

**Untersuchungen zur
Freisetzung
radioaktiver Stoffe aus
Abfallgebinden in Folge
der Einwirkung von
Sprengstoff**

**Untersuchungen zur
Freisetzung
radioaktiver Stoffe aus
Abfallgebinden in Folge
der Einwirkung von
Sprengstoff**

Abschlussbericht

Christian Heckötter
Waldemar Stips
Philipp Terberger

April 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegenden Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4722R01580 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

AUTODYN, Barriere, Freisetzung, LS-DYNA, lungengängig, Metallplatten, numerische Simulation, Seismoplast, Sprengstoff

Kurzfassung

Im Rahmen der Betrachtungen möglicher Risikoszenarien bei möglichen böswilligen Einwirkungen auf radioaktive Stoffe bzw. deren Gebinde wird in diesem Forschungsvorhaben die Freisetzung luftgetragener Partikel infolge der Einwirkung von direkt aufgelegtem Sprengstoff untersucht. Dazu werden neben verschiedenen Versuchsreihen auch numerische Untersuchungen zu den hochdynamischen Prozessen durchgeführt, wobei die Validierung der Massen und Geschwindigkeiten im Vordergrund steht.

Im vorangegangenen Forschungsvorhaben „Experimentelle und numerische Bestimmung der potentiellen Freisetzung in Folge einer Sprengstoffeinwirkung bei der Beförderung von Kernbrennstoffen“ /GRS 16b/ wurden bereits experimentelle Daten zu Sprengversuchen und numerischer Berechnung gewonnen. Allerdings war die Diskrepanz zwischen Simulation und experimentellen Ergebnissen so groß, dass die Verbesserung und Weiterentwicklung des Modells in diesem Forschungsvorhaben im Vordergrund steht. Zum Anknüpfen an die Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens sind weitere Versuchsreihen mit einem abgewandelten Versuchsaufbau durchgeführt worden. Die Erweiterung der durch die experimentellen Versuche gewonnenen Datenbasis ermöglicht zum einen den Abgleich der Ergebnisse aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben und zum anderen eine fundierte Basis zur Validierung der Simulationsergebnisse. Dazu gibt es eine große Variation an Parametern in den experimentellen Versuchsreihen als auch bei der numerischen Berechnung.

Insgesamt zeigt dieser Bericht, dass die Simulationen zu dieser Thematik die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen gut abbilden. Es werden Methoden und Modelle vorgestellt, mit denen in Zukunft Fragestellungen zur Freisetzung luftgetragener Partikel aus Abfallgebinden infolge von Sprengstoffeinwirkung schneller und sicherer beantwortet werden können.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Einleitung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1 Versagensmoden von metallischen Platten	5
2.2 Literaturstudie zur Sprengstoffeinwirkung auf metallische Platten.....	8
2.2.1 Sprengstoffmodellierung	14
2.2.2 Materialmodellierung der Target-Platten	17
2.3 Einwirkung des Abplatzers auf das Inventar	22
2.3.1 Energieeintrag in die Probe	22
2.3.2 Freisetzung luftgängiger Partikel.....	24
3 Versuchsaufbau.....	33
4 Versuchsdurchführung	39
5 Schadensbilder	49
5.1 Metallplatte	50
5.2 Probekörper.....	57
5.3 Qualitativer Vergleich mit Versuchen aus /GRS 16b/	61
6 Quantitative Ergebnisse und Auswertung	67
6.1 Metallplatte	67
6.2 Probekörper.....	73
6.3 Vergleich mit Versuchen aus /GRS 16b/	86
7 Methodenentwicklung und Diskussion.....	89
7.1 Simulation des Barrierefersagens	89
7.1.1 Modellbildung der Plattenversuche für AUTODYN.....	89
7.1.2 Modellbildung der Plattenversuche für LS-DYNA.....	90
7.1.3 Simulation der Druckwellenausbreitung im Target	92
7.1.4 Energiebilanz der Targetstruktur.....	98

7.1.5	Numerische Ergebnisse.....	100
7.1.6	Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen.....	111
7.2	Freisetzung.....	120
8	Einordnung der Messdaten.....	137
9	Zusammenfassung	143
	Literaturverzeichnis.....	147
	Abbildungsverzeichnis.....	153
	Tabellenverzeichnis.....	159
	Abkürzungsverzeichnis.....	161
A	Anhang – Eingabedaten und Auswerteprogramm zur numerischen Berechnung.....	165
A.1	Nutzereigene Subroutine in AUTODYN zur Ermittlung von Massen und Geschwindigkeiten der Abplatzer.....	165
A.2	LS-DYNA Eingabekarten	166

1 Einleitung

Für die Beförderung von Kernbrennstoffen und sonstigen radioaktiven Stoffen ist unter anderem Genehmigungsvoraussetzung, den erforderlichen Schutz gegen Störmassnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) zu gewährleisten. Bei der Bewertung der Relevanz möglicher SEWD auf Beförderungsvorgänge von radioaktiven Stoffen ist unter anderem auch das Szenario einer Einwirkung mit Sprengstoff auf mit zementierten radioaktiven Abfällen gefüllte Gebinde von Interesse.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung der Folgen von SEWD mit Sprengstoff auf mit zementierten radioaktiven Abfällen gefüllte Gebinde, insbesondere hinsichtlich einer möglichen Freisetzung. Im Rahmen von Untersuchungen der GRS /GRS 16b/ wurde ein experimenteller Modellansatz entwickelt, bei dem der Ausschnitt aus einer Gebindewand durch eine Metallplatte repräsentiert wurde und das zementierte Inventar durch einen zylindrischen Beton-Probekörper. Dieser Modellansatz wurde mit einem anderen experimentellen Aufbau auch im aktuellen Forschungsvorhaben genutzt, wobei die Ergebnisse aus /GRS 16b/ validiert und verbessert wurden. Die Versuche wurden so instrumentiert, dass zusätzlich der in /GRS 16b/ nicht gemessene Parameter „Bruchstück-Geschwindigkeit“ erfasst wurde und weitere Messgrößen einen Anschluss an bisherige Versuche ermöglichten. Es wurden Versuche mit einer Variation von Parametern wie z. B. Plattenmaterial (S235JR bzw. GGG40) und Plattendicke (20 mm bzw. 30 mm) durchgeführt und ausgewertet. Mit diesen zusätzlichen experimentellen Grundlagen wurden Analysemodelle erstellt und darauf basierend numerische Simulationen der Barriere und der Beton-Probekörper bei Sprengstoffeinwirkungen durchgeführt. Auf Basis dieser numerischen und experimentellen Ergebnisse wurde der Stand von Wissenschaft und Technik zum Thema Freisetzung von radioaktiven Stoffen weiterentwickelt.

Mit der Durchführung der experimentellen Arbeiten hat die GRS das Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik/Ernst-Mach Institut (EMI) beauftragt. Dies umfasste die Herstellung des Versuchsaufbaus, Fertigung der Metall- und Beton-Proben, die messtechnische Begleitung der Versuche, die Siebung der bei den Versuchen entstandenen Partikel sowie deren Dokumentation. Die Ergebnisse und Erkenntnisse sind in den vorliegenden Abschlussbericht eingeflossen.

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich in acht Kapitel und zwei Anhänge. In Kapitel 2 wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik insbesondere zu der Thematik des Forschungsvorhabens dargelegt.

Kapitel 3 stellt den bei den Experimenten verwendeten Versuchsaufbau dar.

Kapitel 4 gibt einen detaillierten Überblick über die Versuchsdurchführung. Sie beinhaltet auch Erläuterungen zu versuchsspezifischen Randbedingungen wie beispielsweise den verwendeten Targets.

Kapitel 5 befasst sich mit den Schadensbildern der experimentellen Untersuchungen. Die Schadensbilder der in den Experimenten verwendeten Metallplatten, welche die Gebindewand simulieren, und die Schadensbilder der Beton-Probekörper werden hier dargestellt und diskutiert.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse aus den Versuchen sowie aus der Siebung quantitativ ausgewertet. Im Anschluss werden diese Ergebnisse miteinander und mit den Ergebnissen der Sprengstoffversuche aus früheren Forschungsvorhaben verglichen.

Die numerischen Berechnungen zur Wirkung des Sprengstoffes auf die untersuchten Barrieren (Metallplatten aus unterschiedlichen Werkstoffen) sind in Kapitel 7 zusammengefasst. Die Eingabedaten sowie ein Auswerteprogramm zu den numerischen Berechnungen sind als Anhang A beigefügt. Weiterhin enthält Kapitel 7 Ergebnisse zu den berechneten Freisetzunganteilen. Als Ergebnis ergibt sich eine Methode mit der basierend auf numerisch bestimmten Werten für Geschwindigkeit und Masse der von der Metallplatte abgesprengten „Abplatzer“ eine Vorhersage zum freigesetzten Anteil lungenfähiger Partikel gemacht werden kann. Die Methode verwendet die gesammelten Erkenntnisse und experimentellen Ergebnisse, um Aussagen über das Schadensbild und die Freisetzung radioaktiver Stoffe bei Einwirkung mit Sprengstoff auf Gebinde machen zu können. Gleichzeitig werden Unsicherheiten der experimentell wie auch numerisch ermittelten Daten dargestellt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Ergebnisse diskutiert.

In Kapitel 8 werden die Messdaten hinsichtlich der Fehlerbetrachtung eingeordnet und Kapitel 9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die Notwendigkeit einer möglichst genauen Abschätzung einer Freisetzung aus Gebinden mit radioaktiven Stoffen in kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen und bei der Beförderung im Falle von SEWD ergibt sich aus den Schutzzielen und weiteren Festlegungen im Atomgesetz sowie dem untergesetzlichen sicherungstechnischen Regelwerk.

Das genannte Szenario kann in die folgenden wesentlichen Teilprozesse gegliedert werden: die Reaktion der Gebindewand („Barriere“) auf die Detonationswelle der Sprengladung (siehe Abschnitt 2.1), die Zerstörung des Inventars durch die Einwirkung von Gebindebruchstücken (siehe Abschnitt 2.3) und die Freisetzung der durch die Einwirkung zerstörten Bestandteile des Inventars aus dem Gebinde in die Umgebung, wobei Letzteres nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist. Abgesehen von der Geometrie und der Dynamik der Anfangsverteilung des freigesetzten Materials in der Umgebung des Gebindes sind die weiteren Schritte einer Berechnung der luftgetragenen Ausbreitung der Freisetzung und der durch eine Inhalation und äußere Exposition hervorgerufenen Dosis unabhängig von der Art der Einwirkung.

Frei verfügbare empirische Ansätze sowie numerische Untersuchungen zur Frage, bei welchen aufgelegten Sprengstoffmassen Barrieren versagen bzw. einen ausreichenden Schutz bieten, beschränken sich überwiegend auf bauliche Strukturen (z. B. /DOD 08/, /EBP 82/, /GRE 04/, /GRS 16c/), während für metallische Strukturen nur wenige veröffentlichte Quellen bekannt sind (z. B. /HEY 23/, /HOF 15/, /LON 13/). Bei Kenntnis des Ausmaßes eines flächigen Versagens einer Gebindewand lässt sich die Beschleunigung des Barrierematerials als Grundlage für eine folgende Abschätzung des möglichen Schadens im Inneren des Gebindes konservativ über einen Ansatz von Gurney /ZUK 98/ abschätzen. Um die Schadenswirkung auf das Gebinde und das Inventar genauer und auch für komplexere Geometrien und Materialfolgen berechnen zu können, haben sich auf Grund der heute verfügbaren Rechenleistungen dreidimensionale Rechencodes basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) und der netzfreien Teilchen-Hydrodynamik (Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH) etabliert (z. B. /GRE 04/, /GRS 16c/).

Anhand der Analyse von ausgewählten Sprengversuchen mit den Rechenprogrammen AUTODYN /ANS 22/ und LS-DYNA /LST 21/ konnte in /GRS 16c/ gezeigt werden, dass die Prognosen empirischer Grenzkurven teilweise nicht konservativ sind. Simulationen der Auswirkungen von Sprengladungen, die auf Stahlbetonstrukturen aufgelegt werden

bzw. einen geringen Ladungsabstand haben, erfordern demnach eine explizite Darstellung mittels Euler-Lagrange-Kopplung mit vergleichsweise hoher Feinheit des Euler-Netzes.

Die Freisetzung des für die Inhalationsdosis bestimmenden Anteils lungengängigen Materials kann unter Vernachlässigung der abmildernden Barrierewirkung konservativ auf Basis eines empirischen Ansatzes nach /DOE 94/ abgeschätzt werden. Sofern die tatsächlich auf sprödbrechendes oder unfixiertes Material einwirkende Energie bekannt ist, erlauben empirische Ansätze aus /MAE 99/ und /GRS 07/ eine genauere Abschätzung der lungengängigen Freisetzung. Für sprödbrechendes Material sind zudem typische Größenverteilungen von mechanisch zerstörtem Material bekannt /MAE 99/ und /GRS 07/, sodass sich berechnete oder gemessene lungengängige Freisetzungsmassen auf andere Größenklassen übertragen lassen.

Die in /GRS 07/ zitierten Versuche beschränken sich auf dünnwandige Abfallgebinde und andere Versagensprozesse der Gebindehülle, die zwar auf eine weiterhin vorhandene Rückhaltewirkung beschädigter Gebinde hinweisen, jedoch nicht auf das Szenario einer Sprengstoffeinwirkung übertragbar sind.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 3613R01605 /GRS 16b/ wurden Simulationen mit AUTODYN durchgeführt, um die Sprengstoffeinwirkung auf Stahlplatten und einen dahinter befindlichen Probekörper zu simulieren und diese Berechnungen anhand von Versuchsergebnissen zu validieren. Die Stahlplatten und ein zylindrischer Beton-Probekörper repräsentierten dabei in einer gegenüber der Realität reduzierten Skala die Wand eines Gebindes respektive das dahinterliegende Inventar. Abb. 2.1 zeigt eine solche Stahlplatte nach der Sprengung. In der Versuchsreihe wurden die Ladungsmasse und die Abstände zwischen Platte und Inventar variiert. Erfasst wurden u. a. das Schadensbild und die Korngrößenverteilung der Partikel des zerstörten Inventars. Aus diesen Daten konnte in Verbindung mit geometrischen Skalierungsgesetzen der Sprengstoffwirkung (/DOD 08/, /ZUK 98/) abhängig von der Masse der Sprengladung die Grenze zum Versagen von Stahlplatten bei vergleichbarer Ladungsgeometrie vereinfacht abgeschätzt werden.



Abb. 2.1 Schadensbild der Stahlplatte aus Forschungsvorhaben 3613R01605 /GRS 16b/ nach der Sprengung mit danebenliegendem Abplatzer

Die Geschwindigkeit der auf das Inventar aufprallenden Bruchstücke der Gebindewand wurde nicht experimentell erfasst, sondern bisher ohne Validierung der Methodik an entsprechenden Experimenten aus den AUTODYN-Berechnungen abgeleitet. Unter Verwendung der energieabhängigen Ansätze zur Abschätzung von lungengängigen Freisetzungssanteilen aus /GRS 07/ wurde so versucht, die gemessenen Freisetzungsdaten zu reproduzieren.

2.1 Versagensmoden von metallischen Platten

Einen Überblick über mögliche Versagensmoden von metallischen Platten infolge von Sprengstoffeinwirkung gibt /JAC 07/. Hierbei wurde zwischen gleichmäßigen und lokalen Belastungen der Platte unterschieden. In Tab. 2.1 sind die Beschreibungen der verschiedenen Versagensmoden bei lokaler Belastung aufgeführt.

Tab. 2.1 Überblick über Versagensmoden von metallischen Platten bei lokaler Belastung nach /JAC 07/

Bezeichnung	Beschreibung
Mode I	Große inelastische Deformation
Mode Ib	Große inelastische Deformation mit Einschnürung am Auflager
Mode Itc	Große inelastische Deformation mit Plattendickenreduktion
Mode II*c	Teilabrisse im Plattenzentrum
Mode II	Zugversagen am Auflager
Mode IIc	Vollständiges Aufreißen im Plattenzentrum
Petalling	Aufreißen im Zentrum mit blütenblättrigen Falten

Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Kontaktdetonationen ist von lokaler Belastung auszugehen, wobei die Plattendicken im Vergleich zu den der Nomenklatur von /JAC 07/ zugrundeliegenden Versuchen vergleichsweise groß sind. In solchen Fällen ist nach /RIN 51/, /SKI 65/ und /MEY 83/ Spallationsversagen möglich. Bei diesem kommt es zu Materialversagen infolge der Überlagerung von zwei Dekompressionswellen (vgl. Abb. 2.2). Infolge von Spallation kann es zum Ablösen von Abplatten kommen. Weiterhin ist multiple Spallation infolge von Reflexionen an neu gebildeten Grenzflächen möglich /RIN 52/. Ein Beispiel für einen von multipler Spallation betroffenen Querschnitt einer Stahlplatte zeigt Abb. 2.3.

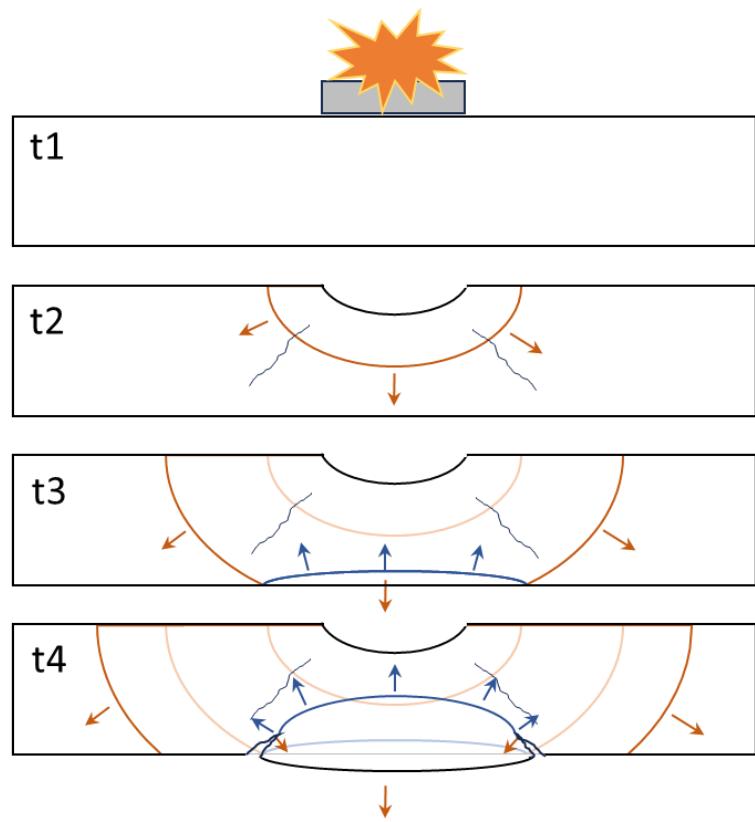


Abb. 2.2 Prinzipgrafik der Druckwellenausbreitung nach /ZUK 04/ bei Kontaktdetonation auf einer Platte

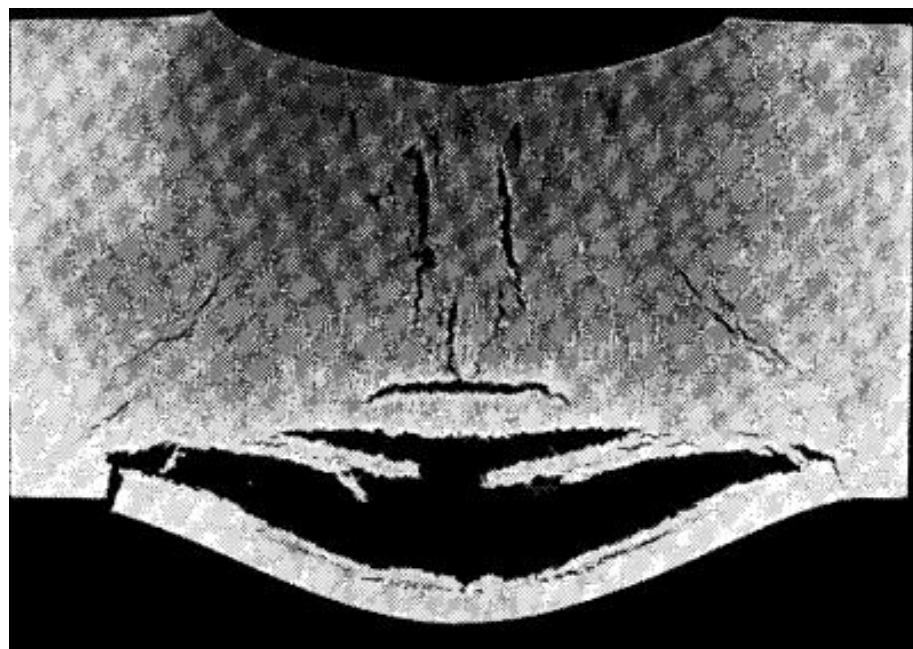


Abb. 2.3 Beispiel für Spallationsversagen einschließlich multipler Spallation in Stahl infolge einer Kontaktdetonation /RIN 52/

Im Rahmen dieses Abschlussberichtes wurde daher eine vereinfachte Nomenklatur möglicher Versagensmoden gewählt:

- Mode I: Verformung der Platte ohne Abplatzung
- Mode II: Verformung der Platte mit Ablösung einer abplatzenden Masse ohne Bildung einer Öffnung
- Mode III: Öffnung der Platte, entweder durch Auswurf eines Bruchstücks oder durch wanddurchdringende Risse

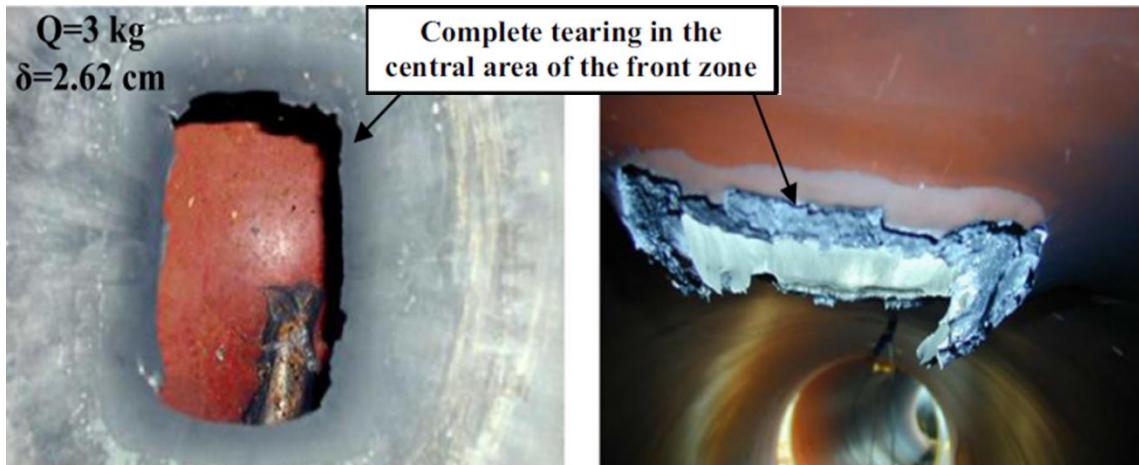
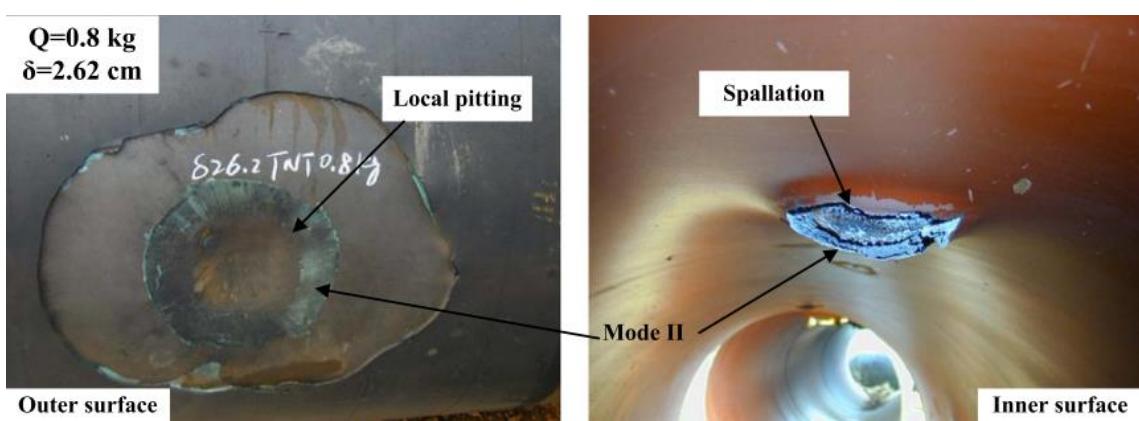
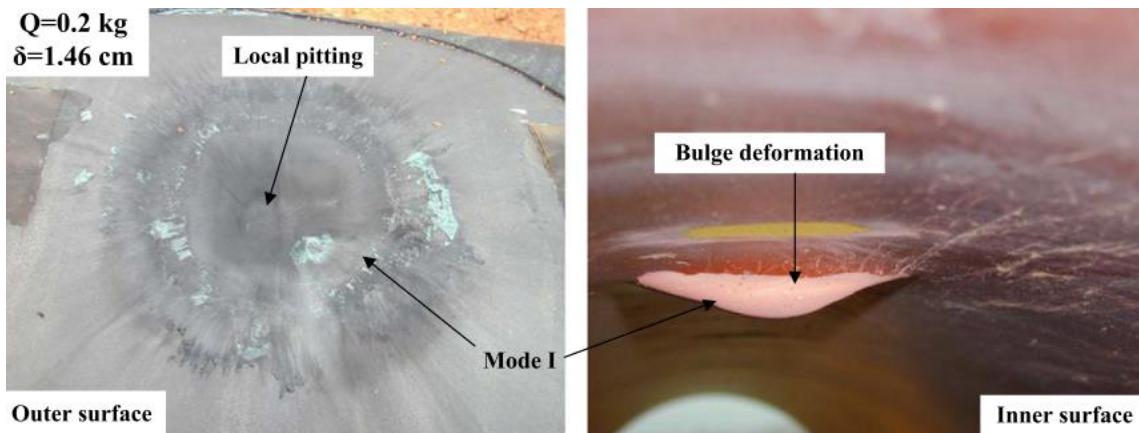
2.2 Literaturstudie zur Sprengstoffeinwirkung auf metallische Platten

In der Versuchsreihe von Song et al. /SON 16/ werden Pipeline-Strukturen unter Kontaktdetonationslasten mit quaderförmigen Trinitrotoluol (TNT)-Ladungen untersucht. Die Zündung der Ladung erfolgt jeweils mittig auf der oberen Fläche der Ladung. Die Stahlgüte wird mit X70 bezeichnet, für den die mechanischen Kennwerte wie Streckgrenze mit 575 MPa, Zugfestigkeit mit 687 MPa und maximale Dehnung mit 42 % aufgeführt sind.

Tab. 2.2 Ausgewählte Parameter und Ergebnisse von Versuchen nach /SON 16/

Nr.	Wanddicke / [mm]	Ladungsmasse / [kg]	Ladungsabmessung / [cm]	Kratertiefe bzw. Lochabmessungen / [cm]	Versagensmode
1	14,6	0,2	10 x 5 x 2,5	2,3	I
2	26,2	0,4	10 x 10 x 2,5	3,5	I
3	26,2	0,8	10 x 10 x 5,0	5,3	II
4	26,2	1,4	10 x 10 x 8,7	5,9	II
5	14,6	3	20 x 15 x 6,2	23 x 28	III
6	26,2	3	20 x 15 x 6,2	23 x 16	III
7	14,6	5	20 x 20 x 7,8	32 x 28	III
8	2,62	5	25 x 20 x 6,2	29 x 21	III
9	2,62	10	25 x 20 x 12,4	29 x 21	III

Das Versuchsprogramm wird von den Autoren durch numerische Simulationen begleitet, wobei mit LS-DYNA Geschwindigkeiten von Fragmenten berechnet werden. Für Versuch Nr. 6 wird eine stabile Fragmentgeschwindigkeit von ca. 400 m/s angegeben. Exemplarisch zeigen Abb. 2.4 bis Abb. 2.6 Schadensbilder zu den verschiedenen auftretenden Versagensmoden.



Eine von Fernando et al. /FER 19/ durchgeföhrte Versuchsreihe befasst sich mit der Anspregung von metallischen Kompositplatten. In diesem Rahmen sind auch zwei Versuche mit Stahlplatten (A36) und einer in einem geringen Abstand platzierten zylindrischen

Sprengstoffladung (Composition B) durchgeführt worden. Die wesentlichen Versuchsparameter sind in Tab. 2.3 aufgeführt. Der Ladungsabstand bezeichnet hierbei den Abstand zwischen dem Massenschwerpunkt der Ladung und der Zielstruktur. Die Kompositplatten sind durch Sprengschweißung der einzelnen Schichten gefertigt worden. Die Lateralabmessungen weisen Werte zwischen 350 mm und 450 mm auf. Die Schadensbilder in den Versuchen M1-S30 und M2-S54 sind in Abb. 2.7 dargestellt. Auf der Frontseite der Platte entsprechen die Kraterdurchmesser etwa dem Ladungsdurchmesser. Der Durchmesser der rückseitigen Abplatzer nimmt mit größerem Ladungsabstand ab. In Versuch C1-STA-54 ändert sich das Schadensbild im Vergleich zu Versuch M2-S54 dahingehend, dass es zu einem teilweisen Ablösen eines Abplatzers in der Aluminiumschicht kommt (Mode II*). Der Unterschied wird im Wesentlichen der im Vergleich zu Stahl höheren Duktilität und geringeren Zugfestigkeit des verwendeten Aluminiums zugeordnet. Es kommt zu lokaler Durchbiegung der Aluminiumschicht, obwohl durch die Impedanzsprünge infolge der Schichtungen die absoluten Spannungen im Vergleich zur monolithischen Platte geringer sind. In Versuch C2-STA-78 sind hingegen keinerlei Schäden erkennbar.

Tab. 2.3 Versuchspараметер zu Sprengversuchen aus /FER 19/ (jeweils mit zylindrischer Ladung, ca. 250 g Composition B, $D_{Sp}=H_{Sp}=30$ mm)

Bezeichnung	Ladungsabstand / [mm]	Materialfolge	Plattendicke / [mm]	Schadens-mode
M1-S30	30	Stahl	25,4	II
M2-S54	54	Stahl	24,7	II
C1-STA-54	54	Stahl/Titan/Alu.	24,9	II
C2-STA-78	78	Stahl/Titan/Alu.	25,2	I

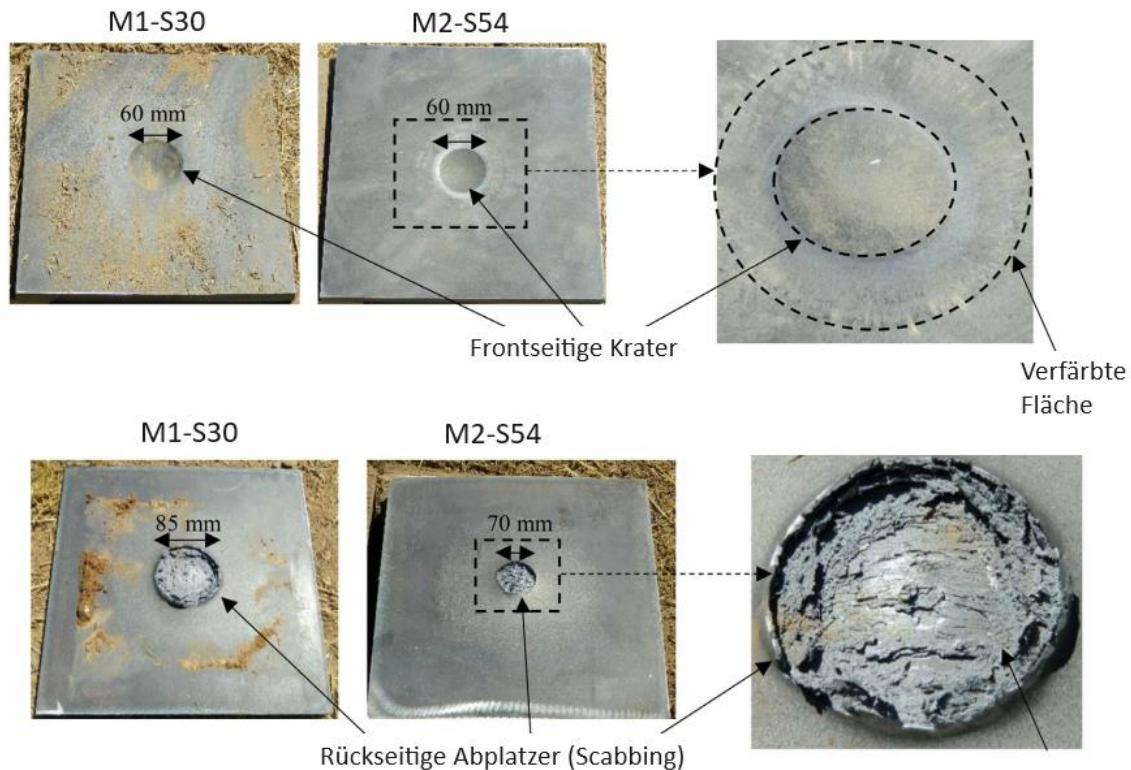


Abb. 2.7 Schadensbilder der Stahlplatten in Versuchen aus /FER 19/

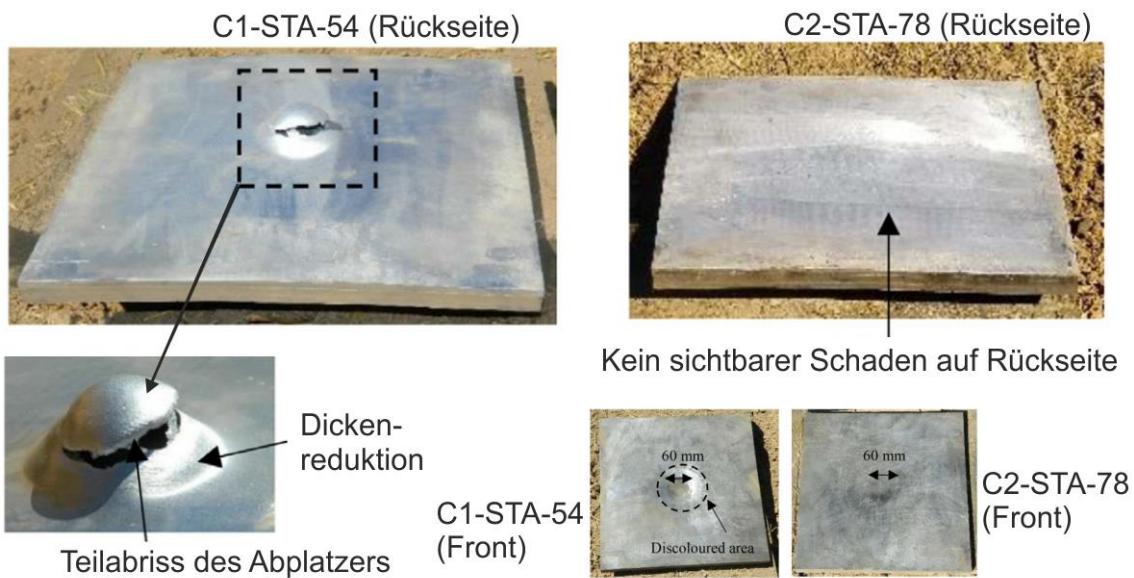


Abb. 2.8 Schadensbilder der Stahlplatten in Versuchen C1-STA-54 und C2-STA-78 aus /FER 19/

Versuche mit 17 mm dicken Stahlplatten unter Belastung durch Kontaktdetonationen sind von He et al. /HEY 23/ durchgeführt. Der verwendete Stahl mit der Bezeichnung X80 kommt bei der Fertigung von Pipelines zum Einsatz und weist eine Streckgrenze

$R_{p0,2}$ von 544 MPa und eine Zugfestigkeit R_m von 651,5 MPa auf. Die Belastung erfolgt durch Kontaktdetonation zylindrischer TNT-Ladungen. Infolge des Ausschneidens der Platten aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 1219 mm weisen die Stahlplatten eine leichte Krümmung auf. Wesentliche Versuchspараметer und Ergebnisse sind in Tab. 2.4 aufgeführt.

Tab. 2.4 Versuchspараметer und Ergebnisse von Sprengversuchen aus /HEY 23/

Nr. .	La- dungs- masse / [g]	Ladungs- durchmes- ser D_{Sp} / [mm]	Ladungs- höhe H_{Sp} / [mm]	Versa- gens- mode	Krater- durchmes- ser / [mm]	Abplatzer- durchmesser / [mm]
1	20	30	17,3	I	31	-
2	50	30	43,2	II	34	29
3	100	40	48,5	III	42	45

Die Schadensbilder der Plattenquerschnitte sind in Abb. 2.9 gegenübergestellt, wobei der Einfluss der Ladungsmasse auf die Versagensmode deutlich wird. Bei Einwirkung mit einer Ladung von 20 g bildet sich infolge von Spallationsversagen ein weiter Riss sowie ein weniger weiter Riss darunter. Allerdings kommt es, anders als bei einer Einwirkung mit 50 g TNT, nicht zu einer Ablösung der Auswölbung, d. h. diese Versuche sind der Versagensmode I bzw. II zuzuordnen. Bei Einwirkung von 100 g TNT erhöht sich der Durchmesser der abplatzenden Masse. Im Einwirkungsbereich tritt ein hemisphärischer Defekt auf, welcher in eine Punktierung von ca. 3 mm Durchmesser mündet. Aufgrund dieser Öffnung ist dieser Versuch der Versagensmode III zuzuordnen.



Abb. 2.9 Schadensbilder der Stahlplattenquerschnitte in Versuchen aus /HEY 23/

In einer Versuchsreihe von Zhou et al. /ZHO 24/ ist der Effekt des Ladungsabstandes auf das Schadensbild von 20 mm dicken Stahlplatten mit der Bezeichnung Q345 untersucht worden. Dieser weist eine Fließgrenze von ca. 445 MPa, eine Zugfestigkeit von 450 MPa und eine Bruchdehnung von 18 % auf. Es wurden jeweils zylindrische RDX-Ladungen (95 % RDX und 5 % Wachs, Dichte 1,673 g/cm³) mit einem Durchmesser von 54 mm und einer Höhe von 52 cm verwendet. Dies entspricht einer Ladungsmasse von 200 g. Die Abstände von der Basisfläche der Ladung zur Stahlplatte betragen in den vier

Versuchen 20 mm, 30 mm, 60 mm und 100 mm. Der Einfluss durch Erhöhung des Abstandes von 20 mm (Test 1) auf 30 mm (Test 2) auf das Schadensbild wird anhand von Abb. 2.10 erkennbar.

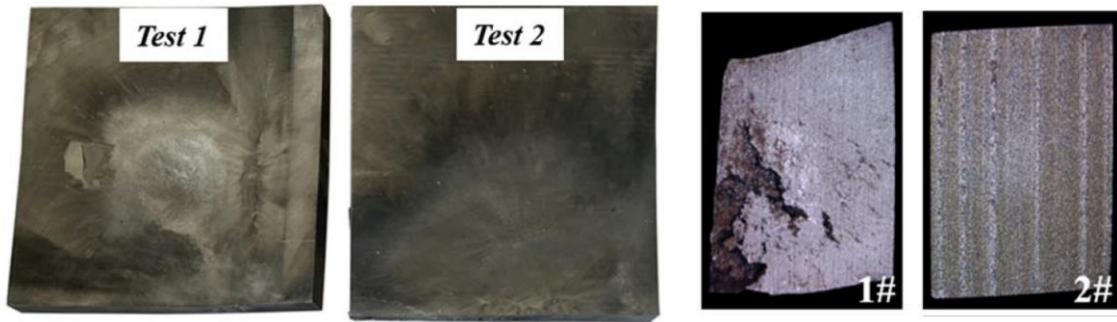


Abb. 2.10 Schadensbilder in Versuchen aus /ZHO 24/ auf Plattenfrontseite und im Plattenquerschnitt für Ladungsabstände von 20 mm (Test 1) und 30 mm (Test 2)

Yan et al. /YAN 23/ untersuchten aus der Titanlegierung Ti632 gefertigte Platten unter Detonationslasten. Die Plattendicke beträgt 10,5 mm. Es werden zylindrische TNT-Ladungen verwendet, wobei eine Variation der Ladungsmasse erfolgte. Der Abstand zwischen Basisfläche der Ladung und Zielstruktur beträgt 40 mm. Wesentliche Versuchsparameter sind in Tab. 2.5 aufgeführt. Die Schadensbilder werden in Abb. 2.11 gegenübergestellt. Bei einer Ladungsmasse von 100 g treten keine offensichtlichen Schäden auf. Ab einer Ladungsmasse von 200 g kommt es zur Ausbildung von plattendurchdringenden Rissen. Bei einer Ladungsmasse von 500 g kommt es zu einem vollständigen Aufreißen im Plattenzentrum.

Tab. 2.5 Versuchsparameter der Versuchsreihe von Yan et al. /YAN 23/

Nr.	Ladungs-masse / [g]	Ladungsdurchmesser D_{Sp} / [mm]	Ladungs-höhe H_{Sp} / [mm]	Versagens-mode
1	100	30	22	I
2	200	30	44	III
3	300	30	66	III
4	400	30	88	III
5	500	30	111	III

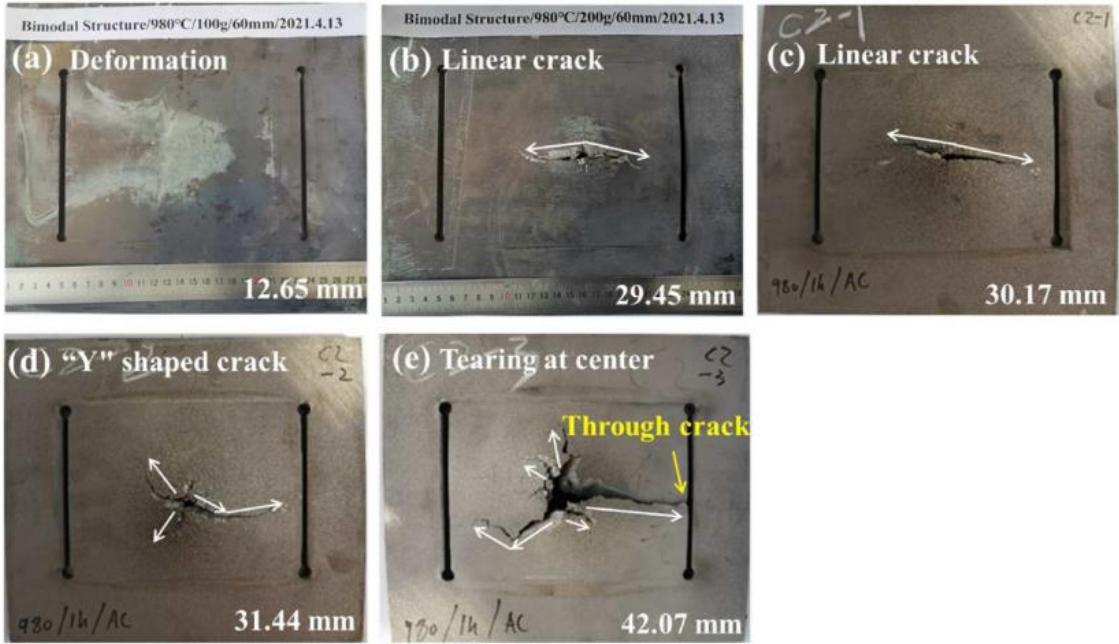


Abb. 2.11 Schadensbilder der Plattenrückseiten in Versuchen aus /YAN 23/

2.2.1 Sprengstoffmodellierung

Gemäß der Jones-Wilkins-Lee-Zustandsgleichung (JWL-EOS) berechnet sich der Druck p der Detonationsprodukte nach Gleichung 2.1:

$$p = A_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \theta}{R_1}\right) \cdot e^{-R_1/\theta} + B_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \theta}{R_2}\right) \cdot e^{-R_2/\theta} + \omega \cdot \rho \cdot e_i \quad (2.1)$$

p	Druck
A_1	Konstante
ω	Konstante
θ	Dichteverhältnis $\theta = \rho / \rho_0$
R_1	Konstante
B_1	Konstante
R_2	Konstante
ρ	Dichte des reagierten Materials
ρ_0	Referenzdichte des nicht reagierten Materials
e_i	spezifische innere Energie

Die JWL-Modellparameter für gängige Sprengstoffe sind in /DOB 85/ aufgeführt. Für den in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Sprengstoff mit der Typbezeichnung Seis-

moplast und einer Dichte von $1,588 \text{ g/cm}^3$ wird ein Parametersatz aus /PLO 02/ verwendet. Die Eingabeparameter sind im Vergleich zu denen von Pentaerythrityltetranitrat (PETN) (Dichte $1,5 \text{ g/cm}^3$) in Tab. 2.6 aufgeführt. D_{CJ} ist die Detonationsgeschwindigkeit und P_{CJ} der Chapman-Jouguet Druck.

Tab. 2.6 Eingabeparameter der JWL-EOS zu verschiedenen Sprengstoffen

Spreng-stoff	$A_1 / [\text{kPa}]$	$B_1 / [\text{kPa}]$	$R_1 / [-]$	$R_2 / [-]$	$\omega / [-]$	$D_{CJ} / [\text{m/s}]$	$e_f = E_{CJ} / [\text{kJ/m}^3]$	$P_{CJ} / [\text{kPa}]$
Seismo-plast	6,206E8	2,327E7	5,399	1,651	0,282	7200	7,0E6	2,05E7
PETN 1.50	6,253E8	2,329E7	5,25	1,6	0,28	7450	8,56E6	2,2E7

Die Summen sowie die Anteile der einzelnen Summanden aus Gleichung 2.1 am gesamten Druck sind für die Parametersätze Seismoplast /PLO 02/ und PETN 1.50 /DOB 85/ in Abhängigkeit des relativen Volumens in Abb. 2.12 aufgetragen. Grundsätzlich sind die Verläufe sehr ähnlich. Im Hinblick auf einen Vergleich der Energiebilanzen sind Unterschiede hinsichtlich der massenbezogenen Energiedichte ($4,41 \text{ MJ/kg}$ für Seismoplast bzw. $5,71 \text{ MJ/kg}$ für PETN 1.50) zu beachten. Eine Vergleichsstudie zeigte, dass der Parametersatz für PETN 1.50 bessere Ergebnisse lieferte als die von Seismoplast, sodass in den Referenzrechnungen mit LS-DYNA der Parametersatz PETN 1.50 verwendet wurde.

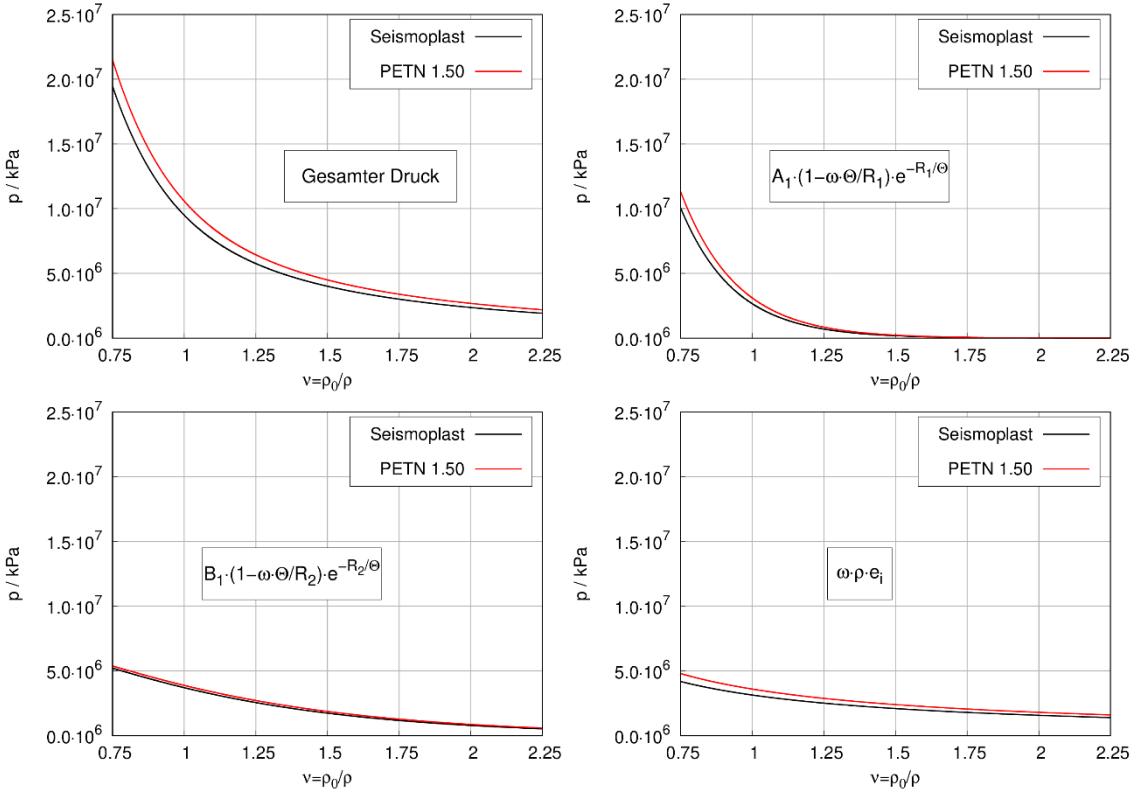


Abb. 2.12 Verhalten der JWL-Parameter für Seismoplast und PETN 1.50

Der Modellierung von Luft kommt für Belastungen durch aufgelegte Ladungen eine untergeordnete Bedeutung zu. In den Simulationen mit AUTODYN erfolgte eine Diskretisierung von Sprengstoff und Zielstruktur durch SPH (vgl. Abb. 7.1), wobei Luft vernachlässigt worden ist. In den Simulationen mit LS-DYNA wird Luft als ideales Gas über die Zustandsgleichung *EOS_Linear_Polynomial abgebildet, welche sich auf die Form von Gleichung (2.2) umstellen lässt. Mit $e_i = 253312,5 \text{ J/m}^3$, $\gamma = 0,4$ und $\rho = \rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ wird ein Anfangsdruck von 101,325 kPa initialisiert:

$$p = (\gamma - 1) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot e_i \quad (2.2)$$

p	Druck
γ	Adiabatenindex
ρ	Dichte
ρ_0	Referenzdichte
e_i	Innere Energie pro Einheitsvolumen

2.2.2 Materialmodellierung der Target-Platten

Das Verhalten der Targetplatten bei hydrostatischer Kompression wurde durch lineare Zustandsgleichungen gemäß Gleichung (2.3) mit dem Bulkmodulus K abgebildet. Vergleichsrechnungen mit der Mie-Grüneisen-EOS zeigten keinen nennenswerten Einfluss auf das Schadensbild der Platten, sodass der einfache Ansatz gemäß Gleichung (2.3) ausreichend erscheint:

$$p = -K \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.3)$$

K Bulkmodulus

Verwendete Dichten und elastische Konstanten der bei den Versuchen verwendeten Werkstoffe der Targetplatten sind in Tab. 2.7 aufgeführt, wobei jeweils Standardwerte verwendet wurden.

Tab. 2.7 Dichten und elastische Konstanten der Materialien der Zielstrukturen

Größe	Formelzeichen	Einheit	S355	S235	GGG40
Dichte	ρ_0	g/cm ³	7,85	7,85	7,2
E-Modul	E	GPa	210	210	165
Bulkmodulus	K	GPa	175	175	122,2
Poissonzahl	ν	-	0,3	0,3	0,275
Schubmodul	G	GPa	80,77	80,77	64,7

Zur Beschreibung von Festigkeit wird für die Targetplatten in den Rechnungen mit LS-DYNA und AUTODYN das Johnson-Cook-Modell /JOH 83/ verwendet. Hierin berechnet sich die Fließgrenze σ_y gemäß Gleichung 2.4, welche einen quasistatischen, einen dynamischen und einen thermischen Faktor aufweist:

$$\sigma_y = (L_1 + L_2 \varepsilon_{pl}^{L_3}) \cdot (1 + L_4 \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^*{}^{L_5}) \quad (2.4)$$

σ_y Fließgrenze

L_1 Spannung bei einsetzender Plastifizierung

L_2 Verfestigungsparameter

L_3	Exponent Verfestigungsmodell
$\dot{\varepsilon}^*$	Normierte plastische Dehnrate $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_{pl}/\dot{\varepsilon}_0$
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	Dehnrate der plastischen Dehnung
$\dot{\varepsilon}_0$	Referenzdehnrate
$T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$	Homologe Temperatur
T	vorliegende Temperatur
T_r	Raumtemperatur
L_4	Parameter zur Beschreibung der Dehnrateabhängigkeit der Fließspannung
L_5	Exponent zur Beschreibung des thermischen Anteils
ε_{pl}	Effektive plastische Dehnung
T_m	Schmelztemperatur

Die für das Festigkeitsmodell verwendeten Modellparameter für die einzelnen in diesem Forschungsvorhaben relevanten Werkstoffe sind in Tab. 2.8 aufgeführt. Da für GGG40 (EN-GJS-400-15) zunächst keine Daten zur Verfügung standen, wurden Eingabeparameter für GGG40.3 (EN-GJS-400-18-LT) aus /HÄC 11/ verwendet. In der Folge wurde auch ein neuerer Parametersatz aus /ÖZC 24/ für den Werkstoff EN-GJS-400 ohne Angabe der Bruchdehnung verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Gusseisen mit Kugelgraphit, dessen Zugfestigkeit etwa 400 MPa beträgt.

Tab. 2.8 Verwendete Parameter des Festigkeitsmodells

Mate- rial	L_1 / [MPa]	L_2 / [MPa]	L_3	L_4	$\dot{\varepsilon}_0$ / [s ⁻¹]	L_5	T_m / [K]	Referenz
S355	448	782	0,562	0,0247	1e-5	1	1793	/CAD 18/
S235	310,9	213	0,088	0,022	1e-5	1	1793	/GRS 16a/
GGG40	211,7	568,1	0,351	0,02	1e-5	0,85	1250	/HÄC 11/
GGG40	310	728	0,5545	0,0241	1e-5	0,936	1250	/ÖZC 24/

Es ist zu beachten, dass die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von GGG40 im Druck- und Zugbereich voneinander abweichen. Die angegebenen Parameter beziehen sich auf den Zugbereich. Die Modellkurven für die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen werden in Abb. 2.13 verglichen.

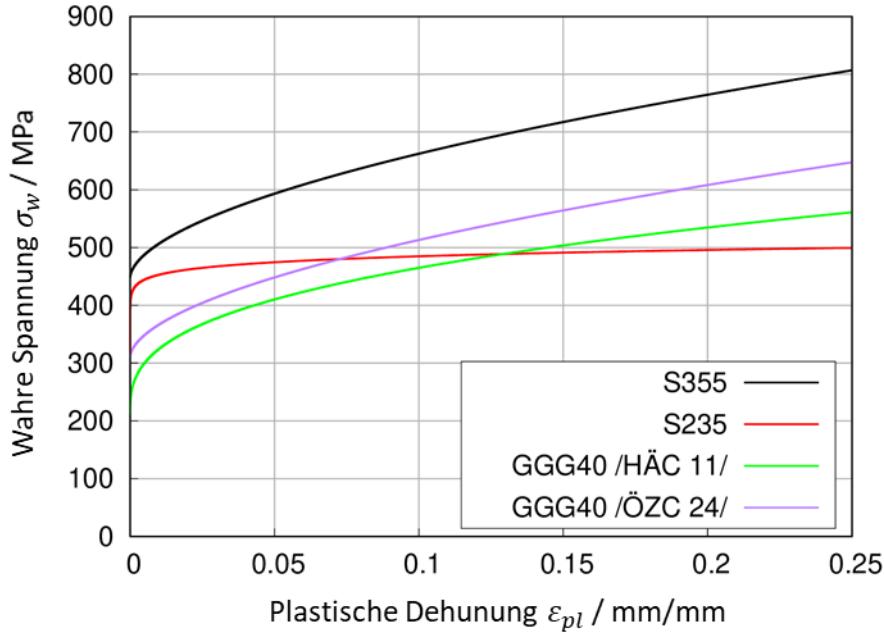


Abb. 2.13 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nach dem Johnson-Cook-Modell

Die Bruchdehnung des Materials wird im Johnson-Cook-Modell gemäß Gleichung 2.5 berechnet. Das Modell weist jeweils für den statischen, dynamischen und thermischen Anteil einen Faktor auf. Das Johnson-Cook-Versagensmodell wurde lediglich in den Rechnungen mit LS-DYNA verwendet, da hier eine Kombination mit einem Modell für Spallationsversagen möglich ist. Im Gegensatz hierzu wird in den Rechnungen mit AUTODYN ausschließlich ein p_{min} -Kriterium verwendet (vgl. Erläuterungen unten):

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \cdot e^{(D_3 \cdot \sigma^*)}) \cdot (1 + D_3 \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 + D_5 \cdot T^*) \quad (2.5)$$

ε_f	Bruchdehnung
D_1-D_5	Modellparameter
σ^*	Spannungsmehrachsigkeit gemäß Gl. 2.6
$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_{pl}/\dot{\varepsilon}_0$	Normierte Dehnrate

Die Bruchdehnung hängt von der Spannungsmehrachsigkeit ab, welche sich gemäß Gleichung 2.6 aus dem Verhältnis von hydrostatischem Druck und von Mises-Vergleichsspannung berechnet. Negative Werte der Spannungsmehrachsigkeit treten bei Druckbelastungen auf, welche zu einer Erhöhung der Bruchdehnung beitragen. Im Kontaktbereich zwischen Sprengstoffladung und Platte treten hohe Drücke auf, sodass dieser

Effekt nicht vernachlässigt werden kann. In Bereichen mit Rissen infolge von Spallationsversagen können höhere Spannungsmehrachsigkeiten unter Zugbelastung auftreten. Somit erscheint zur Simulation von Abplatzern die Berücksichtigung der Spannungsmehrachsigkeit für eine realistische Simulation erforderlich:

$$\sigma^* = -\frac{p_{hyd}}{\sigma_{eff}} \quad (2.6)$$

p_{hyd}	hydrostatischer Druck
σ^*	Spannungsmehrachsigkeit
σ_{eff}	Von-Mises-Vergleichsspannung

Materialversagen wird unterstellt, sobald der gemäß Gleichung 2.7 berechnete Schadensparameter D den Wert 1 erreicht. Mit dem Erreichen des Bruchkriteriums nimmt das Material keine Zugspannungen mehr auf:

$$D = \sum_{\Delta} \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_f} \quad (2.7)$$

D	Schadensparameter
ε_{pl}	plastische Dehnung
ε_f	Bruchdehnung gemäß Gleichung (2.5)

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens relevanten Werkstoffe sind die verwendeten Parameter des Schädigungsmodells in Tab. 2.9 aufgeführt. Die Parameter für S235JR wurden anhand der Simulation zur Perforation von Stahlplatten durch Explosively Formed Projectiles (EFP) /GRS 16a/ abgeleitet. Da für GGG40 (EN-GJS-400-15) zunächst keine Daten zur Verfügung standen, wurden Eingabeparameter für GGG40.3 (EN-GJS-400-18-LT) aus /HÄC 11/ verwendet. In der Folge wurde auch ein neuerer Parametersatz aus /ÖZC 24/ für den Werkstoff mit der Bezeichnung EN-GJS-400 ohne Angabe der Bruchdehnung verwendet.

Tab. 2.9 Verwendete Parameter des Johnson-Cook-Schädigungsmodells

Material	D1	D2	D3	D4	D5	Referenz
S355	0,15	2	-2,5	0	0	/CAD 18/
S235	0,19596	0,1845	-3,189	0	0	/GRS 16a/
GGG40	0,01	0,45	-2,5	0	0	/HÄC 11/
GGG40	0,0498	1,57752	-8,5926	0,1451	0,4141	/ÖZC 24/

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens relevanten Werkstoffe sind die verwendeten Parametersätze des Schädigungsmodells in Abb. 2.14 gegenübergestellt. Es zeigen sich jeweils deutliche Unterschiede zwischen den Parametersätzen für S355 und S235 sowie den beiden Parametersätzen für GGG40. Insbesondere im Schubbereich bei einer Spannungsmehrachsigkeit von Null weichen die Modellkurven stark voneinander ab.

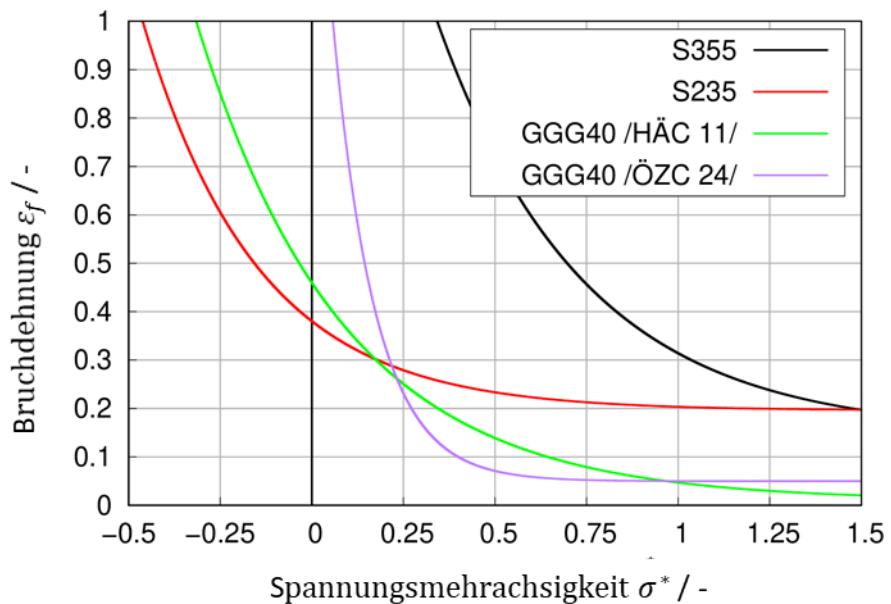


Abb. 2.14 Vergleich der Bruchdehnungen im Johnson-Cook-Schädigungsmodell

Die Simulation von Spallationsversagen kann durch ein Kriterium zur Begrenzung von hydrostatischen Zugspannungen (p_{min} -Kriterium) erfolgen. Sofern der hydrostatische Druck einen Wert p_{min} unterschreitet, setzt Materialversagen ein, d. h. der Druck für das entsprechende Element wird gleich Null gesetzt. In Rechnungen mit AUTODYN wird ausschließlich das p_{min} -Kriterium verwendet. Dahingegen lässt sich in Rechnungen mit LS-DYNA ein p_{min} -Kriterium mit dem Versagensmodell von Johnson-Cook kombinieren.

Für die Wahl des p_{min} -Kriteriums stehen keine geeigneten Daten aus Versuchen zur Materialcharakterisierung zur Verfügung. Die in der Literatur verfügbaren Angaben umfassen z. B. Werte von -0,9 GPa bis -1,5 GPa für American Iron and Steel Institute (AISI) 1020 Stahl (Fließgrenze ca. 295 MPa) und -3 GPa für AISI 4130 Stahl (435 MPa) /RIN 51/. Für die Versuche mit S235-Stahlplatten wird in den Referenzrechnungen ein Wert von $p_{min}=-1,625$ GPa gewählt, da damit sowohl mit LS-DYNA als auch mit AUTO-DYN die Versagensmoden für Ladungen von 50 g und 200 g korrekt reproduziert werden können. Für den in den Vorversuchen verwendeten S355-Stahl wird aufgrund der höheren Fließgrenze ein Wert von $p_{min}=-1,87$ GPa verwendet. In /PLU 13/ wird für die Spallationsfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit ein Bereich zwischen -0,94 GPa und -1,2 GPa angegeben. Die Referenzrechnungen wurden mit $p_{min}=-0,94$ GPa durchgeführt.

2.3 Einwirkung des Abplatzers auf das Inventar

2.3.1 Energieeintrag in die Probe

Die Freisetzung feiner lungengängiger Partikel durch kurzzeitige Einwirkung mechanischer Kräfte auf sprödbrechende Probekörper, wie beispielsweise Betonproben, ist in der Vergangenheit durch verschiedenste Versuche untersucht worden. Dabei gibt es verschiedene Ansätze, die Einwirkung mechanischer Kräfte auf den Probekörper umzusetzen. Einerseits besteht die Möglichkeit, die Probekörper zu beschleunigen und auf einen unnachgiebigen Körper prallen zu lassen, sodass der Probekörper durch den Aufprall zerstört wird und die feinen Stäube frei werden. Dabei kann die Beschleunigung des Probekörpers je nach Masse entweder durch Gaskanonen wie in den Versuchen von /MAE 99/, /LAN 03/ oder durch Fallversuche wie bei /LAN 03/, /GRS 07/ umgesetzt werden. Die Schwere des Aufpralls wird dabei als spezifischer Energieeintrag W_m in einen Probekörper der Masse m_P ausgedrückt, definiert als die vom Probekörper aufgenommene mechanische Energie, normiert auf ihre Masse. Beim Aufprall eines Probekörpers der Masse m_P mit einer Geschwindigkeit v auf einen unnachgiebigen Körper ist die kinetische Energie definiert mit Gleichung 2.8:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m_P * v^2 \quad (2.8)$$

- E_{kin} kinetische Energie
 m_P Masse des Probekörpers
 v Geschwindigkeit des beschleunigten Probekörpers

Dementsprechend gilt für die spezifische Energie W_m :

$$W_m = \frac{E_{kin}}{m_P} = \frac{1}{2} * v^2 \quad (2.9)$$

Bei Fallversuchen wird beim Aufprall auf einen nachgiebigen Körper die im Probekörper gespeicherte potenzielle Energie

$$E_{pot} = m_P * g * h \quad (2.10)$$

- E_{pot} potenzielle Energie
 m_P Masse des Probekörpers
 g Erdbeschleunigung
 h Fallhöhe

in kinetische Energie umgewandelt und somit gilt für diese Versuche für die spezifische Energie Gleichung 2.11:

$$W_m = \frac{E_{pot}}{m_P} = g * h \quad (2.11)$$

Andererseits besteht die Möglichkeit den Probekörper unabhängig von seiner Masse zu positionieren und mit einem Geschoss zu beaufschlagen. Die Eigenschaften des Geschosses wie Form, Masse, Größe, Material etc. sind variabel und können nach Anwendungsfall variiert werden. So wurden Probekörper beispielsweise in den Versuchen nach /GRS 16a/ mit Projektilen beschossen und so die Freisetzung feiner Stäube hervorgerufen. Bei diesen Versuchen traf ein Geschoss mit der Masse m_G und einer Geschwindigkeit v auf einen ruhenden Probekörper mit der Masse m_P . So gilt für die auf den Probekörper wirkende spezifische Energie:

$$W_m = \frac{E_{kin}}{m_P} = \frac{\frac{1}{2} * m_G * v^2}{m_P} \quad (2.12)$$

E_{kin}	kinetische Energie des Geschosses
m_P	Masse des Probekörpers
m_G	Masse des Geschosses
v	Geschwindigkeit des Geschosses

Es ist zu erwähnen, dass je nach Versuchsaufbau nicht der Großteil der kinetischen Energie für die Verformung bzw. Zerstörung des Probekörpers umgesetzt wird und somit die vom Probekörper aufgenommene Energie geringer ist. Für den Vergleich von Simulation und Experiment ist die Betrachtung der kompletten auf den Probekörper wirkenden spezifischen Energie sinnvoll, da die Aufteilung der kinetischen Energie in die vom Probekörper aufgenommene und die Restenergie messtechnisch nicht vollständig umsetzbar ist. Bei Fallversuchen, bei denen eine Masse m_G auf einen Probekörper mit der Masse m_P fallen gelassen wird, lautet die spezifische Energie dementsprechend:

$$W_m = \frac{E_{pot}}{m_P} = \frac{m_G * g * h}{m_P} \quad (2.13)$$

E_{pot}	potentielle Energie des Fallkörpers
m_P	Masse des Probekörpers
m_G	Masse des Fallkörpers
g	Erdbeschleunigung
h	Fallhöhe

Bei Beaufschlagung einer Barriere wie beispielsweise einer Metallplatte mit Sprengstoff kann, wie oben bereits erwähnt durch ein Spallationsversagen auf der gegenüberliegenden Seite der Metallplatte ein Abplatzer austreten. Der beschleunigte Abplatzer wird durch die Restenergie beschleunigt und kann mit einer gewissen Geschwindigkeit auf den hinter der Barriere befindenden Probekörper auftreffen. Bei diesem Szenario wirkt der beschleunigte Abplatzer wie ein beschleunigtes Projektil und es gilt die Gleichung 2.12.

2.3.2 Freisetzung luftgängiger Partikel

Eine Abschätzung der durch Sprengstoffeinwirkung freigesetzten Partikel bei SEWD auf radioaktive Stoffe ist für die Bewertung der durch die Freisetzung resultierenden Gefahr notwendig. Durch die Sprengstoffeinwirkung entstehen neben den größeren Bruchstücken, die sich um das Gebinde herum absetzen würden, auch luftgetragenes Material,

das sich aufgrund der geringeren Absetzgeschwindigkeit gegenüber den großen Bruchstücken in der näheren Umgebung des Sprengortes in Windrichtung ablagert und zur Strahlenexposition von Personen beitragen kann. Die Trennung des Größenbereichs erfolgt über den sogenannten aerodynamischen Durchmesser d_{AE} . Der aerodynamische Durchmesser ist eine fiktive Größe, die über die Gleichung 4.1 mittels des geometrischen Äquivalentdurchmessers und der Dichte des Materials bestimmt wird (vgl. Kap. 4). Die Schwelle für den luftgetragenen Größenbereich liegt bei $d_{AE} < 100 \mu\text{m}$. Ein anderer Expositionspfad ist der lungengängige Größenbereich mit einem $d_{AE} < 10 \mu\text{m}$, der von großer Bedeutung ist, da Partikel dieser Größe beim Einatmen die tiefen Lungenabschnitte erreichen, was bezüglich der Inhalationsdosis relevant ist. Bei einer Freisetzung durch Sprengstoffeinwirkung sind die Anteile dieser beiden Hauptexpositionspfade von großem Interesse. Bei den Anteilen η_{dAE} handelt es sich nach Gleichung 4.3 um massenspezifische Anteile der Partikel des entsprechenden Partikelgrößenbereichs bezogen auf die gesamte Probekörpermasse.

Die Generierung luftgetragener Partikel und vor allem lungengängiger Partikel beim Bruch spröder Materialien wurde in der Dissertation /MAE 99/ aus dem Jahr 1999 untersucht. In /MAE 99/ wurden kleine Probenmassen (60 g bis 300 g), bestehend aus verschiedenen Zementtypen und Pyrexglas, mit einer pneumatischen Kanone auf ein unachgiebiges Hindernis geschossen. Dabei konnte für einen weiten Bereich der spezifischen Energie ein linearer Zusammenhang zwischen dem Freisetzungsfaktor K_4^{100} , was η_{100} entspricht, und der spezifischen Energie W_m ermittelt werden. Eine solche Auftragung für die verschiedenen Zementtypen ist in Abb. 2.15 zu sehen.

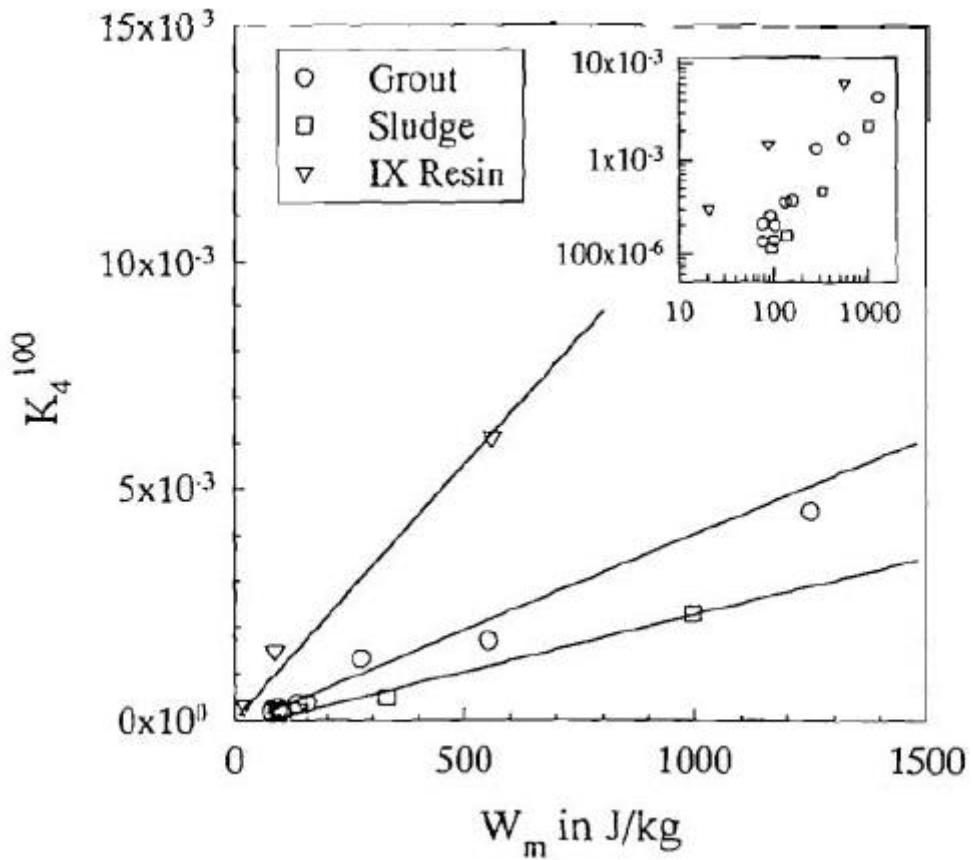


Abb. 2.15 Spezifische Freisetzung aller luftgetragenen Partikel verschiedener Zementarten nach /MAE 99/

Dieser lineare Zusammenhang nach /MAE 99/ ist in Gleichung 2.14 wiederzufinden:

$$W_m = A + B * K_4^{100} \quad (2.14)$$

W_m spezifische Energie

K_4^{100} Verhältnis des luftgetragenen aerodynamischen Anteils ($<100 \mu\text{m}$) zur gesamten Pro-
bekörpermasse

A y-Achsenabschnitt

B Steigung der Geradengleichung

Dabei ist nach /MAE 99/ der Achsenabschnitt mit der Ordinate eine kritische massen-
spezifische Energie, bei der mit einer Freisetzung von luftgetragenen Partikeln zu rech-
nen ist. In /MAE 99/ wurde nachgewiesen, dass die Daten zur Freisetzung luftgetragener
Partikelmengen skalierbar sind und dies wurde, wie in Abb. 2.16 zu sehen, erstmalig für

Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser d_{AE} zwischen 0,1 und 100 μm gezeigt. In Abb. 2.16 ist auf der Ordinate die Korngrößenverteilung Q_3 , die maschinell ermittelt worden ist, normiert auf den Freisetzungsfaktor, aufgetragen. Aus dieser Auftragung geht auch die von /MAE 99/ beschriebene Beziehung, dass η_{10} etwa 1/10 von η_{100} entspricht, hervor.

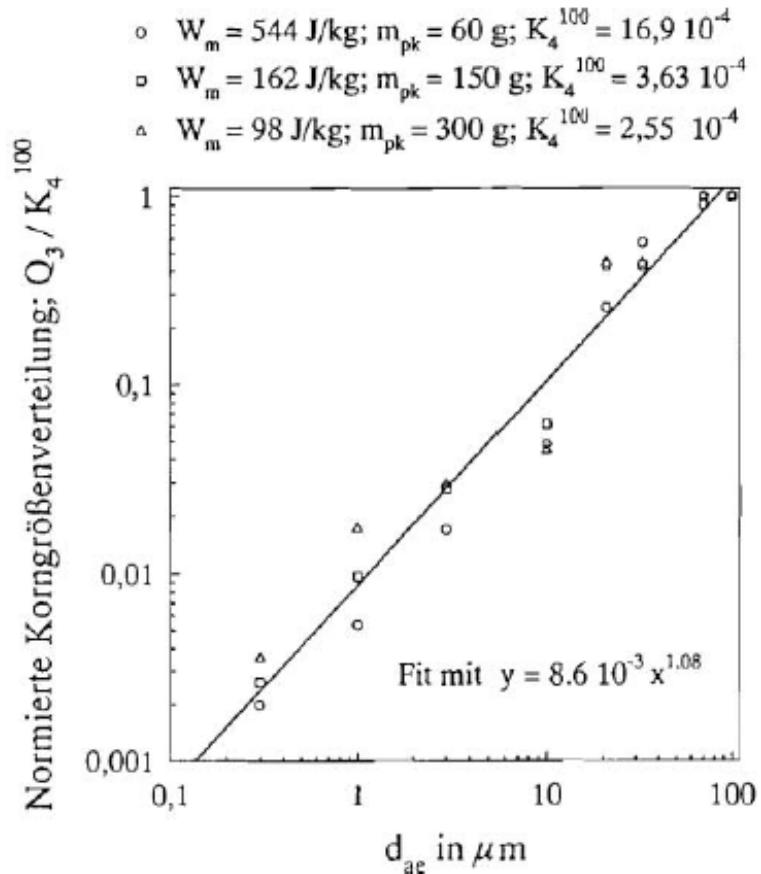


Abb. 2.16 Auf den luftgetragenen Anteil normierte Korngrößenverteilung für Versuche mit Probekörpern des Zementtyps „Grout“ nach /MAE 99/

In dem Forschungsvorhaben /LAN 03/ von 2003 wird der lineare Ansatz aus /MAE 99/ verwendet, um eine Aussage über den freigesetzten Anteil lungengängiger Partikel (<100 μm) η_{100} machen zu können. Dabei ist der in Gleichung 2.14 wiedergegebene lineare Ansatz aus /MAE 99/ angepasst worden, ohne die Parameter A und B umzubennen, zur Gleichung:

$$\eta_{100} = A + B * W_m \quad (2.15)$$

Zusätzlich ist in /LAN 03/ die Skalierbarkeit von kleinskaligen Probekörpern mit Massen zwischen 125 g und 210 g zu großskaligen Versuchen mit Massen der Probekörper zwischen 66 kg und 487 kg betrachtet worden. Dabei sind spezifische Energien W_m bis 700 J/kg betrachtet worden. Die kleinskaligen Versuche sind mit einer Druckluftkanone und die großskaligen mit Fallversuchen durchgeführt worden. Grundsätzlich ist nach /LAN 03/ eine Skalierung möglich, sofern ein Volumenkorrekturfaktor λ für größere Massen bei der Ermittlung der spezifischen Energie berücksichtigt wird. Eine klare Abgrenzung, ab welcher Masse bzw. ab welchem Volumen der Korrekturfaktor angewandt werden soll, ist nicht aufgeführt. In den Fallversuchen ist bei Probekörpern mit einer größeren Masse als 60 kg dieser Korrekturfaktor zu tragen gekommen:

$$W_{mk} = \frac{E}{m_P^\lambda} \quad (2.16)$$

W_{mk}	korrigierte spezifische Energie bei größeren Probekörpermassen
E	Energie
m_P	Probekörper
λ	Volumenkorrekturfaktor ($\lambda=1,43$)

Der Volumenkorrekturfaktor gleicht nach /NOL 06/ die ineffizientere Energieausnutzung bei der Zerkleinerung des Probekörpers aus. Mit dem Forschungsvorhaben /GRS 07/ folgten weitere Versuche, die die Ergebnisse von /LAN 03/ bestätigen. Ein weiteres Ergebnis ist, wie in Abb. 2.17 zu sehen, der Zusammenhang zwischen dem Anteil luftgetragener Partikel mit $\eta_{100} < 100 \mu\text{m}$ und der spezifischen Energie W_m bei einer doppelt logarithmischen Auftragung, wie es auch schon in /MAE 99/ mit den Ergebnissen in Abb. 2.15 identifiziert wurde.

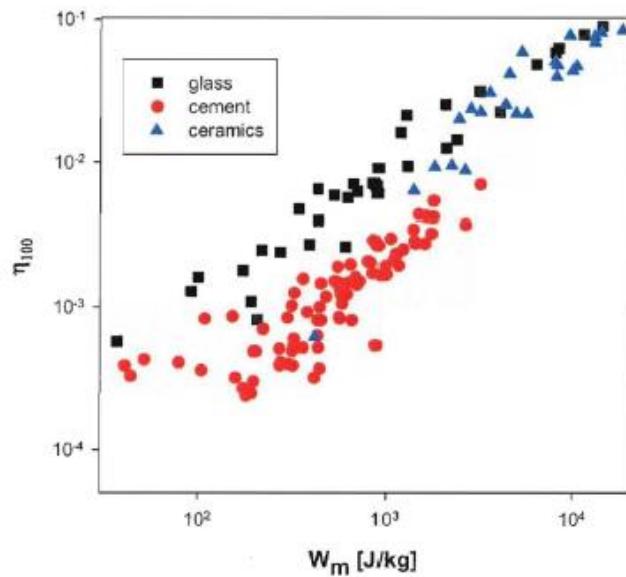


Abb. 2.17 Zusammenfassung der Freisetzungsanteile in kleinskaligen Versuchen nach /LAN 03/

In dem Forschungsvorhaben der GRS mit dem Förderkennzeichen 3614R01620 zur Freisetzung durch EFP /GRS 16a/ ist der lineare Ansatz aus /LAN 03/ auf Projektil mit Geschwindigkeiten von über 1000 m/s angewandt worden und die damit berechneten Ergebnisse zur Freisetzung lungengängiger Partikel stimmten gut mit den Ergebnissen aus den Versuchen überein. Dabei sind Werte für die spezifische Energie von 2 kJ/kg bis knapp 50 kJ/kg betrachtet worden. In /GRS 16b/ ist ein Sprengstoffszenario betrachtet worden, bei dem der lineare Ansatz für die Berechnung des freigesetzten Anteils auf durch Spallation verursachte Abplatzer angewandt worden ist. Allerdings ist die Diskrepanz zwischen den Versuchsergebnissen und dem numerischen Ansatz, wie in Abb. 2.18 zu sehen ist, sehr groß.

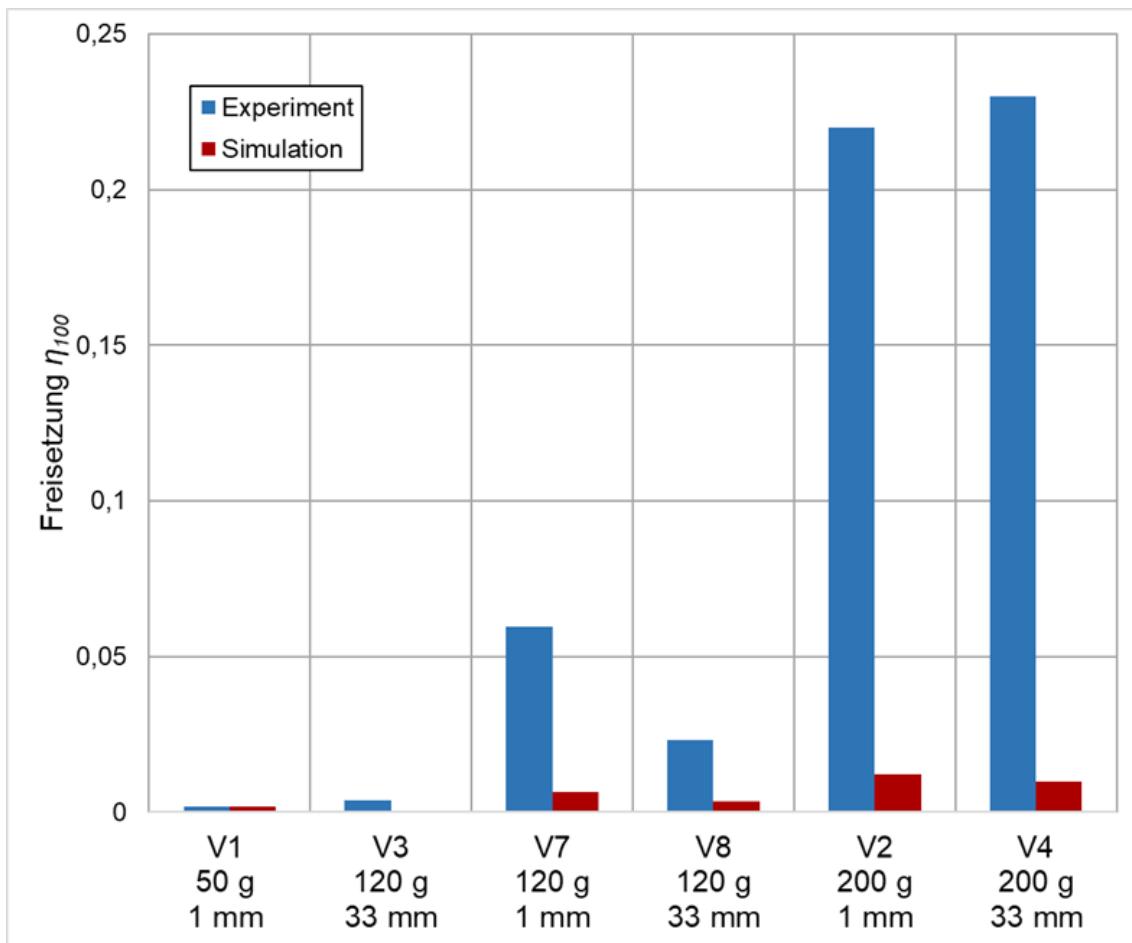


Abb. 2.18 Ergebnisse von experimenteller Erfassung und Simulation des Freisetzungssanteils η_{100} nach /GRS 16b/

Während in /GRS 16b/ das Schadensbild gut von den Simulationen wiedergegeben werden konnte, sind die Übereinstimmungen der berechneten und gemessenen Freisetzungssanteile nur teilweise zufriedenstellend. In dem EFP-Forschungsvorhaben /GRS 16a/ wurden mit dem linearen Ansatz aus /GRS 07/ auf Basis gemessener Impaktgeschwindigkeiten bessere Übereinstimmungen mit gemessenen Freisetzungssanteilen erreicht.

Eine nachträgliche Abwägung möglicher Ursachen für die in /GRS 16b/ aufgetretene, teilweise deutliche Unterschätzung der gemessenen Freisetzungssanteile kommt zu dem Schluss, dass mehrere Aspekte wie beispielsweise größere Unsicherheiten bei Aerosolmessung, Diskrepanz der Abplatzergeschwindigkeit zur Simulation oder die Korrelation zwischen Extrapolation und tatsächlichem Wert Einfluss nehmen konnten. Aufgrund der Tatsache, dass die Geschwindigkeit quadratisch in die Gleichung der kinetischen Energie eingeht und somit den größten Einfluss hat, sollten zur Validierung der Methodik zur

Berechnung der Geschwindigkeiten der Bruchstücke experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden und unter anderem sollte auch der verwendete Ansatz aus /GRS 07/ genauer geprüft werden. Die Reproduzierung der Versuche im Hinblick auf die Aerosolmessung am Versuchsaufbau in /GRS 16b/ war nicht möglich, sodass ein alternativer Versuchsaufbau entwickelt werden musste.

3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird der für das Forschungsvorhaben verwendete Versuchsaufbau beschrieben. Eine Anforderung an den Versuchsaufbau war, dass es möglich sein sollte, damit experimentelle Ergebnisse aus /GRS 16b/ zu reproduzieren und den Grund für die große Diskrepanz zwischen den Versuchsergebnissen und den simulierten Freisetzunganteilen zu identifizieren. Dazu war es erforderlich für die Versuche einen vergleichbaren Versuchsaufbau zu wählen wie in /GRS 16b/. Im Versuchsaufbau für die kleinskaligen Versuche aus 2016 waren, wie in Abb. 3.1 skizziert, Probekörper und Sprengstoff horizontal angeordnet, was höhere Anforderungen an die Fixierung des Probekörpers bzw. der Sprengstoffladung stellte.

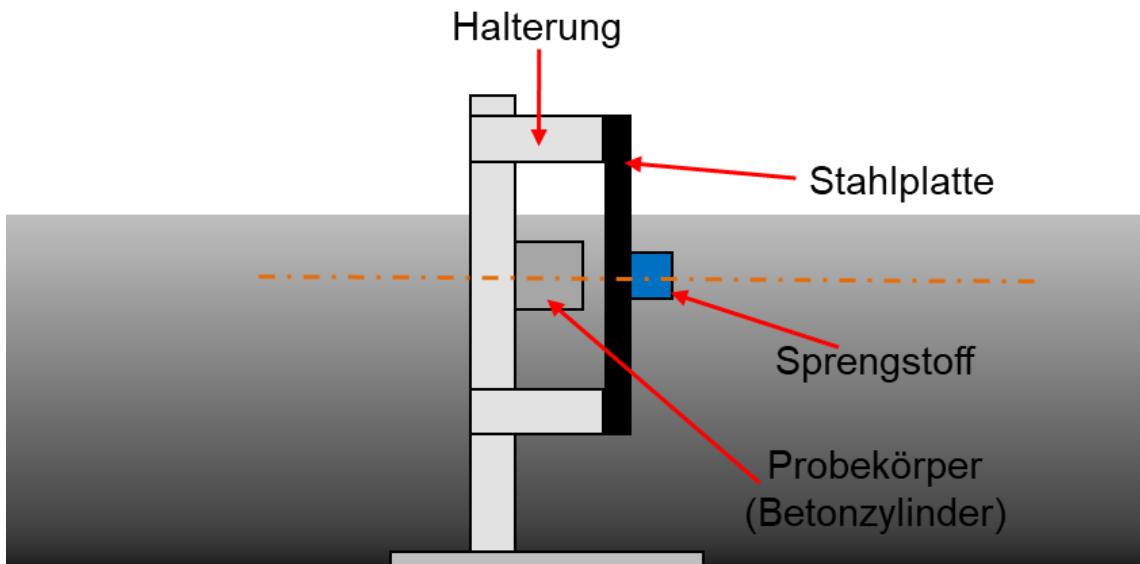


Abb. 3.1 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung aus /GRS 16b/

Der Versuchsaufbau in /GRS 16b/ hat durch einen geschlossenen Versuchsräum ermöglicht, die Partikel über einen längeren Zeitraum abzusaugen und so die Korngrößenverteilung zu bestimmen. Zudem wurde durch die horizontale Anordnung der Wirkrichtung von Metallplatte, Sprengstoff und Probekörper die Möglichkeit geschaffen, den Abstand zwischen Metallplatte und Sprengstoff zu variieren. Wiederholungsversuche im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens an demselben Versuchsaufbau waren nicht möglich, da der Aufbau nicht mehr existiert, sodass in Zusammenarbeit mit Fraunhofer EMI ein Versuchsaufbau mit vertikaler Anordnung von Sprengstoff und Probekörper gewählt wurde. Auf eine Variation des Abstandes zwischen Metallplatte und Sprengstoff wurde verzichtet und die Versuche 3, 4 und 8 aus /GRS 16b/, bei denen ein Abstand

von 33 mm vorlag, als Wiederholungsversuche zu /GRS 16b/ durchgeführt. Dieser Abstand hatte insbesondere den Vorteil, dass die Bewegung von Abplatzern der Metallplatte in diesem Spalt mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen werden konnte, um damit die Geschwindigkeit der Abplatzer auswerten zu können. Der neue Versuchsaufbau hatte jedoch den Nachteil, dass eine Aerosolmessung in einem geschlossenen Raum nicht möglich war.

In Abb. 3.2 ist der im aktuellen Forschungsvorhaben verwendete Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Auf der Unterseite der Tischplatte war als Gegenhalter für die Metallplatte und der von oben wirkenden Kraft ein umlaufendes Flacheisen angeschweißt, auf dem die Metallplatte auflag. Um die Überbelichtung der Hochgeschwindigkeitskameras durch den bei der Detonation entstehenden Lichtblitz zu minimieren, war zwischen dem Flacheisen und der Stahlplatte ein Moosgummi angebracht, das bei jedem Versuch erneuert werden musste. Die Metallplatte mit den Maßen 29x29 cm² (Länge x Breite) war von oben über einen Fixierungsrahmen mit sechs M12-Schrauben fixiert, sodass die Metallplatte während des Versuchs nicht verrutschen konnte. Ein Querschnitt des Aufbaus ist in Abb. 3.3 zu sehen. Der Probekörper war unterhalb der Metallplatte auf einem massiven Stahlklotz innerhalb eines großen Stahltopfes positioniert. Der Stahltopf diente dem einfacheren Sammeln der Probekörperreste nach dem Versuch. Nach jedem Versuch wurde der Stahltopf mit einem eigens angeschafften Industriesauger ausgesaugt und die Fragmente jedes Versuchs zur Siebung in jeweils einem Behälter separat gesammelt.

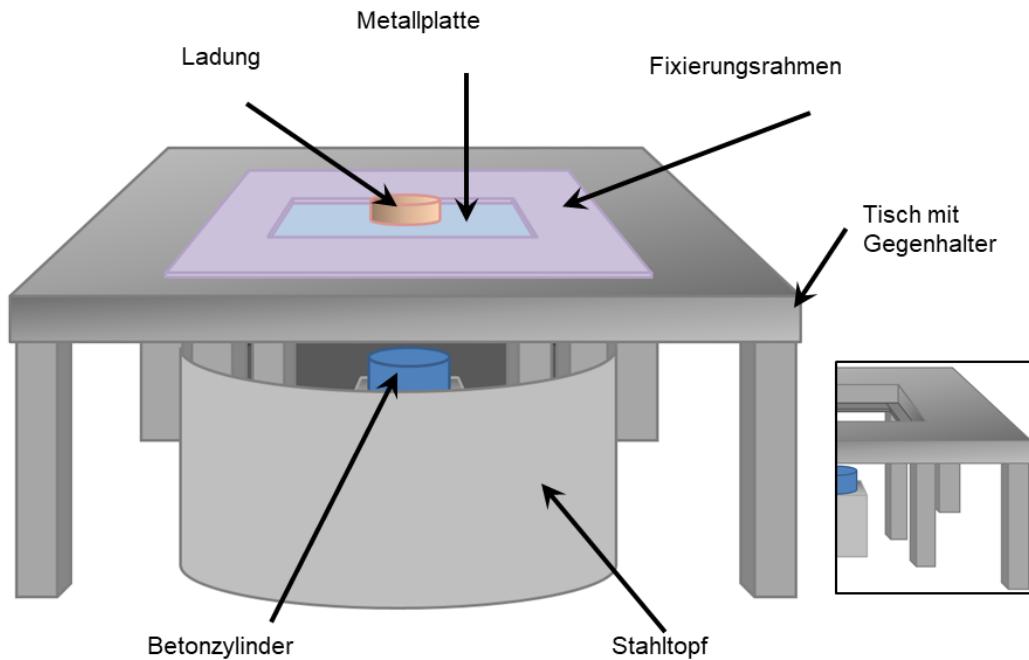


Abb. 3.2 Schematischer Versuchsaufbau des aktuellen Forschungsvorhabens

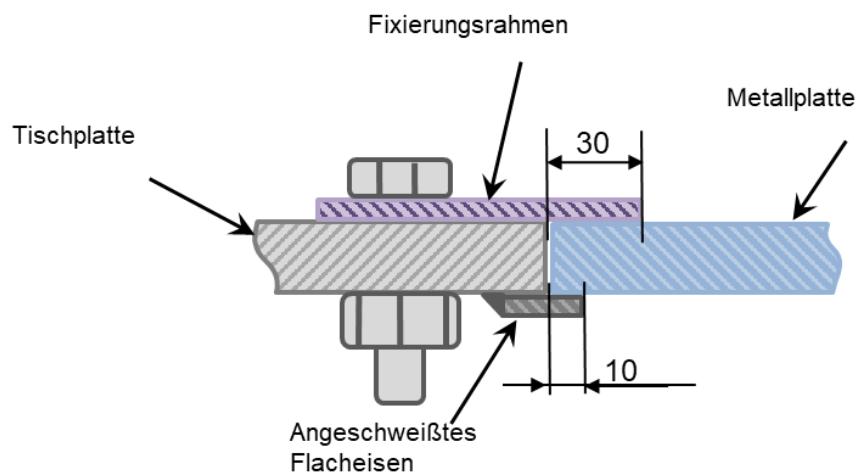


Abb. 3.3 Querschnitt der Metallplattenfixierung (Maße in mm)

Für die Bestimmung der Abplatzergeschwindigkeit wurde ein fester Abstand von 33 mm zwischen dem Probekörper und der Stahlplatte gewählt. Dies entspricht dem in einer Versuchsreihe aus /GRS 16b/ gewählten Abstand. Zwei Hochgeschwindigkeitskameras (Photron FASTCAM MINI AX200 Modell 900K-16GB) wurden wie in Abb. 3.4 dargestellt angeordnet, um in diesem Spalt zwecks Geschwindigkeitsbestimmung den Flug des Abplatzers aufzunehmen.

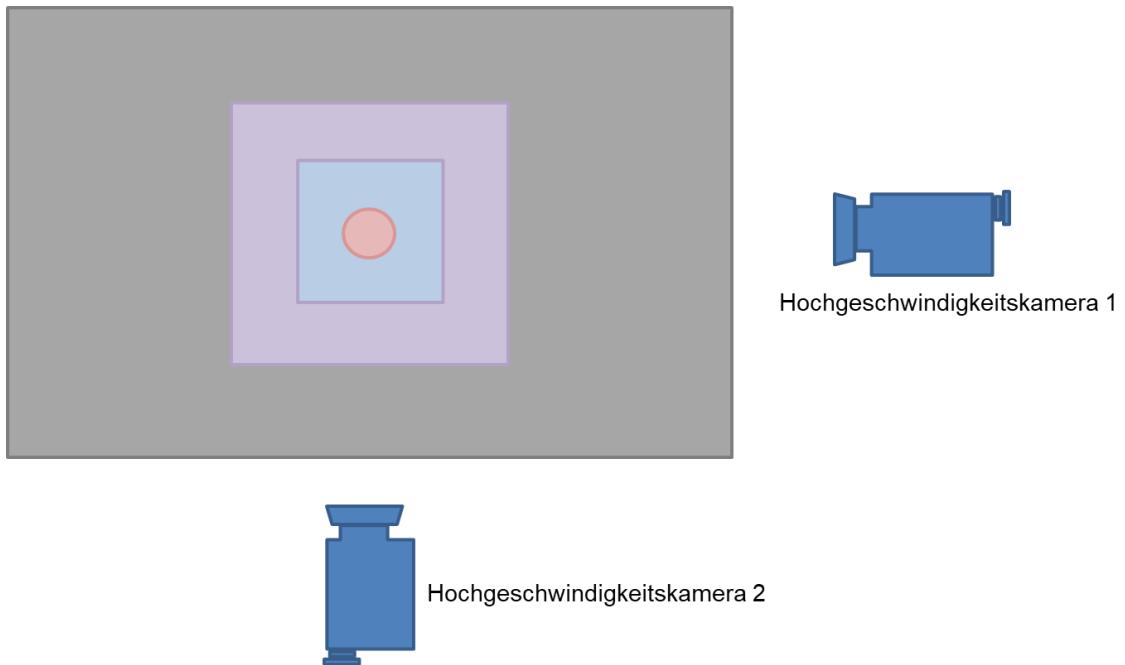


Abb. 3.4 Schematischer Versuchsaufbau des aktuellen Forschungsvorhabens
(Draufsicht)



Abb. 3.5 Foto des Versuchsaufbaus

In Abb. 3.5 ist ein Foto des Versuchsaufbaus zu sehen. Die Hochgeschwindigkeitskameras sind von vorne und von links positioniert. Im Hintergrund sind zwei große Betonklötze zu sehen, die einen neutralen Hintergrund für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gewährleisten sollten. Die auf der Tischplatte angeschweißten U-Profile sollten die Druckwelle der Detonation nach oben umlenken, um zum einen die Kameras zu schonen und zum anderen eine Überlichtung der Aufnahmen zu minimieren.

4 Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zwei einwöchige Versuchskampagnen in KW39 und KW48 des Jahres 2023 durchgeführt. Die erste Versuchskampagne mit den Versuchen FX770-FX776 (siehe Tab. 4.2) diente u. a. dem Abgleich der Ergebnisse durch den abgewandelten Versuchsaufbau gegenüber den Versuchen aus /GRS 16b/. Die Validierung des aktuellen Versuchsaufbaus durch einen Vergleich mit Ergebnissen aus /GRS 16b/ war notwendig, um in weiteren Versuchen Rückschlüsse auf die große Diskrepanz zwischen Experiment und Simulation im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ ziehen zu können. Der Abgleich von Versuchen aus /GRS 16b/ mit Versuchen mit dem aktuellen Versuchsaufbau erfolgte anhand der drei in Tab. 4.1 aufgeführten Versuche, die jeweils mit einem Abstand zwischen Metallplatte und Probekörper von 33 mm durchgeführt wurden. Dieser Abstand wurde für alle Versuche im aktuellen Forschungsvorhaben gewählt. Neben den Werten für die Freisetzunganteile η_{10} von Partikeln kleiner 10 µm, die anhand der von /MAE 99/ beschriebenen Beziehung $\eta_{100} \approx 10 \cdot \eta_{10}$ (vgl. Abschnitt 2.3.2) zwecks Vergleichbarkeit auf η_{100} hochskaliert wurden, dienten Schadensbilder, aus denen die Form, Größe und Masse der Abplatzer hervorgeht, als weiteres Ergebnis, mit dem die Versuchen aus /GRS 16b/ mit Versuchen mit dem aktuellen Versuchsaufbau abgeglichen wurden.

Tab. 4.1 Vergleichbare Versuche aus /GRS 16b/ mit Ergebnissen

Versuchsnummer / [-]	Material / [-]	Platten-dicke / [mm]	Ladungs-masse / [g]	η_{100} über Respicon / [-]
3	S235JR	20	50	0,0037
8	S235JR	20	120	0,023
4	S235JR	20	200	0,23

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass bei dem aktuellen Versuchsaufbau nicht wie in /GRS 16b/ die in einem geschlossenen Versuchraum freigesetzten lungengängigen Teilchen abgesaugt wurden und über einen Virtualimpaktor (Respicon) und Filter gesammelt wurden. Stattdessen wurde der Versuchsaufbau, wie in Abb. 3.5 zu sehen ist, unter freiem Himmel aufgebaut und die Bestimmung der Freisetzunganteile indirekt über eine Extrapolation von Siebergebnissen durchgeführt. In dem Forschungsvorhaben /GRS 16b/ wurden für einzelne Versuche, wie u. a. für Versuch 8 (vgl. Tab. 4.1) zusätzlich zur Respiconmessung Siebungen durchgeführt, die die Ergebnisse der Respicon-Messung zufriedenstellend widerspiegeln. Dies ermöglicht einen Abgleich zum aktuellen Versuchsaufbau. Aufgrund des freiliegenden Versuchsaufbaus ist mit einem Verlust

an Probenmaterial nach der Sprengung zu rechnen. Der Siebturm aus /GRS 16b/ verfügte mit den Siebstufen 45, 125, 350, 1000 und 2000 μm über vier Siebstufen weniger als der Siebturm des aktuellen Forschungsvorhabens mit den Siebstufen 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 und 16000 μm . Im Forschungsvorhaben von /NOL 06/ konnte, wie in Abb. 4.1 dargestellt, nachgewiesen werden, dass der Zusammenhang zwischen dem kumulativen Massenanteil lungengängiger Partikel und dem aerodynamischen Durchmesser über eine Potenzfunktion hinreichend genau beschrieben werden kann. Auf dieser Basis wurden im aktuellen Forschungsvorhaben die Siebergebnisse im doppelt logarithmischen Koordinatensystem auf den Anteil kleiner 100 μm extrapoliert.

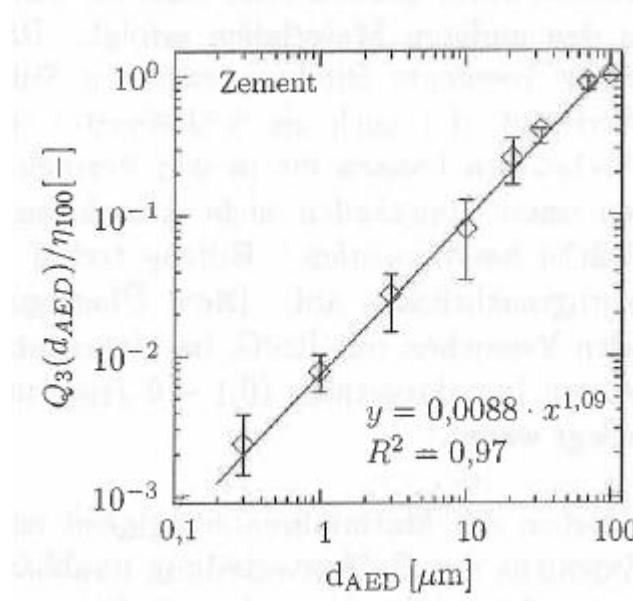


Abb. 4.1 Normierte Korngrößenverteilung für Zement-Probekörper nach /NOL 06/

Der aerodynamische Durchmesser ist eine fiktive Größe, die aus dem geometrischen Äquivalentdurchmesser (d. h. der Maschengröße der jeweiligen Siebstufe) unter der Annahme kugelförmiger Partikel anhand der Gleichung 4.1 aus /GRS 07/ berechnet wird. Der aerodynamische Durchmesser eines Partikels beliebiger Form und Materialdichte entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit der Dichte von Wasser, die die gleiche Absetzgeschwindigkeit in Luft aufweist wie das tatsächliche Partikel (vgl. /GRS 07/):

$$d_{AE} = d_{geo} * \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \quad (4.1)$$

d_{AE} Aerodynamischer Durchmesser

d_{geo}	Geometrischer Äquivalentdurchmesser
ρ	Dichte des Materials
ρ_0	Einheitsdichte von Wasser mit $\rho_0=1 \text{ g/cm}^3$

Die Dichte des Probekörpers wurde über die Gleichung 4.2 bestimmt:

$$\rho = \frac{m_P}{V_P} \quad (4.2)$$

m_P	Masse des Probekörpers
V_P	Volumen des Probekörpers

Der auf der Ordinate von Abb. 4.1 aufgetragene Parameter $Q_3(d_{AE})$ beschreibt nach Gleichung 4.3 das Verhältnis der kumulativen Masse des entsprechenden aerodynamischen Durchmessers zur Masse des Probekörpers. Dieser Wert wurde in /NOL 06/ maschinell aufgenommen und wie in Abb. 4.1 zu sehen auf $\eta_{d_{AE}}$ normiert, sodass die Werte auf der Ordinate nicht größer als eins sind:

$$\eta_{d_{AE}} \approx Q_3(d_{AE}) = \frac{m_{<d_{AE}}}{m_P} \quad (4.3)$$

Zusätzlich zum Abgleich der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen zum Versuchsaufbau aus /GRS 16b/ wurden Parameter wie Material, Plattendicke, Ladungsmasse sowie Ladungsgeometrie untersucht. Als Plattenmaterial wurde neben dem Baustahl S235JR der Grauguss mit Kugelgraphit GGG40 verwendet. Eine Steigerung der Plattendicke von 20 mm auf 30 mm sollte zeigen, inwieweit sich das Ergebnis der Spallation bzw. Perforation dabei verändert. Die zusätzlich gewählte Ladungsmasse von 100 g sollte die im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ rechnerisch ermittelte kritische Ladungsmasse, bei der es mit den dort gewählten Parametern zu einer Perforation der Metallplatte kommt, experimentell belegen. Der Einfluss der Ladungsgeometrie auf das Schadensbild sollte mit einer Variation des Verhältnisses von Höhe zu Durchmesser der Sprengladung näher untersucht und mit numerischen Simulationen verglichen werden. Die im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens durchgeföhrten Versuche mit den zugehörigen Parametern sind in chronologischer Reihenfolge in Tab. 4.2 und nach Parametern sortiert in Tab. 4.3 aufgeführt.

Tab. 4.2 Übersicht Versuchsmatrix

Versuchsnummer	Plattenmaterial	Plattendicke / [mm]	Ladungsmasse / [g]	Verhältnis Höhe / Durchmesser der Ladung
FX770	S235JR	20	120	1:3
FX771(*)	S235JR	20	120	1:3
FX772	S235JR	20	200	1:3
FX773	S235JR	30	200	1:3
FX774(*)	S235JR	30	200	1:3
FX775	S235JR	20	100	1:3
FX776	S235JR	20	200	1:2
FX778	GGG40	20	120	1:3
FX779	GGG40	20	50	1:3
FX780	S235JR	20	50	1:3
FX781	GGG40	20	100	1:3
FX782	GGG40	20	200	1:3
FX783	GGG40	20	100	1:2
FX784	GGG40	20	120	1:2
FX785	S235JR	20	200	1:1
FX786(*)	GGG40	20	120	1:2
FX787	S235JR	30	200	1:2
FX788	GGG40	20	200	1:2

(*) Wiederholungsversuch

Tab. 4.3 Versuchsmatrix sortiert

Versuchsnummer	Plattenmaterial	Plattendicke / [mm]	Ladungsmasse / [g]	Verhältnis Höhe/Durchmesser der Ladung
FX780	S235JR	20	50	1:3
FX775	S235JR	20	100	1:3
FX770/FX771	S235JR	20	120	1:3
FX772	S235JR	20	200	1:3
FX773/FX774	S235JR	30	200	1:3
FX787	S235JR	30	200	1:2
FX776	S235JR	20	200	1:2
FX785	S235JR	20	200	1:1
FX779	GGG40	20	50	1:3
FX781	GGG40	20	100	1:3
FX778	GGG40	20	120	1:3
FX782	GGG40	20	200	1:3
FX783	GGG40	20	100	1:2
FX784/FX786	GGG40	20	120	1:2
FX788	GGG40	20	200	1:2

Die Spalte in beiden Tabellen mit der Beschriftung „Versuchsnummer“ weist auf eine vom Fraunhofer EMI zugeteilte fortlaufende Nummer hin, die zwecks Dokumentation eine Zuordnung im Nachhinein erleichtert. Für eine leichtere Einordnung im weiteren Verlauf des Abschlussberichtes wird an einigen Stellen ein Kürzel genutzt, um beispielsweise die entsprechenden Versuchspараметer dem Schadensbild zuzuordnen. Das Kürzel setzt sich wie folgt zusammen:

(Material – Plattendicke – Ladungsmasse – Kehrwert des Ladungsverhältnisses)

Material	S für S235JR oder G für GGG40
Plattendicke	Plattendicke in mm
Ladungsmasse	Masse in g
Kehrwert	z. B. 3 für 1:3

Für die Versuchsnummer FX783 ist das Kürzel beispielsweise (G-20-100-2).

Die für den Versuch notwendigen Probekörper aus Beton wurden nach der Rezeptur aus Tab. 4.4 hergestellt.

Tab. 4.4 Betonrezeptur für die Probekörper

Komponente	Eigenschaft	Masse / [kg]
Wasser	-	175
Zement CEM II/A-LL 32,5 R	-	365
Gesteinskörnung 1	Korngröße (KG): 0/2 mm	898
Gesteinskörnung 2	KG: 8/16 mm	898
w/z-Wert	0,48	-

Nach dem Anmischen erfolgte eine Trockenlagerung nach Anhang NA der DIN EN 12390-2 (2009). Diese beinhaltet zunächst eine gegen Austrocknen geschützte Lagerung für 24 ± 2 h bei 20 ± 2 °C. Nach der Lagerung wird der Probekörper entformt und anschließend für mindestens sechs Tage bei 20 ± 2 °C auf einem Rost im Wasserbad oder auf einem Lattenrost in einer Feuchtekammer mit ≥ 95 % relativer Luftfeuchte gelagert. Im letzten Schritt werden die Probekörper aus dem Wasserbad bzw. der Feuchtekammer entnommen und bei 20 ± 2 °C und bei 65 ± 5 % relativer Luftfeuchte auf einem Lattenrost gelagert und gegen Austrocknen geschützt. Grundsätzlich sollten die vom Fraunhofer EMI hergestellten Beton-Probekörper ca. vier Wochen vor der jeweiligen Versuchskampagne angemischt werden, damit diese zum Zeitpunkt der Sprengversuche eine Aushärtezeit von ca. 28 Tagen aufweisen. Die Druckfestigkeit wurde bei zwei Proben nach 14 Tagen, bei einer Probe am ersten Versuchstag (ca. 21 Tage) und bei einer Probe am letzten Versuchstag (24 Tage) durchgeführt, sodass sich bei einer Auftragung der Druckfestigkeit über der Zeit eine Sättigungskurve ausbildet und eine Aussage über die Festigkeit während des Versuchszeitraums getätigt werden kann.

Bei der Herstellung der Probekörper mit einem Durchmesser und einer Höhe von 100 mm verfügte das Fraunhofer EMI über drei zylindrische Formen mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm, die im Nachhinein halbiert werden. Zusätzlich gab es vier rechteckige Formen mit einer Kantenlänge von 150 mm und einer Höhe von 300 mm, aus denen die Probekörper mit dem entsprechenden Durchmesser gezogen wurden, sodass pro Versuchskampagne zehn Probekörper und vier Proben für die Druckfestigkeit zur Verfügung standen. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3 (2002). Eine Übersicht der Druckfestigkeit über die Lagerungszeit für beide Versuchskampagnen ist in Abb. 4.2 aufgeführt.

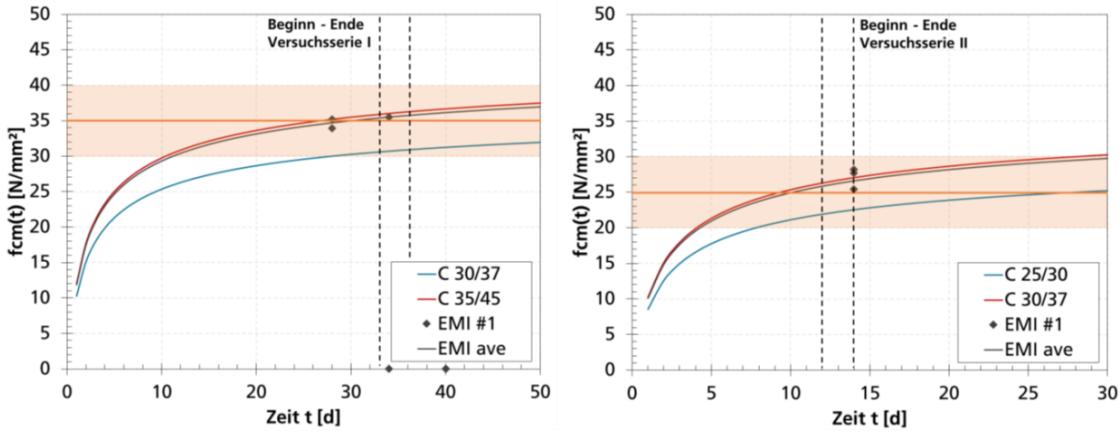


Abb. 4.2 Aushärtekurven der Probekörper für die erste (links) und zweite (rechts) Versuchskampagne

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Druckfestigkeitswerte der Probekörper in der zweiten Versuchskampagne um etwa 10 MPa geringer waren als in der ersten Versuchskampagne. Die vertikalen schwarz gestrichelten Linien in Abb. 4.2 begrenzen den Versuchszeitraum der jeweiligen Versuchskampagne. In den Diagrammen sind Aushärtekurven gängiger Betonarten, die als obere und untere Grenze fungieren, eingezeichnet. So kann eine Abschätzung mit den im Druckversuch ermittelten Ergebnissen zur Festigkeit der hergestellten Beton-Probekörper getätigter werden. Die erste Versuchskampagne wurde nach einer Aushärtezeit der Probekörper von 33 bis 37 Tagen durchgeführt, die zweite Versuchskampagne nach einer Aushärtezeit der Probekörper von 12 bis 14 Tagen. Dies führte zu einer Reduzierung der Druckfestigkeitswerte in der zweiten Versuchskampagne. Die Druckfestigkeitswerte der zweiten Versuchskampagne entsprechen in etwa den Druckfestigkeitswerten in /GRS 16b/. In den Versuchen in /GRS 16b/ wurden die Beton-Probekörper aus Trockenbeton C25/30 (Zusammensetzung: Sand, Zement, Zusätze, KG=0-8 mm) hergestellt. Die Druckfestigkeit der Beton-Probekörper der ersten Versuchskampagne des aktuellen Forschungsvorhabens lag etwas höher. Trotz leichter Unterschiede bei den Druckfestigkeitswerten sind, wie in Abb. 4.3 zu sehen, die Schädigungsbilder nach der Druckprüfung beider Kampagnen gleich. Unter der Berücksichtigung, dass die Zugfestigkeit bei Betonproben etwa 1/10 der Druckfestigkeit entspricht, sind die Unterschiede eher gering und die Proben sind gut vergleichbar.



Abb. 4.3 Beton-Probekörper nach Druckprüfung – Kampagne 1 (links), Kampagne 2 (rechts)

Für die Sprengversuche wurden auf die Probekörper von zwei Seiten um 90° versetzt 1 cm breite Markierungen angebracht, die als Referenzmaß bei der Auswertung der Bilder der Hochgeschwindigkeitskameras fungierten. Vor jedem Versuch wurde der Stahltopf, in dem der Probekörper aus Beton auf einem massiven Stahlklotz mittig positioniert wurde, ausgesaugt. Die Sprengladung mit dem Zünder, dessen Ende von oben senkrecht bis zur Mitte in die Sprengladung geschoben wurde, wurde, wie in Abb. 4.4 dargestellt, zentral auf der Metallplatte positioniert. Mit den beiden Hochgeschwindigkeitskameras wurden die Versuche mit einer Bildrate von 100.000 fps aufgenommen. Ihr Triggersignal, mit dem die Aufnahmen gestartet wurden, erhielten sie vom elektrischen Zünder.



Abb. 4.4 Positionierung der Sprengladung

Vor und nach jedem Versuch wurden Aufnahmen von Metallplatte, Probekörper, Aufbau und Schadensbild gemacht. Die Probekörper und die Metallplatten sowie deren Reste werden vor und nach dem Versuch gewogen, um den Fehler durch Materialverlust abschätzen zu können. Nach jedem Versuch wurden mithilfe eines Magneten kleinere Reste/Splitter der Metallplatten aus dem Stahltopf heraussortiert. Anschließend wurden die Beton-Partikel mit einem Industriesauger aufgesammelt und separat je nach Versuch in Behältern gesammelt, um anschließend eine Siebung mit neun Fraktionen der aufgesammelten Partikel durchführen zu können.

Im Laufe der ersten Versuchskampagne musste nach Versuch FX770 der Versuchsaufbau, speziell die Einrichtung zur Aufnahme und Fixierung der Metallplatte, modifiziert werden, weil die zuvor verwendete Einrichtung bei den Sprengversuchen beschädigt wurde. Konkret wurde ein umlaufendes Flacheisen auf der Unterkante des Tisches, wie in Abb. 3.3 zu sehen ist, angeschweißt. Somit sind die mit dem anfänglichen Versuchsaufbau gewonnenen Ergebnisse aus Versuch FX770 nur bedingt aussagekräftig. In Versuch FX773 hat das Triggersignal die Hochgeschwindigkeitskameras nicht ausgelöst, sodass der Wiederholungsversuch FX774 durchgeführt werden musste. Bei Versuch FX784 in der zweiten Versuchskampagne war die Ausrichtung des Angusses der GGG40-Platte gegenüber den anderen Versuchen verändert worden, was mutmaßlich

zu einer Veränderung des Schadensbildes geführt hat. Daher musste auch hier ein Wiederholungsversuch (FX786) durchgeführt werden.

5 Schadensbilder

Die in den Versuchen genutzten Sprengladungen verursachten nach der Detonation Schaden an den darunterliegenden Metallplatten und diese wiederrum nahmen Einfluss auf die Probekörper. Die entstandenen Schadensbilder werden im Folgenden näher betrachtet. Die unterschiedlichen Versagensmechanismen wurden, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, in unterschiedliche Moden unterteilt. Zur Auswertung der Schadensbilder wurden weitere Parameter herangezogen, die in Abb. 5.1 je nach Mode dargestellt sind. Die Versagensmode I kommt in den Versuchsreihen nicht vor, sodass diese in der Darstellung nicht weiter aufgeführt ist.

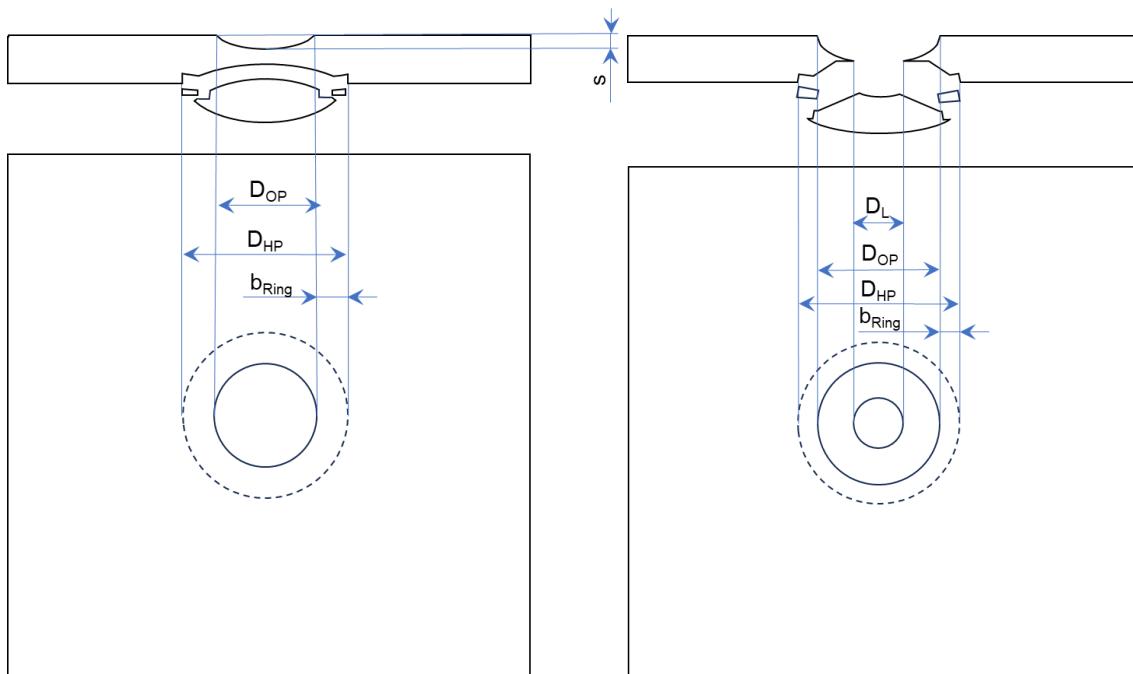


Abb. 5.1 Parameter für die Bewertung der Versagensmode II (links) und der Versagensmode III (rechts) in Seiten- und Draufsicht auf die Metallplatte

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist in tabellarischer Form in Tab. 5.1 aufgeführt.

5.1 Metallplatte

Tab. 5.1 Auswertung des Versagensbildes der Metallplatte

Versuchsnummer	D_{OP} / [mm]	s / [mm]	D_L / [mm]	D_{HP} / [mm]	b_{Ring} / [mm]	Versagens-mode	Bemerkung
FX771(*)	69	n. v.	30	100	11	III	Ring teilweise abgelöst; zweiteiliger Abplatzer (51 mm Durchmesser an Kontaktfläche)
FX772	80	n. v.	49	106	7	III	Ring nur angerissen
FX773	82	13	n. v.	113	n. v.	II	Ring nur angerissen
FX774(*)	83	15	n. v.	118	n. v.	II	Abplatzer viergeteilt
FX775	64	n. v.	n. v.	96	6	III(**)	Ring anhängend an Abplatzer
FX776	70	n. v.	35	96	8	III	Ring nicht identifizierbar
FX778	68	n. v.	39	91	n. v.	III	Risse auf der Platte sind in einem Durchmesser von 92 mm zu sehen
FX779	53	5	n. v.	67	n. v.	II	Risse auf der Platte sind in einem Durchmesser von 93 mm zu sehen
FX780	53	7	n. v.	73	11	II	Ring nicht identifizierbar; Reste vom Ring an Platte ersichtlich
FX781	65	n. v.	21	91	n. v.	III	Risse auf der Platte sind in einem Durchmesser von 76 mm zu sehen
FX782	98	n. v.	98	136	n. v.	III	Gerade durchgestanzt
FX783	57	13	n. v.	79	n. v.	II	Risse auf der Platte sind in einem Durchmesser von 81 mm zu sehen
FX784	71	n. v.	71	115	n. v.	III	durchgestanzt
FX785	57	n. v.	11	68	4,5	III	Ein Abplatzer + viele kleine Fragmente
FX786 (*)	86	n. v.	80	124	n. v.	III	Risse auf der Platte sind in einem Durchmesser von 96 mm zu sehen
FX787	73	12	n. v.	110	12,5	II	Andeutung eines Ringes aber nicht klar ersichtlich
FX788	86	n. v.	84	125	n. v.	III	durchgestanzt

(*) Wiederholungsversuch

(**) nur ein kleiner Riss, der aufgrund der Öffnung zur Mode III gezählt wird

Im Folgenden sind die Bilder der Plattenoberseite (links), Plattenunterseite (mittig) und Abplatzer (rechts) der jeweiligen Versuche dokumentiert.

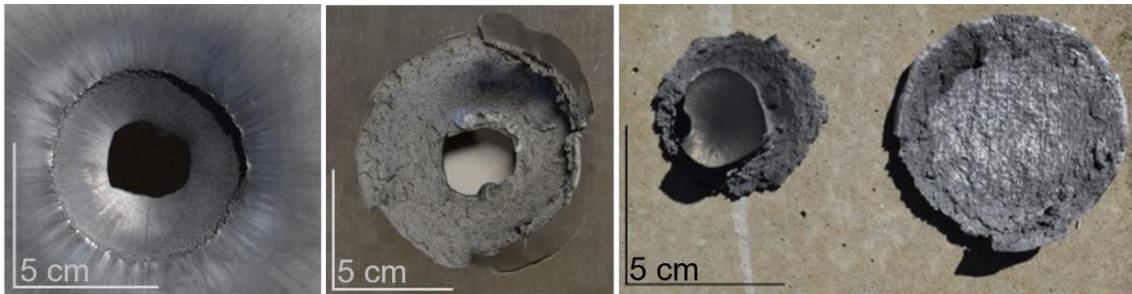


Abb. 5.2 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX771 (S-20-120-3)

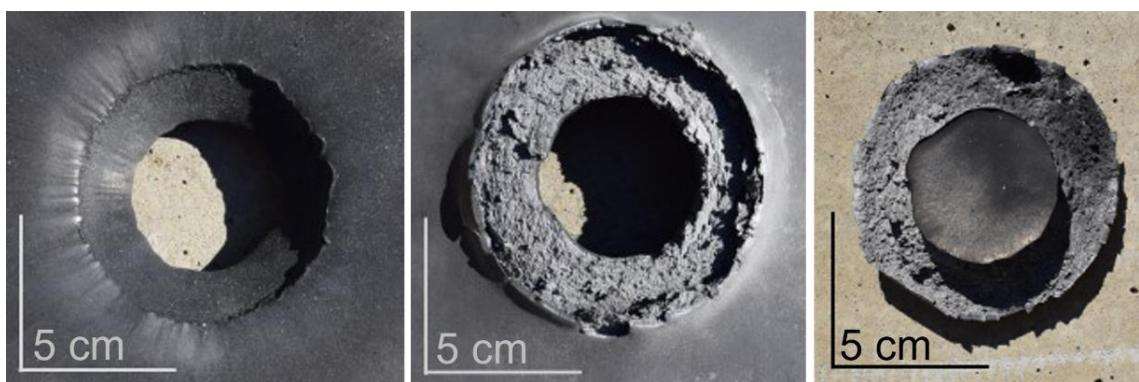


Abb. 5.3 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX772 (S-20-200-3)

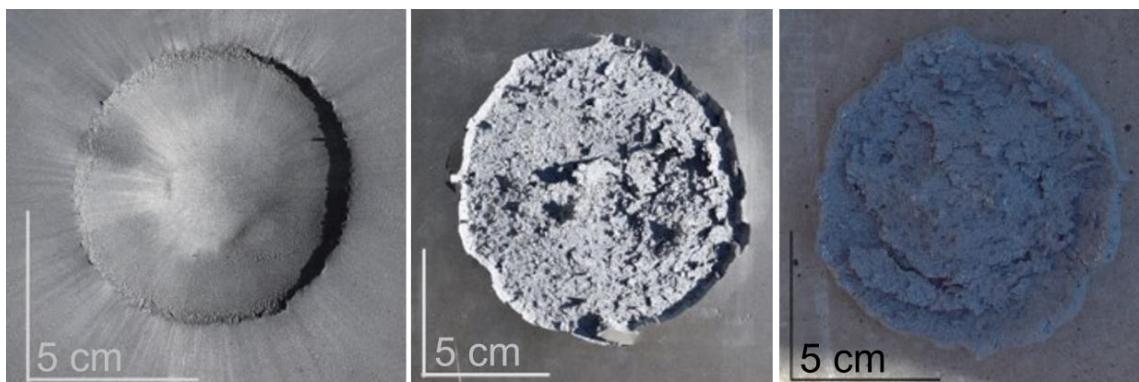


Abb. 5.4 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX773 (S-30-200-3)

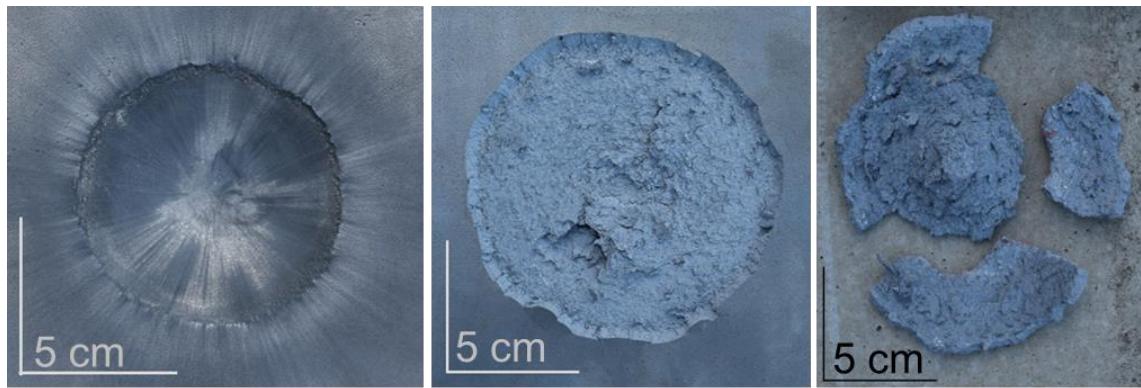


Abb. 5.5 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX774 (S-30-200-3)

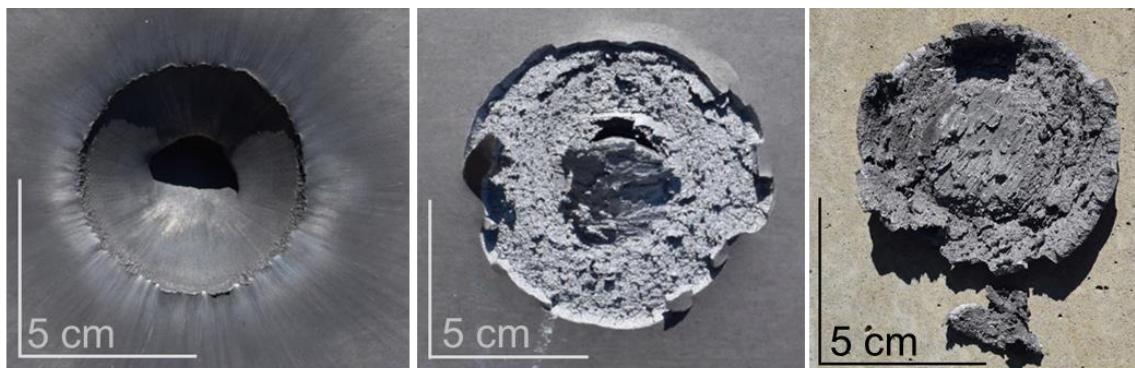


Abb. 5.6 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX775 (S-20-100-3)

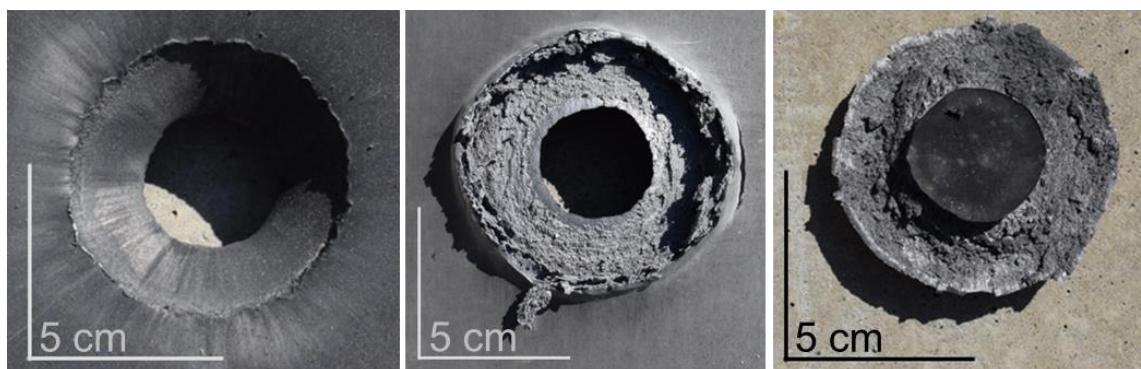


Abb. 5.7 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX776 (S-20-200-2)

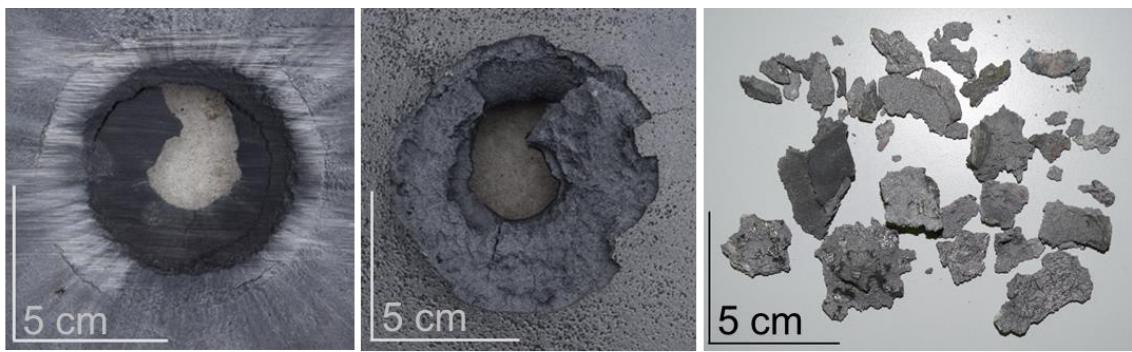


Abb. 5.8 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX778 (G-20-120-3)

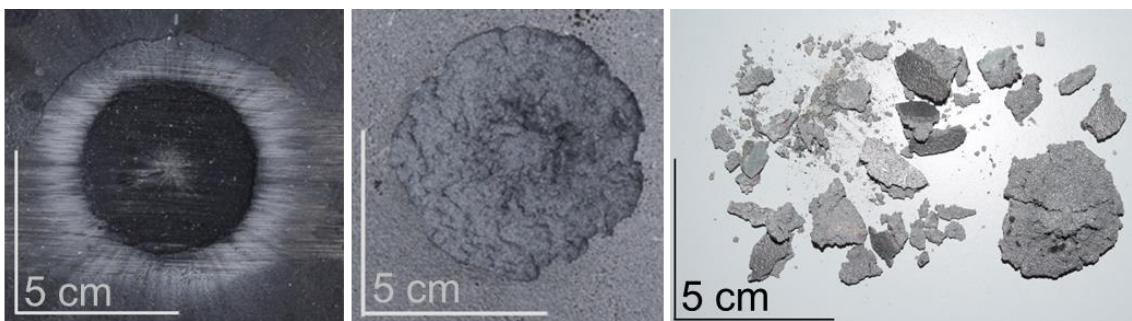


Abb. 5.9 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX779 (G-20-50-3)

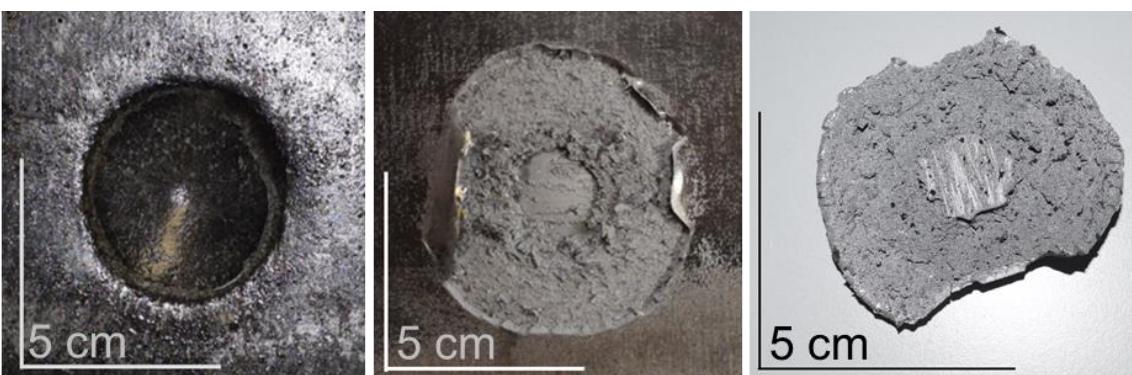


Abb. 5.10 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX780 (S-20-50-3)

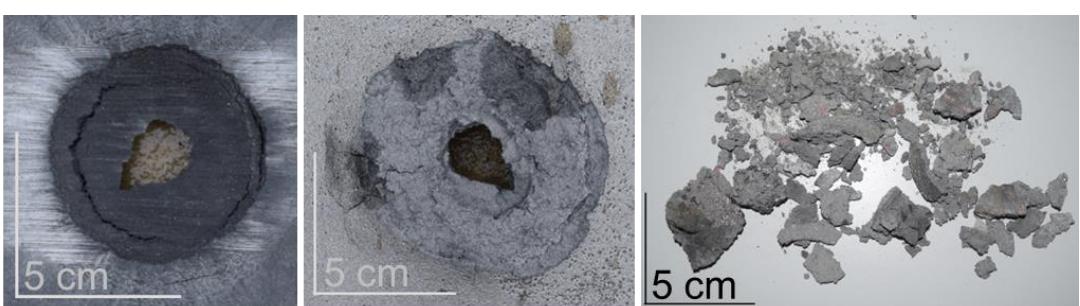


Abb. 5.11 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX781 (G-20-100-3)

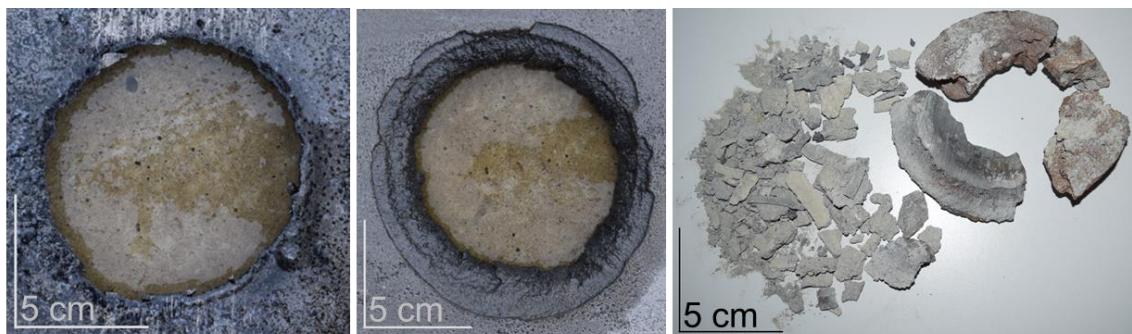


Abb. 5.12 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX782 (G-20-200-3)

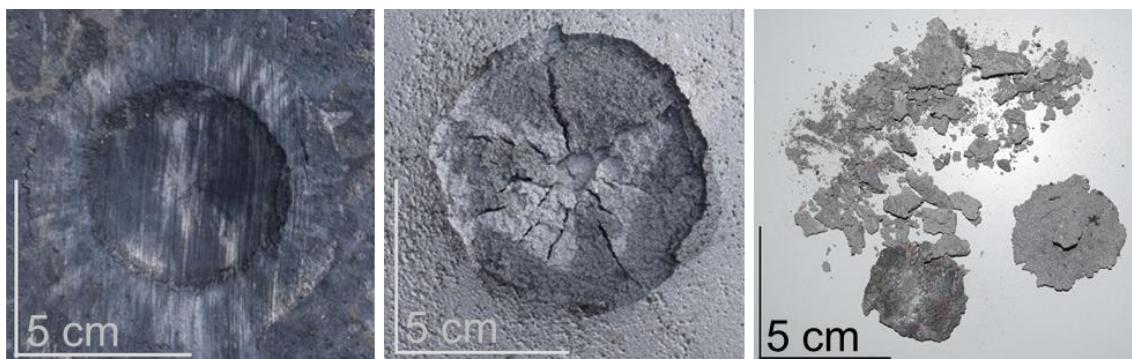


Abb. 5.13 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX783 (G-20-100-2)

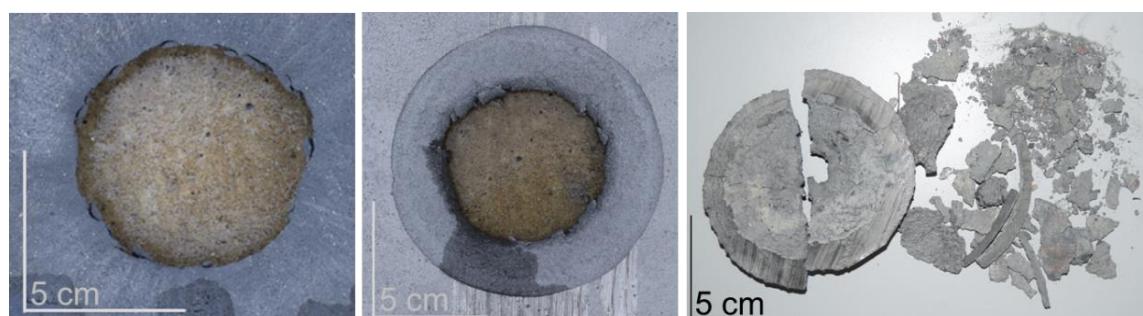


Abb. 5.14 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX784 (G-20-120-2)

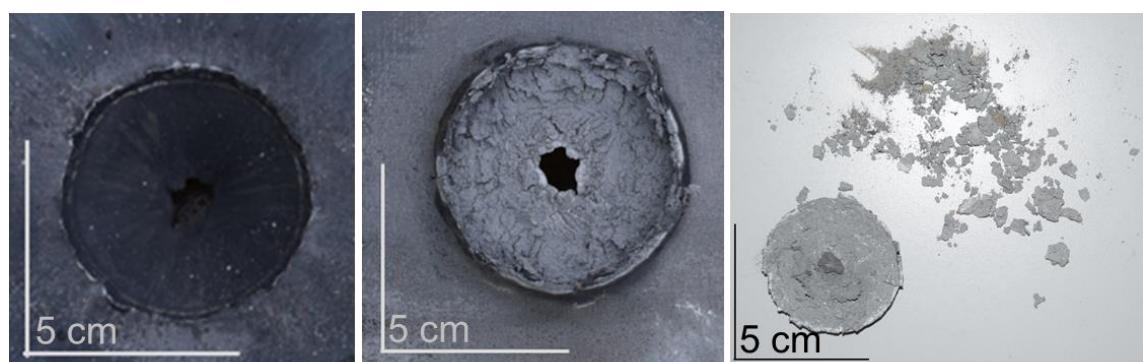


Abb. 5.15 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX785 (S-20-200-1)

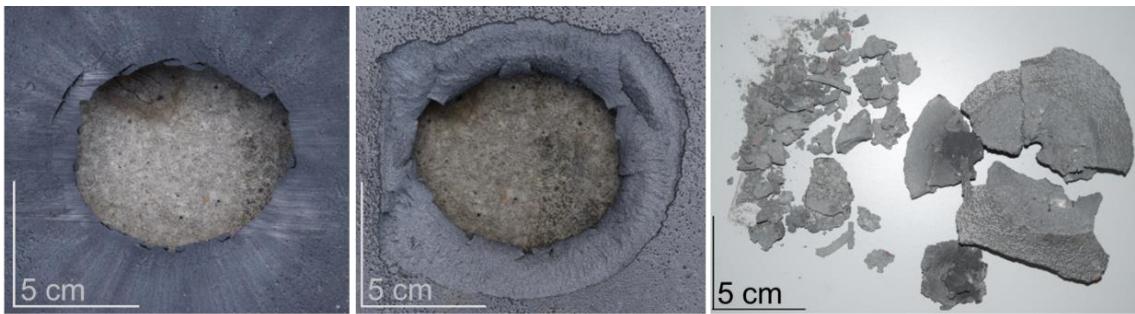


Abb. 5.16 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX786 (G-20-120-2)

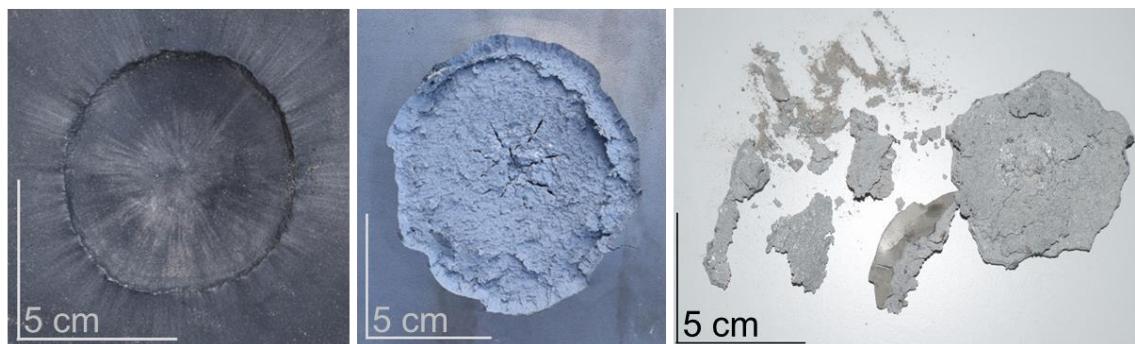


Abb. 5.17 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX787 (S-30-200-2)

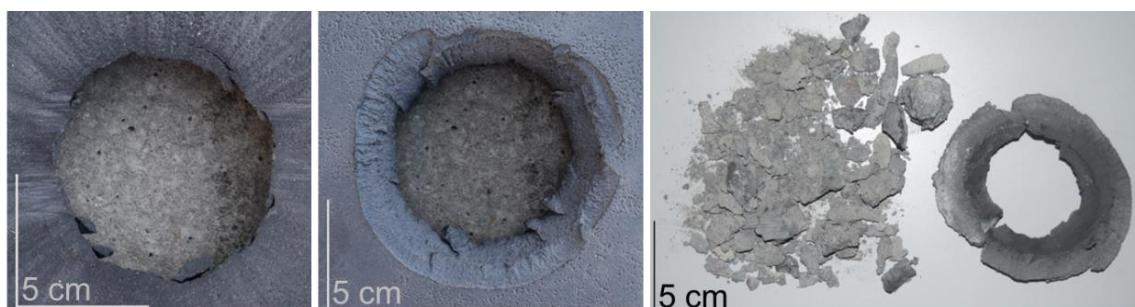


Abb. 5.18 Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX788 (G-20-200-2)

In der oben aufgeführten Fotodokumentation ist der erste Versuch FX770 aufgrund des unterdimensionierten Versuchsaufbaus, wie bereits oben erwähnt, nicht berücksichtigt worden.

Bei der Fotodokumentation fällt beim Vergleich der beiden Materialien S235JR und GGG40 auf den ersten Blick die unterschiedliche Geometrie des Abplatters bzw. der Abplatterfragmente auf. Bei S235JR ist es ein eher großes zusammenhängendes Fragment und beim GGG40 sind große Bestandteile dabei, allerdings überwiegt der eher feinere Anteil, dessen Wirkung einer Schrotladung ähnelt. Durch die unterschiedliche Charakteristik der Abplatter ist ein unterschiedlicher Schadenshergang bei der Kollision

mit dem Probekörper zu erwarten. Beim zusammenhängenden Fragment wird die Energie an einer Stelle in den Probekörper eingeleitet, wohingegen bei vielen kleineren Fragmenten die Energie dementsprechend an vielen unterschiedlichen Stellen des Probekörpers eingeleitet wird.

Der Versuch FX786 ist eine Wiederholung des Versuchs FX784. Der einzige Unterschied stellt die Ausrichtung der GGG40-Platte dar. In allen Versuchen mit GGG40 wird die Sprengladung auf die angeschliffene Fläche, die vermutlich die Position des Angusses bzw. Steigers im Herstellungsprozess markiert, positioniert. Diese Position befindet sich mittig auf der Metallplatte. Bei Versuch FX784 wurde die angeschliffene Fläche nach unten gerichtet. Bei einem Vergleich der beiden Fotodokumentationen fällt zunächst auf, dass die Charakteristik des Abplatzers ähnlich ist. Allerdings fallen bei Versuch FX786 (G-20-120-2) sowie bei allen anderen Versuchen mit GGG40, wo die angeschliffene Fläche nach oben gerichtet ist, Risse auf, die im Versuch FX784 (G-20-120-2) nicht vorliegen. Weiter fällt auf, dass die Risse stets entlang der Grenze der angeschliffenen Fläche verlaufen, obwohl jeweils ein unterschiedlicher Durchmesser der Risse und somit der angeschliffenen Fläche vorliegt. Eine Ausnahme bilden hier FX782 (G-20-200-3), bei dem D_{OP} so groß ist, dass die angeschliffene Fläche nicht mehr sichtbar ist, und FX784 (G-20-120-2), bei dem die angeschliffene Fläche nach unten gerichtet ist. Eine mögliche Erklärung für das Auftreten dieser Risse sind eingebrachte Eigenspannungen oder Erstarrungssphänomene beim Herstellungsprozess der GGG40-Platten. Beim Übergang von dem Anguss bzw. Steiger zur restlichen Platte, der wahrscheinlich über die angeschliffene Fläche angedeutet ist, können bei der Herstellung ungünstige Eigenspannungen bzw. Gefügeausbildungen entstehen, die eine Rissbildung begünstigen. Genauere Angaben zur Herstellung der GGG40-Platten liegen nicht vor.

Weiter ist jeweils ein Wiederholungsversuch mit S235JR und einer mit GGG40 durchgeführt worden. Bei dem Wiederholungsversuch mit S235JR handelt es sich um die Versuche FX773 und FX774 (S-30-200-3). Bei einem Vergleich des Schadens und den dazugehörigen Werten aus Tab. 5.1 wird eine klare Ähnlichkeit bzw. Übereinstimmung deutlich. Dies ist auf die gleichen Parameter bei den beiden Versuchen zurückzuführen und macht deutlich, dass der verwendete Versuchsaufbau reproduzierbare Ergebnisse ermöglicht. Bei dem Wiederholungsversuch mit GGG40 handelt es sich um die Versuche FX784 und FX786 (G-20-120-2). Bei Betrachtung der Werte in Tab. 5.1 fallen hier die deutlich größeren Werte der Durchmesser beim Versuch FX786 auf. Diese Abweichung

lässt sich aufgrund von mangelnder Datenlage zur Herstellung bzw. fehlender Materialanalysen nicht begründen. Mutmaßlich kann der Herstellungsprozess und die damit einhergehenden Eigenspannungen bzw. Erstarrungsprozesse am Anguss bzw. Steiger dafür ursächlich sein.

5.2 Probekörper

Die Abplatzerfragmente der Metallplatte trafen mit einer gewissen kinetischen Energie auf die Probekörper auf, die dadurch Schaden nahmen. Um das Ausmaß des Schadens charakterisieren zu können, wurden Siebungen für jeden Versuch mit einem Siebturm mit den Maschenweiten 0,063 mm, 0,0125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm und 16 mm durchgeführt. Dazu wurde der Stahltopf nach jedem Versuch mit einem Industriesauger (Bosch GAS 55 M AFC) ausgesaugt und das aufgesaugte Material des Versuchs separat gesammelt. Der Siebturm mit den unterschiedlichen Sieben und Maschenweiten ist in Abb. 5.19 zu sehen. Die Masse des Siebguts einer jeden Maschenweite wurde anschließend mit einer Waage Precisa XT 620M (Max. 620 g, Ablesegenauigkeit 0,001 g und Eichwert 0,01 g) dokumentiert. Die Übersicht der Massen der einzelnen Siebfragmente ist in Abschnitt 6.2 zu finden.

In Abb. 5.19 sind rechts zwei neu angeschaffte Siebe mit den Maschenweiten 0,063 mm und 0,125 mm und links die restlichen Siebe der Firma Curt Weissgerber GmbH dargestellt. Ein aktuelles Prüfzertifikat und damit Angaben zur Genauigkeit der Siebe liegt nicht vor.



Abb. 5.19 Siebturm mit unterschiedlichen Sieben

In Abb. 5.20 ist eine Übersicht der Siebfragmente der einzelnen Versuchsreihen der zweiten Kampagne abgebildet. Eine vergleichbare Übersicht der ersten Kampagne liegt nicht vor. Ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Plattenmaterialien mit sonst gleichen Parametern ist aufgrund der fehlenden Fotodokumentation der Siebfragmente aus der ersten Kampagne in Abb. 5.20 lediglich für die Versuche FX779 (G-20-50-3) und FX780 (S-20-50-3) der zweiten Versuchskampagne möglich. Die Betrachtung der einzelnen Massen erfolgt in Abschnitt 6.2.

Ein direkter Vergleich des Einflusses der Ladungsgeometrie auf den Beton-Probekörper ist bei den Versuchen mit GGG40 mit drei unterschiedlichen Ladungsmassen möglich. Dabei variierte das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser der Sprengladung von 1:3 zu 1:2. Bei den Versuchen FX781 (G-20-100-3) und FX783 (G-20-100-2) wurde eine Ladungsmasse von 100 g verwendet. Ein Vergleich der Abbildungen in Abb. 5.20 zeigt, dass bei einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von 1:3 ein Kegelstumpf <16 mm zurückblieb.

Bei den Versuchen FX779 (G-20-50-3), FX781 (G-20-100-3), FX778 (G-20-120-3) und FX782 (G-20-200-3) wurde bei sonst gleichen Parametern die Ladungsmasse erhöht. Bei einem direkten Vergleich fällt auf, dass durch die Erhöhung der Ladungsmasse der Anteil an größeren Siebfragmenten reduziert und zu feineren Siebfragmenten verschoben wurde. Weiter ist ersichtlich, dass bis auf den Versuch mit 200 g Ladungsmasse ein

Kegelstumpf >16 mm zurückblieb. Bei allen anderen Versuchen mit anderen Ladungsverhältnissen ist ein solcher Kegelstumpf lediglich bei FX785 (G-20-200-1) und der An-
satz eines Kegelstumpfes bei FX786 (G-20-120-2) vorhanden.

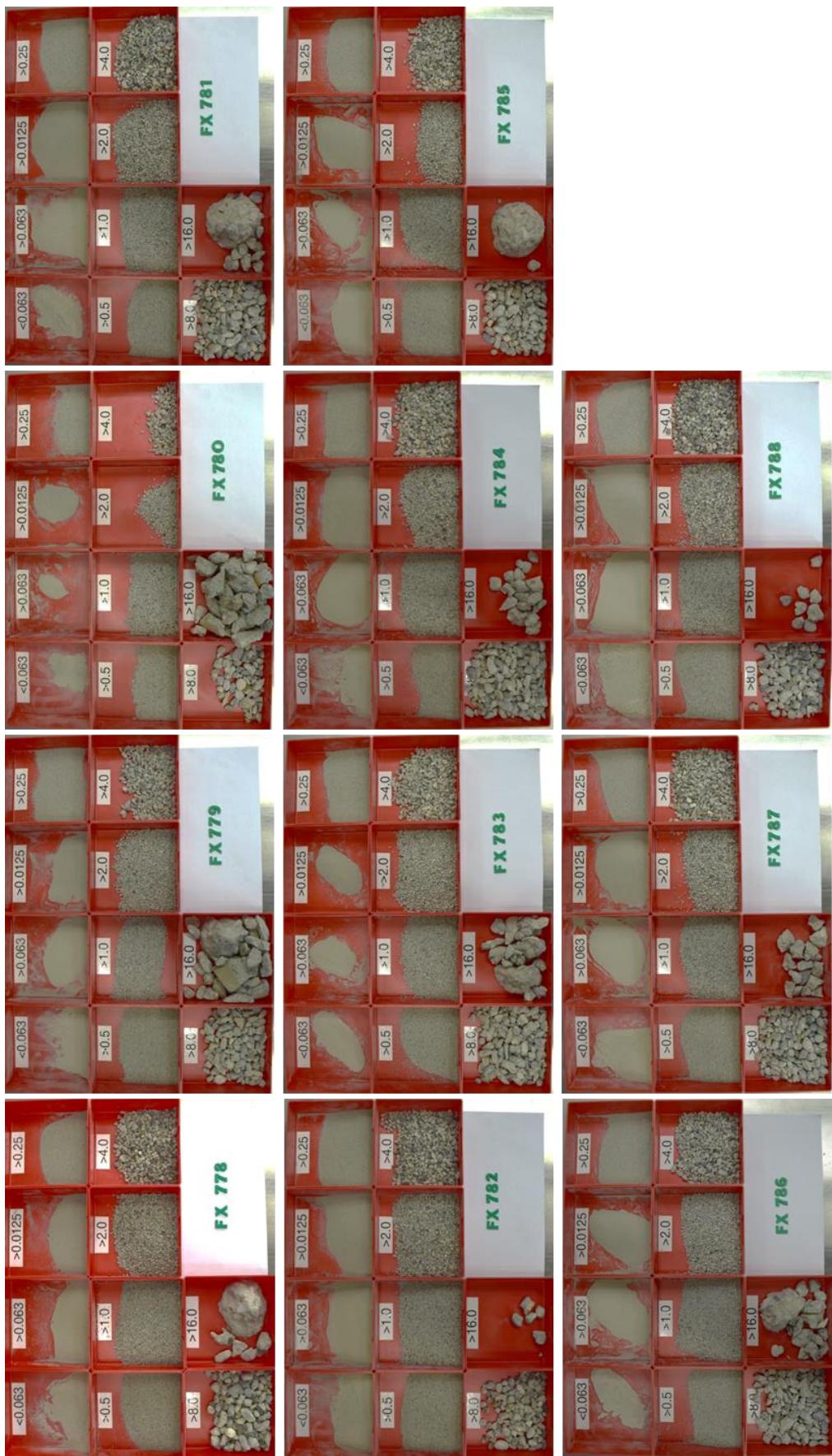


Abb. 5.20 Übersicht der Siebfragmente der zweiten Kampagne

5.3 Qualitativer Vergleich mit Versuchen aus /GRS 16b/

Ein Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens war, Versuche aus /GRS 16b/ zu reproduzieren und daran anzuknüpfen. Zu diesem Zweck wurden einzelne Versuche mit passenden Parametern zum direkten Vergleich identifiziert. Diese werden im Folgenden qualitativ verglichen.

Versuch 3 aus /GRS 16b/ ist vergleichbar mit FX780 (S-20-50-3) im aktuellen Forschungsvorhaben. Die Versagensbilder sind in Abb. 5.21 und Abb. 5.22 dargestellt. Sie zeigen, dass die Metallplatten ein hinsichtlich Form und Art des Versagens qualitativ gleiches Schadensbild aufweisen. Die gemessenen Werte D_{OP} , s und D_{HP} weisen bei dem Versuch 3 aus /GRS 16b/ im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem aktuellen Forschungsvorhaben leicht höhere Werte auf ($\Delta D_{OP} = 3,5 \text{ mm}$, $\Delta s = 2,4 \text{ mm}$ und $\Delta D_{HP} = 6 \text{ mm}$), was eine leicht abweichende Ladungsgeometrie vermuten lässt.

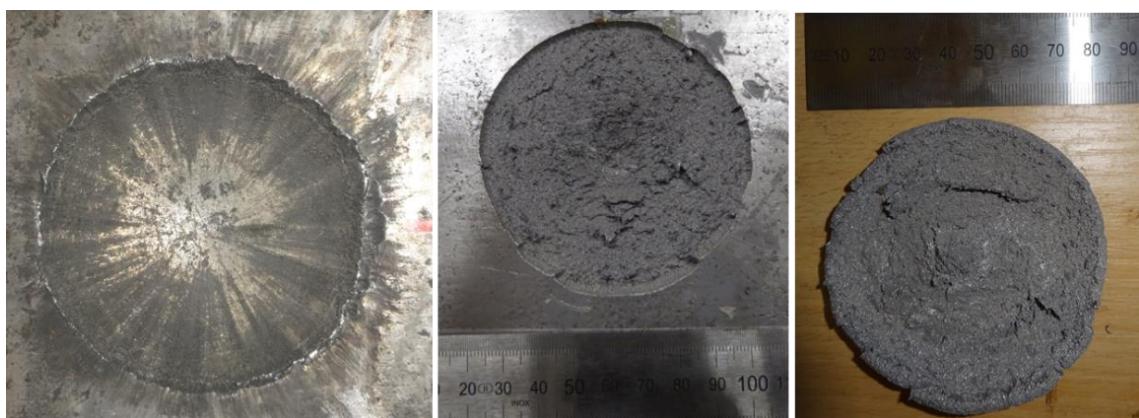


Abb. 5.21 Versagensbild der Metallplatte von Versuch 3 aus /GRS 16b/

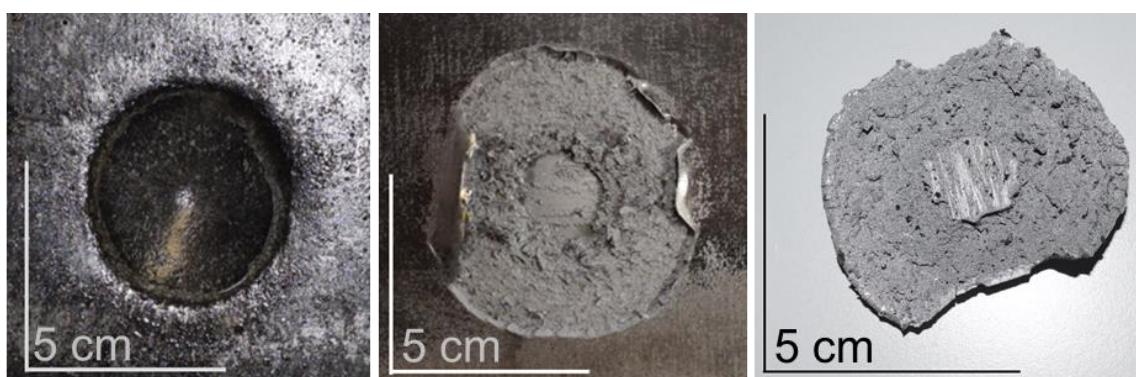


Abb. 5.22 Versagensbild der Metallplatte von FX780 (S-20-50-3)

In Versuch 3 aus /GRS 16b/ blieb wie in Abb. 5.23 zu sehen ein Kegelstumpf zurück, der in dem Versuch FX780 nicht vorhanden war. In Abb. 5.20 sind einige größere Fragmente

>16mm zu erkennen, die jedoch lose sind und keinen zusammenhängenden Kegelstumpf bilden.



Abb. 5.23 Kegelstumpf des Probekörpers von Versuch 3 aus /GRS 16b/

Versuch 4 aus /GRS 16b/ ist vergleichbar mit FX772 (S-20-200-3). Die zugehörigen Bilder sind in Abb. 5.24 und Abb. 5.25 zu sehen. Das Versagen entspricht in beiden Fällen der Mode III. Bei Versuch 4 hatte sich der Ring von der Platte abgelöst und lag lose neben dem Abplatzer. Beim Versuch FX772 ist der Ring wiederum noch mit der Platte fest verbunden. Der Ring ist anhand der vorhandenen Risse eindeutig zu identifizieren. Der Wert für D_{OP} ist beim Versuch 4 mit 8 mm größer als im aktuellen Forschungsvorhaben. Die gleiche Tendenz spiegelt sich im D_{HP} wider. Hier ist der Wert um 4 mm größer, was sich auf b_{Ring} auswirkt, der mit 3 mm ebenfalls in Versuch 4 größer ist. Der Wert für D_L hingegen ist bei FX772 um 6 mm größer. Der größere Durchmesser auf der Sprengseite lässt auch hier darauf schließen, dass das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser der Ladung nicht wie bei Versuch FX772 1:3 entsprach. Die Differenzen im Lochdurchmesser D_L und im Abplatzerdurchmesser D_{HP} sind so gering, dass sie aufgrund von Streuung der Materialeigenschaften in der Metallplatte ähnliche Versagensbilder liefern. Sowohl in Versuch 4 als auch in FX772 ist kein Kegelstumpf des Probekörpers zurückgeblieben, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterstreicht.



Abb. 5.24 Versagensbild der Metallplatte von Versuch 4 aus /GRS 16b/

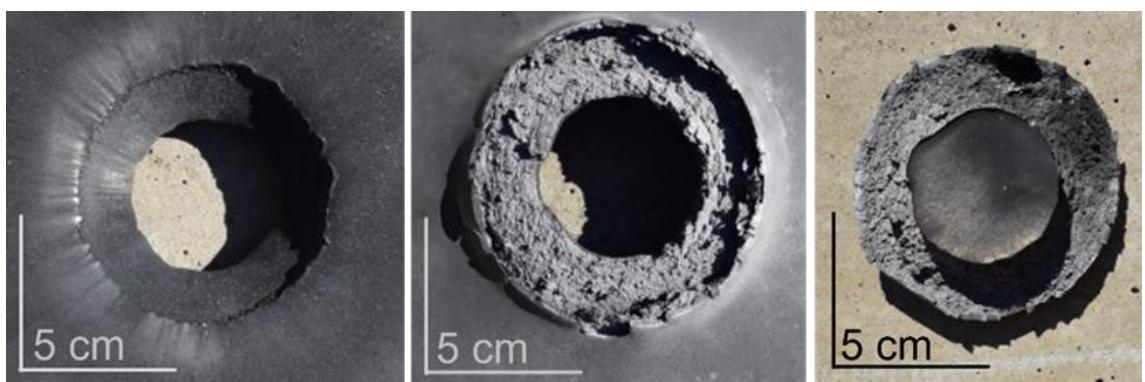


Abb. 5.25 Versagensbild der Metallplatte von FX772 (S-20-200-3)

Versuch 8 aus /GRS 16b/ ermöglicht einen Vergleich mit dem Versuch FX771 (S-20-120-3). Die dazugehörigen Bilder sind in Abb. 5.26 und Abb. 5.27 dargestellt. Auch hier entspricht die Versagensform der Mode III. Bei Versuch 8 liegt der Wert für D_{OP} mit 75 mm und D_L mit 45 mm etwas höher als bei Versuch FX771 im aktuellen Forschungsvorhaben. Der Wert für D_{HP} mit 90-95 mm hingegen ist geringfügig kleiner als beim Versuch FX771. Ein Kegelstumpf des Probekörpers lässt sich in beiden Versuchen wiederfinden.



Abb. 5.26 Versagensbild der Metallplatte von Versuch 8 aus /GRS 16b/

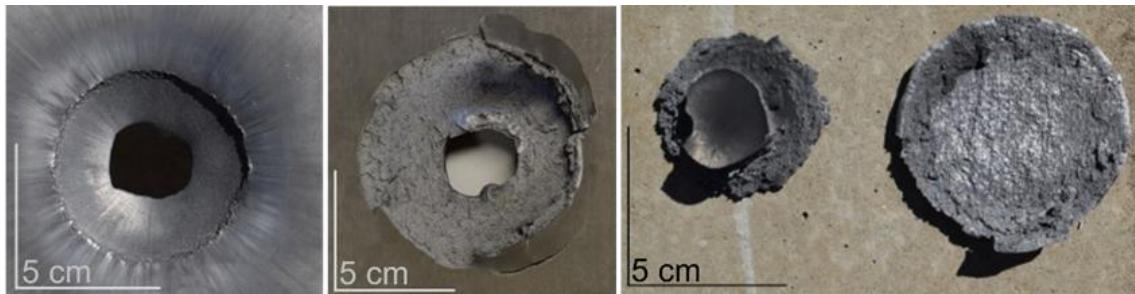


Abb. 5.27 Versagensbild der Metallplatte von FX771 (S-20-120-3)



Abb. 5.28 Kegelstumpf des Probekörpers von Versuch 8 aus /GRS 16b/

Der Vergleich der Werte für D_{OP} zwischen den Versuchen aus /GRS 16b/ (Versuche 3, 4 und 8) und den Versuchen aus dem aktuellen Forschungsvorhaben (Versuche FX780, FX772 und FX771) legt die Vermutung nahe, dass die in /GRS 16b/ genutzte Ladungsgeometrie nicht der im aktuellen Forschungsvorhaben verwendeten entspricht. Angaben zur Ladungsgeometrie sind in dem Abschlussbericht /GRS 16b/ nicht erwähnt. In /FER 19/ und /HEY 23/, bei denen ebenfalls mit aufgelegtem Sprengstoff gearbeitet wurde, entspricht der Ladungsdurchmesser in etwa dem Krater auf der Metallplatte D_{OP} . Unter der Annahme, dass ein vergleichbarer Sprengstoff benutzt wurde wie in

/GRS 16b/, müsste die Ladungsgeometrie aus /GRS 16b/ einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser 1:4 entsprechen, wenn die leicht größeren Werte des D_{OP} in den drei Versuchen aus /GRS 16b/ herangezogen werden. Die geringen Differenzen bei den Durchmessern von D_L und D_{HP} können z. B. auf Materialeigenschaften des Baustahls S235JR zurückgeführt werden. Die genormten Grenzen für einen Baustahl erlauben einen Spielraum bei der Herstellung. Die Versagensform der Metallplatte aus /GRS 16b/ ist unter Berücksichtigung der möglichen geringen Abweichung in der Ladungsgeometrie vergleichbar. In den folgenden Kapiteln gilt es, die Simulationsergebnisse sowie die Ergebnisse für die Freisetzung zu vergleichen.

6 Quantitative Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse von Massen, Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskameras und Siebung quantitativ analysiert und ausgewertet.

6.1 Metallplatte

Bei Betrachtung der Wirkung des Sprengstoffes auf die Metallplatte im Hinblick auf die numerische Bestimmung der einwirkenden Energie auf den Probekörper sind speziell die Impaktgeschwindigkeit und die Masse des auf den Probekörper wirkenden Abplatzers von Interesse. Bei dem aktuellen Versuchsaufbau ist die Wirkungsrichtung aufgrund der Anordnung von Metallplatte und Probekörper vertikal. Somit ist es notwendig, sowohl die potenzielle als auch die kinetische Energie zu betrachten. Aus den Versuchen in /GRS 16b/, speziell dem Versuch 4 aus Tab. 4.1 wird in dem Abschlussbericht eine mittlere Geschwindigkeit \bar{v} von 236 m/s und eine Abplatzermasse m_{Ab} von 427 g angegeben. Der Abstand s zwischen der Metallplatte und dem Probekörper betrug 33 mm. Mit diesen Werten lassen sich die potenzielle Energie E_{pot} (Gl. 2.10) und die kinetische Energie E_{kin} (Gl. 2.8) bestimmen:

$$E_{pot} = m_{Ab} * g * h = 0,427 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,033 \text{ m}$$

$$E_{pot} = 0,138 \text{ J}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m_{Ab} * v^2 = \frac{1}{2} * 0,427 \text{ kg} * \left(236 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$E_{kin} = 11891 \text{ J}$$

Ein Vergleich der Ergebnisse beider Energien verdeutlicht, dass die potenzielle Energie sehr viel kleiner als die kinetische Energie ist und somit näherungsweise bei einer Sprengstoffmasse von 200 g vernachlässigt werden kann. Bei einer Sprengstoffmasse von 50 g wie es in Versuch 3 der Fall ist, ergeben sich Werte für die mittlere Geschwindigkeit \bar{v} von 143 m/s und eine Abplatzermasse m_{Ab} von 157 g. Daraus ergeben sich Werte für die potenzielle Energie von $E_{pot} = 0,051 \text{ J}$ und für die kinetische Energie von $E_{kin} = 1605 \text{ J}$. Auch bei der geringsten Sprengstoffmasse besteht immer noch eine Differenz von vier Größenordnungen und somit ist die potenzielle Energie näherungsweise vernachlässigbar.

Die Masse der Abplatzer wird nach den jeweiligen Versuchen mittels Wägung bestimmt. Der Fehler durch Verlust einzelner Fragmente kann abgeschätzt werden, indem die Metallplatten vor und nach dem Versuch gewogen werden. Im Idealfall sollte die Differenz der Abplatzermasse entsprechen. Die Werte für die Massen sind Tab. 6.1 für S235JR und Tab. 6.2 für GGG40 zu entnehmen.

Tab. 6.1 Massen Metallplatte S235JR

Bezeichnung EMI	Kürzel	Masse Metallplatte vorher m_{PV} / [kg]	Masse Restplatte nachher m_{PN} / [kg]	Masse Abplatzer m_{Ab} / [g]	Differenz $m_{PV} - (m_{PN} + m_{Ab})$ / [g]	Relative Abweichung / [Ma.- %]
FX770	S-20-120-3	14,060	13,800	250	10	0,07
FX771(*)	S-20-120-3	14,036	13,772	252	12	0,09
FX772	S-20-200-3	14,064	13,592	448	24	0,17
FX773	S-30-200-3	21,088	20,580	484	24	0,11
FX774(*)	S-30-200-3	21,062	20,508	526	28	0,13
FX775	S-20-100-3	14,034	13,778	240	16	0,11
FX776	S-20-200-2	14,034	13,714	288	32	0,23
FX780	S-20-50-3	14,072	13,952	115	5	0,04
FX785	S-20-200-1	14,066	13,930	127,1	8,9	0,06
FX787	S-30-200-2	21,060	20,638	402,7	19,3	0,09

(*) Wiederholungsversuch

Tab. 6.2 Massen Metallplatte GGG40

Bezeichnung EMI	Kürzel	Masse Metallplatte vorher m_{PV} / [kg]	Masse Restplatte nachher m_{PN} / [kg]	Masse Abplatzer m_{Ab} / [g]	Differenz $m_{PV} - (m_{PN} + m_{Ab})$ / [g]	Relative Abweichung / [Ma.- %]
FX778	G-20-120-3	13,218	12,860	245,2	112,8	0,85
FX779	G-20-50-3	13,242	13,108	121,9	12,1	0,09
FX781	G-20-100-3	13,230	12,964	256,8	9,2	0,07
FX782	G-20-200-3	13,130	11,798	1016,0	316,0	2,4
FX783	G-20-100-2	13,102	12,968	110,3	23,7	0,18
FX784	G-20-120-2	13,070	12,202	827,0	41,0	0,31
FX786(*)	G-20-120-2	13,062	11,996	1047,6	18,4	0,14
FX788	G-20-200-2	13,150	12,110	982,8	57,2	0,43

(*) Wiederholungsversuch

Die Masse der nicht wiedergefundenen Bruchstücke, die in beiden Tabellen jeweils in der vorletzten Spalte aufgeführt ist, weist bei S235JR mit 5-32 g im Gegensatz zu GGG40 mit 12-316 g eine deutlich geringe Spannweite auf. Diese unterschiedliche Spannweite ist auf die unterschiedliche Versagensart der beiden verwendeten Materialien zurückzuführen. Wie in Kapitel 5 zu sehen ist, besteht in der Regel der Abplatzer bei den Versuchen mit S235JR nach dem Ablösen von der Metallplatte aus einem zusammenhängenden Stück mit einem Ring. Beim GGG40 hingegen liegen viele kleinere Bruchstücke vor. Mit einer höheren Anzahl an Fragmenten steigt die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Fragmente nicht wieder zu finden sind, wie es bei GGG40 der Fall ist. Bis auf zwei Versuche FX778 und FX782, bei denen die Differenz 112,8 g bzw. 316,0 g beträgt, unterscheiden sich die Verlustmengen der beiden Materialien nur geringfügig. Dies wird durch die geringen relativen Abweichungen, aufgeführt in der letzten Spalte der beiden Tabellen, nochmals unterstrichen. Aus Tab. 6.1 und Tab. 6.2 geht hervor, dass die bei S235JR im Durchschnitt ca. 0,1 % und bei GGG40 ca. 0,6 % verloren gehen. Die durchschnittlichen Verlustmengen sind mit unter einem Prozent sehr gering.

Die Geschwindigkeit, die für die Ermittlung der auf den Beton-Probekörper wirkenden kinetischen Energie notwendig ist, ist ein Maß für die zurückgelegte Strecke des Abplatzers in einer gewissen Zeit. Aufgrund der hohen Bildrate der Hochgeschwindigkeitskameras von 100.000 fps ist das Zeitintervall zwischen den einzelnen Frames mit 0,01 ms ausreichend klein, so dass der vereinfachte Ansatz zur Geschwindigkeitsbestimmung ohne Berücksichtigung der Beschleunigung mit

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} \quad (6.1)$$

v	Geschwindigkeit
Δr	zurückgelegter Weg
Δt	verstrichene Zeit
t_1	Zeitpunkt 1
t_2	Zeitpunkt 2
r_1	Ort zum Zeitpunkt t_1
r_2	Ort zum Zeitpunkt t_2

gewählt wurde. Die Geschwindigkeit der Abplater wurde graphisch ausgewertet. Dazu wurden einzelne Bildsequenzen, in denen die Bewegung der Abplater zu sehen ist, aus den Videos extrahiert. Anschließend wurden horizontale Geraden an die verschiedenen Positionen der Fragmente der extrahierten Bildsequenzen angelegt (vgl. Abb. 6.1).

Durch Bildung des Quotienten des Abstandes zweier Geraden aufeinanderfolgender Bildsequenzen und der zeitlichen Differenz dieser beiden Bildsequenzen wurde die Geschwindigkeit ermittelt (vgl. Gl. (6.1)).

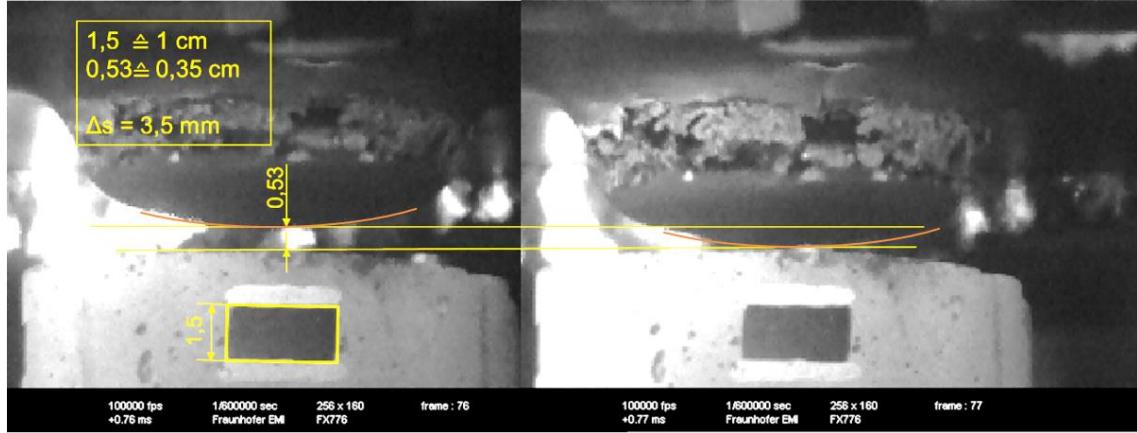


Abb. 6.1 Beispiel Bildauswertung anhand FX776_out1_Frame 77-78

Der tatsächliche Abstand der beiden Geraden wurde mithilfe der Referenzmarkierungen von 1 cm, die wie in Abb. 6.2 auf jeden Probekörper um 90° – eine für jede Kamera – versetzt angebracht war, berechnet.



Abb. 6.2 Probekörper mit Referenzmarkierungen

Bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ist es wichtig, einen Kompromiss zwischen der Bildrate und der Bildqualität zu finden, da eine höhere Bildrate eine niedrigere Bildqualität bedingt und eine höhere Bildqualität eine niedrigere Bildrate. Aufgrund der für die Anforderungen in diesem Forschungshaben notwendigen hohen Bildrate von 100.000 fps fiel bei den Aufnahmen die Bildqualität relativ gering aus. Die Aufnahmen haben eine Auflösung von 256x160 Pixel. Von Versuch zu Versuch variiert die Position der Hochgeschwindigkeitskameras minimal, wodurch sich der Abstand der Hochge-

schwindigkeitskameras zu dem Probekörper ändert. Bei der grafischen Geschwindigkeitsbestimmung wird ein Fehler durch das Anlegen der beiden Geraden an die Positionen der Fragmente und Ablesen des Abstandes bei einer Strichstärke von 0,44 mm, was bei dem Bildformat etwa einem Pixel entspricht, mit $\pm 0,5$ Pixel angenommen. Die Umrechnung der Bildhöhe auf die Einheit cm/Pixel erfolgt über die Referenzmarkierung. Der Abstand des halben Pixels durch die Anlegegenauigkeit der Geraden, wie in Abb. 6.1 zu sehen ist, kann durch die Zeitdifferenz zwischen den beiden Bildsequenzen nach Gleichung (6.1) dividiert und so ein Wert für den absoluten Fehler der Geschwindigkeit ermittelt werden. Es sind absolute Fehler der ermittelten Geschwindigkeiten mit 20-33 m/s zu erwarten. Die Genauigkeit der Zeitmessung ist nicht bekannt und fließt somit nicht in die Fehlerbetrachtung ein. Die ermittelten Geschwindigkeiten mit Fehlerbetrachtung sind der Tab. 6.3 zu entnehmen.

Tab. 6.3 Übersicht Geschwindigkeiten der Abplatzer

Bezeichnung EMI	Kürzel	Geschwindigkeit / [m/s]	Absoluter Fehler Geschwindigkeit / [m/s]	Relativer Fehler Geschwindigkeit / [%]
FX780	S-20-50-3	140	27	19,3
FX775	S-20-100-3	220	23	10,5
FX770/ FX771(*)	S-20-120-3	270	33	12,3
FX772	S-20-200-3	310	23	7,5
FX773/ FX774(*)	S-30-200-3	230(**)	-	
FX787	S-30-200-2	286	24	8,4
FX776	S-20-200-2	370	22	6,0
FX785	S-20-200-1	391	23	5,9
FX779	G-20-50-3	200	24	12,0
FX781	G-20-100-3	200	27	13,5
FX778	G-20-120-3	240	24	10,0
FX782	G-20-200-3	260	27	10,4
FX783	G-20-100-2	210	25	12,0
FX784/ FX786(*)	G-20-120-2	349/225	31/29	8,9/12,9
FX788	G-20-200-2	240	30	12,5

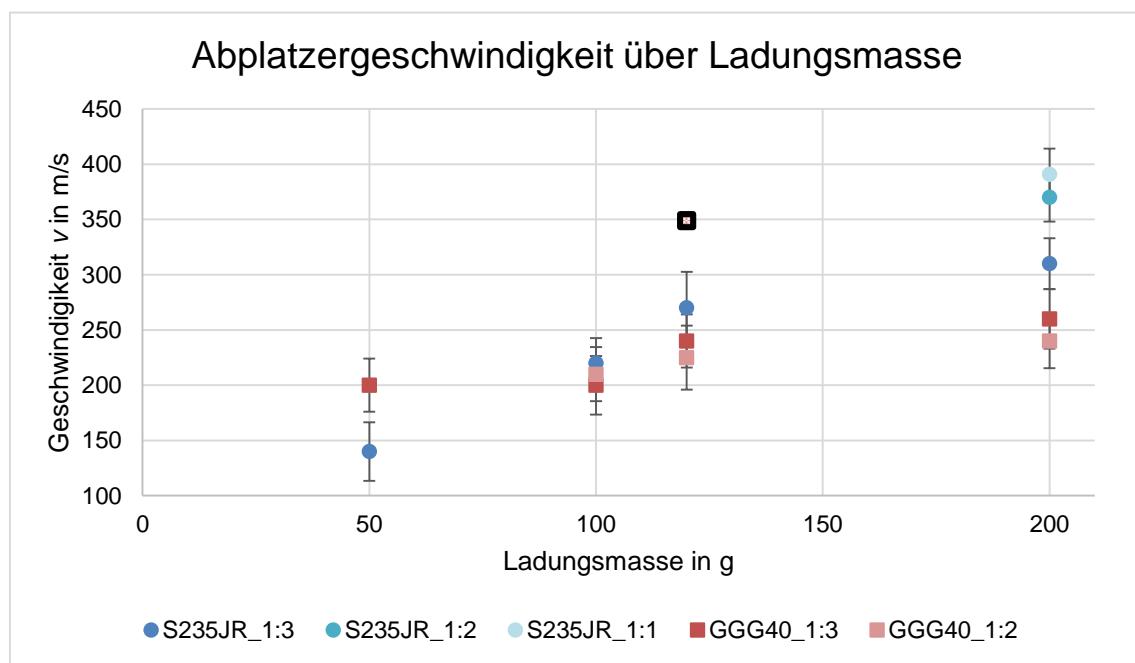
(*) Wiederholungsversuch

(**) Auswertung der Aufnahmen FX773 nicht möglich, deswegen Annahme, dass sich die Geschwindigkeit ähnlich verhält wie mit der anderen 30 mm dicken Platte (FX774)

In Abb. 6.3 sind die Geschwindigkeiten über die Ladungsmasse aufgetragen und es ist zu sehen, dass zum einen die Geschwindigkeit mit höherer Ladungsmasse zunimmt und zum anderen, dass die Ladungsgeometrie einen Einfluss auf die Abplatzergeschwindigkeit hat.

Bei den Versuchen mit GGG40 fällt bei den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auf, dass bevor größere Bruchstücke der Metallplatte, die eine Zerstörung des Probekörpers hervorrufen, auf den Probekörper treffen, eine Staubwolke entsteht. Aufgrund der Staubwolke sind die fliegenden Bruchstücke kaum oder nicht zu erkennen, was die Auswertung erschwert bzw. in einigen Fällen verhindert. Die Masse der Staubpartikel ist im Vergleich zu den Fragmenten geringer und somit weisen sie aufgrund der geringeren Trägheit höhere Geschwindigkeiten auf. Dies ist in Abb. 6.3 am schwarz umrahmten Datenpunkt (Versuch FX784) zu sehen. Dieser Ausreißer weicht signifikant nach oben ab, da er die Geschwindigkeit der Staubwolke, nicht der Bruchstücke, wiedergibt.

Die ermittelte Geschwindigkeit bei den Versuchen mit GGG40 ist mit einem größeren Fehler behaftet, da die Geschwindigkeiten der einzelnen Bruchstücke variiert. Ob die in Abb. 6.3 angegebene Geschwindigkeit repräsentativ für die mittlere Geschwindigkeit der Bruchstücke ist, ist mit der gewählten Messmethodik nicht abzuschätzen, da aus den Aufnahmen nicht hervorgeht, welches der nach dem Versuch eingesammelten Bruchfragmente aufgenommen wurde.



Schwarzumrahmter Datenpunkt ist ein Ausreißer

Abb. 6.3 Diagramm Abplatzergeschwindigkeit über Ladungsmasse

6.2 Probekörper

Die Anteile für die Freisetzung luftgetragener Partikel kleiner 100 µm werden nicht direkt über ein Messgerät erfasst, sondern indirekt über eine lineare Extrapolation im doppelt logarithmischen Diagramm des kumulativen Massenanteils über dem aerodynamischen Durchmesser ermittelt. Die daraus ermittelten Anteile werden in einem weiteren Diagramm über die spezifische Energie W_m der Abplatzer aufgetragen. Der daraus entstehende mathematische Zusammenhang soll im Folgenden näher betrachtet werden, da in anderen Forschungsvorhaben ein linearer Ansatz nach Gleichung 2.15 verwendet wurde.

Eine Übersicht der Siebungen ist in Tab. 6.4 aufgeführt. Die verloren gegangene Masse ist in der letzten Spalte gelistet. Es fällt auf, dass diese sehr gering ausfällt, was darauf hindeutet, dass der verwendete Versuchsaufbau trotz der einfachen Konstruktion zuverlässige Ergebnisse liefert. Der größte Verlust ist beim Versuch FX776 (S-20-200-2) mit 15,9 g festzustellen, was einer relativen Verlustmenge von 1,03 % entspricht.

Tab. 6.4 Übersicht Siebfragmente mit Verlust

Versuchsnummer (Kürzel)	Probenmasse vorher / [g]	Einzelmassen der Fragmente / [g]						Summe der Einzelgrößen / [g]	Absoluter Fehler / [g]				
		<0,063	>0,063	>0,125	>0,25	>0,5	>1,0						
		Siebmaschenweite in mm											
		<0,063	>0,063	>0,125	>0,25	>0,5	>1,0	>2,0	>4,0	>8,0	>16,0		
FX770 (S-20-120-3)	1410	17,5	26	41	68	96	159	137	200	391	275	1410,5	-0,5
FX771 (S-20-120-3) (*)	1672	18,5	27,5	43,5	63,5	87	139	166	319	702	103	1669	3
FX772 (S-20-200-3)	1602	14,8	81,9	120,3	124,5	147	213	178	309	381,5	29	1599	3
FX773 (S-30-200-3)	1768	8,7	53,5	70,1	96,9	118,5	176	167	275,5	730	73	1769,2	-1,2
FX774 (S-30-200-3) (*)	1748	16,8	59	80,4	107	133	191	175,5	251,5	417	304,2	1735,4	12,6
FX775 (S-20-100-3)	1630	16,6	43,6	44	67,5	91,5	142	142,5	202	392	488	1629,7	0,3
FX776 (S-20-200-2)	1538	36,5	73,6	82,6	193,5	177,4	275,5	188	141,8	228,2	125	1522,1	15,9
FX778 (G-20-120-3)	1742	28	38	54,6	88	120,3	194,8	167	217	488,8	336,6	1733,1	8,9
FX779 (G-20-50-3)	1464	5,2	6,3	12,5	24,7	36	60,3	56,2	84,5	269,6	901	1456,3	7,7
FX780 (S-20-50-3)	1188	0,42	1,6	4,5	11,2	16,9	29,6	21	34,5	125,8	933	1178,52	9,48

Versuchsnummer (Kürzel)	Probenmasse vorher / [g]	Einzelmassen der Fragmente / [g]						Summe der Einzelgrößen / [g]	Absoluter Fehler / [g]
		<0,063	>0,063	>0,125	>0,25	>0,5	>1,0		
FX781 (G-20-100-3)	1658	14,3	22,6	39,9	69,2	90	143,2	138,8	232,5
FX782 (G-20-200-3)	1488	70,9	89,8	105,4	156,5	188	256,5	179,9	194,9
FX783 (G-20-100-2)	1468	16,4	16,8	26	46,5	65	104,8	97,5	148,7
FX784 (G-20-120-2)	1546	33,6	34,2	45,9	71,5	90,1	143,8	130,4	214,1
FX785 (S-20-200-1)	1288	17,5	21,8	34,2	59,2	79,7	135,3	103,5	136,9
FX786 (G-20-120-2) (*)	1590	20,6	27,3	47,1	86,4	117,6	194	164,2	199,4
FX787 (S-30-200-2)	1550	28,6	33,2	54,3	88,6	114,7	179,6	153,7	225,2
FX788 (G-20-200-2)	1626	85,3	74,1	94,7	134,3	158,3	227,9	175,3	258,9

(*) Wiederholungsversuch

Die durch die Siebmaschenweiten gegebenen geometrischen Äquivalentdurchmesser wurden anhand der Gleichung 4.1 in die aerodynamischen Durchmesser umgerechnet und anschließend wurden die kumulierten Massen der einzelnen Siebfragmente in einem Diagramm über den aerodynamischen Durchmesser aufgetragen. Die Ergebnisse sind für die Versuche mit dem Baustahl S235JR in Abb. 6.4 und für die Versuche mit dem Grauguss GGG40 in Abb. 6.5 zu sehen.

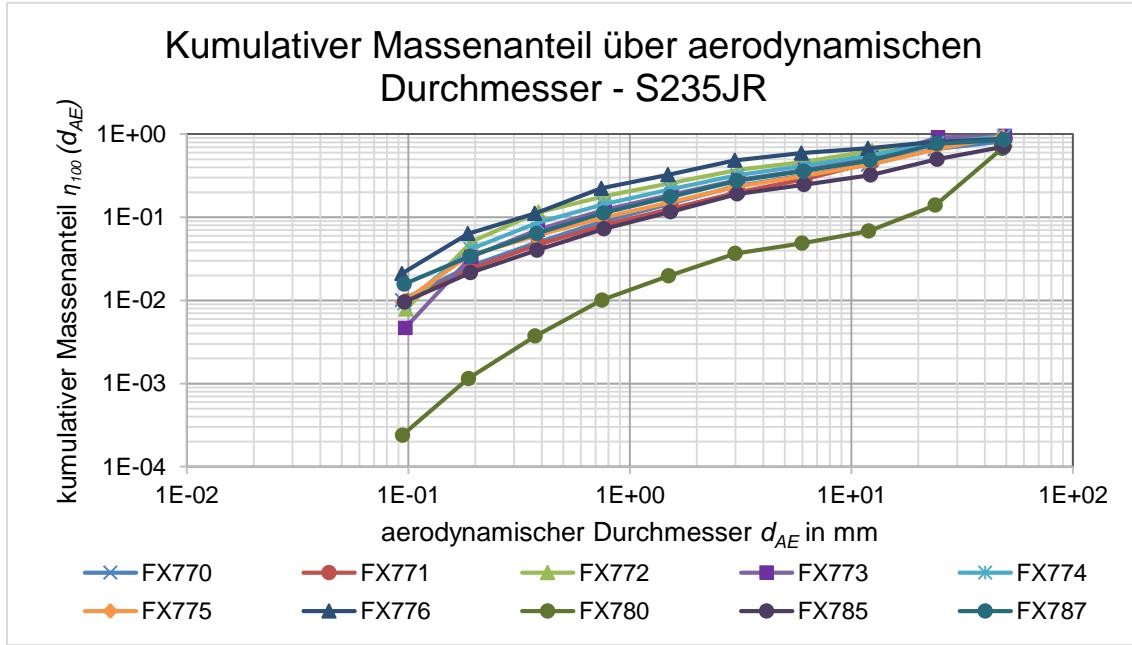


Abb. 6.4 Darstellung der Siebergebnisse für die Versuche mit S235JR

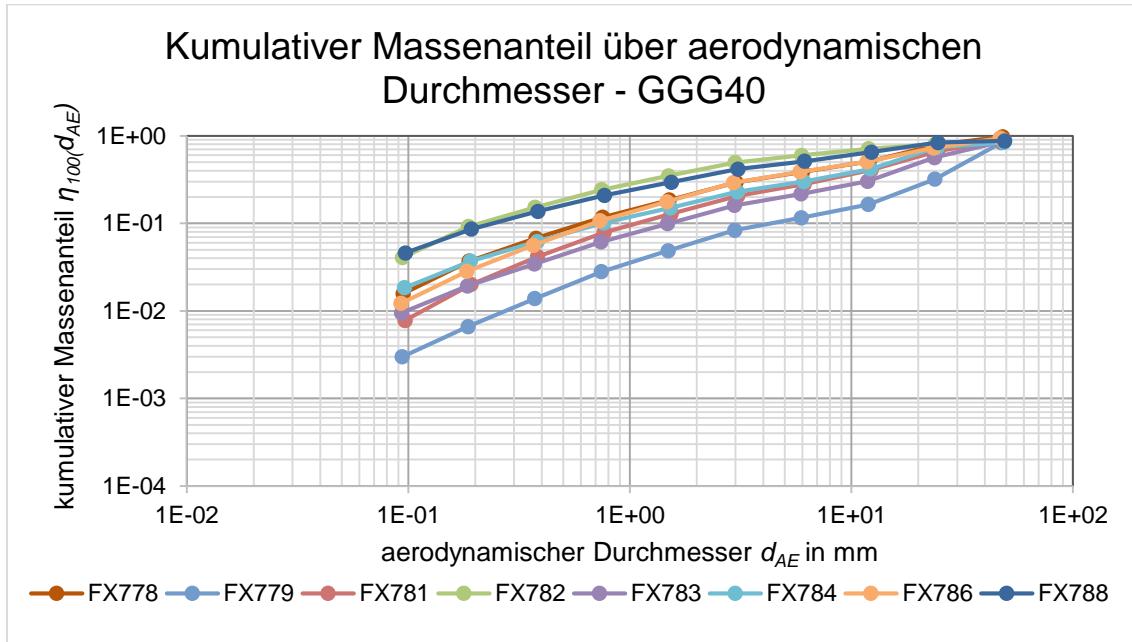


Abb. 6.5 Darstellung der Siebergebnisse für die Versuche mit GGG40

Bei einem direkten Vergleich der beiden Diagramme fallen die Verläufe mit der geringssten Ladungsmasse auf, da sie unterhalb der Kurvenschar im jeweiligen Diagramm liegen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Werte für jeweils einen Versuch nicht auf einer Gerade liegen, sondern einen leicht gekrümmten Verlauf aufweisen. Nach /NOL 06/ sollten die Verläufe, wie es in Abb. 4.1 zu sehen ist, mit einer Potenzfunktion hinreichend genau beschrieben werden können. Dies sollte bei einer doppelt logarithmischen Auftragung zu einem linearen Verlauf führen, was in beiden Diagrammen Abb. 6.4 und Abb. 6.5 nicht der Fall ist.

Das Ziel der Auswertung ist eine Extrapolation in Bereiche luftgetragener Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $d_{AE} < 0,1$ mm, da zum einen eine Extrapolation über mehrere Größenordnungen in Bereiche lungengängiger Partikel kritisch zu sehen ist und zum anderen die Ergebnisse der kleinsten Siebmaschen sich in dieser Größenordnung befinden. Bei Betrachtung der Verläufe in beiden Diagrammen ist festzustellen, dass die Werte der kumulativen Massenanteile η_{100} sich bei den luftgetragenen Partikeln $d_{AE} < 100$ µm in einem Bereich von ca. 1 % und bei einer Extrapolation in den Bereich lungengängiger Partikel $d_{AE} < 10$ µm bereits bei $\eta_{10} < 1$ % liegen. Aus Tab. 6.4 kann ein maximaler relativer Fehler durch Verlust von ca. 1 % festgestellt werden, was für den Bereich luftgetragener Teilchen einen gravierenden Einfluss darstellen kann, da der maximale relative Fehler durch den Verlust in der gleichen Größenordnung liegt wie der zu betrachtende Massenanteil der Partikel. Aufgrund der Dynamik im Stahltopf nach einer Detonation mit einem Spallationsversagen ist es wahrscheinlich, dass ein Teil aufgrund des offenen Versuchsaufbaus weggetragen wurde, was bei den Experimenten in /GRS 16b/ durch den geschlossenen Aufbau mutmaßlich weniger der Fall war. Andererseits könnten die Oberflächen des geschlossenen Raumes das Absetzen der feinen Partikel erleichtern. Die Verlustrate des Probenmaterials aus /GRS 16b/ ist vergleichbar mit den Verlustmengen in diesen Experimenten. Somit könnten die Krümmungen der Graphen auf den Verlust luftgetragener Teilchen durch den offenen Versuchsaufbau zurückzuführen sein. Ergebnisse einer Siebung eines Versuches aus /GRS 16b/ mit vergleichbaren Parametern ist in Abb. 6.6 zu sehen. Der Versuch K2_3 (blauer Verlauf) wurde mit einer Ladungsmasse von 120 g durchgeführt und die verwendeten Parameter entsprechen denen im Versuch FX771 (roter Verlauf). Beim Vergleich beider Graphen ist zu sehen, dass die Werte bei einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner 100 µm in derselben Größenordnung liegen. Dies legt nahe, dass der aktuelle offene Versuchsaufbau mit dem geschlossenen Versuchsaufbau in /GRS 16b/ vergleichbar ist.

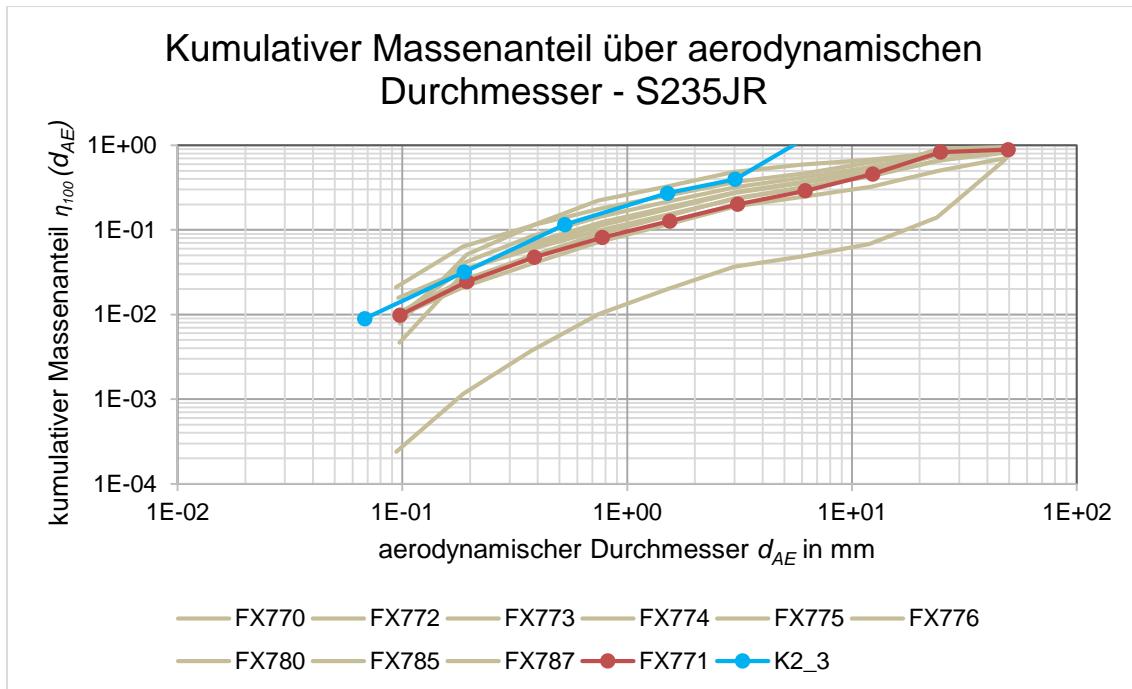


Abb. 6.6 Vergleich mit Siebung aus /GRS 16b/

Aufgrund der Verluste und dem gekrümmten Verlauf der Graphen ist eine Anwendung einer Potenzfunktion für eine Extrapolation auf $d_{AE} = 10 \mu\text{m}$ zu hinterfragen. Die Krümmung ermöglicht beim Fitten einen Spielraum. Um den Fehler zu minimieren, wird eine Extrapolation auf $d_{AE} = 100 \mu\text{m}$ durchgeführt. Dazu ist es sinnvoll, äußerste Datenpunkte nicht im Fit zu berücksichtigen, da die im mittleren Bereich liegenden Datenpunkte eher auf einer Geraden in der doppelt logarithmischen Darstellung liegen. Dieser Verlauf deutet darauf hin, dass sich die Datenpunkte durch eine Potenzfunktion mit der Form $\eta_{100} = (A \cdot d_{AE})^B$ abbilden lassen.

Es ist wahrscheinlich, dass die sehr großen und sehr kleinen Werte für d_{AE} einen größeren Einfluss auf die Steigung der Geraden haben, da sie von der Geraden, die durch die Datenpunkte im mittleren Bereich gebildet wird, abweichen. Dabei ist durch den offenen Versuchsaufbau anzunehmen, dass der Verlust im Bereich kleiner d_{AE} durch den Luftzug bzw. die Aufwirbelung stärker war, was zu einer Unterschätzung der bei dem Versuch entstandenen Massenanteile bei kleinen d_{AE} führen würde. Im Bereich großer d_{AE} könnten die großen unbeschädigten Kiesanteile die Steigung beeinflusst haben. Der Einfluss durch das Weglassen der äußeren Datenpunkte wird beispielhaft anhand des Versuchs FX780 (50 g Ladungsmasse) in Abb. 6.7 verdeutlicht. Dieser Einfluss tritt bei allen Versuchen auf. Bei dem Versuch mit 200 g Ladungsmasse (FX772) liegt eine Größenordnung zwischen den extrapolierten kumulierten Massenanteilen für $d_{AE}=10 \mu\text{m}$ für einen

Fit mit allen betrachteten Messwerte ($\eta_{10} = 0,006$) gegenüber einem Fit, bei dem jeweils die äußersten beiden Datenpunkte ($\eta_{10} = 0,06$) nicht berücksichtigt wurden. Der Fit wird mittels einer Regressionsanalyse durchgeführt. Die Berücksichtigung aller Werte führt zu einem geringeren Wert η_{dAE} , was zu einer Unterschätzung des freigesetzten Anteils führen kann, somit wurden für die Auswertung die äußersten beiden Stützpunkte nicht berücksichtigt.

Im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ wurden Aerosolmessungen mittels Respicon durchgeführt, bei denen der Fehler deutlich geringer war als bei einer nachträglichen Siebung, wenn Partikel sich bereits an Oberflächen abgesetzt haben, was das Ergebnis beeinflussen kann. Die Ergebnisse der Respiconmessungen aus /GRS 16b/ für die drei Versuche mit vergleichbaren Parametern sind in Tab. 4.1 aufgeführt. Diese werden in Abb. 6.8 mit den Ergebnissen der Extrapolationen zu den Versuchen mit vergleichbaren Parametern aus dem aktuellen Forschungsvorhaben dargestellt. Dabei fällt eine große Differenz bei der Sprengstoffmasse von 50 g auf. Die Extrapolation mit den Datensätzen, bei denen alle Siebfractionen berücksichtigt werden („Minus 0 Werte“), unterschätzen durch die größere Steigung zu kleineren d_{AE} -Werten hin die Freisetzung der Anteile luftgetragener Partikel mit $d_{AE} < 100 \mu\text{m}$ um ca. eine Größenordnung. Die Extrapolation mit den Datensätzen, bei denen die äußersten ein bis zwei Datenpunkte weggelassen worden sind, kommen den Ergebnissen der Respiconmessung näher. Eine ähnliche Abstufung ist bei der Sprengstoffmasse 200 g zu beobachten. Bei der Sprengstoffmasse 120 g liegen die Werte für η_{100} sehr nahe beieinander. Bei den Ergebnissen mit der Sprengstoffmasse von 100 g liegen keine vergleichbaren Respiconmessungen aus /GRS 16b/ vor. Allerdings liegen die Werte hier auch ähnlich wie bei der Sprengstoffmasse von 120 g in einem geringen Streufeld, wobei die Extrapolation, bei der keine Datenpunkte weggelassen wurden, den geringsten Wert anzeigt. Darüber hinaus ist auffällig, dass die Werte bei 100 g geringfügig höher liegen als die Werte bei 120 g, während für eine höhere Sprengstoffmasse ein höherer Freisetzungsanteil η_{100} zu erwarten wäre. Da der Unterschied in den Sprengstoffmassen jedoch mit 20 g sehr gering ist, und jeweils nur eine Messung den Auswertungen zugrunde liegt, ist es plausibel, dass diese Abweichung mit der statistischen Streuung erklärt werden kann.

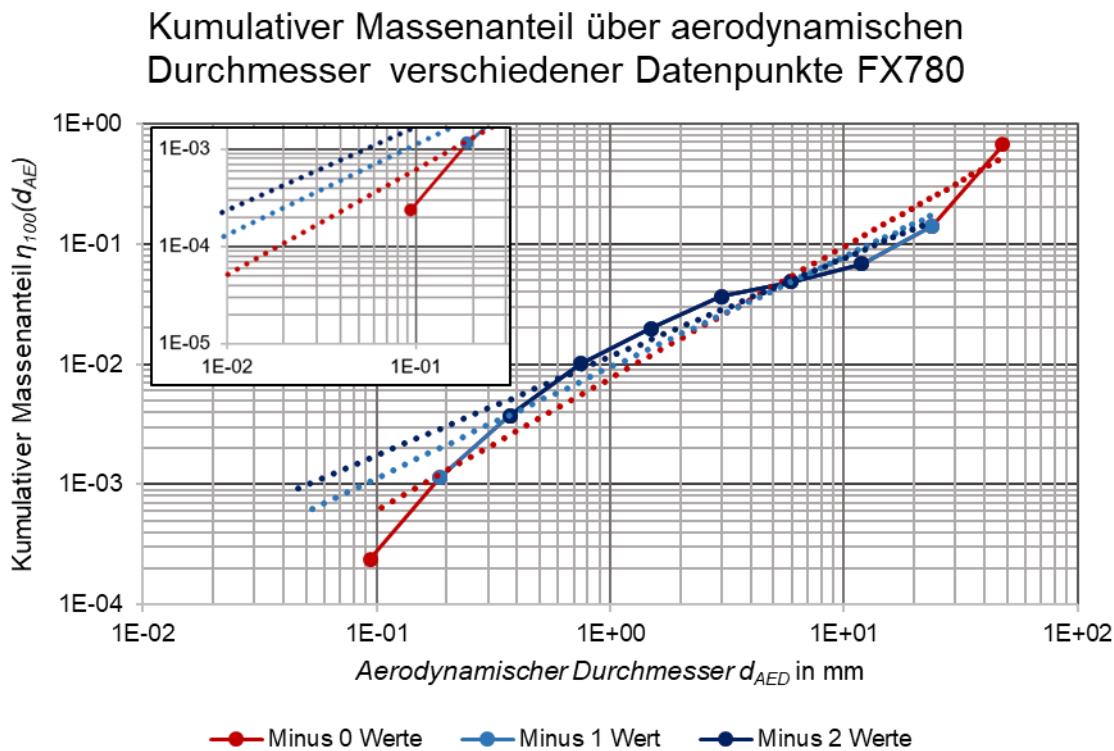


Abb. 6.7 Einfluss der Datenauswahl auf den Fit anhand der Messreihe FX780 (50 g Ladungsmasse) mit vergrößertem Ausschnitt

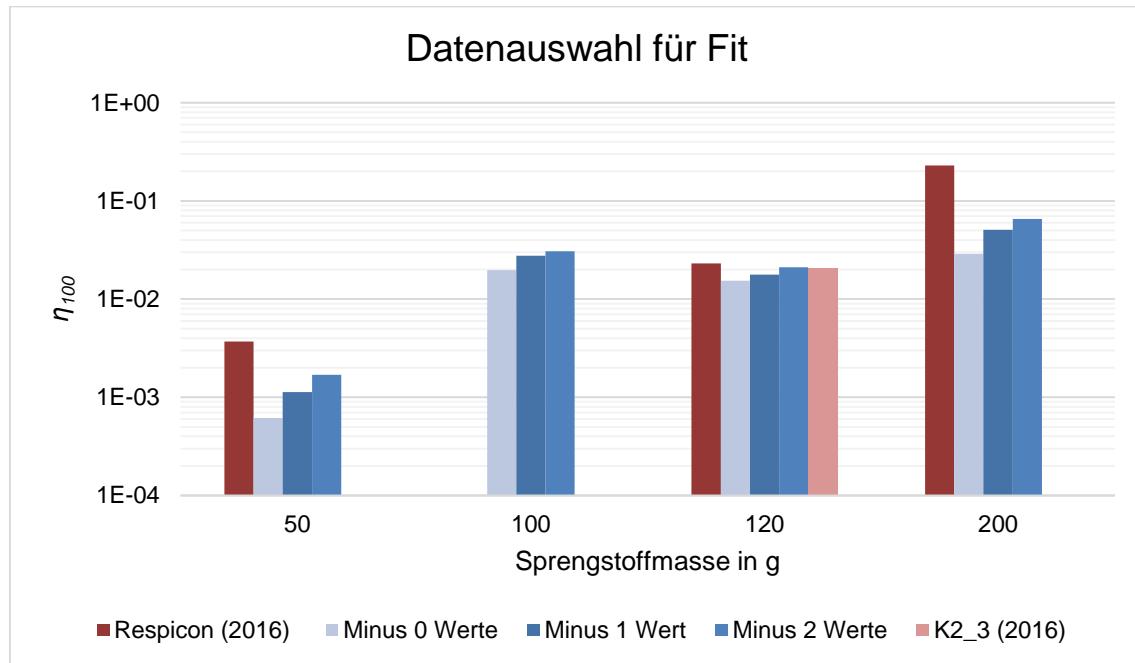
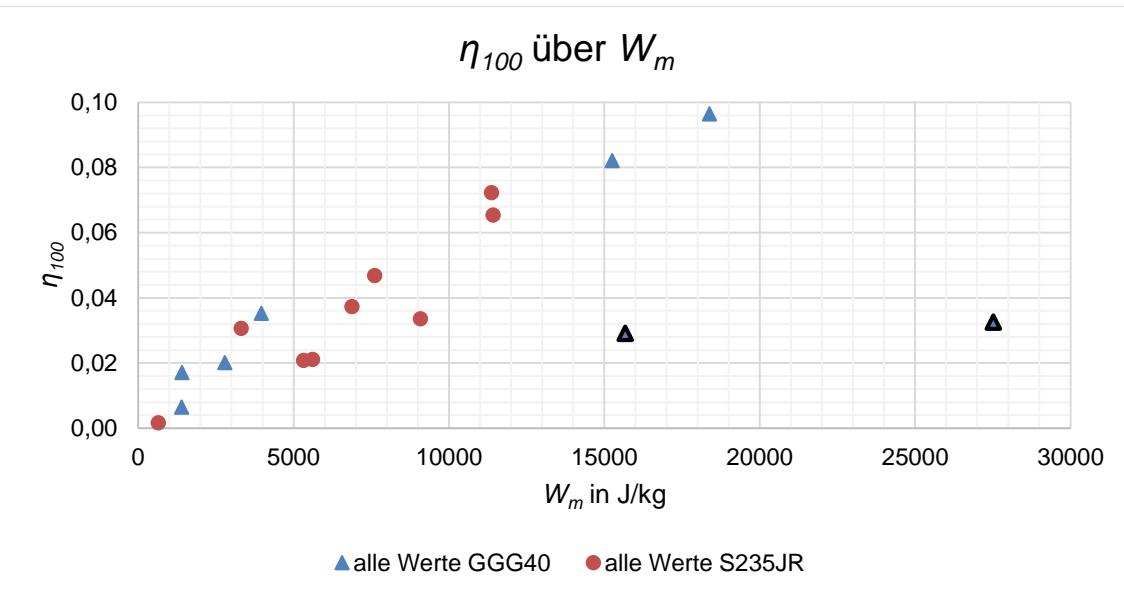


Abb. 6.8 Vergleich der freigesetzten luftgetragenen Partikel kleiner 100 µm bei unterschiedlicher Auswahl an Datenpunkten mit Ergebnissen aus /GRS 16b/

Im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ wurde für einzelne Versuche der zweiten Versuchskampagne Siebungen durchgeführt, sodass ein Datensatz für eine Sprengstoffmasse von 120 g vorliegt. Der aus diesem Datensatz mittels Extrapolation ermittelte Wert für η_{100} ist ebenfalls in Abb. 6.8 aufgeführt. Allerdings wurde beim Datensatz aus /GRS 16b/ aufgrund der geringeren Anzahl an Siebfragmenten jeweils nur ein Wert weggelassen. Das Ergebnis aus /GRS 16b/ stimmt sehr gut mit dem Ergebnis aus dem aktuellen Forschungsvorhaben („Minus 2 Werte“) überein. Es ist zu sehen, dass die Methode der Extrapolation, bei der jeweils die beiden äußeren Datenpunkte nicht berücksichtigt werden, die Respiconmessung am besten widerspiegelt. Diese Methode wird daher bei der weiteren Auswertung verwendet. In Abb. 6.8 ist zu sehen, dass die Methode der Extrapolation die Respiconmessung systematisch unterschätzt. Die größte Abweichung bei einer Ladungsmasse von 200 g liegt bei einem Faktor von ca. 3,5, sodass die Ergebnisse in derselben Größenordnung liegen und dies für die Reproduzierbarkeit durch einen abgewandelten Versuchsaufbau sehr gut ist.

In Abb. 6.9 sind die durch Extrapolation ermittelten Anteile η_{100} über die spezifische Energie W_m aller Ergebnisse der beiden Versuchskampagnen im aktuellen Forschungsvorhaben aufgetragen. Es wird, aufgrund der unterschiedlichen Versagensformen (siehe Schadensbilder in Kapitel 5), zwischen den Plattenmaterialien differenziert. Die Bestimmung der Geschwindigkeit ist bei dem Material GGG40 zum einen aufgrund der Staubwolke, die die Bruchstücke verschleiert, nicht immer möglich, sodass die beiden schwarz umrahmten Datenpunkte als Ausreißer zu werten sind. Zum anderen kann nicht bewertet werden, wie repräsentativ die Geschwindigkeit des einzelnen Fragments für die Geschwindigkeiten der anderen Fragmente ist. Bei den beiden schwarz umrahmten Ausreißern (Versuche FX784 und FX786) in Abb. 6.9 handelt es sich mutmaßlich um Werte, bei denen zur Bestimmung der Bruchstück-Geschwindigkeit schnell fliegende, kleinere Bruchstücke verwendet wurden, was aber aufgrund der Staubwolke nicht zu erkennen ist. Auffällig ist, dass die beiden Ausreißer identische Versuchsparameter aufweisen, da der eine Versuch die Wiederholung des anderen ist. Bei der weiteren Auswertung der Messergebnisse werden diese beiden Datenpunkte nicht berücksichtigt.



Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer

Abb. 6.9 Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse

Die tabellarische Darstellung der Datenpunkte aus Abb. 6.9 sind in Tab. 6.5 aufgeführt.

Tab. 6.5 Massen Metallplatte S235JR

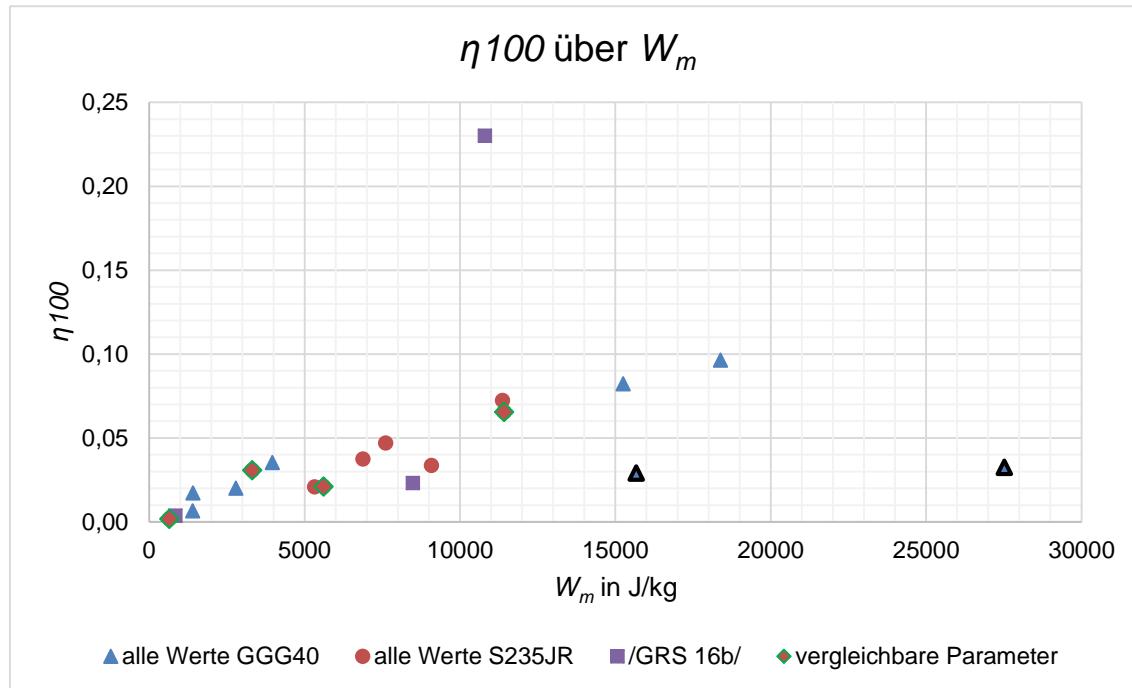
Versuchsnummer	Kürzel	Masse Metallplatte vorher m_{PV} / [kg]	Masse Restplatte nachher m_{PN} / [kg]
FX770	S-20-120-3	-	-
FX771(*)	S-20-120-3	5611	0,021
FX772	S-20-200-3	11426	0,065
FX773	S-30-200-3	6883	0,037
FX774(*)	S-30-200-3	7611	0,047
FX775	S-20-100-3	3315	0,031
FX776	S-20-200-2	11369	0,072
FX778	G-20-120-3	3967	0,035
FX779	G-20-50-3	1403	0,006
FX780	S-20-50-3	643	0,002
FX781	G-20-100-3	2785	0,020
FX782	G-20-200-3	18389	0,096
FX783	G-20-100-2	1412	0,017
FX784	G-20-120-2	27520	0,033
FX785	S-20-200-1	5327	0,021
FX786(*)	G-20-120-2	15672	0,029
FX787	S-30-200-2	9079	0,034
FX788	G-20-200-2	15250	0,082

(*) Wiederholungsversuch

In Abb. 6.10 sind die Ergebnisse des aktuellen Forschungsvorhabens zusammen mit den Ergebnissen der Versuche 3, 4 und 8 aus /GRS 16b/ dargestellt. Für die Ermittlung der spezifischen kinetischen Energie der Versuche aus /GRS 16b/ wurden die Geschwindigkeiten der Abplatzer, abhängig von der Ladungsmasse, aus den aktuellen Experimenten genutzt. Die Masse der für die Berechnung der spezifischen Energie notwendigen Beton-Probekörper beträgt gemäß /GRS 16b/ jeweils ca. 1900 g für alle Probekörper.

Aus Abb. 6.10 geht hervor, dass die Datenpunkte aus /GRS 16b/ bei 100 J/kg (Versuch 3) und 8500 J/kg (Versuch 8) gut mit den Ergebnissen des aktuellen Forschungsvorhabens übereinstimmen (vgl. Tab. 4.1), allerdings im Bereich um 11000 J/kg (Versuch 4) der Wert aus /GRS 16b/ deutlich oberhalb der Ergebnisse aus dem aktuellen Forschungsvorhaben liegt. Die Datenreihe „vergleichbare Parameter“ stellt Datenpunkte

der Versuche FX780, FX772 und FX771 des aktuellen Forschungsvorhabens dar. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die spezifischen kinetischen Energien für die Versuche aus /GRS 16b/ eine Unsicherheit in der horizontalen Richtung mitbringen, da die für die Bestimmung der kinetischen Energie notwendigen Geschwindigkeiten Annahmen aus vergleichbaren Versuchen des aktuellen Forschungsvorhabens sind.



Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer

Abb. 6.10 Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Vergleich /GRS 16b/

Im Rahmen der Versuchskampagnen wurden neben einer Versuchsreihe mit S235JR auch Versuche mit GGG40 durchgeführt. In Abb. 6.11 sind Versuchsreihen mit den Plattenmaterialien GGG40 und S235JR mit ansonsten gleichen Parametern gegenübergestellt. Wie in dem vorangegangenen Kapitel 5 zu sehen ist, ist die Versagensform von GGG40 eine grundsätzlich andere als bei S235JR, was letztlich auch Einfluss auf den Energieeintrag in den Probekörper hat. Dies spiegelt sich in den folgenden Diagrammen der Freisetzungssanteile in Abb. 6.11 wider.

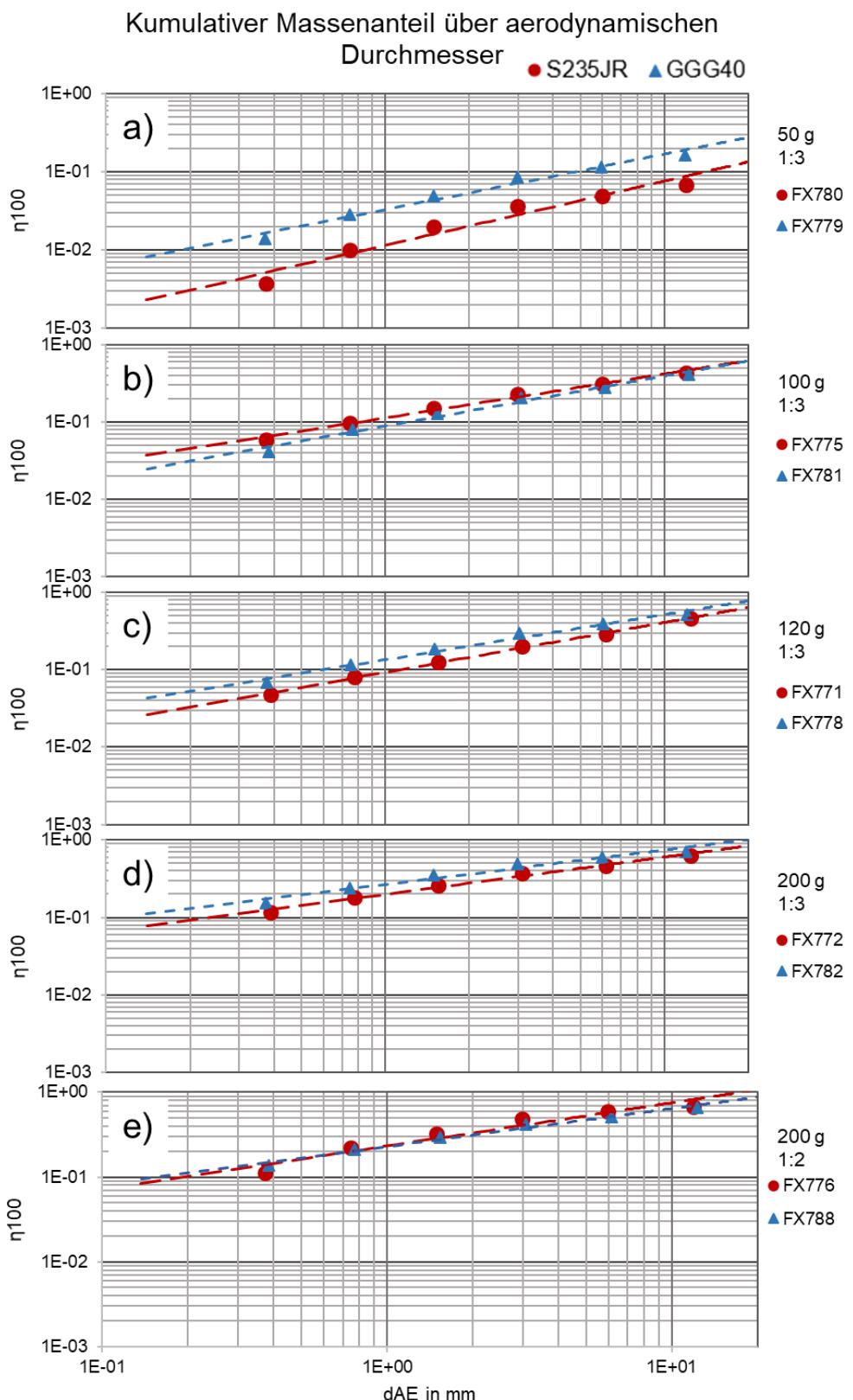


Abb. 6.11 Ergebnisdarstellung η_{100} über d_{AE} von GGG40 und S235JR

Die jeweils verwendete Ladungsmasse, die Geometrie der Sprengladung und die Versuchsreihennummer sind jeweils rechts neben den Diagrammen aufgeführt. Die Trendlinien wurden mithilfe einer Regressionsanalyse erstellt. Es geht aus den verschiedenen Diagrammen hervor, dass die Datenpunkte der Versuchsreihen mit GGG40 grundsätzlich über den Datenpunkten von S235JR liegen, was folglich eine höhere Freisetzung bedeutet. Die Versuchsreihe in Abb. 6.11b mit einer Ladungsmasse von 100 g ist die einzige Versuchsreihe, bei der die Werte von S235JR über den Werten von GGG40 liegen. Bei der Versuchsreihe in Abb. 6.11e mit einer Ladungsmasse von 200 g und einem veränderten Höhen/Durchmesser-Verhältnis (1:2) liegen die Trendlinien fast identisch übereinander.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Versuche lediglich einmal, im Fall einer Wiederholung zweimal, durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig, da eine statistische Streuung der einzelnen Versuchsreihen nicht betrachtet werden kann. Für eine statistische Analyse sollte die Stichprobe aus mindestens drei Versuchen bestehen. Andererseits wurden durch die verschiedenen Variationen der Parameter genug Versuche durchgeführt, um qualitativ festzustellen, dass die Freisetzung η_{100} bei den Versuchen mit GGG40 mindestens so hoch ist, wie bei den Versuchen mit S235JR.

6.3 Vergleich mit Versuchen aus /GRS 16b/

Ein qualitativer Vergleich der Schadensbilder zwischen dem aktuellen Forschungsvorhaben und einzelnen Versuchen aus /GRS 16b/ wurde in Abschnitt 5.3 durchgeführt. Dabei konnte festgehalten werden, dass trotz der unterschiedlichen verwendeten Ladungsgeometrien das Versagensbild vergleichbar ist. Eine weitere Messgröße zum Vergleich mit den Versuchen aus /GRS 16b/, ist die Masse des Abplatters bzw. der Bruchfragmente. In Tab. 6.6 ist ein Überblick der Abplatzermassen der drei vergleichbaren Versuche aufgeführt. Im aktuellen Forschungsvorhaben und in den Versuchen in /GRS 16b/ wird die Abplatzermasse mit steigender Ladungsmasse größer. Auffällig ist, dass die Massen der Abplatter aus /GRS 16b/ stets größer sind als die Massen der Abplatter im aktuellen Forschungsvorhaben. Bei den Versuchen mit 50 g und 200 g Ladungsmasse beträgt die Differenz der Abplatzermassen ca. 40 g und bei dem Versuch mit 120 g Ladungsmasse 140 g. In Abb. 5.27 ist ein nicht abgelöster Teil des Abplatters oder Ringfragmente auf der Plattenunterseite zu sehen. Bei dem vergleichbaren Versuch 8 ist in Abb. 5.26 kein solches Ringfragment zu sehen. Daraus folgt, dass der entsprechende lose Teil des Rings aus Versuch 8 /GRS 16b/ in Versuch FX771 mit der

Metallplatte verbunden ist, was die zusätzlich fehlenden 100 g bei der Abplatzermasse erklären könnte. Die systematische Abweichung von ca. 40 g kann auf die unterschiedliche Ladungsgeometrie zurückgeführt werden. Dies wird im weiteren Verlauf mit den Simulationsergebnissen näher beleuchtet.

Die Abplatzermasse von 491,5 g beim Versuch mit 200 g Ladungsmasse aus /GRS 16b/ setzt sich aus dem zentralen Abplatzer und dem zusätzlichen Ringfragment zusammen. Das Ringfragment ist in Abb. 5.24 zu sehen.

Tab. 6.6 Vergleich Abplatzermasse

Kürzel	Versuch /GRS 16b/ / aktuelles Forschungsvorhaben	Abplatzermasse /GRS 16b/ [g]	Abplatzermasse ak- tuelles Forschungs- vorhaben / [g]
(S-20-50-3)	3 / FX780	151,5	115
(S-20-120-3)	8 / FX771	428,5	290
(S-20-200-3)	4 / FX772	491,5 (427+64,5(**))	448

(*) Abplatzermasse + Ringmasse

Anders als bei den Versuchen in /GRS 16b/ wurden im aktuellen Forschungsvorhaben die durch den Energieeintrag der beschleunigten Abplatzerfragmente resultierenden Betonbruchstücke nach jedem Versuch gesammelt und anschließend gesiebt. Mithilfe einer Extrapolation auf $d_{AE} < 100 \mu\text{m}$ kann der Wert η_{100} bestimmt werden. Im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ wurde der Wert für η_{100} mit einem Respicon während des Versuches gemessen. Tab. 6.7 zeigt eine Gegenüberstellung der ermittelten Werte für η_{100} für die Versuche aus /GRS 16b/ und dem aktuellen Forschungsvorhaben. In /GRS 16b/ wurden zu einzelnen Versuchsreihen zusätzlich zur Respiconmessung Siebungen durchgeführt. Der mit einem Sternchen markierte Wert für η_{100} wurde anhand der im aktuellen Forschungsvorhaben angewandten Extrapolation der in /GRS 16b/ dokumentierten Siebfaktionen ermittelt. Bei Betrachtung von Tab. 6.7 fällt auf, dass die Ergebnisse für η_{100} bei einer Ladungsmasse von 120 g sehr gut übereinstimmen. Dies gilt für den direkten Vergleich der Respiconmessung mit der Extrapolation der in /GRS 16b/ durchgeföhrten Siebung als auch mit der Siebung der aktuellen Versuchsreihe. Bei den Versuchsreihen mit der geringeren Ladungsmasse von 50 g liegt der Wert für η_{100} in /GRS 16b/ um ca. einen Faktor 2 über dem Wert im aktuellen Forschungsvorhaben und damit in derselben Größenordnung. Die größte Abweichung ist bei den Versuchsreihen mit der hohen Ladungsmasse von 200 g zu erkennen. Dort liegt der Wert für η_{100} in /GRS 16b/ um ca. einen Faktor 3,5 über dem Wert im aktuellen Forschungsvorhaben. Für alle Versuche in

Tab. 6.7 ist zu erkennen, dass mit steigender Sprengstoffmasse auch der Wert für η_{100} steigt.

Tab. 6.7 Vergleich luftgetragener Anteil

Kürzel	Versuch /GRS 16b/ / aktuelles Forschungsvorhaben	η_{100} Respicon /GRS 16b/	η_{100} Extrapolation aktuelles Forschungsvorhaben
(S-20-50-3)	3 / FX780	0,0037	0,0017
(S-20-120-3)	8 / FX771	0,023	0,021
			0,021(*)
(S-20-200-3)	4 / FX772	0,23	0,065

(*) Siebung aus /GRS 16b/ für Versuch K2_3

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Tab. 6.7 wird deutlich, dass die Bestimmung des luftgetragenen Anteils η_{100} über eine Extrapolation der Siebergebnisse im Grundsatz die Werte der Respiconmessung gut abbildet. Dies gilt insbesondere für die Versuchsreihen mit der Ladungsmasse 120 g. Eine Abweichung gibt es bei den Ladungsmassen 50 g und 200 g. Im Grundsatz ist es plausibel, dass der geschlossene Versuchsaufbau mit der Respiconmessung aus /GRS 16b/ genauere Ergebnisse liefert als der offene Versuchsaufbau des aktuellen Forschungsvorhabens. Der offene Versuchsaufbau bringt mutmaßlich den Nachteil mit, dass ungleich verteilte Anteile der Partikel (überproportional größere Anteile bei kleineren Partikeln) aus dem Auffangtopf geschleudert werden, was zu einer Unterschätzung der Freisetzunganteile führen könnte. Eine Einordnung der Messdaten folgt im weiteren Verlauf des vorliegenden Abschlussberichtes.

7 Methodenentwicklung und Diskussion

In diesem Kapitel werden Methoden beschrieben, die es ermöglichen sollen zum einen eine Vorhersage über das Versagen von Barrieren und zum anderen eine Vorhersage über die freigesetzte Menge an luftgetragenen bzw. lungengängigen Partikeln zu ermöglichen.

7.1 Simulation des Barrierefalls

7.1.1 Modellbildung der Plattenversuche für AUTODYN

Die Modellbildung für AUTODYN basiert auf den Modellen, welche im Rahmen des Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 3613R01605 /GRS 16b/ entwickelt wurden. Ein Schnittbild des Modells ist in Abb. 7.1 dargestellt. Die Sprengstoffladung sowie das Material im Zentrum der Targetplatte wird durch die SPH-Methode diskretisiert, welche große Verformungen abbilden kann. Anders als bei der Modellbildung in /GRS 16b/ wird auf die Definition von Symmetrieebenen verzichtet. Auf Symmetrieebenen lassen sich keine SPH-Partikel positionieren, sodass eine Ankopplung an Lagrange-Elemente lediglich eingeschränkt möglich ist. Der mit SPH diskretisierte Bereich der Stahlplatte weist Lateralabmessungen von $80 \times 80 \text{ mm}^2$ auf, wobei die Anbindung an den über Volumenelemente abgebildeten Außenbereich über gemeinsame Knoten erfolgt. Der Außenbereich der Targetplatte ist über gemeinsame Knoten mit einer Auflagerstruktur verbunden. Als Randbedingung sind die unteren Knoten der Auflagerstruktur fixiert. Es wurde eine Partikelgröße bzw. Elementkantenlänge von 1 mm verwendet.

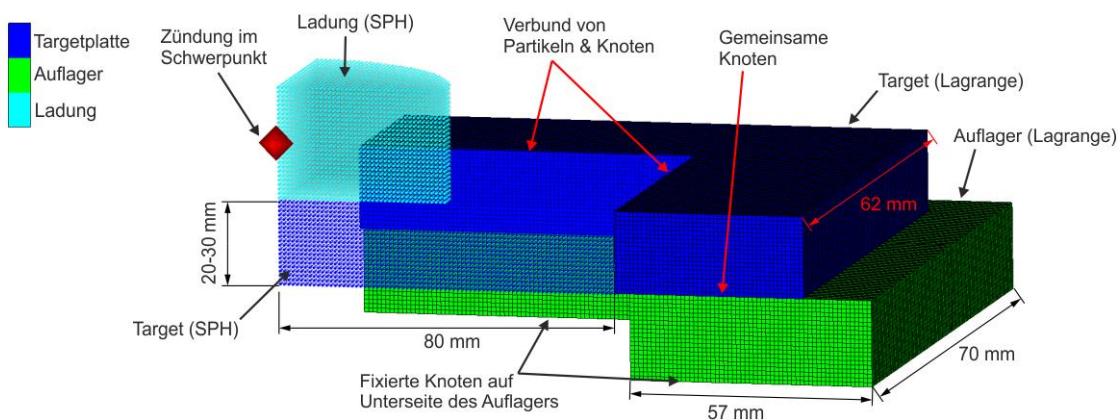


Abb. 7.1 Schnittbild eines Modells für das Rechenprogramm AUTODYN

Prinzipiell ist die SPH-Methode dazu geeignet, die Perforation der Targetplatten und die Ausbreitung der Fragmente zu reproduzieren. Exemplarisch wird dies in Abb. 7.2 für Simulationen zu den Versuchen FX780 (Versagensmode II mit Spallation eines Bruchstücks) und FX772 (Versagensmode III mit einem Primärfragment sowie Ablösung eines ringförmigen, langsameren Fragments) veranschaulicht. Eine Auswertung der räumlichen Ausbreitung der Massen und Geschwindigkeiten von Partikeln kann über die nutzereigene Subroutine EXEDIT erfolgen. Gemäß des im Anhang Abschnitt A.1 angegebenen Quelltextes erfolgt eine Bilanzierung in mehreren Abständen, hinter der Targetplatte für Massen, Energien und Geschwindigkeiten, der durch die jeweilige Kontrollebenen tretenden Partikel. Es erfolgt eine Mittelung über sämtliche Geschwindigkeitsbereiche. Ferner erfolgt in der aktuellen Version keine Unterscheidung zwischen größeren und kleineren Trümmerstücken. Diese könnte über eine Unterteilung in Geschwindigkeitsgruppen erfolgen.

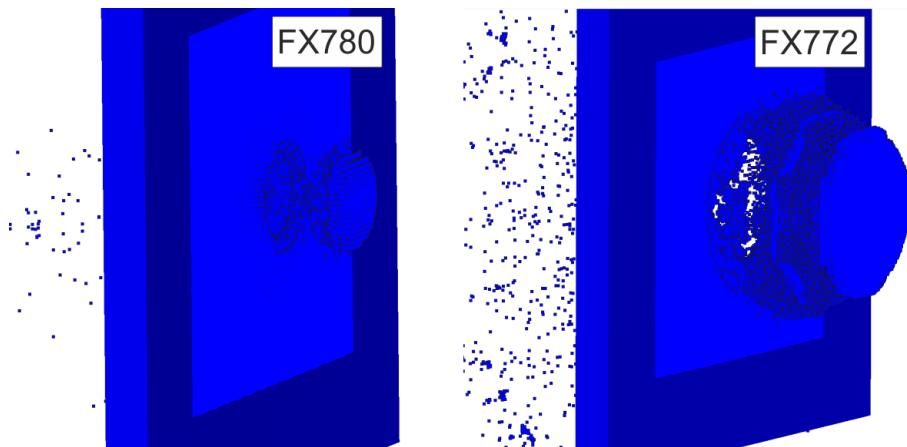
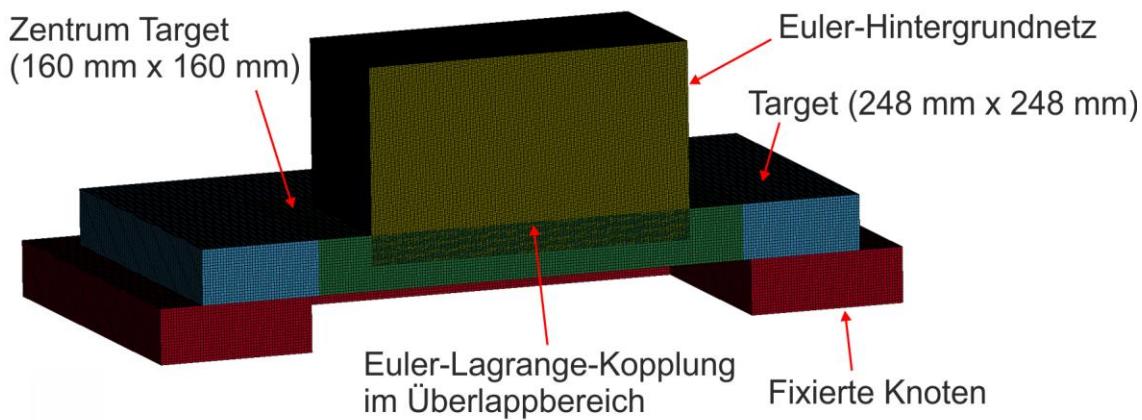


Abb. 7.2 Fragmentierung der Stahlplatten in Simulationen mit AUTODYN

7.1.2 Modellbildung der Plattenversuche für LS-DYNA

Als Erweiterung im Vergleich zu /GRS 16b/ wurden neben Rechnungen mit AUTODYN vertiefende Analysen mit dem Rechenprogramm LS-DYNA durchgeführt. Das in Abb. 7.3 dargestellte Modell basiert auf Euler-Lagrange-Kopplung, wobei die Abmessungen der über Volumenelemente dargestellten Targetstruktur dem Modell für AUTODYN (vgl. Abb. 7.1) entsprechen. Die Elementkantenlänge beträgt 1 mm. Für Sprengstoffladung und Luft wird ein Euler-Hintergrundnetz mit einer Elementkantenlänge von 0,5 mm verwendet, dessen Abmessung $155 \times 155 \times 81 \text{ mm}^3$ beträgt. Die zugehörigen Kontrollparameter sind in Abschnitt A.2.3 aufgeführt. Zur Füllung des Netzes mit Sprengstoff und

anschließender Zündung dienen die in A.2.2 aufgelisteten Optionen. Unerwünschte Reflexionen an den Modellgrenzen werden über transmittierende Randbedingungen reduziert. Die Kopplung zwischen Struktur und Euler-Hintergrund-Netz erfolgt über die im Anhang Abschnitt A.2.1 aufgeführte Eingabekarte. Für die Berechnung werden auf dem Rechencluster der GRS 8 CPU und die Message Passing Parallel (MPP)-Version von LS-DYNA verwendet, wobei der Rechenzeitbedarf zur Simulation des für die Fragestellung erforderlichen Zeitbereichs von 0,4 ms auf dem Linux-Cluster der GRS etwa 24 h beansprucht.



*Initial_Volume_Fraction_Geometry und *Initial_Detonation

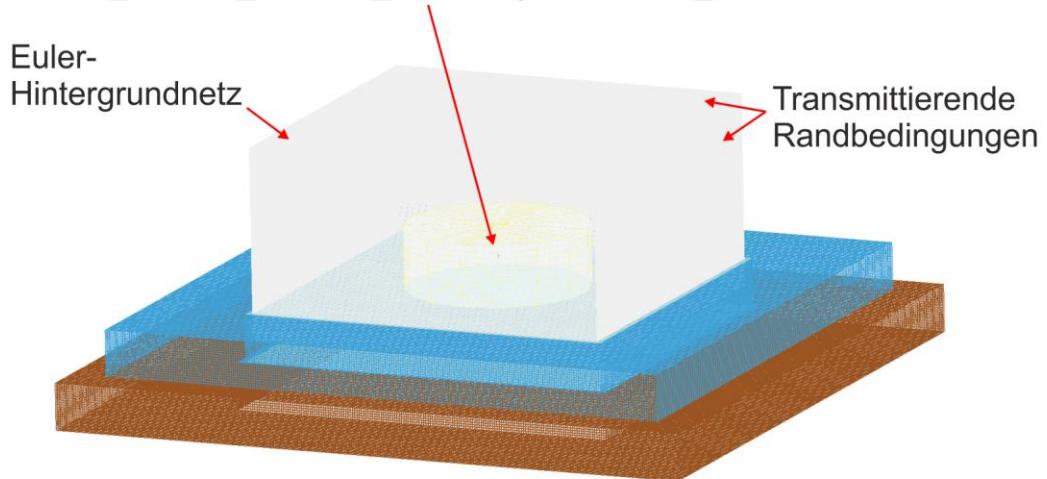


Abb. 7.3 Bestandteile eines Modells für das Rechenprogramm LS-DYNA

Das Materialverhalten der Targetplatten wird über das Johnson-Cook-Modell in Verbindung mit einer linearen Zustandsgleichung beschrieben, wobei die Parameterbelegungen für GGG40 nach /HÄC 11/ exemplarisch in A.2.4 aufgelistet sind. Elemente, welche das Versagenskriterium gemäß Gleichung 2.7 überschreiten, werden durch den Parameter EROD=0 aus der Simulation entfernt. Dies wird als Erosion bezeichnet. Zusätzlich

wird ein Kriterium für Spallationsversagen mit $pc=p_{min}$ (vgl. A.2.4) in Verbindung mit der Parameterbelegung SPALL=3 (vgl. A.2.4) verwendet. Beim Versagen eines Elementes über Spallation soll dieses ebenfalls erodiert werden, was über *Mat_Add_Erosion realisiert wird. Es ist zu beachten, dass Erosion lediglich eine Maßnahme zur Vermeidung kleiner Zeitschritte infolge stark verzerrter Elemente darstellt. Formal ist hierdurch die Darstellung von Plattenperforation, Spaltbildung und Trümmerbildung möglich. Grundsätzlich ist die Entfernung von Elementen aus dem Modell jedoch unphysikalisch und geht mit einer Entfernung von Masse einher. Versuchsweise wurde eine adaptive Option erprobt, bei der Elemente nach dem Erreichen des Erosionskriteriums in SPH-Partikel umgewandelt werden (vgl. Abb. 7.4). Auf diese Weise kann die Masse der erodierten Elemente erhalten werden und die SPH-Partikel können bei der Kontaktberechnung zwischen den Fragmenten berücksichtigt werden. Bereits vor der Aktivierung der SPH-Partikel durch Erosion werden diese sowohl in der Eingabe wie der Ausgabe als deaktivierte Partikel erfasst. Nachteilig sind der erhöhte Rechenzeitbedarf sowie die umfangreichen Eingabe- und Ergebnisdateien. Da im Rahmen der Erprobung in den konkreten Problemstellungen kein nennenswerter Einfluss auf Geschwindigkeiten von Abplatzern und Fragmenten festgestellt werden konnte, wurde im Folgenden auf die Verwendung dieser Methodik verzichtet.

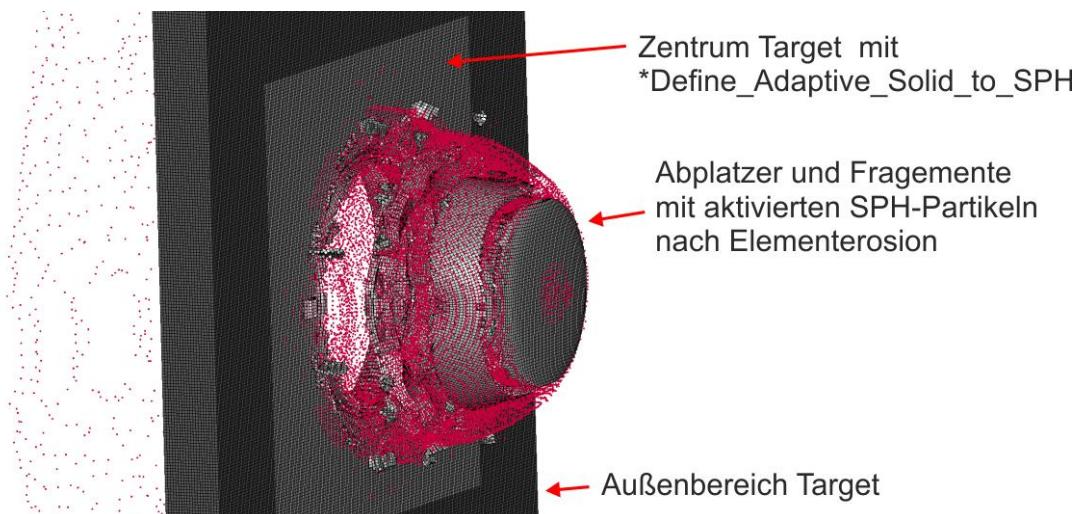


Abb. 7.4 Illustration der Funktionalität zur adaptiven Umwandlung von Volumenelementen in SPH-Partikel nach Elementerrosion in LS-DYNA

7.1.3 Simulation der Druckwellenausbreitung im Target

Zur Veranschaulichung der Wellenausbreitung in den Targetplatten werden mit LS-DYNA berechnete zeitliche Druckverläufe im Querschnitt einer S235-Platte in Abb. 7.5

für eine Ladungsmasse von 50 g und in Abb. 7.6 für eine Ladungsmasse von 200 g dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Reflektion der Druckwellen an der rückseitigen freien Oberfläche hydrostatische Drücke im Zugbereich hervorruft. In manchen Regionen kommt es zum Materialversagen nach dem p_{min} -Kriterium, wobei die Lage dieser Regionen von der Ladungsmasse abhängig ist. Für eine Ladungsmasse von 50 g ist die Ausbildung eines tellerförmigen Abplatzers erkennbar (vgl. z. B. Abb. 7.22). Weiterhin sind sekundäre Reflektionen an den neu entstandenen freien Oberflächen erkennbar, welche allerdings im konkreten Fall nicht zu sekundärer Spallation führen. Bei einer Ladungsmasse von 200 g ist erkennbar, dass das ausgeworfene Bruchstück im unteren Bereich eine Kegelform sowie im oberen Bereich eine Zylinderform aufweist (vgl. z. B. Abb. 7.23). Das Ausscheren des oberen zylindrischen Teils erfolgt in diesem Beispiel nicht über spannungsbasieretes Spallationsversagen, sondern über ein dehnungsbasiertes Versagen nach dem Johnson-Cook-Modell.

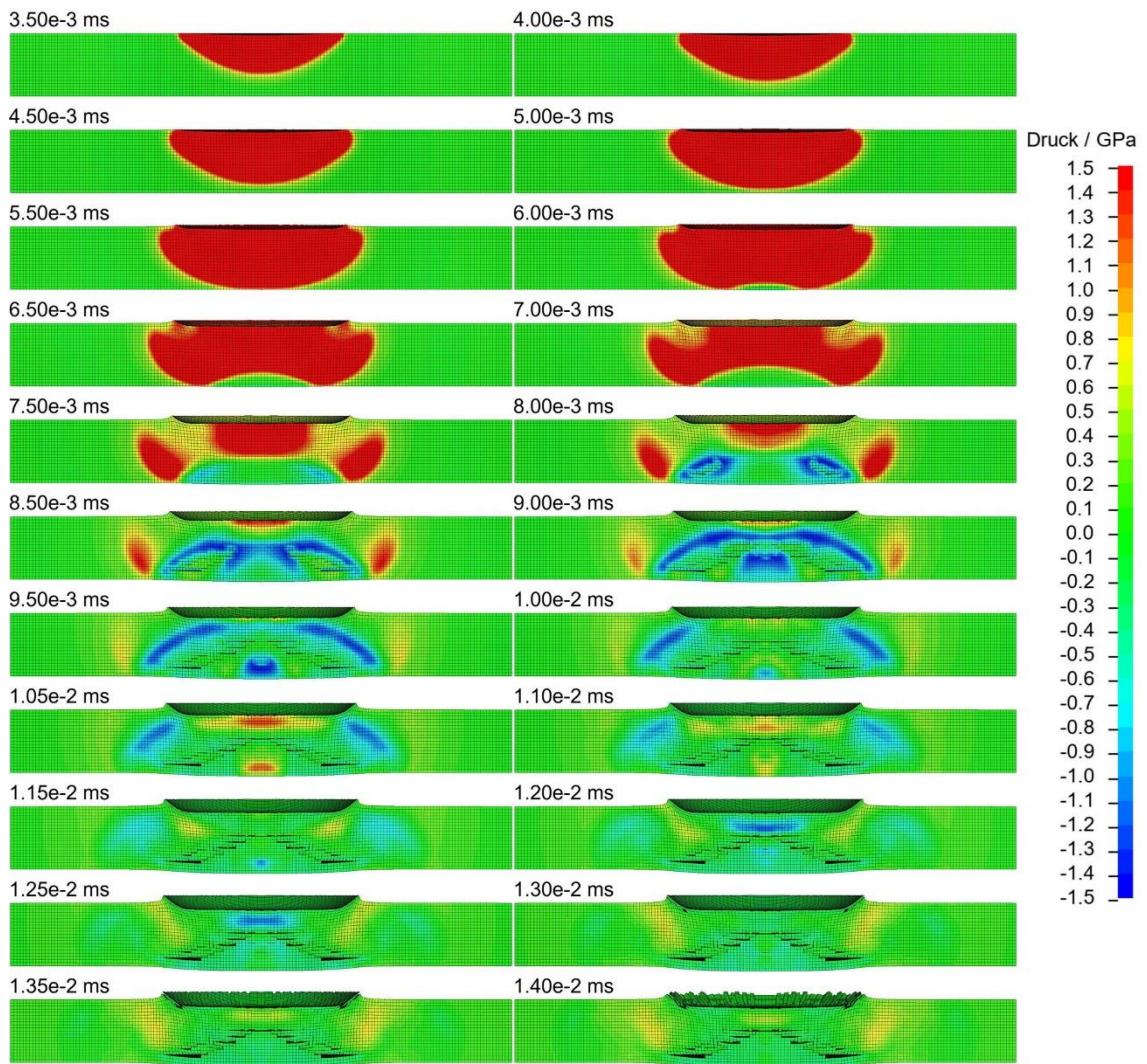


Abb. 7.5 Konturen des Druckverlaufs im Plattenquerschnitt ($H=20$ mm, $m_{Sp}=50$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1$)

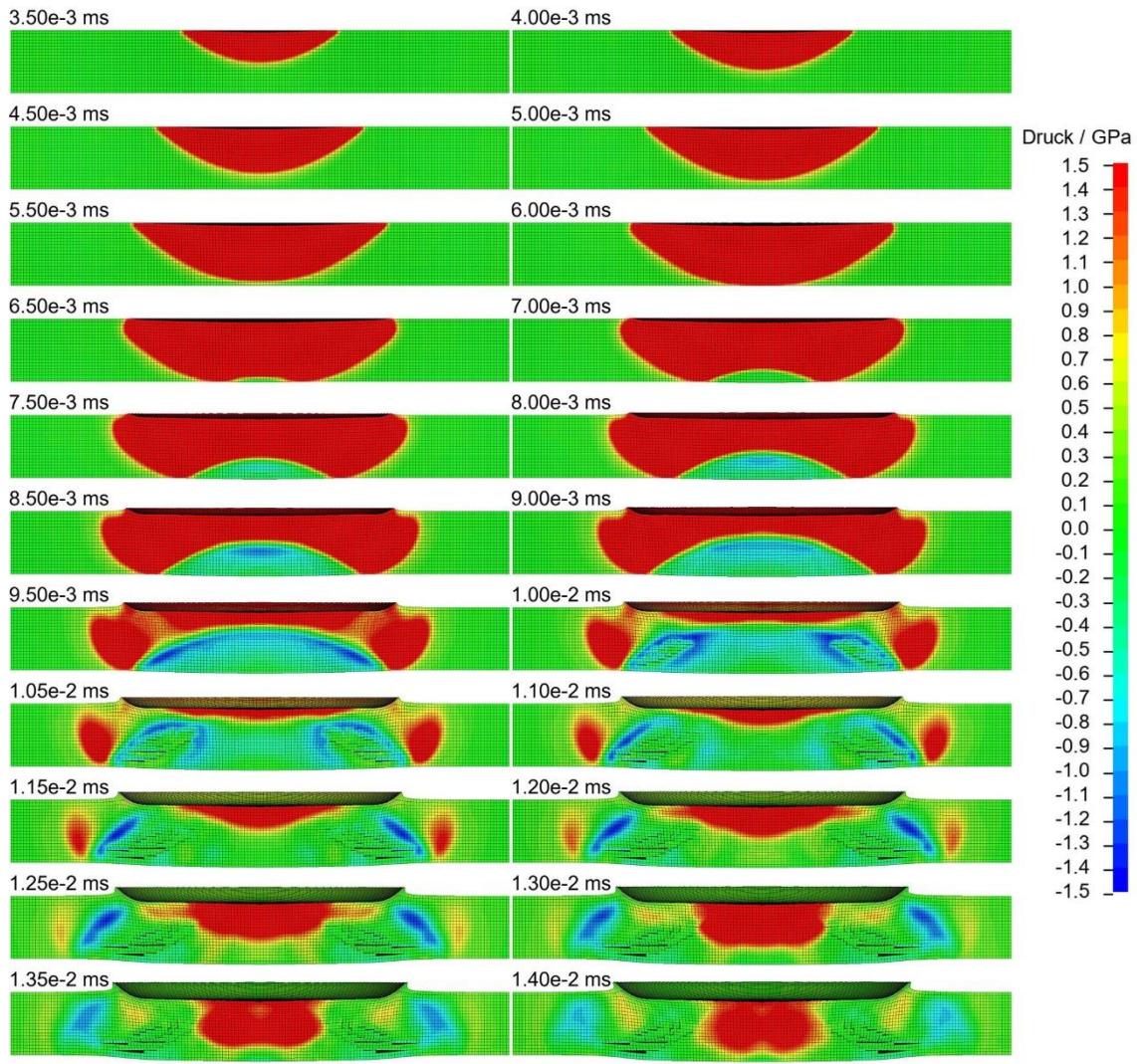


Abb. 7.6 Konturen des Druckverlaufs im Plattenquerschnitt ($H=20$ mm, $m_{Sp}=200$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1$)

Abb. 7.7 vergleicht für den Fall einer Ladung von 50 g PETN zeitliche Druckverläufe in drei verschiedenen Elementen, welche sich mittig unterhalb der Ladung befinden. In dem unverformten Zustand $z=9,5$ mm (roter Kurvenverlauf) im unterhalb der Ladung befindlichen Element wird das p_{min} -Kriterium nach etwa 9 μ s erreicht und es kommt zum Spaltversagen. In den benachbarten Elementen ($z=8,5$ mm bzw. 10,5 mm) sind die berechneten Drücke ebenfalls nach etwa 9 μ s maximal nahe dem angesetzten Wert für p_{min} . Das Versagenskriterium wird allerdings nicht erreicht.

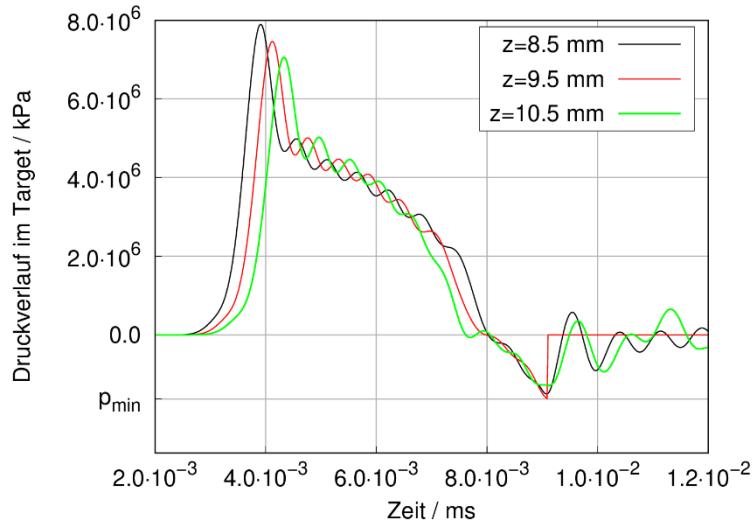


Abb. 7.7 Druckverläufe in ausgewählten Elementen nahe einer Spallationsebene ($H=20$ mm, $m_{Sp}=50$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1$)

Details der Druckverläufe in den Targetplatten können vom Eingabeparametersatz der Sprengstoffmodellierung abhängen. Infolge der geringeren Dichte (vgl. Abschnitt 2.2.1) von PETN 1.50 reduziert sich die Kontaktfläche im Vergleich zu Simulationen mit Seismoplast. Gleichzeitig sind auch die integralen Belastungen durch den Parametersatz zu PETN 1.50 etwas höher, wie der Vergleich der akkumulierten Kopplungskräfte in Abb. 7.8 zeigt.

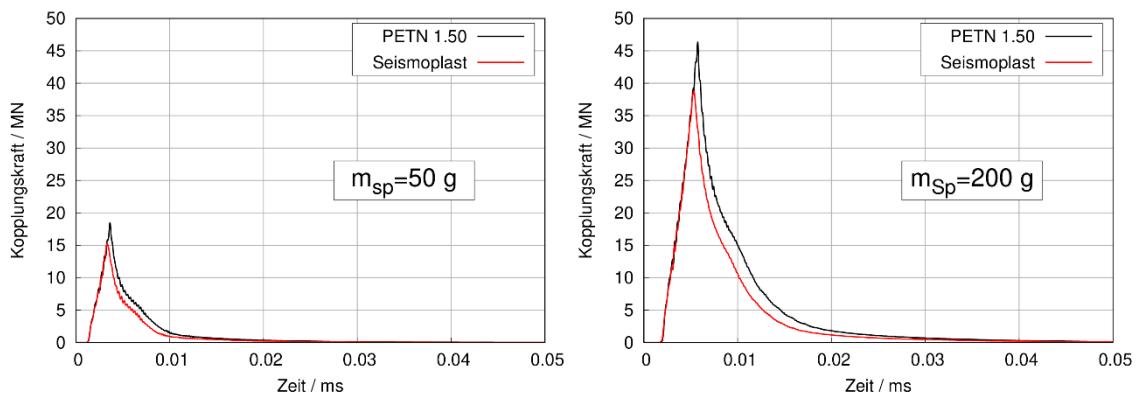


Abb. 7.8 Einfluss der JWL-Parametersätze auf akkumulierte Kopplungskräfte in LS-DYNA Rechnungen

Die Unterschiede der Belastung spiegeln sich in unterschiedlichen zeitlichen Druckverläufen innerhalb der Targetplatte wider. In Abb. 7.9 bis Abb. 7.13 werden Verläufe für beide Ladungsmassen in verschiedenen Abständen unterhalb der Ladung miteinander verglichen. Insbesondere in der Nähe des Kontaktbereiches werden mit dem Parametersatz für PETN 1.50 höhere Spitzendrücke berechnet. Abseits des Kontaktbereiches

und im weiteren Zeitverlauf sind ebenfalls Unterschiede erkennbar. So kann beispielsweise der Parametersatz der JWL-EOS die Positionen der von Spallationsversagen betroffenen Elemente beeinflussen.

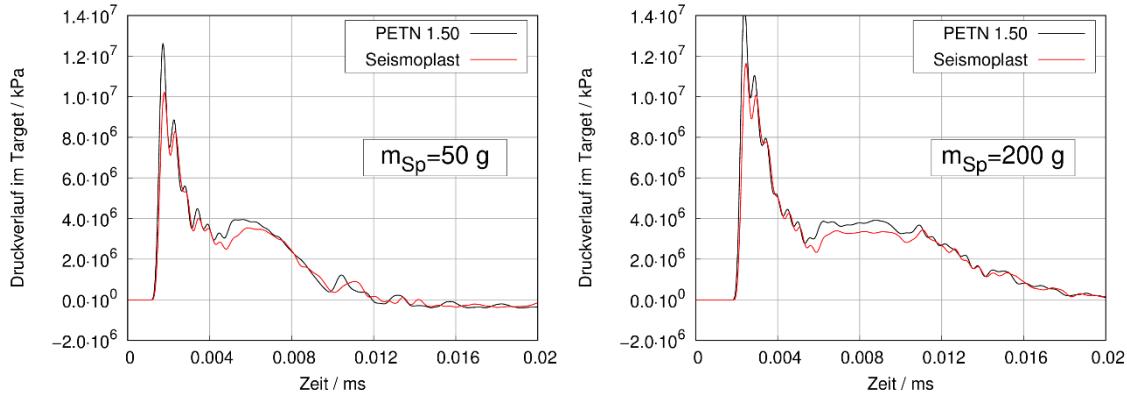


Abb. 7.9 Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 0,5 mm unterhalb der Ladung

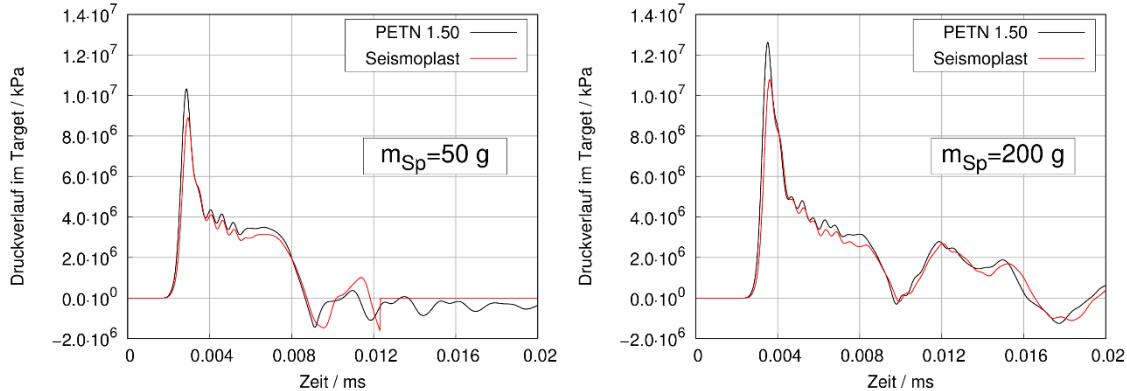


Abb. 7.10 Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 5,5 mm unterhalb der Ladung

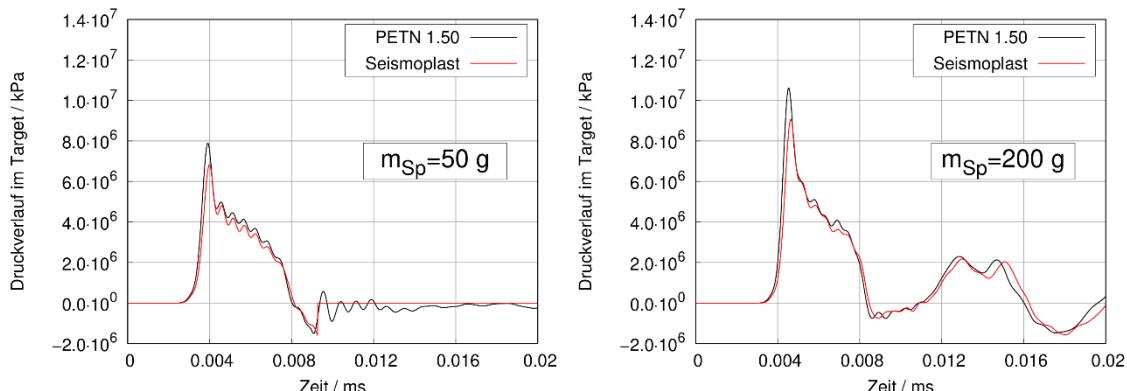


Abb. 7.11 Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 9,5 mm unterhalb der Ladung

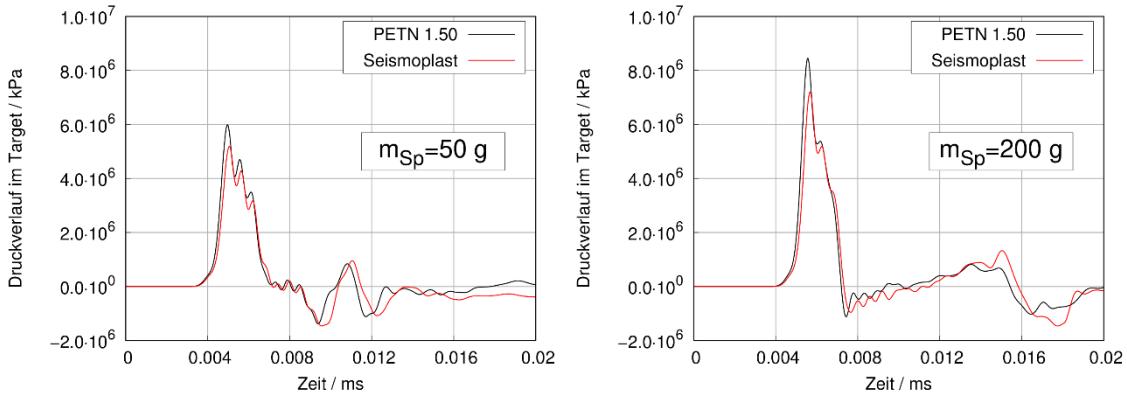


Abb. 7.12 Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 15,5 mm unterhalb der Ladung

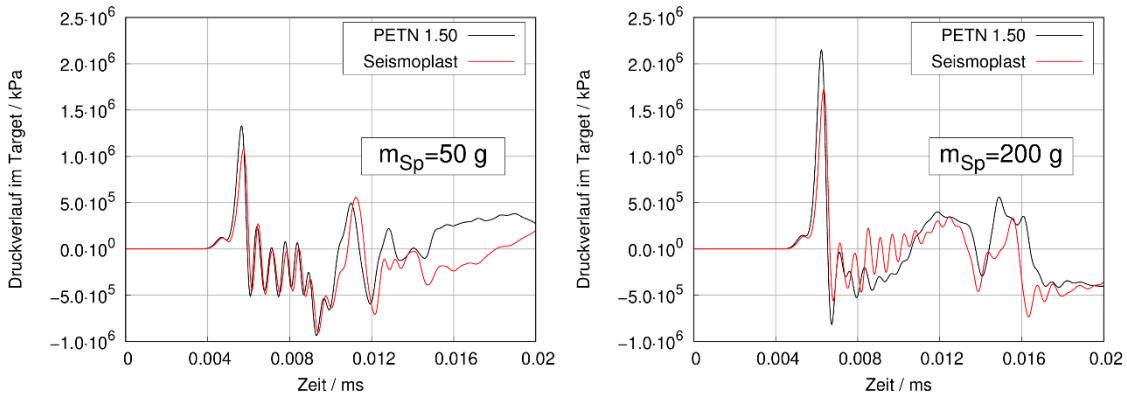


Abb. 7.13 Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 19,5 mm unterhalb der Ladung

7.1.4 Energiebilanz der Targetstruktur

Es ist zu beachten, dass die Zielstruktur lediglich geringe Anteile der durch die Ladung freigesetzten Energie aufnimmt. Diese Anteile liegen für aufgelegte Ladungen erfahrungsgemäß unterhalb von 5 %. Exemplarisch sind Ergebnisse mit LS-DYNA für Simulationen zu den Versuchen FX780 und FX772 in Tab. 7.1 aufgeführt. Die Unterschiede bezüglich der maximalen inneren Energie der Ladung ergeben sich unmittelbar aus den Unterschieden der Parametersätze der JWL-EOS (vgl. Tab. 2.6).

Tab. 7.1 Energieaufnahme der Stahlplatte in Simulationen zu FX780 (Ladung 50 g) und FX772 (Ladung 200 g) mit LS-DYNA

Energie	PETN 1.50		Seismoplast	
	50 g	200 g	50 g	200 g
Max. innere Energie Ladung / MJ	2,86e-1	1,14e-0	2,21e-1	8,82e-1
Energieaufnahme Stahl / MJ	1,18e-2	5,11e-2	9,48e-3	4,27e-2
Anteil Energieaufnahme Stahl / %	4,13	4,48	4,29	4,84

Abb. 7.14 vergleicht Zeitverläufe der Energiebilanzen der Targetplatte für verschiedene Ladungsmassen und Sprengstoffe. Die Energieaufnahme beinhaltet kinetische Energie und innere Energie. Weiterhin ist der zur Ausdämpfung von Nullenergieverformungsmoden (Hourglass-Moden) der Elemente erforderliche Energieanteil (Hourglass-Energie) aufgetragen. Dieser wird als hinreichend klein bewertet. Wie bereits erwähnt, kommt es durch die Erosion von Elementen zu einem Verlust von Masse. Dieser äußert sich auch im Verlust von kinetischer und innerer Energie. Im Hinblick auf die Einwirkung auf der Targetplatte nachgelagerter Strukturen ist insbesondere die kinetische Energie relevant. Die erodierten Energieanteile werden als hinreichend gering bewertet. Anhand der Bilanz der kinetischen Energie für den Fall der 50 g Ladung wird deutlich, dass der Parametersatz der JWL-EOS auch die Versagensmode beeinflussen kann. Für Seismoplast wird die kinetische Energie überwiegend in innere Energie (Verformungsenergie) gewandelt.

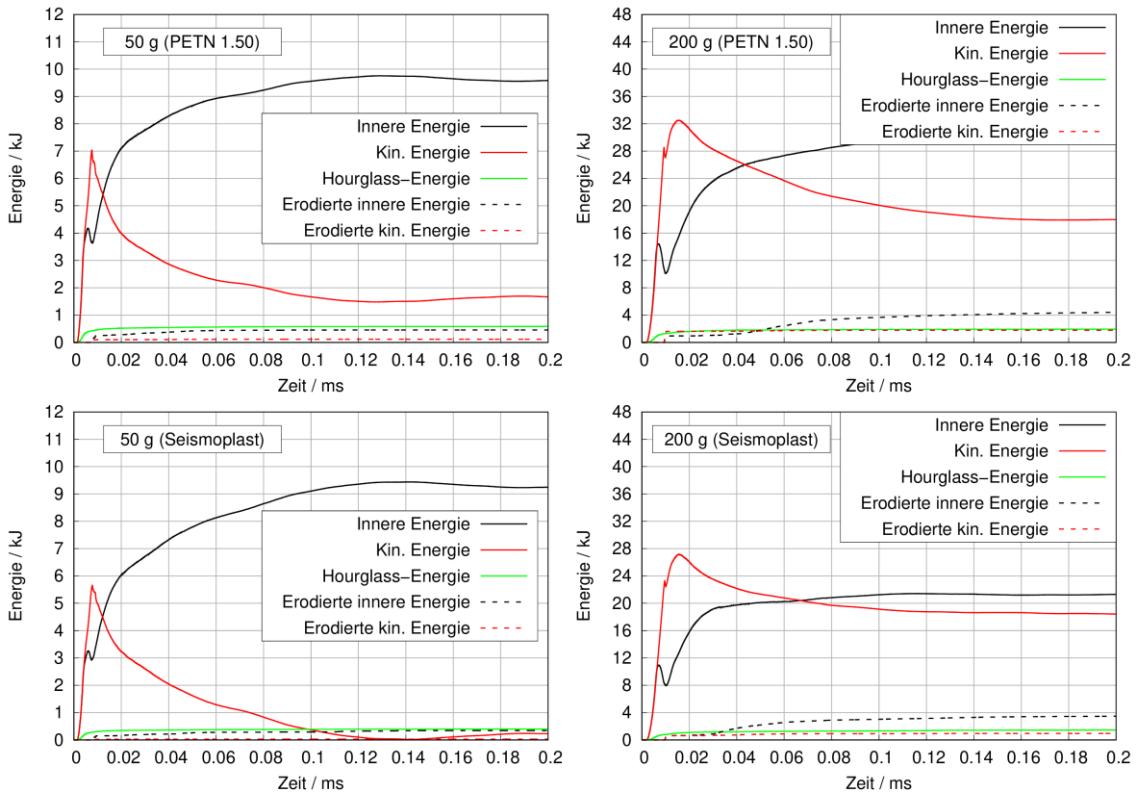


Abb. 7.14 Energiebilanzen der Stahlplatten in Simulationen zu den Versuchen FX780 und FX772 mit LS-DYNA

7.1.5 Numerische Ergebnisse

7.1.5.1 Ergebnisse zur Simulation der Vorversuche

Es wurden zur Erprobung des Versuchsstandes insgesamt drei Vorversuche vom Fraunhofer EMI durchgeführt, wobei die Targetplatten aus Baustahl der Sorte S355 gefertigt waren. Die Plattendicke betrug jeweils 20 mm. Die Versuche unterscheiden sich gemäß Tab. 7.2 hinsichtlich der Ladungsmasse und der -geometrie.

Tab. 7.2 Versuchsparameter der Vorversuche mit S355-Platten

Bez.	Ladungsmasse m_{Sp} / [g]	Ladungshöhe H_{Sp} / Ladungsdurchmesser D_{Sp}	Versagensmode
FX760	120	3:1	II
FX761	120	1:3	II
FX762	200	1:3	II

Bei den folgenden Vergleichen sind die Abbildungen aus der Simulation auf den gleichen Maßstab skaliert wie die Versuchsbilder. Das Simulationsergebnis zu FX760 prognostiziert einen frontseitigen Krater mit einem D_{OP} von 37 mm (vgl. Abb. 7.15) und einen Bereich mit rückseitigen Abplatzungen mit einem D_{HP} von 38 mm (vgl. Abb. 7.16). Im Vergleich zum im Versuch vorgefundenen Schadensbild wird der Durchmesser des Bereiches mit rückseitigen Abplatzungen somit um etwa 17 % überschätzt.

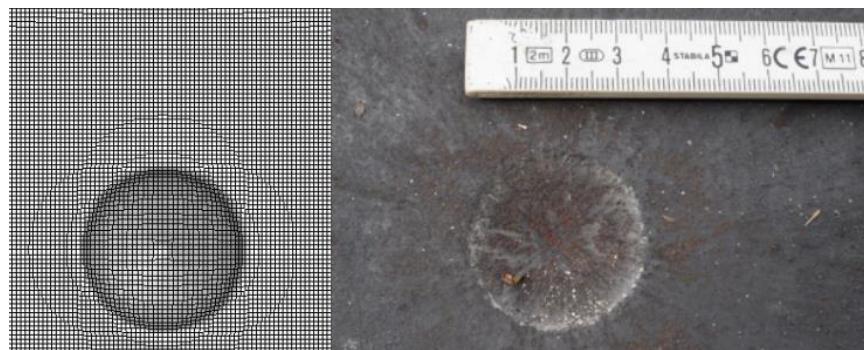


Abb. 7.15 Verformungen der Frontseite in Vorversuch FX760 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)



Abb. 7.16 Verformungen der Rückseite in Vorversuch FX760 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)

Im Vergleich zu FX760 wurde in FX761 die Ladungsgeometrie korrigiert. Die simulierte Kratertiefe s von ca. 14 mm stimmt größtenteils mit dem Versuch ermittelten Wert ca. 13 mm überein. Auf der Frontseite bildete sich ein Krater mit einem Außen-durchmesser D_{OP} von ca. 67 mm, welcher in der Simulation mit einem Wert von etwa 79 mm überschätzt wird (vgl. Abb. 7.17). Der Durchmesser des Abplatzers D_{HP} wird mit 83 mm im Vergleich zum Versuchsergebnis von ca. 73 mm überschätzt (vgl. Abb. 7.17). Gleiches gilt für die berechnete Masse des Abplatzers von 325 g im Vergleich zu 193 g im Versuch.

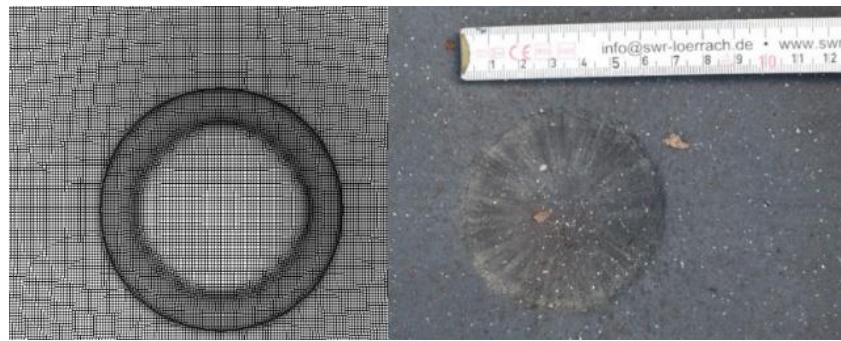


Abb. 7.17 Verformungen der Frontseite in Vorversuch FX761 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)

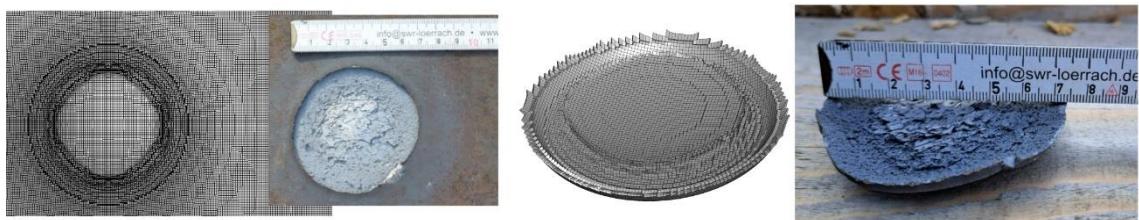


Abb. 7.18 Verformung und Abplatzung auf der Rückseite in Vorversuch FX761 in Simulation (jeweils links) und Schadensbild im Versuch (jeweils rechts)

In Versuch FX762 wurde die Ladungsmasse im Vergleich zu FX761 erhöht. Die numerische Simulation reproduziert nicht die Versagensmode II und prognostiziert stattdessen die Mode III (vgl. Abb. 7.19 und Abb. 7.20). Durch Kalibrierung der Parameterbelegung des Versagensmodells (vgl. Tab. 2.9) könnte das Simulationsergebnis angepasst werden. Allerdings ist die Datenbasis zu Sprengversuchen mit S355-Platten gering. Zudem fehlen Versuchsdaten zur Charakterisierung des Materialverhaltens. Da die übrigen Versuche mit S235JR- und GGG40-Platten durchgeführt wurden, wurde auf eine Kalibrierung verzichtet.

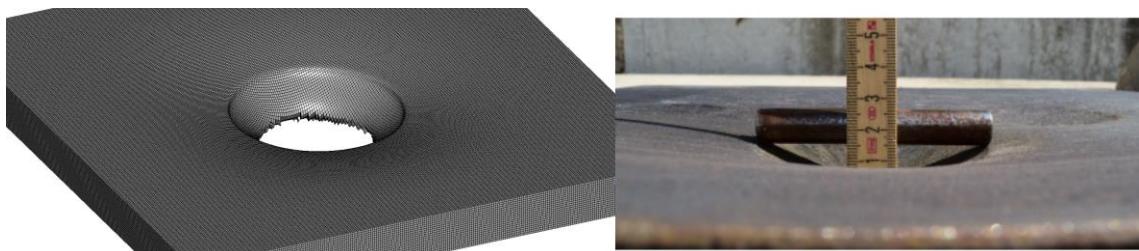


Abb. 7.19 Verformungen auf der Frontseite in Vorversuch FX762 in Simulation (links) und Versuch (rechts)

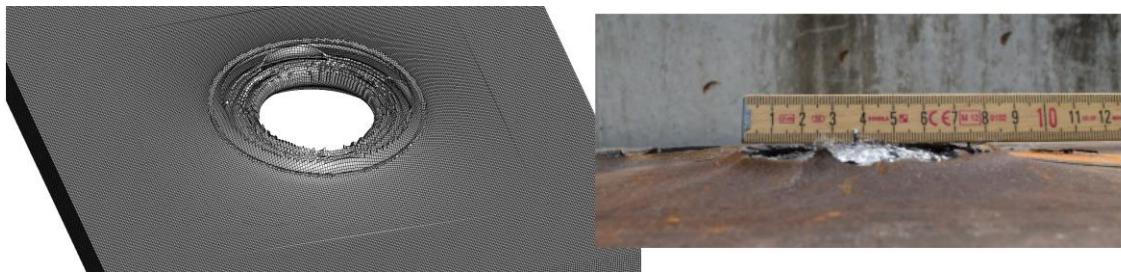


Abb. 7.20 Verformungen auf der Rückseite in Vorversuch FX762 Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)

7.1.5.2 Ergebnisse zur Simulation der Versuche mit den Plattenmaterialien S235JR und GGG40

In Abb. 7.21 werden mit AUTODYN berechnete Schädigungen der Querschnitte der S235JR-Targetplatten verglichen. In der überwiegenden Anzahl von Fällen wird die Versagensmode korrekt reproduziert. In Versuchen mit Ladungsmassen von 100 g und 120 g wird stets Perforation vorhergesagt, was im Hinblick auf die Versuchsergebnisse ein konservatives Ergebnis darstellt. Da sich bei der SPH-Methode die Partikel voneinander entfernen können, ist eine Erosion nicht erforderlich.

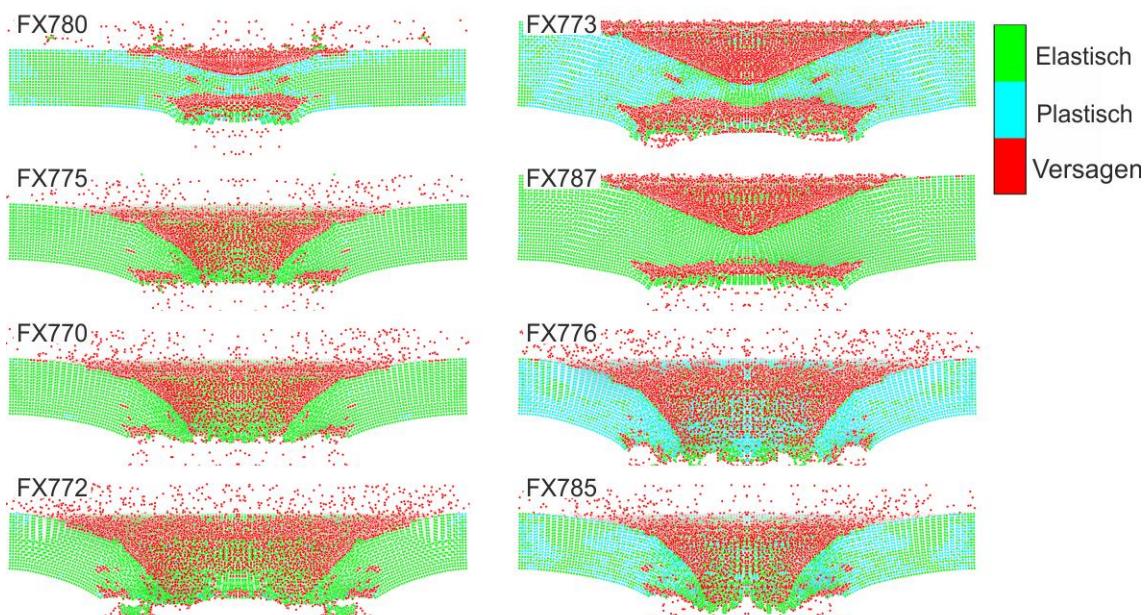


Abb. 7.21 Schädigungsbilder der Querschnitte in Simulationen mit AUTODYN zu Versuchen mit S235-Platten

In Simulationen mit LS-DYNA wird auf Elementerosion zurückgegriffen, womit sich formal auch Fragmentierung abbilden lässt. Exemplarisch ist dies in Abb. 7.22 für Ladungsmassen von 50 g und in Abb. 7.23 für Ladungsmassen von 200 g dargestellt. Es wird

deutlich, dass Form und Größe der Fragmente entscheidend von der Materialmodellierung abhängen. In den Simulationen zu Versuchen mit S235-Platten werden bei entsprechender Kalibrierung der Parameter des Versagensmodells Form und Größe der Bruchstücke zufriedenstellend reproduziert. Die hohe Anzahl an Fragmenten in der Simulation zu Versuchen mit GGG40-Platten (speziell FX782) wird im Hinblick auf das Versuchsergebnis als nicht realistisch bewertet. Zwar bildet sich jeweils ein charakteristisches größeres Trümmerstück mit hoher Geschwindigkeit, aber die Massenanteile der kleineren Fragmente sind nicht vernachlässigbar. Bemerkenswert ist in Abb. 7.23 ferner die hohe Geschwindigkeit eines kleineren Ringfragmentes in der Simulation zu FX782 (G-20-200-3), das das größere Trümmerstück überholt.

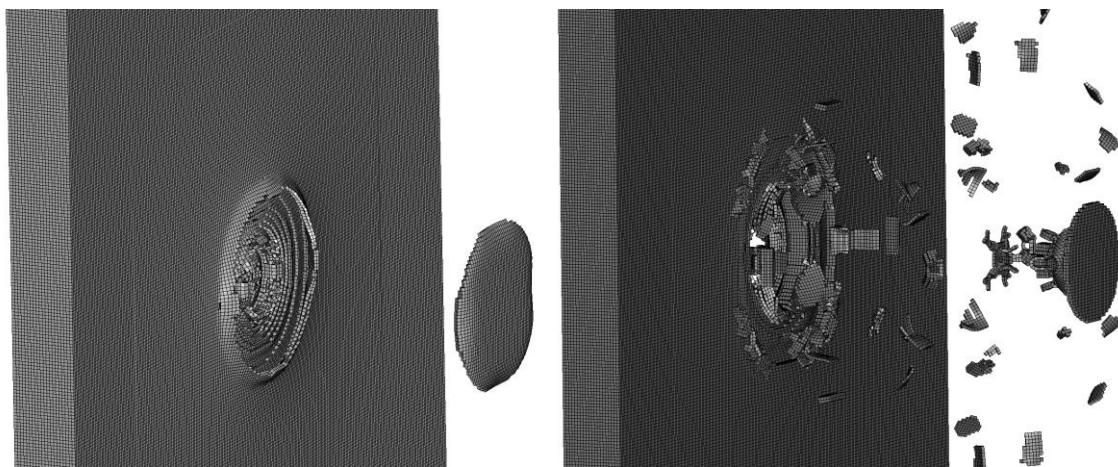


Abb. 7.22 Vergleich der Fragmentierung in Simulationen zu den Versuchen FX780 (S-20-50-3) (links) und FX779 (G-20-50-3) (rechts) mit 50 g Ladungen

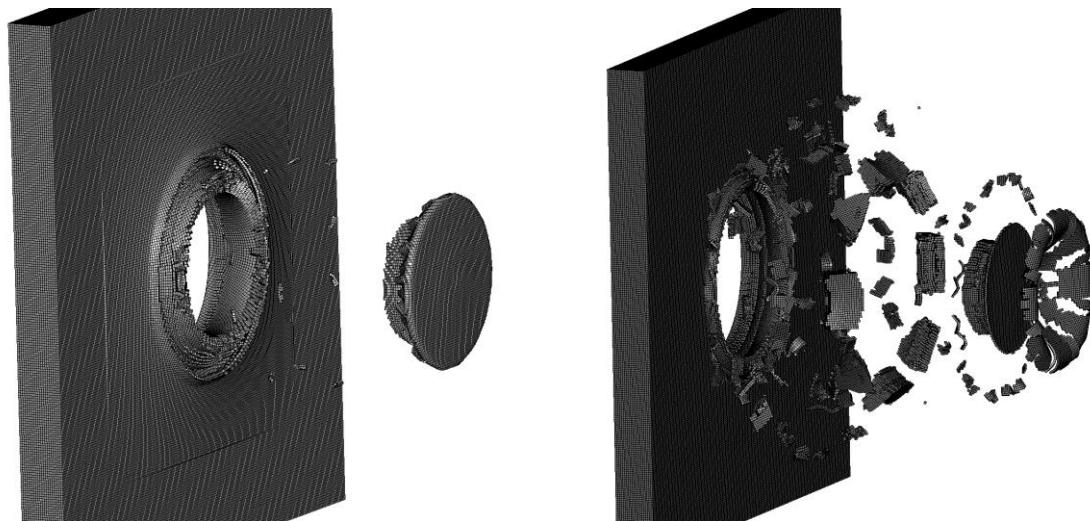


Abb. 7.23 Vergleich der Fragmentierung in Simulationen zu den Versuchen FX772 (S-20-200-3) (links) und FX782 (G-20-200-3) (rechts) mit 200 g Ladungen

Im Rahmen von Parameterstudien ist der Einfluss der Modellparameter für Sprengstoff sowie des Versagensmodells von S235 untersucht worden. Ausgewählte Parametervariationen sind in Tab. 7.3 zusammengefasst.

Tab. 7.3 Variationsparameter in LS-DYNA Simulationen

Rechnung	Sprengstoff	$p_{min} / [GPa]$	D_1	D_2	D_3
1	Seismoplast	-1,625	0,19596	0,1845	-3,189
2	PETN 1.50	-1,75	0,19596	0,1845	-3,189
3	PETN 1.50	-1,625	0,39192	0,369	-3,189
4	PETN 1.50	-1,625	0,19596	0,1845	-3,189

Der Einfluss der Parametervariationen auf das Versagensbild der Platte in Versuch FX772 (S-20-200-3) ist in Abb. 7.24 illustriert. Variationen des Sprengstoffmodells (vgl. Rechnung 1 und 4) wirken sich zum einen in Geschwindigkeit und Größe des primären Fragments sowie in Form und Anzahl der Sekundärfragmente aus. Der Einfluss des Wertes für p_{min} (vgl. Rechnung 2 und 4) weist einen vergleichsweise geringen Einfluss auf Form und Anzahl der sekundären Fragmente auf. Anhand des Vergleiches von Rechnung 3 und 4 wird deutlich, dass die Parameter des Johnson-Cook-Versagensmodells einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung sekundärer Fragmente aufweisen können. In den Versuchen wird in Einzelfällen die Ablösung ringförmiger Fragmente beobachtet, dessen Auftreten möglicherweise experimentellen Streuungen unterliegt. Allerdings wird das Ergebnis von Rechnung 4 als nicht realistisch bewertet, da mit dem sekundären Fragment die volle Plattendicke ausgeworfen wird und sich somit der Durchmesser der Öffnung gegenüber Rechnung 3 erhöht. Die Parameterbelegung für D_1-D_3 erfolgte für Simulationen mit AUTODYN und die SPH-Methode zur Reproduktion des Schadensbildes von S235-Platten bei EFP-Beschuss /GRS 16a/. In den Referenzrechnungen mit LS-DYNA zur vorliegenden Versuchsreihe mit S235-Platten unter Lasten infolge von Kontaktdetonation wurde der abgeänderte Parametersatz aus Rechnung 3 verwendet.

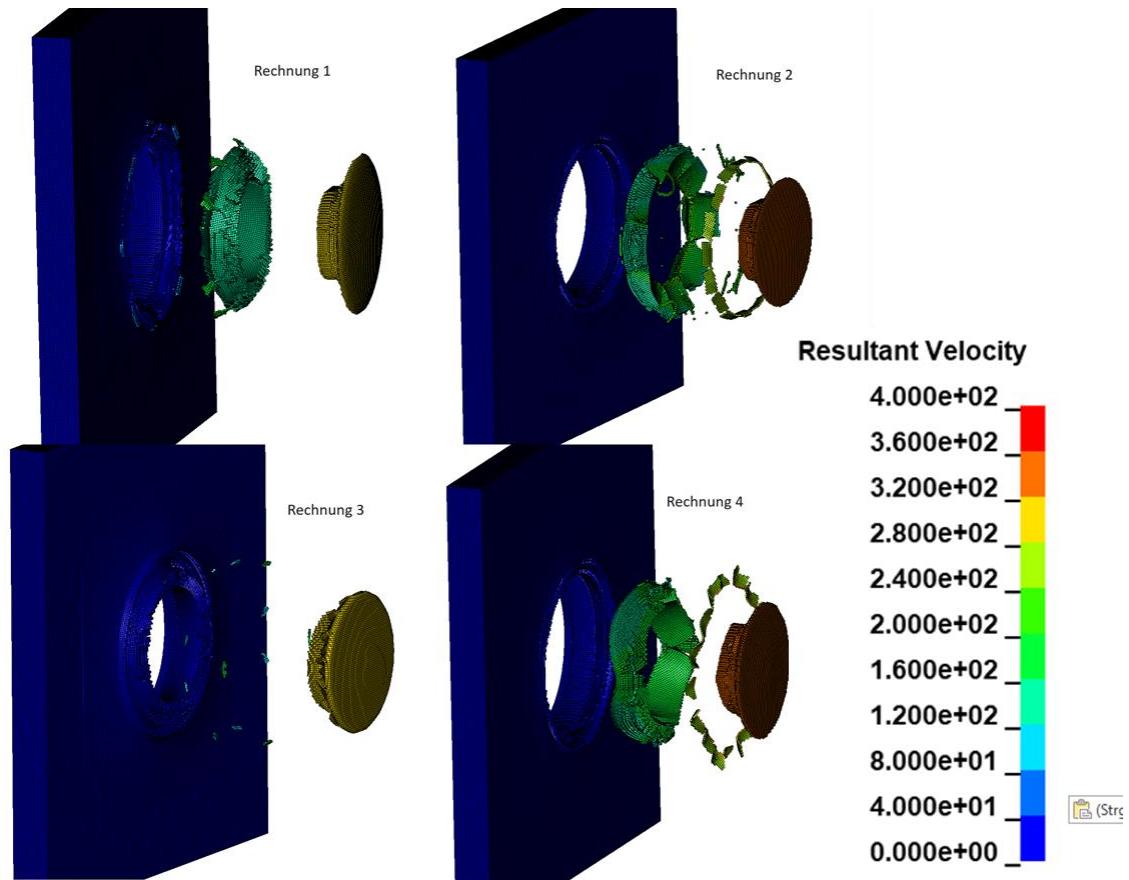


Abb. 7.24 Einfluss diverser Parameter auf Bruchbild des Targets und Geschwindigkeitsverteilungen der Trümmer in Simulationen zu FX772 (S-20-200-3)

Die Auswertung von Geschwindigkeiten und Massen in Simulationen mit AUTODYN erfolgt integral über alle Fragmente. Die Ergebnisse zu S235-Platten sind in Tab. 7.4 zusammengefasst. Tendenziell werden mit dem Parametersatz für Seismoplast im Vergleich zu PETN 1.50 kleinere Fragmentgeschwindigkeiten ermittelt, wobei die größten Abweichungen in der Simulation zu Versuch FX780 auftreten.

Tab. 7.4 Ergebnisse AUTODYN, $p_{min} = -1,625 \text{ GPa}$ für S235-Platten

Bezeichnung	Kürzel	Seismoplast			PETN 1.50		
		v / [m/s]	m_{Ab} / [g]	Versagens-mode	v / [m/s]	m_{Ab} / [g]	Versagens-mode
FX780	S-20-50-3	88	71	II	152	69	II
FX775	S-20-100-3	152	226	III	212	235	III
FX770/FX771	S-20-120-3	189	292	III	215	300	III
FX772	S-20-200-3	247	473	III	259	515	III
FX773/FX774	S-30-200-3	170	371	II	192	389	II
FX787	S-30-200-2	190	192	II	200	222	II
FX776	S-20-200-2	224	379	III	268	354	III
FX785	S-20-200-1	275	143	III	298	174	III

In Tab. 7.5 sind die mit LS-DYNA ermittelten Simulationsergebnisse zu S235-Platten aufgeführt. Die Auswertung erfolgte hier für das in sämtlichen Fällen charakteristische primäre Fragment, welches auch die maximale Geschwindigkeit aufweist. Dieses wurde mit dem Programm LS-PREPOST vermessen. Der Parametersatz für Seismoplast reproduziert nicht die Versagensmode von FX780 (S-20-50-3). In Versuchen mit Ladungsmassen von 100 g und 120 g wird stets Perforation vorhergesagt, was im Hinblick auf die Versuchsergebnisse ein konservatives Ergebnis darstellt.

Tab. 7.5 Ergebnisse LS-DYNA, $p_{min} = -1,625 \text{ GPa}$ in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für S235-Platten

Bezeichnung	Kürzel	Seismoplast			PETN 1.50		
		v / [m/s]	$m_{Ab} / [\text{g}]$	Versagens-mode	v / [m/s]	$m_{Ab} / [\text{g}]$	Versagens-mode
FX780	S-20-50-3	-	-	I	205	70	II
FX775	S-20-100-3	N/A	N/A	N/A	223	196	III
FX770/FX771	S-20-120-3	199	251	III	247	237	III
FX772	S-20-200-3	295	360	III	310	370	III
FX773/FX774	S-30-200-3	N/A	N/A	N/A	195	310	II
FX787	S-30-200-2	N/A	N/A	N/A	245	196	II
FX776	S-20-200-2	N/A	N/A	N/A	327	185	III
FX785	S-20-200-1	N/A	N/A	N/A	412	37	III

In Simulationen zu Versuchen mit GGG40-Platten lässt sich ein starker Einfluss der Parameter des Johnson-Cook-Versagensmodells auf Form und Anzahl der Fragmente feststellen. Ein zuletzt veröffentlichter Parametersatz /ÖZC 24/ für ein Festigkeits- und Versagensmodell von EN-GJS-400 prognostiziert im Vergleich zum bislang genutzten Parametersatz /HÄC 11/ eine stark abweichende Fragmentierung, wie exemplarisch anhand von Versuch FX779 (G-20-50-3) (vgl. Abb. 7.25) und FX782 (G-20-200-3) (vgl. Abb. 7.26) deutlich wird. In diesen Darstellungen wird die Fragmentierung des zentralen Plattenbereiches mit Abmessungen von $80 \times 80 \text{ mm}^2$ miteinander verglichen. Auch der Parametersatz nach /ÖZC 24/ prognostiziert für FX779 (G-20-50-3) die Versagensmode III, was im Vergleich zum Versuchsergebnis (Mode II) ein konservatives Ergebnis darstellt. Insgesamt erscheinen die Ergebnisse mit dem Parametersatz nach /ÖZC 24/ bezüglich der Fragmentformen realistischer als die Ergebnisse mit dem Parametersatz nach /HÄC 11/. Andererseits erscheinen die Ergebnisse mit dem Parametersatz nach /ÖZC 24/ bezüglich der Lochdurchmesser weniger realistisch.

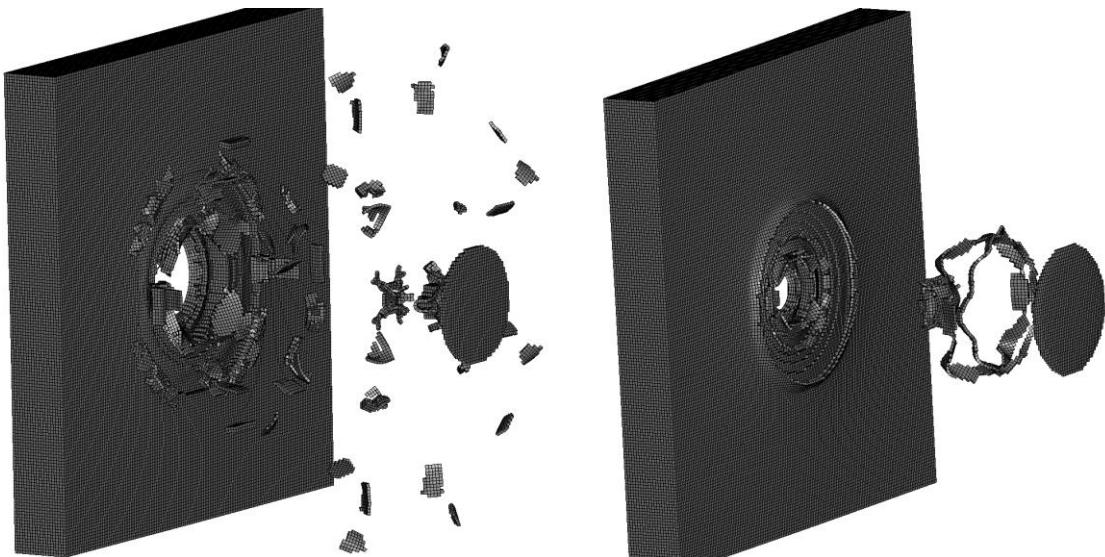


Abb. 7.25 Vergleich von Plattenzerstörung und Fragmentierung in Simulationen zu Versuch FX779 (G-20-50-3) mit Parametersätzen nach /HÄC 11/ (links) und /ÖZC 24/ (rechts)

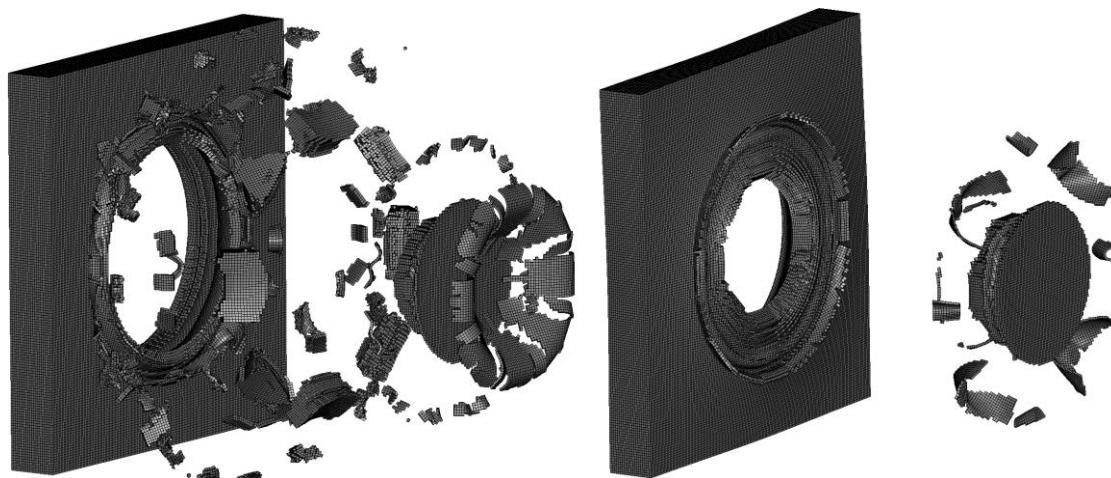


Abb. 7.26 Vergleich von Plattenzerstörung und Fragmentierung in Simulationen zu Versuch FX782 (G-20-200-3) mit Parametersätzen nach /HÄC 11/ (links) und /ÖZC 24/ (rechts)

Da im Hinblick auf die Fragmentanzahl die Ergebnisse mit dem Parametersatz nach /HÄC 11/ nicht auswertbar sind, sind in Tab. 7.6 lediglich die Ergebnisse mit dem Parametersatz nach /ÖZC 24/ aufgeführt.

Tab. 7.6 Ergebnisse LS-DYNA, $p_{min} = -0,94$ GPa in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für GGG40 mit Parametern des Festigkeits- und Versagensmodells nach /ÖZC 24/

Versuch	Kürzel	Geschwindigkeit $v / [\text{m/s}]$	Abplatzermasse $m_{Ab} / [\text{g}]$	Versagensmode
FX779	G-20-50-3	262	57	III
FX781	G-20-100-3	300	123	III
FX778	G-20-120-3	311	170	III
FX782	G-20-200-3	360	310	III
FX783	G-20-100-2	368	67	III
FX784/FX786	G-20-120-2	314	73	III
FX788	G-20-200-2	409	167	III

Ergänzend zu den Untersuchungen mit LS-DYNA, wurden die Versuche FX779 (G-20-50-3) und FX782 (G-20-200-3) mit der SPH-Methode in AUTODYN simuliert, wobei lediglich ein einfaches Versagensmodell mit p_{min} -Kriterium verwendet wurde. Die Ergebnisse sind in Tab. 7.7 aufgeführt.

Tab. 7.7 Ergebnisse AUTODYN, $p_{min} = -0,94$ GPa in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für GGG40 mit Parametern des Festigkeitsmodells nach /HÄC 11/

Versuch	Kürzel	Geschwindigkeit $v / [\text{m/s}]$	Abplatzermasse $m_{Ab} / [\text{g}]$	Versagensmode
FX779	G-20-50-3	168	162	III
FX782	G-20-200-3	277	549	III

7.1.6 Vergleich von Simulations- und Versuchsergebnissen

In diesem Abschnitt werden die durchgeführten Versuchen mit Simulationen abgebildet und die Ergebnisse miteinander verglichen. In Tab. 7.8 sind für ausgewählte Versuchsreihen die Ergebnisse aus der Simulation gegenübergestellt. Im Speziellen werden die geometrischen Parameter wie Kraterdurchmesser auf der Sprengseite D_{OP} , Lochdurchmesser D_L bei Perforation, dem Kraterdurchmesser auf der Rückseite der Metallplatte D_{HP} und die Versagensmode betrachtet.

Tab. 7.8 Gegenüberstellung der geometrischen Ergebnisse von Simulation und Versuchen

Kürzel	Grundlage	D_{OP} / [mm]	D_L / [mm]	D_{HP} / [mm]	Versagensmode
S-20-120-3	FX771	69	30	104	III
	LS-DYNA	70	43	80	III
S-20-200-3	FX772	80	49	106	III
	LS-DYNA	85	61	91	III
S-20-50-3	FX780	53	-	73	II
	LS-DYNA	53	-	56	II
S-20-100-3	FX775	64	(30)*	96	III*
	LS-DYNA	66	38	76	III
S-30-200-3	FX773	82	-	113	II
	LS-DYNA	103 (83)**	-	84	II
S-20-200-1	FX785	57	11	68	III
	LS-DYNA	61	19	71	III
S-30-200-2	FX787	73	-	110	II
	LS-DYNA	87 (73)**	-	66	II

(*) Es ist lediglich eine kleine Öffnung zu sehen, wobei ein D_L zu erahnen ist.

(**) Unterschiedliche Durchmesser bei 30 mm dicken Platten aufgrund des Kegelverlaufs (siehe Text)

Die Kraterdurchmesser D_{OP} auf der Sprengseite entsprechen bis auf die Parametersätze mit den Kürzeln S-30-200-3 und S-30-200-2 näherungsweise den simulierten Ergebnissen. Bei den Versuchsreihen mit S235JR werden lediglich bei diesen zwei Parametersätzen Metallplatten mit einer Dicke von 30 mm verwendet. Die Vergrößerung des D_{OP} bei Verwendung einer dickeren Metallplatte um 15-20 mm kann nicht erklärt werden. Beim Vergleich der Querschnitte aus der Simulation Abb. 7.32 für den Parametersatz S-

20-200-1 und Abb. 7.33 für den Parametersatz S-30-200-2 fällt der Knick im Kraterverlauf auf. Bei der 20 mm dicken Metallplatte verläuft der Knick so, dass der weitere Verlauf quasi senkrecht verläuft und die Durchmesser auf der Metalloberfläche sowie im Knick gleich sind. Bei der 30 mm dicken Metallplatte ist dieser Knick ebenfalls vorhanden, allerdings ist der Verlauf danach nicht senkrecht, sondern läuft in einem anderen Winkel nach außen weg. Somit ist der zu messende Durchmesser auf der Metalloberfläche größer als der Durchmesser auf Höhe des Knicks. Das gleiche Phänomen lässt sich bei dem Parametersatz S-30-200-3 in Abb. 7.29 wiederfinden. Die Durchmesser auf Knickhöhe sind in Tab. 7.9 in Klammern mit zwei Sternchen markiert aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Durchmesser auf Knickhöhe die Ergebnisse aus den Versuchsreihen mit der 30 mm dicken Metallplatte wiedergeben. Die Versagensmode der einzelnen Versuchsreihen stimmt mit den Ergebnissen der Simulation überein. Bei der Versuchsreihe FX775 (S-20-100-3) ist eine Perforation zu sehen, allerdings hängt das letzte Stück noch an der Metallplatte und ein Lochdurchmesser ist zu erahnen, weshalb in der oben aufgeführten Tabelle der Lochdurchmesser mit einem Sternchen markiert ist. Die numerisch errechnete Versagensmode weicht von der im Versuch vorliegenden Versagensmode ab. Laut Simulation ist eine Perforation zu erwarten, was letztlich eine konservative Be trachtung ist. Die Lochdurchmesser D_L der Versuchsreihen, bei denen eine Perforation vorliegt, fällt bei der Simulation stets etwas größer aus. Beim rückseitigen Kraterdurchmesser der Metallplatte D_{HP} fällt auf, dass die numerisch berechneten Durchmesser, bis auf den Parametersatz S-20-200-1, durchweg kleiner ausfallen, als die bei den Versuchen. Beim Parametersatz S-20-200-1 sind die beiden Durchmesser quasi gleich groß. Diese Versuchsreihe ist die einzige, bei der ein Ladungsverhältnis Durchmesser zu Höhe von 1:1 vorliegt.

Im Folgenden werden die in Tab. 7.8 gegenübergestellten Parametersätze graphisch ausgewertet. Dazu werden simulierte Schadensbilder mit den aus Versuchsreihen verglichen.

Beim Parametersatz (S-20-120-3) wird die Form des Abplatters, wie in Abb. 7.27 zu sehen, vergleichbar wiedergegeben. Im Versuch liegt der Abplatter in zwei Teilen vor, was aus der Simulation nicht hervorgeht. Dieser Unterschied ist möglicherweise auch auf die statistische Streuung der Materialeigenschaften der Metallplatte zurückzuführen, was hier nicht validiert werden kann, da zu jedem Parametersatz, bis auf einzelne Wie-

derholungen, lediglich ein Versuch vorliegt. Bei dieser Versuchsreihe gibt es einen zweiten Wiederholungsversuch, der allerdings nicht aussagekräftig ist, da zwischen den beiden Versuchsreihen der Versuchsaufbau abgewandelt worden ist.

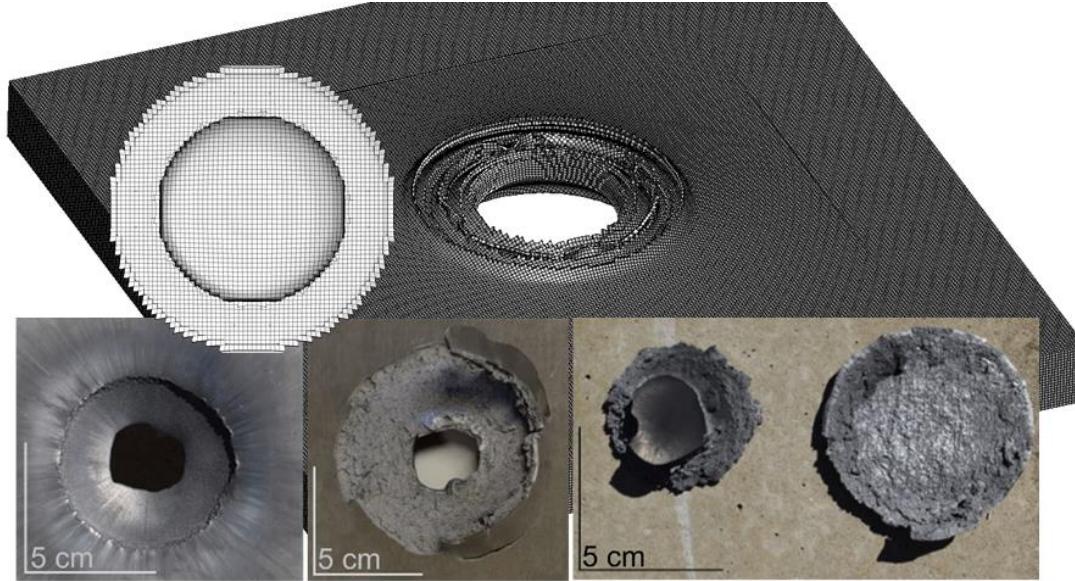


Abb. 7.27 FX771 im Vergleich zur Simulation (S-20-120-3)

Beim Vergleich des Versuches FX772 (S-20-200-3) mit der Simulation ist in Abb. 7.28 zu sehen, dass die Simulation ein etwas anderes Bild wiedergibt. Bei der Simulation ist die Differenz zwischen D_L und D_{HP} sehr gering im Vergleich zu den Versuchsergebnissen. Dies geht auch aus Tab. 7.9 hervor. Wohingegen im Versuch eine Differenz von etwa 60 mm vorliegt, beträgt die Differenz bei der Simulation halb so viel. Dies ist auch anhand der Form des Abplatzers in Abb. 7.28 zu erkennen. Es sieht bei der Simulation so aus, dass der fehlende äußere Kranz nach oben gefaltet ist.

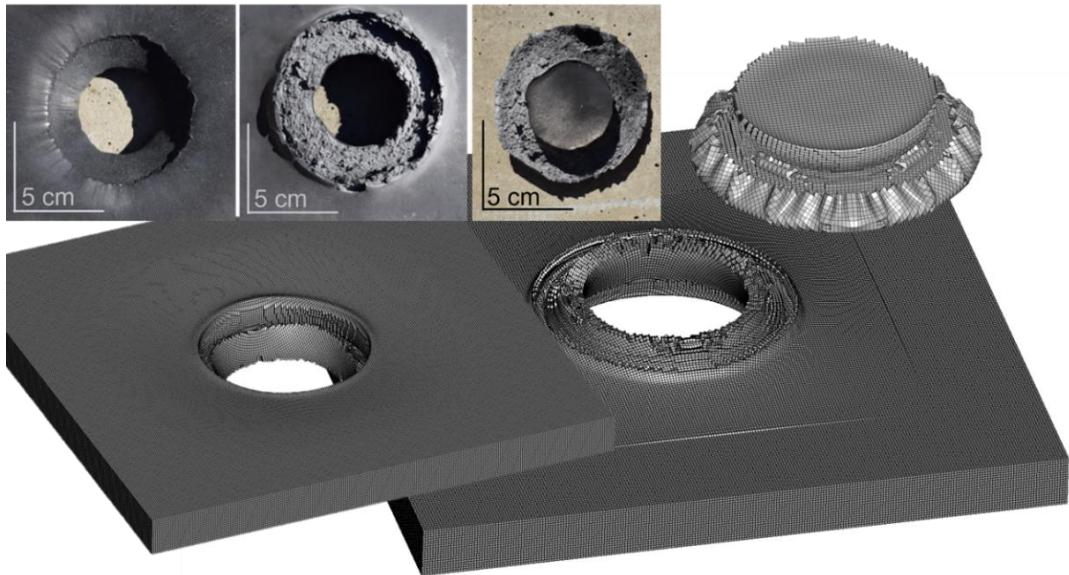


Abb. 7.28 FX772 im Vergleich zur Simulation (S-20-200-3)

In Abb. 7.29 gibt die Simulation die Schadensform der Versuchsreihe FX773 (S-30-200-3) vergleichbar wieder. Auf der Unterseite der Metallplatte ist in der Simulation ein Ring zu erahnen, der sich kurz vor dem Ablösen befindet. Im Versuch selbst ist dieser Ring in dieser Versuchsreihe so nicht erkennbar. Die flache, tellerartige Form des Abplatzers wird durch die Simulation wiedergegeben. Die größere Abweichung beim D_{OP} und der nicht vorliegende Knick im Versuch wurde oben erwähnt.

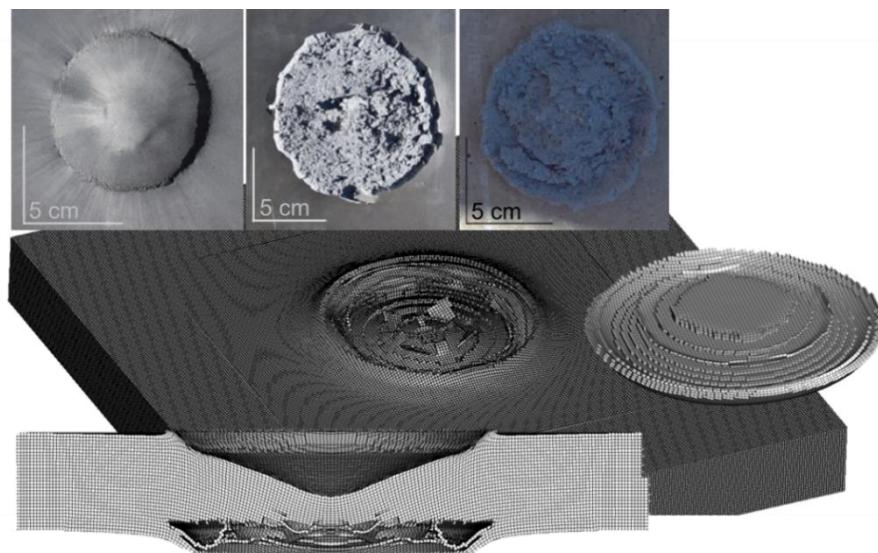


Abb. 7.29 FX773 im Vergleich zur Simulation (S-30-200-3)

Wie oben bereits erwähnt, spiegelt die Simulation des Versuches FX775 (S-20-100-3) das Schadensbild des Versuches nur bedingt wieder. In der Simulation weist der Abplatzer einen hohen Steg auf, der im Versuch noch mit der Platte fest verbunden ist. Im Versuch liegt ein Aufriss vor und es ist ein Lochdurchmesser zu erahnen. Bei dieser Kombination der Parameter ist bei Baustahl in etwa die Grenze, wo das Material gerade nicht hält. Die Simulation hingegen sagt eine Perforation voraus, was für weitere Be- trachtungen ein konservativerer Ansatz ist.

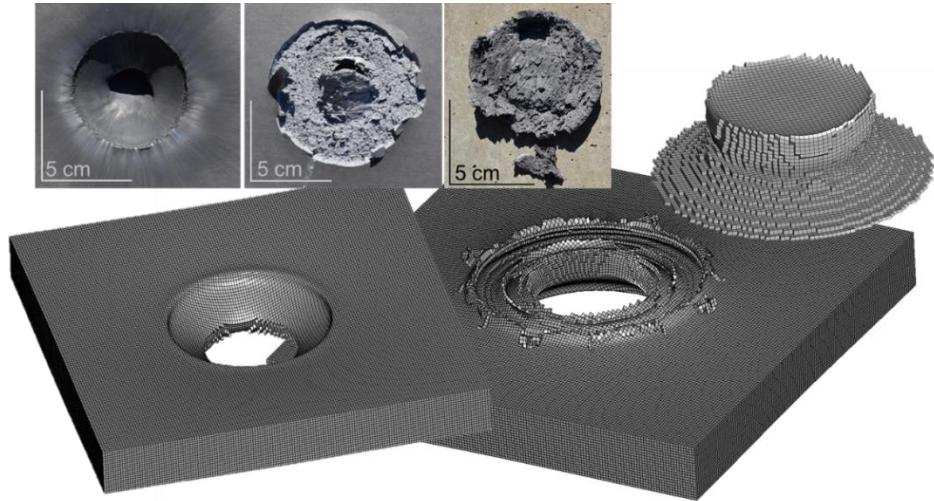


Abb. 7.30 FX775 im Vergleich zur Simulation (S-20-100-3)

In Abb. 7.31 sind die Ergebnisse der Simulation zum Versuch FX780 mit dem Parame- tersatz S-20-50-3 aufgeführt. Hier spiegelt die Simulation das Versagen der Metallplatte im Versuch wieder. Es liegt eine Spallation vor. Der Abplatzer im Versuch ist eher teller- förmig und flach, was durch die Simulation wiedergegeben wird.

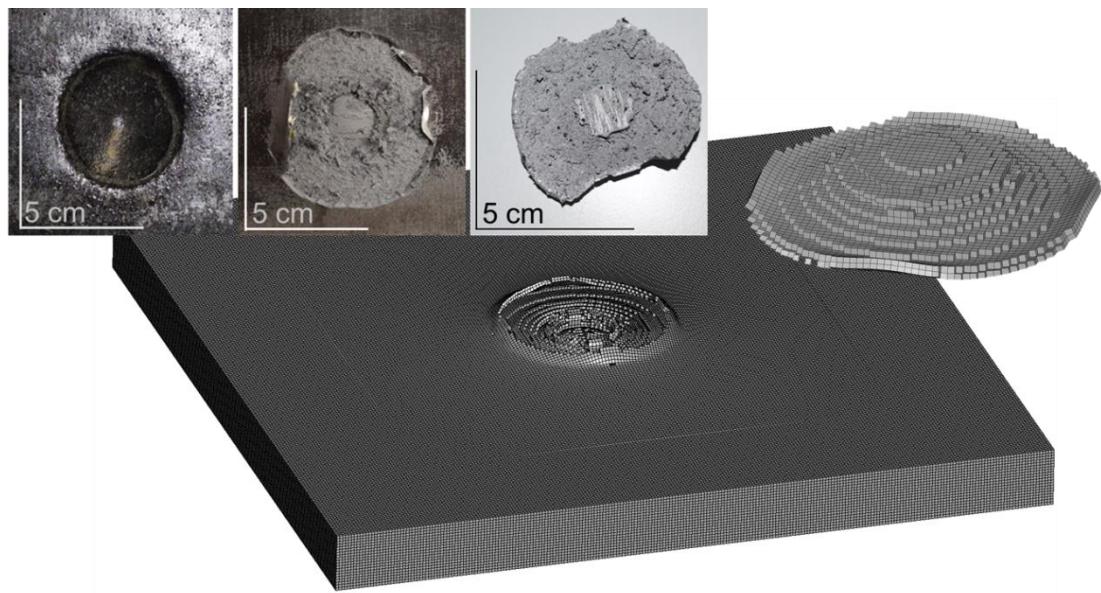


Abb. 7.31 FX780 im Vergleich zur Simulation (S-20-50-3)

Die Simulation mit dem Parametersatz S-20-200-1 des Versuchs FX785 spiegelt die Schädigung der Metallplatte mit einem kleinen Loch in der Mitte wider. Der simulierte Abplatzer hingegen scheint im Vergleich deformiert zu sein und entspricht nicht dem des Versuches.

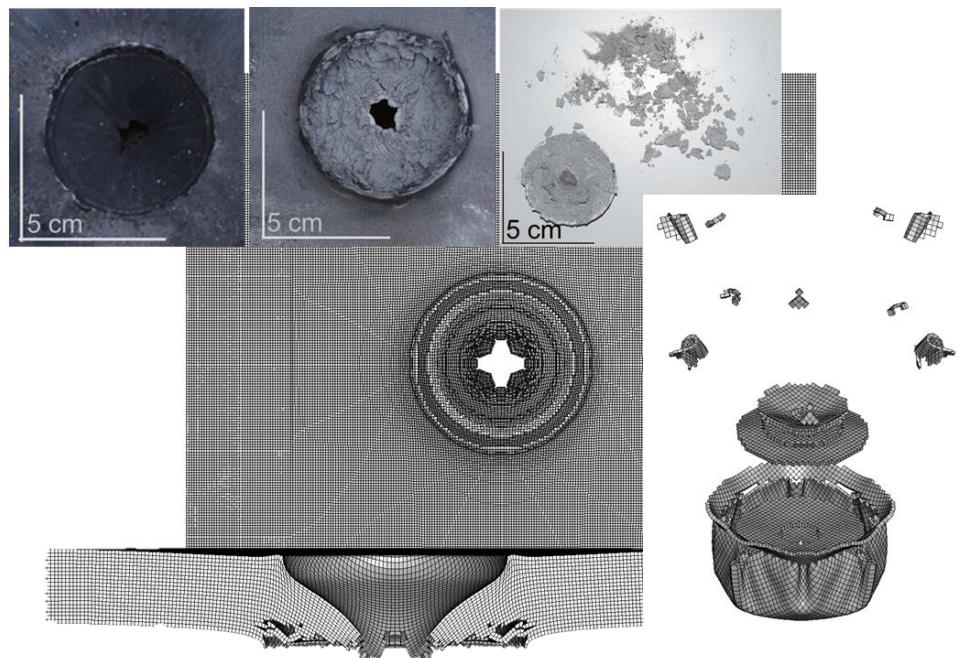


Abb. 7.32 FX785 im Vergleich zur Simulation (S-20-200-1)

Wie auch bei der Simulation der anderen Versuchsreihe mit der 30 mm dicken Metallplatte scheint es in Abb. 7.33 im Versuch keinen Knick im Krater auf der Metalloberseite zu geben. Das Spallationsversagen wird mit der Simulation dieses Parametersatzes wiedergegeben.

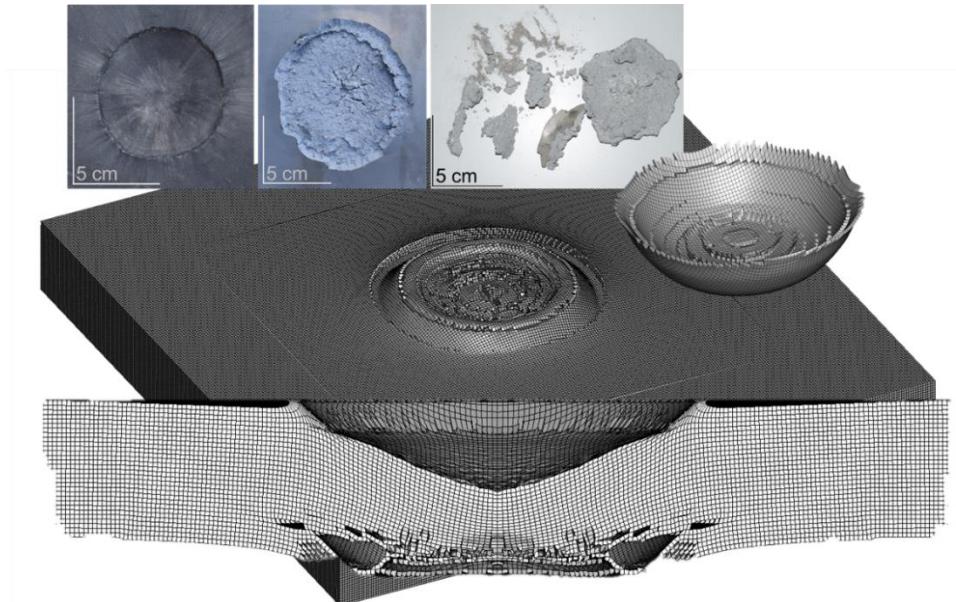


Abb. 7.33 FX787 im Vergleich zur Simulation (S-30-200-2)

In der Tab. 7.9 sind die Abplatzermassen und Geschwindigkeiten der Bruchstücke der Simulationen aufgeführt. Dabei gibt es Variationen des Sprengstoffes und des Simulationsprogramms. In der Tab. 7.9 sind die Ergebnisse für die Simulationen mit S235JR-Platten aufgeführt. Eine Illustration der in Tab. 7.9 aufgeführten Ergebnisse ist für die Abplatzermassen in Abb. 7.34 und für die Geschwindigkeiten in Abb. 7.35 dargestellt. Es fällt in beiden Diagrammen auf, dass je nach Kombination aus Sprengstoff und Simulationsprogramm die tatsächlich im Versuch vorliegenden Ergebnisse unterschiedlich stark unter- bzw. überschätzt werden. Im Vergleich zu den im Versuch ermittelten Geschwindigkeiten liegen die simulierten Geschwindigkeiten mit der Kombination LS-DYNA und PETN 1.50 am nächsten an den Versuchsergebnissen. Bei den Abplatzermassen hingegen sind die Abweichungen dann vergleichsweise groß.

Tab. 7.9 Gegenüberstellung m_{Ab} und v von Simulation und Versuchen

Kürzel	Grundlage	$m_{Ab} /$	$v /$	Versagen-mode	$m_{Ab} /$	$v /$	Versagens-mode
		[g]	[m/s]		[g]	[m/s]	
	Seismoplast			PETN 1.50			
S-20-120-3	FX771	290	270	III			
	LS-DYNA	199	251	III	237	247	III
	AUTODYN	292	189	III	300	215	III
S-20-200-3	FX772	448	310	III			
	LS-DYNA	360	295	III	370	310	III
	AUTODYN	473	247	III	515	259	III
S-20-50-3	FX780	115	140	II			
	LS-DYNA	-	-	I	70	205	II
	AUTODYN	71	88	II	69	152	II
S-20-100-3	FX775	240	220	II*			
	LS-DYNA	N/A	N/A	N/A	196	223	III
	AUTODYN	226	152	III	235	212	III
S-30-200-3	FX773/FX774	484-526	230	II			
	LS-DYNA	N/A	N/A	N/A	310	195	II
	AUTODYN	371	170	II	389	192	II
S-20-200-1	FX785	127	391	III			
	LS-DYNA	N/A	N/A	N/A	37	412	III
	AUTODYN	143	275	III	174	298	III
S-20-200-2	FX776	288	370	III			
	LS-DYNA	N/A	N/A	N/A	185	327	III
	AUTODYN	379	224	III	354	268	III
S-30-200-2	FX787	403	286	II			
	LS-DYNA	N/A	N/A	N/A	196	245	II
	AUTODYN	192	190	II	222	200	II

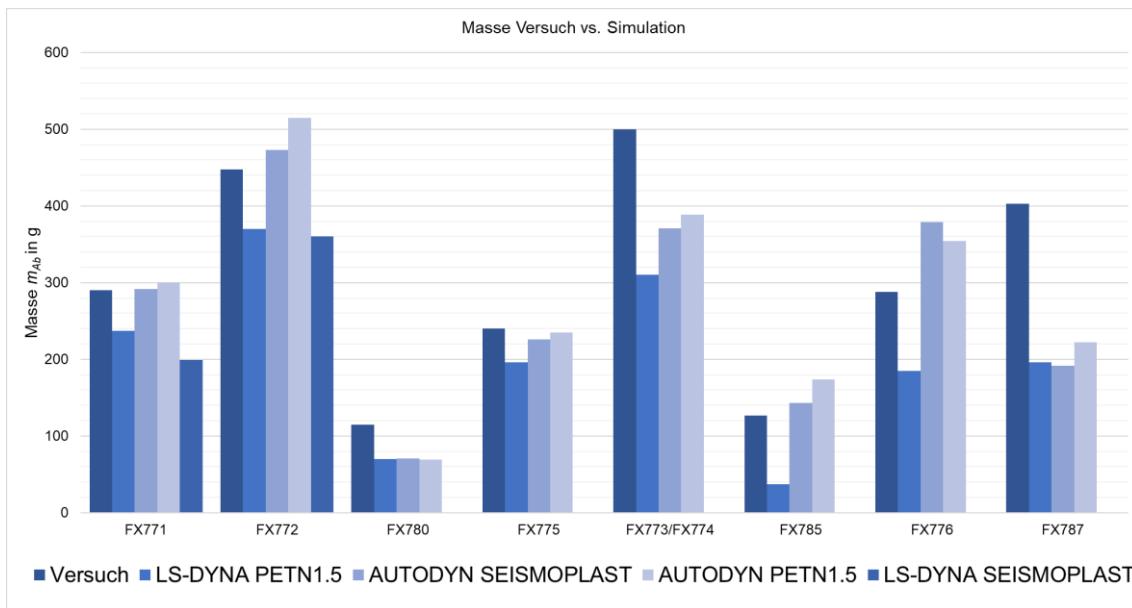


Abb. 7.34 Vergleich der Abplatzermassen zwischen Versuch und Simulation

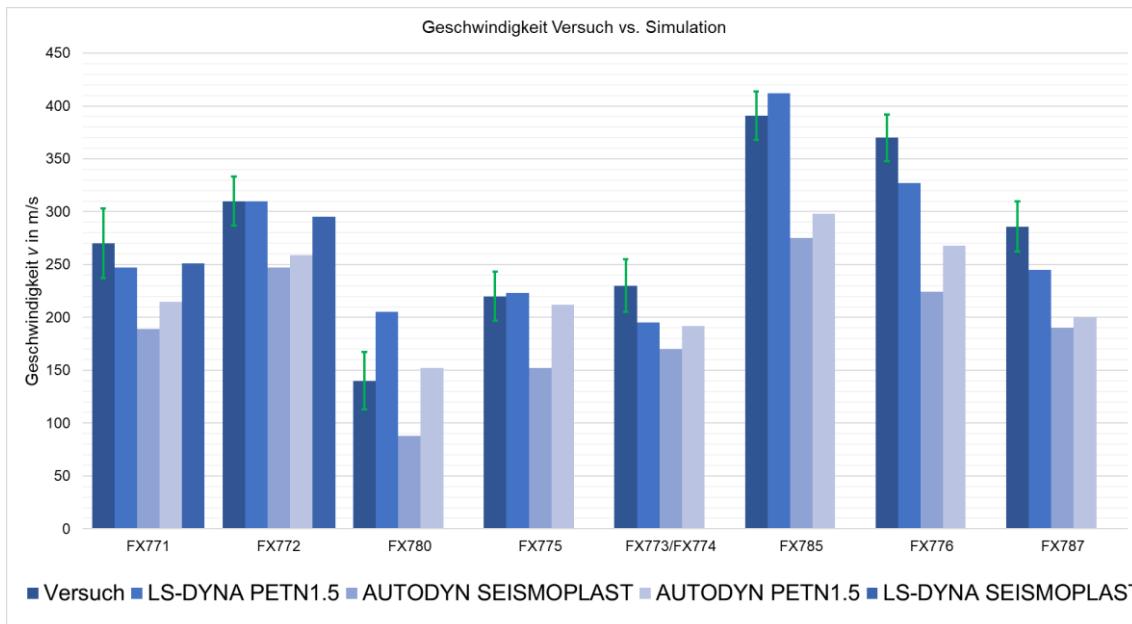


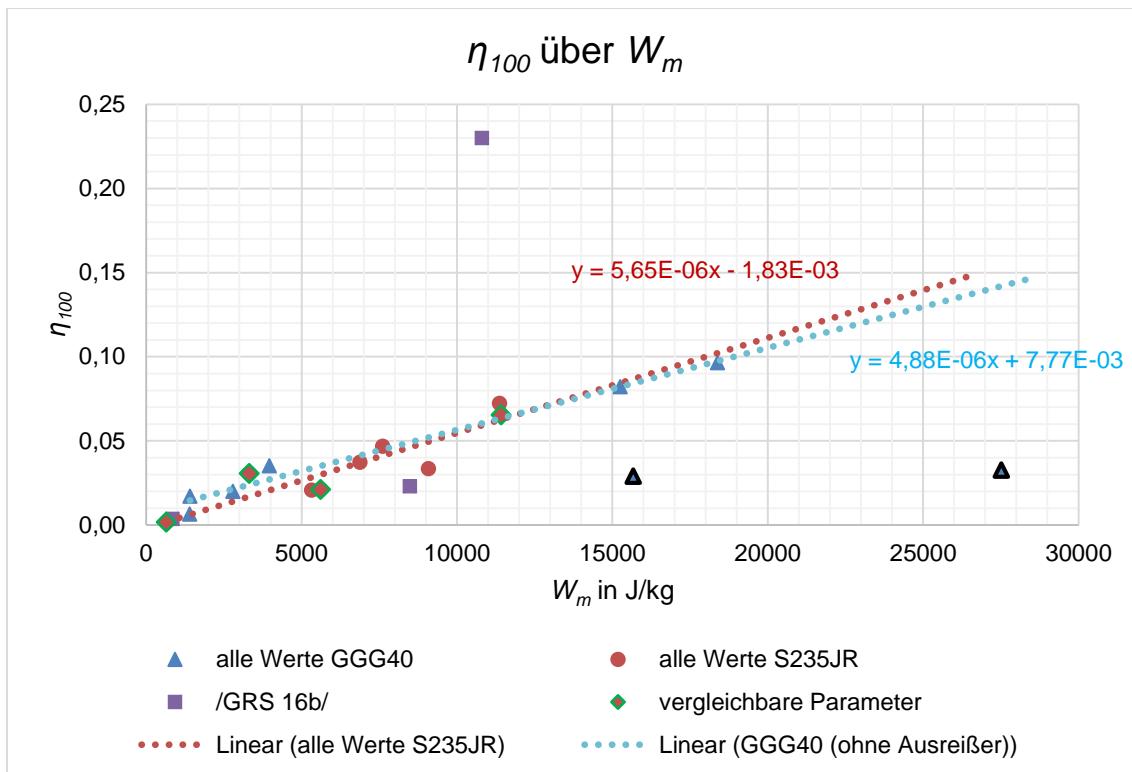
Abb. 7.35 Vergleich der Geschwindigkeiten zwischen Versuch und Simulation

Es bestehen Unsicherheiten bezüglich der Charakterisierung des verwendeten Sprengstoffs. Im Rahmen einer numerischen Parameterstudie konnte für beide verwendeten Rechenprogramme eine Abhängigkeit der ausgeworfenen Masse und der Geschwindigkeiten der Fragmente vom Sprengstoffmodell festgestellt werden. In Simulationen mit dem Parametersatz PETN 1.50 treten höhere Belastungen der Zielstruktur auf als bei Verwendung des Parametersatzes Seismoplast (vgl. Abb. 7.8). Tendenziell werden für den Parametersatz PETN 1.50 im Vergleich zu Ergebnissen mit dem Parametersatz

Seismoplast sowohl höhere Werte der ausgeworfenen Masse als auch höhere Fragmentgeschwindigkeiten ermittelt (vgl. Tab. 7.9). Bemerkenswert ist der Einfluss auf die Versagensmode in Simulationen zu Versuch FX780 (S-20-50-3) mit dem Rechenprogramm LS-DYNA (vgl. Tab. 7.5). Die geringeren Werte der prognostizierten ausgeworfenen Masse in Rechnungen mit Seismoplast können lediglich teilweise mit der höheren Dichte und der geringeren Auflagefläche des entsprechenden Parametersatzes erklärt werden, d. h. Unterschiede in der Belastung üben neben geometrischen Effekten ebenfalls einen Einfluss auf die Masse der Fragmente aus. Trotz der geringeren zu beschleunigenden Masse wurden darüber hinaus in Simulationen mit Seismoplast geringere Fragmentgeschwindigkeiten ermittelt, d. h. Effekte der Unterschiede in der Belastung werden durch den Effekt der geringeren Masse nicht kompensiert. Zusammenfassend werden die Ergebnisse mit dem Parametersatz PETN 1.50 als konservativer bewertet.

7.2 Freisetzung

Anhand der in Abschnitt 7.1 ermittelten Werte für Geschwindigkeit und Abplatzermasse sollte eine Methode entwickelt werden, um eine Vorhersage zum freigesetzten Anteil lungengängiger Partikel treffen zu können. In den Untersuchungen /MAE 99/, /LAN 03/, /NOL 06/, /GRS 07/ und /GRS 16a/ wurde eine lineare Abhängigkeit nach Gleichung (2.15) unterstellt. Die Parameter A und B sind hierbei empirische Größen, die es für einen Bereich der spezifischen Energie ermöglichen, eine Aussage über die freigesetzte Menge luftgetragener Teilchen η_{100} treffen zu können. In Abb. 7.36 wurden zwei lineare Trendlinien mithilfe einer Regressionsanalyse in das Diagramm gelegt. Es ist zu erkennen, dass beide Trendkurven eine ähnliche Steigung haben. Die blaue Trendkurve berücksichtigt die Ergebnisse der Versuche mit GGG40 dieses Forschungsvorhabens und die rote die Ergebnisse mit S235JR. Es fällt auf, dass die Parameter $A=7,77\text{E-}03$ bzw. $-1,83\text{E-}03$ und $B=4,88\text{E-}06 \text{ kg/J}$ bzw. $5,65\text{E-}06 \text{ kg/J}$ der erzeugten Trendkurven sich von den Parametern aus dem Forschungsvorhaben /GRS 07/, die die Autoren von /GRS 16b/ verwendet haben ($A=3\text{E-}04$ und $B=3\text{E-}06 \text{ kg/J}$ für Beton-Probekörper), lediglich beim Parameter A um eine Größenordnung unterscheiden. Das Fraunhofer Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) verwendete für eigene Bewertungen laut /GRS 16b/ ein um etwa 50 % höheren Wert für Parameter B bei Betonproben. Die negativen Werte für Parameter A aus Abb. 7.36 sind physikalisch nicht zu erklären und sind auf die Streuung der Messwerte zurückzuführen. Allerdings sind die Werte für A sehr klein und gehen näherungsweise durch den Nullpunkt, sodass diese erst bei Betrachtung kleiner spezifischer Energien relevant werden.



Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer

Abb. 7.36 Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Trendlinie (linear) für Ergebnisse GGG40 (blau) und für Ergebnisse S235JR (rot)

Der lineare Ansatz ist gemäß /MAE 99/ nur für einen Bereich der spezifischen Energie gültig. Bei den in /MAE 99/ untersuchten Zementprobekörpern ist ein Bereich der spezifischen Energie W_m bis 1500 J/kg betrachtet worden. In den Arbeiten /LAN 03/, /NOL 06/ und /GRS 07/ lag die spezifische Energie für Zementkörper für klein- und großskalige Versuche in einem spezifischen Energiebereich von 100 J/kg bis 1600 J/kg. In dem EFP-Forschungsvorhaben /GRS 16a/, in dem der lineare Ansatz nach Gleichung 2.15 in einem spezifischen Energiebereich von 7000 J/kg bis 47000 J/kg angewendet wurde und plausible Ergebnisse ermittelt wurden, wurden Probekörper aus Ceramofix und nicht aus Zement untersucht. Dies macht eine Vergleichbarkeit nur bedingt möglich, da nach /GRS 07/ Probekörper aus Zement gegenüber Ceramofix, aufgrund der höheren Oberfläche, mehr Freisetzunganteile produziert. In den früheren Forschungsvorhaben, in denen Betonzyylinder betrachtet wurden, fällt die vergleichsweise kleine Spannweite der spezifischen Energie von 100-1600 J/kg auf, in der plausible Ergebnisse für die Freisetzung vorhergesagt werden konnten. Im aktuellen Forschungsvorhaben liegt die Spannweite der betrachteten spezifischen Energie zwischen 700 J/kg und 20000 J/kg.

In Abb. 7.37 scheinen die Ergebnisse des aktuellen Forschungsvorhabens sowie die Ergebnisse aus /GRS 16b/ bei doppelt logarithmischer Auftragung einer Potenzfunktion (blaue Trendlinie) zu folgen, wobei Ausreißer bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurden. Der lineare Verlauf (rote Trendlinie) hingegen driftet unterhalb einer spezifischen Energie von ca. 1000 J/kg ab, was bei dieser Auftragung auf den negativen Schnittpunkt des Fits mit der Ordinate zurückzuführen ist. Dies führt bei Vorhersagen für kleine spezifische Energien zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Freisetzung.

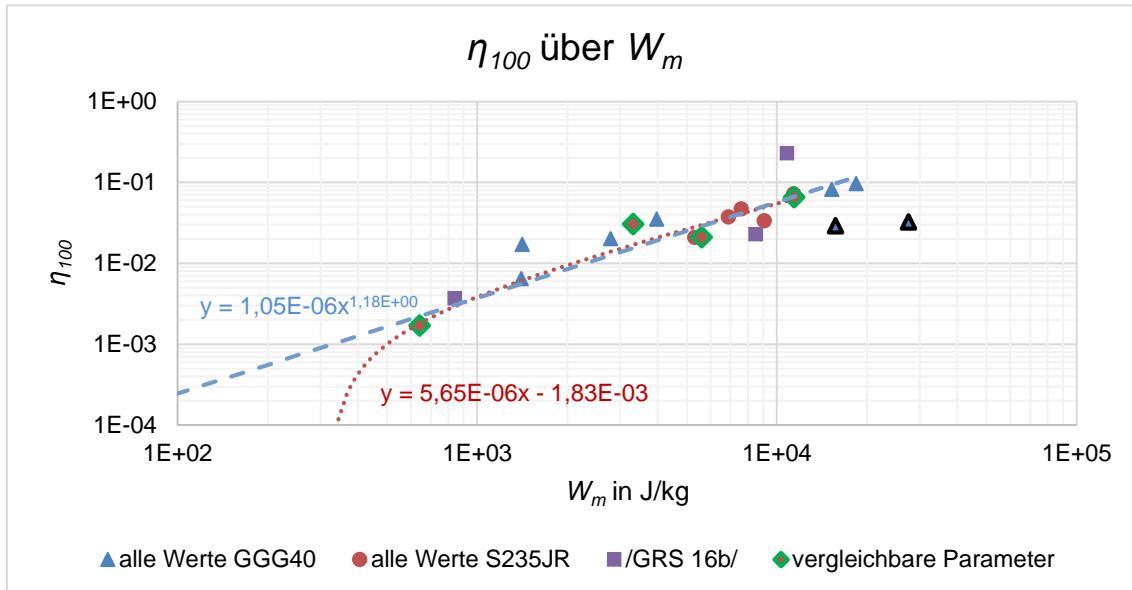
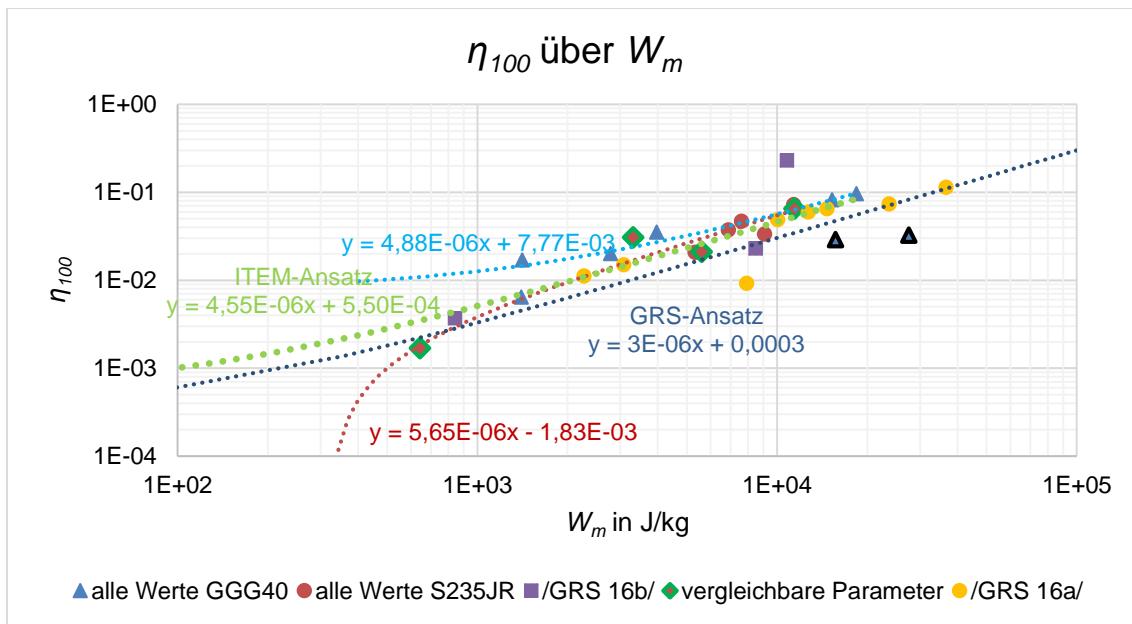


Abb. 7.37 Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Trendlinie (doppelt logarithmisch)

In Abb. 7.38 ist eine dunkelblaue Trendlinie (Beschriftung „GRS-Ansatz“) zu sehen, die teilweise bei den oben genannten früheren Forschungsvorhaben verwendet wurde. Es geht aus dem Diagramm hervor, dass bei Verwendung dieser Gleichung die aktuell vorliegenden Messergebnisse nur bedingt abgebildet werden.



Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer

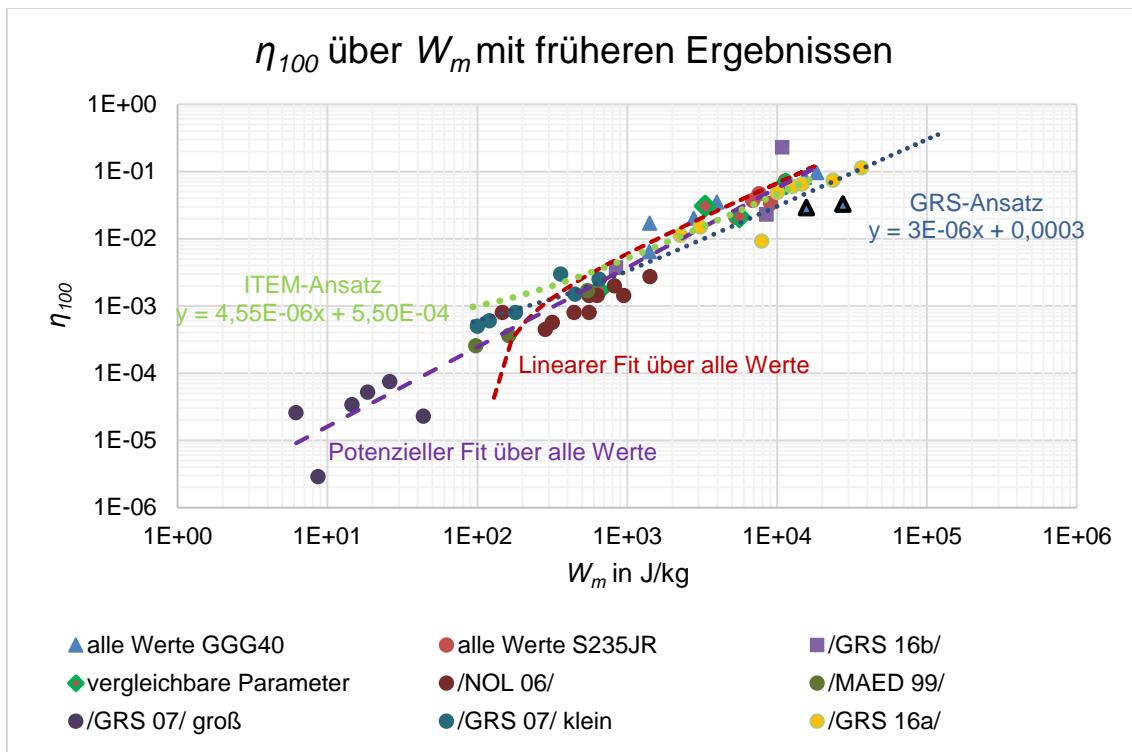
Abb. 7.38 Einfluss des linearen Ansatzes auf die Vorhersage

Aussagen oberhalb einer spezifischen Energie von 1500 J/kg führen grundsätzlich bei Anwendung dieses linearen Ansatzes ($\eta_{100} = 3 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ kg/J} \cdot W_m$) zu einer Unterschätzung der tatsächlich vorliegenden freigesetzten Menge. Im EFP-Forschungsvorhaben /GRS 16a/ liegen die Werte für die spezifische Energie im Bereich von 7000 J/kg bis 47000 J/kg. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten und der geringen Volumina der Projektilen wird die theoretisch mögliche kinetische Energie nicht vollständig auf den Probekörper übertragen. Die Parameter für $A=3 \cdot 10^{-4}$ und $B=3 \cdot 10^{-6}$ kg/J für Ceramofix sind nach /GRS 16a/ die gleichen wie für Beton. Die Darstellungen der verschiedenen linearen Trendlinien zeigen, dass eine Anwendung der linearen Gleichung nur in einem Bereich sinnvoll ist und die Anwendung auf das aktuelle Forschungsvorhaben zu einer Unterschätzung des freigesetzten Anteils luftgetragener Teilchen kommt. Die Betrachtung von sehr kleinen Werten und vergleichsweise großen Werten führt bei einer doppelt logarithmischen Auftragung unter Anwendung einer Geraden zu einer gekrümmten Darstellung. Die Krümmung liegt bei Betrachtung der dunkelroten Kurve in Abb. 7.38 bei einer spezifischen Energie von 1500 J/kg.

Es kann festgehalten werden, dass der lineare Ansatz, wie in den vorherigen Forschungsvorhaben beschrieben, nur für einen Bereich gültig ist. Um eine Trendlinie über einen Bereich der spezifischen Energie zu finden, ist es notwendig, experimentelle Ergebnisse über den gesamten Bereich zu haben. Die früheren Untersuchungen in

/MAE 99/, /LAN 03/, /NOL 06/, /GRS 07/ und /GRS 16a/ haben unter anderem Probekörper aus Zement bzw. Beton untersucht, sodass Ergebnisse für die luftgetragenen Teilchen auch im unteren spezifischen Energiebereich vorliegen. Im Forschungsvorhaben /GRS 16a/ hingegen, wo der lineare Ansatz mit den experimentellen Ergebnissen korreliert, wurde zum einen anderes Material untersucht und zum anderen wurde die kinetische Energie, aufgrund von hohen Geschwindigkeiten und Volumina der Projektilen, nicht vollständig auf den Probekörper übertragen, sodass diese Ergebnisse im vorliegenden Forschungsvorhaben nicht berücksichtigt werden können.

In Abb. 7.39 sind alle Ergebnisse der aktuellen und der früheren Untersuchungen in einem Diagramm doppelt logarithmisch aufgetragen. In Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer und wurden bei der Berechnung der Trendlinien nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse aus den großskaligen Versuchen in /GRS 07/ wurden nach Gleichung 2.16 um den Volumenkorrekturfaktor $\lambda=1,43$ korrigiert. Bei Betrachtung des Diagramms ist ersichtlich, dass die Datenpunkte eher mit einer Potenzfunktion beschrieben werden können als mit einem linearen Ansatz. Die rote Trendlinie soll das lineare Verhalten über alle Messwerte beschreiben. Sinnvoll anwendbar ist diese oberhalb einer spezifischen Energie von 500 J/kg. Die lila Trendlinie bildet mit der Potenzfunktion die Messwerte über den betrachteten spezifischen Energiebereich, in dem Messwerte erfasst wurden, hinreichend ab, sodass festgehalten werden kann, dass nur in einem eingeschränkten Bereich der spezifischen Energie ein linearer Ansatz anwendbar ist.



Schwarz umrahmte Datenpunkte sind Ausreißer

Abb. 7.39 η_{100} über W_m Vergleich mit früheren Ergebnissen

Soll eine Extrapolation für spezifische Energien unterhalb von ca. 500 J/kg durchgeführt werden, so ist eine Potenzfunktion vorzuziehen, wobei jedoch der entstehende Fehler größer wird. Eine Abschätzung für den freigesetzten Anteil luftgetragener Partikel ist auf Basis der Ergebnisse der verschiedenen Forschungsvorhaben und des aktuellen Forschungsvorhabens dennoch möglich, da die hohe Variation an Parametern, wie Ladungsgeometrie, Ladungsmasse sowie Plattenmaterial eine gewisse Streuung berücksichtigt, auch wenn jeder Versuch lediglich ein bis zwei Mal durchgeführt wurde, was für die Berechnung einer Standardabweichung zu wenig ist. In Abb. 7.40 sind die Formeln der Trendlinien mit dem linearen Ansatz und der Potenzfunktion dargestellt. Bei der Erstellung der Trendlinien mithilfe einer Regressionsanalyse wurden die Fallversuche aus /GRS 07/, bei denen die spezifische Energie über den Volumenkorrekturfaktor angepasst wurde, hierbei nicht berücksichtigt, da der Energiebereich für das aktuelle Forschungsvorhaben nicht relevant ist. Das Bestimmtheitsmaß des linearen Ansatzes liegt mit ca. 57 % deutlich niedriger als das Bestimmtheitsmaß beim Ansatz über eine Potenzfunktion mit ca. 91 %.

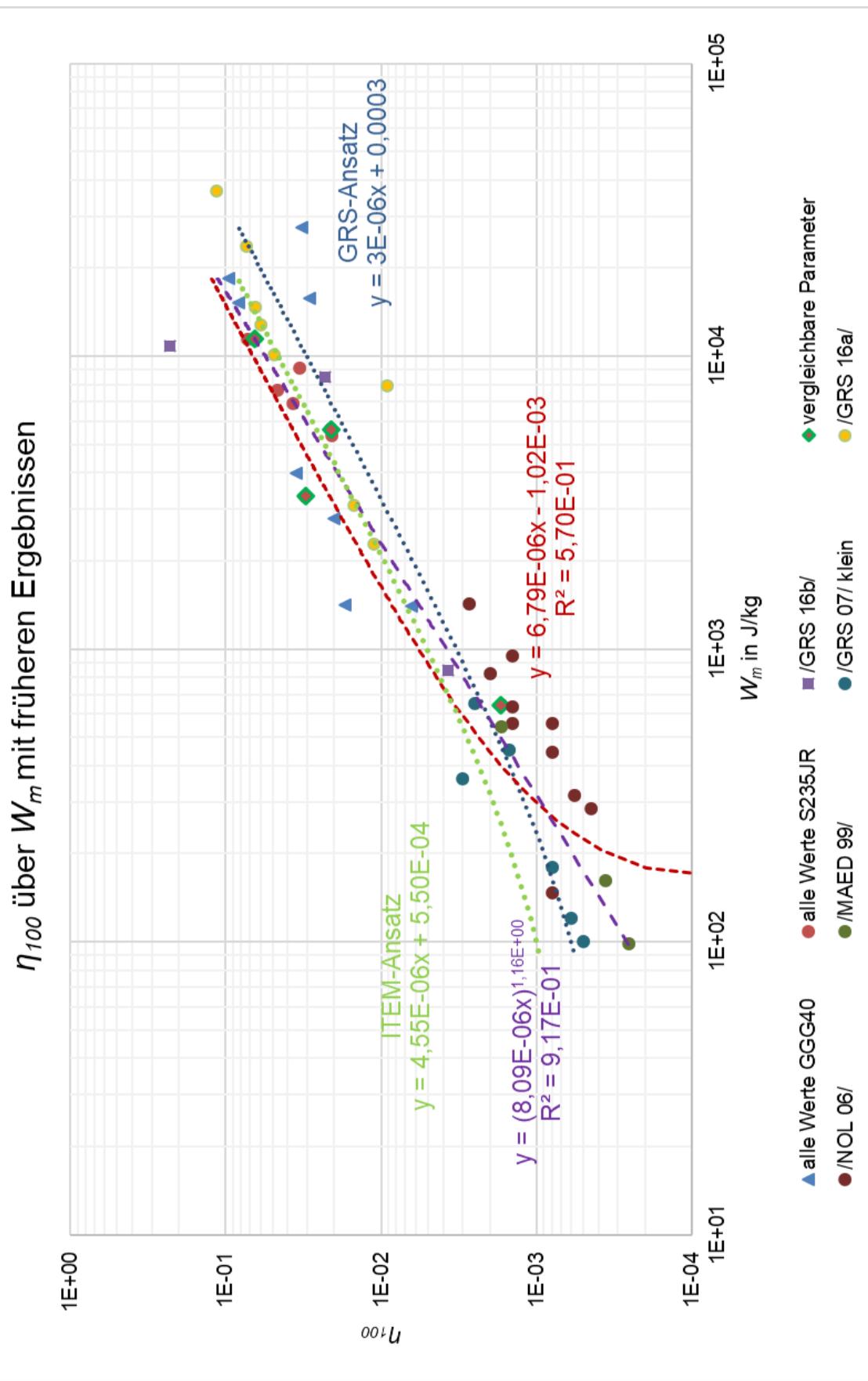


Abb. 7.40 η_{100} über W_m mit verschiedenen Fits

Tab. 7.10 Übersicht der Trendlinien

	ITEM	GRS	Linearer Ansatz	Potenzfunktion
Formel	$\eta_{100} = A + B * W_m$			$\eta_{100} = (A * W_m)^B$
Für den Fit verwendete Datensätze	/NOL 06/	/GRS 07/	alle Werte GGG40 alle Werte S235JR /GRS 16b/ /GRS 07/ /NOL 06/ /MAE 99/	alle Werte GGG40 alle Werte S235JR /GRS 16b/ /GRS 07/ /NOL 06/ /MAE 99/
Fit-Parameter	$A=5,5E-4$ $B=4,55E-6$	$A=3E-4$ $B=3E-6$	$A=1,02E-3$ $B=6,79E-6$	$A=8,09E-6$ $B=1,16$
Bestimmtheitsmaß	k. A.	k. A.	57,0%	91,7%

In Abb. 7.40 sind vier verschiedene Ansätze dargestellt, die die Messdaten der verschiedenen Forschungsvorhaben unterschiedlich gut abbilden. Im aktuellen Forschungsvorhaben wurden die Parameter Geschwindigkeit, Abplatzermasse und Probekörpermasse experimentell bestimmt und daraus die spezifische Energie berechnet. Damit konnte für die mittels Siebung und Extrapolation erfassten Freisetzunganteile η_{100} die jeweilige spezifische Energie berechnet werden (siehe Kap. 6). Dies ermöglicht einen Vergleich der mit den vier Ansätzen berechneten Freisetzunganteile mit den experimentell ermittelten Freisetzunganteilen. In Tab. 7.11 sind die verschiedenen berechneten Werte für die Freisetzunganteile η_{100} für S235JR und in Tab. 7.12 für GGG40 aufgeführt.

Tab. 7.11 Rechnerische Ermittlung von η_{100} mit experimentell ermittelten Werten für Abplatzermasse und Geschwindigkeit unter Verwendung verschiedener Ansätze (S235JR)

Kürzel	Versuchsnummer	η_{100}				
		Siebung	ITEM	GRS	Linearer Ansatz	Potenzfunktion
S-20-120-3	FX771	0,021	0,026	0,017	0,037	0,028
S-20-200-3	FX772	0,065	0,053	0,035	0,077	0,063
S-20-50-3	FX780	0,0017	0,003	0,002	0,003	0,002
S-20-100-3	FX775	0,031	0,016	0,010	0,021	0,015
S-30-200-3	FX773/ FX774	0,037/ 0,047	0,032	0,021	0,046	0,035
S-20-200-1	FX785	0,021	0,025	0,016	0,035	0,026
S-20-200-2	FX776	0,072	0,052	0,034	0,076	0,063
S-30-200-2	FX787	0,034	0,042	0,028	0,061	0,048

Tab. 7.12 Rechnerische Ermittlung von η_{100} mit experimentell ermittelten Werten für Abplatzermasse und Geschwindigkeit unter Verwendung verschiedener Ansätze (GGG40)

Kürzel	Versuchsnummer	η_{100}				
		Siebung	ITEM	GRS	Linearer Ansatz	Potenzfunktion
G-20-120-3	FX778	0,035	0,019	0,012	0,026	0,019
G-20-50-3	FX779	0,0064	0,007	0,005	0,009	0,006
G-20-100-3	FX781	0,020	0,013	0,009	0,018	0,012
G-20-200-3	FX782	0,096	0,084	0,055	0,124	0,110
G-20-100-2	FX783	0,017	0,007	0,005	0,009	0,006
G-20-120-2	FX784	0,033	-	-	-	-
G-20-120-2	FX786	0,029	-	-	-	-
G-20-200-2	FX788	0,082	0,070	0,046	0,103	0,088

Eine anschauliche Gegenüberstellung der errechneten Ergebnisse für η_{100} aus Tab. 7.11 und Tab. 7.12 ist in Abb. 7.41 für S235JR und in Abb. 7.42 für GGG40 zu finden. Für die Versuchsreihen mit Platten aus S235JR und GGG40 wurden die Werte für η_{100} mit den verschiedenen Ansätzen ermittelt und nebeneinander dargestellt. Als Referenz ist bei der jeweiligen Versuchsreihe links das Ergebnis aus der Siebung aufgeführt. Aus der Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass es keine klare Tendenz für einen bestimmten Ansatz gibt. Die verschiedenen Ansätze bilden die Siebergebnisse gut ab. Bei Betrachtung des linearen Ansatzes und der Potenzfunktion ist im überwiegenden Teil der Versuche ersichtlich, dass die Versuchsergebnisse unter den berechneten Werten liegen. Dies könnte auf die bei der Auswertung nicht berücksichtigten Verluste durch den offenen Versuchsaufbau im Vergleich zu /GRS 16b/ zurückzuführen sein.

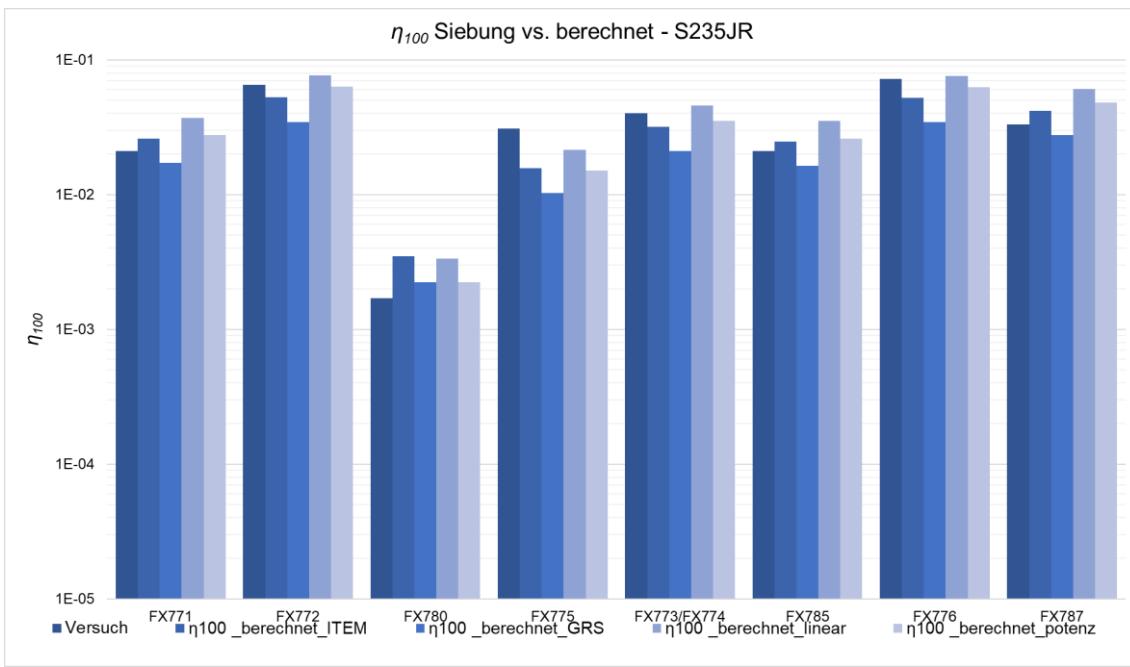


Abb. 7.41 Gegenüberstellung der mittels Siebung und Extrapolation ermittelten Freisetzungssanteile η_{100} mit den mit verschiedenen Ansätzen berechneten Freisetzungssanteilen η_{100} bei Verwendung experimenteller Abplatzermasen und Geschwindigkeiten (S235JR)

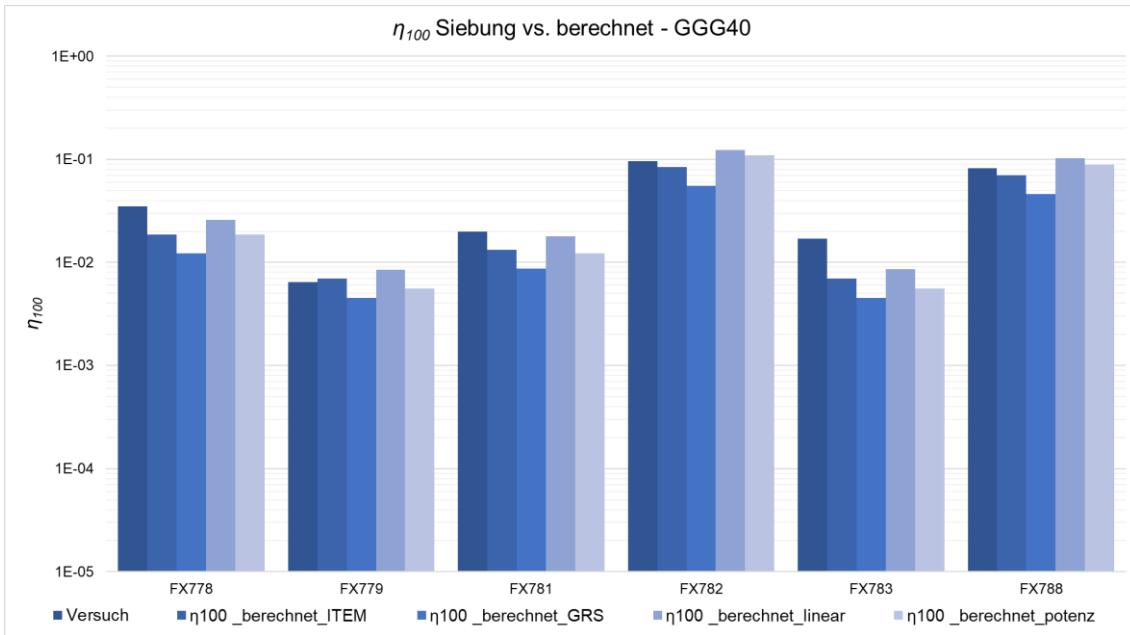


Abb. 7.42 Gegenüberstellung der mittels Siebung und Extrapolation ermittelten Freisetzungssanteile η_{100} mit den mit verschiedenen Ansätzen berechneten Freisetzungssanteilen η_{100} bei Verwendung experimenteller Abplatzermasen und Geschwindigkeiten (GGG40)

Der nächste Schritt ist die Anwendung der Ansätze aus Abb. 7.40 zur Berechnung von η_{100} mit den in den numerischen Berechnungen (vgl. Abschnitt 7.1) ermittelten Geschwindigkeiten und Abplatzermassen. Die numerischen Berechnungen wurden mit Parametersätzen für zwei unterschiedliche Sprengstoffe (PETN 1.50, Seismoplast) und zwei unterschiedlichen Simulationsprogramme (AUTODYN, LS-DYNA) durchgeführt, sodass sich unter Bezugnahme der vier Ansätze eine 4x4-Matrix für jede Versuchsreihe aufspannt. Die dazugehörigen Ergebnisse sind tabellarisch in Tab. 7.13 und Tab. 7.14 aufgelistet. Eine graphische Gegenüberstellung dieser Ergebnisse ist in Abb. 7.43 aufgeführt. Hier sind vier Diagramme dargestellt, um die Ergebnisse nach Simulationsprogramm und Sprengstoff zu differenzieren. Trotz der größeren Abweichungen der numerisch berechneten Massen bzw. Geschwindigkeiten, im Zusammenspiel mit den verschiedenen Ansätzen werden die Ergebnisse aus den Siebungen wiedergegeben. Für die Simulationen mit AUTODYN zeigt ein direkter Vergleich der simulierten Sprengstoffe, dass die Ergebnisse mit Seismoplast die luftgetragenen Anteile aus den Siebungen stärker unterschätzen als die Ergebnisse mit PETN 1.50. Die ermittelten Werte für η_{100} der beiden Simulationsprogramme unter Verwendung der Parameter für den Sprengstoff PETN 1.50 (die oberen beiden Diagramme in Abb. 7.43) liegen in einem ähnlichen Bereich. Die Analyse der Werte für Seismoplast (die unteren beiden Diagramme in Abb. 7.43) beschränkt sich auf zwei der acht ausgewählten Versuche und führt zu vergleichbaren Schlussfolgerungen.

Tab. 7.13 Berechnete Freisetzungssanteile η_{100} mit simulierten Parametern (Teil 1)

Kürzel	Versuchsnum- mer	η_{100}			
		ITEM	GRS	Linearer Ansatz	Potenz- funktion
S-20-120-3	PETN 1.50 AUTODYN	0,017	0,011	0,024	0,017
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,018	0,012	0,025	0,018
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,013	0,009	0,018	0,012
	SEISMOPLAST LS-DYNA	0,016	0,010	0,022	0,015
S-20-200-3	PETN 1.50 AUTODYN	0,042	0,028	0,061	0,049
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,043	0,029	0,063	0,051
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,035	0,023	0,051	0,040
	SEISMOPLAST LS-DYNA	0,038	0,025	0,055	0,044
S-20-50-3	PETN 1.50 AUTODYN	0,00262	0,00166	0,00207	0,00150
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,00437	0,00282	0,00468	0,00306
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,00126	0,00077	0,00005	0,00044
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-
S-20-100-3	PETN 1.50 AUTODYN	0,01426	0,00934	0,01945	0,01347
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,01321	0,00864	0,01787	0,01227
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,00733	0,00477	0,00910	0,00595
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-

Tab. 7.14 Berechnete Freisetzungssanteile η_{100} mit simulierten Parametern (Teil 2)

Kürzel	Versuchsnummer	η_{100}			
		ITEM	GRS	Linearer Ansatz	Potenzfunktion
S-30-200-3	PETN 1.50 AUTODYN	0,01809	0,01186	0,02515	0,01791
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,01497	0,00981	0,02050	0,01427
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,01366	0,00895	0,01855	0,01279
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-
S-20-200-1	PETN 1.50 AUTODYN	0,01982	0,01301	0,02774	0,01998
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,00838	0,00546	0,01067	0,00703
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,01404	0,00919	0,01911	0,01321
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-
S-20-200-2	PETN 1.50 AUTODYN	0,03391	0,02229	0,04876	0,03776
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,02650	0,01741	0,03771	0,02822
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,02550	0,01675	0,03621	0,02696
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-
S-30-200-2	PETN 1.50 AUTODYN	0,01169	0,00764	0,01560	0,01058
	PETN 1.50 LS-DYNA	0,01530	0,01003	0,02100	0,01466
	SEISMOPLAST AUTODYN	0,00924	0,00603	0,01195	0,00793
	SEISMOPLAST LS-DYNA	-	-	-	-

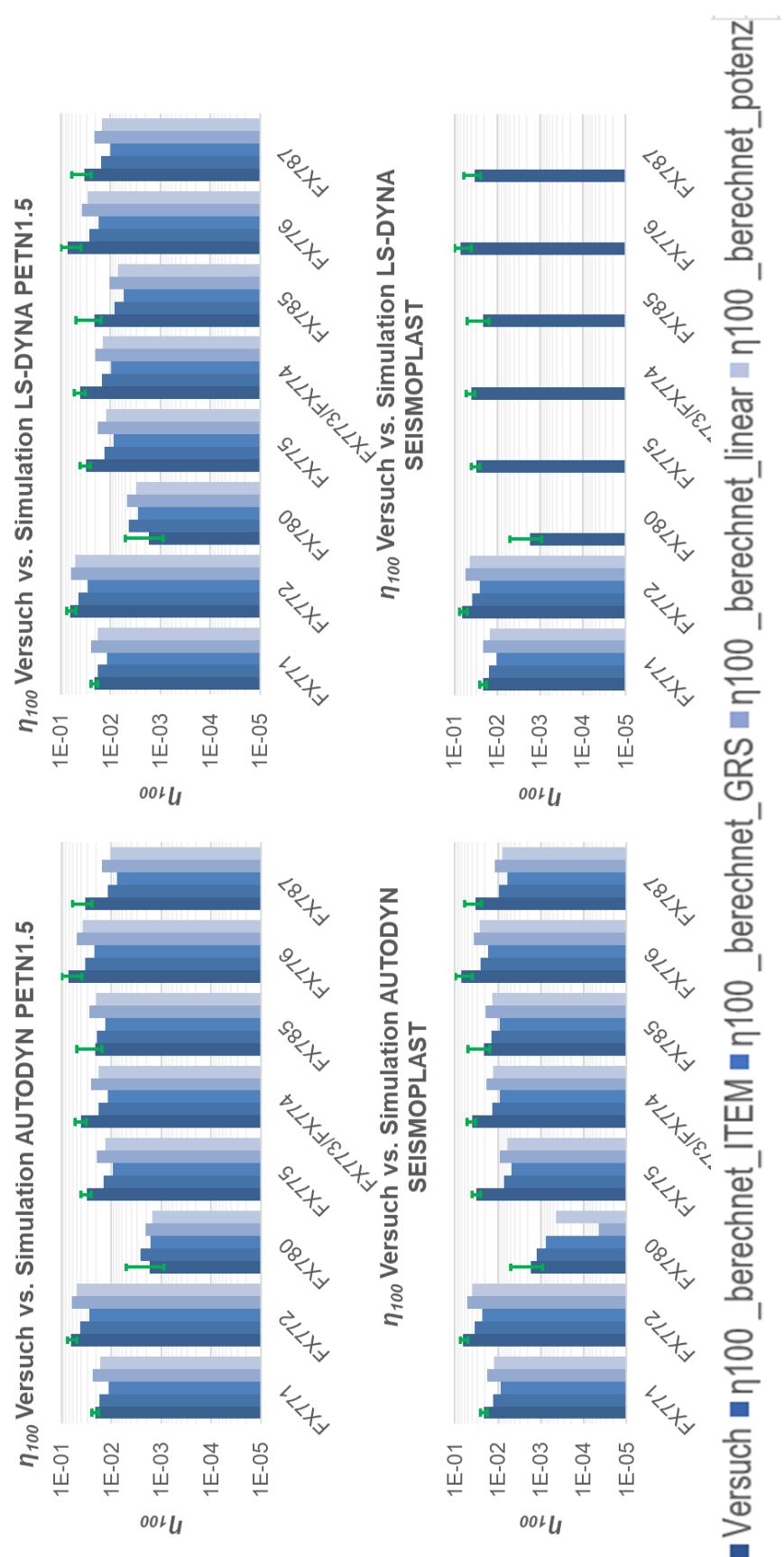


Abb. 7.43 Gegenüberstellung von η_{100} der Siebung mit den über die Ansätze berechneten Werten (Verwendung simulierter Parameter)

Abschließend wurden zum Vergleich der in /GRS 16b/ experimentell und mit dem linearen Ansatz gemäß Gleichung 2.15 berechneten Freisetzunganteile η_{100} in Abb. 7.43 mit Ergebnissen aus dem aktuellen Forschungsvorhaben gegenübergestellt. Im Gegensatz zu Abb. 2.18 ist η_{100} auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Für Abb. 7.43 wurden die mittels AUTODYN und dem Parametersatz für PETN 1.50 berechneten Geschwindigkeiten und Abplatzermassen ausgewählt und mit dem ITEM-Ansatz die Freisetzunganteile berechnet (vgl. Tab. 7.13). Der direkte Vergleich zeigt, dass die Simulationen aus dem aktuellen Forschungsvorhaben eine deutliche Verbesserung bei der Berechnung der Freisetzunganteile ermöglichen.

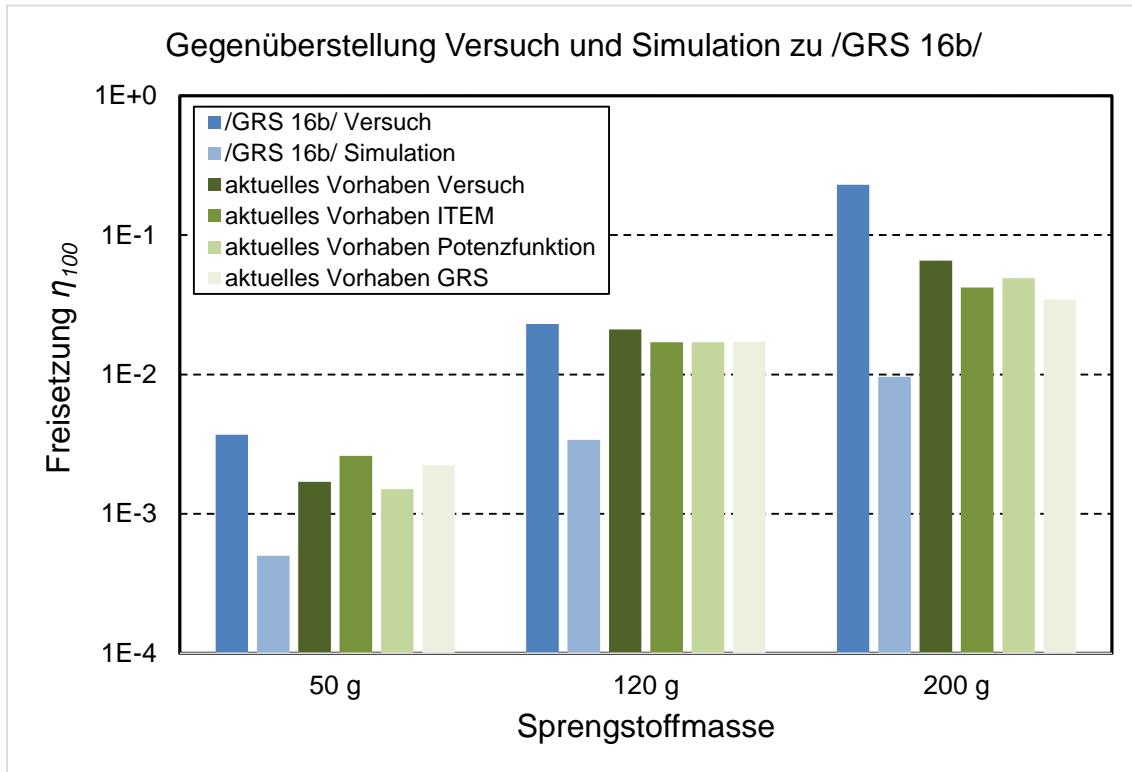


Abb. 7.44 Gegenüberstellung von in /GRS 16b/ ermittelten Freisetzunganteile η_{100} (Experiment und Simulation) mit im aktuellen Forschungsvorhaben gemessenen und berechneten Freisetzunganteilen η_{100}

8 Einordnung der Messdaten

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Versuchsreihen in /GRS 16b/ sollten mit diesem Forschungsvorhaben die bereits aufgebauten numerischen Modelle weiterentwickelt werden. Dazu war das Ziel der ersten Versuchskampagne dieses Forschungsvorhabens, Ergebnisse aus /GRS 16b/ mit einem messtechnisch vereinfachten Versuchsaufbau zu reproduzieren. Als Basis dafür standen die Versuche 3, 4 und 8 aus /GRS 16b/ zur Verfügung. Der Vergleich der Schadensbilder dieser drei Versuche aus /GRS 16b/ mit denen aus dem aktuellen Forschungsvorhaben zeigt, dass diese qualitativ wiedergegeben werden und dass die Versagensmoden übereinstimmen (vgl. Abschnitt 5.3).

Beim Vergleich der Abplatzermassen aus den Versuchen in /GRS 16b/ mit den aktuellen ist, wie in Abschnitt 6.3 aufgeführt, eine systematische Abweichung von ca. 40 g festzustellen. Dies ist wahrscheinlich auf die abweichende Ladungsgeometrie zurückzuführen. In Tab. 8.1 sind die sprengstoffseitigen Krater auf den Metallplatten der vergleichbaren Versuche und die theoretischen Durchmesser mit einer Ladungsgeometrie von 1:3 und 1:4 aufgeführt. Unterstellt wurde bei den theoretisch berechneten Durchmessern eine Dichte von Seismoplast von 1,54 g/cm³.

Tab. 8.1 Übersicht der sprengstoffseitigen Krater

Kürzel	$D_{OP_aktuell}$ / [mm]	D_{OP} aus /GRS 16b/ / [mm]	$D_{OP_theoretisch}$ für 1:3 / [mm]	$D_{OP_theoretisch}$ für 1:4 / [mm]
S-20-120-3	69	75	67	73
S-20-200-3	80	88	79	87
S-20-50-3	53	55-58	50	55

Es fällt bei der Gegenüberstellung auf, dass die Durchmesser aus /GRS 16b/ stets größer sind als die aus dem aktuellen Forschungsvorhaben und die Abweichungen zu den theoretischen Durchmessern für eine Ladungsgeometrie 1:4 geringer sind als die bei 1:3. Die Durchmesser in beiden Forschungsvorhaben wurden mit einem Gliedermaßstab der Klasse III gemessen, was nach Richtlinie 2004/22/EG, Anhang MI - 008 einer Genauigkeit von ± 1 mm bei einer Messlänge ≤ 1 m bedeutet. Vor diesem Hintergrund scheint es sehr wahrscheinlich, dass die Sprengversuche in /GRS 16b/ mit einer Ladungsgeometrie von 1:4 und nicht wie im aktuellen Forschungsvorhaben 1:3 durchgeführt wurden. Für die Betrachtung der Versagensmode hat dies keine ersichtlichen Auswirkungen. Die Abplatzermasse ist aufgrund der Impulserhaltung bei einer

Ladungsgeometrie von 1:4 laut Simulationsergebnissen und den Ergebnissen aus den Versuchen etwas höher, die resultierende Geschwindigkeit etwas geringer. Bei den Diagrammen, wie beispielsweise in Abb. 7.39 zu erkennen, bedeutet dies für die angenommenen spezifischen Energien der Messwerte aus /GRS 16b/, dass bei einer etwas geringeren Geschwindigkeit die Messwerte etwas nach links verschoben werden müssten, da die Geschwindigkeit quadratisch in die kinetische Energie eingeht. Der Einfluss ist bei einer doppel-logarithmischen Auftragung mit sechs Größenordnungen auf der Abszisse jedoch optisch kaum zu erkennen.

Beim Vergleich der Anteile lungengängiger Partikel $\eta_{100} < 100 \mu\text{m}$ scheinen die Ergebnisse bis auf die Versuche mit 200 g Ladungsmasse ähnlich zu sein. In Abb. 7.39, wo die Ergebnisse verschiedener Forschungsvorhaben in einem Diagramm aufgetragen sind, sticht dieser Messwert deutlich über die anderen Werten heraus. Dies lässt die Vermutung zu, dass dieser Wert, der um etwa eine Größenordnung höher ist als die Trendlinie über alle Messwerte hinweg, einen Ausreißer darstellt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die für die Bestimmung der spezifischen kinetischen Energie notwendige experimentell ermittelte Abplatzer-Geschwindigkeit nicht vorliegt und lediglich eine Annahme auf Basis der Geschwindigkeiten des aktuellen Forschungsvorhabens ist. Aufgrund der etwas anderen Ladungsgeometrie ist es naheliegend, dass tatsächliche Geschwindigkeiten in /GRS 16b/ von diesen Geschwindigkeiten abweichen. Die anderen beiden Versuche sind mit den Ergebnissen des aktuellen Forschungsvorhabens, wie in Abb. 7.37 zu sehen, vergleichbar, auch wenn die vereinfachte Messtechnik für die Freisetzung und die anschließende Auswertung im aktuellen Forschungsvorhaben einen entsprechenden Fehler nach sich zieht. Auch hier ist damit zu rechnen, dass es Verschiebungen in horizontaler Richtung aufgrund der unterstellten Geschwindigkeiten aus dem aktuellen Forschungsvorhaben geben kann. Im Forschungsvorhaben /GRS 16b/ wurden die Freisetzunganteile luftgetragener Partikel in erster Linie über Virtualimpaktoren (Respicoms) gemessen, die aufgrund des geschlossenen Aufbaus und der zeitlich längeren Probennahme genauere Messergebnisse liefern sollten. Somit kann die Lage des Messwertes mit der Ladungsmasse von 200 g aus /GRS 16b/ nicht abschließend geklärt werden. Zusätzlich zu den Messungen über Virtualimpaktoren wurden in /GRS 16b/ für einzelne Versuche Siebungen durchgeführt.

Für die Parameter S-20-120-3 liegen aus dem Forschungsvorhaben /GRS 16b/ sowohl Ergebnisse der Respicommessung als auch der Siebung vor. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Ergebnisse des lungengängigen Anteils aus der Respicommessung,

der mit der Beziehung von /MAE 99/ auf η_{100} umgerechnet wurde, mit der Extrapolation der Siebergebnisse im Diagramm „Kumulativer Massenanteil über aerodynamischen Durchmesser“ (Abb. 6.6). Die Ergebnisse sind in Tab. 6.7 aufgeführt und es ist ersichtlich, dass die Abweichung mit etwa 8,7 % für den deutlich einfacheren Aufbau akzeptabel ist, wenn berücksichtigt wird, dass keine Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden und die statistische Streuung nicht erfasst werden kann, da nur ein Versuch pro Parametersatz durchgeführt wurde.

Positiv hinzuzufügen ist, dass der Anteil luftgetragener Partikel mit den gleichen Parametern des aktuellen Forschungsvorhabens im gleichen Bereich liegt wie das Ergebnis der Siebung in /GRS 16b/. Dieses Resultat zeigt, dass die Ergebnisse aus /GRS 16b/ reproduziert werden konnten.

Die zwei kleinsten Siebe wurden vom Fraunhofer EMI für die Versuche im aktuellen Forschungsvorhaben neu angeschafft. Die restlichen Siebe (siehe Abb. 5.19) waren jedoch deutlich älter. Der auf den älteren Sieben genannte Hersteller Firma Curt Weissgerber GmbH aus Frankfurt am Main wurde im Februar 1993 aus dem Handelsregister der Stadt Frankfurt am Main gelöscht. Es ist anzunehmen, dass die Siebe mindestens so alt sind. Die Abnutzung durch Abrieb der Siebmaschen ist nicht bekannt und etwaige Prüfzertifikate einer Kalibrierung sind nicht vorhanden. Laut Fraunhofer EMI war der Siebturm selten in Gebrauch, was bedeuten könnte, dass die Abnutzung der Siebmaschen nicht so sehr fortgeschritten war, wie nach über 30 Jahren zu erwarten wäre. Eine quantitative Fehlerabschätzung war jedoch aufgrund der nicht vorliegenden Prüfzertifikate nicht möglich. Qualitativ gesehen erfahren die größeren Siebmaschen einen höheren Materialdurchfluss, was folglich zu einem stärkeren Materialverschleiß der Siebmaschen führen könnte. Mit dieser Annahme würde sich, je nach Fortschritt des Verschleißes, ein größerer Anteil des Schüttgutes zu den mittleren Maschen hin verschieben, was zu einer stärkeren Krümmung des Kurvenverlaufs im Diagramm bei der Auftragung von η_{100} über W_m führt. Dies bedeutet, sofern ein Verschleiß vorhanden war und die Annahme mit dem stärkeren Verschleiß der größeren Siebmaschen richtig ist, dass der Anteil lungengängiger Partikel η_{100} systematisch überschätzt wurde. Werden diese Daten zur Berechnung der Freisetzung von zementierten radioaktiven Abfällen aus Gebinden als Folge einer Einwirkung mit Sprengstoff zugrunde gelegt, so ist das ermittelte Ergebnis konservativer als ohne diesen Fehler. Für quantitative Aussagen wäre eine Überprüfung der Siebmaschen erforderlich.

Die Siebfragmente aus der Siebung der Versuche der zweiten Kampagne sind in Abb. 5.20 gegenübergestellt. Laut der Rezeptur des Fraunhofer EMI aus Tab. 4.4 bestehen die Beton-Probekörper aus zwei verschiedenen Gesteinskörnungen mit Korngrößen von 0-2 mm und 8-16 mm, die laut Rezeptur jeweils zu etwa 38 Ma.-% in den Probekörpern enthalten sind. Bei Betrachtung der Gegenüberstellung in Abb. 5.20 fällt auf, dass ein Anteil an Kies mit Korngrößen >8 mm nach der Beaufschlagung des Abplatzers unbeschadet vorliegt. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die unbeschädigten größeren Gesteinsbrocken die Extrapolation beeinflussen und ob es für eine Bestimmung der Freisetzungssanteile mithilfe einer Extrapolation Zementproben, die keine größeren Gesteinskörnungen aufweisen, repräsentativer wären. In diesem Forschungsvorhaben war es korrekt die Probekörper aus Beton zu wählen, da sonst die Reproduzierbarkeit der Versuche aus /GRS 16b/ nicht gegeben wäre. Es ist jedoch sinnvoll, den Einfluss der Gesteinskörnung in zukünftigen Forschungsvorhaben genauer zu untersuchen.

Ein weiteres zentrales Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Bestimmung der Geschwindigkeit der Abplatzer, die letztlich für die Bestimmung der kinetischen Energie benötigt wurde. Die Abschätzung des Fehlers durch die graphische Auswertung der Bildsegmente ist in Abschnitt 6.1 beschrieben. Bei der Auswertung der Bildsegmente fiel auf, dass die ermittelte Geschwindigkeit für die Versuche mit S235JR repräsentativer ist als bei den Versuchen mit GGG40, was auf die unterschiedlichen Versagensarten zurückzuführen ist. Bei den Versuchen mit S235JR bestehen die Abplatzer grundsätzlich aus einem Stück, die Fragmente bei GGG40 bestehen hingegen aus vielen kleineren Bruchstücken, die aufgrund einer sich bildenden Staubwolke auf den mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildern nicht nachverfolgt werden kann. Die ermittelten Geschwindigkeiten sind daher Geschwindigkeiten von einzelnen Fragmenten. Wie repräsentativ diese Geschwindigkeiten für die anderen Fragmente unterschiedlicher Massen sind, kann nicht zu bewertet werden. Ebenso schwierig gestalten sich die numerischen Simulationen zu Versuchen mit GGG40, da die Versagensart von mit Sprengstoff beaufschlagten Metallplatten aus GGG40 bisher unbekannt war. Um die Geschwindigkeitsverteilung beim Versagen von Graugussplatten besser abschätzen zu können, sollten weitere Versuche durchgeführt werden, in denen die Geschwindigkeit der einzelnen Bruchstücke ermittelt werden kann.

Auf den Probekörpern wurden 1 cm breite Markierungen angebracht, da der Abstand der Kameras zu dem Probekörper von Versuch zu Versuch ein wenig variierte. Bei der Auswertung der Bildsegmente diente diese Markierung als Referenzmaß. In der ersten

Versuchskampagne wurde die Markierung mit einem Permanentmarker angebracht, was nur eine geringe Reproduzierbarkeit ermöglichte und eine Fehlerabschätzung im Nachhinein erschwerte. In der zweiten Versuchskampagne wurde ein Klebeband mit einem Zentimeter Breite genutzt und so die Reproduzierbarkeit verbessert. Der Parallelfehler sowie Fehler durch unterschiedliche Abstände und Breiten der Markierungen werden als so gering eingeschätzt, dass sie im Vergleich zu den in der Fehlerabschätzung in Abschnitt 6.1 adressierten Fehlerquellen vernachlässigt werden können. Der Einfluss durch das Anlegen der Geraden an die jeweilige Stelle im Bildsegment hat einen deutlich größeren Einfluss.

Weiter fiel bei den Versuchen mit GGG40 auf, dass der Herstellungsprozess der Metallplatten einen Einfluss auf das Versagen hatte. Die in diesem Forschungsvorhaben hergestellten Metallplatten schienen in der Mitte der Metallplatten keine homogenen Materialeigenschaften aufzuweisen, was auf die Positionierung des Angusse zur Speisung der Metallschmelze zurückzuführen ist. Die Speisung sollte über den Rand erfolgen, sodass in der Mitte der Platte, wo der Energieeintrag durch den Sprengstoff erfolgt, homogene Eigenschaften vorliegen. So wurden je nach Lage der Graugussplatte umlaufende Risse zu beobachten, die von der Größe her dem Speiser bzw. Steiger zuzuordnen sind. Alternativ könnten Ausschnitte aus einer größeren Platte verwendet werden, wobei der Bereich, über den die Speisung erfolgt ist, nicht für Versuche verwendet wird.

9 Zusammenfassung

Bei der Analyse und Bewertung von SEWD auf Beförderungsvorgänge von radioaktiven Stoffen ist unter anderem die Untersuchung der Folgen einer Einwirkung mit Sprengstoff auf mit zementierten radioaktiven Abfällen gefüllte Gebinde von Interesse, insbesondere hinsichtlich einer möglichen Freisetzung. Um zu solchen Einwirkszenarien belastbare Aussagen zur freigesetzten Masse radioaktiver Stoffe und der damit verbundenen potentiellen Strahlenbelastung in der Umgebung treffen zu können, müssen die zur Quantifizierung des Schadensausmaßes und des Freisetzungsprozesses eingesetzten Modelle möglichst präzise sein und die Modellparameter geeignet miteinander verknüpft werden. Außerdem sollte die Datenbasis solcher Modelle möglichst mit einer großen Variation an Versuchsergebnissen gespeist werden, sodass die darauf aufbauende Simulation belastbare Abschätzungen liefert.

Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Erweiterung dieser Datenbasis unter Anknüpfung an vorhandene experimentelle Ergebnisse aus anderen Forschungsvorhaben (insbesondere /GRS 16b/) und anderen Quellen. Auf dieser Datenbasis sollten daraufhin Modelle sowie numerische Untersuchungen durchgeführt und weiterentwickelt werden.

Die Grundlage für die im Forschungsvorhaben durchgeföhrten Analysen waren die beim Fraunhofer EMI an einem neu entwickelten Versuchsaufbau durchgeföhrten Sprengversuche. Es wurde jeweils eine Metallplatte (S235JR oder GGG40), unter der sich ein Beton-Probekörper befand, mit Sprengstoff beaufschlagt. Mit Hochgeschwindigkeitskameras wurde die Bewegung der Abplatzer bzw. Fragmente der Metallplatte erfasst und daraus deren Geschwindigkeit ermittelt. Die Masse der Abplatzer bzw. der Fragmente wurde durch Wägung bestimmt. Darüber hinaus wurde die Korngrößenverteilung des fragmentierten Beton-Probekörpers durch Siebung ermittelt.

Die Sprengversuche wurden mit den Rechenprogrammen LS-DYNA und AUTODYN simuliert. Bei den Simulationen lag der Fokus auf der Analyse des Versagens der Metallplatten sowie der Prognose von Massen und Geschwindigkeiten ausgeworfener Fragmente. Für LS-DYNA wurde eine Methodik mit Euler-Lagrange-Kopplung zwischen Fluideomäne und Strukturdomäne in Verbindung mit Erosion von finiten Elementen nach dem Erreichen des Versagenskriteriums verwendet. Die Modellierung in AUTODYN nutzt stattdessen die netzfreie Partikelmethode SPH.

Mit den Simulationen der Metallplatten konnten die experimentell erfassten Schadensbilder größtenteils wiedergegeben werden (vgl. Abschnitt 7.1). Im Falle von Abweichungen waren die Ergebnisse der Simulationen konservativ.

Die Hypothese, dass zur Verbesserung der Modelle zur Berechnung der Freisetzunganteile die Geschwindigkeit der durch die Sprengstoffeinwirkung entstehenden Bruchstücke der Stahlplatte experimentell verifiziert werden musste, konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens bestätigt werden. So konnte die aus Geschwindigkeit und Masse berechnete spezifische Energie W_m der Bruchstücke der Stahlplatten (S235JR) mit den lungengängigen Anteilen der fragmentierten Beton-Probekörper korreliert werden (vgl. Abb. 7.40). Es wurden mehrere Ansätze entwickelt, mit denen die luftgetragenen Freisetzunganteile η_{100} berechnet werden können. So konnte für S235JR gezeigt werden, dass der in der Vergangenheit angewandte lineare Ansatz lediglich in gewissen eingeschränkten Bereichen der spezifischen Energie W_m plausible Ergebnisse für die luftgetragenen Freisetzunganteile η_{100} liefert. Ein ganzheitlicher Ansatz über eine Potenzfunktion konnte auf der Basis von Messergebnissen aus mehreren Forschungsvorhaben entwickelt werden. Dieser bildet die Messwerte sehr gut ab.

Durch einen Vergleich der Ergebnisse der numerischen Simulationen mit den experimentellen Ergebnissen konnte darüber hinaus analysiert werden, welche Simulationsprogramme und Parametersätze am besten geeignet sind, um diese bei der Berechnung von Masse (vgl. Abb. 7.34) und Geschwindigkeit (vgl. Abb. 7.35) der Bruchstücke zu verwenden.

In Simulationen zur Ansprengung von aus S235JR gefertigten Platten konnten insgesamt plausible Ergebnisse im Hinblick auf den oben genannten Fokus erzielt werden. Dahingegen bestehen Unsicherheiten bei der Simulation von GGG40-Platten unter Lasten infolge von Kontaktdetonation. Die Ergebnisse könnten durch eine genauere Beschreibung des Herstellungsprozesses sowie eine bessere Charakterisierung des Materials im Hinblick auf notwendige Parameteranpassungen der Versagensmodelle verbessert werden.

Die Datenbasis für Sprengversuche mit GGG40 ist klein und sollte ausgeweitet werden. Von besonderem Interesse sind die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung der abplatzenden Trümmer und die Zuordnung zu den Trümmermassen. Inwieweit die Ergebnisse der kleinskaligen Versuche dieses Forschungsvorhabens auf dickere oder größere

Platten sowie größere Ladungsmassen anwendbar sind, sollte in weiteren Arbeiten untersucht werden. Darüber hinaus sollten Arbeiten zur Untersuchung des Einflusses des Abstands zwischen der Sprengstoffladung und der Targetstruktur durchgeführt werden. Eine weitere interessante Fragestellung besteht in der Untersuchung von Targetstrukturen, welche aus gestaffelten Materialfolgen bestehen. Denkbar wären etwa Untersuchungen zu Sandwich-Strukturen aus Stahlblechen, welche Schichten aus Materialien wie Kunstharzen, Blei oder Betonen einschließen.

Literaturverzeichnis

- /ANS 22/ ANSYS AUTODYN, Software build date 20221123, 2023 R1, <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn>, 2022.
- /CAD 18/ Cadoni, E., Forni, D., Gieleta, R., Kruszka, L.: Tensile and compressive behaviour of S355 mild steel in a wide range of strain rates. *The European Physical Journal Special Topics*, 227(1):29–43, ISSN 1951-6401, September 2018.
- /DOB 85/ Dobratz, B. M., Crawfod, P. C.: LLNL Explosives Handbook - Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. Technischer Bericht, Lawrence Livermore National Laboratory, Januar 1985.
- /DOD 08/ U.S. Department of Defence: Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC 3-340-02, Dezember 2008.
- /DOE 94/ U.S. Department of Energy: Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Non-reactor Nuclear Facilities (DOE Handbook), Dezember 1994.
- /EBP 82/ Ernst Basler & Partner: Lokale Schadenwirkung an Betonplatten durch Sprengladungen, Gruppe für Rüstungsdienste, Fachstellen und Forschung / Technische Abteilung 6, B 3113.10-2, September 1982.
- /FER 19/ Fernando, P. L. N., Mohotti, D., Remennikov, A.: Behaviour of explosively welded impedance-graded multi-metal composite plates under near-field blast loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 163, ISSN 0020-7403, November 2019.
- /GRE 04/ Greulich, S.: Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2004.
- /GRS 07/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Assessment, Evaluation and further Development of the Safe Transport of Radioactive Material, Abschlussbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens SR 2497, GRS-A-3378/IV, Juni 2007.

- /GRS 16a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Untersuchungen und Berechnungen des Barrierefersagens sowie der Freisetzung infolge einer Einwirkung mit projektilbildenden Ladungen, Abschlussbericht zu Auftrags-Nr. 801715 im Rahmen des Forschungsvorhabens 3614R01620, April 2016, GRS-VS-Tgb.-Nr.: 12/16, VS-VERTRAULICH.
- /GRS 16b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Experimentelle und numerische Bestimmung der potenziellen Freisetzung in Folge einer Sprengstoffeinwirkung bei der Beförderung von Kernbrennstoffen, Abschlussbericht zu Auftrags-Nr. 805121 im Rahmen des Forschungsvorhabens 3613R01605, September 2016, GRS-VS-Tgb.-Nr.: 32/16, VS-VERTRAULICH.
- /GRS 16c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Weiterentwicklung der Analysemethodik zur Berücksichtigung komplexer Lastannahmen bei hochdynamischen Einwirkungen auf Stahlbetonstrukturen, Abschlussbericht RS1509, GRS-410, 2016.
- /HÄC 11/ Häcker, R., Knothe, E., Memhard, D., Andrieux, F.: Entwicklung und Verifikation von Materialmodellen und numerischen Methoden zur Vorhersage der Containment Sicherheit beim Bersten von Laufrädern in Abgasturboladern (ATL). Projektbericht, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), Containmentsicherheit Forschungsvorhaben Nr. 936, 2011.
- /HEY 23/ He, Y., Liu, Z., Li, M., Li, P., Zhao, Y., Liu, Q., Liu, C., Ye, P.: The Damage to Thick Steel Plates by Local Contact Explosions. Materials, 16(8), ISSN 1996-1944, 2023.
- /HOF 15/ Hoffmeister, B. et al.: Advanced design methods for BLAST Loaded steel structures, Final report of EU-project ADBLAST, ISSN 1831-9424, 2015.
- /JAC 07/ Jacob, N., Nurick, G. N., Langdon, G. S.: The effect of stand-off distance on the failure of fully clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. Engineering Structures, 29(10):2723–2736, ISSN 0141-0296, Oktober 2007.

- /JOH 83/ Johnson, W. H., Cook, W. H.: Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. In: 7th International Symposium on Ballistics, 1983.
- /LAN 03/ Lange, F.; Martens, R.; Hörmann, E; Koch,W.; Nolte, O.; Gray, J.; Ringot, C.; Carr, N.; van Velzen, L.; Hughes, S.: Improvement of the Radiological and Experimental Basis to Further Develop the Requirements of the IAEA Transport Regulations for LSA/SCO Materials, Final Report, Joint Research Study by GRS, Nirex, NRG and NRPB, CEC Contract 4.1020/D/01-001, March 2003.
- /LON 13/ Longère, P. et al.: Ship structure steel plate failure under near-field air-blast loading: Numerical simulations vs experiment. International Journal of Impact Engineering, Vol. 62, p 88–98, 2013.
- /LST 21/ Livermore Software Technology Corporation (LST), An Ansys Company: LS-DYNA, A Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions, Version 09/24/21 (r:14186) LS-DYNA R13, 2021.
- /MAE 99/ Mädler, L.: Freisetzung feiner und lungengängiger Stäube durch kurzzeitige Einwirkung mechanischer Kräfte. Dissertation, Universität Freiberg (TU), Fak. f. Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, 1999.
- /MEY 83/ Meyers, M. A., Taylor Aimone, C.: Dynamic fracture (spalling) of metals. Progress in Materials Science, 28(1):1–96, ISSN 0079-6425, Januar 1983.
- /NOL 06/ Nolte, O.: Zur Phänomenologie der Feinstpartikelentstehung bei transientem mechanischen Energieeintrag in ungeordnete Festkörper. Dissertation, Universität Clausthal (TU), Fak. F. Mathematik/Informatik und Maschinenbau, 2006.
- /ÖZC 24/ Özcan, B., Şeker, U.: Determination of Johnson Cook Strength and Failure Parameters of EN-GJS-400 Spheroidal Graphite Cast iron. Journal of Institut Of Science and Technology, 40(2):254–269, 2024.

- /PLO 02/ Plotzitz, A.: Ein Verfahren zur numerischen Simulation von Betonstrukturen beim Abbruch durch Sprengen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fak. f. Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2002.
- /PLU 13/ Plume, G. W.: Response of Materials to Various Shock Loading Conditions Generated by Plate Impact Experiments. Response of Materials to Various Shock Loading Conditions Generated by Plate Impact Experiments, University of Rhode Island, 2013.
- /RIN 51/ Rinehart, J. S.: Some Quantitative Data Bearing on the Scabbing of Metals under Explosive Attack. *Journal of Applied Physics*, 22(5):555–560, ISSN 0021-8979, Mai 1951.
- /RIN 52/ Rinehart, J. S.: Scabbing of Metals under Explosive Attack: Multiple Scabbing. *Journal of Applied Physics*, 23(11):1229–1233, ISSN 0021-8979, November 1952.
- /SKI 65/ Skidmore, I. C.: An Introduction to Shock Waves in Solids. *Applied Materials Research*, 4:131–147, Juli 1965.
- /SON 16/ Song, K., Long, Y., Ji, C., Gao, F., Chen, H.: Experimental and numerical studies on the deformation and tearing of X70 pipelines subjected to localized blast loading. *Thin-Walled Structures*, 107:156–168, ISSN 0263-8231, Oktober 2016.
- /YAN 23/ Yan, Z., Wang, L., Ning, Z., Li, Y., Cheng, H., Cheng, X.: Deformation behaviors and microstructure evolution of Ti6321 alloy under air blast loadings. *Journal of Materials Research and Technology*, 24:5147–5158, ISSN 2238-7854, Mai 2023.
- /ZHO 24/ Zhou, Z.-q., Du, Z.-c., Wang, X., Jiang, H.-l., Zhou, Q., Zhang, Y.-l., Liu, Y.-z., Zhang, P.-z.: Micro defects formation and dynamic response analysis of steel plate of quasi-cracking area subjected to explosive load. *Defence Technology*, 31:580–593, ISSN 2214-9147, Januar 2024.
- /ZUK 04/ Zukas, J.A.: Introduction to Hydrocodes. *Studies in Applied Mechanics*. Academic Pr. Inc., ISBN-13: 978-0080443485, 2004

/ZUK 98/ Zukas, J. A., Walters, W. P.: Explosive Effects and Applications, Springer, 1998.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schadensbild der Stahlplatte aus Forschungsvorhaben 3613R01605 /GRS 16b/ nach der Sprengung mit danebenliegendem Abplatzer	5
Abb. 2.2	Prinzipgrafik der Druckwellenausbreitung nach /ZUK 04/ bei Kontaktdetonation auf einer Platte	7
Abb. 2.3	Beispiel für Spallationsversagen einschließlich multipler Spallation in Stahl infolge einer Kontaktdetonation /RIN 52/.....	7
Abb. 2.4	Versagensbild von Versuch Nr. 1 aus /SON 16/ mit Versagensmode I	9
Abb. 2.5	Versagensbild von Versuch Nr. 3 aus /SON 16/ mit Versagensmode II	9
Abb. 2.6	Versagensbild von Versuch Nr. 6 aus /SON 16/ mit Versagensmode III	9
Abb. 2.7	Schadensbilder der Stahlplatten in Versuchen aus /FER 19/	11
Abb. 2.8	Schadensbilder der Stahlplatten in Versuchen C1-STA-54 und C2-STA-78 aus /FER 19/.....	11
Abb. 2.9	Schadensbilder der Stahlplattenquerschnitte in Versuchen aus /HEY 23/	12
Abb. 2.10	Schadensbilder in Versuchen aus /ZHO 24/ auf Plattenfrontseite und im Plattenquerschnitt für Ladungsabstände von 20 mm (Test 1) und 30 mm (Test 2)	13
Abb. 2.11	Schadensbilder der Plattenrückseiten in Versuchen aus /YAN 23/	14
Abb. 2.12	Verhalten der JWL-Parameter für Seismoplast und PETN 1.50	16
Abb. 2.13	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nach dem Johnson-Cook-Modell.....	19
Abb. 2.14	Vergleich der Bruchdehnungen im Johnson-Cook-Schädigungsmodell	21
Abb. 2.15	Spezifische Freisetzung aller luftgetragenen Partikel verschiedener Zementarten nach /MAE 99/	26
Abb. 2.16	Auf den luftgetragenen Anteil normierte Korngrößenverteilung für Versuche mit Probekörpern des Zementtyps „Grout“ nach /MAE 99/	27
Abb. 2.17	Zusammenfassung der Freisetzungsanteile in kleinskaligen Versuchen nach /LAN 03/	29

Abb. 2.18	Ergebnisse von experimenteller Erfassung und Simulation des Freisetzungssanteils η_{100} nach /GRS 16b/	30
Abb. 3.1	Schematische Darstellung der Versuchsanordnung aus /GRS 16b/	33
Abb. 3.2	Schematischer Versuchsaufbau des aktuellen Forschungsvorhabens.....	35
Abb. 3.3	Querschnitt der Metallplattenfixierung (Maße in mm).....	35
Abb. 3.4	Schematischer Versuchsaufbau des aktuellen Forschungsvorhabens (Draufsicht)	36
Abb. 3.5	Foto des Versuchsaufbaus	36
Abb. 4.1	Normierte Korngrößenverteilung für Zement-Probekörper nach /NOL 06/	40
Abb. 4.2	Aushärtekurven der Probekörper für die erste (links) und zweite (rechts) Versuchskampagne	45
Abb. 4.3	Beton-Probekörper nach Druckprüfung – Kampagne 1 (links), Kampagne 2 (rechts)	46
Abb. 4.4	Positionierung der Sprengladung.....	47
Abb. 5.1	Parameter für die Bewertung der Versagensmode II (links) und der Versagensmode III (rechts) in Seiten- und Draufsicht auf die Metallplatte	49
Abb. 5.2	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX771 (S-20-120-3)	51
Abb. 5.3	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX772 (S-20-200-3)	51
Abb. 5.4	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX773 (S-30-200-3)	51
Abb. 5.5	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX774 (S-30-200-3)	52
Abb. 5.6	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX775 (S-20-100-3)	52
Abb. 5.7	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX776 (S-20-200-2)	52
Abb. 5.8	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX778 (G-20-120-3).....	53
Abb. 5.9	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX779 (G-20-50-3).....	53
Abb. 5.10	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX780 (S-20-50-3)	53
Abb. 5.11	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX781 (G-20-100-3).....	53
Abb. 5.12	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX782 (G-20-200-3).....	54
Abb. 5.13	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX783 (G-20-100-2).....	54

Abb. 5.14	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX784 (G-20-120-2).....	54
Abb. 5.15	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX785 (S-20-200-1)	54
Abb. 5.16	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX786 (G-20-120-2).....	55
Abb. 5.17	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX787 (S-30-200-2)	55
Abb. 5.18	Schadensbild der Metallplatte von Versuch FX788 (G-20-200-2).....	55
Abb. 5.19	Siebturm mit unterschiedlichen Sieben	58
Abb. 5.20	Übersicht der Siebfragmente der zweiten Kampagne	60
Abb. 5.21	Versagensbild der Metallplatte von Versuch 3 aus /GRS 16b/	61
Abb. 5.22	Versagensbild der Metallplatte von FX780 (S-20-50-3).....	61
Abb. 5.23	Kegelstumpf des Probekörpers von Versuch 3 aus /GRS 16b/	62
Abb. 5.24	Versagensbild der Metallplatte von Versuch 4 aus /GRS 16b/	63
Abb. 5.25	Versagensbild der Metallplatte von FX772 (S-20-200-3).....	63
Abb. 5.26	Versagensbild der Metallplatte von Versuch 8 aus /GRS 16b/	64
Abb. 5.27	Versagensbild der Metallplatte von FX771 (S-20-120-3).....	64
Abb. 5.28	Kegelstumpf des Probekörpers von Versuch 8 aus /GRS 16b/	64
Abb. 6.1	Beispiel Bildauswertung anhand FX776_out1_Frame 77-78.....	70
Abb. 6.2	Probekörper mit Referenzmarkierungen	70
Abb. 6.3	Diagramm Abplatzergeschwindigkeit über Ladungsmasse	72
Abb. 6.4	Darstellung der Siebergebnisse für die Versuche mit S235JR	76
Abb. 6.5	Darstellung der Siebergebnisse für die Versuche mit GGG40.....	76
Abb. 6.6	Vergleich mit Siebung aus /GRS 16b/.....	78
Abb. 6.7	Einfluss der Datenauswahl auf den Fit anhand der Messreihe FX780 (50 g Ladungsmasse) mit vergrößertem Ausschnitt	80
Abb. 6.8	Vergleich der freigesetzten luftgetragenen Partikel kleiner 100 µm bei unterschiedlicher Auswahl an Datenpunkten mit Ergebnissen aus /GRS 16b/.....	80
Abb. 6.9	Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse	82
Abb. 6.10	Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Vergleich /GRS 16b/.....	84

Abb. 6.11	Ergebnisdarstellung η_{100} über d_{AE} von GGG40 und S235JR	85
Abb. 7.1	Schnittbild eines Modells für das Rechenprogramm AUTODYN	89
Abb. 7.2	Fragmentierung der Stahlplatten in Simulationen mit AUTODYN.....	90
Abb. 7.3	Bestandteile eines Modells für das Rechenprogramm LS-DYNA	91
Abb. 7.4	Illustration der Funktionalität zur adaptiven Umwandlung von Volumenelementen in SPH-Partikel nach Elementerosion in LS- DYNA	92
Abb. 7.5	Konturen des Druckverlaufs im Plattenquerschnitt ($H=20$ mm, $m_{Sp}=50$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1$).....	94
Abb. 7.6	Konturen des Druckverlaufs im Plattenquerschnitt ($H=20$ mm, $m_{Sp}=200$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1$).....	95
Abb. 7.7	Druckverläufe in ausgewählten Elementen nahe einer Spallationsebene ($H=20$ mm, $m_{Sp}=50$ g, Ladungsgeometrie $D_{Sp}/H_{Sp}=3:1)$	96
Abb. 7.8	Einfluss der JWL-Parametersätze auf akkumulierte Kopplungskräfte in LS-DYNA Rechnungen	96
Abb. 7.9	Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 0,5 mm unterhalb der Ladung	97
Abb. 7.10	Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 5,5 mm unterhalb der Ladung	97
Abb. 7.11	Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 9,5 mm unterhalb der Ladung	97
Abb. 7.12	Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 15,5 mm unterhalb der Ladung	98
Abb. 7.13	Druckverläufe in der Targetplatte in Rechnungen zu Versuchen FX780 (links) und FX772 (rechts) 19,5 mm unterhalb der Ladung	98
Abb. 7.14	Energiebilanzen der Stahlplatten in Simulationen zu den Versuchen FX780 und FX772 mit LS-DYNA.....	100
Abb. 7.15	Verformungen der Frontseite in Vorversuch FX760 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)	101
Abb. 7.16	Verformungen der Rückseite in Vorversuch FX760 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)	101

Abb. 7.17	Verformungen der Frontseite in Vorversuch FX761 in Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)	102
Abb. 7.18	Verformung und Abplatzung auf der Rückseite in Vorversuch FX761 in Simulation (jeweils links) und Schadensbild im Versuch (jeweils rechts)	102
Abb. 7.19	Verformungen auf der Frontseite in Vorversuch FX762 in Simulation (links) und Versuch (rechts)	102
Abb. 7.20	Verformungen auf der Rückseite in Vorversuch FX762 Simulation (links) und Schadensbild im Versuch (rechts)	103
Abb. 7.21	Schädigungsbilder der Querschnitte in Simulationen mit AUTODYN zu Versuchen mit S235-Platten.....	103
Abb. 7.22	Vergleich der Fragmentierung in Simulationen zu den Versuchen FX780 (S-20-50-3) (links) und FX779 (G-20-50-3) (rechts) mit 50 g Ladungen	104
Abb. 7.23	Vergleich der Fragmentierung in Simulationen zu den Versuchen FX772 (S-20-200-3) (links) und FX782 (G-20-200-3) (rechts) mit 200 g Ladungen.....	104
Abb. 7.24	Einfluss diverser Parameter auf Bruchbild des Targets und Geschwindigkeitsverteilungen der Trümmer in Simulationen zu FX772 (S-20-200-3)	106
Abb. 7.25	Vergleich von Plattenzerstörung und Fragmentierung in Simulationen zu Versuch FX779 (G-20-50-3) mit Parametersätzen nach /HÄC 11/ (links) und /ÖZC 24/ (rechts).....	109
Abb. 7.26	Vergleich von Plattenzerstörung und Fragmentierung in Simulationen zu Versuch FX782 (G-20-200-3) mit Parametersätzen nach /HÄC 11/ (links) und /ÖZC 24/ (rechts).....	109
Abb. 7.27	FX771 im Vergleich zur Simulation (S-20-120-3)	113
Abb. 7.28	FX772 im Vergleich zur Simulation (S-20-200-3)	114
Abb. 7.29	FX773 im Vergleich zur Simulation (S-30-200-3)	114
Abb. 7.30	FX775 im Vergleich zur Simulation (S-20-100-3)	115
Abb. 7.31	FX780 im Vergleich zur Simulation (S-20-50-3)	116
Abb. 7.32	FX785 im Vergleich zur Simulation (S-20-200-1)	116
Abb. 7.33	FX787 im Vergleich zur Simulation (S-30-200-2)	117

Abb. 7.34	Vergleich der Abplatzermassen zwischen Versuch und Simulation	119
Abb. 7.35	Vergleich der Geschwindigkeiten zwischen Versuch und Simulation	119
Abb. 7.36	Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Trendlinie (linear) für Ergebnisse GGG40 (blau) und für Ergebnisse S235JR (rot).....	121
Abb. 7.37	Ergebnisdarstellung η_{100} über W_m aller Ergebnisse mit Trendlinie (doppelt logarithmisch).....	122
Abb. 7.38	Einfluss des linearen Ansatzes auf die Vorhersage	123
Abb. 7.39	η_{100} über W_m Vergleich mit früheren Ergebnissen.....	125
Abb. 7.40	η_{100} über W_m mit verschiedenen Fits	126
Abb. 7.41	Gegenüberstellung der mittels Siebung und Extrapolation ermittelten Freisetzungssanteile η_{100} mit den mit verschiedenen Ansätzen berechneten Freisetzungssanteilen η_{100} bei Verwendung experimenteller Abplatzermassen und Geschwindigkeiten (S235JR)....	130
Abb. 7.42	Gegenüberstellung der mittels Siebung und Extrapolation ermittelten Freisetzungssanteile η_{100} mit den mit verschiedenen Ansätzen berechneten Freisetzungssanteilen η_{100} bei Verwendung experimenteller Abplatzermassen und Geschwindigkeiten (GGG40)	130
Abb. 7.43	Gegenüberstellung von η_{100} der Siebung mit den über die Ansätze berechneten Werten (Verwendung simulierter Parameter)	134
Abb. 7.44	Gegenüberstellung von in /GRS 16b/ ermittelten Freisetzungssanteile η_{100} (Experiment und Simulation) mit im aktuellen Forschungsvorhaben gemessenen und berechneten Freisetzungssanteilen η_{100}	135

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Überblick über Versagensmoden von metallischen Platten bei lokaler Belastung nach /JAC 07/	6
Tab. 2.2	Ausgewählte Parameter und Ergebnisse von Versuchen nach /SON 16/.....	8
Tab. 2.3	Versuchsparameter zu Sprengversuchen aus /FER 19/ (jeweils mit zylindrischer Ladung, ca. 250 g Composition B, $D_{Sp}=H_{Sp}=30$ mm).....	10
Tab. 2.4	Versuchsparameter und Ergebnisse von Sprengversuchen aus /HEY 23/	12
Tab. 2.5	Versuchsparameter der Versuchsreihe von Yan et al. /YAN 23/	13
Tab. 2.6	Eingabeparameter der JWL-EOS zu verschiedenen Sprengstoffen.....	15
Tab. 2.7	Dichten und elastische Konstanten der Materialien der Zielstrukturen	17
Tab. 2.8	Verwendete Parameter des Festigkeitsmodells	18
Tab. 2.9	Verwendete Parameter des Johnson-Cook-Schädigungsmodells	21
Tab. 4.1	Vergleichbare Versuche aus /GRS 16b/ mit Ergebnissen	39
Tab. 4.2	Übersicht Versuchsmatrix	42
Tab. 4.3	Versuchsmatrix sortiert	43
Tab. 4.4	Betonrezeptur für die Probekörper	44
Tab. 5.1	Auswertung des Versagensbildes der Metallplatte	50
Tab. 6.1	Massen Metallplatte S235JR	68
Tab. 6.2	Massen Metallplatte GGG40.....	68
Tab. 6.3	Übersicht Geschwindigkeiten der Abplatzer.....	71
Tab. 6.4	Übersicht Siebfragmente mit Verlust.....	74
Tab. 6.5	Massen Metallplatte S235JR	83
Tab. 6.6	Vergleich Abplatzermasse	87
Tab. 6.7	Vergleich luftgetragener Anteil	88
Tab. 7.1	Energieaufnahme der Stahlplatte in Simulationen zu FX780 (Ladung 50 g) und FX772 (Ladung 200 g) mit LS-DYNA	99
Tab. 7.2	Versuchsparameter der Vorversuche mit S355-Platten.....	100

Tab. 7.3	Variationsparameter in LS-DYNA Simulationen	105
Tab. 7.4	Ergebnisse AUTODYN, $p_{min} = -1,625 \text{ GPa}$ für S235-Platten	107
Tab. 7.5	Ergebnisse LS-DYNA, $p_{min} = -1,625 \text{ GPa}$ in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für S235-Platten.....	108
Tab. 7.6	Ergebnisse LS-DYNA, $p_{min} = -0,94 \text{ GPa}$ in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für GGG40 mit Parametern des Festigkeits- und Versagensmodells nach /ÖZC 24/	110
Tab. 7.7	Ergebnisse AUTODYN, $p_{min} = -0,94 \text{ GPa}$ in Verbindung mit Johnson-Cook-Modell für GGG40 mit Parametern des Festigkeitsmodells nach /HÄC 11/	110
Tab. 7.8	Gegenüberstellung der geometrischen Ergebnisse von Simulation und Versuchen	111
Tab. 7.9	Gegenüberstellung m_{Ab} und v von Simulation und Versuchen	118
Tab. 7.10	Übersicht der Trendlinien.....	127
Tab. 7.11	Rechnerische Ermittlung von η_{100} mit experimentell ermittelten Werten für Abplatzermasse und Geschwindigkeit unter Verwendung verschiedener Ansätze (S235JR)	128
Tab. 7.12	Rechnerische Ermittlung von η_{100} mit experimentell ermittelten Werten für Abplatzermasse und Geschwindigkeit unter Verwendung verschiedener Ansätze (GGG40).....	129
Tab. 7.13	Berechnete Freisetzunganteile η_{100} mit simulierten Parametern (Teil 1)	132
Tab. 7.14	Berechnete Freisetzunganteile η_{100} mit simulierten Parametern (Teil 2)	133
Tab. 8.1	Übersicht der sprengstoffseitigen Krater	137

Abkürzungsverzeichnis

AISI	American Iron and Steel Institute
EFP	Explosively Formed Projectiles
EMI	Ernst-Mach-Institut
EOS	<i>equation of state</i> , Zustandsgleichung
FEM	Finite-Elemente-Methode
GRS	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit
ITEM	Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin
JWL	Jones-Wilkins-Lee
KG	Korngröße
KW	Kalenderwoche
log	Logarithmisch
MPP	Message Passing Parallel
PETN	Pentaerythrityltetranitrat
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TNT	Trinitrotoluol

Formelzeichen

Δ	Differenz
ε^*	Verhältnis der Dehnraten
ε_{pl}	Plastische Dehnung
ε_f	Bruchdehnung
η_{10}	kumulierter Anteil kleiner 10 µm
η_{100}	kumulierter Anteil kleiner 100 µm
θ	Dichtevehrhältnis
λ	Volumenkorrekturfaktor
ρ	Dichte
ρ_0	Referenzdichte
σ^*	Mises Vergleichsspannung
σ_{eff}	Spannungsmehrachsigkeit
σ_w	wahre Spannung
σ_y	Fließgrenze
ω	Konstante

A	y-Achsenabschnitt
A_1	Konstante
B	Steigung der Gerade
B_1	Konstante
b_{Ring}	Ringbreite
d	Ablesegenauigkeit
D	Schadensparameter
D_1	Modellparameter
D_2	Modellparameter
D_3	Modellparameter
D_5	Modellparameter
d_{AE}	aerodynamischer Äquivalentdurchmesser
D_{CJ}	Detonationsgeschwindigkeit
D_{HP}	Kraterdurchmesser Rückseite der Platte
D_L	Lochdurchmesser
D_{OP}	Kraterdurchmesser auf der Platte (Sprengladungsseite)
d_{geo}	geometrischer Äquivalentdurchmesser
D_{SP}	Durchmesser der Sprengladung
E	Energie
E_{CJ}	spezifische innere Energie
e_i	spezifische innere Energie
E_{kin}	kinetische Energie
E_{pot}	potentielle Energie
fcm	Druckfestigkeit
fps	<i>frames per second</i> , Bilder pro Sekunde
g	Erdbeschleunigung
H	Dicke der Platte
h	Fallhöhe
H_{SP}	Höhe/Dicke der Sprengladung
K_4^{100}	Freisetzungsfaktor
L_1	empirischer werkstoffspezifischer Erfahrungswert
L_2	empirischer werkstoffspezifischer Erfahrungswert
L_3	empirischer werkstoffspezifischer Erfahrungswert
L_4	empirischer werkstoffspezifischer Erfahrungswert

L_5	empirischer werkstoffspezifischer Erfahrungswert
m_{Ab}	Masse des Abplatzers
m_G	Geschossmasse
m_P	Masse des Probekörpers
m_{PN}	Masse der Metallplatte nach dem Versuch
m_{PV}	Masse der Metallplatte vor dem Versuch
m_{Sp}	Sprengstoffmasse
p	Druck
p_{hyd}	hydrostatischer Druck
P_{CJ}	Chapman-Jouguet Druck
Q_3	maschinell ermittelte Korngrößenverteilung
r	Weg
R_1	Konstante
R_2	Konstante
s	Tiefe des Kraters
t	Zeit
T^*	Temperaturverhältnis T_{akt} / T_{melt}
T_{akt}	aktuelle Temperatur
T_{melt}	Schmelztemperatur
v	Geschwindigkeit
V_{Ab}	Geschwindigkeit des Abplatzers
V_P	Volumen des Probekörpers
W_m	Spezifische Energie
W_{mk}	korrigierte spezifische Energie bei größeren Probekörpern
z	Abstand von der Kontaktfläche Sprengstoff/Platte ins Innere

A Anhang – Eingabedaten und Auswerteprogramm zur numerischen Berechnung

A.1 Nutzereigene Subroutine in AUTODYN zur Ermittlung von Massen und Geschwindigkeiten der Abplatzer

SUBROUTINE EXEDIT3

```
USE kindef
USE wrapup
USE mdgrid3
USE object
USE subdef
USE cycvar
USE matdef
USE mdstring
USE material

IMPLICIT NONE

REAL*8 :: x_vel ! Geschwindigkeitskomponente
REAL*8 :: x_pos ! Koordinate
REAL*8 :: masse_stahl(12), geschwindigkeit_stahl(12),& energie_stahl(12), impuls_stahl(12)
integer :: n_sph, i_sph ! Anzahl der SPH Partikel
integer :: n_mat, i_mat ! Anzahl der Objekte in SPH Part
integer :: ijk, NS, i_obj
integer :: n_bilanz(12), i_bil ! Anzahl der Ebenen
integer , parameter :: n_bil=12
real*8, parameter, dimension(12) :: x_bilanz=(/-5.0d0,-10.0d0,-15.0d0,-20.0d0,-25.0d0,-30.0d0,-35.0d0,
&
-40.0d0,-45.0d0,-50.0d0,-55.0d0,-60.0d0/)
real*8 , parameter :: v_min=-0.1d0
character*4 , parameter :: stahl_name='St37'

do NS=1,NUMSUB ! Schleife ueber Parts
NSUB=NS
CALL GETSUB
! Liegt der SPH Part vor?
if(trim(NAMSUB(NS))=='SPH') then
  open(unit=10, file="MASSEN_OUT.dat", status="unknown",position="append", recl=2000)
  open(unit=11, file="ENERGIE_OUT.dat", status="unknown",position="append", recl=2000)
  open(unit=12, file="XVEL_OUT.dat", status="unknown",position="append", recl=2000)

  ! Mittlere geschwindigkeiten null setzen
  energie_stahl=0.0d0
  masse_stahl=0.0d0
  geschwindigkeit_stahl=0.0d0
  impuls_stahl=0.0d0
  n_bilanz=0
  ! Gesamtzahl Partikel ermitteln
  n_sph=0
  do i_obj=1,NOBJ
    n_sph=n_sph+NSPHOB(i_obj)
  end do

  ! Schleife ueber Partikel
  do i_sph=1,n_sph
    ! Index des Partikels
    IJK=IJKSET3(1,i_sph,1)
    ! Ist es ein Stahlpartikel?
    if(MATERIALS(MATNO)%NAME=='St37') then
```

```

! Position/Geschwindigkeit des Partikels
x_pos=XN(IJK)
x_vel=UXN(IJK)
! Energie und Masse von durchfliegenden Partikeln
do i_bil=1,n_bil
  if (x_vel.le. v_min.and. x_pos.le.x_bilanz(i_bil)) then
    n_bilanz(i_bil)=n_bilanz(i_bil)+1
    impuls_stahl(i_bil)=impuls_stahl(i_bil)+x_vel*PMASS(IJK)
    masse_stahl(i_bil)=masse_stahl(i_bil)+PMASS(IJK)
    energie_stahl(i_bil)=energie_stahl(i_bil)+0.5d0*PMASS(IJK)*ABSVEL(IJK)**2.0d0
  end if
  end do
end if
end do
end do
! Ermittlung der mittleren Geschwindigkeiten
do i_bil=1,n_bil
  if(n_bilanz(i_bil).ge.1) then      geschwindigkeit_stahl(i_bil)=impuls_stahl(i_bil)/masse_stahl(i_bil)
  end if
end do
if (TIME.ge.0.0d0) then
  ! Massen
  write(10,*) TIME, masse_stahl
  ! Energie
  write(11,*) TIME, energie_stahl
  ! Geschwindigkeiten
  write(12,*) TIME, geschwindigkeit_stahl
end if
close(10)
close(11)
close(12)

end if
end do
RETURN

END SUBROUTINE EXEDIT3

```

A.2 LS-DYNA Eingabekarten

A.2.1 Parameter der Euler-Lagrange-Kopplung

```

*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID_TITLE
$# coupid                      title
$#   0Kopplung
$# slave  master  sstyp  mstyp  nquad  ctype  direc  mcoup
$#   3     2       2      0      4      4      2      0
$# start  end    pfac   fric   frcmin  norm   normtyp  damp
$#   0.01.00000E10   0.1   0.0    0.5     0     0     0.0
$# cq    hmin   hmax   ileak  pleak  lcidpor  nvent blockage
$#   0.0    0.0    0.0    0.01    0     0     0
$# iboxid ipenchk intforc ialeosf lagmul pfacmm thkf
$#   0     0     0     0.0     0     0

```

A.2.2 Initialisierung der Sprengstoffladung

Folgende Eingabekarten realisieren beispielhaft die Initialisierung einer 50 g Ladung PETN 1.50.

*INITIAL_DETINATION

```

$# pid      x      y      z      lt      -      mmgset
      0      0.0    0.0   28.435    0.0          0
*INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY
$# fmsid  fmidtyp  bammg  ntrace
      4      1      1     20
$# conttyp  fillopt  fammg      vx      vy      vz      unused      unused
      4      0      2     0.0     0.0     0.0
$# x1      y1      z1      x2      y2      z2      r1      r2
      0.0    0.0   20.05    0.0     0.0   36.819   25.154   25.154

```

A.2.3 Parameter des Euler-Hintergrundnetzes

```

*CONTROL_ALE
$# dct      nadv      meth      afac      bfac      cfac      dfac      efac
      -1      0      1    -1.0     0.0     0.0     0.0     0.0
$# start      end      aafac      vfact      prit      ebc      pref      nsidebc
      0.01.00000E20  1.01.00000E-6      0      0   101.325      0
$# ncpl      nbkt      imascl      checkr      beamin      mmgpref      pdifmx      dtmufac
      1      50      0     0.0     0.0     0     0.0     0.0
$# optimpp      ialedr      bndflx      minmas
      0      0    01.00000E-5
*SECTION_SOLID_TITLE
ALE
$# secid      elform      aet      unused      unused      unused      cohoff      unused
      2      11      0                      0
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
$# sid      idtype      gpname
      4      1    Luft
      5      1    Ladung

```

A.2.4 Eingabekarten für GGG40 nach /HÄC 11/

in (Einheiten: mm, mg, ms)

```
*MAT_JOHNSON_COOK_TITLE
GGG40
$# mid ro g e pr dtf vp rateop
 3 7.26.471000E71.650000E8 0.275 0.0 1.0 0.0
$# a b n c m tm tr epso
 211700.0 568100.0 0.351 0.02 0.85 1250.0 293.01.00000E-8
$# cp pc spall it d1 d2 d3 d4
 515.0 -940000.0 3.0 0.0 0.01 0.45 -2.5 0.0
$# d5 c2/p erod efmin numint
 0.0 0.0 01.00000E-6 0.0
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_TITLE
Eos GGG40
$# eosid c0 c1 c2 c3 c4 c5 c6
 4 0.01.222000E8 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
$# e0 v0
 0.0 1.0
*MAT_ADD_EROSION_TITLE
Erosionskriterium
$# mid excl mxpres mneps effeps voleps numfip ncs
 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 1.0
$# mnpres sigp1 sigvm mxeps epssh sigth impulse failtm
 -940000.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
$# idam - - - - - - lcregd
 0 0
$# lcflid nsff epsthin engcrt radcrt lceps12 lceps13 lcepsmx
 0 10 0.0 0.0 0.0 0 0 0
$# dtectl unused mxtmp dtmin
 0.0 0.0 0.0
```

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de