

Beton unter Kontaktdetonation – neue experimentelle Methoden

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Stephan Steiner
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 05. November 2008

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
Korreferent: Prof. Dr. rer.nat Klaus Thoma

Karlsruhe 2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie an der Universität Karlsruhe (TH). Die Arbeit hat zum Ziel, Grundlagen zum lokalen Verhalten von Beton unter Kontaktdetonation zu erarbeiten und ist ein Baustein der ersten Förderphase der DFG-Forschergruppe 500 „Computergestützte Destruktion komplexer Tragwerke durch Sprengung“. Sie wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Mein Dank gilt Herrn Professor Stempniewski für die Unterstützung der Arbeit, für sein in mich gesetztes Vertrauen und die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Professor Thoma vom Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, Freiburg danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts sei für die gemeinsame Zeit und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre gedankt. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Nico Herrmann; seine stete Bereitschaft zur Diskussion, seine Unterstützung bei den Versuchen sowie seine „physikalische“ Betrachtungsweise waren wertvolle Hilfen. Frau Daniela Ruch gebührt ebenso mein besonderer Dank; sie war immer dann zur Stelle, wenn es wirklich „brannte“. Schließlich möchte ich meinem langjährigen Zimmerkollegen Herrn Niklas Puttendörfer danken; einerseits waren es die fachlichen Diskussionen mit ihm, die zu neuen Ansatzpunkten bei der Lösung vieler Fragestellungen führten, andererseits waren es vielmehr die Diskussionen außerhalb des Protokolls, die zu unserer freundschaftlichen Partnerschaft im „Duden-Büro“ beigetragen haben.

Bei allen Mitarbeitern in der Versuchshalle der Materialprüfungsanstalt und der Abteilung Messtechnik möchte ich mich für ihre stets zuverlässige, tatkräftige und oft weit über das übliche Maß hinausgehende Unterstützung bedanken. Den Mitarbeiterinnen des Zeichenbüros sei für die Unterstützung und Geduld beim Anfertigen vieler Zeichnungen in dieser Arbeit gedankt.

Den Menschen, die mich im Privaten während dieser Zeit begleitet haben und hoffentlich weiter begleiten werden gilt ebenso mein Dank. Besonders möchte ich hier meinen Eltern für Ihre Unterstützung in allen Bereich danken.

Meiner Frau Silke gilt abschließend mein ganz besonderer Dank. Ihre Unterstützung, Motivation, ihre Geduld und ihre endlose Nachsicht haben mir den notwendigen Freiraum verschafft, um diese Arbeit erfolgreich zu beenden.

Karlsruhe, im Oktober 2009

Stephan Steiner

Abstract

This thesis presents theory and experiments investigating the behaviour of concrete subjected to a highly dynamic load induced by a contact detonation. The observability of the induced shock waves and the consequential shift of the thermodynamic state variables pressure, volume and internal energy are the main objectives of this thesis.

Changes within the concrete due to the loading are recorded using a special measuring technique and investigation methods to determine the crack velocity are presented. The combination of the experimental results and the theory allows for an enhanced description of the physical behaviour of concrete in the range of high pressures.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit stellt Experimente und Theorie zum Verhalten von Beton unter einer hochdynamischen, durch Kontaktdetonation erzeugten Beanspruchung vor. Wesentliche Ziele dieser Arbeit sind die Untersuchbarkeit der durch diese Belastung in die Versuchskörper eingetragenen Stoßwellen sowie die damit verbundenen Änderungen der thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, Volumen und innere Energie.

Aus der Belastung resultierende Veränderungen im Beton werden durch eine spezielle Messtechnik erfasst. Außerdem werden Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Rissgeschwindigkeiten vorgestellt. Die Verknüpfung der Ergebnisse aus den Experimenten mit der Theorie ermöglicht es, die Physik von Beton im Bereich hoher Drücke erweiternd zu beschreiben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung in die Thematik	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	7
2.1	Lineare und nichtlineare Wellenausbreitung	7
2.1.1	Elastische Wellenausbreitung	8
2.1.2	Nichtlineare Wellenausbreitung – Dispersion	16
2.1.3	Stoßwellen	18
2.2	Bilanzsätze – Erhaltungsgleichungen	21
2.3	Zustandsgleichungen – EOS	24
2.3.1	Experimentelle Ermittlung	24
2.3.2	Theoretische Zustandsgleichungen	26
2.3.3	Mie-Grüneisen-Theorie	34
2.4	Festigkeit. Materialmodelle	40
2.5	Werkstoffsimulation	48
3	Stoßwellen und Detonationstheorie	53
3.1	Detonationsvorgang	53
3.2	Detonationstheorie	56
3.3	Zustandsgleichung	58
4	Beton	61
4.1	Beschreibung des Werkstoffs	61
4.2	Statische Eigenschaften	64
4.3	Dynamisches Verhalten	74
4.3.1	Hohe Dehngeschwindigkeiten	74
4.4	Wellenausbreitung im Beton	78
5	Experimentelle Untersuchungen	81
5.1	Eigene Versuchsmethode und Versuchsaufbau	82
5.1.1	Möglichkeiten und Grenzen der Versuchsmethode	83
5.1.2	Versuchseinrichtung	85
5.2	Versuchsdurchführung	93
5.2.1	Triggerung	94
5.2.2	Vorversuche	96

5.2.3	Funktions- und Zündertests	97
5.3	Messtechnik	101
5.3.1	Datenaufzeichnung und allgemeine Messtechnik	101
5.3.2	Elemente, Signalverstärkung, Kalibrierung	104
5.4	Messung des Wärmestroms – ALTS	110
5.4.1	Sensoreigenschaften	110
5.4.2	Wärmestrom und Temperatur	113
5.4.3	Vorversuche zum Einsatz der ALTS in Beton	116
5.4.4	ALTS - Konfektionierung / Reparatur	119
5.4.5	ALTS - Bauart C	123
5.5	Datenauswertung – Messergebnisse	125
5.5.1	Signalverläufe	125
5.5.2	Messgrößen-Zeit-Verläufe	133
5.5.3	Hugoniot-Daten für Beton	139
5.5.4	HUGONIOT-Daten – Vergleich mit Daten aus der Literatur	141
5.5.5	Wärmestrom und Energie	142
5.5.6	Überlegungen zu Temperaturberechnungen	145
5.6	Schädigung der Versuchskörper	146
5.7	Risslaufzeiten und Rissgeschwindigkeiten	150
5.7.1	Silberleitlackstreifen in einem Stromkreis	151
5.7.2	Hochgeschwindigkeitskamera	154
5.7.3	Diskussion der Ergebnisse beider Verfahren	156
6	Zusammenfassung und Ausblick	157
	Literaturverzeichnis	161
A	Betonkennwerte	169
B	Kalibrierkurven	171
C	Messkurven	175
D	Planunterlagen	307

Abbildungsverzeichnis

1.1	Versuchsablauf	3
2.1	Wellenanteile bei Stoßbelastung eines Festkörpers nach MEYERS [64]	7
2.2	Ausbreitung einer elastischen Kompressionswelle in einem dünnen Stab [64]	9
2.3	Reflexion einer Welle an einer freien Oberfläche	13
2.4	Spannungsimpuls an der Grenzfläche unterschiedlicher Materialien nach NIEDRIG [68]	15
2.5	Eindimensionale Zugbelastung und Dispersion einer plastischen Welle, z.B in einem dünnem Stab nach MEYERS [64]	16
2.6	Nichtlineares Materialverhalten bei hydrostatischer Druckbelastung	17
2.7	Ausbildung einer Stoßwelle durch Dispersion	19
2.8	Bilanzierung an einer Stoßfront mit Bewegungsrichtung von links nach rechts	23
2.9	(links) Darstellung einer Zustandsgleichung im p-V-e-Raum, beschränkt auf die feste Phase; (rechts) Rayleigh-Gerade und HUGONIOT-Kurve in CLAPEYRON-Koordinaten	26
2.10	Bindungsenergie und Bindungskräfte zwischen benachbarten Atomen	27
2.11	Parabelpotential harmonischer Oszillatoren	30
2.12	Feld von Atomen als unabhängige Schwinger	31
2.13	Druck entlang poröser HUNGONIOT-Kurve und 0 K- Isotherme nach Berechnungen von OCKERT [69]	35
2.14	Wesentliche Phasen bei der Kompression eines porösen Materials .	36
2.15	Zunahme der Gesamtenergie bei Kompression nach Berechnungen von OCKERT [69]	38
2.16	Temperatur entlang der porösen HUGONIOT-Kurve von Beton nach OCKERT [69]	40
2.17	Normal- und Schubspannungen an einem infinitesimal kleinen Würfel	41
2.18	Würfel mit Kanten entlang den Spannungshauptachsen und Lage der acht Schnittebenen, in denen die Oktaederspannungen auftreten (links); Deviatorschnitt und HAIGH-WESTERGAARD Koordinaten (rechts)	44

2.19	Deviatorschnitt (links) und Meridianschnitt (rechts) unterschiedlicher Fließ- und Versagensflächen nach [73]	45
2.20	Darstellung von Fließfläche und Versagensfläche eines Werkstoffs im Hauptspannungsraum nach CHEN [19]	46
2.21	Ausgewählte Werkstoffmodelle aus CHEN [18]	47
2.22	Berechnungszyklus eines Hydrocodes, GREULICH [37]	49
2.23	Wichtungsfunktion EFG nach LARCHER [60]; (links) ohne Riss, (rechts) mit Riss	50
2.24	Vergleich Simulationsergebnis Krater – Versuchskörper	51
2.25	Vergleich Simulationsergebnis Risse – Versuchskörper	51
3.1	Entstehung einer Stoßfront nach COOPER [21]	54
3.2	HUGONIOT-Kurve eines Verdichtungsstoßes nach BARTLMÄ [8]	56
3.3	Detonationsvorgang nach der Modellvorstellung von CHAPMAN [16] und JOUGUET [54]	57
3.4	ZDN-Modell zur Beschreibung des Detonationsvorgangs	58
4.1	Grenzsieblinien der DIN 1045-2 für Zuschläge mit einem Größtkorn von 16 mm	64
4.2	Betonprisma unter einaxialem Druck – Volumendilatation	65
4.3	Rissentwicklung innerhalb einer Druckprobe	66
4.4	Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton bei Druckbeanspruchung	66
4.5	Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton bei Zugbeanspruchung	67
4.6	Genzlinie der zweiaxialen Festigkeit und Grenzfläche der dreiaxialen Festigkeit nach [14] in [72]	68
4.7	Betonfestigkeit bei dreiaxialer Druckbeanspruchung bei variierenden Verhältnissen von axialer Spannung (A) zur Umfangsspannung (R)	69
4.8	Versuchsergebnisse entlang des Zug- und Druckmeridians	70
4.9	Versagensfläche im Deviatorschnitt	71
4.10	Triaxiale Testeinrichtung des IfMB	72
4.11	Statische p-V-Daten aus Versuchen am IfMB [55]	73
4.12	Einfluss der Dehnrates auf die Zugfestigkeit von Beton (SCHULER-&HANSON [83])	75
4.13	Einfluss der Dehnrates auf die Druckfestigkeit von Beton nach BISCHOFF [12]	76
4.14	Ursachen der Festigkeitssteigerung nach CURBACH [22]	77
4.15	Änderung der Wellenfront beim Eintritt in den Versuchskörper und zunehmender Wellenlaufzeit	79
4.16	Änderung der Wellenform mit zunehmender Entfernung von der Oberseite	79

5.1	oberer Bildteil: (links) Versuchskörper (1,0 x 1,0 x 0,5 m) mit kegelförmiger Ladung (3325 g, $\varnothing = 20$ cm); (rechts) Versuchskörper 200 μ s nach der Zündung; unterer Bildteil: (links) fortschreitende Zerstörung nach 750 μ s; (rechts) Sprengergebnis	82
5.2	Messelemente und Messtechniken	84
5.3	Versuchsaufbau	85
5.4	Kapselungen der Manganinaufnehmer	88
5.5	Positionsgitter mit gekapselten Messelementen; (links) vor dem Einbau in die Schalung, (rechts) nach Einbau	88
5.6	Positionsgitter mit zusätzlich angebrachten Querstäben	89
5.7	Stahlstangen und Ziehen der Stangen	90
5.8	Aufbau der Sprengladung	91
5.9	Elementanordnung	92
5.10	Schematische Darstellung der Änderung der Wellenform mit zunehmender Entfernung von der Stelle des Lasteintrags; (links) kegelförmige Ladung und (rechts) zylindrische Ladung	94
5.11	Zusammenhänge bei Triggerung der Messkette	95
5.12	Vorversuche zur Triggerung und ideales Triggersignal	97
5.13	Zündertest: (links) Testaufbau; (rechts) Schnitt in der Symmetrieachse	98
5.14	Triggersignal und Dynasen-Gate, Detail	99
5.15	Gesamtverlauf Dynasen-Gate und extremale Signalankunftszeiten .	100
5.16	Ergebnisse der Zündertests – Detaildarstellung	100
5.17	Funktionsschaltbild eines Transientenrekorders	102
5.18	Prinzip der Datenspeicherung eines Transientenrekorders	103
5.19	(oben) Schnitt durch einen Kohle-Masse-Widerstand (KMW); (unten) gekapselter Widerstand	105
5.20	Spannungsteilerschaltung zur Messung der Widerstandsänderung .	106
5.21	Manganin-Folienaufnehmer – vorbereitet für den Einsatz senkrecht zur Belastungsrichtung	108
5.22	Kapselung eines DMS	109
5.23	ALTS – (links) schematischer Aufbau; (rechts) Sensor mit Fläche 10 x 10 mm auf Sensorträger aus PVC	111
5.24	ALTS – Funktionsprinzip	112
5.25	Signalverlauf bei einem Luftstrom	114
5.26	Signalverlauf in Wasser	114
5.27	ALTS-Sensor mit Goldmänder	116
5.28	Vorversuche-Fortech HTS	117
5.29	Vorversuche IfMB	118
5.30	Sensor Bauart A in Kunststoffgehäuse; (links) befestigt an Positionsgitter, (rechts) Detail	119
5.31	Gehäuse der ALTS (Bauart B), Schnittdarstellung	120

5.32	Dreiteiliges Gehäuse der ALTS (Bauart B) vor dem Zusammenbau .	121
5.33	Auslieferungszustand Sensor B und Problematik des Anschlusses .	122
5.34	ALTS nach Öffnen des Gehäuses	123
5.35	Sensor Bauart C mit abgenommenem Gehäusedeckel	124
5.36	Auswertung des Signalverlaufs eines KMW im unteren Druckbereich nach HOLLENBERG [49]	126
5.37	Auswertung des Signalverlaufs eines KMW im oberen Druckbereich nach HOLLENBERG [49]	127
5.38	Typischer Signalverlauf eines Manganin-Aufnehmers	128
5.39	Typischer Signalverlauf eines DMS	129
5.40	Weg-Zeit-Beziehungen unterschiedlicher Autoren und Auswerteverfahren	131
5.41	Signalankunft bei unterschiedlichen Kapselungsverhältnissen	132
5.42	Eindringverhalten der Stoßwelle in axialer Richtung	133
5.43	Druck-Zeit-Verläufe von KMW mit unterschiedlichen Abständen von der Belastungsachse	134
5.44	Versagenszustand – Vergleichsspannung	136
5.45	Weg-Zeit- und Geschwindigkeit-Zeit-Beziehung	137
5.46	(links) Nichtlineares Materialverhalten; (rechts) Wellengeschwindigkeit innerhalb des Versuchskörpers: t=0:Eintritt der Welle an der Oberseite; t=153 μ s: Ankunft der Welle an der Unterseite	138
5.47	Identifikation des Geschwindigkeitsprofils der Stoßwelle am Sägeschnitt eines Versuchskörpers	139
5.48	HUGONIOT-Daten unterschiedlicher Versuche am IfMB	140
5.49	HUGONIOT-Daten aus Dehnungsmessungen	141
5.50	HUGONIOT-Daten unterschiedlicher Autoren	142
5.51	Energie entlang 0K-Isotherme von Beton nach Berechnungen von OCKERT [69]	144
5.52	Energiedifferenz gegenüber der 0K-Isotherme von Beton, experimentell ermittelt	144
5.53	Signalverlauf der ALTS, Bauart C	145
5.54	Typisches lokales Materialversagen bei Stoßbelastung	147
5.55	Schnittbild des Versuchskörpers nach Sprengung mit 640 g - Ladung	148
5.56	Vollständig zerstörter Versuchskörpers nach Sprengung mit 3325 g - Ladung	148
5.57	Momentaufnahmen der Zerstörung bei Sprengung mit 3325 g - Ladung; Aufnahmegeschwindigkeit 4000 Bilder/sec	149
5.58	Rissmuster eines Versuchskörpers (640 g Sprengstoff)	150
5.59	(links) Gerissene Leitlackstreifen nach dem Versuch; (rechts) Spannungsteilerschaltung	152
5.60	Leitlackstreifen, Versuch Nr. 9	154
5.61	Kameraeinstellungen	155

5.62	Prinzipielles Vorgehen bei der Auswertung der Einzelbilder	156
6.1	Ausblick	160
A.1	Betonrezeptur aller Versuchskörper	169
A.2	Bestimmung des E-Modul, am Bsp. der Versuchskörper 3, 4	170
B.1	Verwendete Kalibrierkurve für KMW nach [69]	171
B.2	Grobkalibrierung mit IR-Strahler	172
B.3	Grobkalibrierung Nr. 2 mit IR-Strahler	172
B.4	Zeitkonstante des Systems, ermittelt mit CO_2 -Laser	173
B.5	Pulsstruktur des CO_2 -Lasers	173
B.6	Kontrolle der Zeitkonstanten nach Zusammenbau mit Blitzlicht	174
C.1	KMW 201-205, oberer Druckbereich	177
C.2	KMW 206-208, unterer Druckbereich	177
C.3	KMW 201, Einbautiefe 0 mm	178
C.4	KMW 202, Einbautiefe 23,5 mm	178
C.5	KMW 203, Einbautiefe 31,5 mm	179
C.6	KMW 204, Einbautiefe 43,5 mm	179
C.7	KMW 205, Einbautiefe 52,5 mm	180
C.8	KMW 206, Einbautiefe 122,5 mm	180
C.9	KMW 207, Einbautiefe 161,5 mm	181
C.10	KMW 208, Einbautiefe 204,5 mm	181
C.11	KMW 301, 303, 305 – oberer Druckbereich	183
C.12	KMW 302, 304, 306, 308 – unterer Druckbereich	183
C.13	KMW 301, Einbautiefe 0 mm	184
C.14	KMW 302, Einbautiefe 17 mm	184
C.15	KMW 303, Einbautiefe 36 mm	185
C.16	KMW 304, Einbautiefe 57 mm	185
C.17	KMW 305, Einbautiefe 77 mm	186
C.18	KMW 306, Einbautiefe 99,7 mm	186
C.19	KMW 308, Einbautiefe 99 mm; $r_a = 150$ mm	187
C.20	KMW 401-405 – oberer Druckbereich	189
C.21	KMW 406-408 – unterer Druckbereich	189
C.22	KMW 401, Einbautiefe 0 mm	190
C.23	KMW 402, Einbautiefe 26,5 mm	190
C.24	KMW 403, Einbautiefe 47,5 mm	191
C.25	KMW 404, Einbautiefe 67 mm	191
C.26	KMW 405, Einbautiefe 87 mm	192
C.27	KMW 406, Einbautiefe 111,5 mm	192
C.28	KMW 407, Einbautiefe 109 mm; $r_i = 0$ mm	193
C.29	KMW 408, Einbautiefe 109 mm; $r_a = 150$ mm	193
C.30	KMW 501-505 – oberer Druckbereich	195

C.31	KMW 506-512 – unterer Druckbereich	195
C.32	KMW 501, Einbautiefe 0 mm	196
C.33	KMW 502, Einbautiefe 9 mm	196
C.34	KMW 503, Einbautiefe 27 mm	197
C.35	KMW 504, Einbautiefe 49 mm	197
C.36	KMW 505, Einbautiefe 69 mm	198
C.37	KMW 506, Einbautiefe 111 mm	198
C.38	KMW 507, Einbautiefe 135 mm	199
C.39	KMW 508, Einbautiefe 173 mm	199
C.40	KMW 509, Einbautiefe 209 mm	200
C.41	KMW 510, Einbautiefe 303 mm	200
C.42	KMW 511, Einbautiefe 398 mm	201
C.43	KMW 512, Einbautiefe 492 mm	201
C.44	KMW Versuch Nr. 6, oberer Druckbereich; KMW 601-605	203
C.45	KMW Versuch Nr. 6, unterer Druckbereich; KMW 606-612	203
C.46	KMW 601, Einbautiefe 0 mm	204
C.47	KMW 602, Einbautiefe 19 mm	204
C.48	KMW 603, Einbautiefe 37 mm	205
C.49	KMW 604, Einbautiefe 58 mm	205
C.50	KMW 605, Einbautiefe 79 mm	206
C.51	KMW 606, Einbautiefe 111 mm	206
C.52	KMW 607, Einbautiefe 156 mm	207
C.53	KMW 608, Einbautiefe 232 mm	207
C.54	KMW 609, Einbautiefe 272 mm	208
C.55	KMW 610, Einbautiefe 345 mm	208
C.56	KMW 611, Einbautiefe 446 mm	209
C.57	KMW 612, Einbautiefe 493 mm	209
C.58	KMW Versuch Nr. 7, KMW 701-708	211
C.59	KMW 701, Einbautiefe 0 mm	211
C.60	KMW 702, Einbautiefe 9 mm	212
C.61	KMW 703, Einbautiefe 29 mm	212
C.62	KMW 704, Einbautiefe 49 mm	213
C.63	KMW 705, Einbautiefe 69 mm	213
C.64	KMW 706, Einbautiefe 77 mm	214
C.65	KMW 707, Einbautiefe 97 mm	214
C.66	KMW 708, Einbautiefe 248 mm	215
C.67	KMW 709, Einbautiefe 491 mm	215
C.68	KMW 710, Einbau R 150 mm	216
C.69	KMW 711, Einbau R 300 mm	216
C.70	KMW 712, Einbau R 450 mm	217
C.71	KMW Versuch Nr. 8, oberer Druckbereich; KMW 801-804	219
C.72	KMW 801, Einbautiefe 0 mm	219

C.73	KMW 802, Einbautiefe 19 mm	220
C.74	KMW 803, Einbautiefe 41 mm	220
C.75	KMW 804, Einbautiefe 58 mm	221
C.76	KMW 805, Einbautiefe 78 mm	221
C.77	KMW 806, Einbautiefe 96 mm	222
C.78	KMW 807, Einbautiefe 108 mm	222
C.79	KMW 808, Einbautiefe 266 mm	223
C.80	KMW 809, Einbautiefe 487 mm	223
C.81	KMW 810, Einbau R 150 mm	224
C.82	KMW 811, Einbau R 300 mm	224
C.83	KMW 812, Einbau R 450 mm	225
C.84	KMW Versuch Nr. 9, KMW 901-905	227
C.85	KMW 901, Einbautiefe 0 mm	227
C.86	KMW 902, Einbautiefe 17 mm	228
C.87	KMW 903, Einbautiefe 39 mm	228
C.88	KMW 904, Einbautiefe 60 mm	229
C.89	KMW 905, Einbautiefe 80 mm	229
C.90	KMW 906, Einbau R 100 mm	230
C.91	KMW 907, Einbau R 150 mm	230
C.92	KMW 908, Einbau R 200 mm	231
C.93	KMW Versuch Nr. 10, KMW 1001-1005	233
C.94	KMW 1001, Einbautiefe 0 mm	233
C.95	KMW 1002, Einbautiefe 30 mm	234
C.96	KMW 1003, Einbautiefe 51 mm	234
C.97	KMW 1004, Einbautiefe 70 mm	235
C.98	KMW 1005, Einbautiefe 94 mm	235
C.99	KMW Versuch Nr. 10, radiale KMW 1006-1008	236
C.100	KMW 1006, Einbau R 150 mm	236
C.101	KMW 1007, Einbau R 200 mm	237
C.102	KMW 1008, Einbau R 250 mm	237
C.103	KMW Versuch Nr. 11, KMW 1101-1105 und 1108	239
C.104	KMW 1101, Einbautiefe 0 mm	239
C.105	KMW 1102, Einbautiefe 29 mm	240
C.106	KMW 1103, Einbautiefe 50 mm	240
C.107	KMW 1104, Einbautiefe 69 mm	241
C.108	KMW 1105, Einbautiefe 90 mm	241
C.109	KMW 1106, Einbau R 150 mm	242
C.110	KMW 1107, Einbau R 250 mm	242
C.111	KMW 1108, Einbautiefe 500 mm	243
C.112	Versuch Nr. 2, MA 201-208	245
C.113	MA 201-axial, Einbautiefe 23,5 mm	245
C.114	MA 202-axial, Einbautiefe 31,5 mm	246

C.115	MA 203-axial, Einbautiefe 43,5 mm	246
C.116	MA 204-axial, Einbautiefe 52,5 mm	247
C.117	MA 205-axial, Einbautiefe 81,5 mm	247
C.118	MA 206-radial, Einbautiefe 23,5 mm	248
C.119	MA 207-radial, Einbautiefe 43,5 mm	248
C.120	MA 208-axial, Einbautiefe 81,5 mm	249
C.121	Versuch Nr. 3, MA 301-308	251
C.122	MA 301-axial, Einbautiefe 17 mm	251
C.123	MA 302-axial, Einbautiefe 36 mm	252
C.124	MA 303-axial, Einbautiefe 57 mm	252
C.125	MA 304-axial, Einbautiefe 77 mm	253
C.126	MA 305-axial-neu, Einbautiefe 17 mm	253
C.127	MA 306-axial-neu, Einbautiefe 36 mm	254
C.128	MA 307-radial, Einbautiefe 57 mm	254
C.129	MA 308-radial, Einbautiefe 77 mm	255
C.130	Versuch Nr. 4, MA 401-408	257
C.131	MA 401-axial, Einbautiefe 26,5 mm	257
C.132	MA 402-axial, Einbautiefe 47,5 mm	258
C.133	MA 403-axial, Einbautiefe 67 mm	258
C.134	MA 404-axial, Einbautiefe 87 mm	259
C.135	MA 405-axial-neu, Einbautiefe 26,5 mm	259
C.136	MA 406-axial-neu, Einbautiefe 47,5 mm	260
C.137	MA 407-radial, Einbautiefe 67 mm	260
C.138	MA 408-radial, Einbautiefe 87 mm	261
C.139	Versuch Nr. 2, DMS 201-204	263
C.140	Versuch Nr. 2, DMS 205-206	263
C.141	DMS 201, Einbautiefe 31,5 mm	264
C.142	DMS 202, Einbautiefe 52,5 mm	264
C.143	DMS 203, Einbautiefe 122,5 mm	265
C.144	DMS 204, Einbautiefe 161,5 mm	265
C.145	DMS 205, Einbautiefe 204,5 mm	266
C.146	DMS 206, Einbautiefe 204,5 mm	266
C.147	DMS 205 und 206 Vergleich, Einbautiefe 204,5 mm	267
C.148	Versuch Nr. 3, DMS 301-305	269
C.149	DMS 301, Einbautiefe 17 mm	269
C.150	DMS 302, Einbautiefe 36 mm	270
C.151	DMS 303, Einbautiefe 57 mm	270
C.152	DMS 304, Einbautiefe 77 mm	271
C.153	DMS 305, Einbautiefe 500 mm	271
C.154	Versuch Nr. 4, DMS 401-404	273
C.155	DMS 401, Einbautiefe 26,5 mm	273
C.156	DMS 402, Einbautiefe 46,5 mm	274

C.157	DMS 403, Einbautiefe 67 mm	274
C.158	DMS 404, Einbautiefe 87 mm	275
C.159	DMS 405, Einbautiefe 500 mm	275
C.160	Versuch Nr. 5, DMS 501-505	277
C.161	DMS 501, Einbau R 150 mm	277
C.162	DMS 502, Einbau R 250 mm	278
C.163	DMS 503, Einbau R 300 mm	278
C.164	DMS 504, Einbau R 450 mm	279
C.165	Versuch Nr. 5, DMS 701-704: auf Seitenfläche	281
C.166	Versuch Nr. 8, DMS 801-504; auf Seitenfläche	281
C.167	Versuch Nr. 5, ALTS-B 51-54	283
C.168	ALTS-B 51, Einbautiefe 32 mm	283
C.169	ALTS-B 52, Einbautiefe 50 mm	284
C.170	ALTS-B 53, Einbautiefe 70 mm	284
C.171	ALTS-B 54, Einbautiefe 105 mm	285
C.172	Versuch Nr. 6, ALTS-B 61-63	287
C.173	ALTS-B 61, Einbautiefe 32 mm	287
C.174	ALTS-B 62, Einbautiefe 32 mm	288
C.175	ALTS-B 63, Einbautiefe 49 mm	288
C.176	Versuch Nr. 7, ALTS-B 71-74	289
C.177	ALTS-B 71, Einbautiefe 32 mm	289
C.178	ALTS-B 72, Einbautiefe 49 mm	290
C.179	ALTS-B 73, Einbautiefe 32 mm	290
C.180	Versuch Nr. 8, ALTS-B 81-84	291
C.181	ALTS-B 81, Einbautiefe 22 mm	291
C.182	ALTS-B 82, Einbautiefe 22 mm	292
C.183	ALTS-B 83, Einbautiefe 42 mm	292
C.184	Versuch Nr. 9, ALTS-B 91-94	293
C.185	ALTS-B 91, Einbautiefe 21 mm	293
C.186	ALTS-B 92, Einbautiefe 40 mm	294
C.187	ALTS-B 93, Einbautiefe 61 mm	294
C.188	ALTS-B 94, Einbautiefe 81 mm	295
C.189	Versuch Nr. 10, ALTS-B 101-104	297
C.190	ALTS-B 101, Einbautiefe 21 mm	297
C.191	ALTS-B 102, Einbautiefe 40 mm	298
C.192	ALTS-B 103, Einbautiefe 61 mm	298
C.193	ALTS-B 104, Einbautiefe 81 mm	299
C.194	Versuch Nr. 11, ALTS-B 111-114	301
C.195	ALTS-B 111, Einbautiefe 49 mm	301
C.196	ALTS-B 112, Einbautiefe 69 mm	302
C.197	ALTS-B 113, Einbautiefe 89 mm	302
C.198	ALTS-B 114, Einbautiefe 109 mm	303

C.199	Versuch Nr. C, ALTS C1-C3	305
C.200	ALTS C1, Einbautiefe 20 mm	305
C.201	ALTS C2, Einbautiefe 45 mm	306
C.202	ALTS C3, Einbautiefe 60 mm	306
D.1	ALTS-Gehäuse Bauform C	307
D.2	Bewehrungsplan und Schneideskizze	308
D.3	Kapselungen DMS	309
D.4	Kapselungen Manganin (radial)	309
D.5	Kapselungen Manganin (axial); (links) alte Bauform, (rechts) neue Form	310
D.6	Konstruktionsplan-Messgitter	311
D.7	Anordnung der Messelemente-Prinzip	312

Tabellenverzeichnis

1.1	Schnell ablaufende Vorgänge	2
2.1	Formulierungsmöglichkeiten einer Erhaltungsgleichung	21
3.1	Parameter in der JWL-EOS nach [23]	59
5.1	Messelemente	87
5.2	Ladungsgrößen	93
5.3	Physikalische Eigenschaften des Schichtsystems (ZEUNER [96], KNAUSS [56])	115
5.4	Auswertung von Versuch Nr. 2	130
5.5	Wellenausbreitung entlang der Oberfläche	135
5.6	Ergebnisse der Wärmestrommessungen	143
5.7	ALTS C, Berechnungen	145
A.1	Betonkennwerte der Versuchskörper	170
C.1	Übersicht der eingebauten Messaufnehmer	175

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Ein Lichtblitz, Rauchschwaden und ein lauter Knall sind die Eindrücke, die man üblicherweise mit der Explosion von Sprengstoff in Zusammenhang bringt. Es gestaltet sich jedoch schwierig, diese Bündelung an Eindrücken zu ordnen. Unsere Sinnesorgane sind in ihrer Wahrnehmungsfähigkeit begrenzt. So sind reiz-aufnehmende Sinneszellen nach Einwirkung von Reizen für kurze Zeit nicht refraktär, also nicht erregbar. Deshalb können schnell aufeinander folgende Reize nur bedingt verarbeitet werden. Auch bei der Weiterleitung eines Reizes begrenzt die Refraktärzeit das zeitliche Auflösungsvermögen. Aus den aufgeführten Gründen lässt es unsere Wahrnehmung nicht zu, Vorgänge ab einer bestimmten Geschwindigkeit zeitlich aufzulösen und miteinander in Beziehung zu setzen.

Tabelle 1.1 enthält schnell ablaufende Vorgänge, unter anderem aus unserer täglichen Umgebung. Wir empfinden sicher alle diese Vorgänge als schnell, können aber keine Auskunft darüber geben, welcher schneller als der andere abläuft und wie schnell der Vorgang absolut gesehen ist. Schnell ablaufende Vorgänge können wir nicht objektiv einem Zeitmaßstab zuordnen. Noch gravierender wird dies bei der Betrachtung hochdynamischer Vorgänge in der Kurzzeitdynamik, deren Zeitdauer nur einen Bruchteil der in Tabelle 1.1 genannten Abläufe beträgt.

Für die Untersuchung von Stoßwellen und den damit einhergehenden physikalischen Abläufen innerhalb des betrachteten Werkstoffs wird ein geeignetes Hilfsmittel benötigt, um die Veränderungen einem Zeitmaßstab zuordnen zu können. Bei Betonkörpern unter Explosionsbelastung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden, erfolgt dies durch Auswahl einer Messtechnik, bei der die Komponenten der Messkette genau aufeinander abgestimmt sind. Nur damit ist es möglich, die Veränderungen im zur Verfügung stehenden Zeitfenster direkt zu erfassen und miteinander in Beziehung zu setzen.

Tabelle 1.1: Schnell ablaufende Vorgänge

Vorgang	Zeit [s]
Taktzeit für einen Prozessor (3 GHz)	$0,3 \cdot 10^{-9}$
Blitzdauer eines Hochgeschwindigkeits-Stroboskops	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Wellenlaufzeit im Versuchskörper	$200 \cdot 10^{-6}$
Hauptentladungszeit eines Gewitterblitzes	$400 \cdot 10^{-6}$
Blitzdauer (Foto)	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Flügelschlag einer Fliege	$3,0 \cdot 10^{-3}$
Schlagdauer eines Bohrhammers	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Wimpernschlag	$100 \cdot 10^{-3}$

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Wird Sprengstoff in Form einer aufgelegten Ladung durch Zündung zur Detonation gebracht, so resultiert aus der Explosion des Sprengstoffs eine direkte Belastung des jeweiligen Versuchskörpers in Form einer Stoßwelle. Diese Art der Belastung wird als Kontaktdetonation bezeichnet.

Die vorliegende Arbeit untersucht das Verhalten von Versuchskörpern aus Beton, die durch eine Kontaktladung mit spezieller Geometrie belastet werden. Durch diese Geometrie erfolgt die Belastung der Versuchskörper in Form einer ebenen Stoßwelle (Plane-Wave).

Kennzeichnend für die Belastung durch die Sprengladung sind lokal extrem hohe Drücke, verbunden mit einer Zerstörung der Porenstruktur des Betons, was wiederum kurzfristig zu einer Änderung der thermischen Verhältnisse führt.

Ziel der vorgestellten Untersuchungen ist es das Materialverhalten des Betons unter dieser Belastung zu beschreiben.

Vorrangiges Interesse haben Stoßwellen und die dadurch hervorgerufenen Veränderungen im Beton. Hierzu werden die physikalischen Vorgänge innerhalb der Versuchskörper mit Hilfe von Messtechnik direkt erfasst. Die besondere Herausforderung liegt im extrem kleinen Zeitfenster, in dem diese Veränderungen stattfinden. Hierfür wird eine räumlich und zeitlich hoch auflösende Messtechnik eingesetzt, die es erlaubt, Veränderungen im Bereich weniger Mikrosekunden aufzuzeichnen. Teile dieser Messtechnik wurden im Rahmen der Arbeit entwickelt.

Grundlage dieser Arbeit bilden sprengtechnische Untersuchungen, die im Zeitraum von April 2004 bis Oktober 2006 am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal-Berghausen durchgeführt wurden.

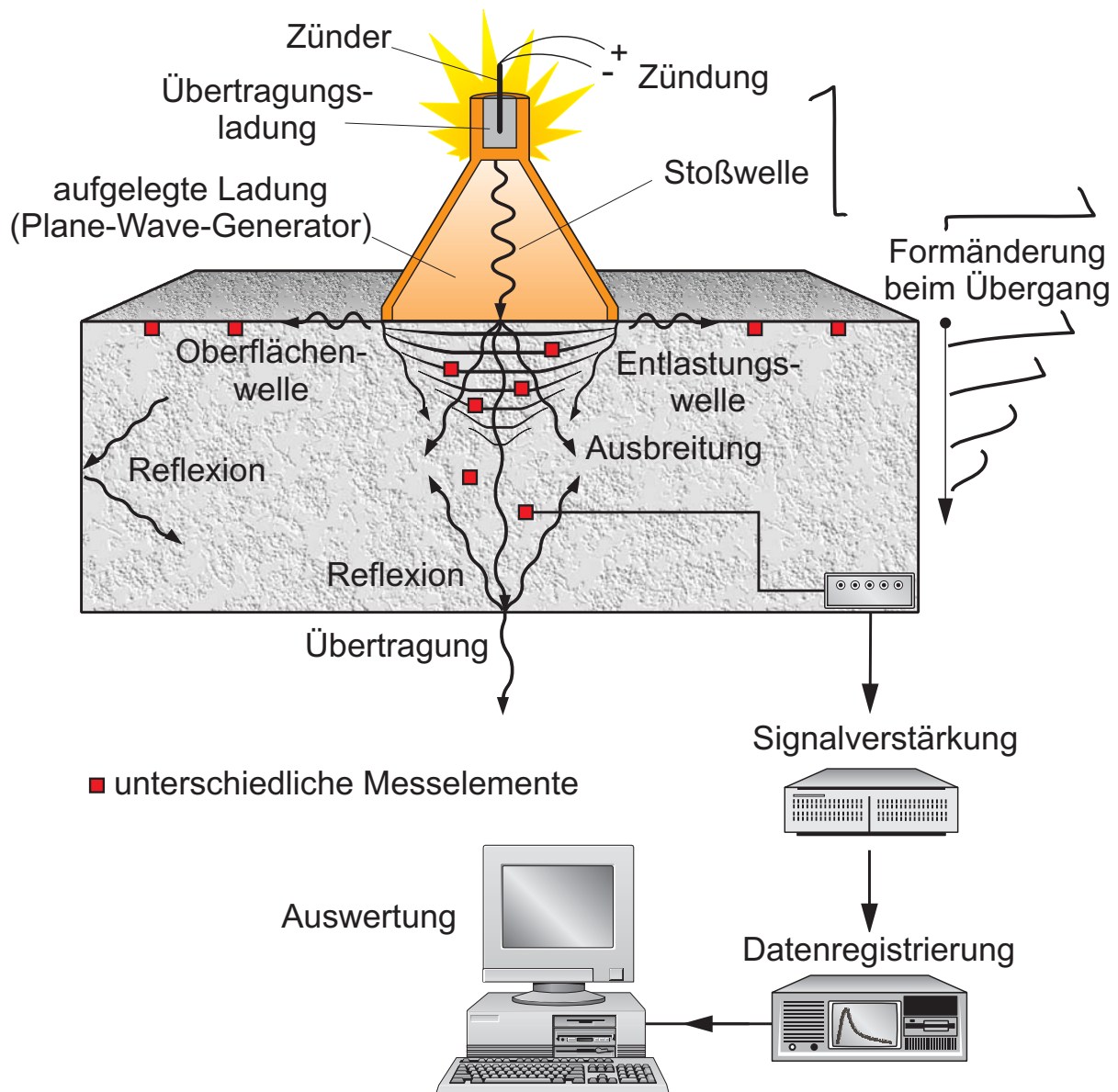


Bild 1.1: Versuchsablauf

Um die Fülle unterschiedlicher Effekte, die im Zusammenhang mit den hier vorgestellten Untersuchungen auftreten und um die Ergebnisse der Messungen zutreffend interpretieren zu können, werden in den Kapiteln 2, 3 und 4 zunächst Grundlagen erläutert. In Kapitel 5 werden die durchgeführten Versuchsreihen ausführlich vorgestellt und deren Versuchstechnik dargelegt.

Anhand der Darstellung in Bild 1.1 werden im Folgenden die wesentlichen Stadien des Versuchsablaufs und die dabei eintretenden Ereignisse beschrieben, sowie als Orientierungshilfe Verweise zu den vertiefenden Abschnitten innerhalb dieser Arbeit gegeben.

Ein elektrischer Spannungsimpuls aktiviert den Zünder, der seinerseits im Anschluss eine Übertragungsladung (Sekundärsprengstoff) aktiviert. Die Übertragungsladung setzt durch einen Verdichtungsstoß den eigentlichen Detonationsvorgang in Gang, der sich in Form einer Stoßwelle durch den Sprengstoff fort-

bewegt. Kapitel 3 beschreibt die Entstehung und Ausbreitung der Stoßwelle innerhalb des Sprengstoffs sowie die grundlegenden Detonationstheorien.

Trifft die Detonationswelle auf die Oberfläche des Versuchskörpers, wird sie dort ebenfalls als Stoßwelle in den Versuchskörper eingetragen. Die Beschreibung von Stoßwellen kann mathematisch mit Hilfe von Zustandsgleichungen erfolgen und wird in ihren Grundlagen in Kapitel 2, Abschnitt 2.1.3 ausführlich erläutert. Unmittelbar nach dem Übergang in den Versuchskörper breitet sich die Stoßwelle räumlich aus. Dadurch breiten sich die Wellenanteile mit einer, gegenüber der ursprünglich vorhandenen, stark reduzierten Intensität im Versuchskörper aus. Sowohl an den Begrenzungsflächen des Versuchskörpers als auch an den Grenzflächen unterschiedlicher Materialien innerhalb des Versuchskörpers (Bewehrung, Messelemente) kommt es zu Reflexion und Übertragung unterschiedlicher Wellenanteile. Kapitel 2 enthält in Abschnitt 2.1 Einzelheiten zur Ausbreitung von Wellen und gibt eine Übersicht der unterschiedlichen Wellenarten, die sich im unendlich ausgedehnten Halbraum ausbreiten. Die Möglichkeit, diese messtechnisch zu erfassen, wird in Kapitel 5, Abschnitt 5.5.2 beschrieben.

Mit dem Belastungseintrag durch die Stoßwelle sind extrem hohe mechanische Beanspruchungen innerhalb des Versuchskörpers verbunden. Gestützt auf eine spezielle Messtechnik werden in Abschnitt 5.5.2 Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten der Druckwelle und zur Form der Versagensfläche von Beton vorgestellt. In Abschnitt 5.5.3 werden HUGONIOT-Daten für den Beton einerseits aus Messungen des volumetrischen Drucks und andererseits aus gemessenen Materialstauchungen ermittelt. Die lokal hohen Drücke bis 20000 MPa führen zu einer Zerstörung der Porenstruktur des Betons. Dieser Effekt ist verantwortlich für das nichtlineare Kompressionsverhalten des Betons. Im Verlauf der Ausbreitung der Belastungswelle kommt es zu einer Abnahme der Spannungsamplitude und zu einer Änderung der Wellenform. In Kapitel 4, Abschnitt 4.3 werden allgemeine Aussagen zum Werkstoffverhalten aus Kapitel 2 für den Beton formuliert und grundlegende Materialeigenschaften erläutert. Kapitel 5 enthält messtechnische Untersuchungen zum Materialverhalten.

Während des Kompressionsvorgangs wird plastische Arbeit am Beton verrichtet, was zu einer Änderung der inneren Energie führt. Diese steht maßgeblich im Zusammenhang mit der Änderung der thermischen Verhältnisse und äußert sich in einer Temperaturerhöhung. Die damit in Zusammenhang stehenden thermodynamischen Grundlagen werden in Kapitel 2, Abschnitt 2.2 erläutert. Eine experimentelle Methode zur Erfassung dieser Vorgänge basierend auf der Messung des Wärmestroms wird in Kapitel 5, Abschnitt 5.4 vorgestellt. Abhängig von der Größe der Sprengladung ergeben sich unterschiedliche Schädigungsgrade der Versuchskörper. Ergebnisse werden in Kapitel 5, Abschnitt 5.6 vorgestellt. Ergänzend zur messtechnischen Erfassung werden in Abschnitt 5.7 Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera ausgewertet, die eine Aussage über die Rissgeschwindigkeit ermöglichen.

In einer geeigneten Simulation lassen sich diese Vorgänge numerisch erfassen. Für die Simulation von hochdynamischen Kurzzeitvorgängen werden in der Regel Hydrocodes eingesetzt. Eigene Simulationen der Sprengversuche wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Deshalb werden nur die Grundzüge einer Analysemöglichkeit mit Rechenprogrammen skizziert (Kapitel 2). Kapitel 6 gibt Anregungen für weiterführende Untersuchungen mit der vorgestellten Versuchsmethode und gibt Hinweise für die Weiterentwicklung der eingesetzten Messtechnik. Alternativen zur Erfassung der thermischen Verhältnisse mit faseroptischen Methoden werden genannt.

2 Grundlagen des dynamischen Materialverhaltens

2.1 Lineare und nichtlineare Wellenausbreitung

Wird ein Körper einer impulsartigen Belastung ausgesetzt, so entstehen in seinem Inneren Spannungswellen, die kinetische und potentielle Energie transportieren. Bei einem Festkörper kann dies durch unterschiedliche Arten von Wellen geschehen. Bild 2.1 zeigt die wesentlichen Wellenanteile bei lokaler Stoßbelastung eines halbumendlich ausgedehnten Festkörpers.

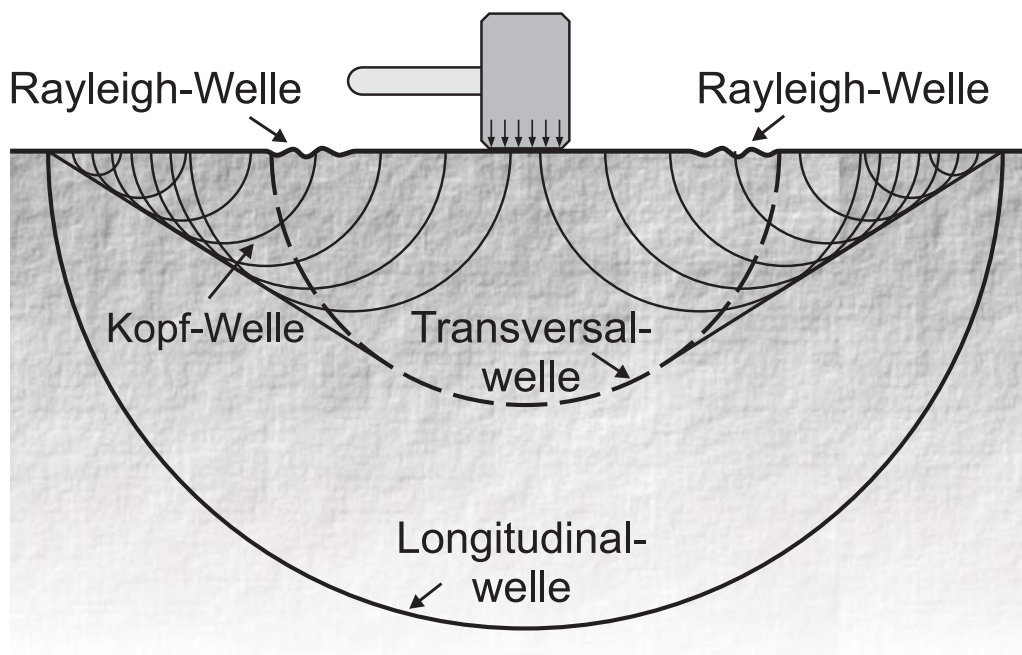


Bild 2.1: Wellenanteile bei Stoßbelastung eines Festkörpers nach MEYERS [64]

Wellen sind zeitperiodische Vorgänge, die sich räumlich ausbreiten. Allgemein werden Wellenausbreitungsvorgänge mathematisch durch die Wellengleichung beschrieben. Reale Wellenvorgänge sind zeitlich und räumlich begrenzt. Im Zusammenhang mit endlichen Wellenzügen findet sich häufig der Begriff von „Wel-

lenpaketen" [68]. Wird an einem bestimmten Ort in einem Medium durch die Abweichung eines physikalischen Zustandes von seiner Gleichgewichtslage, zeitlich verzögert an einem benachbarten Ort über einen entsprechenden Koppungsmechanismus eine Zustandsänderung hervorgerufen, so kann es zur Ausbreitung von Wellen kommen. Häufig wird die Abweichung aus der Gleichgewichtslage auch als Störung bezeichnet. Solche Störungen können beispielsweise Auslenkungen von Massepunkten in einem elastischen Medium sein. Im Falle von Kompressionswellen sind dies kurzzeitige Druckschwankungen, die sich dann als Wellenfront fortpflanzen.

Die Wellenausbreitung ist nicht mit einer Fortbewegung von Teilchen innerhalb des betrachteten Mediums verbunden, sondern stellt die Ausbreitung eines Bewegungszustandes dar, der mit dem Transport von Energie verbunden ist. Bei einer mechanischen Welle wird durch Schwingung kleinster Materieteilchen um ihre Ruhelage die Energie an die benachbarten Teilchen weitergegeben.

Wellen können in unterschiedlichen Arten und Formen auftreten. Die Schwingungsrichtung einer Welle kann quer oder längs zur Ausbreitungsrichtung erfolgen. Bei Transversalwellen erfolgt die Ausbreitung senkrecht zur Bewegung der schwingenden Größe und bei Longitudinalwellen erfolgt die Ausbreitung in Schwingungsrichtung. Beschränkt man sich auf mechanische Wellen in Festkörpern, so kann es sich hierbei um Oberflächenwellen oder räumliche Wellen handeln. Je nach den Eigenschaften des betrachteten Materials, der Belastungsart und der Spannungsamplitude kann die Ausbreitung als elastische, plastische oder in Form einer Stoßwelle erfolgen. Darüber hinaus ist die Geometrie des Körpers, in dem sich eine Welle ausbreitet, von Bedeutung (HIERMAIER [46]). Eine elastische Welle breitet sich beispielsweise in einem unendlich ausgedehnten Körper anders aus als in einem stabförmigen.

Maßgebende Faktoren im Zusammenhang mit der Wellenausbreitung sind

- die Materialeigenschaften und die Geometrie des Mediums, in dem sich die Welle fortbewegt sowie
- die Art der Belastung, mit der die Wellenausbreitung ausgelöst wird.

Um Materialien unter kurzzeitdynamischen Belastungen untersuchen zu können, werden Gleichungen zur Beschreibung der Ausbreitung der unterschiedlichen Wellenarten benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich alle weiteren Darstellungen auf (mechanische) elastische, elastisch-plastische und Stoßwellen in Festkörpern.

2.1.1 Elastische Wellenausbreitung

Betrachtet man die Ausbreitung einer Welle auf atomarer Ebene, so lässt sich die Ausbreitung als Folge von Stoßvorgängen benachbarter Atome innerhalb der Gitterstruktur des betrachteten Materials auffassen. Dabei werden die Ato-

me durch den Stoßvorgang beschleunigt und übertragen einen Teil ihres Impulses an ein benachbartes Atom. Dabei bestimmen Masse, mittlerer Abstand der Atome und Bindungskräfte die Fortpflanzung der Störung (MEYERS [64]).

Elastische Wellen in deformierbaren Materialien werden durch die elastischen Eigenschaften des Mediums bestimmt. Unter der Annahme eines eindeutigen funktionalen Zusammenhangs zwischen Spannung σ und Verzerrung ε (HOOKESches Gesetz) lässt sich aus den Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls eine mathematische Beschreibung der Ausbreitung einer Schwingung in einem ein-dimensionalen Kontinuum angeben.

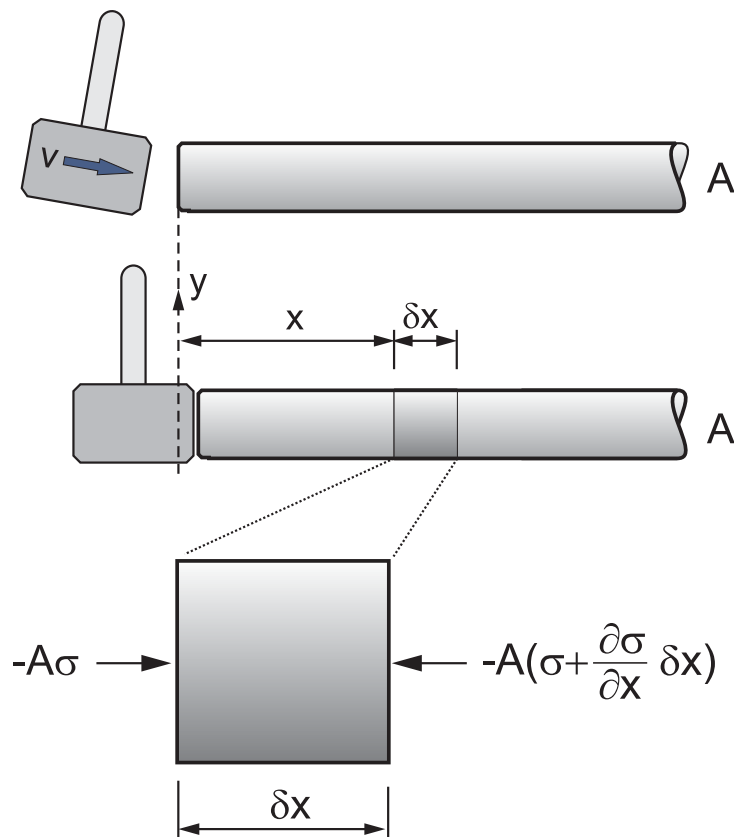


Bild 2.2: Ausbreitung einer elastischen Kompressionswelle in einem dünnen Stab [64]

Bild 2.2 zeigt einen dünnen Stab, in dem durch den axialen Stoß eines Zylinders am linken Ende eine Kompressionswelle ausgelöst wird. Die Kompressionswelle durchläuft den Stab von links nach rechts. Zum Zeitpunkt t befindet sich die Welle an der Stelle x . Für ein (infinitesimales) Volumenelement der Länge δx und der Querschnittsfläche A lässt sich an der Stelle x das zweite Newtonsche Gesetz $F = m \cdot a$ formulieren. Unter Berücksichtigung der Erhaltung für Masse und Impuls erhält man:

$$- \left[A \cdot \sigma - A \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cdot \delta x \right) \right] = A \cdot \rho \cdot \delta x \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

Für elastisches Materialverhalten gilt das HOOKEsche Gesetz

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{bzw.} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = E \quad (2.2)$$

Verwendet man die linearisierte Form

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.3)$$

erhält man für die Longitudinalschwingung in einem dünnen geraden Stab

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[E \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right] = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

und nach weiterer Umformung die Wellengleichung in der Form

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_L^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

Eine Longitudinalwelle breitet sich somit im eindimensionalen Fall mit der Geschwindigkeit c_L aus. Gleichung 2.6 macht den Zusammenhang mit den elastischen Materialeigenschaften deutlich.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \text{konst.} \quad (2.6)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Ausbreitungsverhalten von Wellen an Versuchskörpern unter einer Stoßbelastung untersucht, die durch eine Sprengladung mit spezieller Geometrie erzeugt wird (siehe Abschnitt 5.1.2). Verbunden mit der Art der Belastung und der Geometrie der Versuchskörper erfolgt auch eine räumliche Ausbreitung von Wellenanteilen, deren Geschwindigkeit sich von der Geschwindigkeit eindimensionaler Longitudinalwellen unterscheiden. Für den Fall eines räumlich ausgedehnten Körpers lässt sich wiederum unter Zuhilfenahme der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls die Wellen-

gleichung angeben. Unter Ausnutzung der Einsteinschen Summationschreibweise (die Summation erfolgt über sich wiederholende Indizes in einem Term) erhält man die Wellengleichung für den allgemeinen räumlichen Fall:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Die Zusammenhänge zwischen den elastischen Moduln, akustischen Wellenformen und den zugehörigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in einem halbunendlichen Festkörper sind im Folgenden dargestellt.

- Räumliche hydrostatische Kompressionswelle

$$c_B = \sqrt{\frac{K}{\rho}}; \quad K = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \text{konst.} \quad (2.8)$$

- Räumliche Transversalwelle

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.9)$$

- Räumliche Longitudinalwelle

$$c_P = \sqrt{\frac{K + 4/3 G}{\rho}}; \quad K = \frac{\partial p}{\partial \rho} = \text{konst.}; \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.10)$$

Ergänzend sei angemerkt, dass im Falle der Longitudinalwelle in einem dünnen Stab ein einaxialer Spannungszustand zugrunde liegt. In einem halbunendlichen Festkörper mit elastischem Materialverhalten liegt jedoch ein einaxialer Dehnungszustand vor, da das Material seitlich nicht ausweichen kann. Entsprechend dem Querdehnungsverhalten ergibt sich somit eine größere Ausbreitungsgeschwindigkeit einer räumlichen Longitudinalwelle als bei einer Longitudinalwelle im dünnen Stab. Eine ausführliche Herleitung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den Gleichungen (2.8), (2.9) und (2.10) findet man beispielsweise bei RIEDEL [73] und MEYERS [64]. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Form der Wellenfront oder der Wellenfläche. Hier unterscheidet man zwischen ebenen Wellen, Zylinder- oder Kreiswellen und Kugelwellen. Ebene Wellen können auf die Beschreibung eindimensionaler Wellen zurückgeführt werden [68].

Reflexion elastischer Wellen

Trifft eine sich in einem Material ausbreitende Welle auf die Übergangsstelle zu einem anderen Material, so tritt an dieser Grenzfläche eine Reflexion

und/oder Transmission der Welle auf. Verantwortlich hierfür sind die an diesen Grenzflächen vorhandenen Impedanzunterschiede. Diese Effekte beeinflussen den Spannungszustand der beteiligten Materialien beim Durchgang einer Belastungswelle. Im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich die Untersuchungen auf die Beschreibung von Festkörperwellen, die sich nach Belastungseintrag durch eine Kontaktdetonation räumlich im Versuchskörper ausbreiten. Für den Fall der untersuchten Betonkörper (vgl. 1.1) findet man Materialübergänge und damit Grenzflächen die zu den erwähnten Effekten führen

- an der Unterseite des Versuchskörpers beim Übergang Festkörper-Luft (freie Oberfläche),
- an einzelnen Messelementen im Innern der Versuchskörper und
- grundsätzlich an jedem Zuschlagskorn sowie an der Verbundfläche zwischen Bewehrungsstahl und Beton.

Der heterogene Aufbau des Betons wurde bei den durchgeführten Untersuchungen bewusst in Kauf genommen, wohl wissend, dass der Einfluss auch an den Übergängen zwischen Matrix und Zuschlagskorn vorhanden ist. Dies trifft ebenso auf die mit Bewehrung versehenen Randbereiche der Versuchskörper zu. Die Reflexionen in den Randbereichen haben auf die Wellenausbreitung der longitudinale Hauptbelastungswelle keinen nennenswerten Einfluss.

Ursachen der Reflexion (elastischer Wellen)

Ursache für die auftretenden Reflexionen an den Materialübergängen sind die unterschiedlichen Impedanzen der benachbarten Materialien. Unter Impedanz (I_m) versteht man allgemein den Widerstand, den ein Medium einer sich darin ausbreitenden Welle entgegengesetzt. Die Impedanz I_m ist definiert als das Produkt aus Dichte ρ und Wellengeschwindigkeit c . Die entsprechende Wellengeschwindigkeit lässt sich aus einer der Gleichungen (2.6) bis (2.8) ermitteln.

Auftreffen einer (elastischen) Welle auf eine freie Oberfläche [27]

Bild 2.3 zeigt ein Erklärungsmodell für den Vorgang der Reflexion einer Druckwelle an einer freien Oberfläche. Im ersten Bild sind zwei gegeneinander laufende Wellen dargestellt. Im linken Teil durchläuft eine Druckwelle mit Amplitude σ_I einen Körper. In der Modellvorstellung geht man davon aus, dass auf den Körper vom freien Ende her eine Welle mit gleicher Geschwindigkeit und Amplitude, aber umgekehrtem Vorzeichen zuläuft. Eine Überlagerung beider Wellen erfolgt, sobald beide die freie Oberfläche erreicht haben. Das Ergebnis dieser Modellvorstellung sich überlagernder Wellen ist eine vollständige Reflexion der ursprünglichen Druckwelle σ_I als eine Zugwelle σ_R . Dieses Beispiel verdeutlicht, dass es an einer freien Oberfläche zu keinem Übertrag sondern zu vollständiger

Reflexion der Festkörperwelle kommt. Damit verbunden ist eine Belastungsumkehr an der freien Oberfläche; anstelle einer Druckwelle breitet sich eine Zugwelle mit gleicher Intensität aus.

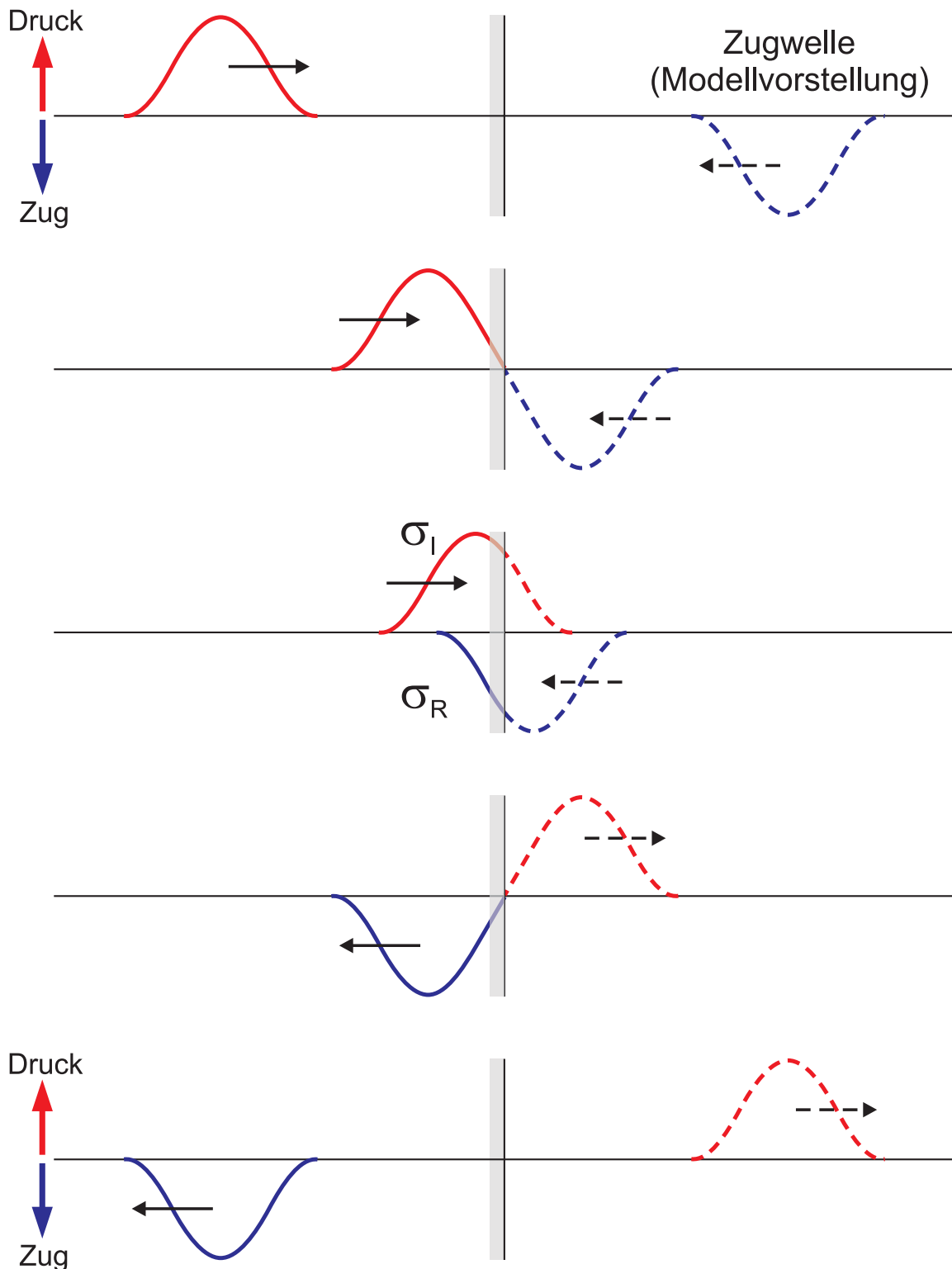


Bild 2.3: Reflexion einer Welle an einer freien Oberfläche

Auftreffen einer (elastischen) Welle auf eine Grenzfläche

Beim Übergang einer Welle an der Grenzfläche zwischen einem Medium A (Impedanz I_m^A) und einem Medium B (Impedanz I_m^B) müssen zwei Randbedingungen erfüllt sein: Sowohl die Spannungen der einlaufenden (σ_I), reflektierten (σ_R) und übertragenen (σ_T) Welle als auch die zugehörigen Partikelgeschwindigkeiten ($U_{p,I}$, $U_{p,R}$, $U_{p,T}$) müssen jeweils identisch sein.

$$\sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \quad (2.11)$$

$$U_{p,I} + U_{p,R} = U_{p,T} \quad (2.12)$$

Wären diese Bedingungen verletzt, so würde dies zu einer Klaffung an der Kontaktstelle der beiden Materialien führen. Mit Hilfe der Impulserhaltung $\sigma = \rho \cdot c \cdot U_p$ und der Gleichungen (2.11) und (2.12) lässt sich durch entsprechende Umformung eine Beziehung für die übertragene Spannungsamplitude an der Kontaktzone formulieren [64].

$$\sigma_R = \left(\frac{I_m^B - I_m^A}{I_m^B + I_m^A} \right) \cdot \sigma_I \quad (2.13)$$

$$\sigma_T = \left(\frac{2 \cdot I_m^B}{I_m^B + I_m^A} \right) \cdot \sigma_I \quad (2.14)$$

Folgende Aussage lässt sich aus den Gleichungen (2.13) und (2.14) gewinnen:

- Die Intensität der reflektierten und der übertragenen Welle ist von der Impedanz abhängig
- für die Spannungsbeschreibung ist das Impedanzverhältnis maßgebend.

Ein ausführliche Darstellung der Spannungsverhältnisse σ_R/σ_I und σ_T/σ_I für unterschiedliche Impedanzverhältnisse findet man z.B. bei GREULICH [37] in einer tabellarischen Zusammenstellung. Der wesentliche Sachverhalt ist in Bild 2.4 dargestellt.

Bei Impedanzverhältnissen $I_m^B < I_m^A$ erfährt der reflektierte Teil R der ursprünglich einlaufenden Druckwelle I eine Belastungsumkehr und breitet sich ausgehend von der Grenzfläche beider Medien in entgegengesetzter Richtung als Zugwelle im Medium A aus. Der übertragene (transmittierte) Teil T der Welle I breitet sich im Medium B mit gleichem Vorzeichen wie die ursprüngliche Welle I als Druckwelle aus. Die Wellenanteile R und T zeigen eine Abnahme ihrer Amplitude gegenüber der Eingangswelle I. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer „weichen“ Reflexion. Für die praktische Anwendung bedeutet die Abnahme der Amplitude der übertragenen Welle eine geringere Beanspruchung des

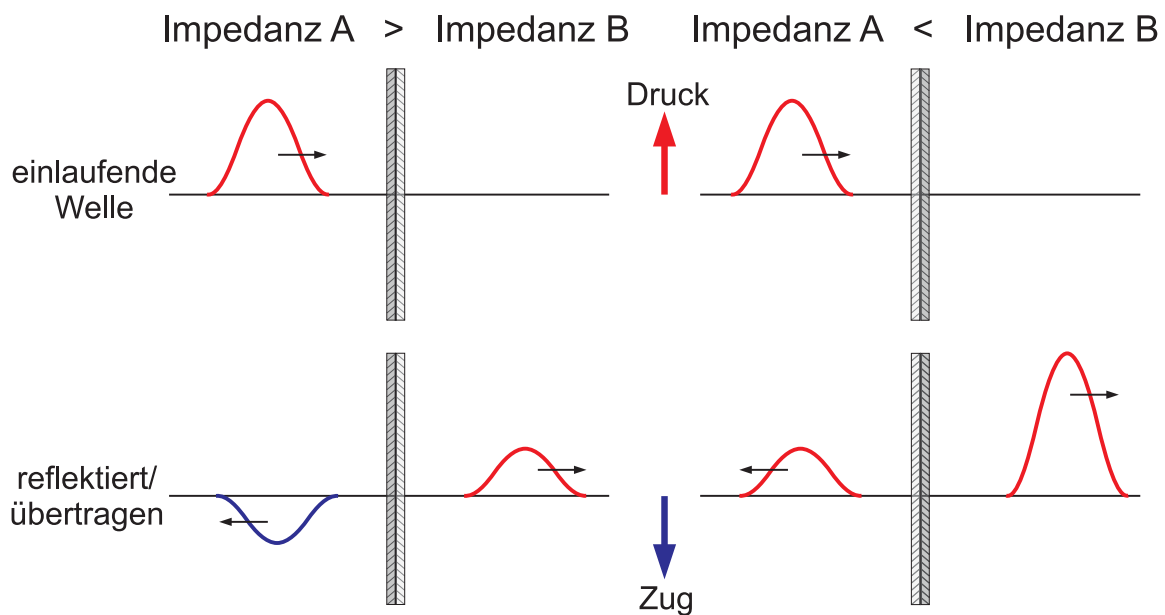


Bild 2.4: Spannungsimpuls an der Grenzfläche unterschiedlicher Materialien nach NIEDRIG [68]

Materials, in das die Welle übertragen wird. Diesen Effekt kann man sich bei der Auslegung einer detonationsbeanspruchten Struktur zu Nutze machen.

Bei Impedanzverhältnissen $I_m^B > I_m^A$ läuft eine Belastungswelle gleicher Art zurück in das Medium A. Entsprechend findet man für diesen Vorgang häufig die Bezeichnung „harte“ Reflexion. Die Amplitude des reflektierten Wellenanteils R ist jedoch kleiner als die der einlaufenden Welle I. Der an der Grenzfläche übertragene Wellenanteil T zeigt bei gleichem Vorzeichen eine höhere Spannungsamplitude als die eingetragene Welle. In diesem Fall tritt ein Verstärkung gegenüber der Ausgangswelle I ein. Die Amplitude kann maximal doppelt so groß wie die der Ursprungswelle sein.

Für den Fall gleicher Impedanzen $I_m^B = I_m^A$ wird die einlaufende Welle unverändert in das angrenzende Medium übertragen. Reflexion tritt nicht auf. Bei der Signalübertragung in elektronischen Schaltkreisen werden diese Verhältnisse durch eine sogenannte Wellenanpassung hergestellt. Die Folge der Anpassung ist eine weitgehend unverfälschte und verlustfreie Übertragung der ursprünglichen Signale (vgl. Abschnitt 5.3.1). Diese Zusammenhänge spielen bei der Kapselung von Messelementen eine wichtige Rolle. Um ein weitgehend unverfälschtes Signal am Messelement zu erhalten, wurden bei den in Kapitel 5 vorgestellten Messungen die Materialien so gewählt, dass die Impedanzverhältnisse der eingesetzten Materialien in etwa der gleichen Größenordnung lagen. Vergleiche hierzu Abschnitt 5.1.2, Tabelle 5.1.

Ist die Impedanz $I_m^B = 0$, so wird die Grenzfläche von einer freien Oberfläche gebildet. Die einlaufende Welle wird vollständig als Zugwelle an der Grenzfläche reflektiert und breitet sich in entgegengesetzter Richtung im Ursprungsmaterial aus (siehe Bild 2.3). Dabei kann es in der Folge zu einer Überlagerung mit

anderen einlaufenden Wellenanteilen kommen. Bei der Untersuchung der Ausbreitungscharakteristik von Wellen muss dieser Effekt beachtet werden.

2.1.2 Nichtlinear elastisch-plastische Wellenausbreitung – Dispersion

Die Ausbreitung von Wellen ändert sich, sobald sich das Material nichtlinear verhält. Im Gegensatz zu einem elastischen Material breiten sich Wellen in einem Werkstoff mit nichtlinearem Verhalten nicht mit konstanter Geschwindigkeit aus. Der Grund hierfür liegt in der Dehnungsabhängigkeit der Elastizitätsmoduls.

$$E = E(\varepsilon) = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (2.15)$$

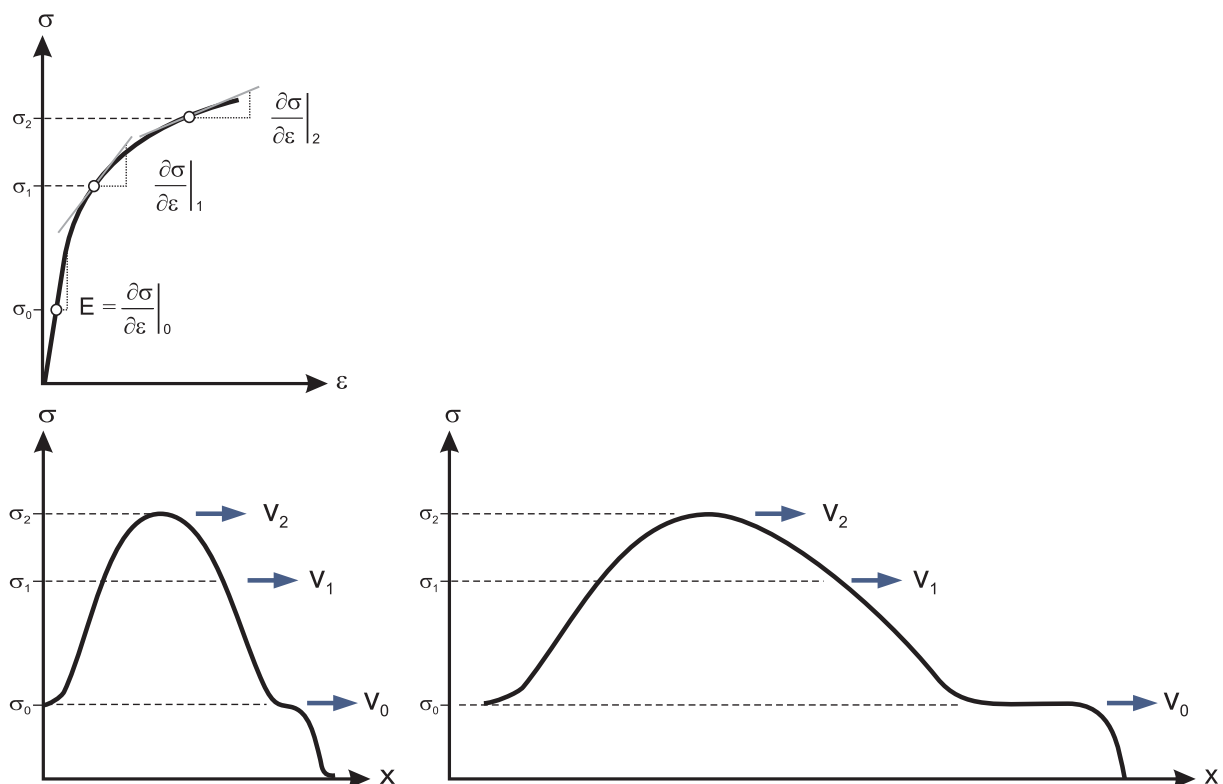


Bild 2.5: Eindimensionale Zugbelastung und Dispersion einer plastischen Welle, z.B. in einem dünnen Stab nach MEYERS [64]

Bild 2.5 zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung für einen dünnen Zugstab mit plastischer Verformung und Verfestigung. Aus dem Kurvenverlauf ist ersichtlich,

dass die Module an den Stellen 1 und 2 kleiner sind als der elastische Modul (Index 0). Aus den Zusammenhängen des Abschnitts 2.1.1 und unter Berücksichtigung von Gleichung (2.6) ergibt sich nach dem Überschreiten der elastischen Grenze eine geringere Wellenausbreitungsgeschwindigkeit; mit zunehmender Belastung nimmt somit die Wellengeschwindigkeit ab. Damit verbunden ist das im unteren Teil von Bild 2.5 dargestellte Auseinanderlaufen der Welle bzw. eine Verbreiterung des eingekoppelten Wellenprofils mit zunehmender Lauflänge der Welle. Den Effekt der Ausbreitung von Wellen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsanteilen nennt man Dispersion.

Betrachtet man nun das in Bild 2.6 dargestellte Materialverhalten, so tritt ein gegenteiliger Effekt auf. Unter einer hydrostatischen Druckbelastung nimmt mit zunehmender Kompression die „Zusammendrückbarkeit“ des Materials ab, (d.h. die Beziehung zwischen Druck und Dichte verläuft konkav). Für die Wellenausbreitung folgt daraus eine Zunahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Verdichtung.

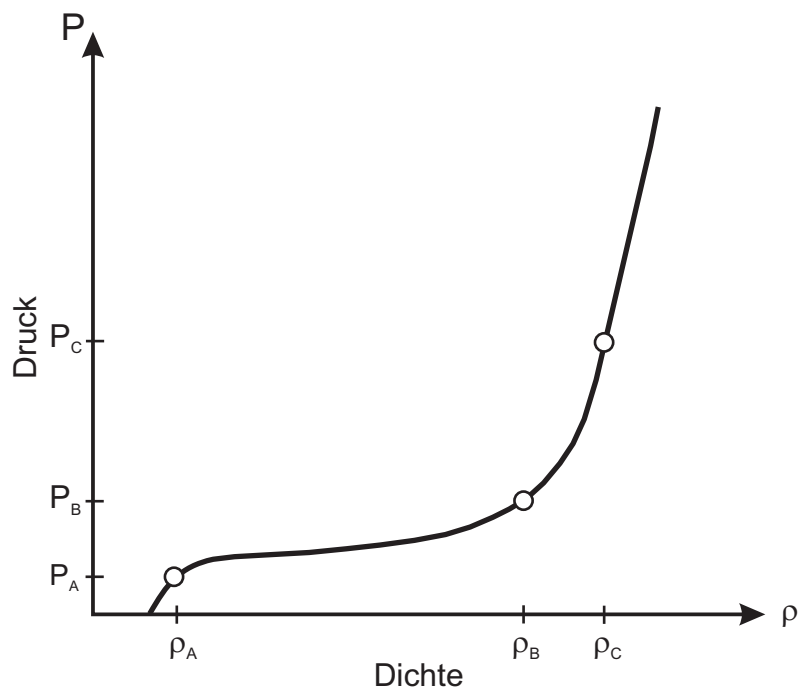


Bild 2.6: Nichtlineares Materialverhalten bei hydrostatischer Druckbelastung

Unter gewissen Umständen können Dispersionseffekte bei einer Druckbelastung und einem nichtlinearen Materialverhalten zur Ausbildung von sogenannten Stoßwellen führen. Welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit diese spezielle Wellenform entstehen kann, und wodurch diese Wellenform gekennzeichnet ist, wird im folgenden Abschnitt eingehender erläutert.

2.1.3 Stoßwellen

Stoßwellen – Dispersion

Übersteigt die Druckbelastung eines Materials mit nichtlinearem Kompressionsverhalten den Verfestigungspunkt (p_{WP} , V_{WP}), kommt es bei der sich ausbreitenden Druckwelle (durch Dispersion) zur Ausbildung einer Stoßwelle (vgl. Bild 2.7).

Der rechte Teil der Darstellung zeigt die typische Dreiecksform einer Stoßwelle wie sie bei einer Belastung durch eine Kontaktdetonation innerhalb eines Materials entstehen würde. Die Welle besteht aus einer Stoßfront mit einem steilen, nahezu sprunghaften Anstieg bei Vorhandensein extremer Druckgradienten. Je nach der vorhandenen Druckamplitude eilt der Stoßfront eine elastische Welle, ein sogenannter „Precursor“, voraus. Bei ausreichend hohem Druckniveau „schluckt“ die Stoßwelle die vorauslaufende Welle (MEYERS [64], in Bild 2.7 gestrichelt dargestellt). In diesen Fall muss ein Materialverhalten vorausgesetzt werden, bei dem mit steigendem Druck p auch eine Zunahme der Stoßwellengeschwindigkeit U_S zu beobachten ist. In der Darstellung von Bild 2.7 tritt dies oberhalb des Verfestigungspunktes (p_{WP} , V_{WP}) für den Zustand des Materials ein, für den gilt: $K > K_A$.

Auf der Rückseite der Stoßfront erfolgt eine Abnahme der Druckamplitude. Verbunden damit ist eine Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Teil der Welle.

Die grundlegende Bedingung für das Ausbilden einer Stoßwelle wird aus dem Verlauf der Kompressionskurve in Bild 2.7 ersichtlich. Mit steigendem Druck p muss auch die Steigung der Kurve zunehmen, was sich mit der folgenden Gleichung ausdrücken lässt (V bezeichnet in Gleichung 2.16 die Änderung des Volumens).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial V^2} \Big|_{WP} > 0 \quad (2.16)$$

Entstehung von Stoßwellen

Anhand des in Bild 2.7 dargestellten Kurvenverlaufs wird im Folgenden die Entstehung einer Stoßwelle beschrieben.

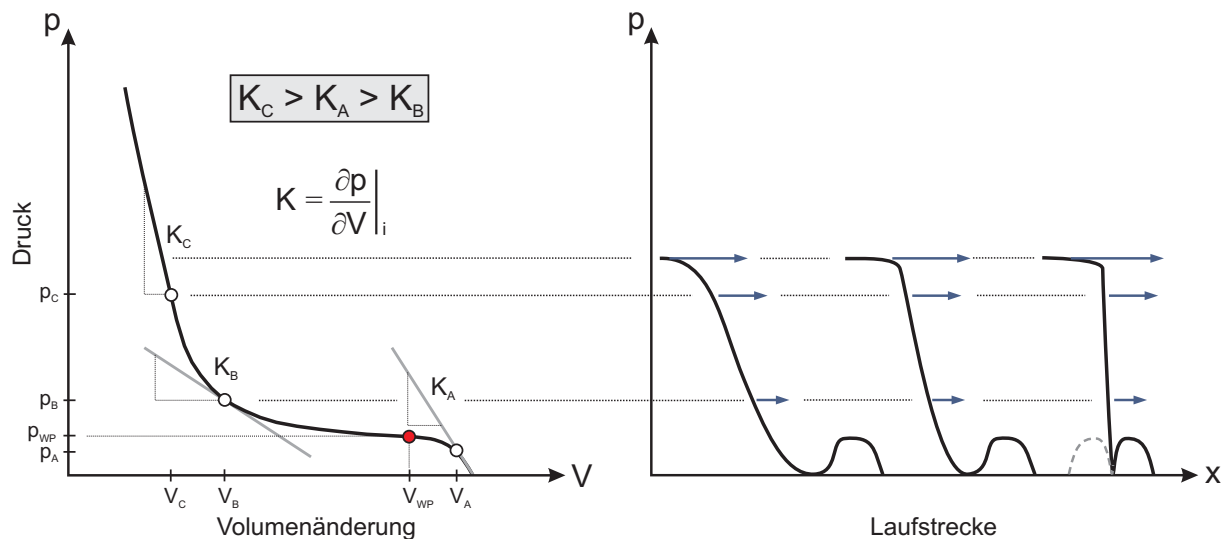


Bild 2.7: Ausbildung einer Stoßwelle durch Dispersion

Wenn ein Material auf einen Zustand (p_C, V_C) verdichtet wird, so resultieren daraus Spannungswellen, die sich entsprechend der örtlich vorhandenen Dichte des Materials mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten. Um die Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Wellenanteile identifizieren zu können, wird zum besseren Verständnis der Vorgänge das Material gedanklich statisch belastet. In diesem Fall würden sich zunächst elastischen Wellen mit einer Geschwindigkeit $c_A = \sqrt{\left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_A}$ ausbreiten. Bei weiterer Laststeigerung über den elastischen Bereich hinaus, z.B. bis zu einem Druck p_B , breiten sich aufgrund der geringeren Steifigkeit in diesem Bereich die Wellen mit einer geringeren Geschwindigkeit $c_B = \sqrt{\left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_B}$ aus. Bei weiterer Verdichtung des Materials über den Punkt (p_B, V_B) hinaus ist aus dem Kurvenverlauf in Bild 2.7 eine Zunahme der Steifigkeit zu erkennen. Wellen, die aus diesem Druckbereich z.B. an der Stelle (p_C, V_C) resultieren, besitzen eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit als alle zuvor in das Material eingetragenen Spannungswellen.

Damit sich eine Stoßwelle innerhalb des Materials ausbilden kann, muss die Belastung entsprechend schnell erfolgen. Die später ausgelösten Wellenanteile aus den höheren Druckbereichen müssen in der Lage sein, die früher ausgelösten Wellen innerhalb der Lauflänge einzuholen bzw. zu überholen. Denn nur dann kann sich durch Dispersion eine Stoßwelle ausbilden. Mitentscheidend für die Ausbildung einer Stoßwelle ist somit auch das Zusammenspiel zwischen Amplitude und Geschwindigkeit der Belastung.

Reflexion und Übertragung von Stoßwellen

Im Zusammenhang mit den durchgeführten experimentelle Untersuchungen an Betonversuchskörpern unter einer Kontaktdetonation muss insbesondere die

Frage des Lasteintrags der Stoßwelle in den Versuchskörper beantwortet werden. Von Interesse sind insbesondere die Verhältnisse beim Übertrag der Stoßwellen an Grenzfläche Sprengstoff - Versuchskörper.

Analog zu den Ausführungen des Abschnitts 2.1.1 lässt sich das Produkt aus der Dichte ρ und der Stoßwellengeschwindigkeit U_S als Stoßwellenimpedanz I definieren. Die Stoßwellenimpedanz eines Materials kann in ausreichender Näherung aus der Schallgeschwindigkeit c und der Anfangsdichte ρ_0 des Materials vor dem Stoßwellendurchgang ermittelt werden (MEYERS [64]). Zum Verständnis der Auswertung der Sprenguntersuchungen in Kapitel 5 und zur Charakterisierung einer Stoßwelle nach einem Grenzflächenübergang ist es wesentlich, zu erkennen in welchem Maße sich physikalische Größen wie z.B. Druck, Wellengeschwindigkeit oder Dichte beim Grenzübergang einer Stoßwelle in einen Festkörper gegenüber ihrem Ausgangszustand ändern. Die damit einhergehende Änderung der Wellenform wird in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 4.4 erläutert.

Weiterführende theoretische Darstellungen zum Übergang von Stoßwellen an Materialgrenzen sind ausführlich u.a. in der Arbeit von OCKERT [69], bei MEYERS [64] und ZUKAS [100] zu finden.

Stoßwellen – Überlagerung

Eine anderer Mechanismus, der zur Ausbildung einer Stoßwelle führt, resultiert aus der Überlagerung von Wellen. Erfolgt die Bewegung einer Quelle mindestens mit der gleichen Geschwindigkeit wie die von dieser Quelle ausgelösten Wellen, kommt es am Ort der Quelle zu einer Überlagerung der Wellen. Die daraus entstehende Welle wird als Kopfwelle bezeichnet. Wellen dieser Art lassen sich z. B. in Wasser, ausgehend vom Bug eines Schiffes beobachten, das sich mit größerer Geschwindigkeit bewegt als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der von ihm ausgelösten Wasserwellen. Der wohl bekannteste Vertreter einer Welle, deren Entstehung auf Überlagerung unterschiedlicher Wellenanteile zurückgeführt werden kann, ist die sogenannte Machwelle; eine Stoßwelle in Luft, die bei einem schnell fliegenden Flugzeug auftritt und sich in Form eines Überschallknalls äußern kann.

Besonderheiten bei der Detonation von Explosivstoffen

Bei einer Detonation treten beide genannten Formen von Stoßwellen auf. Die durch die Detonation entstehende und sich ausbreitende Druckwelle besitzt wegen der schnellen Umsetzung des Explosivstoffs in gasförmige Reaktionsprodukte hohe Druckamplituden, die zu Dispersionseffekten führen. Die Reaktionsprodukte ihrerseits enthalten aber auch Feststoffe, die bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit oberhalb der Schallgeschwindigkeit eine Kopfwelle entstehen lassen. Der Detonationsvorgang und die damit verbundene Entstehung einer

Stoßwelle innerhalb des in den Versuchen eingesetzten Ladungskegels wird in Abschnitt 3.1 beschrieben.

2.2 Bilanzsätze – Erhaltungsgleichungen

Die physikalische Betrachtungsweise der Erhaltung bestimmter Größen innerhalb eines System ist für die Beschreibung zahlreicher physikalischer Vorgänge von besonderer Bedeutung. Vernachlässigt man Quellen und Senken im Inneren eines System, so besagt das Prinzip der Erhaltung, dass die Änderung einer Größe nur über die Grenzen des Systems erfolgen kann (BAEHR [7]). Erfolgt die Änderung einer physikalischen Größe, z.B. der Dichte, unabhängig vom Weg, so wird diese in der Thermodynamik als Zustandsgröße bezeichnet. Um die Änderungen der Eigenschaften eines Körpers zu beschreiben, ist neben der Wahl des Bezugssystems die Festlegung der Grenzen des System entscheidend. Innerhalb dieser Grenzen müssen zur Beschreibung einer Zustandsänderung die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie erfüllt sein. Je nach Anwendungsfall muss unterschieden werden, ob die Beschreibung in einem ortsfesten oder einem mitbewegten Koordinatensystem erfolgen soll. Im ersten Fall erhält man die Darstellung der Erhaltungsgleichungen in der Eulerschen oder konservativen Form, im Falle des mitbewegten System die nicht-konservative Formulierung nach Lagrange. Weiterhin muss festgelegt werden, ob es sich beim betrachteten System und ein endlich berandetes Gebiet handelt oder um ein infinitesimales Volumen handelt. Ein endlich berandetes Gebiet führt zu einer intergralen Darstellung der Erhaltungsgleichungen, das Volumenelement liefert eine differentielle Formulierung. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der möglichen Formulierungen einer Erhaltungsgleichung.

Tabelle 2.1: Formulierungsmöglichkeiten einer Erhaltungsgleichung

	endliche Berandung	infinitesimales Volumen
Euler - ortsfest	intergral, konservativ	differentiell, konservativ
Lagrange - mitbewegt	intergral, nicht-konservativ	differentiell, nicht-konservativ

Im Rahmen der weiteren Ausführungen in diesem Abschnitt werden nur die differentiellen Formen der Erhaltungsgleichungen angegeben. Weiterführende und detaillierte Darstellungen der unterschiedlichen Formulierungen sind z.B. bei ANDERSON [2], HIERMAIER [46], RIEDEL [73] enthalten.

Mit der in Gleichung 2.7 eingeführten Indexschreibweise lassen sich die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie wie folgt angeben (vgl. SCHULER [82]):

$$\text{Massenerhaltung } \rho \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.17)$$

$$\text{Impulserhaltung } \rho \cdot \frac{\partial v_i}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot f_i \quad (2.18)$$

$$\text{Energieerhaltung } \rho \cdot \frac{\partial e}{\partial t} = -p \cdot \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + S_{ij} \cdot \frac{\partial v}{\partial x_j} \quad (2.19)$$

Rankine-Hugoniot-Gleichung: Bilanzierung der Erhaltungsgleichungen an einer stationären Stoßfront

Wie bereits erwähnt, zeichnet sich eine Stoßwelle durch einen extrem steilen Anstieg der Wellenfront aus. Untersuchungen z.B. von SWEGLE und GRADY [87] zeigen, dass sich eine Stoßfront immer über eine endliche, wenn auch sehr geringe Ausdehnung erstreckt bzw. sehr kurze Anstiegszeiten aufweist (HIERMAIER [46]). Üblicherweise wird diese Ausdehnung bei der Beschreibung vernachlässigt. Somit kann eine Stoßwelle als eine Diskontinuität des Drucks, des Volumens (der Dichte) und der inneren Energie aufgefasst werden (MEYERS [64]). Formuliert man die Erhaltungsgleichungen (2.17), (2.18) und (2.19) über die Sprungstelle einer Stoßfront hinweg (Bild 2.8), erhält man die drei bekannten RANKINE-HUGONIOT-Gleichungen. Die den Gleichungen zugrunde liegenden Annahmen von RANKINE [71] und HUGONIOT [53] beruhen auf einer eindimensionalen Ausbreitung der Stoßfront in konservativer Darstellung (Euler) und der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie.

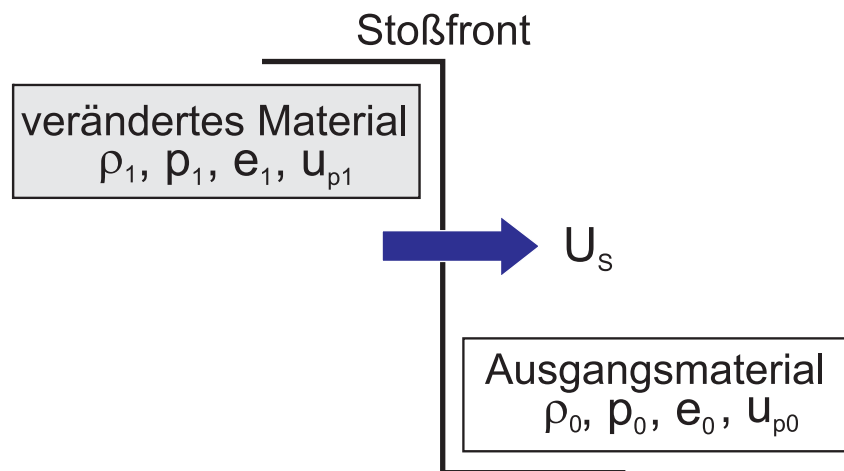


Bild 2.8: Bilanzierung an einer Stoßfront mit Bewegungsrichtung von links nach rechts

Dies führt zu den drei Gleichungen (2.20), (2.21) und (2.19). Die Variablen für die Größen vor der Stoßfront (Ausgangsmaterial) werden mit 0, diejenigen hinter der Stoßfront (verändertes Material) mit 1 indiziert. Somit erhält man die folgende Darstellung:

$$\rho_0 \cdot (U_S - u_{p0}) = \rho_1 \cdot (U_S - u_{p1}) \quad (2.20)$$

$$\rho_0 \cdot (U_S - u_{p0}) \cdot (u_{p1} - u_{p0}) = p_1 - p_0 \quad (2.21)$$

$$e_1 - e_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_0 + p_1) \cdot (V_0 - V_1) \quad (2.22)$$

Die Gleichungen sind äquivalent zu den Erhaltungssätzen von Masse, Impuls und Energie und bilden ein System materialunabhängiger Gleichungen, mit denen auch die Bewegung von Festkörpern beschrieben werden kann. Die Energiegleichung (2.22) enthält nur noch thermodynamische Größen. Die Gleichungen beschreiben den thermodynamischen Zustand hinter der Stoßfront in Abhängigkeit vom Zustand vor dem Stoß. Ergänzend sei angeführt, dass der Einfluss der Energie in Gleichung (2.22) aus drei Komponenten – mechanische Arbeit, innere Energie und kinetische Energie – besteht.

Es ist offensichtlich, dass die Anzahl der zur Verfügung stehenden Gleichungen nicht ausreicht, um alle Variablen zu bestimmen. Die Annahme entsprechender Randbedingungen reduziert die Anzahl der unbekanntenen Größen in den RANKINE-HUGONIOT-Gleichungen (2.20), (2.21) und (2.22). Aus der Wahl eines ruhenden Koordinatensystems für das System folgt für das Gebiet vor dem Stoß $u_{p0} = 0$. Werden für das betrachtete System Umgebungsbedingungen vorausgesetzt, so spielen Drücke und Energien vor dem Stoß – verglichen mit den Ver-

hältnissen nach Durchgang der Stoßwelle— keine wesentliche Rolle und können vernachlässigt werden ($e_0 = 0$; $p_0 = 0$). Die Anfangsdichte ρ_0 lässt sich experimentell ermitteln. Damit verbleiben als Unbekannte ρ_1 , p_1 , e_1 , u_{p1} und die Stoßwellengeschwindigkeit u_s . Zu ihrer Ermittlung fehlt eine weitere Beziehung zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, Volumen (Dichte) und innerer Energie. Dieser Zusammenhang wird über eine Zustandsgleichung hergestellt, die zwei beliebige Variablen der Erhaltungsgleichungen mit der inneren Energie in Beziehung setzt.

2.3 Zustandsgleichungen – EOS

Bei der Beschreibung von Festkörpern ist es üblich, den Spannungstensor in einen hydrostatischen und einen deviatorischen Anteil aufzuspalten (vgl. Abschnitt 2.5). Liegt die Belastungsamplitude weit über der Materialfestigkeit, so kann der deviatorische Anteil gegenüber dem hydrostatischen Anteil vernachlässigt werden. Unter dieser Annahme lässt sich die Beschreibung des Festkörpers „ohne schlechtes Gewissen“ [64] auf die für Fluide gültigen physikalischen und mathematischen Gesetzmäßigkeiten zurückführen.

Zustandsgleichungen beschreiben Beziehungen zwischen den thermodynamischen Zustandsgrößen Druck p , Volumen V (Dichte ρ) und innerer Energie e . Eine Zustandsgleichung lässt sich schematisch als eine räumliche Fläche im Druck-Volumen-innere Energie-Raum (p - V - e -Raum) darstellen (siehe Bild 2.9). Diese Fläche repräsentiert alle physikalisch möglichen Zustände innerhalb der betrachteten Materialphase und lässt sich mathematisch durch den folgenden Zusammenhang ausdrücken:

$$p = p(V, e) \quad (2.23)$$

2.3.1 Experimentelle Ermittlung

Betrachtet man die Darstellung einer Zustandsgleichung in Bild 2.9, so erkennt man, dass für einen Übergang von Punkt A nach Punkt B unterschiedliche Prozessarten möglich sind. Der Punkt A bezeichnet hierbei den Ausgangszustand eines Materials und der Punkt B den Endzustand des Materials nach einer Zustandsänderung. Im quasi-statischen Fall könnte sich eine Zustandsänderung von Punkt A nach Punkt B aus einer isothermen Verdichtung des Materials von A nach B^* und einer anschließenden isochoren Zustandsänderung von B^* nach B zusammensetzen. Im Falle einer Stoßwellenbelastung erfolgt eine Zustandsänderung immer entlang der sogenannten RAYLEIGH-Geraden, die aus den beiden mechanischen Erhaltungssätzen (2.20) und (2.21) abgeleitet ist. Die innere Energie ändert sich dabei als abhängige Variable gemäß Gleichung (2.22).

In ihrer allgemeinen Darstellung nimmt die RAYLEIGH-Gerade eine räumliche Lage im p-V-e-Raum ein. Durch die Projektion in die Druck-Volumen-Ebene (p-V-Ebene) erhält man eine Darstellung in der Form von Gleichung (2.24) bzw. Gleichung (2.25). Die innere Energie ändert sich als abhängige Variable gemäß den Gleichungen

$$\frac{p - p_0}{V - V_i} = \left(\frac{U_S}{V_0} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$1 - \frac{p_i}{\rho_0 \cdot U_S^2} = \frac{\rho_0}{\rho_i} = \frac{V_i}{V_0} \quad (2.25)$$

Bei einer Zustandsänderung können für ein und denselben Anfangszustand unterschiedliche Endzustände eingenommen werden. Verbindet man die möglichen Endzustände, so erhält man die Bild 2.9 dargestellte HUGONIOT-Kurve. Die HUGONIOT-Kurve beschreibt die Gesamtheit aller durch Verdichtungsstöße unterschiedlicher Intensität erreichbaren Endzustände eines Materials und repräsentiert eine Linie innerhalb der Zustandsfläche des p-V-e-Raums. Eine häufig verwendete, vereinfachte Darstellung einer HUGONIOT-Kurve enthält man durch die Projektion in die p-V-Ebene (CLAPEYRON-Koordinaten, vgl. Bild 2.9, rechts). Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die einzelnen Punkte auf der HUGONIOT-Kurve implizit Anteile der inneren Energie enthalten. Bei Festkörpern wird für die HUGONIOT-Kurve häufig auch die Bezeichnung „Stoß-HUGONIOT“ verwendet.

Punkte der HUGONIOT-Kurve lassen sich experimentell mit unterschiedlichen Versuchsmethoden ermitteln. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wurden die Stoßwellen in den Versuchskörpern durch Kontaktdetonation erzeugt. Diese Methode erfordert größere Probenabmessungen und bietet sich daher für die Untersuchung von Festkörpern mit heterogener Struktur an. Kapitel 5 beschreibt ausführlich die Vorgehensweise bei dieser Versuchsmethode. Eine weitere, häufig angewandte Methode zur Erzeugung von Stoßwellen sei der Vollständigkeit halber an dieser Stelle kurz erwähnt. Beim Planar-Platten-Impakt-Versuch wird ein Material mit bekannter Zustandsgleichung auf ein zu untersuchendes „Zielmaterial“ mit nicht bekannter Zustandsgleichung geschossen. Durch entsprechende Messungen ist aus diesen Versuchen eine Beziehung zwischen Partikelgeschwindigkeit u_p und Stoßwellengeschwindigkeit U_S ableitbar, mit der sich dann die RANKINE-HUGONIOT-Gleichungen lösen lassen. Diese Methode ist im allgemeinen auf kleine Probengeometrien beschränkt und daher nicht geeignet, die Heterogenität von Beton ausreichend zu erfassen. Angewandt wurde diese Methode zur Charakterisierung von Zementstein, u.a. von RIEDEL [73].

Wie bereits erwähnt, lässt sich mit einer repräsentativen Anzahl an $(U_S - u_p)$ -Wertepaaren aus Stoßwellenversuchen zwar die HUGONIOT-Kurve eines Ma-

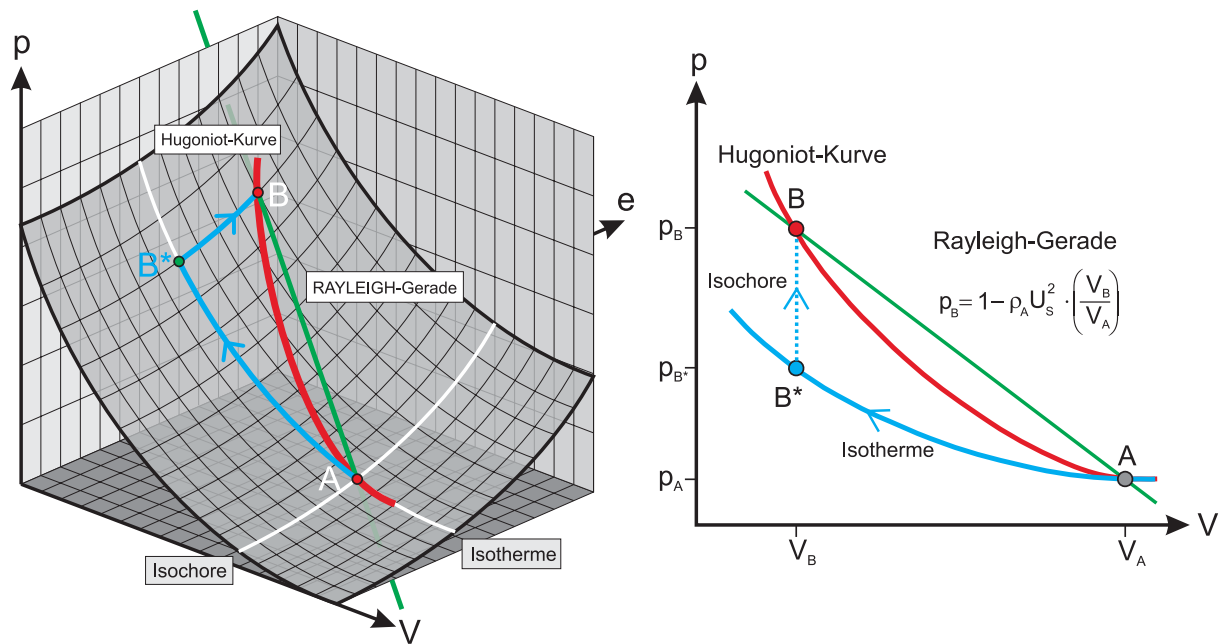


Bild 2.9: (links) Darstellung einer Zustandsgleichung im p-V-e-Raum, beschränkt auf die feste Phase; (rechts) Rayleigh-Gerade und HUGONIOT-Kurve in CLAPEYRON-Koordinaten

terials gewinnen, nicht aber eine Zustandsgleichung daraus ableiten. Um aus der Stoß-HUGONIOT eine Zustandsgleichung konstruieren zu können, werden weitere Annahmen über die Beschaffenheit der Zustandsfläche in der näheren Umgebung der HUGONIOT-Kurve benötigt. Dies führte in der Vergangenheit zu unterschiedlichen theoretischen Ansätzen, mit denen Zustandsgleichungen formuliert werden konnten. Häufig wird ein Ansatz verwendet, der auf Überlegungen von MIE [65] und GRÜNEISEN [38] zurückzuführen ist. Der folgende Abschnitt zeigt die Vorgehensweise wie, basierend auf Methoden der statistischen Mechanik, theoretische Zustandsgleichungen gewonnen werden können.

2.3.2 Theoretische Zustandsgleichungen

Um das Verhalten eines Materials vollständig durch eine Zustandsgleichung beschreiben zu können, benötigt man Informationen darüber, wie sich der Druck in Abhängigkeit des Volumens und der (inneren) Energie verhält. Mögliche Beanspruchungen, die nicht zu einer reinen Volumenänderung führen, z.B. eine Scherbeanspruchung, soll bei der folgenden Herleitung theoretischer Zustandsgleichungen unberücksichtigt bleiben. Es wird von einem rein hydrostatischen Verhalten des Festkörpers ausgegangen.

Ziel theoretischer Zustandsgleichungen ist es, aus dem grundlegenden Teilchenverhalten auf atomarer Ebene makroskopisches Materialverhalten abzuleiten. Theoretische Zustandsgleichungen basieren auf den Bindungsbeziehungen einzelner Atome. Dabei ist die Art der Bindung zwischen den Grundbau-

steinen eines Werkstoffs bestimmend für dessen mechanische Eigenschaften, wie z.B. Festigkeit, Verformungsverhalten oder Elastizitätsmodul. Atome können in gewissen Grenzen unterschiedliche Aufenthaltsorte bezüglich ihrer Ruhelage einnehmen (Gitterschwingung/Oszillation). Mit dem sich ändernden Abstand zwischen benachbarten Atomen sind Änderungen der Bindungsenergie und der Bindungskräfte verbunden. Aus der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Protonen ergeben sich anziehende und abstoßende Kräfte, die sich mit variierendem Atomabstand r ändern. Die Änderung von Bindungsenergie bzw. Bindungskräften als Funktion des Atomabstandes ist aus Bild 2.10 ersichtlich.

Condon-Morse Diagramm

Der in Bild 2.10 dargestellte Abstand r_0 (Grundabstand) ist nur dann vorhanden, wenn keine äußere Kraft wirkt bzw. wenn die Temperatur $T=0\text{ K}$ ist. Wirkt hingegen eine äußere Kraft oder erfolgt eine Erhöhung der Temperatur, so erkennt man, dass zwei extremale Abstände möglich sind. Es ist üblich, einen Mittelwert r_m für den Atomabstand anzugeben. Er ergibt sich aus der Oszillation der Atome im Kristallgitter. Die später beschriebenen Energieanteile aus der Gitterschwingung treten daher nur oberhalb des absoluten Nullpunktes auf.

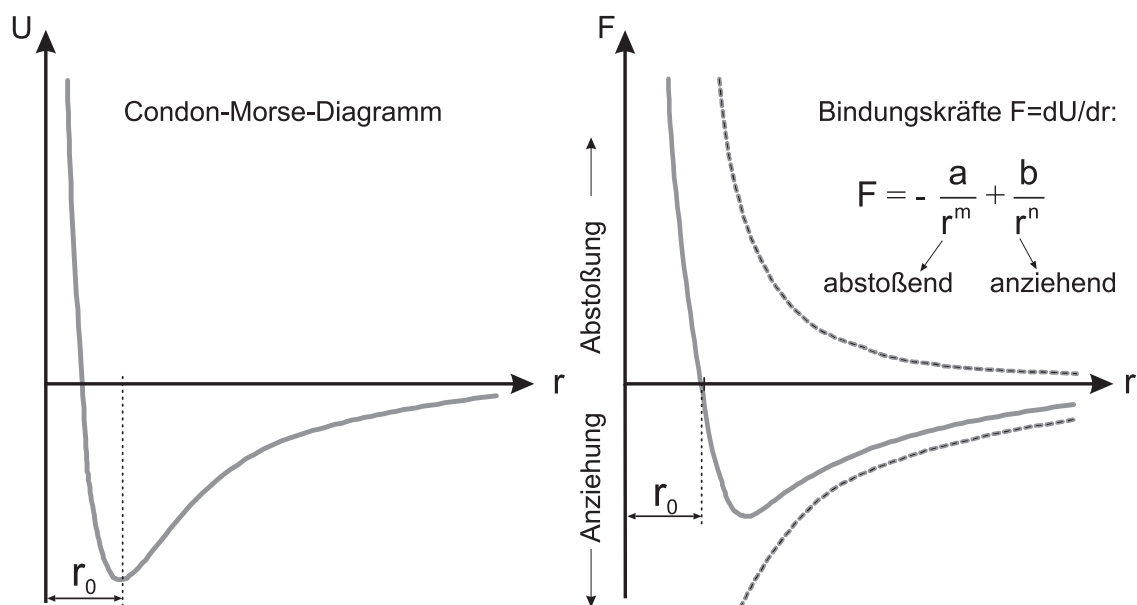


Bild 2.10: Bindungsenergie und Bindungskräfte zwischen benachbarten Atomen

Anziehung und Abstoßung von Atomen

Ein Festkörper setzt jeder Gestalts- oder Volumenänderung einen Widerstand entgegen. Dies bedeutet, dass sowohl die Annäherung als auch die Entfernung von Atomen auf einen entsprechenden Widerstand stößt (GRÜNEISEN [38]). Bei einer Kompressionsbelastung erfolgt eine Annäherung der Atome. Sobald die Elektronenschalen beginnen, sich zu durchdringen, treten große abstoßende Kräfte auf. Diese Kräfte wirken über eine kurze Entfernung. Die abstoßenden Kräfte ändern sich mit der 4. Potenz des Atomabstandes. Im Gegensatz dazu ändern sich anziehende Kräfte quadratisch mit dem Abstand. Im Grundabstand sind beide Kräfte gleich. Der Verlauf der anziehenden und der abstoßenden Kräfte ist im rechten Teil von Bild 2.10 dargestellt.

Die Kraft, die ein aus der Gleichgewichtslage entferntes Atom in diese zurücktreibt, ist umgekehrt proportional zur Entfernung aus der Gleichgewichtslage. GRÜNEISEN [38] führt in diesem Zusammenhang den Begriff einer Direktionskraft ein, die dem Quotienten aus Kraft und Auslenkung (=Entfernung aus der Ruhelage) entspricht. Die Direktionskraft nimmt bei einer Entfernung von einem Nachbaratom ab, bei einer Annäherung zu.

Mit Zunahme der thermischen Bewegung von Atomen dehnt sich ein Körper aus. Der mittlere Abstand der Atome vergrößert sich entsprechend dem Kurvenverlauf im Condon-Morse-Diagramm. Die Ausdehnung hängt ihrerseits wieder mit der Direktionskraft zusammen, was zu einem unterschiedlichen Verhalten bei Dehnung bzw. Zusammendrückung führt. Nach GRÜNEISEN [38] wächst die Dehnung zeitlich beschleunigt an, die Zusammendrückung wächst hingegen zeitlich verzögert mit dem Druck.

Ableitung mechanischer Eigenschaften

Aus der Lage des Energieminimums, der Steigung und der Symmetrie der Kurve in Bild 2.10 lassen sich wesentliche charakteristische Eigenschaften von Werkstoffen wie Festigkeit, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit ableiten. Näheres hierzu findet man im GRÜNEISEN-Artikel [38], bei MEYERS [64] und MÜLLER [67].

Die Frage, ob sich die makroskopisch beobachteten Festigkeitssteigerungen von Werkstoffen wie z.B. von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten auf diese grundlegenden mikroskopischen Bindungsbeziehungen zurückführen lassen, wird in Kapitel 4 beantwortet.

Teilchenmodelle

Auf mikroskopischer Ebene setzt sich ein Werkstoff aus einer großen Anzahl einzelner Teilchen zusammen. Er lässt sich als ein Vielteilchensystem auffas-

sen. Mit der Methode der statistischen Mechanik können aus der atomaren Betrachtungsweise mit Hilfe repräsentativer Mittelwerte Ausdrücke abgeleitet werden, mit denen sich das Verhalten eines Werkstoffes auf makroskopischer Ebene, z.B. durch thermodynamische Zustandsvariablen, beschreiben lässt. Dabei steigt die Genauigkeit mit der Anzahl der Teilchen N . Die Teilchen eines Systems sind z.B. die Atome oder Moleküle der betrachteten Materiemenge oder auch fiktive Massenelemente, d.h. differentiell kleine Bruchteile der Gesamtmasse des Vielteilchensystems (NIEDRIG [68]). Im Falle eines Festkörpers besitzen die Teilchen feste Abstände untereinander und es besteht eine feste Nah- und Fernordnung, was man als Kristallstruktur bezeichnet.

Statistische Mechanik

Im Gegensatz zu Ein- oder Zweiteilchensystemen können bei Vielteilchensystemen die kinematischen und dynamischen Größen der Teilchen nicht zu jedem Zeitpunkt aus den Bewegungsgleichungen bzw. dem Impuls- und Energieerhaltungssatz berechnet werden. Die Situation ist bei Systemen, die aus einer großen Anzahl von N Teilchen oder Atomen bestehen, eine vollkommen andere. Die Lösung der Bewegungsgleichungen bei Teilchenzahlen in der Größenordnung von $N = 10^{26}$ (Gase) ist nicht möglich. Außerdem müssten auch die Anfangsbedingungen für jedes einzelne Teilchen bekannt sein. Mit der Methode der statistischen Mechanik können durch die Bildung repräsentativer Mittelwerte Aussagen über die Eigenschaften von Vielteilchensystemen gemacht werden. Die statistische Mechanik erlaubt somit eine theoretische und experimentelle Analyse fundamentaler Eigenschaften von Systemen mit einer großen Anzahl einzelner Teilchen. Für die Thermodynamik liefert die statistische Mechanik die mikroskopische Fundierung.

Wird ein Festkörper mit Methoden der statistischen Mechanik beschrieben, so ist zunächst ein entsprechendes Modell zu formulieren. Ein Werkstoff wie Beton kann im Sinne der statistischen Mechanik als ein Satz schwingender Kristalle aufgefasst werden, die aus sich regelmäßig wiederholenden Einheiten aufgebaut sind. Diese Einheiten wiederum setzen sich aus einer Anordnung einer bestimmtem Anzahl einzelner Atome zusammen. Nach SLATER [84] muss ein Festkörper aus mindestens $3N$ schwingungsfähigen, voneinander unabhängigen Teilsystemen aufgebaut sein. Solche Teilsysteme bezeichnet man als Oszillatoren. Bei der Einführung der Wellenausbreitung in Abschnitt 2.1.1 wurde bereits eine Form eines Oszillators beschrieben. Im Gegensatz zu diesem handelt es sich bei den Betrachtungen im Zusammenhang mit theoretischen Zustandsgleichungen nicht um einen mechanischen, sondern um einen quantenmechanischen Oszillator. Beide Systeme sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Harmonischer / makroskopischer Oszillator

Ein harmonischer oder makroskopischer Oszillator ist ein physikalisches Modell zur Beschreibung von harmonischen Bewegungen. Diese Bewegungen treten auf, wenn in einem System kleine Auslenkungen aus einer stabilen Gleichgewichtslage lineare Rückstellkräfte erzeugen. Ein Beispiel für einen solchen Oszillator ist das links in Bild 2.11 dargestellte lineare Federpendel. Der Energieinhalt eines solchen Oszillators ist zeitlich konstant, wobei eine periodische Umwandlung von potentieller in kinetische Energie stattfindet.

Bei einem harmonischen mechanischen Oszillator kann die Auslenkung des Systems annähernd jeden Wert annehmen und damit dem Oszillator jede beliebige Gesamtenergiemenge erteilt werden. Diese Aussage kann in der Quantenmechanik nicht aufrecht erhalten bleiben.

Quantenmechanischer harmonischer Oszillator

Ein quantenmechanischer Oszillator kann nur bestimmte (diskrete) Energiewerte der Gesamtenergie annehmen. Der grundlegende Unterschied zum mechanischen Oszillator soll anhand des in Bild 2.11 dargestellten Parabelpotentials verdeutlicht werden.

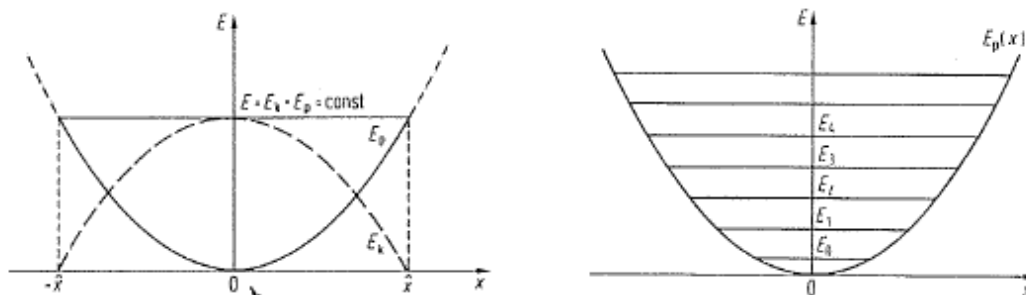


Bild 2.11: Parabelpotential harmonischer Oszillatoren

- Bei einem gequantelten Oszillator kann der Energieunterschied zwischen benachbarten Energiewerten berechnet werden. Hingegen sind die Frequenzen bei makroskopischen Oszillatoren so gering, dass die Unterschiede der Energiewerte praktisch nicht bemerkt werden bzw. messbar sind. Die Schwingungen im atomaren Bereich erfolgen mit Frequenzen von 10^{14} Hz (Lichtfrequenz) und zeigen daher gut messbare diskrete Energieniveaus.
- Da die Schwingungsenergie gequantelt ist, muss die mittlere thermische Energie pro Freiheitsgrad (FHG) mindestens für eine Anregung der ersten Quantenstufe der Schwingungsenergie pro FHG ausreichen. Dies bedeutet, dass bei tieferen Temperaturen Schwingungsfreiheitsgrade nicht mehr

angeregt werden, was zu einer Abnahme der Gesamtenergie eines Systems führt.

Grundsätzlich unterscheiden sich quantenmechanischen Oszillatoren von „herkömmlichen“ harmonischen Schwingern dadurch, dass die Oszillation nicht um einen festen „Ruhepunkt“ stattfindet, sondern von einem mittleren Atomabstand ausgeht, der sich seinerseits in Abhängigkeit der thermischen Verhältnisse des Systems ändert. Die Atome nehmen also unterschiedliche Aufenthaltsorte bezogen auf einen mittleren Abstand ein, indem sie Schwingungen einer bestimmtem Frequenz ν_i in einer vorgegebenen Richtung ausführen. Diese Situation ist für eine Anordnung von Atomen in Bild 2.12 dargestellt.

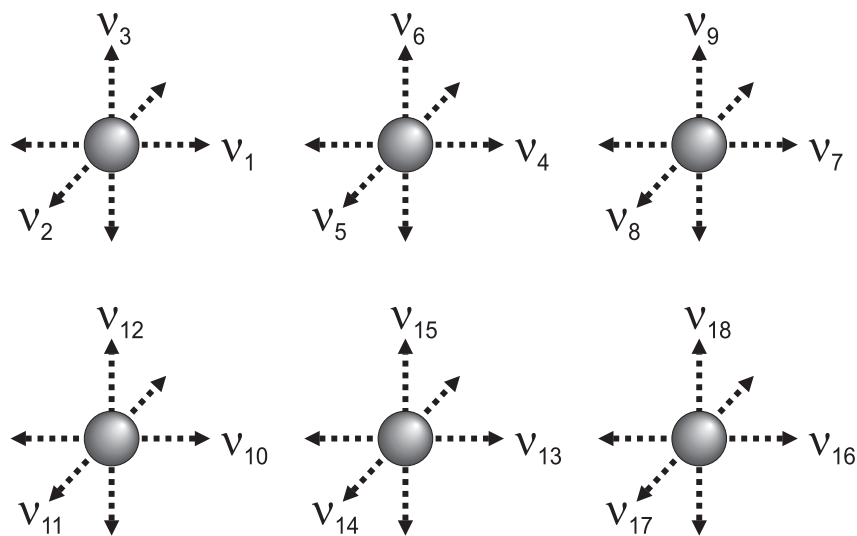


Bild 2.12: Feld von Atomen als unabhängige Schwinger

Aus dieser Modellvorstellung lassen sich entsprechend der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der einzelnen Atome und der damit verbundenen unterschiedlichen Bindungsbeziehungen mit Hilfe der Methoden der statistischen Mechanik mittlere Energien formulieren.

Energieanteile eines Festkörpers

Über die Berechnung von Gitterschwingungen im Festkörper mit Hilfe der Formulierung der freien Energie (HELMHOLTZ-Energie: $A = A(T, V, N)$) wird ein Zusammenhang zwischen dem Druck auf der 0-Kelvin-Isothermen und Zuständen höherer Energie hergestellt. Die Vorgehensweise soll im Folgenden beschrieben werden.

Die Gesamtenergie eines Festkörpers setzt sich aus der potentiellen Energie Φ der in den Schwingungsmittelpunkten als ruhend gedachten Atome und der

thermischer Energie E_{th} zusammen. Der thermische Anteil resultiert aus der Schwingung der Gitterbausteine um ihre Ruhelage (Kristallordnung), die sich, ausgehend vom absoluten Nullpunkt unter der Annahme einer isochoren Erwärmung einstellt. Mit steigender Temperatur erhöht sich die mittlere Amplitude dieser oszillierenden Bewegungen. Die Gesamtenergie des Festkörpers kann als Summe der Energien von Wellen bestimmter Frequenz beschrieben werden, die den Kristall durchziehen. GRÜNEISEN [39] bezeichnet die sich in Kristallen ausbreitenden Wellen auch als Gitterschwingung. Im Gegensatz zu Gasen oder Flüssigkeiten besteht bei Festkörpern zwischen den Atomen eine Nah- und Fernordnung, wodurch die Bewegungen der einzelnen Atome durch das Kristallgitter beschränkt sind.

Ausgehend von der Energie des einzelnen quantenmechanischen Oszillators in Gleichung (2.26) lässt sich die mittlere kinetische Energie eines Kristalls aus der Summe der Energien von $3N$ Oszillatoren mit Gleichung (2.27) berechnen.

$$\varepsilon = N \cdot h \cdot \nu \quad (2.26)$$

$$\bar{E} = \sum_{j=1}^{3N} n_j \cdot h \cdot \nu_j = \sum_{j=1}^{3N} \varepsilon_j \quad (2.27)$$

Dabei bezeichnet N die Anzahl der Atome, h die PLANKSche Konstante und ν_j ($j = 1, 2, \dots, 3N$) die unterschiedlichen Frequenzen der Schwingung. Mit einer Aussage über die Verteilung der Oszillatoren erhält man

$$\bar{E} = \sum_{j=1}^{3N} \frac{h\nu_j}{e^{h\nu_j/kT} - 1} \quad (2.28)$$

Die Gesamtenergie eines Materials lässt sich wie bereits erwähnt aus der Summe der potentiellen Energie der Atome (1. Summand in Gleichung (2.29)) und der kinetischen (thermischen) Energie resultierend aus der Gitterschwingung der Atome (3. Summand in Gleichung (2.29)) ermitteln und wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$E = \Phi(\nu) + \sum_{j=1}^{3N} \frac{1}{2} h\nu_j + \sum_{j=1}^{3N} n_j h\nu_j = \Phi(\nu) + \sum_{j=1}^{3N} \left[\frac{1}{2} h\nu_j + \frac{h\nu_j}{e^{h\nu_j/kT} - 1} \right] \quad (2.29)$$

Der 2. Summand in Gleichung (2.29) beschreibt den Energieanteil im Grundzustand (Energieanteil ohne das Vorhandensein von Schwingungen). Diese ist nur am absoluten Nullpunkt vorhanden. Zusammenfassend lassen sich die Zusammenhänge auch wie folgt ausdrücken

$$e = \Phi + e_{0K} + e_{th} \quad (2.30)$$

Darin bezeichnet Φ die potentielle Energie, den e_{0K} Energieanteil entlang der 0K-Isothermen und e_{th} den thermischen Anteil an der Gesamtenergie.

Atomare Beziehungen – makroskopische Größen

Aus der Formulierung der freien HELMHOLTZ-Energie in Gleichung (2.31) und deren Ableitung nach dem Volumen bei konstanter Temperatur erhält man aus Gleichung (2.32) den Druck p .

$$A = -kT \ln \sum e^{-E_j/kT} = \Phi(\nu) + \sum_{j=1}^{3N} \frac{1}{2} h\nu_j + kT \sum_{j=1}^{3N} \ln(1 - e^{h\nu_j/kT}) \quad (2.31)$$

$$p = - \left(\frac{\partial A}{\partial V} \right)_T = \frac{\partial \Phi}{\partial V} + \frac{1}{V} \sum_{j=1}^{3N} \Gamma_j \left[\frac{1}{2} h\nu_j + \frac{h\nu_j}{e^{h\nu_j/kT} - 1} \right] \quad (2.32)$$

Mit Gleichung (2.32) wird durch die Beschreibung der Vorgänge auf atomarer Ebene eine Beziehung zwischen den makroskopischen physikalischen Größen Druck und Volumen gewonnen. Damit lassen sich dann auch die thermodynamischen Zusammenhänge zwischen dem Druck entlang der 0-Kelvin-Isothermen und Zuständen höherer Energie herstellen (vgl. Bild 2.9 bzw. Bild 2.13).

Die Variable Γ_j in Gleichung (2.32) ist definiert als

$$\Gamma_j = - \frac{V}{\nu_j} \left(\frac{\partial \nu_j}{\partial V} \right)_T - \left(\frac{\partial \ln \nu_j}{\partial \ln V} \right)_T \quad (2.33)$$

Diese Gleichung macht deutlich, dass bei Druckbelastung eines Materials durch die Volumenänderung die Schwingungsfrequenz ν_j ansteigt. Γ_j steigt also mit kleiner werdendem Volumen und ergibt einen Wert $\Gamma_j > 0$ (siehe auch SLATER [84]).

GRÜNEISEN [38] vereinfacht die Betrachtungsweise, indem er allen Oszillatoren den gleichen Wert für Γ_j zuschreibt. Dies führt auf die in Gleichung (2.34) formulierte GRÜNEISEN-Konstante Γ

$$\Gamma = - \left(\frac{\partial \ln \nu}{\partial \ln V} \right)_T \quad (2.34)$$

Für einen Wert $\Gamma = 1$ verhält sich die Änderung der Frequenz umgekehrt proportional zur Volumenänderung. Dies bedeutet beispielsweise bei einer Verringerung eines Volumens auf die Hälfte seines ursprünglichen Volumens eine Verdoppelung der Frequenz. Mit der GRÜNEISEN-Konstante Γ ergibt Gleichung (2.32) zu:

$$p = - \frac{\partial \Phi}{\partial V} + \frac{\Gamma}{V} \underbrace{\sum_{j=1}^{3N} \left[\frac{1}{2} h\nu_j + \frac{h\nu_j}{e^{h\nu_j/kT} - 1} \right]}_{E_{VIB}} = - \frac{\partial \Phi}{\partial V} + \frac{\Gamma}{V} \cdot E_{VIB} \quad (2.35)$$

Formuliert man Gleichung (2.35) für die Verhältnisse am absoluten Nullpunkt, erhält man

$$p_{0K} = -\frac{\partial\Phi}{\partial V} + \frac{\Gamma}{V} \cdot E_{0K} \quad (2.36)$$

2.3.3 Mie-Grüneisen-Theorie

Über die Berechnung von Gitterschwingungen im Festkörper mit Hilfe der freien Energie nach HELMHOLTZ wird ein Zusammenhang zwischen dem Druck entlang der 0-Kelvin-Isothermen und Zuständen höherer Energie hergestellt. Der Ansatz, hierbei den Druck in einen Summanden entlang der 0 K-Isothermen („kalte“ Kompression) und einen Ergänzungsterm (thermischer Anteil) aufzuteilen, mündet in die Formulierung einer Zustandsgleichung nach MIE und GRÜNEISEN. Durch Subtraktion der Gleichung (2.36) von Gleichung (2.35) erhält man die sogenannte MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung

$$p - p_{0K} = \frac{\Gamma}{V} \cdot (e - e_{0K}) \quad (2.37)$$

Diese Gleichung kann allgemein wie folgt aufgefasst werden: Der Druck p lässt durch einen Druck p_{0K} entlang einer Referenzkurve (hier die 0K-Isotherme) zuzüglich eines weiteren Terms, der die Abweichung von dieser Kurve beschreibt, ausdrücken. Als Referenz kann grundsätzlich jede beliebige bekannte Kurve auf der Zustandsfläche herangezogen werden. Bei der Berechnung von Stoßwellenvorgängen hat sich die in Bild 2.9 dargestellte HUGONIOT-Kurve als geeignet herausgestellt. Für diesen Fall erhält man die MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung in der Form

$$p - p_H = \frac{\Gamma}{V} \cdot (e - e_H) \quad (2.38)$$

Die mit H indizierten Größen bezeichnen die Zustandsvariablen auf der HUGONIOT-Kurve. Durch die MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung werden bei einem gegebenen Volumen die Zustandsgrößen Druck und innere Energie eines Punktes, der sich nicht auf der HUGONIOT-Kurve befindet, mit den entsprechenden Größen auf der HUGONIOT-Kurve in Beziehung gesetzt. Die Darstellung im rechten Teil von Bild 2.9 gibt diesen Sachverhalt schematisiert wieder.

Grüneisen-Konstante

Aus den Hauptsätzen der Thermodynamik, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten α , der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v und dem Kompressionsmodul bei konstanter Temperatur K errechnet sich der Grüneisenkoeffizient Γ zu

$$\Gamma = V \cdot \frac{3\alpha}{c_v K} \quad (2.39)$$

Eine Abschätzung des GRÜNEISEN-Koeffizienten kann auf Basis eines thermodynamisch konsistenten Modells von DOUGDALE und MACDONALD [25] direkt aus Stoßwellenexperimenten über die Steigung S der U_S - u_p -Beziehung berechnet werden.

$$\Gamma \cong 2S - 1 \quad (2.40)$$

Die experimentelle Bestimmung des GRÜNEISEN-Koeffizienten hat sich bislang als schwierig erwiesen, da der Druckanteil resultierend aus einer Erhöhung des thermischen Anteils der inneren Energie im Vergleich zum Gesamtdruck klein ist. Berechnungen von OCKERT [69] zufolge zeigen sich signifikante Abweichung des Drucks entlang der porösen HUNGONIOT-Kurve von der Isotherme erst bei Drücken oberhalb von 50000 MPa. Dies entspricht einer Volumenänderung von 60%. Für den durch Kontaktdetonation erzeugten Druckbereich sind die Verhältnisse in Bild 2.13 dargestellt. Die Druckdifferenz resultiert aus dem Unterschied des thermischen Anteils der inneren Energie.

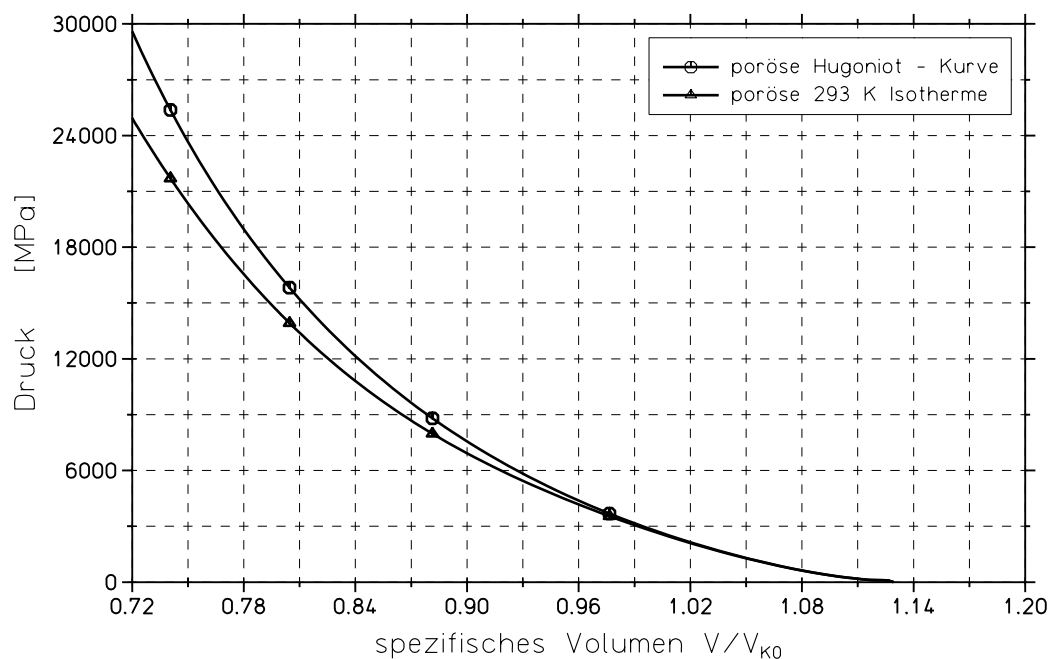


Bild 2.13: Druck entlang poröser HUNGONIOT-Kurve und 0 K- Isotherme nach Berechnungen von OCKERT [69]

Einfluss der Porosität

Das typische Kompressionsverhalten eines porösen Werkstoffs wie Beton lässt sich in drei Phasen unterteilen und ist in Bild 2.14 skizziert .

Nach einer rein elastischen Kompression in Phase A schließt sich eine irreversible Kompaktierung des Materials an (Phase B). Dieser Vorgang ist bereits bei geringem Druck zu beobachten und ist charakterisiert durch eine deutliche Abnahme der Steifigkeit des Materials, die erst bei höheren Drücken wieder ansteigt (Phase C). Erst wenn die Porenvolumina oder die Hohlräume größtenteils geschlossen sind, verhält sich der Werkstoff ähnlich einem Vollmaterial [73]. Der stark nichtlineare Kompressionspfad ist charakteristisch für das Materialverhalten eines porösen Stoffs wie Beton. Verantwortlich für dieses Verhalten ist der innere strukturelle Aufbau des betreffenden Materials. Für Beton wird dieser Aufbau in Kapitel 4 beschrieben.

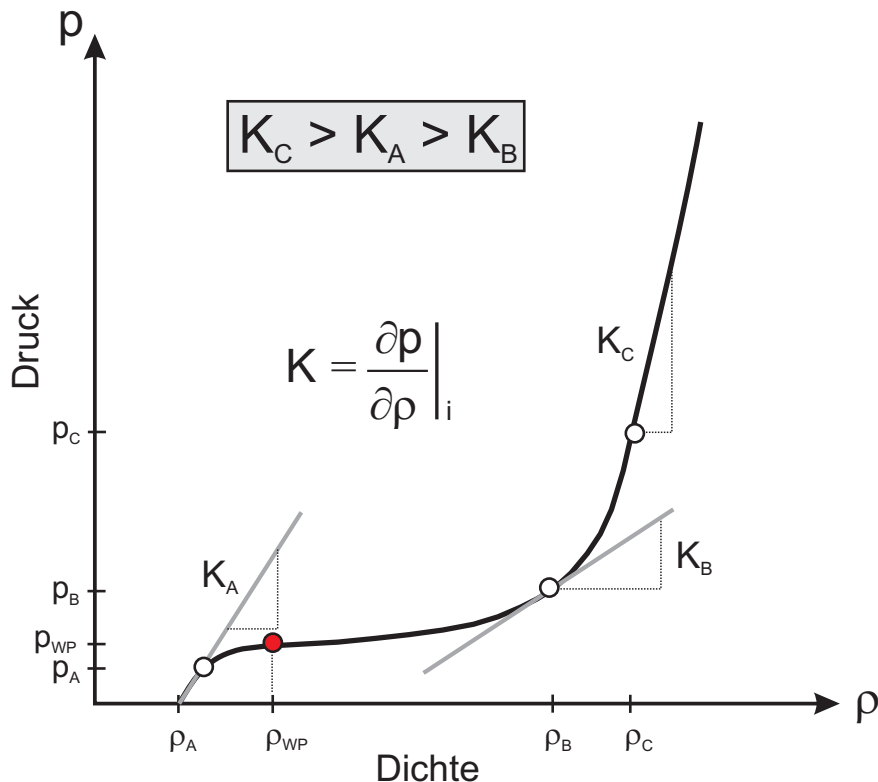


Bild 2.14: Wesentliche Phasen bei der Kompression eines porösen Materials

Für eine Zustandsgleichung zur Beschreibung des Kompaktierungsverhaltens duktiler poröser Materialien unter einer dynamischen Belastung existieren verschiedene Ansätze. Sie unterscheiden sich je nachdem, ob eine Beschreibung der Kompaktierung im niedrigen Druckbereich oder bei hoher Stoßbelastung, bei der die Festigkeit des Materials eine untergeordnete Rolle spielt, wiedergegeben werden soll.

Ansätze im niedrigen Druckbereich formulieren sowohl für den elastischen Bereich des porösen Materials als auch für den Bereich des vollkompaktierten, porenfreien Materials lineare Zusammenhänge zwischen Druck und vorhandener Dichte. Die Verknüpfung dieser beiden Extrembereiche erfolgt über die Einführung der Porosität α . Sie ist definiert als das Verhältnis der Dichte ρ_{voll} des porenfreien „Vollmaterials“ zur aktuellen Materialdichte ρ .

$$\alpha = \rho_{\text{voll}} / \rho \quad (2.41)$$

Dieser Ansatz zur Beschreibung des Materialverhaltens ist in unterschiedlichen Rechenprogrammen, z.B. im Hydrocode AUTODYN implementiert. Bei RIEDEL [73] werden für Beton die entsprechenden Materialparameter zur Formulierung der porösen Zustandsgleichung ausführlich beschrieben und tabellarisch zusammengestellt. Für Stahlfaserbeton werden von GREULICH [37] ebenso detailliert die erforderlichen Größen zusammengestellt.

Für den Fall, dass die Festigkeit des Materials durch die auftretende Stoßbelastung um ein Vielfaches überstiegen wird, lässt sich ausgehend von einer gegebenen/bekanntem Zustandsgleichung des Vollmaterials aus den Erhaltungsgleichungen und über den Ansatz einer MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung die HUGONIOT-Kurve des porösen Materials berechnen. Die Vorgehensweise basiert auf der Annahme konstanten Volumens. MEYERS [64] zeigt an einem Rechenbeispiel für poröses Kupfer, dass mit diesem Ansatz für Drücke oberhalb von 20000 MPa eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment besteht. Im Bereich geringerer Stoßintensitäten bestehen jedoch erhebliche Abweichungen vom HUGONIOT-Zustand, da dieser Ansatz den Einfluss der Festigkeit im elastischen und im Kompaktierungsbereich nicht berücksichtigt.

Eine Möglichkeit, beide Anwendungsbereiche in Einklang zu bringen, stellt der Ansatz von HERRMANN [43] dar. Bei der Beschreibung des volumetrischen Verhaltens durch ein sogenanntes p - α -Modell wird neben dem nichtlinearen Kompressionsverhalten die Zunahme der inneren Energie bei stoßintensiver Belastung berücksichtigt. Dieser Ansatz kann auf eine Zustandsgleichung des Typs von Gleichung (2.23) angewendet werden:

$$p = f(V, e) \xrightarrow{p - \alpha - \text{Modell}} p = f\left(\frac{V}{\alpha}, e\right) \quad (2.42)$$

Die grundlegende Annahme dieses Ansatzes ist, dass die anfängliche innere Energie bei gleichen Randbedingungen (Druck, Temperatur) unabhängig von der Porosität des Materials ist.

HERRMANN [43] definiert in seinem Ansatz die Porosität als thermodynamische Zustandsvariable in Abhängigkeit des Drucks und der inneren Energie (siehe Gleichung (2.43)). Wegen der Schwierigkeit diese allgemeine Funktion experimentell zu bestimmen, wurde von HERRMANN [43] vorgeschlagen, α nur in Abhängigkeit vom Druck zu beschreiben. So wird aus bekannten Hugoniotzu-

ständen des Vollmaterials mit impliziter Abhängigkeit von der inneren Energie der Kompaktierungspfad abgeleitet:

$$\alpha = g(p, e) \quad \text{bzw.} \quad \alpha = g(p) \quad (2.43)$$

Durch diesen Ansatz werden Druck, Porosität und Dichte implizit miteinander gekoppelt. Ist der Druck bekannt, kann daraus der aktuelle Zustand auf dem Kompaktierungsast berechnet werden [73]. Für die Funktion $g(p)$ wurde z.B. von OCKERT auf Basis eigener Versuchsdaten und Daten von GRADY [31] und GREGSON [36] ein Verlauf für die Porosität berechnet. Andere Vorschläge für „poröse“ Zustandsgleichungen enthalten die Programmbibliotheken numerischer Rechenverfahren, z. B. AUTODYN [5].

Temperatureinfluss

Aus der beim Durchgang einer Stoßwelle am Werkstoff verrichteten plastischen Arbeit (Kompaktierungsverhalten) resultiert aus der Dichteänderung eine Zunahme der inneren Energie. Anhand der Energieerhaltungsgleichung (2.22) lässt sich dies belegen. Die bereits erwähnten Untersuchungen von OCKERT [69] verdeutlichen dies (vgl. Bild 2.15).

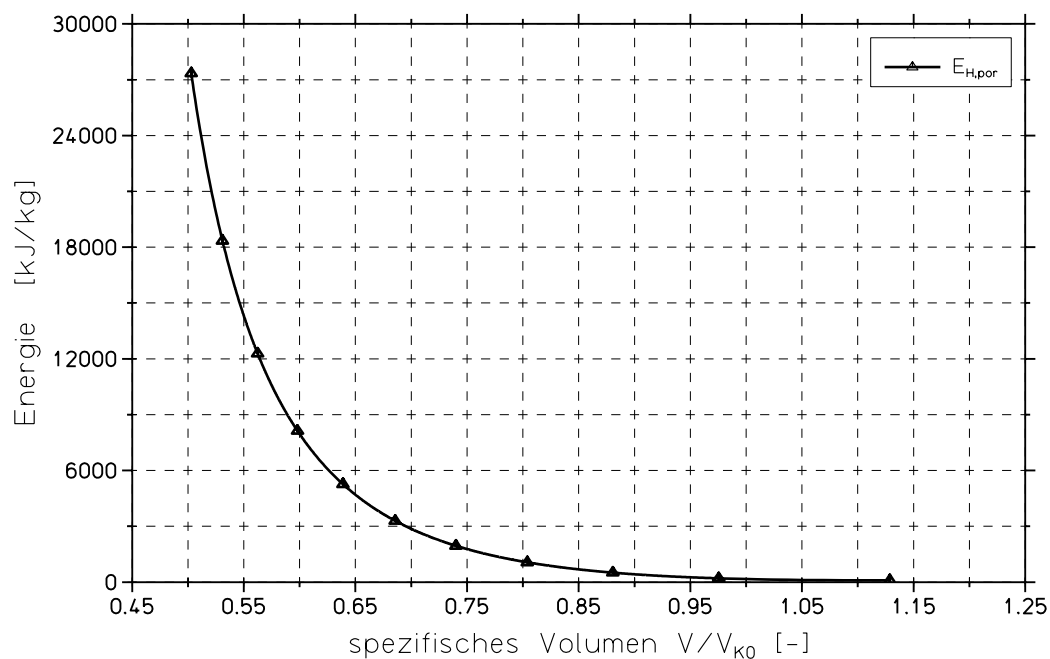


Bild 2.15: Zunahme der Gesamtenergie bei Kompression nach Berechnungen von OCKERT [69]

Der Anstieg der Gesamtenergie ist insbesondere auf den thermischen Anteil der inneren Energie zurückzuführen und kann durch Gleichung (5.7) beschrieben werden:

$$E_{th} = m \cdot c \cdot T \quad (2.44)$$

Darin bezeichnet m die Masse, c die spezifische Wärmekapazität und T die absolute Temperatur.

Die Erhöhung des thermischen Anteils ist im vorliegenden Fall mit einem Anstieg der Temperatur verbunden. Vorausgesetzt werden muss hier allerdings, dass dem System Wärme (Prozessgröße) zugeführt wird (Steigerung der mittleren kinetischen Energie). Durch den Kompressionsvorgang wird dem System Wärme zugeführt, was einen Wärmestrom (=Wärmemenge pro Zeiteinheit) bedingt. Die Kurzzeitigkeit dieses Vorgangs rechtfertigt die Annahme eines Prozesses mit vernachlässigbarer Wärmeabfuhr (Annahme eines adiabatischen Prozesses). Dadurch tritt nur kurzzeitig eine Erhöhung der Temperatur innerhalb des Materials auf.

MEYERS [64] zeigt, wie die Zunahme der inneren Energie, die auf den Durchgang einer Stoßwelle zurückzuführen ist, in eine äquivalente Temperatur umgerechnet werden kann. Die Berechnungsgleichung kann aus der MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung und weiteren thermodynamischen Beziehungen abgeleitet werden und gestattet es, die Temperatur als Funktion des Volumens an jedem Punkt der HUGONIOT-Kurve zu berechnen:

$$\begin{aligned} T &= T_0 \cdot e^{\frac{\Gamma_0}{V_0} \cdot (V - V_0)} \\ &= \frac{(V - V_0)}{2C_v} \cdot p + \frac{e^{(-\Gamma_0/V_0)V}}{2C_v} \\ &\cdot \int_{V_0}^V p \cdot e^{(-\Gamma_0/V_0)V} \left[2 - \frac{\Gamma_0}{V_0} \cdot (V - V_0) \right] dV \end{aligned} \quad (2.45)$$

Mit Gleichung (2.45) ermittelt OCKERT [69] für unterschiedliche „Materialzustände“ die Temperatur entlang der zugehörigen HUGONIOT-Kurven. Das Ergebnis seiner Berechnung für Beton (poröse HUGONIOT-Kurve) ist in Bild 2.16 dargestellt.

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Energie und zur Temperatur entlang der HUGONIOT-Kurve liegen bislang nur vereinzelt vor. Eine Erklärung hierfür findet man durch Vergleich der Kurven in Bild 2.13. Erst im Bereich hoher Drücke wird ein Unterschied zwischen der 0K-Isothermen und der experimentell ermittelten porösen HUGONIOT-Kurve deutlich, was bei experimentellen Untersuchungen erschwerend hinzukommt. Einen ersten Ansatz zur messtechnischen Erfassung von Punkten entlang des Temperaturverlaufs der HUGONI-

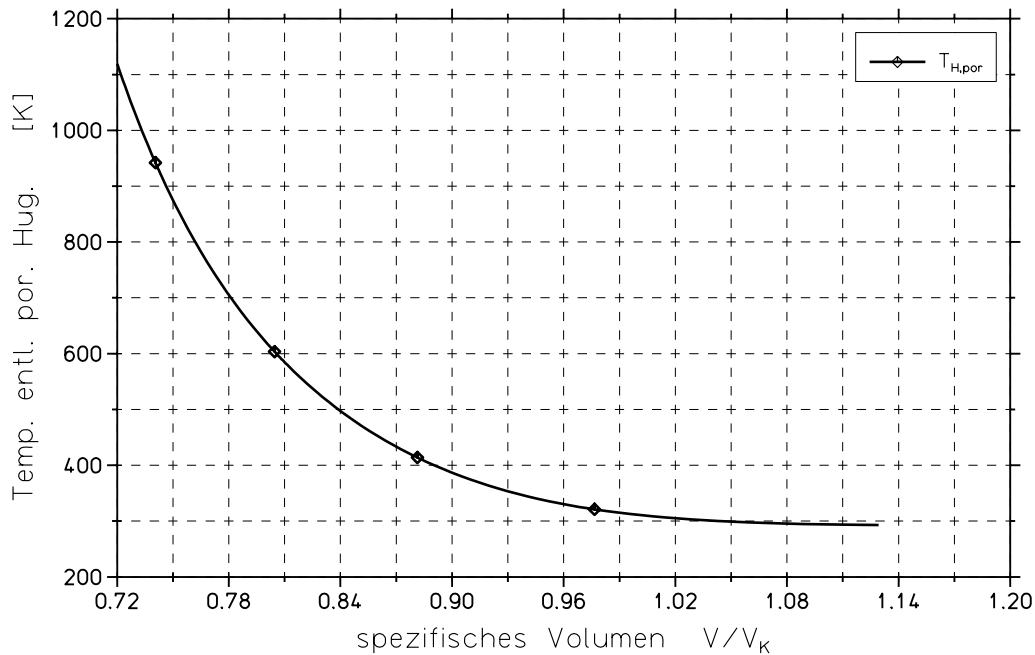


Bild 2.16: Temperatur entlang der porösen HUGONIOT-Kurve von Beton nach OCKERT [69]

OT-Kurve von Beton findet man in der Arbeit von HERRMANN[42]. In Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit wird eine auf diesem Ansatz basierende Methode vorgestellt, mit der durch Messung des Wärmestroms Angaben zur inneren Energie entlang der HUGONIOT-Kurve (vgl. Bild 2.15) möglich sind.

2.4 Festigkeit. Materialmodelle

Eine Beschreibung von Versagenserscheinungen mit Hilfe mathematischer Modelle kann auf Basis der auftretenden Spannungen erfolgen. Dazu kann man Flächen im Spannungsraum definieren, die das Eintreten von bestimmten Versagensarten kennzeichnen. Die Mechanismen, die zu einem Versagen von Werkstoffen führen, können sehr unterschiedlich sein. Versagen kann sich unter Zugbelastung als duktileres Zerreißen, unter Schubbelastung als Abscheren oder bei Druckbeanspruchung durch ein Zerstören der Poren äußern. In der Regel ist für die jeweilige Versagensart eine Kette unterschiedlicher Mechanismen verantwortlich. Das Beispiel eines Zugstabes verdeutlicht dies. Ausgehend von Mikrofehlstellen innerhalb des Materials bilden sich bei einer Zunahme der Belastung größere Hohlräume, die allmählich zusammenwachsen und zu einem makroskopisch sichtbaren Riss führen, als dessen Folge dann Versagen eintritt [46].

Im Rahmen dieses Abschnitts soll die grundlegende Beschreibung der Festigkeit eines Materials nur in dem Maße behandelt werden, als es zum Verständnis

der in Kapitel 4 beschrieben und zur Darstellung der in Kapitel 5 messtechnisch untersuchten Betoneigenschaften erforderlich erscheint. Eine umfassende Aufarbeitung der Materialtheorien und deren mathematische Formulierung ist u.a. bei CHEN [18], [19] und HIERMAIER [46] zu finden. Eine Übersicht ausgewählter Materialmodelle von Beton wird am Ende dieses Abschnitts gegeben.

Spannungszustände

Üblicherweise herrschen in Bauteilen räumliche Spannungszustände. Allgemein wird ein Spannungszustand eines isotropen, homogenen Werkstoffs durch die Spannungen σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} und τ_{zx} in einem beliebig gewählten x-y-z-Koordinatensystem beschrieben (Bild 2.17).

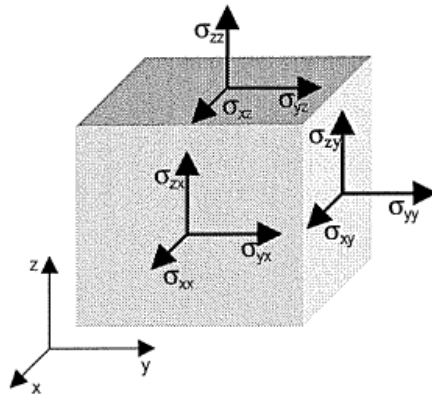


Bild 2.17: Normal- und Schubspannungen an einem infinitesimal kleinen Würfel

Die eingetragenen Spannungen können in der symmetrischen Matrix

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

zusammengefasst werden. In ihr stehen die Koordinaten des Spannungstensors. Es gilt die Gleichheit einander zugeordneter Schubspannungen $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. Eine Darstellung des Spannungszustandes durch die sechs unabhängigen Komponenten des Spannungstensors ist im allgemeinen nicht besonders anschaulich.

Wird für die Beschreibung des Materialversagens ein spannungsbasiertes Kriterium verwendet, so muss dies unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems sein, in dem der Spannungszustand beschrieben wird. Eine Möglichkeit zur Charakterisierung des Spannungszustandes bietet die Darstellung im Hauptspannungsraum. Speziell orientierte Flächen in diesem Raum bieten die Möglichkeit zu einer Formulierung in Oktaederspannungen oder einer Darstellung in HAIGH-WESTERGAARD-Koordinaten. Diese Beschreibungen sind anschaulich und bieten gute geometrische Interpretationsmöglichkeiten des Spannungszustandes. Die Quantifizierung des Spannungszustandes kann hier über die Invarianten des Spannungstensors (als skalare Größen) erfolgen. Diese Möglichkeit soll im Folgenden entwickelt werden.

Meist sind bei der Beschreibung des Materialverhaltens die Größtwerte der auftretenden Spannungen von besonderem Interesse. Durch eine Transformationsvorschrift (Hauptachsentransformation) kann der Spannungszustand eines Körpers in beliebigen Schnittebenen ausgedrückt werden. Erfolgt die Drehung des Koordinatensystems in der Weise, dass die Schubspannungen in der oben dargestellten Matrix verschwinden, lässt sich der Spannungszustand eindeutig durch die drei verbleibenden Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 ausdrücken. Für die Hauptnormalspannungen selbst ergeben sich bei einer Drehung des Koordinatensystems keine Änderungen: Hauptnormalspannungen sind invariant gegenüber einer Drehtransformation.

Die Invarianten des Spannungstensors sind Größen, die aus den Hauptnormalspannungen zusammengesetzt sind. Jeder Ausdruck, der aus den Hauptnormalspannungen gebildet wird, stellt selbst wieder eine Invariante dar. Üblicherweise verwendet man die Invarianten I_1 , I_2 und I_3 da sie sich am einfachsten explizit als Funktionen der Spannungen σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} und τ_{zx} in einem beliebig gewählten Koordinatensystem ausdrücken lassen (WITTENBURG [93]).

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad I_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \quad I_3 = (\sigma_1\sigma_2\sigma_3) \quad (2.46)$$

Weitere Möglichkeiten zur Beschreibung des Spannungszustandes

Wie erwähnt lässt sich jeder Spannungszustand durch Hauptachsentransformation in ein Koordinatensystem umrechnen, in dem alle Schubspannungen verschwinden. Wenn man in diesem Koordinatensystem die drei Normalspannungen zu einem Vektor zusammenfasst, kann man diesen in zwei Komponenten zerlegen. Dieses Vorgehen ist üblich bei der Beschreibung des materialabhängigen Verhaltens durch Stoffgleichungen und führt zu einer Aufspaltung des Spannungstensors in einen hydrostatischen und einen deviatorischen Anteil.

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - p\delta_{ij} \quad (2.47)$$

Die Komponente in Richtung der Raumdiagonalen des infinitesimal kleinen Würfels beschreibt dann den hydrostatischen Druck p und die deviatorische Komponente S_{ij} quer zur Raumdiagonalen ist ein Maß dafür, wie groß in anderen Schnittrichtungen die Schubspannungen maximal werden können. Der Spannungszustand selbst lässt sich wiederum durch Invarianten ausdrücken. Hierbei werden häufig die 1. Invariante des Spannungstensors I_1 und die beiden Invarianten J_2 und J_3 des Spannungsdeviators aufgeführt.

Oktaederspannungen

Eine Alternative zu den Invarianten I_1 , J_2 und J_3 ist die Beschreibung in Oktaederspannungen σ_{oct} und τ_{oct} und zugehörigem Winkel Θ . Diese Beschreibung bietet eine gute Interpretationsmöglichkeit der Geometrie und der physikalischen Vorgänge beim Versagen.

Der Einheitsvektor schließt in dieser Darstellung mit allen drei Hauptachsen gleiche Winkel ein, was dazu führt, dass in jeder Fläche des Oktaeders dieselbe Normalspannung σ_{oct} und dieselbe Schubspannung τ_{oct} vorhanden ist (vgl. Bild 2.18, links). Der hydrostatische Anteil wird wiederum durch die Invariante I_1 ausgedrückt und die Scherspannungskomponente durch die Invarianten I_2 und I_3 . Identisch hierzu ist die Darstellung durch die Invarianten I_1 , J_2 und Θ in Bild 2.18, rechts.

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \cdot I_1 \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \tau_{oct} &= \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{I_1^2 + 3I_2} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3} J_2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Versagensflächen und besondere Schnitte

Für die Darstellung des Materialverhaltens werden besondere Schnittflächen verwendet. Ebenen normal zur hydrostatischen Achse $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ bilden sogenannte Deviatorschnitte (Bild 2.18) mit konstantem hydrostatischen Druck und werden durch die folgende Gleichung beschrieben.

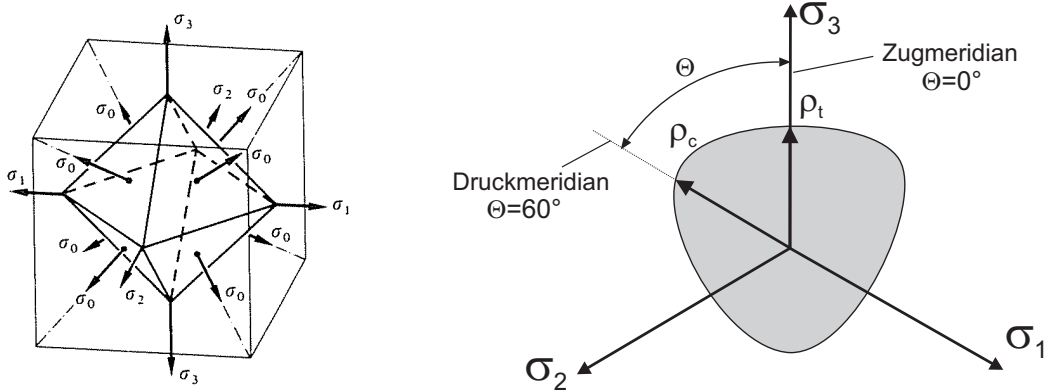


Bild 2.18: Würfel mit Kanten entlang den Spannungshauptachsen und Lage der acht Schnittebenen, in denen die Oktaederspannungen auftreten (links); Deviatorschnitt und HAIGH-WESTERGAARD Koordinaten (rechts)

$$p = \sigma_m = \sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \text{konst.} \quad (2.50)$$

Die Schnitte verschiedener Bruchflächen mit der Deviatorebene erzeugen die Kurven in Bild 2.19 (links). Solche Schnittkurven begrenzen jeweils die zulässigen Spannungszustände in dieser Ebene nach außen. Bezüglich der Hauptachsen zeigt der Schnitt eine Dreifach-Symmetrie mit Sektoren von 120° . Aus der Winkelkoordinate Θ lässt sich der Betrag der Hauptspannung im entsprechenden Segment aus der zweiten und dritten Invariante des Spannungstensors berechnen.

$$\cos 3\Theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_3}{I_2^{3/2}} \quad (2.51)$$

Bildet man für einen konstanten Winkel Θ eine Ebene, die die hydrostatische Achse enthält und bringt diese mit der Bruchfläche zum Schnitt, erhält man die Meridiane der Bruchfläche. Bild 2.19 zeigt im rechten Teil die Verläufe der Meridiane von Versagensflächen unterschiedlicher Materialtheorien. In Kapitel 4 werden für den Werkstoff Beton zwei ganz wesentliche Meridiane vorgestellt und deren Bedeutung für die Form einer Bruchfläche erläutert.

Plane-Wave

Der beschriebene, allgemeine räumliche Spannungszustand vereinfacht sich für den Fall einer ebenen Belastungswelle. Ein solcher Spannungszustand kann im

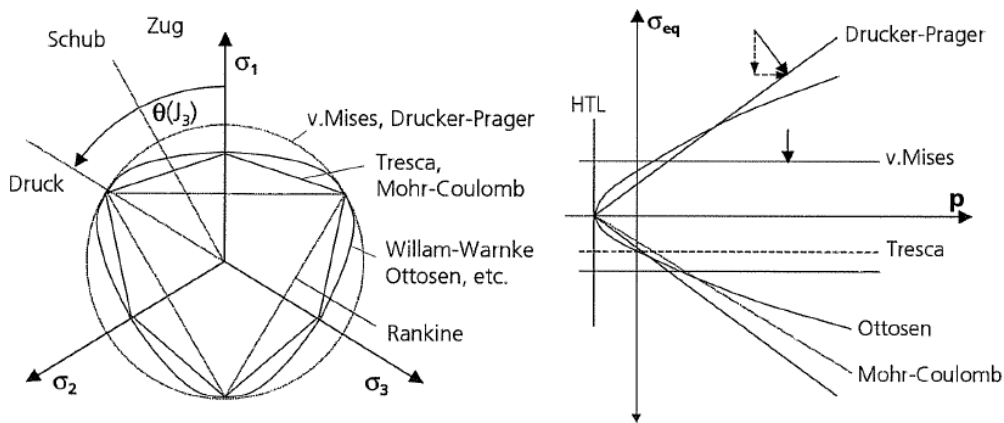


Bild 2.19: Deviatorschnitt (links) und Meridianschnitt (rechts) unterschiedlicher Fließ- und Versagensflächen nach [73]

Experiment - zumindest in einem gewissen Bereich eines Versuchskörpers - mit einem Plane-Wave Generator erzeugt werden (vgl. Kapitel 5). Für einen auf diese Weise erzeugten Spannungszustand gilt $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$, wobei die Richtung der σ_1 - Achse so gewählt wird, dass sie mit der Belastungsrichtung zusammenfällt (Axialsymmetrie).

Sind die Spannungen quer zur Belastung (σ_{rad}) und in Belastungsrichtung (σ_{ax}) bekannt, so lässt sich eine Vergleichsspannung σ_{eq} (z.B. VON MISES [66]) oder der hydrostatische Druck p berechnen.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \stackrel{\text{axialsymm.}}{=} |\sigma_{ax} - \sigma_{rad}| \quad (2.52)$$

$$p = -\frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \stackrel{\text{axialsymm.}}{=} -\frac{1}{3} \cdot (\sigma_{ax} + 2\sigma_{rad}) \quad (2.53)$$

Wählt man z.B. Oktaederspannungen zur Darstellung des Spannungszustandes, so kann man bei Kenntnis des hydrostatischen Drucks und einer Spannung oder bei Kenntnis von zwei zueinander senkrechten Spannungen den deviatorischen Anteil des Spannungstensors berechnen. Auf diese Weise lassen sich Anhaltswerte über die Form der Versagensfläche von Beton (vgl. Kapitel 4, Bild 4.8) bei hohen hydrostatischen Drücken gewinnen.

Die Vorgehensweise bei der Messung dieser Spannungskomponenten und die daraus abgeleiteten Größen werden in Kapitel 5, Abschnitt 5.5.2 vorgestellt.

Versagensflächen und Betonmodelle

Nach CHEN [19] können unter der Voraussetzung eines isotropen Materialverhaltens sowohl die elastische Grenzfläche als auch die Bruchfläche als Flächen im Hauptspannungsraum dargestellt werden. Die folgenden Ausführungen besitzen daher sowohl für Fließflächen als auch für Bruchflächen gleichermaßen Gültigkeit. Aufgrund ihrer Anschaulichkeit und leichten physikalischen Deutung werden i.d.R. Formulierungen in einem Oktaeder-System oder darauf basierende, sogenannte HAIGH-WESTERGAARD-Koordinaten verwendet.

Betonmodelle definieren eine Fließfläche, eine Bruchfläche und eine Fläche für die Restfestigkeit. Die Fließfläche beschreibt denjenigen Spannungszustand, bei dem plastisches Fließen eintritt. Eine Bruchfläche gibt den vom Werkstoff maximal ertragbaren Spannungszustand an. Die Bruch- oder Versagensfläche dient häufig als Bezugsfläche, aus der die Fließfläche durch Skalierung hervorgeht. Mit Restfestigkeit meint man Spannungen, die bei einer vollständigen Schädigung des Werkstoffs noch übertragen werden können. Bild 2.20 gibt einen perspektivischen Eindruck der Form von Fließ- und Versagensfläche.

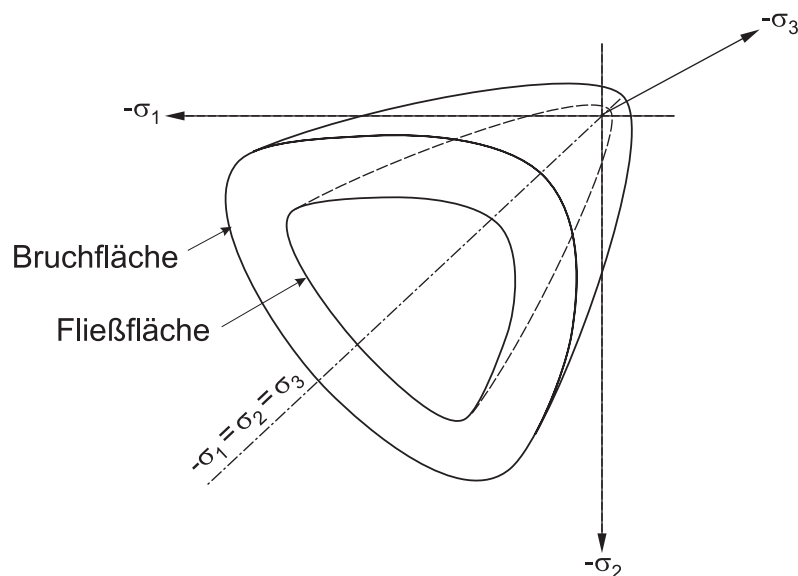


Bild 2.20: Darstellung von Fließfläche und Versagensfläche eines Werkstoffs im Hauptspannungsraum nach CHEN [19]

Für die Beschreibung von Versagensflächen gibt es eine Vielzahl von Modellen, die sich nach Anzahl der Parameter einteilen lassen. Dabei hat sich gezeigt, dass mit steigender Anzahl von Parametern das Verhalten des Beton zunehmend besser abgebildet werden kann. Die lineare Abhängigkeit zwischen hydrostatischem Druck und der Spannung entlang der Meridiane zweiparametrischer Modelle, wie beispielsweise im MOHR-COULOMB- oder im DRUCKER-PRAGER-

Modell, erfassen das Materialverhalten von Beton nur unzureichend. Für die Beschreibung von Beton sind vier- und fünfp-parametrische Modelle nach HSIEH-TING-CHEN [52], OTTOSEN [70], oder WILLAM und WARNKE [92] Stand der Technik. Ausführlich werden diese Modelle z.B. bei CHEN [17], [18] beschrieben. Arbeiten von SCHULER [82], RUPPERT [79], LARCHER [60] und HIERMAIER [46] geben eine gute Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften von Betonmodellen. Bild 2.21 zeigt vervollständigend eine Übersicht ausgewählter Werkstoffmodelle aus CHEN [18]. Eine detaillierte Beschreibung der Form der Versagensfläche von Beton, insbesondere in Abhängigkeit des vorhandenen hydrostatischen Drucks, enthält ebenfalls Kapitel 4.

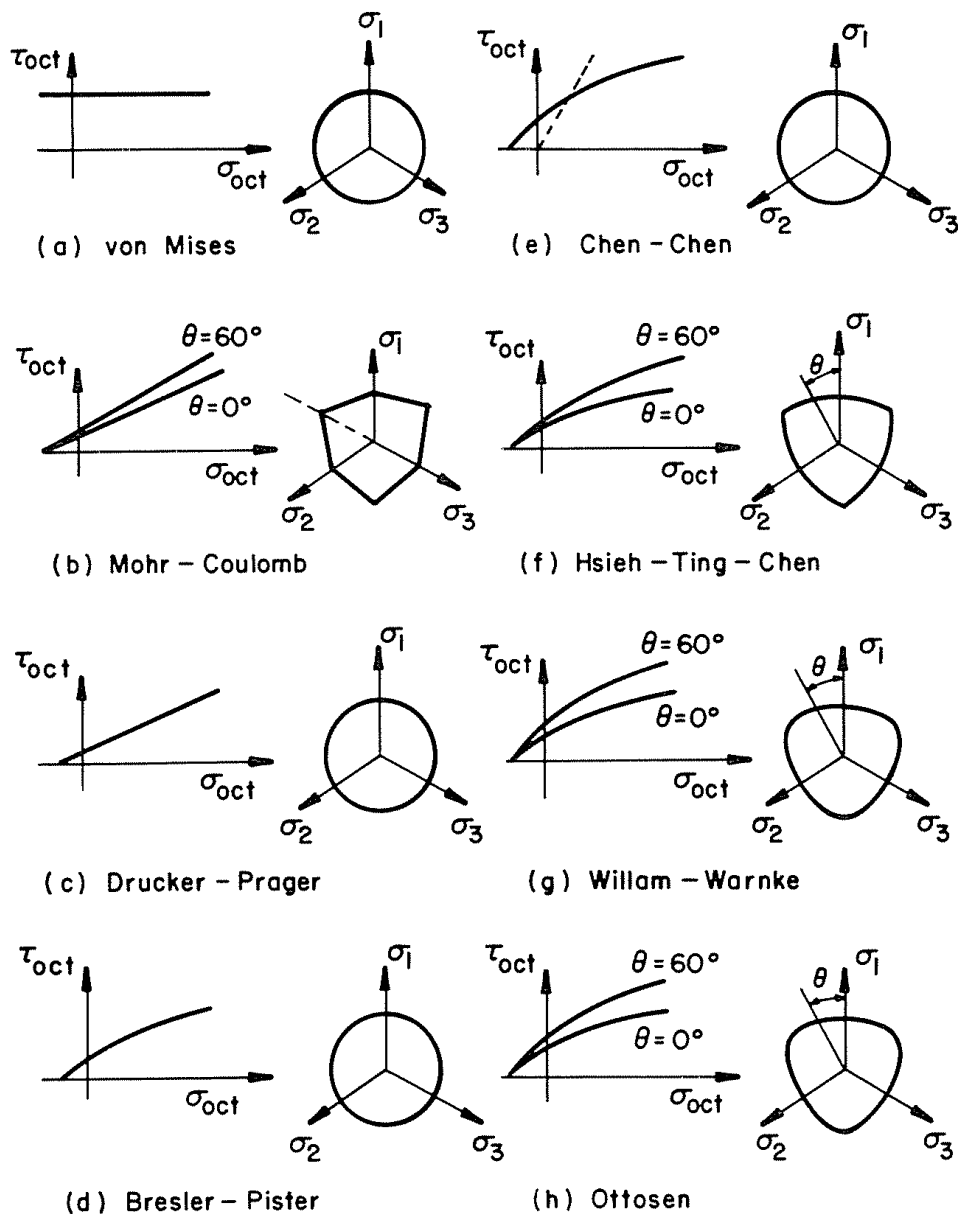


Bild 2.21: Ausgewählte Werkstoffmodelle aus CHEN [18]

2.5 Werkstoffsimulation

Einführung nach HIERMAIER [47]

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen zum Materialverhalten von Beton unter einer Kontaktdetonation stehen in engem Zusammenhang mit dem Auftreten von Stoßwellen. Der Eintrag einer Stoßwelle in ein Bauteil bzw. einen Versuchskörper stellt eine kurzzeitig wirkende schlagartige Belastung dar. Verbunden mit dieser Belastung sind physikalische Vorgänge, die große Verformungen innerhalb des Materials hervorrufen sowie zu starker Rissbildung und einer Fragmentierung des Materials führen. Darüber hinaus ist der Einfluss der Wellenausbreitung auf die Materialantwort entscheidend. Will man solche Prozesse numerisch abbilden, so müssen die physikalischen Vorgänge in einer geeigneten Weise erfasst und beschrieben werden. Die räumliche Diskretisierung des Vorgangs muss unter Berücksichtigung der auftretenden Verformungen, der Rissbildung und ggf. einer Fragmentierung des Materials erfolgen. Aufgrund des signifikanten Einflusses der Wellenausbreitung auf die Materialantwort muss die Diskretisierung des Vorgangs in der Zeit so erfolgen, dass die sich mit der lokalen Schallgeschwindigkeit ausbreitenden Wellen erfasst werden können. Die Werkstoffmodelle für kurzzeitdynamische Vorgänge werden in der Regel in zwei „Komponenten“ unterteilt:

- Eine hydrostatische Komponente in Form einer nichtlinearen Zustandsgleichung zur Beschreibung der Entwicklung und Ausbreitung von Stoßwellen
- Eine deviatorische Komponente zur Abbildung des elastisch-plastischen Materialverhaltens bis zum Versagen.

HIERMAIER [46], [47] gibt in den genannten Referenzen eine sehr gute Darstellung der Theorie und der Formulierung von Rechenprogrammen des Typs „Hydrocode“. Da im Rahmen der eigenen Arbeit keine numerische Simulation durchgeführt wurde, beschränken sich die weiteren Ausführungen dieses Abschnitts auf wesentliche Elemente zu diesem Themenkomplex. Die netzfreie numerische Methode des elementfreien Galerkin-Verfahrens (EFG-Verfahren) wird abschließend an zwei Simulationsbeispielen kurz vorgestellt.

Hydrocodes

Rechenprogramme, die als Funktionen des Ortes und der Zeit Stoßwellen abbilden und Geschwindigkeiten, Spannungs-Dehnungsbeziehungen, etc. berechnen, bezeichnet man als „Hydrocodes“ (ANDERSON [1]). In ihren ursprünglichen Formulierungen beschränkte sich die Anwendung von Hydrocodes auf Fragestellungen der Hydrodynamik. Unter Vernachlässigung des Einflusses der Materialfestigkeit wurden in späteren Anwendungen auch Festkörper, (meist Metalle) in einem Beanspruchungsbereich untersucht, indem das Materialverhalten

näherungsweise wie das eines Fluids betrachtet werden kann. Daher werden Hydrocodes häufig auch als Wellenausbreitungsprogramme bezeichnet.

Ein solches fluidähnliches Verhalten von Festkörpern findet man bei physikalischen Vorgängen im Bereich extremer Drücke, wie z.B. bei Meteoritenimpakt, der Wirkung von Kernwaffen oder auch bei Kontaktdetonationen.

Heute wird mit diesem Typ Rechenprogramm allgemein instationäres, (kurzzeit)dynamisches Fluid- und Strukturverhalten beschrieben [47]. Speziell bei Stoßbelastungen sind diese Prozesse mit irreversiblen Energieeinträgen durch die Stoßwellen verbunden. Die Energieänderungen ergeben sich aus der Lösung der Erhaltungsgleichung (2.19). Darüber hinaus werden in Hydrocodes die Erhaltungsgleichungen für Masse (2.17) und Impuls (2.18) gelöst. Bild 2.22 zeigt den Berechnungszyklus eines Hydrocodes mit seinen wesentlichen Merkmalen:

- Lösen der Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie,
- Explizite Zeitintegration,
- Verwendung unterschiedlicher räumlicher Diskretisierungsmethoden
- Aufspaltung des Spannungstensors in einen hydrostatischen und deviatorischen Anteil.

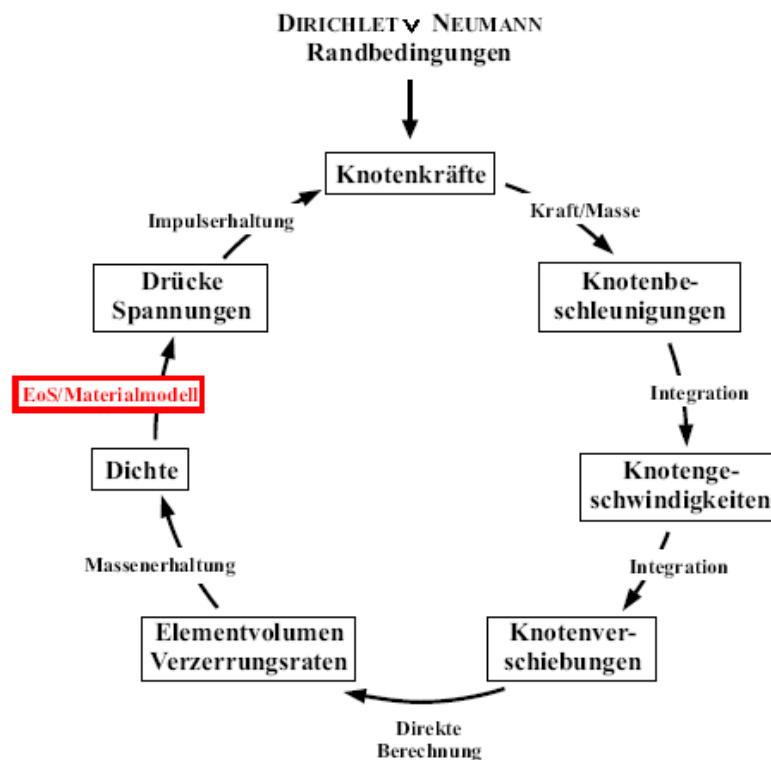


Bild 2.22: Berechnungszyklus eines Hydrocodes, GREULICH [37]

Numerische Methoden – Varianten

Elementfreies Galerkin-Verfahren – EFG-Verfahren

Am IfMB wurde zeitgleich zu den hier vorgestellten Untersuchungen von LARCHER [60] u.a. das Verhalten von Beton unter Stoßwellenbelastung mit Hilfe des EFG-Verfahrens numerisch untersucht. Im Gegensatz zur Finiten-Elemente-Methode erfolgt die räumliche Diskretisierung beim EFG-Verfahren nur über Knoten. Eine „Kopplung“ der Interpolationspunkte erfolgt hier nicht über Elemente und deren Ansatzfunktionen, sondern durch Formfunktionen. Dadurch lässt sich festlegen, welchen Einfluss verschiedene Knoten in der definierten Umgebung eines betrachteten Interpolationspunktes auf diesen Punkt besitzen. Diese Unabhängigkeit von Elementen ist einer der Vorteile dieser Methode.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die relativ einfache Implementierung von Diskontinuitäten, z.B. von diskreten Rissen über Wichtungsfunktionen. Dabei besitzen dann Knoten auf der einen Seite eines Rissufers keinen Einfluss mehr auf, zwar benachbarte, aber auf der anderen Seite des Rissufers gelegene Punkte, indem sie in der Wichtungsfunktion nicht mehr erfasst werden. In der Berechnung wird der Riss durch das Abschneiden der Wichtungsfunktion an der Stelle des Risses berücksichtigt. Bild 2.23 zeigt den Vergleich einer Wichtungsfunktion ohne und mit einem Riss.

Der grundlegende Unterschied des EFG-Verfahrens zu anderen Finiten Verfahren liegt jedoch darin, dass keine starre gegenseitige Zuordnung der Knoten vorliegt. Die Zuordnung kann während der Berechnung angepasst werden und wird dann für jedem Zeitschritt neu berechnet.

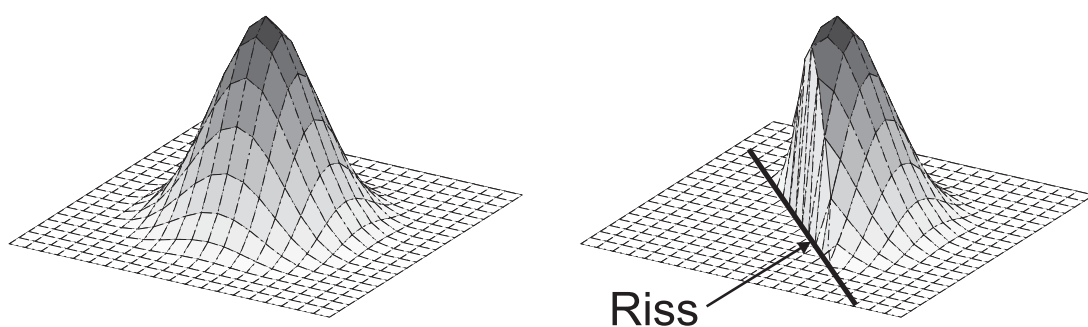


Bild 2.23: Wichtungsfunktion EFG nach LARCHER [60]; (links) ohne Riss, (rechts) mit Riss

In den Bildern 2.24 und 2.25 ist jeweils der Vergleich zwischen der numerischen Simulation von LARCHER [60] und dem experimentellem Ergebnis der hier vor-

gestellten, durch Kontaktdetonation belasteten Versuchskörper dargestellt. Erforderlichen Daten zur Kalibrierung des Materialmodells wurden aus den experimentellen Ergebnissen dieser Arbeit herangezogen. Insbesondere erfolgte die Validierung des Rechenmodells mit Hilfe der in Kapitel 5, Abschnitt 5.6 dargestellten visuellen Auswertungen der Versuchskörper.

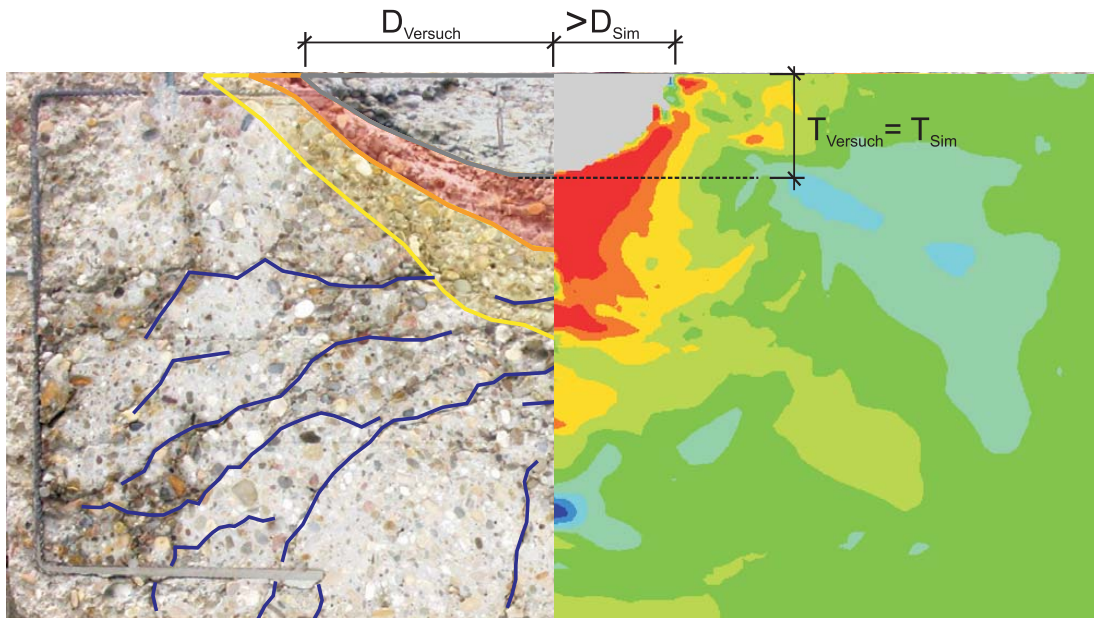


Bild 2.24: Vergleich Simulationsergebnis Krater – Versuchskörper

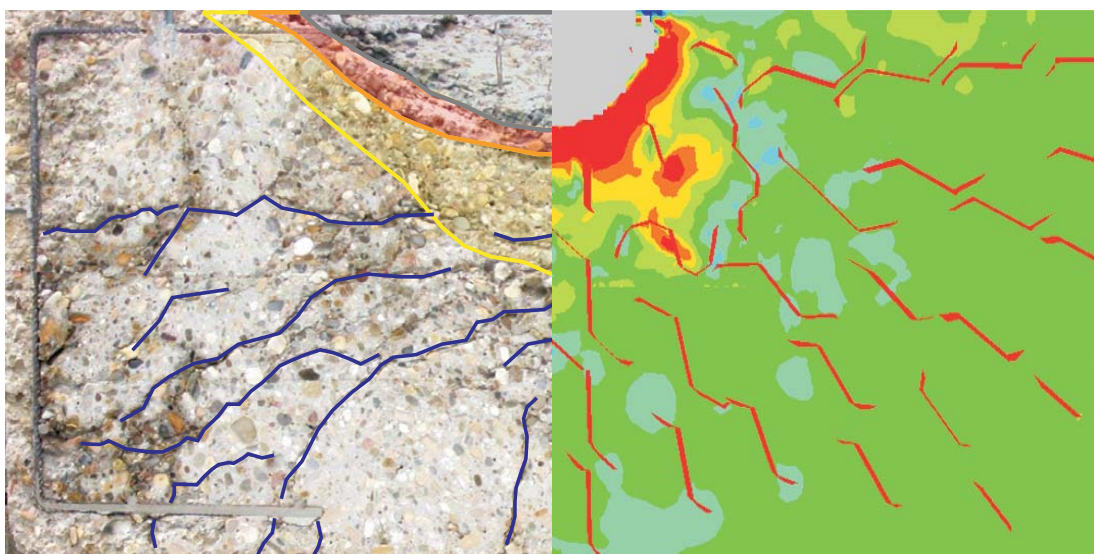


Bild 2.25: Vergleich Simulationsergebnis Risse – Versuchskörper

Die Kratertiefe (Bild 2.24, 2.25) und die Rissbildung (2.25) zeigen eine gute Übereinstimmung von Numerik und Experiment. Beim Durchmesser des Kraters ist eine deutliche Abweichungen zwischen experimentellem Ergebnis und numerischer Simulation erkennbar.

Da bei netzfreien Methoden die Interpolationspunkte den Einfluss auf ihre Nachbarn ohne weiteres verlieren können, ist beim Erreichen bestimmter Grenzwerte im Gegensatz zu anderen Finiten Methoden keine Element-Erosion erforderlich. Eine Ursache für den zu geringen Durchmesser der Berechnung ist darin zu sehen, dass der Einfluss, sich an der Oberfläche ausbreitender Belastungswellen (vgl. Bild 2.1) in den meisten numerischen Simulationen nicht ausreichend erfasst wird. Nach aktuellem Kenntnisstand liegt dies in erster Linie daran, dass in diesem Bereich für die Kalibrierung der Berechnungsmodelle keine Versuchsdaten vorliegen.

In Rahmen der messtechnischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden Messelemente entsprechend angeordnet um diese Datenlücke zu schließen (vgl. Kapitel 5, Abschnitt 5.5.2).

3 Entstehung von Stoßwellen – Detonationstheorie

Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Verhalten von Betonkörpern vorgestellt, die mit einer aufgelegten Sprengladung belastet wurden. Verbunden mit dieser Art der Belastung sind Stoßwellen, die lokal zu Spitzen drücken bis ca. 20000 MPa führen. Eine Erzeugung von Druckwerten dieser Größenordnung ist im Experiment nur mit dem Einsatz von Sprengstoffen möglich. Die Kenntnisse der theoretischen Zusammenhänge bei dieser Art der Lasterzeugung und dem damit verbundenen Lasteintrag sind von grundlegender Bedeutung für die Auswertung der in Kapitel 5 vorgestellten experimentellen Untersuchungen.

3.1 Detonationsvorgang

Eine Detonation ist ein Vorgang, bei dem in extrem kurzer Zeit Energie freigesetzt wird. Dabei erfolgt innerhalb einer sehr schmalen Reaktionszone die chemische Umsetzung eines Explosivstoffes in gasförmige Reaktionsprodukte. Eingeleitet durch einen elektrischen Spannungsimpuls wird im vorliegenden Fall ein Zünder (Primärsprengstoff) aktiviert, der zunächst die Detonation einer Übertragungsladung bewirkt. Diese Zwischenstufe liefert den notwendigen Verdichtungsstoß zur Detonation des eigentlichen (Sekundär)Sprengstoffs. Anschließend breitet sich der mechanische Impuls in Form einer Stoßwelle im Sprengstoff aus. Bei diesem Vorgang liegen die erwähnten Reaktionsprodukte zunächst in Form stark komprimierter Gase vor. Durch deren Ausdehnung wird die zum Fortschreiten der Reaktionsfront erforderliche mechanische Arbeit geleistet und der Detonationsvorgang aufrecht erhalten. Kennzeichnend für eine Detonation ist, dass die Reaktionsfront, ausgehend vom Ort der Zündung den Sprengstoff mit einer Geschwindigkeit durchläuft, die größer als die Schallgeschwindigkeit im unzersetzten (unreagierten) Sprengstoff ist. Dadurch ist ein Wärmeaustausch mit dem umgebenden Medium nicht möglich. Thermodynamische Systeme, bei denen Zufuhr oder Abfluss von Wärme nicht möglich ist, werden als adiabatisch oder wärmedicht bezeichnet (ATKINS [3], BAEHR [7]).

Sprengstoffarten

Primärsprengstoffe sind hochempfindliche Explosivstoffe, die durch geringe mechanische, thermische oder elektrische Einwirkung initiiert werden können. Der Zündimpuls ist ausreichend, um den Detonationsvorgang innerhalb des verwendeten Explosivstoffs auszulösen. Hingegen kann bei Sekundärsprengstoffen der Detonationsvorgang nur durch einen Verdichtungsstoß ausgelöst werden. Um die notwendige Energie dafür bereit zu stellen, wurden in den vorgestellten Untersuchungen Übertragungsladungen eingesetzt.

Entstehung von Stoßwellen

Der Detonationsvorgang ist durch zwei wesentliche Mechanismen gekennzeichnet. Zum Einen durch die chemische Umsetzung des Explosivstoffes innerhalb der Reaktionszone und zum Anderen durch die Wellenausbreitung im Material. Detonationen erzeugen Stoßwellen, die sich grundsätzlich in der Form der Ausbreitung von linear elastischen Wellen unterscheiden. Durch die hohe Geschwindigkeit in den stark komprimierten Materialpunkten entsteht eine Stoßfront mit diskontinuierlichen Zustandsgrößen. Bild 3.1 zeigt nochmals schematisch die Entwicklung der Stoßfront einer Detonationswelle.

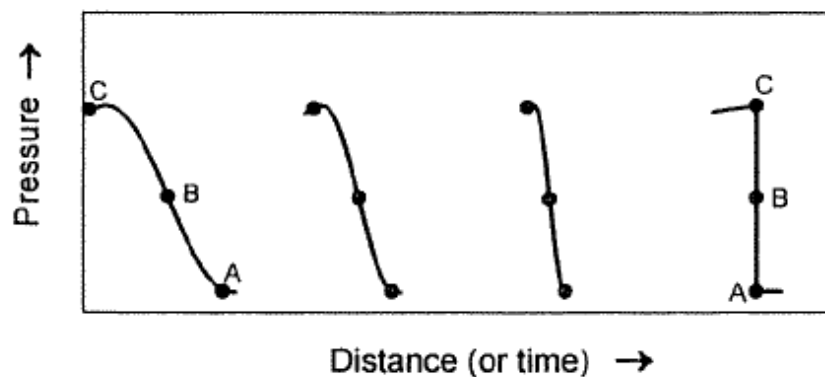


Bild 3.1: Entstehung einer Stoßfront nach COOPER [21]

Die Stoßfront entsteht dadurch, dass eine zum Zeitpunkt t_1 ausgelöste Welle mit der Geschwindigkeit v_1 durch eine zu einem späteren Zeitpunkt t_2 ausgelöste Welle, die sich mit der Geschwindigkeit v_2 ausbreitet, eingeholt wird. Dadurch, dass sich der Fuß der Welle langsamer als der Scheitel der Welle bewegt, kommt es im weiteren zeitlichen Verlauf zur Ausbildung der in Bild 3.1 dargestellten Form der (Stoß)Wellenfront. Die Tatsache, dass Detonationsfronten auch Stoßwellen sind, ist eine Grundlage der Detonationstheorie.

Der Vorgang einer Detonation lässt sich mit den gleichen Methoden beschreiben, die der Ausbreitung von Stoßwellen in einem idealen Gas zugrunde liegen. Diese Modellvorstellung der Wellenausbreitung beruht auf der Annahme einer stationären Stoßfront, sodass auch bei Detonationsvorgängen die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie an der Diskontinuitätsfläche sinngemäß formuliert werden können.

Erhaltungsgleichungen

Die Erhaltungsgleichungen bei Detonationsvorgängen können, ergänzt durch einen Anteil aus der Reaktionswärme, analog zu den Gleichungen (2.20), (2.21) und (2.22) in inerten Medien formuliert werden:

$$\rho \cdot (U_S - u_p) = \rho_0 \cdot U_S \quad (3.1)$$

$$p + \rho \cdot (U_S - u_p)^2 = \rho_0 \cdot U_S^2 \quad (3.2)$$

$$i + \frac{1}{2} \cdot (U_S - u_p)^2 = i_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot U_S^2 + q_R \quad (3.3)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} - \frac{V}{V_0} + \frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{q_R}{c_p \cdot T_1}}{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \cdot \frac{V}{V_0} - 1} \quad (3.4)$$

Die Einführung der Reaktionswärme hat zur Folge, dass die in Bild 3.2 dargestellte HUGONIOT-Kurve in zwei Abschnitte unterteilt wird. Einen Detonationsanteil mit einer Geschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit und einen Deflagrationsanteil, für den die Geschwindigkeit kleiner als die Schallgeschwindigkeit ist. Im Falle der Detonation bildet die RAYLEIGH-Gerade die Tangente an die Hugoniot-Kurve im Punkt D. In diesem Punkt entspricht die Steigung der RAYLEIGH-Geraden der Geschwindigkeit des rückwärtigen Teils der Detonationsfront (Partikelgeschwindigkeit). Für jeden anderen Punkt auf der HUGONIOT-Kurve würden sich Geschwindigkeiten ergeben, die im Widerspruch zu den getroffenen Annahmen einer stationären Stoßfront und einer endlichen Reaktionszone stünden. Man bezeichnet diesen Punkt auch als oberen CHAPMAN-JOUGUET-Punkt [21]. Die Gleichung der RAYLEIGH-Geraden lässt sich für einen Detonationsvorgang wie folgt anschreiben

$$\frac{p}{p_0} = 1 + \kappa \cdot M^2 \cdot \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \quad (3.5)$$

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden vorrangig die wesentlichen thermodynamischen Grundlagen von Detonationsvorgängen erläutert. Ausführliche

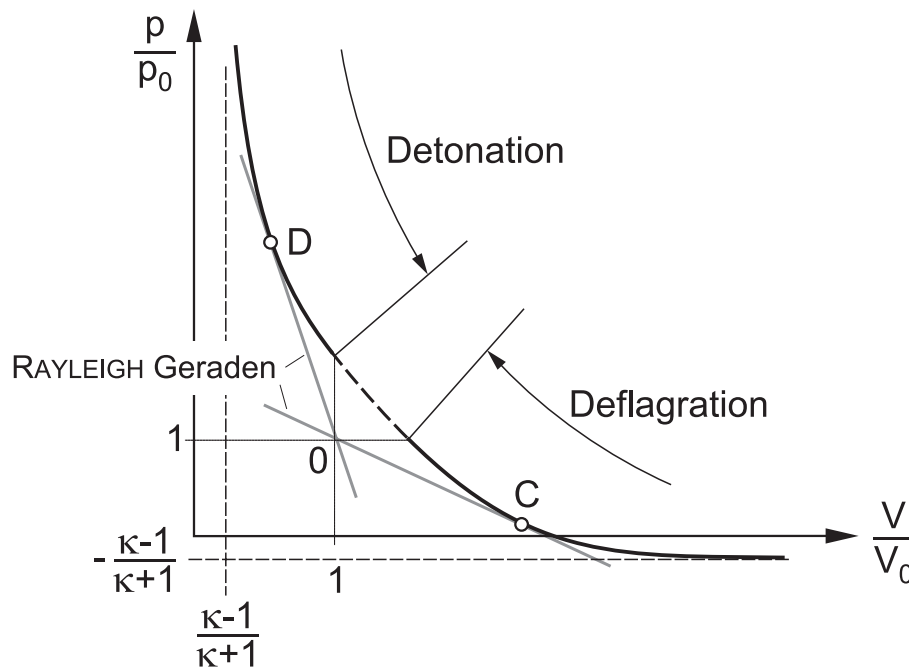


Bild 3.2: HUGONIOT-Kurve eines Verdichtungsstoßes nach BARTLMÄ [8]

und weitergehende Darstellungen der Thematik findet man z.B. bei BARTLMÄ [8], LEE [62], CHERET [20], KUBOTA [58] und COOPER [21].

3.2 Detonationstheorie

Chapman-Jouguet-Modell (C-J-Modell)

Der durch Zündung ausgelöste Vorgang innerhalb der Reaktionszone durchläuft mit Überschallgeschwindigkeit in Form einer Stoßwelle den Sprengstoff. Diese Stoßwelle enthält eine Druck- und Temperaturfront mit hochverdichteter, ionisierter Materie und emittiert Licht (Detonationsblitz). Durch chemische Umwandlungen innerhalb der Reaktionszone, insbesondere durch die Wärmeentwicklung aus der Reaktion des Sprengstoffs, wird der Vorgang aufrecht erhalten. Vereinfachte Modelle im Rahmen der klassischen Detonationstheorie betrachten die Zustände vor und nach der Reaktion unter der Annahme eines adiabatischen Systems. Auch geht man von der Vorstellung aus, dass der Sprengstoff innerhalb der Reaktionszone vollständig in Reaktionsprodukte umgewandelt wird. Diese sogenannte ideale Detonation kann mit der Theorie nach CHAPMAN [16] und JOUGUET [54] beschrieben werden. Im Rahmen dieser Theorie besteht die Detonationsfront aus einem Verdichtungsstoß S und einer Reaktionsfront R, die als unendlich dünn betrachtet werden (vgl. Bild 3.3). Zwischen dem unreaktierten Sprengstoff im Ausgangszustand und dem zersetzten Sprengstoff besteht somit eine Diskontinuitätsfläche, die sich mit der Geschwindigkeit u_s ausbreitet; im vorliegenden Fall mit Überschallgeschwindigkeit. Der Detonati-

onsfront folgt unmittelbar eine Entlastungswelle, die sogenannte TAYLOR-Welle. Bild 3.3 zeigt schematisch die Beschreibung des Detonationsvorgangs nach der Modellvorstellung von CHAPMAN und JOUGUET. Der CHAPMAN-JOUGUET-Punkt (CJ-Punkt) kennzeichnet diejenige Stelle, an der der Sprengstoff vollständig in gasförmige Reaktionsprodukte umgewandelt ist. Der dazugehörige Druck an dieser Stelle wird als CHAPMAN-JOUGUET-Druck (p_{CJ}) bezeichnet und in der Regel für die Charakterisierung einer Detonation verwendet.

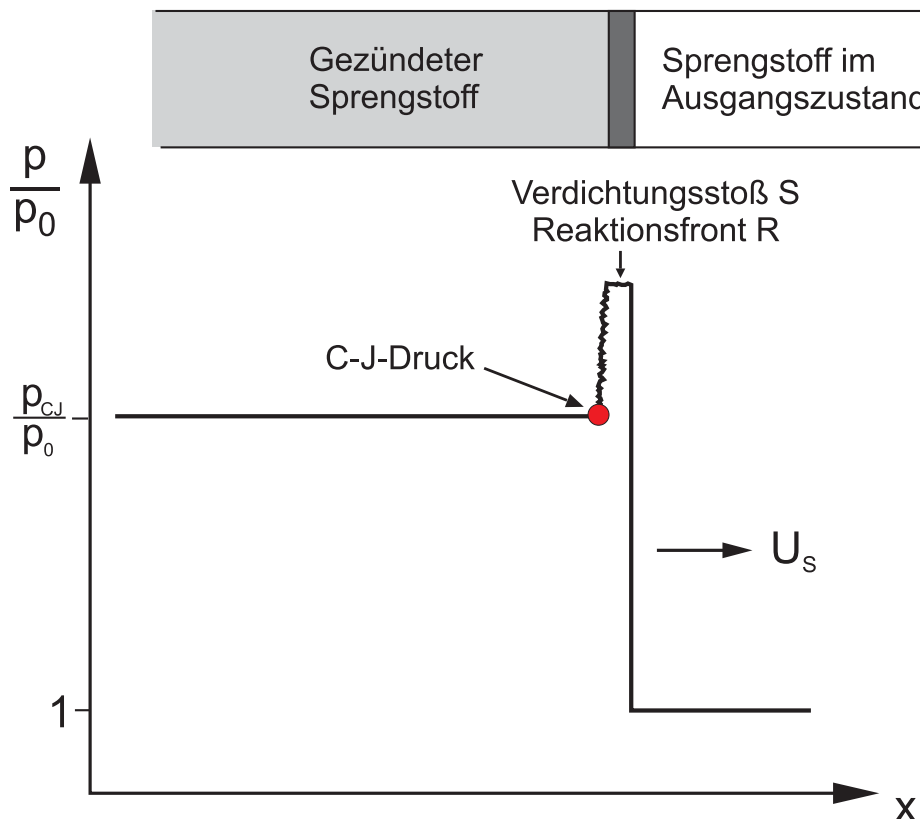


Bild 3.3: Detonationsvorgang nach der Modellvorstellung von CHAPMAN [16] und JOUGUET [54]

Zel'dovich-Döring-von Neumann-Modell (ZDN Modell)

Eine Weiterentwicklung des Modells von CHAPMAN und JOUGUET stellt das sogenannte ZDN Modell dar. Dieses wurde unabhängig von ZEL'DOVICH [95], DÖRING [24] und von VON NEUMANN [88] entwickelt. Der grundlegende Unterschied ist, dass die bei CHAPMAN und JOUGUET als unendlich dünn betrachtete Reaktionszone durch ein Modell mit Zündverzug und endlich ausgedehnter Reaktionszone ersetzt wird. Vor der Reaktionszone stellt sich der in Bild 3.4 dargestellte VON NEUMANN-Spitzendruck ein, der allerdings aufgrund seiner geringen räumlichen Ausdehnung unmittelbar beim Kontakt mit unreaktiertem Sprengstoff

stark gedämpft und wieder abgebaut wird. Für die Charakterisierung der Detonation ist auch hier der Druckwert am C-J-Punkt geeigneter, da die Dämpfung durch die Entlastungswelle in diesem Bereich deutlich unter der Dämpfung des VON NEUMANN-Peaks liegt. Die Verhältnisse hinter dem C-J-Punkt entsprechen wieder den Verhältnissen des gleichnamigen Modells.

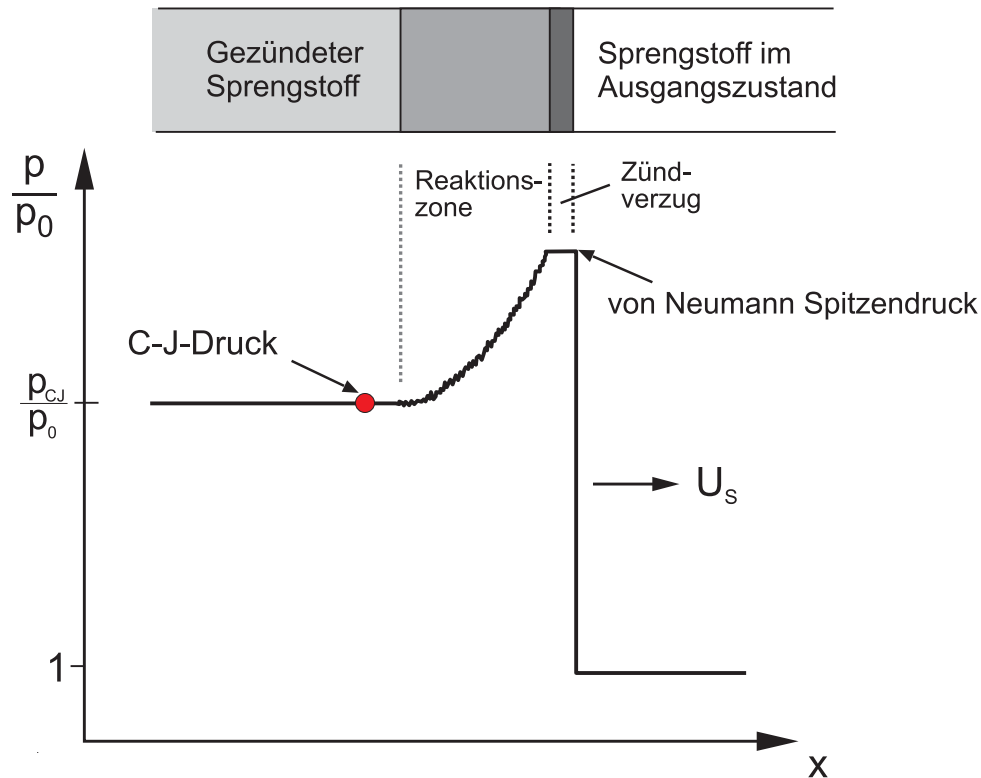


Bild 3.4: ZDN-Modell zur Beschreibung des Detonationsvorgangs

3.3 Zustandsgleichung

Wie bereits erläutert, kann eine Detonation durch chemische Zersetzung eines Explosivstoffs ausgelöst werden. In Falle von Sprengstoff durchläuft eine Stoßwelle die Sprengladung. Durch die starke Kompression an der Detonationsfront werden weitere Reaktionsprozesse ausgelöst, was zur Freisetzung großer Energiemengen führt und dafür sorgt, dass die Stoßfront erhalten bleibt. Innerhalb des Sprengstoffs liegen daher zwei unterschiedliche Bereiche vor. Der chemisch umgesetzte Bereich hinter der Detonationsfront und der unberührte Bereich davor. An der Sprungstelle lassen sich die Erhaltungsgleichungen formulieren, wodurch sich beide Zustände durch eine Zustandsgleichung verknüpfen lassen. In

Rechenprogrammen wird für die Beschreibung des Sprenstoffverhaltens meist die Zustandsgleichung nach JONES, WILKENS und LEE (JWL-EOS) verwendet, die auf dem ZDN-Modell basiert und sich eng an die von Gasen bekannten Zustandsgleichungen anlehnt. Eine große Zahl an Experimenten belegen die gute Übereinstimmung dieser Gleichung mit Versuchsergebnissen (EIBL [27]). Die JWL-EOS lautet:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 V} + \frac{\omega \cdot e}{V} \quad (3.6)$$

Zur Beschreibung des Ablaufs der chemischen Reaktion innerhalb des Sprengstoffs enthält Gleichung 3.6 den Parameter ω . Er gibt den Anteil der chemischen Umsetzung des Sprengstoffs in Reaktionsprodukte wieder. Folglich ist zu Beginn der Reaktion $\omega = 0$ und am Ende der Umsetzung $\omega = 1$. Die weiteren Parameter in Gleichung 3.6 können aus Handbüchern wie z.B. dem LLNL-Explosive Handbook [23] entnommen werden. Tabelle 3.1 fasst die Werte der in den Versuchen eingesetzten Sprengstoffe zusammen.

Tabelle 3.1: Parameter in der JWL-EOS nach [23]

Sprengstoff	Mat-Eigenschaften			JWL-EOS-Parameter					
	ρ_0 [g/cm ³]	U_{Det} [m/s]	p_{CJ} [MPa]	A [MPa]	B [MPa]	R_1	R_2	ω [MPa]	e_0 [Mpa-m ³ /m ³]
TNT	1,63	6930	21000	373800	3747	4,15	0,9	0,35	6000
COMP B (63%RDX, 37%TNT)	1,717	7980	29500	524200	7678	4,2	1,1	0,34	8500
PETN	1,588	7200	20500	620600	23270	5,4	1,651	0,282	7000

Einfluss der Reaktionsrate nach LEE und TARVER [61] aus [37]

Der Einfluss der Geschwindigkeit, mit der die Bildung von Reaktionsprodukten abläuft, kann durch ein von LEE und TARVER [61] entwickeltes Modell berücksichtigt werden. Dieses Modell erfasst einerseits die Einleitung der Reaktion durch die Zündung und andererseits die Fortbewegung der Detonationswelle. Auslöser der eigentlichen Reaktion sind dabei sogenannte „Hot Spots“, die abhängig vom herrschenden Druck und der Temperatur in der Reaktionszone verteilt sind. In diesen Punkten herrscht eine deutlich höhere Temperatur als im übrigen Teil des Sprengstoffs, was lokal zu einer schnellen Zersetzung des Sprengstoffs und zu dem damit verbundenen Druckaufbau führt. Diese „Hot Spots“ steuern den Detonationsvorgang und beeinflussen maßgebend die Reaktionsgeschwindigkeit der Detonation. Die Reaktionsrate lässt sich mit Glei-

chung (3.7) berechnen und beschreibt die zeitliche Entwicklung der Stoßwelle innerhalb des Sprengstoffs:

$$R = \frac{\partial F}{\partial t} = I \cdot (1 - F)^{\frac{2}{9}} \cdot \eta^4 + G \cdot (1 - F)^{\frac{2}{9}} \cdot F^{\frac{2}{3}} \cdot p^{1,20} \quad (3.7)$$

Der erste Summand in Gleichung (3.7) kennzeichnet die Aktivierung des Prozesses, der zweite Summand beschreibt den Wachstumsfortschritt der Stoßwelle. I und G sind Parameter, die von der Art des verwendeten Sprengstoffs abhängig sind und nach LEE und TARVER [61] durch Experimente ermittelt werden können. Da der Druck in die Berechnung der Reaktionsrate eingeht, kann auch die Wechselwirkung zwischen Sprengstoff und Festkörper bei einer Kontaktdetonation berücksichtigt werden. Für den Anteil F des nicht reagierten Sprengstoffs gilt vor der Zündung $F = 0$. EIBL [27] gibt für den Sprengstoff TNT Werte der freien Parameter I und G an, die anhand von Experimenten ermittelt wurden.

4 Beton

4.1 Herstellung des Werkstoffs – Technische Beschreibung

Beton wird aus Zement, unterschiedlichen Korngrößen („Zuschlag“) und Wasser hergestellt. Häufig werden weitere Betonzusatzmittel oder Zusatzstoffe hinzugefügt. Über das Mischungsverhältnis von Zement und Wasser (Zementleim), lässt sich die Verarbeitbarkeit von Frischbeton steuern. Durch Hydratationsreaktionen erhärtet der Zementleim und wird in Zementstein umgewandelt. Dieser sorgt nach dem Erstarren für die Verkittung der Gesteinskörner, wodurch der Beton seine Festigkeit erlangt. Aufgrund der stark unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften beider Stoffe wird Beton als ein Zweiphasensystem aufgefasst. Wesentliche Einflussgrößen für die Eigenschaften des Betons sind abhängig von den Eigenschaften der jeweiligen Phase sowie von den Haftungseigenschaften an der Kontaktfläche zwischen beiden Phasen (REINHARDT [72], MÜLLER [67]).

Zementstein

Der Zementstein wird von einem System feiner Poren durchzogen. Dieses Porensystem ist für die mechanischen Eigenschaften des Betons von wesentlicher Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.2). Das Porensystem wird wesentlich durch die betontechnologischen Parameter Wasserzementwert und Hydratationsgrad des Zements beeinflusst. Die Festigkeitsklasse und die Art des Zements sowie Betonzusätze können das Porensystem ebenfalls beeinflussen.

Zementhydratation

Beim Mischen von Zement mit Wasser sind die einzelnen, noch nicht hydratisierten Zementpartikel durch das Mischwasser voneinander getrennt. Das vom Wasser eingenommene Volumen bezeichnet man als Kapillarporenvolumen. Die mittlere Größe der Zementkörner beträgt mehrere μm . Während der Hydratation führt die Bildung von Hydratationsprodukten zu einem Zusammenwachsen der

Zementkörner. Dadurch entsteht ein durchgehendes Skelett (Zementmatrix) bei gleichzeitiger Abnahme der zunächst vom Wasser eingenommenen Zwischenräume (Kapillarporen). Während der Hydratation bilden sich vor allem kristallines Calciumhydroxid (CH) und nicht-kristalline Calciumsilikathydrate ($C_3S_2H_3$). Die Reaktionsprodukte des Zementsteins, einschließlich des darin enthaltenen Porenwassers, bilden das sogenannte Zementgel, das aus Calciumsilikathydraten mit eingelagerten Calciumhydroxidkristallen besteht. Das Zementgel ist von einem System feiner Poren durchzogen, deren Radien im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-7} mm liegen. Die Porosität des Zementgels ist weitgehend unabhängig vom Wasserzementwert und kann durch betontechnologische Maßnahmen nicht beeinflusst werden.

Dies gilt nicht für die Kapillarporosität. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen dem ursprünglich vor der Hydratation eingenommenen Volumina von Wasser (w_0) und Zement (z) sowie dem Volumen des Zementgels zuzüglich dem Volumen des noch nicht hydratisierten Zementgels. Diese Zusammenhänge werden von HANSEN [41] durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{V_K}{V_0} = \frac{\frac{w_0}{z} - 0,36 \cdot m}{\frac{w_0}{z} + 0,32} \quad (4.1)$$

mit

$$m_{\max} = \frac{\frac{w_0}{z}}{0,42} \leq 1,0 \quad (4.2)$$

Die Abkürzung m in Gleichung (4.2) bezeichnet den Hydratationsgrad des Zementes, also den Anteil des Zementes, der zu einem bestimmten Zeitpunkt hydratisiert ist. Es gilt $0 \leq m \leq 1,0$. Gleichung (4.1) zeigt, dass mit fallendem w_0/z und steigendem Hydratationsgrad das Kapillarporenvolumen des Zementsteins abnimmt und damit die Gesamtporosität des Betons. Beispielsweise ergibt sich für Portlandzement aus Gleichung (4.1) bei einem maximalen Hydratationsgrad von 1,0 ein Kapillarporenanteil des Zementsteinvolumens von 8%. Geht man von einem w_0/z -Wert von 0,45 und einem Hydratationsgrad von 0,9 aus, so verbleiben 15% des Zementsteinvolumens als Kapillarporen. Ein üblicher Konstruktionsbeton (Normalbeton) enthält Poren mit einem Volumenanteil von etwa 8 bis 15%. Der Einfluss der Porosität von Beton auf das mechanische Verhalten zeigt sich bei hohen hydrostatischen Druckbelastungen.

Die Eigenschaften von Zementsteins werden zwar wesentlich durch die Kapillarporosität bestimmt aber nicht ausschließlich. Eine optimierte Größe der Zementpartikel und das Hinzufügen von Zusatzstoffen, wie z.B. Flugasche oder silikatischen Feinstäuben verbessert die „Packungsdichte“ der Phase, was einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des erhärteten Zementsteins hat. Insbesondere für hochfesten Zementstein und Beton ist dies nach REINHARDT [72] von Bedeutung. Die für reinen Zementstein dargestellten Beziehungen be-

sitzen auch für Beton Gültigkeit (REINHARDT [72]). Außerdem müssen besondere Strukturmerkmale des Zementsteins im Übergangsbereich zu den Zuschlagskörnern berücksichtigt werden. In den Kontaktzonen ist der Zementstein grobporiger, porenreicher und häufig bereits durch Mikrorisse geschädigt.

Zuschlag

Zuschlagskörner weisen in der Regel eine höhere Festigkeit und Dichte als der Zementstein auf und beeinflussen dadurch die Festigkeitseigenschaften von Beton nur geringfügig. Eine Änderung der Verteilung der Zuschlagskörnungen bewirkt vorrangig eine Veränderung der Frischbetoneigenschaften. Man unterscheidet die Betonzuschläge nach Stoffart und Korngruppen. Ein Zuschlag mit einem dichten Gefüge hat meist eine Dichte von mehr als $2,5 \text{ kg/m}^3$ und wird für Normalbeton eingesetzt. Die Kornverteilung des Zuschlags bestimmt die Wassermenge einer Betonmischung, die zur Erzielung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit des Frischbetons erforderlich ist. Die Zementleimmenge und der Zementgehalt, die den Betonzuschlag umgeben und zur Erzielung eines geschlossenen Gefüges erforderlich sind, hängen ebenfalls von der Kornverteilung des Betonzuschlags ab (REINHARDT [72]). Die Kornzusammensetzung eines Betonzuschlags wird durch Sieblinien dargestellt. Für die Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 sind Zuschläge mit einem Größtkorn von max. 63 mm zulässig. Bild 4.1 zeigt die Sieblinien der für die Versuchskörper verwendeten Zuschläge mit einem Größtkorn von 16 mm.

Mischungsentwurf

Die Zusammensetzung des Betons wird im Mischungsentwurf bestimmt. Eine rechnerische Abschätzung der Zusammensetzung kann mit Hilfe der sogenannten Stoffraumgleichung erfolgen. Nach Wahl der Ausgangsstoffe und der Abstufung der Zuschlagskörnung werden unter Berücksichtigung der nötigen Konsistenz, des Mindestporengehalts und evtl. zu verwendender Zusatzstoffe und Zusatzmittel (Anteil f) der erforderliche Wassergehalt w und der Zementgehalt z bestimmt. Die Menge des Betonzuschlags g in kg/m^3 lässt sich dann mit Gleichung (4.3) bestimmen. Im Nenner der einzelnen Summanden steht die Rohdichte der jeweiligen Komponente.

$$\frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{f}{\rho_f} + p = 1000 \text{ dm}^3 \quad (4.3)$$

Die „Rezeptur“ des Betons der Versuchskörper enthält Anhang A.

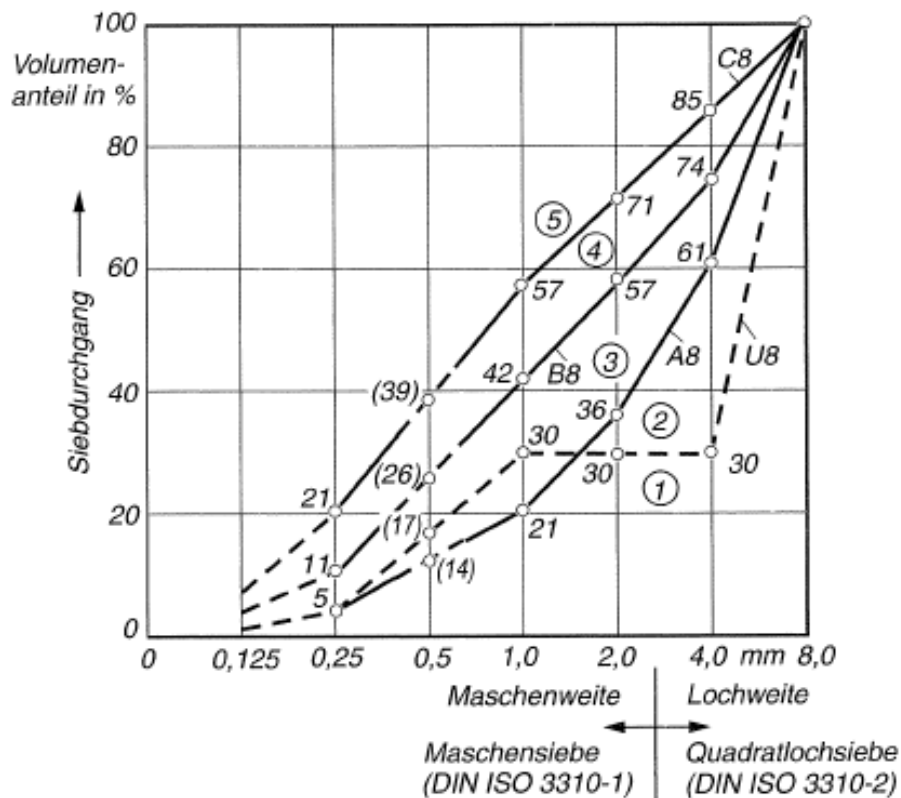


Bild 4.1: Grenzsieblinien der DIN 1045-2 für Zuschläge mit einem Größtkorn von 16 mm

4.2 Statische Eigenschaften

Das Verhalten von Beton unter statischer Belastung ist aus zahlreichen Untersuchungen verschiedener Autoren weitgehend bekannt und in einer Fülle von Veröffentlichungen zugänglich. Das Ziel dieses Abschnitts ist, anhand ausgewählter Literaturquellen die wesentlichen mechanischen Eigenschaften des Betons unter einer statischen Belastung zusammenzustellen und die dazugehörigen Standardprüfverfahren vorzustellen.

Einen Überblick über das statische Verhalten von Beton geben die Arbeiten von J. EIBL [13], S. EIBL [27], OCKERT [69], CHEN [17], RIEDEL [73] und REINHARDT [72]. Eine tabellarische Übersicht zum Bruchverhalten ist in der Arbeit von RUPPERT [79] zu finden.

Durch die bereits erwähnte porenreiche Struktur von Beton in der Kontaktzone von Zementstein und Zuschlagskörnern weist der Zementstein in diesem Bereich eine geringere Festigkeit auf. Für die mechanischen Eigenschaften des Betons ist wesentlich, dass schon im unbelasteten Beton zwischen Zementmatrix und Zuschlagskörnern Mikrorisse vorhanden sind. Hierfür sind die lastunabhängigen Verformungen des Zementsteins infolge Schwinden verantwortlich. Diese Mikrorisse sind Ausgangspunkt der Rissentwicklung sowohl bei Zug-, als auch bei Druckbelastung.

Druckbeanspruchung

Durch seinen mikroskopisch und makroskopisch heterogenen Aufbau zeigt Beton ein stark nichtlineares Verformungsverhalten. Beton zeigt unter Druckbeanspruchung ohne oder mit schwacher Verdämmung bei einem Lastniveau von ca. 65 % der Druckfestigkeit Erscheinungen, die auf das Entstehen von Rissen im Gefüge zurückzuführen sind. Am Beispiel der in Bild 4.2 dargestellten Belastung eines Betonprismas wird dies deutlich. Zu Beginn ist mit steigender Belastung eine Volumenabnahme zu beobachten. Ab einem bestimmten Punkt nimmt das Volumen wieder zu. Unmittelbar vor dem Bruch ist ein absoluter Volumenzuwachs verglichen mit dem Ausgangswert festzustellen. Dieser Vorgang kann mit einer starken Auflockerung des inneren Gefüges der Probe begründet werden. Unter fortschreitender Belastung erfährt der heterogene Werkstoff Beton eine zunehmende Zerstörung seines inneren Gefüges im Mikrobereich. Diese Zerstörungen treten bereits weit unterhalb der eigentlichen Festigkeitsgrenze auf, z.B. schon im unbelasteten Zustand infolge Schwindens [26].

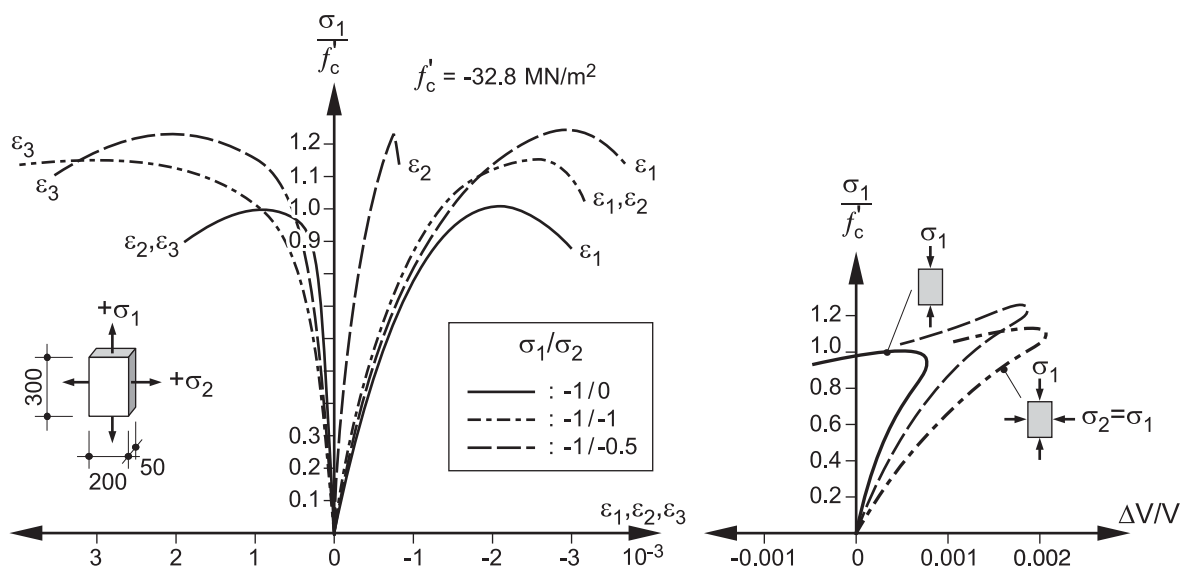


Bild 4.2: Betonprisma unter einaxialem Druck – Volumendilatation

Der Bruch des Betons bei Druckbeanspruchung ist als eine Folge des Wachstums der Mikrorisse innerhalb der Kontaktzonen zwischen Zementstein und den steiferen Zuschlägen zu sehen. Bereits bei einer Spannung von etwa 40 % der Druckfestigkeit beginnen wegen der geringen Verbundfestigkeit zwischen Zementstein und Zuschlag die Mikrorisse innerhalb der Kontaktzonen beider Phasen zu wachsen. Erreicht die Spannung 80 % der Festigkeit, so setzen sich die Risse in der Mörtelphase des Betons fort, vorzugsweise parallel zur Richtung der äußeren Belastung. Der Beton ist dadurch bereits vor dem Erreichen seiner

Druckfestigkeit von zahlreichen feinen Mikrorissen durchzogen (siehe Bild 4.3). Bei weiterer Laststeigerung vereinigen sich die Mikrorisse und es entstehen größere Risse mit kritischer Länge, sodass spontanes Risswachstum und die Bildung einer Bruchfläche möglich sind.

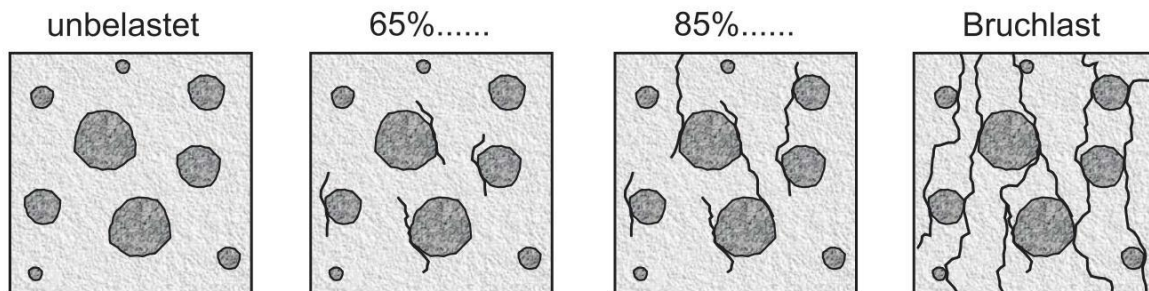


Bild 4.3: Rissentwicklung innerhalb einer Druckprobe

Erfolgt die Belastung der Probe weggesteuert wird nach Erreichen der Druckfestigkeit die Beanspruchung reduziert, wodurch die Mikrorisse nur langsam bei zunehmender Verformung anwachsen. Auf diese Weise entsteht der für Beton charakteristische abfallende Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie (vgl. Bild 4.4). Insgesamt wird das Bruchverhalten, als spröde bezeichnet werden (MÜLLER [67]).

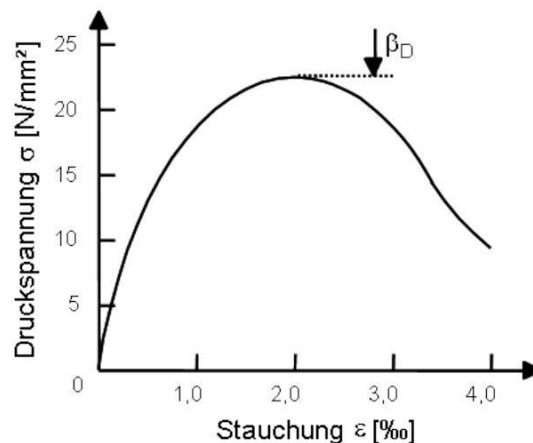


Bild 4.4: Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton bei Druckbeanspruchung

Zugbeanspruchung

Bei einer Zugbeanspruchung verhält sich Beton bis zu einer Spannung von ca. 80 % der Zugfestigkeit nahezu linear-elastisch. Mit zunehmender Last entstehen, ausgehend von einer Schwachstelle Mikrorisse, sich zu einem schmalen

Rissband senkrecht zur Belastung vereinigen. Nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit wachsen die Mikrorisse zu kontinuierlichen Rissen zusammen, wodurch mit zunehmender Verformung die Spannung abnimmt. Die zum Trennen einer Zugprobe notwendige Energie (Bruchenergie), steigt mit dem Anteil der Zuschlagskörner und mit deren Größe. Das Bruchverhalten einer Zugprobe ist daher vor allem durch die Heterogenität der Probe bestimmt. Eine mit Mikrorissen geschädigte Zugprobe kann nur so lange einen Beitrag zur Tragkraft leisten, wie die Heterogenität den Rissfortschritt aufhalten kann (WEERHEIJM [90]). Qualitativ zeigt die Spannungs-Dehnungsbeziehung bei Zugbeanspruchung (Bild 4.5) einen ähnlichen Verlauf wie bei Druckbeanspruchung. Die Zugfestigkeit beträgt aber nur ca. 10% der Druckfestigkeit.

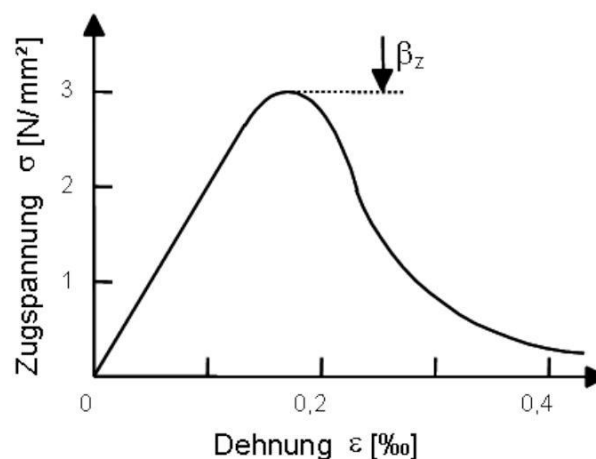


Bild 4.5: Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton bei Zugbeanspruchung

Prüfeinrichtungen

Statische Tests werden mit hydraulischen Maschinen durchgeführt. Um die zahlreichen Einflussfaktoren wie z.B. Probengröße, Probenschlankheit, Art der Lastaufbringung oder Lastexzentrizität gering zu halten, sind Versuchsdurchführung, Prüfmaschinen und Probenform durch Normen geregelt. Standardproben für den Druckversuch sind Würfel mit Kantenlängen von 200 mm und 150 mm. Auch an zylindrischen Proben mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe werden mechanische Parameter ermittelt.

Die Zugfestigkeit von Beton ist wegen des spröden Verhaltens schlecht messbar. Sie wird daher meist auf indirektem Wege über die Biegezugfestigkeit (4-Punkt-Biegung an Balken mit $L : B : H = 150 : 150 : 700$ mm) oder über die Spaltzugfestigkeit an einem Zylinder (Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm) ermittelt.

Ebene Spannungszustände

Eingehende Untersuchungen des zwei axialen statischen Verhaltens wurden von KUPFER [59] durchgeführt. Der linke Bildteil von Bild 4.6 zeigt die Auswertung dieser Versuche. Nach WEERHEIJM [90] stehen die Mechanismen, die unter zwei axialer Belastung zu einem Materialversagen führen, in direktem Zusammenhang mit den Mechanismen, die bei einaxialen Tests zu beobachten sind. Bei Druckbelastung steigt die Vergleichsspannung des ebenen Spannungszustandes verglichen mit der einaxialen Druckfestigkeit geringfügig an.

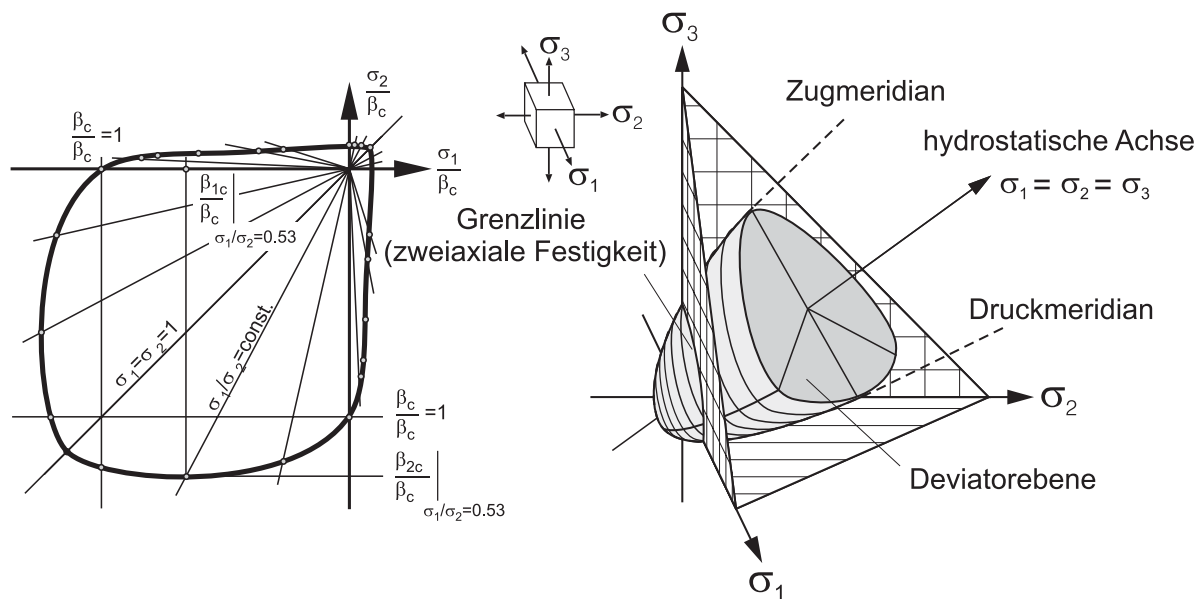


Bild 4.6: Grenzlinie der zwei axialen Festigkeit und Grenzfläche der drei axialen Festigkeit nach [14] in [72]

Räumliche Spannungszustände

Eine einaxiale Spannung verursacht eine Querdehnung. Das Phänomen der Querdehnung (Poissonzahl μ) hat zur Folge, dass in Flächentragwerken (Schalen, Scheiben, Platten), dickwandigen Bauteilen (z.B. Staumauern), bügelbewehrten Stahlbetonbalken, Stahlbetonstützen und umschnürten Betonsäulen ein räumlicher Spannungszustand herrscht. Die Darstellung im rechten Teil von Bild 4.6 vermittelt einen perspektivischen Eindruck der Versagensfläche von Beton bei räumlicher Belastung. Die Vergleichsspannung dieses Spannungszustandes liegt deutlich über der einaxialen Druckfestigkeit. Bild 4.7 zeigt den Verlauf der Betonspannungen unter einer solchen Belastung, ermittelt an einer zylindrischen Probe. Mit zunehmender Radialspannung nimmt die zulässige Axialspannung zu.

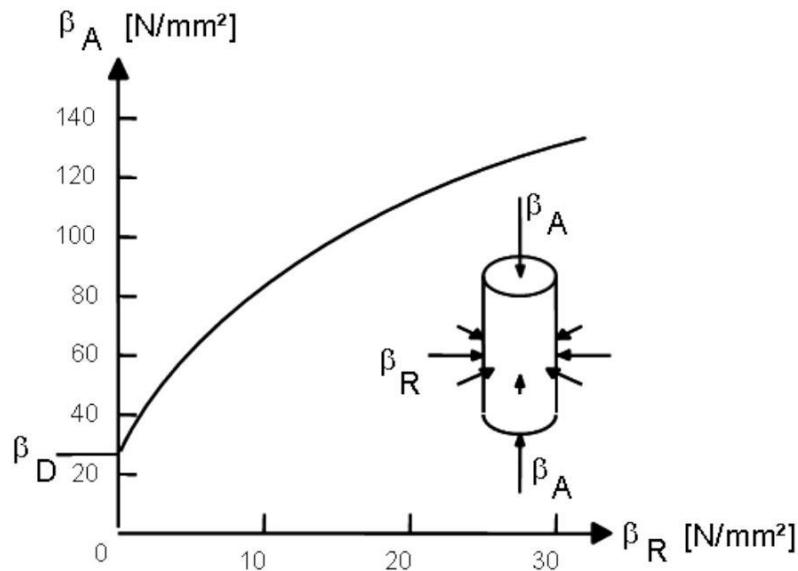


Bild 4.7: Betonfestigkeit bei dreiaxialer Druckbeanspruchung bei variierenden Verhältnissen von axialer Spannung (A) zur Umfangsspannung (R)

Eine Radialspannung lässt sich durch Ummantelung der Probe mit einem Stahlzylinder erreichen (passive Verdämmung). Eine weitere Möglichkeit besteht in einer aktiven Ummantelung der Probe. Dazu werden zylindrische Proben in einem Ölbad hydrostatisch vorbelastet und gleichzeitig in axialer Richtung durch einen Kolben belastet (Triaxialversuche). Trägt man die Spannung beim Versagen aus diesen Versuchen über dem hydrostatischen Druck auf, so erhält man Punkte der Versagensfläche in Meridianschnitten (Bild 4.8). Dabei unterscheidet man den Zug- und den Druckmeridian.

Spannungspunkte entlang des Druckmeridians erhält man im Versuch wenn man einen zylindrischen Probekörper in radialer Richtung hydrostatisch „vorbelastet“ und gleichzeitig in axialer Richtung mit einem hydraulischen Kolben eine Kraft aufbringt. Der Kolben sorgt während der Vorbelastung für eine stirnseitige Verdämmung, sodass die Querdehnung der Probe verhindert wird. Dieser Zustand wird durch eine zusätzliche einaxiale Kolbenbelastung überlagert. Dabei sind die Spannungsverhältnisse durch die folgende Beziehung gegeben:

$$\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3 > \sigma_{ax} = \sigma_1 \quad (4.4)$$

Aus Gleichung (2.51) ergibt sich für den Druckmeridian ein Winkel $\Theta = 60^\circ$.

Erzeugt man in einer zylindrischen Probe einen Spannungszustand mit der Eigenschaft

$$\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3 < \sigma_{ax} = \sigma_1 \quad (4.5)$$

entspricht dies der Überlagerung eines hydrostatischen Spannungszustandes

mit einer einaxialen Zugbelastung. In diesem Fall erhält man Werte entlang des Zugmeridians ($\Theta = 0^\circ$).

Bild 4.8 zeigt die Ergebnisse experimenteller und daraus gewonnene Ausgleichskurven für den Druck- und Zugmeridian. Ergebnisse solcher Triaxialversuche wurden in Heft 447, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) veröffentlicht [40].

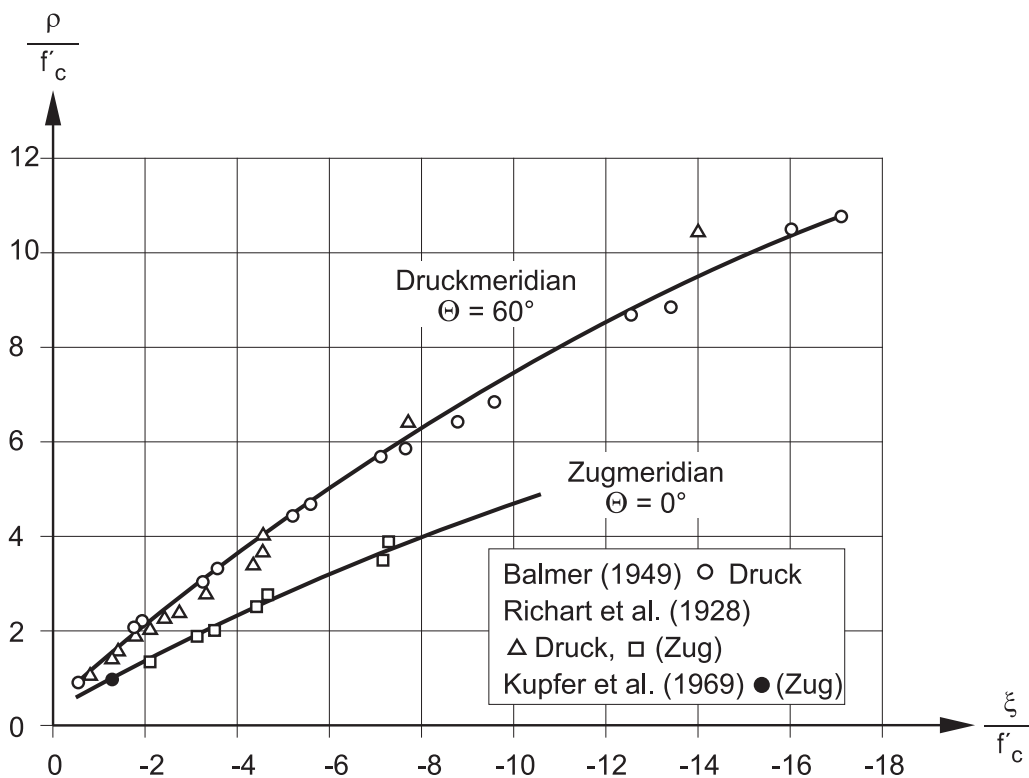


Bild 4.8: Versuchsergebnisse entlang des Zug- und Druckmeridians

Trägt man die (Versagens)Spannung bei konstantem hydrostatischem Druck auf, erhält man die in Bild 4.9 dargestellte Form der Versagensfläche, den Deviatorschnitt.

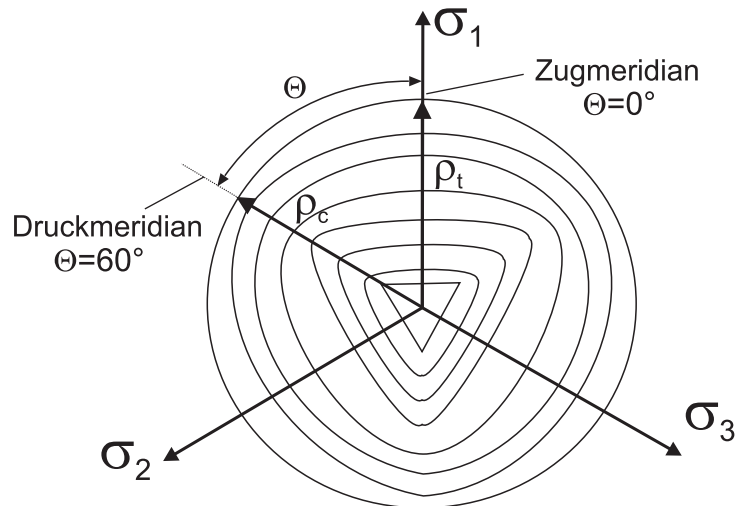


Bild 4.9: Versagensfläche im Deviatorschnitt

Aus den Darstellungen in Bild 4.8 und Bild 4.9 lassen sich folgende Eigenschaften der Versagensfläche von Beton zusammenfassen:

- Mit zunehmendem hydrostatischem Druck nähern sich die Schnittkurven der Versagensfläche mit den Deviatorebenen Kreisen. Das bedeutet, dass bei hohen Drücken das Versagen unabhängig von der dritten Invariante des Spannungstensors ist (CHEN [19]). Bei kleinen hydrostatischen Drücken sind die Schnittkurven konvex und nicht kreisförmig.
- Der deviatorische Radius ρ_t des Zugmeridians ist wegen der geringeren Zugfestigkeit von Beton verglichen mit seiner Druckfestigkeit immer kleiner als der Radius ρ_c des Druckmeridians. Mit zunehmendem Druck strebt das Verhältnis gegen eins.
- Die beiden Meridiane starten vom Punkt des hydrostatischen Zugversagens und verlaufen gekrümmt. Man nimmt an, dass sich der Abstand zur hydrostatischen Achse mit steigendem Druck vergrößert. Für den Bereich hoher Drücke wurde diese Annahme noch nicht bestätigt.

Hydrostatische Belastung und Kompaktierungsverhalten

Am Institut für Massivbau (IfMB) wurden von KLEIN [55] Versuche zum Verhalten von Beton entlang der hydrostatischen Achse bei Drücken bis zu 1000 MPa durchgeführt. Bild 4.10 zeigt die Versuchseinrichtung. Der Versuchsaufbau ermöglicht durch den Flüssigkeitsdruck eine hydrostatische Belastung der Probe.

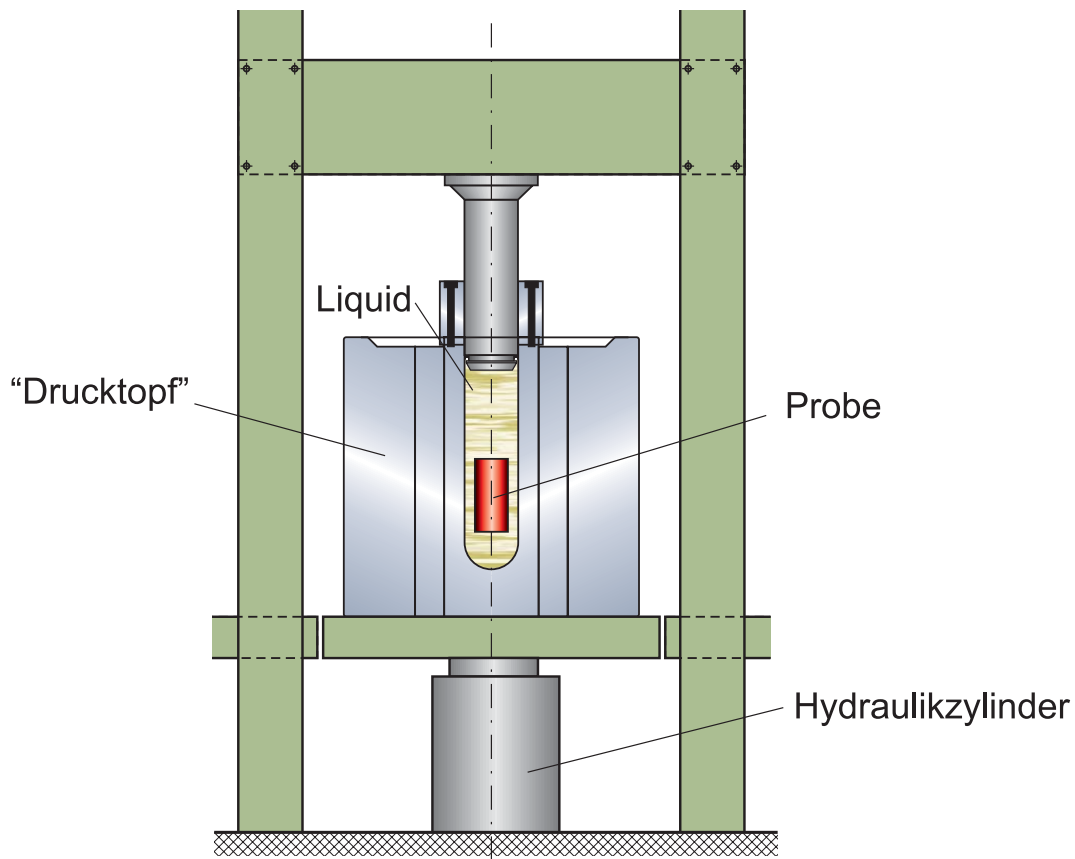


Bild 4.10: Triaxiale Testeinrichtung des IfMB

Die Auswertung dieser Versuche ist in Bild 4.11 dargestellt. RIEDEL [73] berichtet über Ergebnisse vergleichbarer Versuche an der Waterways Experiment Station in Vicksburg, Mississippi.

Das in Versuchen beobachtete und in Bild 4.11 dargestellte Kompaktierungsverhalten ist typisch für poröse Materialien oder allgemein für makroskopisch inhomogene Werkstoffe. Es lässt sich in drei wesentliche Phasen unterteilen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Zunächst erfolgt eine elastische Verformung der Zementmatrix (Phase I). Wird die Festigkeit des Betons in den Porenwänden überschritten, kommt es zu einem Zusammenfallen der Poren („Porenkollaps“). Dieser Vorgang ist mit einer erheblichen Reduktion der Steifigkeit des Materials verbunden und erstreckt sich solange bis der Kompressionsmodul des Materials einen Minimalwert erreicht (Phase II). Sind alle Poren zerstört und zusammengedrückt, so kann über die Porenränder (Partikelkontakt) wieder eine Druckkraft übertragen werden. Entsprechend steigt der Kompressionsmodul wieder an bis der Beton einen kompakten Zustand mit nahezu vollständiger Verdichtung der Hohlräume („dichteste Packung“) einnimmt (Phase III). Der Kompressionsmodul entspricht dann annähernd dem des Vollmaterials.

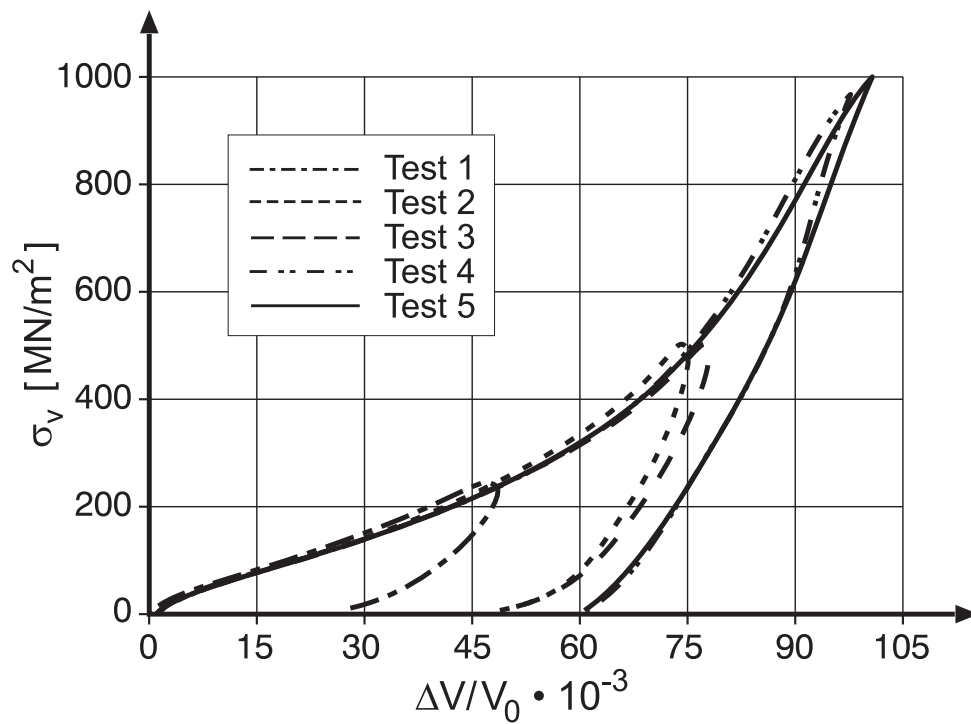


Bild 4.11: Statische p-V-Daten aus Versuchen am IfMB [55]

Im Allgemeinen ist das Kompaktierungsverhalten von porösem Beton immer dann von Interesse, wenn das Materialverhalten durch eine Zustandsgleichung in einem Rechencode abgebildet werden soll. Statische Tests geben lediglich Aufschluss über den Einfluss der Porosität auf das Verhalten des Werkstoffs.

4.3 Dynamisches Verhalten

Will man hochdynamische Vorgänge untersuchen, so liegen die mit statischen Versuchsmethoden erreichbaren Druckwerte weit mehr als eine Größenordnung unterhalb der Spannungsspitzen kurzzeitdynamischer Vorgänge. Bei einer Kontaktdetonation werden beispielsweise Drücke bis ca. 25000 MPa im Beton erreicht (vgl. Kapitel 5).

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Kompaktierung von Betons unter einer statischen Last zeigt die wesentlichen Züge des Verhaltens von porösem Beton entlang der hydrostatischen Achse. Dieses Verhalten lässt sich auch bei hochdynamischen Kurzzeitbelastungen beobachten. Hier treten jedoch eine Reihe weiterer Phänomene auf:

- Eine, in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit kurzzeitig vom Beton „ertragbare“ Spannung, deren Größe über den statischen Materialfestigkeiten liegt (dynamische Festigkeit).
- Eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung, verbunden mit der Ausbreitung von Stoßwellen.

Messungen des dynamischen Materialverhaltens sind wegen der komplexen Spannungszustände und der Heterogenität von Beton schwierig. Wegen der Heterogenität müssen Probekörper hinreichend groß sein. Die Heterogenität erschwert auch die Instrumentierung der Probekörper mit Messtechnik. Sie ist schließlich die Hauptursache für die Streuung von Versuchsergebnissen.

4.3.1 Festigkeitssteigerungen bei hohen Dehngeschwindigkeiten

Aus zahlreichen Untersuchungen geht hervor, dass die Festigkeit von Beton signifikant von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig ist. Die Festigkeitszunahme betrifft sowohl die Druck- als auch die Zugfestigkeit. Bild 4.13 zeigt von BISCHOFF [12] zusammengestellte Versuchsergebnisse unter Druckbelastung und Bild 4.12 zeigt eine Zusammenfassung von SCHULER & HANSON [83] von Untersuchungen bei Zugbelastung. Diese Untersuchungsergebnisse wurden im Bereich $\partial\varepsilon/\partial t > 10^2$ größtenteils aus Fallgewichts- oder Hopkinson-Bar-Versuchen gewonnen.

Zugbeanspruchung

Bei einer Zugbeanspruchung zeigt sich im Bereich kleiner Dehngeschwindigkeiten zunächst ein geringer Anstieg der Festigkeit bis auf etwa das Zweifache der statischen Festigkeit. Für höhere Dehngeschwindigkeiten erfolgt dann ein sehr rascher Anstieg bis hin zum achtfachen Wert der statischen Festigkeit (vgl.

Bild 4.12). Die linearen Ausgleichskurven für zwei unterschiedliche Betone in Bild 4.12 sind Vorschläge von SCHULER&HANSON [83] zur Berücksichtigung der Festigkeitssteigerung bei der Bemessung stoßartig belasteter Bauteile.

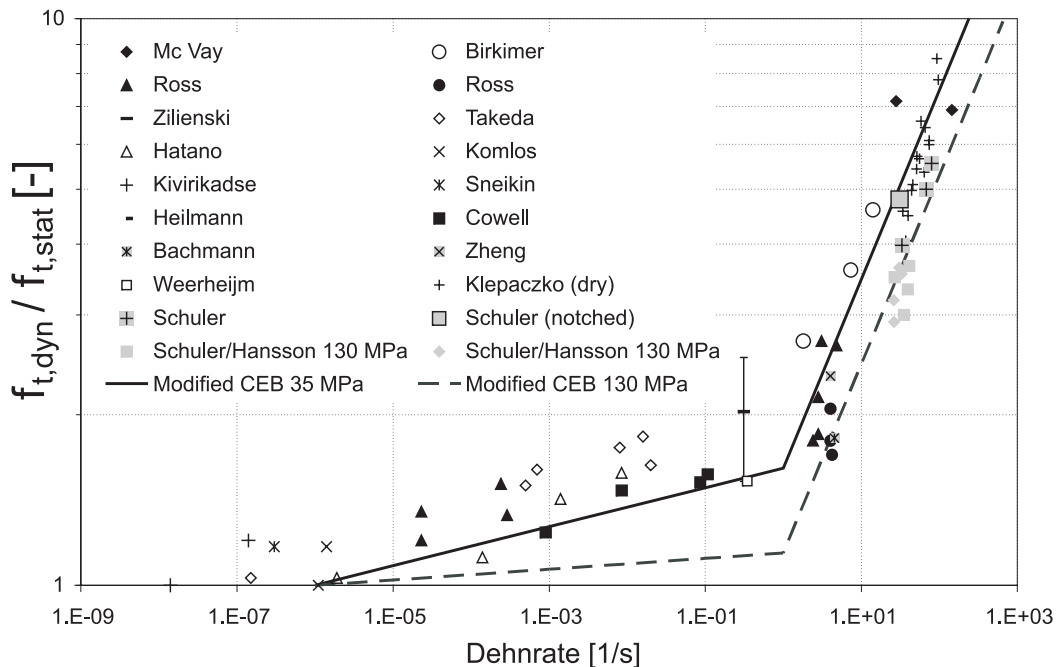


Bild 4.12: Einfluss der Dehnrate auf die Zugfestigkeit von Beton (SCHULER&HANSON [83])

Druckbeanspruchung

Aus dem Vergleich von Bild 4.12 mit Bild 4.13 geht hervor, dass der Erhöhungsfaktor im Falle der einaxialen Druckfestigkeit (Bild 4.13) als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit qualitativ denselben Verlauf zeigt wie bei einer Zugbeanspruchung, jedoch mit kleineren Absolutwerten. Im Bereich schon als relativ hoch zu betrachtender Dehngeschwindigkeiten von ca. 100/s beträgt die Festigkeit im dynamischen Fall gerade das Zweifache des statischen Festigkeitswertes. Auffällig bei der Darstellung in Bild 4.13 ist die große Streuung der Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen. Als Gründe hierfür kommen unterschiedliche Messverfahren, Probengrößen und Betonmischungen in Frage, die den jeweiligen Experimenten zugrunde lagen. Im CEB-Bulltin 187 [15] wurden auf Basis dieser Versuchsergebnisse für den praktisch arbeitenden Ingenieur zur Berücksichtigung der Festigkeitssteigerung in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit die dargestellten Ausgleichskurven vorgeschlagen.

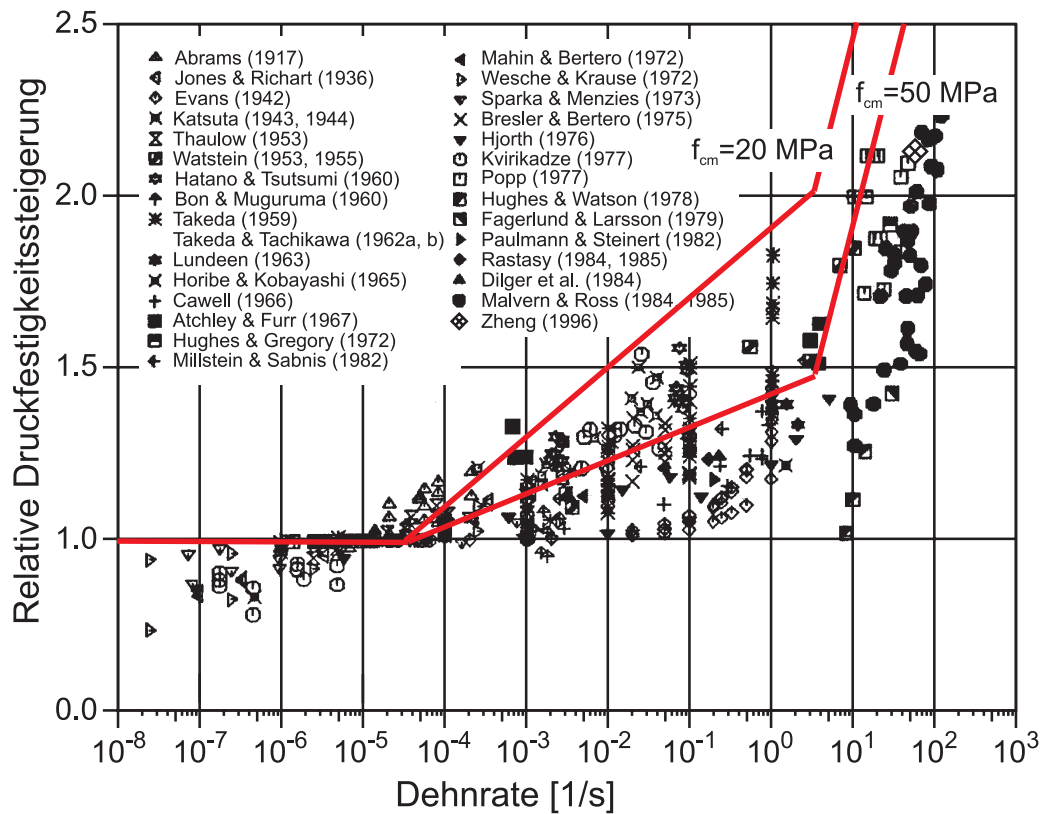


Bild 4.13: Einfluss der Dehnrade auf die Druckfestigkeit von Beton nach BISCHOFF [12]

Über den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Festigkeit von Beton liegen zahlreiche Arbeiten vor (u.a. BISCHOFF [12], CURBACH [22], GOEDDE [29], BACHMANN [6], SCHMIDT-HURTIERNE [81], WEERHEIJM [90], ZHENG [97], SCHULER [82], SCHULER & HANSON [83]). Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeiten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Wellenausbreitung wird durch Verdämmung beeinflusst. Nach WEERHEIJM [90] ist mit zunehmender Verdämmung eine Abnahme der Ratenabhängigkeit festzustellen.
- Bei dynamischer Beanspruchung nähern sich die Belastungszeiten der Laufzeit der Spannungswellen. So können einzelne Wellenanteile lokal zu einem Versagen des Materials führen. Im Querschnitt stellt sich insgesamt eine gleichmäßigere Spannungsverteilung auf einem höheren mittleren Spannungsniveau ein.
- Bei einer Zugbeanspruchung treten mit zunehmender Dehngeschwindigkeit Brüche der Zuschlagskörner auf. Deren Festigkeit liegt um den Faktor drei bis vier über der Festigkeit des Mörtels [57]. Numerische Untersuchungen bestätigen diese Beobachtung (CURBACH [22], GOEDDE [29]).
- Für die Festigkeitssteigerungen sind nicht einzelne Mechanismen verantwortlich sind, sondern die Kombination von Effekten mit unterschiedlicher

zeitlicher Entwicklung (CURBACH [22]). Bild 4.14 zeigt die unterschiedlichen Einflüsse, die von CURBACH im Zusammenhang mit dem Dehnrateneffekt vermutet wurden. Aus Experimenten gewonnene Erkenntnisse von BIRKHEIMER und LINDEMANN [11] untermauern die Überlegungen von CURBACH.

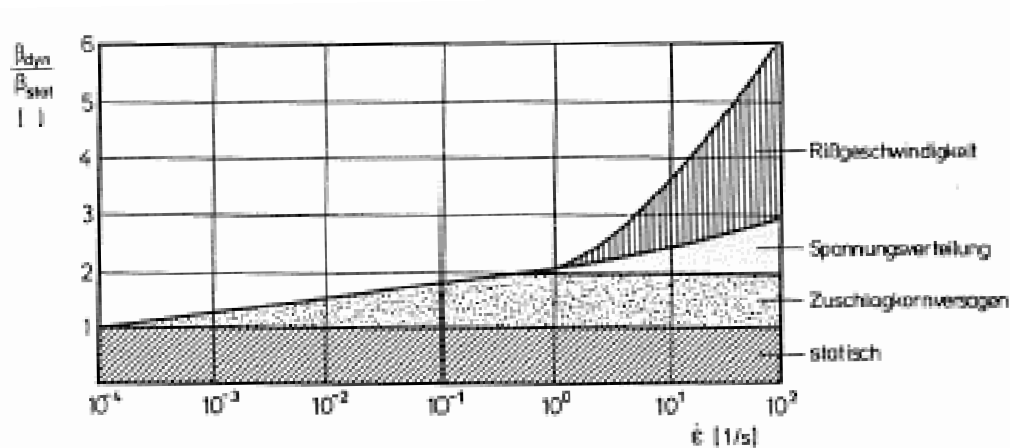


Bild 4.14: Ursachen der Festigkeitssteigerung nach CURBACH [22]

Dehnratenabhängigkeit

Die Festigkeitszunahme eines Werkstoffs mit der Belastungsgeschwindigkeit ist bei Zugbelastung ausgeprägter als bei Druckbelastung (vgl. Bild 4.12 und Bild 4.13). Im makroskopischen Maßstab wird das beschriebene Phänomen häufig auf den Einfluss der aktivierten Massenträgheit bei der Rissbildung zurückgeführt. Die Massenträgheit behindert eine plötzliche Richtungsänderung eines Risses (z.B. das Umlaufen eines Zuschlagkorns), wodurch ein Korntrennbruch begünstigt wird (GOEDDE [29], ZIELINSKI [98, 99]). Nach Ursachen für den Dehnrateneffekt bei Druckbelastung wurde nach derzeitigem Kenntnisstand wenig geforscht.

In Kapitel 2, Abschnitt 2.3.2 wurden anhand des Condon-Morse Diagramms die Zusammenhänge atomarer Bindungsbeziehungen und mechanischer Werkstoffeigenschaften über Wechselwirkungspotentiale idealer Festkörper erläutert.

Die Erklärung der Festigkeitszunahme von Beton lässt sich jedoch nicht einfach auf ein idealtypisches Wechselwirkungspotential reduzieren. Vielmehr ist die gesamte Komplexität des inhomogenen Verbundwerkstoffs mit Zementmatrix, Poren, Zuschlagstoffen und den Grenzflächen Zuschlag-Matrix zu berücksichtigen. Die Verknüpfung von Eigenschaften im atomaren Bereich mit makroskopischen Werkstoffeigenschaften ist Gegenstand aktueller Forschung in der Multiskalensimulation.

4.4 Wellenausbreitung – Dispersion

In Kapitel 2 wurde gezeigt dass, die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Beton (vgl. Bild 4.11) eine wesentliche Voraussetzung für das Entstehen von Stoßwellen ist. Stoßwellen lassen sich durch den sprunghaften Anstieg an der Wellenfront charakterisieren. Sie enthalten Wellenanteile, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten (Wellenpakete).

Bei den hier durchgeführten Versuchen bildet sich die Stoßwelle innerhalb des Sprengstoffs aus (vgl. Kapitel 3) und wird an der Grenzfläche zwischen Ladungskegel und Versuchskörper in den Beton eingekoppelt. Wie sich die Stoßwelle innerhalb des Betonkörpers fortbewegt und welche physikalischen Änderungen innerhalb des Beton zu beobachten sind, stehen in engem Zusammenhang mit dem nichtlinearen Kompressionsverhalten des Werkstoffs.

Die Spannungsamplitude der eingetragenen Stoßwelle übersteigt um Größenordnungen die Festigkeit des Betons, so dass unmittelbar nach dem Übertrag der Belastungswelle auf den Versuchskörper eine sofortige Zerstörung der porösen Struktur des Betons stattfindet. Das Kompaktierungsverhalten (vgl. Bild 2.14) führt zu einer Erhöhung der inneren Energie des Matrixmaterials, was sich mit der Energieerhaltungsgleichung (2.22) belegen lässt und auf die Dichteänderung beim Zusammenfallen der Poren zurückzuführen ist. Dieser Vorgang erfolgt bei vernachlässigbarer Wärmeabfuhr (adiabatisch).

Am Beton wird während des Kompressionsvorgangs (plastische) Arbeit verrichtet, was zu einer erheblichen Dämpfung der Stoßbelastung führt. Diese Eigenschaft kann man sich bei zahlreichen praktischen Anwendungen zum Schutz baulicher Strukturen zu Nutze machen.

Dämpfung und geometrische Ausbreitung

Durch die materialbedingte Dämpfung erfolgt eine rasche Abnahme der Spannungsamplitude und eine Veränderung der ursprünglichen Wellenform. Mit zunehmender Eindringtiefe in den Betonversuchskörper läuft die Welle auseinander.

Dieser Vorgang ist schematisch in Bild 4.15 dargestellt. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen in Kapitel 5 verdeutlichen die hier dargestellte Eindringcharakteristik der Stoßwelle.

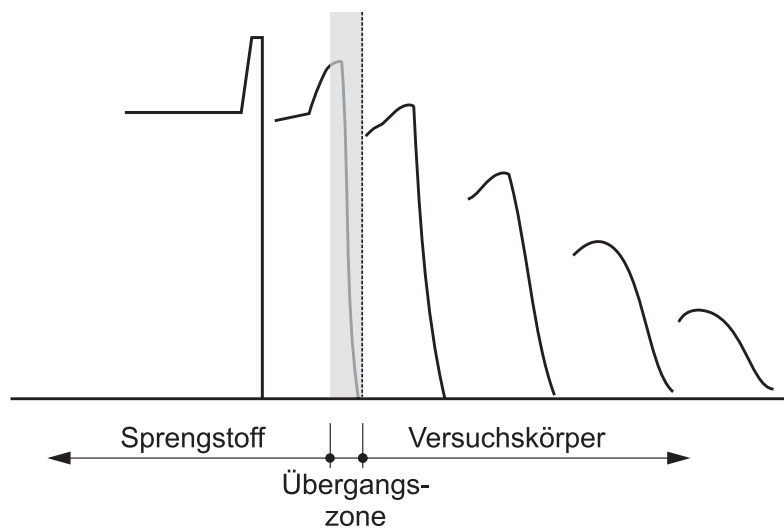


Bild 4.15: Änderung der Wellenfront beim Eintritt in den Versuchskörper und zunehmender Wellenlaufzeit

Bedingt durch die Ladungsgeometrie (vgl. Kapitel 5) wird die Belastung lokal konzentriert, als ebene Stoßwelle in den Versuchskörper eingetragen. Als Folge der Versuchskörpergeometrie breitet sich für die Welle räumlich aus. Die damit einhergehende Energiedissipation führt wiederum zu einer Veränderung der ursprünglichen Form der Welle. Bereiche in denen die Welle als eben betrachtet werden kann (eben=horizontale Tangente an die Wellenfront) werden mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche des Versuchskörpers kleiner. Dieses Verhalten ist in Bild 4.16 skizziert. Abschnitt 5.5.2 enthält messtechnische Untersuchungen zu diesem Verhalten.

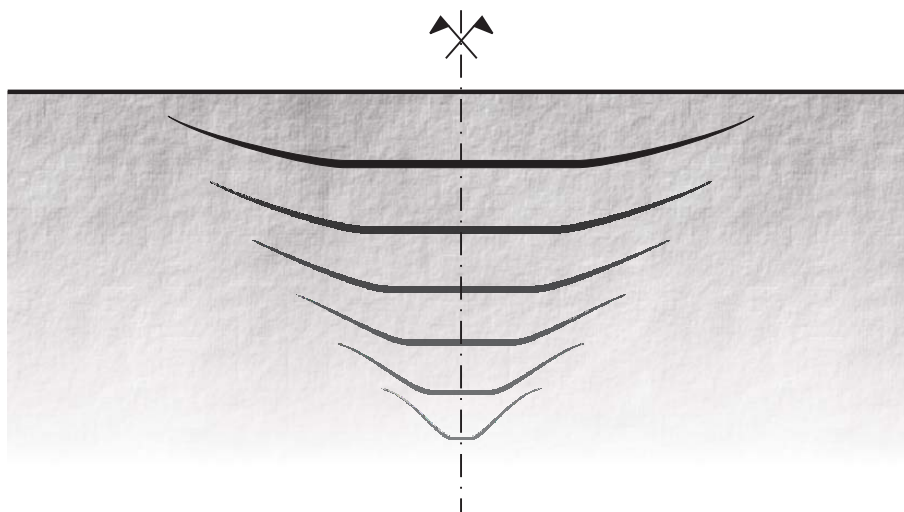


Bild 4.16: Änderung der Wellenform mit zunehmender Entfernung von der Oberseite

Die prinzipielle Wirkung von Belastungswellen lässt sich direkt aus Stoßwellenexperimente ableiten. Nach MEYERS [64] stellen diese Experimente zuverlässige Methoden dar, um die Materialeigenschaften hochdynamischer Vorgänge analysieren zu können. Eine Alternative zu häufig durchgeführten Planarplatten-Experimenten ist die Verwendung von Sprengstoffen in Form einer aufgelegten Ladung (Kontaktladung). Verbunden mit einer entsprechenden Instrumentierung im Innern der Versuchskörper, lassen sich durch Drucksignale an Messelementen und deren Ankunftszeiten u.a. HUGONIOT-Zustände ableiten. Mit dieser Methode wurden alle im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen durchgeführt.

5 Experimentelle Untersuchungen

Wird Sprengstoff in Form einer aufgelegten Ladung durch Zündung zur Detonation gebracht, so resultiert aus der Explosion des Sprengstoffs eine direkte Belastung des Versuchskörpers in Form einer Stoßwelle. Diese Art der Belastung wird als Kontaktdetonation bezeichnet. Im vorliegenden Fall erfolgt die Belastung durch eine Sprengladung mit spezieller Geometrie in Form einer ebenen Stoßwelle (Plane-Wave).

Kennzeichnend für die Belastung durch die Sprengladung sind lokal extrem hohe Drücke, verbunden mit einer Zerstörung der Porenstruktur des Betons, was wiederum kurzfristig zu einer Änderung der thermischen Verhältnisse führt.

Die besondere Herausforderung der Experimente liegt darin, die innerhalb eines extrem kleinen Zeitfensters stattfindenden Veränderungen zu erfassen. Hierfür wird im Inneren der Versuchskörper eine räumlich und zeitlich hoch auflösende Messtechnik eingesetzt, die es erlaubt, Veränderungen im Bereich weniger Mikrosekunden aufzuzeichnen. Teile dieser Messtechnik sind Eigenentwicklungen.

Ausgehend von einer einführenden Beschreibung der eigenen Versuchsmethode und des Versuchsaufbaus (Abschnitt 5.1) werden im Abschnitt 5.3 die Komponenten der Messkette vorgestellt und ihre Funktion erläutert. In Abschnitt 5.5 wird die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messschriebe gezeigt und die daraus gewonnenen Ergebnisse dargestellt. Ergebnisse aus Wärmestrommessungen werden in Abschnitt 5.5.5 mit theoretischen Berechnungsansätzen verglichen. Abschließend werden zwei Methoden zur Ermittlung von Risslaufzeiten vorgestellt, aus denen sich mittlere Rissgeschwindigkeiten ableiten lassen (Abschnitt 5.7).

Grundlage dieser Arbeit bilden sprengtechnische Untersuchungen, die im Zeitraum von April 2004 bis Oktober 2006 am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal-Berghausen durchgeführt wurden. Die für die Versuche notwendige Sprengtechnik wurde vom ICT zur Verfügung gestellt. In fünf Versuchsreihen wurden insgesamt 11 Betonkörper gleicher Geometrie mit Ladungsgrößen von 3325 g und 640 g angesprengt.



Bild 5.1: oberer Bildteil: (links) Versuchskörper (1,0 x 1,0 x 0,5 m) mit kegelförmiger Ladung (3325 g, $\varnothing = 20$ cm); (rechts) Versuchskörper 200 μ s nach der Zündung; unterer Bildteil: (links) fortschreitende Zerstörung nach 750 μ s; (rechts) Sprengergebnis

5.1 Eigene Versuchsmethode und Versuchsaufbau

Mit der Belastung durch Stoßwellen sind im wesentlichen Änderungen der physikalischen Größen

- Druck,
- Volumen oder Dichte und
- Temperatur verbunden.

Bild 5.1 zeigt Momentaufnahmen während des Versuchs; oben links einen Versuchskörper mit aufgelegter, kegelförmiger Ladung vor Versuchsbeginn. Rechts oben ist der Versuchskörper am Ende des Zeitfensters der Untersuchungen, ca. 200 μ s nach Zündung der Ladung zu sehen. Innerhalb dieses Zeitraumes durchläuft die Belastungswelle den Versuchskörper und erreicht dessen

Unterseite. Der weitere Fortschritt der Zerstörung des Versuchskörpers (links unten) ist nicht Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen. Das rechte untere Teilbild zeigt das Sprengergebnis bei Verwendung einer Sprengstoffmenge von 3325 g.

5.1.1 Möglichkeiten und Grenzen der Versuchsmethode

Bild 5.1 verdeutlicht, dass bei größeren Sprengladungen ohne übrigbleibende Restkörper eine räumlich und zeitlich hoch auflösende Messtechnik erforderlich ist. Zu diesem Zweck wurden in die Betonkörper in geeigneter räumlicher Anordnung Messelemente eingebettet. Aus ihren elektrischen Spannungssignalen werden mechanische Größen zur Beschreibung des Materialverhaltens abgeleitet. Insbesondere sind dies:

- Volumetrische Druckwerte. Mit diesen Werten wird eine Beziehung in Form einer Druck-Volumen-Beziehung (HUGONIOT-Kurve) zur Lösung der Erhaltungsgleichungen an der Stoßfront gewonnen (vgl. Abschnitt 2.3 und Abschnitt 5.5.3).
- Gerichtete Spannungsanteile in Belastungsrichtung und senkrecht dazu. Diese Werte werden zur Identifikation der Form einer Versagensfläche herangezogen, wodurch numerische Modelle validiert werden können (Abschnitt 5.5.2).
- Materialverzerrungen in Belastungsrichtung und senkrecht dazu. Aus diesen Messwerten werden erstmals HUGONIOT-Daten für Beton ermittelt (Abschnitt 5.5.3).
- Thermische Veränderungen innerhalb des Beton während der Materialkompression beim Durchgang der Stoßwelle (Abschnitt 5.5.5).

Bild 5.2 zeigt eine Übersicht der eingesetzten Messelemente und der abgeleiteten Messgrößen. Die Ermittlung der Messdaten und die aus ihnen abgeleiteten Erkenntnisse werden ausführlich in Unterabschnitten des Abschnitts 5.5 dargestellt.




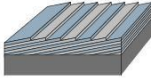
<ul style="list-style-type: none"> • Kohle - Masse - Widerstände (KMW) ➔ volumetrische Drücke 	
<ul style="list-style-type: none"> • Manganinaufnehmer (MA) ➔ gerichtete Spannungsanteile 	
<ul style="list-style-type: none"> • Dehnmessstreifen (DMS) ➔ Volumenänderung 	
<ul style="list-style-type: none"> • Atomlagen-Thermosäulen (ALTS) ➔ Wärmestrom 	
<ul style="list-style-type: none"> • Hochgeschwindigkeitskameratechnik / Leitlackstreifen ➔ Risslaufzeiten 	

Bild 5.2: Messelemente und Messtechniken

Bei Verwendung einer kleinen Sprengladung (640 g) können auch an Resten des Versuchskörpers durch Aufnahme von Rissmustern, Erfassen von Kraterabmessungen und Analyse von Schädigungszonen an einem Sägeschnitt Rückschlüsse auf das Materialverhalten gezogen werden (vgl. Abschnitt 5.6).

Im Sinne der Einteilung dynamischer Versuchsmethoden nach HIERMAIER [46] bilden die hier vorgestellten Untersuchungen eine Kombination unterschiedlicher Versuchsmethoden. Die Untersuchungen können für die Validierung eines Gesamtrechenmodells und auch für die Validierung von Komponenten des Rechenmodells herangezogen werden.

Eine Abgrenzung muss aber gegenüber Versuchsmethoden erfolgen, mit denen aufgrund der apparativen Voraussetzungen, dem Versuchsaufbau und den Abmessungen der Testkörper einzelne Materialparameter ermittelt werden können. Mit der hier vorgestellten Methode ist dies nicht möglich. Bedingt durch die Art des Lasteintrags und dem gleichzeitigen Einsatz verschiedenartiger Messelemente in einem Versuch ergeben sich Abhängigkeiten innerhalb der gesamten Messkette. Eine breite Streuung der Ergebnisgrößen ist in dieser Methode implizit enthalten.

Gegenstand der Untersuchungen ist das Materialverhalten eines üblichen Konstruktionsbetons in seiner Gesamtheit als heterogener Werkstoff und durch möglichst viele unterschiedliche Informationen aus einem einzelnen Versuch das Materialverhalten zu beschreiben. Dies wurde an allen 11 der hier beschriebenen Versuchskörper mit bauteilähnlichen Abmessungen umgesetzt.

5.1.2 Versuchseinrichtung

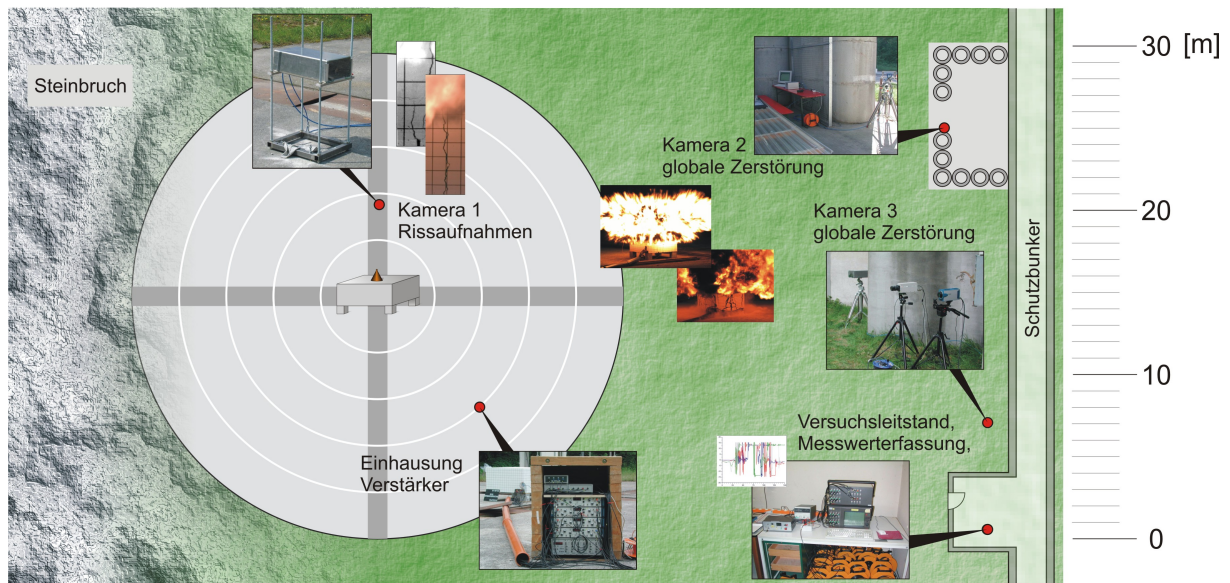


Bild 5.3: Versuchsaufbau

Bild 5.3 zeigt den Versuchsaufbau mit seinen wesentlichen Bestandteilen. In diesem Abschnitt wird die Herstellung einzelner Komponenten näher beschrieben. Auf elektronische Gesichtspunkte wird ausführlich in Unterabschnitten von Abschnitt 5.3 eingegangen. Die wesentlichen Bestandteile der Versuchseinrichtung sind:

- Versuchskörper mit Messelementen
- Sprengladung und elektronische Zündeinheit
- Registriereinheit (Transientenrekorder, TRA)
- Zwischenverstärker
- Messleitungen
- Hochgeschwindigkeitskamera
- Schutzeinhausung für die elektronischen Geräte

Versuchskörper

Die Abmessungen der Versuchskörper wurden von früheren Untersuchungen von OCKERT [69] und HERRMANN [42] am Institut für Massivbau (IfMB) übernommen. Dadurch wurden in Abhängigkeit der verwendeten Ladungsgröße definierbare Zerstörungszustände erzielt. Außerdem wurde erreicht, dass die Messung im Innern nicht von an den Seitenflächen reflektierten Wellen beeinflusst wurde. Für die Versuchskörper wurde ein üblicher Konstruktionsbeton (C 30/37) mit einem Zuschlagsgrößtkorn von 16 mm verwendet. Eine Bewehrung wurde in Form von Bügelmatten (Q 335 A) ausschließlich in den Randbereichen angeordnet. Dadurch verblieb in Plattenmitte der Bereich, in dem die Messungen stattfanden, ohne Bewehrung. Bei einer Bewehrungsmenge von $3,35 \text{ cm}^2/\text{m}$ lagen die Spannungen im Bewehrungsstahl infolge Eigengewicht und Schwinden in einem Bereich, in dem eine vorzeitige Schädigung des Betonkörpers durch Rissbildung ausgeschlossen werden konnte. Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in der Betonieranlage des IfMB. Rezeptur des Betons und die im Labor des IfMB ermittelten Betonkennwerte der jeweiligen Mischungen sind in Anhang A zusammengestellt. Beim Betonieren wurde die spätere Oberseite der Versuchskörper durch den Schalboden gebildet. Dies gewährleistete eine nahezu ebene Auflagefläche für die Sprengladung. Der Einbau aller Elemente in die Schalung erfolgte somit „Kopf unter“ (vgl. Bild 5.5). Nach dem Ausschalen wurden die Versuchskörper wegen der besseren Handhabung bei den Folgearbeiten gedreht.

Kapselungen der Messelemente

Im Innern der Versuchskörper wurden unterschiedliche Messelemente positioniert. Diese wurden zum Schutz vor mechanischer Beschädigung während der Herstellung der Versuchskörper und zum Schutz vor einer Zerstörung vor dem Registrieren des Messsignals in unterschiedlicher Form gekapselt. Tabelle 5.1 enthält eine Auflistung der verwendeten Messelemente und Angaben zu den Werkstoffen, die für die Kapselungen eingesetzt wurden. Der Unterschied zwischen den Impedanzen dieser Materialien und dem umgebenden Beton trägt zu keiner wesentlichen Beeinflussung des Signals an der Messstelle bei. Um auch die Materialveränderungen im Innern der Versuchskörper so wenig wie möglich durch die Geometrie der Kapselungen zu beeinflussen, wurden die Abmessungen in Belastungsrichtung in der Größenordnung des verwendeten Größtkorns festgelegt. Innerhalb der Kapselungen wurde darauf geachtet, dass sich Anschlusspunkte für die Messleitungen -in Belastungsrichtung betrachtet- hinter der Sensorfläche befinden (KMW, MA, DMS). Bei den ALTS wurde ein Schutz der Anschlusspunkte durch ein speziell ausgebildetes Kunststoffgehäuse erreicht. Diese Art der Kapselung wird in einem eigenen Kapitel vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.4.4 und 5.4.5).

Tabelle 5.1: Messelemente

Element	Bezeichnung	Messgröße	Kapselung
Kohle-Masse-Widerstand	KMW	volumetrischer Druck	Epoxydharz
Manganin-Folienaufnehmer	MA	gerichtete Spannungsanteile	Aluminium
Dehnmessstreifen	DMS	Materialverzerrungen	Aluminium
Atomlagen-Thermosäule	ALTS	Wärmestrom, Temperatur	Kunststoffgehäuse
Leitlackstreifen	LL	Risslaufzeiten	-

Kohle-Masse-Widerstände werden zum Schutz üblicherweise vollständig in Epoxidharz eingegossen (vgl. u.a. HERRMANN [42], GINSBERG [30], STANKIEWICZ [85]). Durch Herstellung eigener Gussformen aus PE-HD wurde bei dieser Kapselung eine exaktere Positionierung der Widerstandskörper innerhalb der Kapselung erzielt und eine deutlich verbesserte Formgebung erreicht.

Manganin-Elemente sind aufgrund ihres Aufbaus (vgl. Abschnitt 5.3.2) äußerst empfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung und müssen deshalb besonders sorgfältig gekapselt werden. Bei üblichen Stoßwellenuntersuchungen im Planar-Platten-Versuch werden MA-Elemente zwischen PE-Streifen eingebettet (HOY [51]). Bei Stoßbelastungen unter Kontaktdetonation mit weitaus höheren Druckamplituden reicht das nicht aus. Wie bei früheren Untersuchungen von HERRMANN [42] wurde Aluminium als Kapselungsmaterial verwendet. Diese Art der Kapselung bietet einen ausreichenden Schutz gegenüber mechanischer Beanspruchung während des Betoniervorgangs. Im Hinblick auf die Grenzflächenübergänge besitzt dieses Material Impedanzen in der Größenordnung der Zementsteinmatrix, sodass keine signifikante Beeinflussung des Messsignals auftritt.

Bild 5.4 zeigt Änderungen gegenüber früheren Bauformen und eine vergleichende Darstellung unterschiedlicher Kapselungsarten. Das Verfüllen der nach Zusammenbau offenen Gehäuseoberseite mit Epoxidharz führte bei axialem Einsatz der Manganinelemente zu einer besseren Vergleichbarkeit der Signalkanftszeit zwischen Manganinaufnehmern und KMW (vgl. Abschnitt 5.5.1). Die Ausbildung der Spitze bei den Kapselungen für radialen Einsatz der Manganinelemente, verhinderte gegenüber früheren Bauformen ein Aufspalten der Kapselung in Längsrichtung. Die Aluminiumkapselungen für die DMS wurden so verändert, dass Zusammenbau der Kapselungen und Einbau der Messelemente möglichst einfach sind. Ausführliche Planunterlagen zu den einzelnen Bauformen enthält Anhang D.

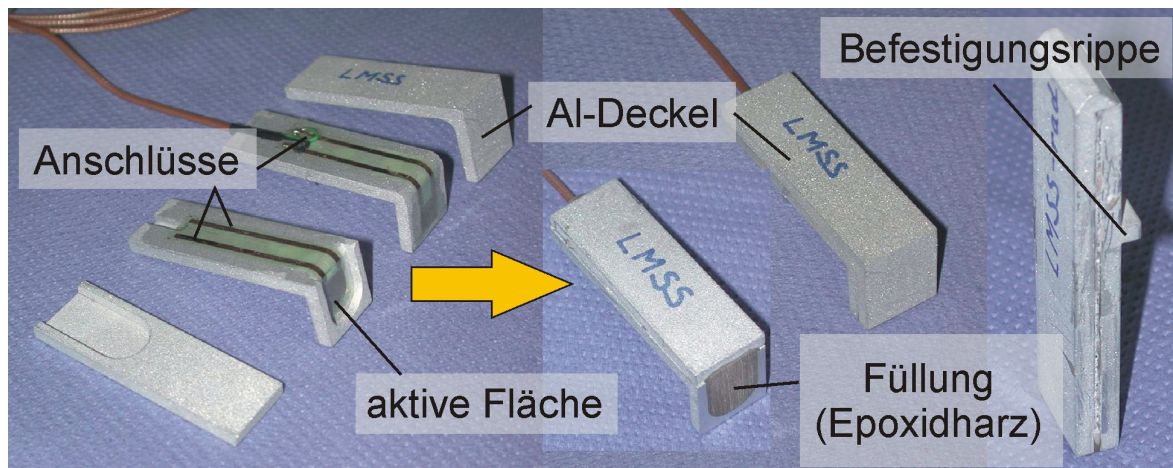


Bild 5.4: Kapselungen der Manganinaufnehmer

Positionsgitter

Die gekapselten Messelemente wurden zur genauen Justierung ihrer Lage mit dünnem Silberdraht und Kabelbindern am jeweiligen Positionsgitter befestigt. Das bestückte Gitter wurde vor dem Betonieren in die Schalung eingebaut und jeweils am Schalboden und an der Oberseite fixiert (vgl. Bild 5.5, rechts). Die Verkabelung innerhalb der Versuchskörper erfolgte mit dünnem Koaxialkabel ($\varnothing = 2 \text{ mm}$) des Typs RG - 178. Die Koaxialkabel wurden an einem Eckstab des Gitters zusammengeführt und entlang der Bewehrung entweder über einen innerhalb der Schalung befestigten Verteilerkasten (Versuchskörper Nr. 1-6, Nr. 9 und Nr. 10) oder über ein flexibles Schlauchstück aus dem Versuchskörper (Versuch Nr. 7, 8 und Nr. 11) herausgeführt (vgl. Bild 5.5).

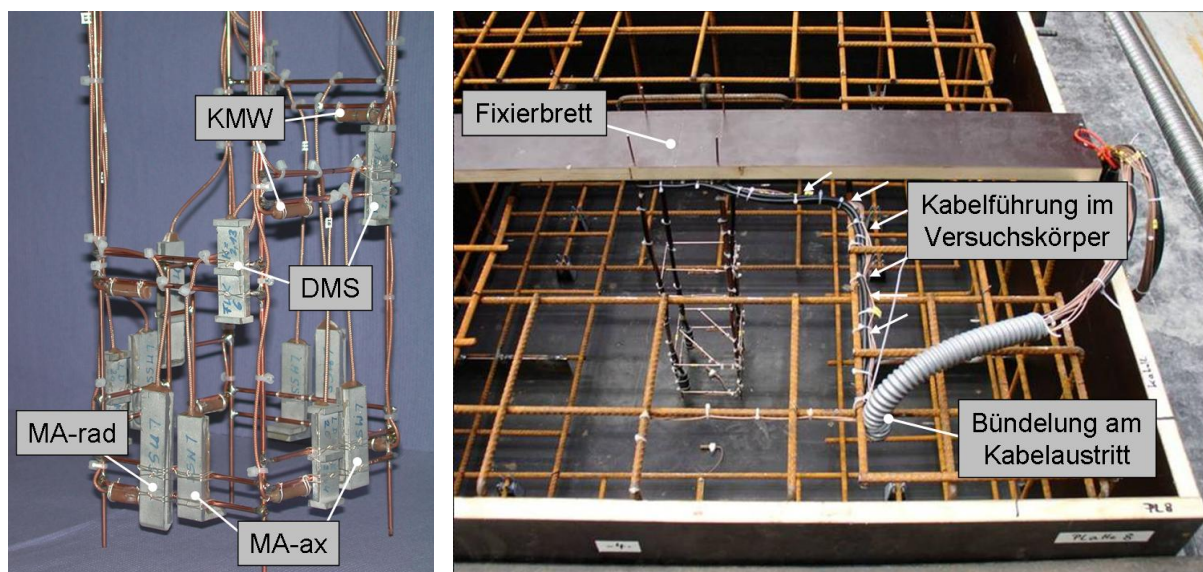


Bild 5.5: Positionsgitter mit gekapselten Messelementen; (links) vor dem Einbau in die Schalung, (rechts) nach Einbau

Innerhalb der Versuchsreihen wurden Gitterkonstruktionen mit unterschiedlichen Abmessungen der quadratischen Stirnflächen eingesetzt. Bei Verwendung des kleinen Ladungskegels wurden die Stirnflächen des Positionsgitters durch Querstäbe mit einer Länge von 100 mm gebildet. Im Falle der großen Ladung wurden Stäbe mit 150 mm Länge verwendet. Dadurch waren die Stirnflächen der Positionsgitter nicht größer als, die von der jeweiligen Ladung auf der Oberseite des Versuchskörpers abgedeckte Fläche. In einigen Versuchen wurde die Gittergrundform durch zusätzliche horizontale Querstäbe ergänzt. Für die Versuche Nr. 3 und Nr. 4 wurden die Gitter so abgeändert, dass bei einem konstanten Abstand zur Oberseite zusätzliche Messelemente innerhalb und außerhalb des Gitters positioniert werden konnten. Dadurch konnte u.a. die Formänderung der Belastungswelle beim Durchlaufen des Versuchskörpers erfasst werden (vgl. Bild 5.43). An den Befestigungsgittern der Versuchskörper Nr. 5, 6, 7 und Nr. 8 wurden im Anschluss an den ladungsnahen oberen Bereich der Versuchskörper zusätzliche Querstäbe mit unterschiedlichen Abständen von der lotrechten Mittenachse eingelötet (Bild 5.6). Dadurch war es möglich, Messelemente an Stellen zu positionieren, an denen eine waagerechte Tangentialebene an der Front der Druckwelle zu erwarten war (vgl. Bild 4.16). Dadurch wurde auch an diesen Stellen der Druckwert einer Messgröße an der Stoßfront zugänglich.

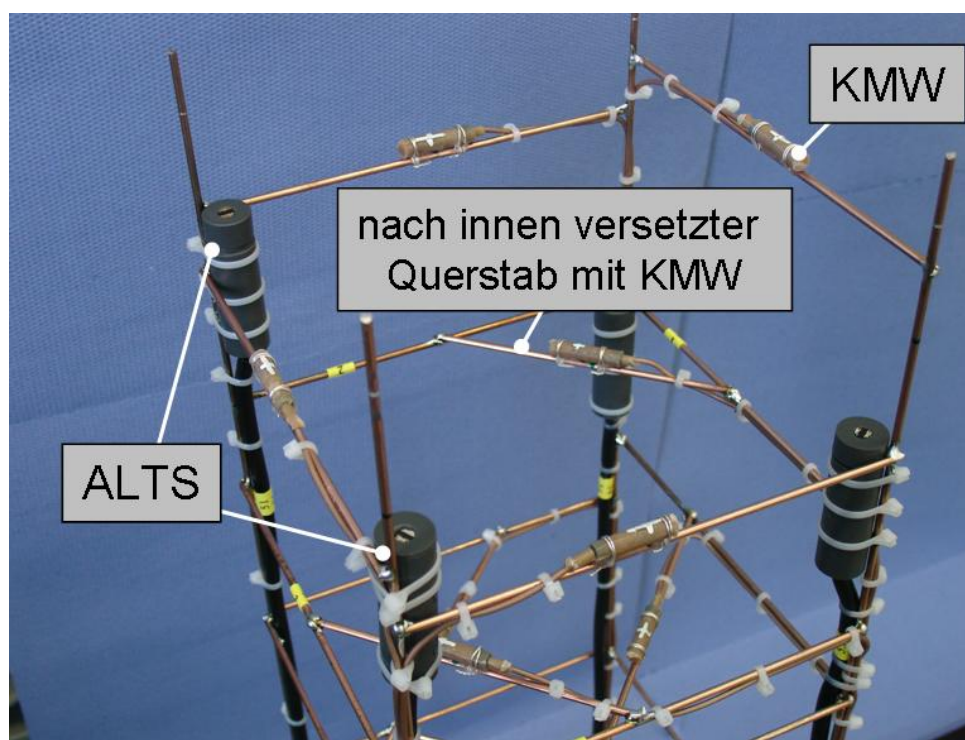


Bild 5.6: Positionsgitter mit zusätzlich angebrachten Querstäben

Die Lage der Messelemente wurde nach dem Einbau des Gitter aufgenommen und mit den Sollwerten verglichen und falls erforderlich korrigiert. Da innerhalb der Kapselung die Lage eines Messelementes genau festgelegt ist, konnte die Position der befestigten Elemente nach dem Einbau mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm angegeben werden. Lagerverschiebungen während des Betoniervorgangs waren aufgrund der Elementbefestigung mit dünnem Silberdraht, Kabelbindern und Klebepunkten und der ausreichend hohen Steifigkeit des Positionsgitters nicht zu erwarten. Weiterhin wurde die Beeinflussung des Belastungszustandes im Versuchskörper dadurch verringert, dass die Messelemente vor dem Betonieren im Versuchskörper positioniert wurden. Bohrungen in den erhärteten Versuchskörper zum nachträglichen Einbau von Messelementen hätten störende Grenzflächen (vgl. Kapitel 2) herbeigeführt.

Eine Ausnahme bilden die Versuche Nr. 9 - 11. In diesen Versuchen wurden zusätzlich zum Positionsgitter vor dem Betonieren Stahlstangen unterschiedlicher Länge in die Schalung eingebaut und nach dem Erhärten des Betons wieder entfernt. In die auf diese Weise erzeugten Hohlräume wurden nachträglich die ALTS in den Versuchskörper eingebracht. Der verbleibende Hohlraum wurde mit einem fließfähigen Beton nachträglich verfüllt. Bild 5.7 zeigt links Teile der eingebauten Stahlstangen und deren Befestigung an der Oberseite der Schalung. In Bildmitte ist die Situation während des Betonierens dargestellt. Rechts ist das nachträgliche Ziehen der Stahlstangen mit dem Kran nach Erhärten des Betons zu sehen.



Bild 5.7: Stahlstangen und Ziehen der Stangen

Sprengladung – Plane-Wave-Generator

Die kegelstumpfförmige Ladung besteht aus zwei Sprengstoffkomponenten: TNT und Composition B. Composition B ist ein militärischer Sprengstoff, der zu ca. 60 % aus TNT und zu 40 % aus RDX besteht. Beide Sprengstoffkomponenten besitzen unterschiedliche Detonationsgeschwindigkeiten (siehe Bild 5.8). Geometrie und Aufbau der Ladung sorgen dafür, dass die sich nach der Zündung innerhalb des Ladungskegels ausbreitende Stoßwelle an der Kontaktfläche zum Versuchskörper als ebene Welle eingetragen wird. Eine Ladung dieser Bauart wird als Plane-Wave-Generator bezeichnet. Die Herstellung der Ladungskegel erfolgte im Technikum des Fraunhofer-ICT.

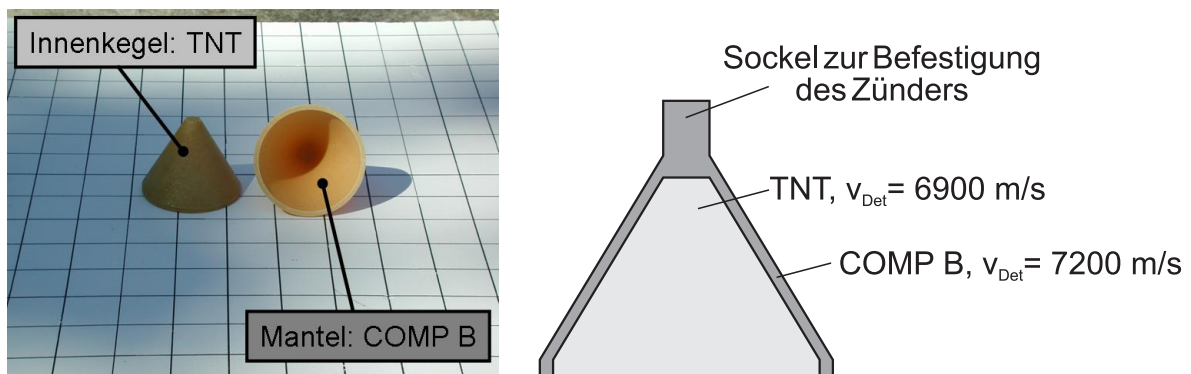


Bild 5.8: Aufbau der Sprengladung

Grundsätzlich lassen sich ebene Wellen auch bei der Verwendung einer zylindrischen Ladungsgeometrie und nur einem Sprengstoff erzeugen. Die kegelförmige Ladung bietet jedoch entscheidende Vorteile:

- Eine große beaufschlagte Fläche bei gleichzeitig geringer Sprengstoffmenge; die Sprengstoffmenge kann eine Einschränkung bei der Auswahl des Versuchsgeländes darstellen.
- Eine ebene Belastungswelle mit einer größeren räumlichen Ausdehnung, d.h. der Bereich mit einer horizontalen Tangente an der Front der eingekoppelten Druckwelle wird dadurch vergrößert.

Da sich darüber hinaus innerhalb der Bereiche mit horizontaler Tangente die Ordinaten der registrierten Messgrößen nicht ändern, ergibt sich beim Einsatz eines Plane-Wave-Generators für die Anordnung der Messelemente ein weiterer, wesentlicher Vorteil:

- Die Veränderung, die der Beton beim Wellendurchgang erfährt, kann von Messelementen an unterschiedlichen Orten innerhalb einer Fläche mit konstanter Entfernung von der Oberseite des Versuchskörpers erfasst werden. Dadurch ist es möglich, verschiedene Eigenschaften durch den Einsatz unterschiedlicher Elemente innerhalb eines Versuchs zu ermitteln. Werden Elemente des gleichen Typs innerhalb einer Ebene eingesetzt, ist eine Kontrolle der erhaltenen Messgröße und der angenommenen Symmetriebedingung der Belastung möglich (vgl. Bild 5.9).

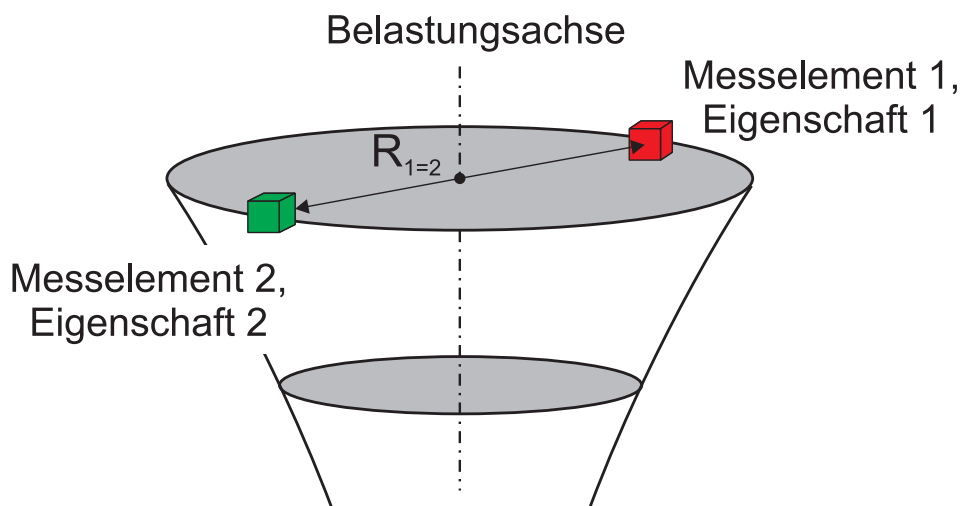


Bild 5.9: Elementanordnung

Innerhalb der Versuchsreihe wurden zwei unterschiedliche Ladungsgrößen eingesetzt, die in allen Versuchen mittig in der Oberfläche der Versuchskörper positioniert wurden. Tabelle 5.2 enthält eine Übersicht der eingesetzten Sprengladungen.

Tabelle 5.2: Ladungsgrößen

Versuch Nr.	Ladungsgröße [g]	TNT/Comp B [g]	Fläche [cm ²]
1	640	450/190	78,5
2			
3	3325	2380/945	314,2
4			
5			
6			
7	640	450/190	78,5
8			
9			
10			
11	3325	2380/945	314,2

Bild 5.10 skizziert den prinzipiellen Einfluss der Ladungsgeometrie auf die Form der in den Versuchskörper eingetragenen Welle. Der dargestellte Unterschied zwischen zylindrischer und kegelförmiger Ladung lässt sich leicht auf einen Vergleich zwischen großer und kleiner Ladung übertragen. Weiterführende, auf Messtechnik gestützte Untersuchungen zur Form der eingekoppelten Stoßwelle werden in Abschnitt 5.5.2 vorgestellt.

Weitere Bestandteile der Versuchseinrichtung sind aufgrund ihrer Funktion der Messtechnik zuzuordnen. In Abschnitt 5.3 werden die wichtigsten Geräte vorgestellt.

5.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Sprengungen (vgl. Bild 5.3) wurden die Versuchskörper auf der Betonplatte des Sprenggeländes positioniert und in den Eckbereichen aufgelagert. Die Lagerung erfolgte auf Betonwürfeln und zusätzlichen Lagern aus Holz zwischen Versuchskörper und Würfel bzw. Würfel und Bodenplatte (vgl. z.B. Bild 5.1). Eine am Rand der Bodenplatte errichtete Schutzeinhausung aus Holz diente zur Aufnahme der Geräte zur Signalverstärkung. In einem von dort ca. 30 Meter entfernten Schutzraum des Sprengplatzes wurden neben der

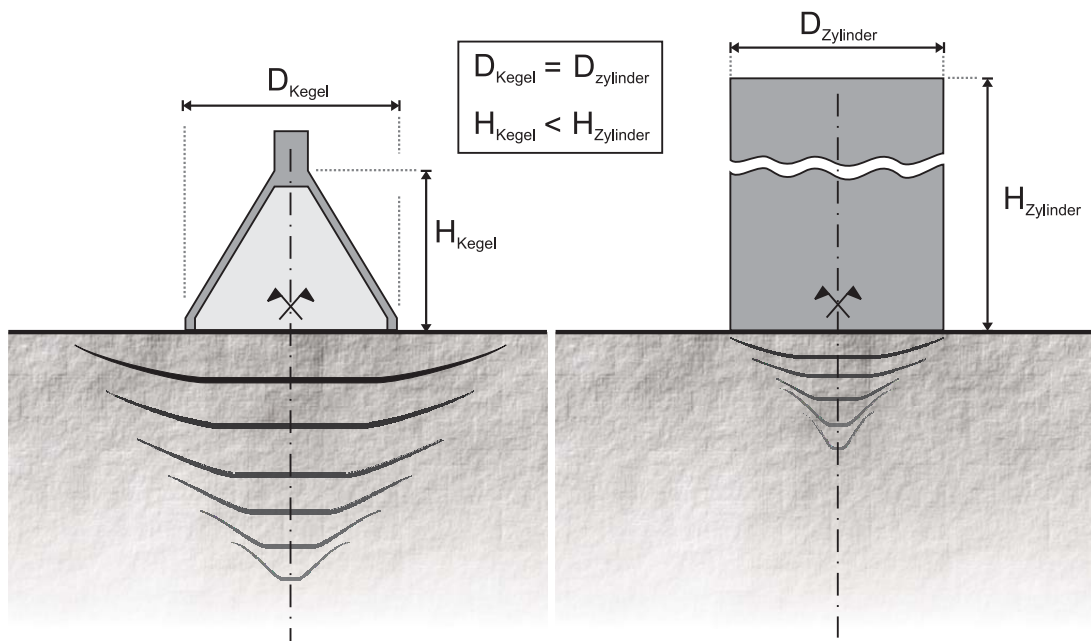


Bild 5.10: Schematische Darstellung der Änderung der Wellenform mit zunehmender Entfernung von der Stelle des Lasteintrags; (links) kegelförmige Ladung und (rechts) zylindrische Ladung

Registriereinheit auch alle weiteren elektronischen Geräte für die Steuerung der Versuchseinrichtung untergebracht.

Die Verkabelung zwischen den Versuchskörpern und den Eingängen der Verstärker erfolgte mit 7,5 m langen Koaxialkabelstücken. An den Versuchskörpern waren zum Anschluss dieser Kabelstücke BNC-Buchsen vormontiert. Die Ausgänge der Verstärker wurden mit 50 m langen Koaxialkabeln an den entsprechenden Kanälen am Transientenrekorder angeschlossen.

Die Zündung der Ladung erfolgte mit einem elektronischen Zündgerät aus dem Schutzraum heraus. Diese und alle anderen im Zusammenhang mit der Sprengtechnik stehenden Tätigkeiten wurden durch einen Sprengberechtigten des Fraunhofer Instituts ausgeführt.

5.2.1 Triggerung

Triggerung bedeutet im weitesten Sinne Prüfen des Vorhandenseins oder des Erfülltseins einer Bedingung. Ist sie erfüllt, wird ein Ereignis ausgelöst [91]. Im vorliegenden Fall ist das Unterschreiten eines festgelegten Schwellenwertes der Zündspannung (vgl. TTL-Pegel in Bild 5.14) die Bedingung für das Auslösen bestimmter Ereignisse innerhalb der Messkette. Diese Zusammenhänge werden in Bild 5.11 auf einer Zeitachse zusammengefasst.

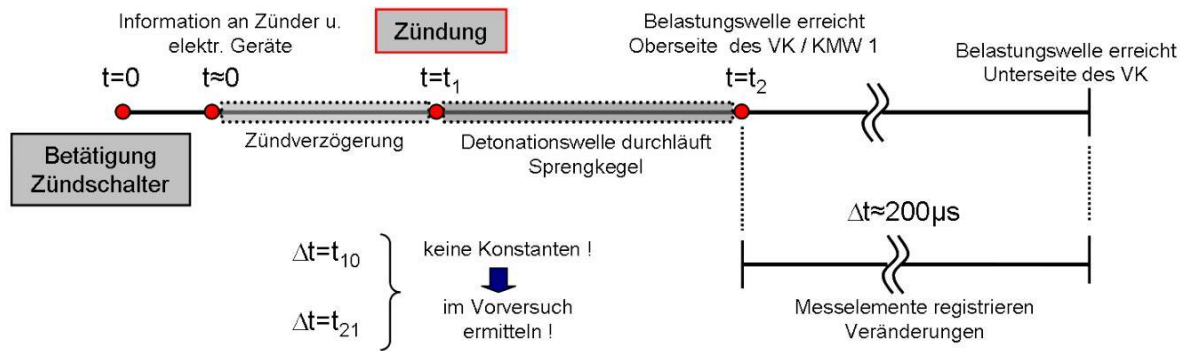


Bild 5.11: Zusammenhänge bei Triggerung der Messkette

Durch die Betätigung des Zündschalters am Zündgerät erhält der Zünder einen Spannungsimpuls, der ihn zur Zündung der Sprengladung veranlasst und damit die Detonation einleitet (vgl. Kapitel 1). Gleichzeitig wird die Zündspannung, die in Form eines TTL-Pegels direkt am Zündgerät abgegriffen werden kann, an eine spezielle Triggerschaltung weitergeleitet, in der alle zu triggernden Komponenten der Messkette zentral erfasst werden. Beim Unterschreiten der Ausgangsspannung um 35 % (vgl. Bild 5.14) werden bestimmte Abläufe innerhalb der Messkette ausgelöst:

- Der Beginn der Hauptmessung am Transientenrekorder, wodurch das Einlesen der Messwerte in den Speicher erfolgen kann.
- Die Bereitstellung der erforderlichen Versorgungsspannung an der Messstelle beim Einsatz der gepulsten Verstärker (vgl. Bild 5.14).
- Das Umschalten der Hochgeschwindigkeitskamera von Bereitschaft in den Aufnahme-Modus.

Bei der Betätigung des Zündschalters werden der Zünder und alle elektrischen Geräte zeitgleich aktiviert ($t=0$). Ab diesem Zeitpunkt steht gerätebedingt ein bestimmtes Zeitfenster (Speichervolumen) für die Datenerfassung zur Verfügung. Es ist wichtig zu wissen, wann die Belastungswelle die Oberseite des Versuchskörpers bzw. den ersten Messaufnehmer erreicht. Hierzu die folgende Betrachtung:

- Zum Einsatz kommen Zünder mit einer Verzögerung von weniger als $5 \mu\text{s}$ (Herstellerangabe). Diese Angabe unterliegt Schwankungen, trotz Spezifikation.
- Die Laufzeit der Belastungswelle innerhalb des Sprengkegels beträgt bei einer Detonationsgeschwindigkeit von 6700 m/s (TNT) und einer Höhe des Ladungskeges von 150 mm (große Ladung) ungefähr $22 \mu\text{s}$.

Somit verstreichen bei dieser Betrachtung rund $27 \mu\text{s}$ vom Zeitpunkt, an dem der Zünder die Information erhält, bis zum Zeitpunkt, an dem die Belastung den ersten Kohle-Masse-Widerstand an der Oberseite erreicht. Für die Laufzeit der Belastungswelle innerhalb des Versuchskörpers sind $150 \mu\text{s}$ eine konservative

Annahme, die sich aus einer mittleren Wellengeschwindigkeit bis zum Wiederaustritt ableiten lässt. Im vorliegenden Zahlenbeispiel sind die Vorgänge nach $177\ \mu\text{s}$ abgeschlossen. Somit sind alle Messstellen in der Lage, die Veränderungen infolge der durchlaufenden Belastungswelle zu registrieren.

In der Versuchspraxis ergeben sich aber zum Teil deutliche Abweichungen. Die von den Herstellern angegebenen Zeitkonstanten der Zünder unterliegen Streuungen und der Ablauf der chemischen Prozesse bei der Detonation der Ladung unterliegt ebenfalls Schwankungen. Von gleichen Verhältnissen darf folglich nicht ausgegangen werden. Wird beispielsweise ein Zünder mit einer in der Sprengpraxis üblichen Verzögerung von $1\ \text{ms}$ eingesetzt, dann erreicht die Belastungswelle erst nach $1,2\ \text{ms}$ den ersten Messaufnehmer in der Platte. Das hat zur Folge:

- Für die Manganin-Aufnehmer steht die Versorgungsspannung nicht ausreichend lange bereit, sodass keine Messwerte an diesen Messstellen erfasst werden.
- Die voreingestellte Blocklänge der Speichereinheit am Transienterecorder ist bereits zu großen Teilen gefüllt und bietet für die Messwerte keinen ausreichenden Speicherplatz; bei einer Abtastrate von $25\ \text{MHz}$ werden innerhalb einer $1\ \text{ms}$ bereits 25000 Werte an der Messstelle erfasst.
- Der Speicher der Hochgeschwindigkeitskamera ist in Abhängigkeit der gewünschten Bildanzahl/Sekunde ebenfalls begrenzt. Auch hier ist eine nicht vollständige Aufnahme der Sprengung die Folge.

Um derartige Datenverluste zu vermeiden, muss die Aktivierung der Aufnahmegeräte unabhängig von der Art der verwendeten Zünder und deren Verzögerung erfolgen. Zu diesem Zweck wurden in Vorversuchen zwei Aktivierungsmethoden auf ihre Eignung zur Triggerung untersucht.

5.2.2 Vorversuche

Ein dünner Kupferdraht und ein mit Leitlack bestrichener Glasstab wurden jeweils in Schaltungen eingebaut, die mit einer konstanten Spannung versorgt wurden. Die Schaltungen sind so ausgelegt, dass bei einem Bruch des Kupferdrahtes bzw. des Glasstabes ein Spannungssprung auf die Betriebsspannung des Schaltkreises erfolgt. Die Triggerung der Messkette erfolgt wiederum bei Erreichen einer zuvor festgelegten Spannungsgrenze. Bild 5.12 zeigt die Spannungsverläufe beider Varianten. Beide sind zur Triggerung ungeeignet, weil statt eines Spannungssprungs eine von Schwingungen überlagerte allmähliche Annäherung an die Betriebsspannung erfolgt.

Für eine Triggerung sollte ein Signal mit einer steilen Flanke vorliegen. Insbesondere muss die vorgegebene Triggerschwelle rasch überschritten werden, um eindeutig als Startsignal für die Messkette erkennbar zu sein. Eine Festlegung

der Triggerschwelle muss so erfolgen, dass Oszillationen um den Schwellenwert nicht auftreten und außerdem ein gut reproduzierbares Signal vorliegt (siehe Detail in Bild 5.12).

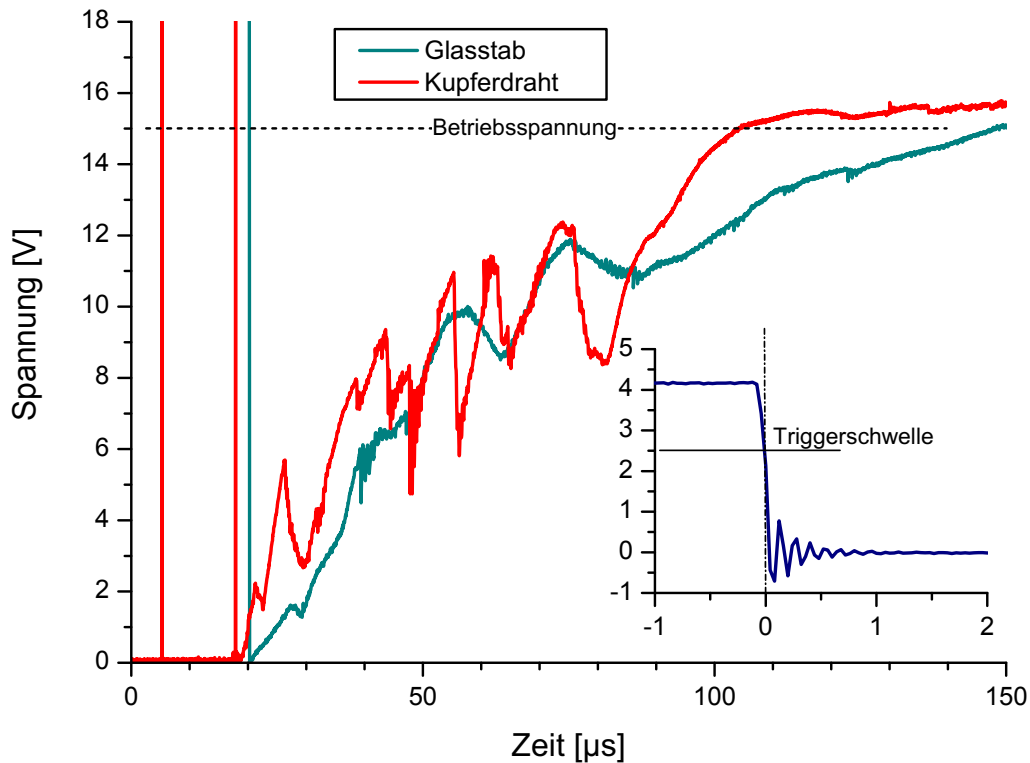


Bild 5.12: Vorversuche zur Triggerung und ideales Triggersignal

Als Ergebnis dieser Untersuchungen ist festzuhalten, dass beide Verfahren nicht zuletzt wegen des nur allmählich ansteigenden Spannungsverlaufs keine Alternative zu einer Triggerung direkt über das Zündsignal darstellen. Bei einer Triggerung über das Zündsignal sind aus den bereits genannten Gründen (Zündverzögerung) vor Versuchsbeginn zusätzliche Tests durchzuführen.

5.2.3 Funktions- und Zündertests

Vor Versuchsbeginn wurde in Funktionstests überprüft, ob die elektronischen Bestandteile der Messkette durch die vorgesehene Triggerung aktiviert werden und die ihnen zugeordnete Aufgabe bei der Messung übernehmen. Das Auslösen des Triggers wurde zunächst mit dem Züngerät ohne den Einsatz eines Zünders getestet. Die bei diesen Tests registrierten Signalverläufe („Nullmessungen“) wurden für die spätere Hauptmessung als Bezugsgrößen herangezogen. Um sicherzustellen, dass die Komponenten der Messkette auch mit Zünder

ihre Aufgabe wahrnehmen, wurden vor einer Versuchsreihe Zündertests durchgeführt. Diese Tests erfolgten an Betonwürfeln, die mit einer kleineren Menge von ca. 80-100 g PETN angesprengt wurden. Bild 5.13 zeigt den Testaufbau eines Zündversuchs.

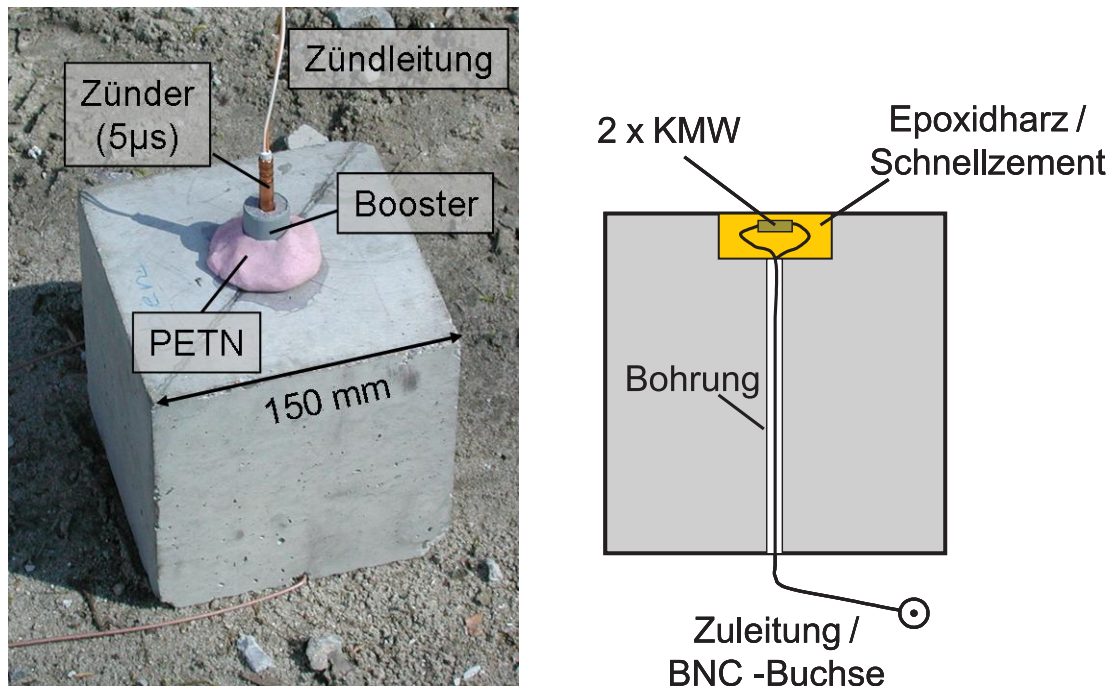


Bild 5.13: Zündertest: (links) Testaufbau; (rechts) Schnitt in der Symmetrieachse

Die Ankunftszeit der Belastung wurde wie in den Versuchskörpern der Hauptversuche mit zwei in die Probewürfel eingebauten KMW registriert. Gleichzeitig wurde in diesen Vortests immer die Zündspannung und der Verlauf der Versorgungsspannung (Dynasen-Gate) der gepulsten Verstärker für die Mangannelemente aufgezeichnet. In den Probewürfeln W 1 bis W 6 waren die KMW in Epoxidharz und im Test W 7 in einen Schnellzement (Racofix) eingegossen. Zwei von jeweils drei aus einer Charge entnommene Zündern wurden für Vortests eingesetzt. Der dritte wurde bei erfolgreichem Verlauf der Vortests im Hauptversuch eingesetzt.

Ergebnis der Zündertests

Aus Bild 5.14 wird ersichtlich, dass die Versorgungsspannung für das Dynasen-Gate 3,25 µs nach dem Triggerzeitpunkt aktiviert wurde und bereits nach ca.

7,5 μs einen weitgehend konstanten Verlauf erreicht hat. Eine Versorgung der Manganinmessstellen ist in diesem Fall sichergestellt.

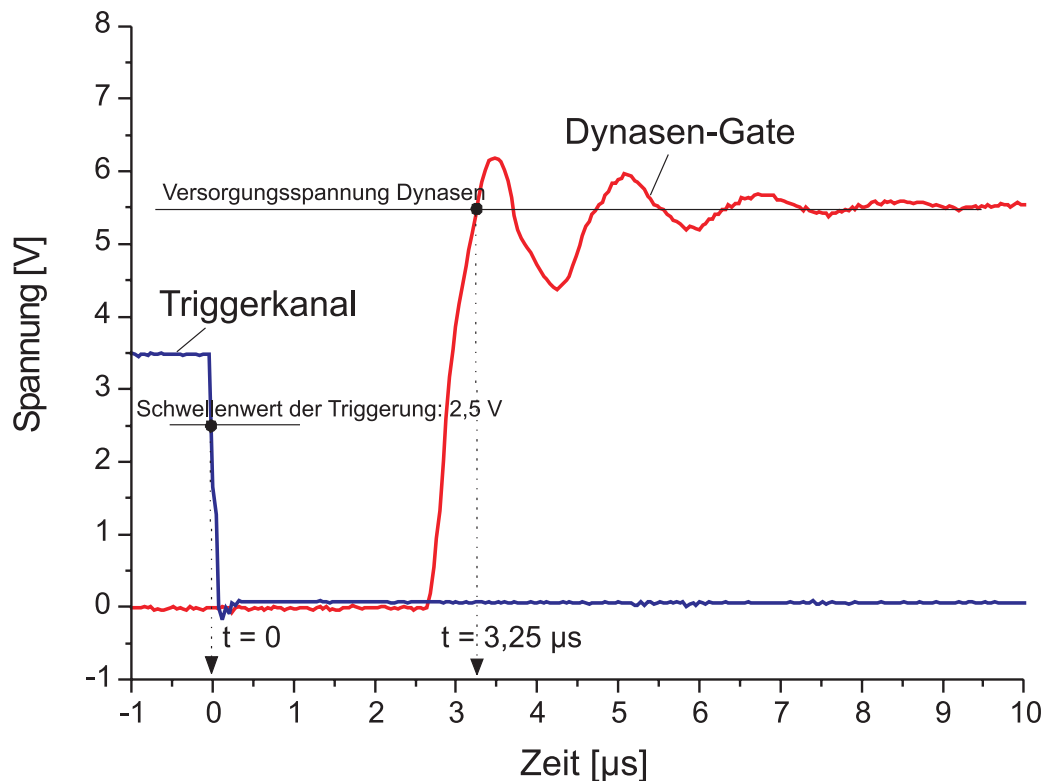


Bild 5.14: Triggersignal und Dynasen-Gate, Detail

In Bild 5.15 ist die früheste und die späteste Signalankunftszeit an einem KMW in Bezug zum Zeitfenster der Dynasen-Verstärker dargestellt. Mit diesen Ergebnissen lässt sich für einen Hauptversuch der Zeitpunkt abschätzen, an dem die Belastungswelle die Unterseite des Versuchskörpers erreicht. Addiert man zur Ankunftszeit des Tests W 1 (87 μs) die Laufzeit innerhalb des Ladungskegels (22 μs) und des Versuchskörpers (150 μs) hinzu, dann trifft die Belastungswelle 259 μs nach Betätigung des Zündschalters an der Unterseite des Versuchskörpers eintreffen. Da zusätzlich noch zeitliche Reserven bis zum Ende des Dynasen-Gate vorhanden sind, können alle Messstellen im zur Verfügung stehenden Zeitfenster Daten erfassen. Eine Korrektur der Gerätevoreinstellungen (Aufzeichnungsdauer, Speichervolumen) ist unnötig.

Bild 5.16 zeigt zusammenfassend alle Ergebnisse der durchgeführten Zünder-tests in einer Darstellung.

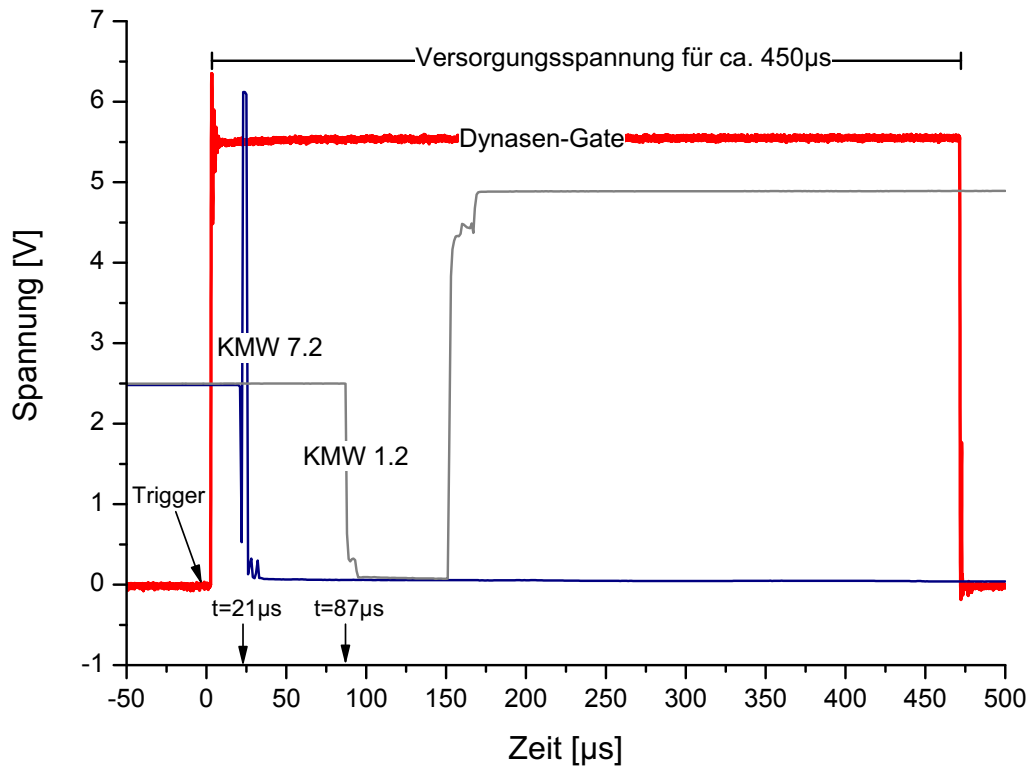


Bild 5.15: Gesamtverlauf Dynasen-Gate und extreme Signalankunftszeiten

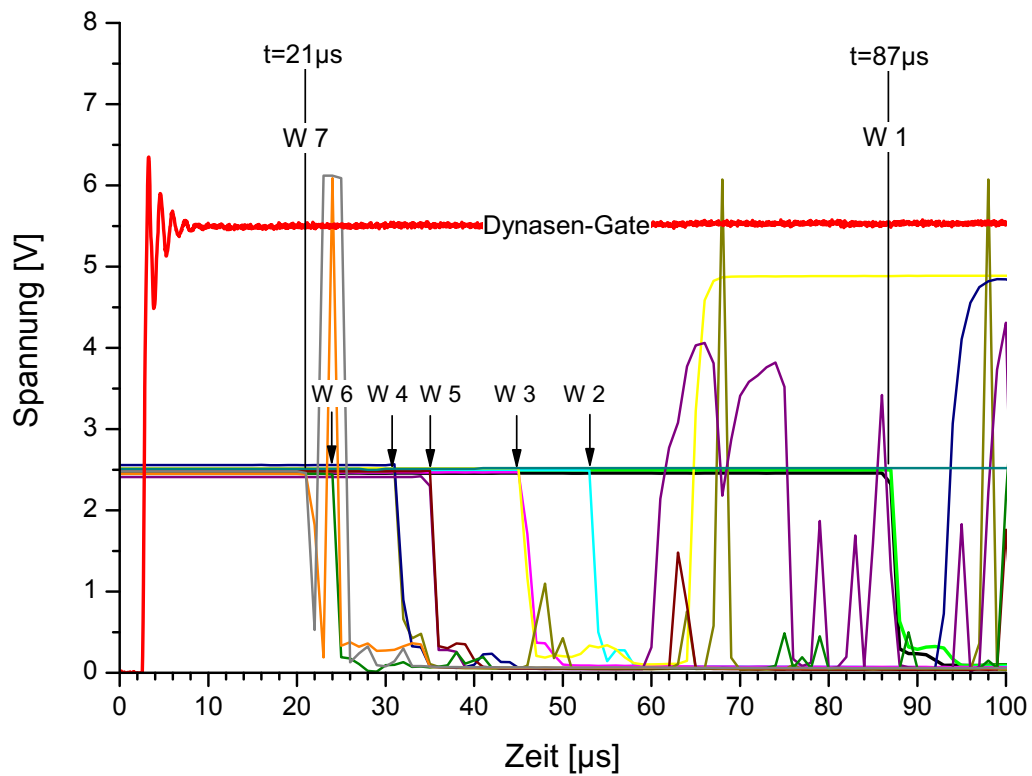


Bild 5.16: Ergebnisse der Zündertests – Detaildarstellung

5.3 Messtechnik

Bei der Durchführung von Versuchen im Kurzzeitbereich und speziell bei Untersuchungen unter Verwendung von Explosivstoffen ergeben sich besondere Anforderungen an die Messtechnik. Dies betrifft sowohl einzelne Komponenten als auch die gesamte Messkette:

- Die Ansprechzeiten der Messaufnehmer müssen so gering sein, dass ein Signalpeak erfasst werden kann, noch bevor der Aufnehmer beschädigt wird. Andererseits müssen die Messelemente so robust sein, dass sie nicht bereits bei der Herstellung der Probekörper ihre Funktion einbüßen.
- Signale an den Messstellen müssen in kurzen Messzyklen erfasst werden, schnell und weitgehend unverfälscht weitergeleitet und registriert werden.

Die wesentlichen Bestandteile der Messkette sind Geräte zum Abtasten der Messstelle und zur Datenspeicherung, zur Signalverstärkung, sowie Messleitungen und Messelemente. Gerade dem Einsatz dieser Komponenten kommt bei der Durchführung der vorgestellten Untersuchungen eine besondere Bedeutung zu. Im folgenden Abschnitt werden die Funktionsweise dieser Komponenten und ihrer Aufgabe innerhalb der Messkette näher erläutert.

5.3.1 Datenaufzeichnung und allgemeine Messtechnik

Transientenrekorder (TRA)

Für die Durchführbarkeit von Untersuchungen im Kurzzeitbereich kommen nur sogenannte Transientenrekorder in Frage. Transientenrekorder sind Systeme zur Datenspeicherung, die mit sehr hohen Abtastraten arbeiten können. Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurden Transientenrekorder des Typs TRA/TRF 800 der Firma W&W Scientific-Instruments mit insgesamt 24 Kanälen eingesetzt. 8 Kanäle arbeiten mit einer Tastfrequenz von 1 MHz, weitere 16 Kanäle erlauben eine Abtastrate von 25 MHz, d.h. Messwerte werden in einem zeitlichen Abstand von 1 μ s (1 MHz) und 40 ns (25 MHz) erfasst und an den Speicher übergeben.

Neben der hohen Geschwindigkeit bei der Datenerfassung sind insbesondere das Funktionsprinzip eines Transientenrekorders und die Art der Datenspeicherung ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz bei Untersuchungen im Kurzzeitbereich.

Funktionsprinzip

Bei einem Transientenrekorder erfolgt die Messung, die Signalverstärkung, die Umwandlung des analogen Messsignals in ein digitales Signal sowie die anschließende Speicherung der Informationen getrennt für jeden Kanal der Registriereinheit (vgl. Bild 5.17). Die an einer Messstelle erfassten Signale können

so in einen eindeutigen zeitlichen Bezug zu denen der anderen Kanäle gesetzt werden. Ermöglicht wird dies durch eine direkte Signalverstärkung, die für jeden Kanal des Transientenrekorders separat erfolgt. Der Vergleich mit einer in der Messtechnik zu diesem Zwecke ebenfalls gebräuchlichen Multiplexschaltung soll dies verdeutlichen.

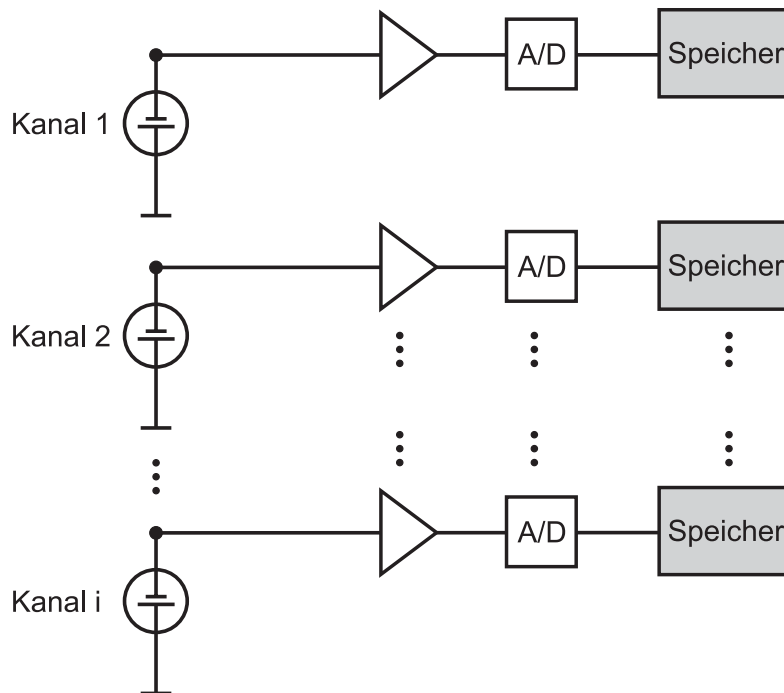


Bild 5.17: Funktionsschaltbild eines Transientenrekorders

In einer Multiplexschaltung erfolgt die Verstärkung des Signals, die Umwandlung und die Speicherung zentral für die gesamte Einheit. Jeder Kanal gibt die erfassten Messwerte über einen Zwischenspeicher (Kondensator) an die zentrale Verstärkereinheit weiter. Eingeschränkt wird die Geschwindigkeit der Datenweitergabe durch die Frequenz, mit der zwischen den Kanälen umgeschaltet wird (Grenzfrequenz des Verstärkers). Bei dieser Art der Datenregistrierung können Verschiebungen der erfassten Messdaten auf der Zeitachse auftreten, was bei Signalfolgen innerhalb weniger Mikrosekunden die Genauigkeit der Aufzeichnungen und deren zeitlichen Bezug entscheidend beeinflusst.

Datenspeicherung

Durch ein entsprechendes Triggersignal (vgl. z.B. Bild 5.14) wird die Speicherung der an der Messstelle erfassten Daten ausgelöst. Der Datenspeicher ar-

beitet nach dem Prinzip eines logischen Schieberegisters. Bild 5.18 zeigt das Prinzip. Ein Schieberegister ist ein logisches Schaltwerk, bei dem mehrere in Reihe geschaltete Flipflops (einfachste elektronische Schaltung, die eine Informationsmenge von einem Bit speichern kann) ihren Speicherinhalt bei jedem Arbeitstakt um einen Flipflop weiter schieben. Die Anzahl der im Register vorhandenen Speicherplätze ist dabei konstant. Schieberegister arbeiten nach dem FIFO-Prinzip („First In, First Out“). Das bedeutet, dass diejenigen Elemente, die zuerst gespeichert wurden, auch wieder zuerst aus dem Speicher entnommen werden. Hinein- und Herausschieben, das Ein- und das Auslesen arbeiten dabei synchron [91].

Für die Versuche wurde ein Pretrigger von 10% gewählt. Für diesen Fall setzt sich der Datenspeicher zu 10% aus Messwerten zusammen, die vor dem Triggersignal (vgl. Abschnitt 5.2) in den Speicher eingelesen werden, die verbleibenden 90% werden mit Daten aus der Hauptmessung nach der Triggerung gefüllt. Für die Auswertung der Messschriebe werden die Signalverläufe aus der Pretriggerung als Bezugskurven für die Aufzeichnungen der Hauptmessung herangezogen.

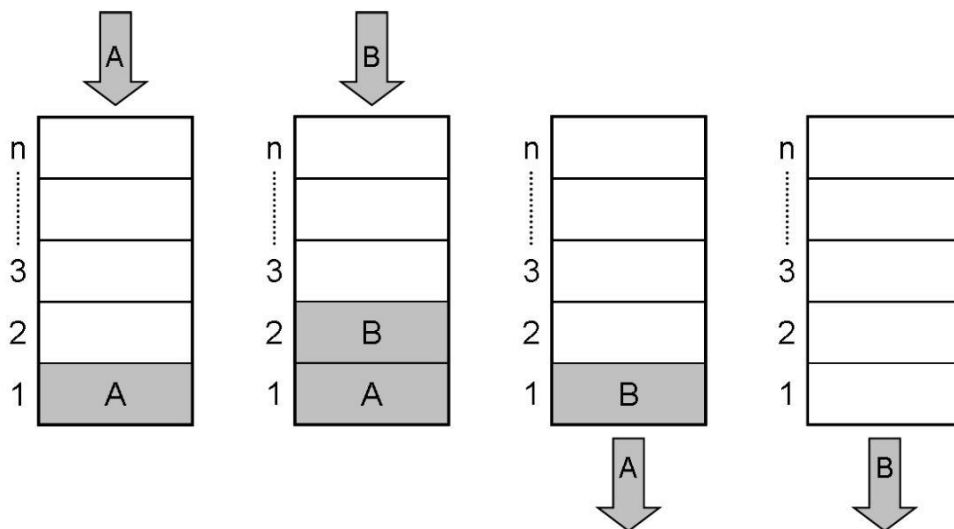


Bild 5.18: Prinzip der Datenspeicherung eines Transientenrekorders

Messleitungen

Die Verkabelung aller Komponenten innerhalb der gesamten Messkette erfolgte einheitlich mit Koaxialkabeln vom Typ RG-58. Sie besitzen eine Impedanz

(Wellenwiderstand) von $50\ \Omega$ (Ohm). Bei der Übertragung hochfrequenter Signale können durch Reflexionseffekte innerhalb der Messkette Signalverläufe verfälscht werden. Reflexionen treten an Stellen auf, an denen sich der Wellenwiderstand ändert. Das sind Enden einer Messleitung, Verbindungsstellen unterschiedlicher Messleitungen und Schnittstellen zwischen elektrischen Geräten und Anschlussleitungen. Zur Vermeidung dieser störenden Einflüsse wurden für die Ein- und Ausgangswiderstände aller Komponenten der Messkette in der HF-Technik übliche $50\ \Omega$ gewählt. Der Anschluss an die Registriereinheit (TRA) erfolgte mit T-Stücken in BNC-Technik, sodass im Bedarfsfall eine Anpassung mit $50\ \Omega$ -Abschlusswiderständen vorgenommen werden konnte.

5.3.2 Elemente, Signalverstärkung, Kalibrierung

Elemente und deren Aufbau

Innerhalb der Versuchsserie wurden unterschiedliche Aufnehmertypen eingesetzt (vgl. Tabelle 5.1). Kohle-Masse-Widerstände (KMW), Manganaufnehmer (MA) und Dehnmessstreifen (DMS) sind passive Elemente. Passive Elemente ändern unter einer äußeren Einwirkung ihren Widerstand, was zu einer Änderung der elektrischen Spannung gegenüber der jeweiligen Ausgangsspannung führt. Im Gegensatz zu diesen Elementen „generieren“ aktive Elemente, wie eine Atomlagen-Thermosäule (ALTS) bei einer Veränderung der Umgebungsbedingungen eine elektrische Spannung. Sowohl bei den passiven als auch bei den aktiven Elementen lässt sich der zeitliche Verlauf der Spannungsänderungen mit Hilfe von Kalibrierkurven in die entsprechenden (mechanischen) Größen umrechnen.

Der Aufbau der passiven Messelemente und die zugehörige Peripherie an Messtechnik wird in den folgenden Abschnitten der Arbeit genauer dargestellt. Aufgrund der besonderen Stellung der ALTS innerhalb der Versuche wird dieser Aufnehmertyp in einem eigenen Abschnitt behandelt (siehe Seite 110).

Für die Untersuchung von Risslaufzeiten wurden Streifen aus einem speziellen, elektrisch leitfähigen Lack auf Basis einer Silberlegierung eingesetzt und in einen Spannungsteiler eingebaut (vgl. Abschnitt 5.7).

Druckmessung (KMW)

Zur Druckmessung wurden Kohle-Masse-Widerstände der Firma Allen-Bradley verwendet. Durch ihren schichtartigen Aufbau werden diese Widerstände häufig auch als Kohle-Schicht-Widerstände bezeichnet. Bild 5.19 zeigt den inneren Aufbau. Die Widerstände besitzen eine geringe Eigenkapazität, kleine Abmessungen und sind weitgehend unempfindlich gegenüber magnetischen Feldern.

Letzteres ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da im Innern der Versuchskörper weitere Messelemente angeordnet sind, die mit konstanter Versorgungsspannung gespeist werden.

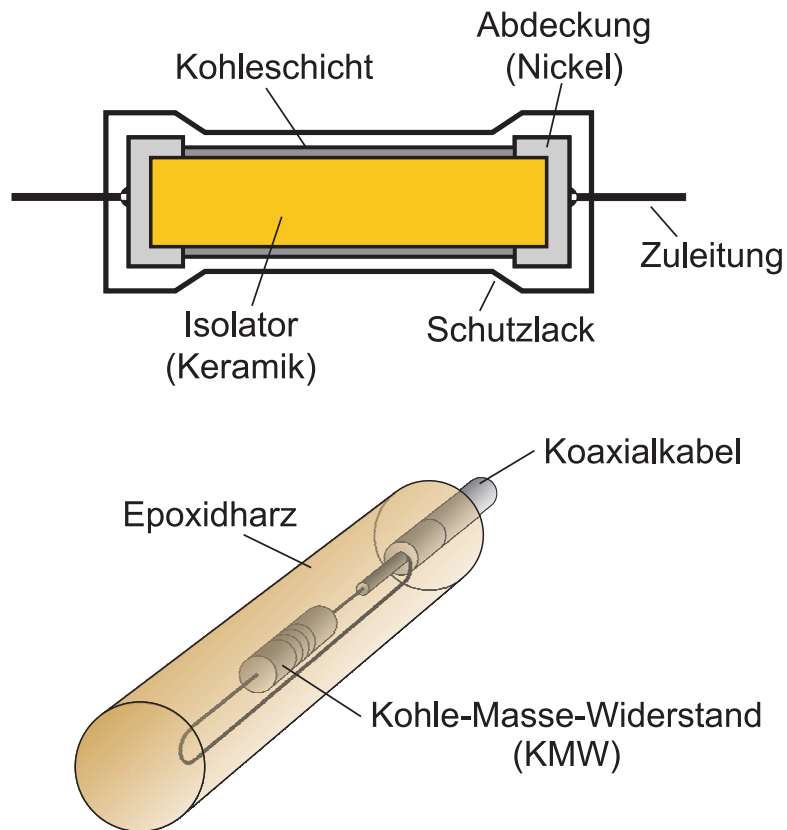


Bild 5.19: (oben) Schnitt durch einen Kohle-Masse-Widerstand (KMW); (unten) gekapselter Widerstand

Signalverstärkung

Unter hydrostatischen Druckverhältnissen kommt es zu einer Änderung des Nennwiderstandes (STANKIEWICZ [85]). Die Widerstandsänderung gegenüber dem Ausgangswiderstand lässt sich als Funktion über der Zeit messtechnisch durch den Einbau des Widerstandes in eine Spannungsteilerschaltung erfassen. Bild 5.20 zeigt das Schaltbild des Spannungsteilers zur Messung der Widerstandsänderung. Die beiden in Reihe geschalteten Widerstände R_1 und R_M besitzen im Ausgangszustand denselben Ohmschen Widerstand. Die zwischen den Widerständen abfallende Spannung entspricht genau der Hälfte der konstanten Versorgungsspannung von 5 V. Ändert sich während des Versuchs der

Wert des Widerstands R_M , so verringert sich die am Widerstand R_1 abfallende Spannung. Eine exemplarische Berechnung der Spannungsverhältnisse wird im Rahmen der Untersuchungen mit den Leitlackstreifen im Abschnitt (5.7.1) auf Seite 152 durchgeführt. Um eine Verfälschung der Signalform durch Reflexionen zu vermeiden, wurde die Schaltung gleichzeitig als Impedanzwandler/Trennverstärker ausgeführt. Der hochohmige Ausgang des Spannungsteilers wurde durch den Einbau eines Impedanzwandlers/Trennverstärkers in ein niederohmiges Signal gewandelt. Um eine optimale Anpassung an die Messleitung (Koaxialkabel, Typ RG - 58) und den Eingangswiderstand des Transientenrekorders von $50\ \Omega$ zu erreichen, wurde die Schaltung mit einem Ausgangswiderstand R_A von ebenfalls $50\ \Omega$ ausgelegt.

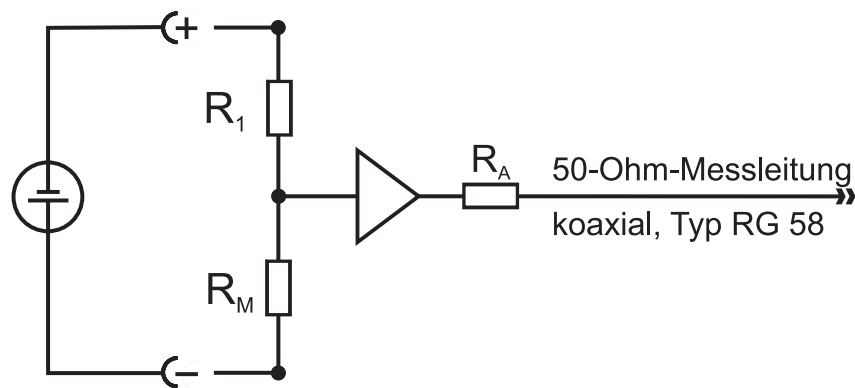


Bild 5.20: Spannungsteilerschaltung zur Messung der Widerstandsänderung

Durch den Einsatz mehrerer Impedanzwandler mit insgesamt 12 Kanälen wurde der zeitliche Verlauf einer Belastungswelle innerhalb eines Versuchskörpers detailliert erfasst.

Dadurch wurden weitere Informationen über die Druckverhältnisse innerhalb der Körper gewonnen (vgl. Abschnitt 5.5.2). Der unterschiedlichen Stadien einer Belastungswelle innerhalb eines Versuchskörpers konnten dadurch genauer erfasst werden.

Sowohl die hier vorgestellten Experimente, als auch frühere Stoßwellenuntersuchungen von AUSTING [4], GINSBERG [30], HERRMANN [42] HOLLENBERG [48], [49], OCKERT [69] WATSON [89] u.a. wurden mit KMW mit Nennwiderständen von $470\ \Omega$ und $1/8$ Watt Leistungsaufnahme durchgeführt. Für die Kapselung der Messelemente wurde ein vergleichbares Epoxidharz des Typ „Henkel, Stabilit-Express“ verwendet. Die Einordnung der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen und ein objektiver Vergleich der Ergebnisse untereinander ist dadurch sehr gut möglich (vgl. Abschnitt 5.5.1).

Kalibrierung

Für Kohle-Masse-Widerstände mit $470\ \Omega$ und $1/8$ Watt Leistung liegt aus den Untersuchungen von OCKERT [69] eine Kalibrierkurve vor, die auf Ergebnissen der zuvor genannten Autoren basiert. Sie ist in Bild B.1 in Anhang B dargestellt. Mit dieser Kurve wurden die Druckwerte der vorliegenden Arbeit ermittelt.

Messung gerichteter Spannungsanteile (MA)

Eine Aussage über die Form der Versagensfläche von Beton ist möglich, wenn die Komponente des Spannungstensors senkrecht zur Richtung der hydrostatischen Achse bekannt ist. Um diese deviatorische Komponente des Spannungstensors aus Messungen ableiten zu können, wurden ergänzend zu den hydrostatischen Druckwerten gerichtete Spannungsanteile ermittelt. Hierfür wurden Manganin-Folienaufnehmer eingesetzt. Manganin (CuMn12Ni) ist eine Kupfer-Mangan-Nickel-Legierung mit einer Zusammensetzung von 82-84 % Kupfer, 12-15 % Mangan und 2-4 % Nickel. Es handelt sich um eine Widerstandslegierung mit einer geringen Temperaturabhängigkeit und einer hohen Empfindlichkeit gegenüber mechanischem Druck (HETZLER [44]). Manganinaufnehmer registrieren Druckänderungen senkrecht zu ihrer aktiven Fläche. In den vorgestellten Untersuchungen wurden die Elemente in spezielle Kapselungen so eingebaut, dass eine Messung der Druckwerte in Belastungsrichtung oder senkrecht dazu möglich war. Die Folienaufnehmer bestehen aus einer aktiven Sensorfläche aus mäanderförmig angeordneten Leiterschleifen, die auf eine Trägerfolie aufgedampft sind. Der Anschluss der Messleitungen erfolgt über Kontaktfahnen. In den Versuchsreihen wurden Elemente der Baureihe 210 AW (LM-SS-210AW-048) der Firma Vischay Micro-Measurement eingesetzt. Speziell diese Baureihe weist besonders lange Anschlussfahnen auf, so dass die Anschlusspositionierung nach Abschnitt 5.1.2 möglich ist.

Bild 5.21 zeigt einen Manganinstreifen in Vorbereitung für die Messung von Spannungsanteilen in Belastungsrichtung (axialer Einsatz). Der nach dem Zusammenbau verbleibende Hohlraum innerhalb der Kapselung sowie die Vertiefung dieser Bauform an der Oberseite wurden mit Epoxidharz aufgefüllt. Die Stirnfläche wurde nach Erhärten des Klebers plangeschliffen. Alle Elemente wurden für Koaxialkabel mit einer Impedanz von $50\ \Omega$ ausgelegt.

Manganin-Folienaufnehmer wurden in zahlreichen Untersuchungen zum Verhalten von Stoßwellen in ähnlichen Druckbereichen, meist in gekapselter Form eingesetzt (HERRMANN [42] am Institut für Massivbau, ROSENBERG [76], [78], GRAN [34], [33], [35].).

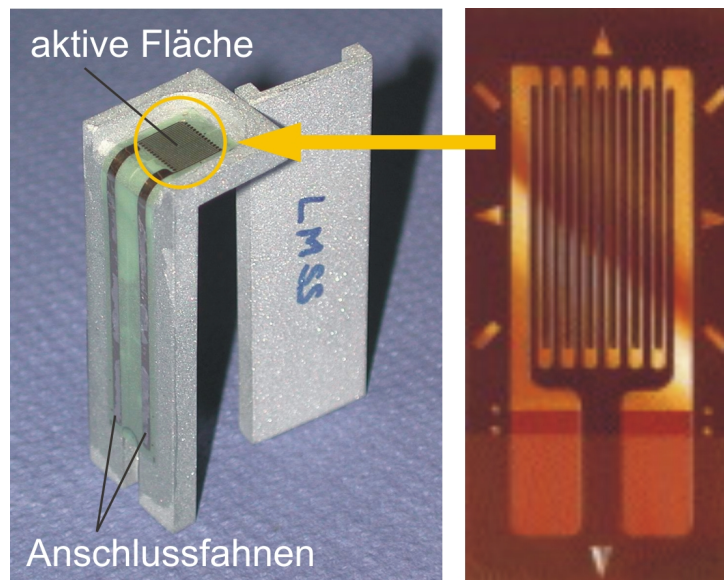


Bild 5.21: Manganin-Folienaufnehmer – vorbereitet für den Einsatz senkrecht zur Belastungsrichtung

Signalverstärkung

Manganinelemente benötigen eine Messspannung von 5 V. Bei dauerhafter Versorgung des Messelementes mit dieser Spannung besteht aufgrund der Bauform, insbesondere wegen der dünnen Leiterschleifen, die Gefahr eines Driftens der Signale oder aber eines vorzeitigen Ausfalls des Aufnehmers. Aus diesem Grund wurden die Manganinaufnehmer nur kurzzeitig mit der erforderlichen Messspannung von 5 V versorgt. Gepulste Verstärker der Firma Dynasen vom Typ CK2-50/0.050-300 ermöglichten es, für einen kurzen Zeitraum von rund 450 μ s die erforderliche Messspannung bereitzustellen. Die Aktivierung der Geräte erfolgte durch Triggerung über das TTL Signal aus dem Zündgerät. Auf die Zusammenhänge bei der Triggerung wurde bereits ausführlich in Abschnitt 5.2.1 auf Seite 99 eingegangen. Dieses Zusammenspiel wurde in Vortests untersucht und durch eine Triggerung über das Zündsignal im Versuch umgesetzt (vgl. Abschnitt 5.1). Insgesamt stehen 8 Kanäle für die Messungen der gerichteten Spannungsanteile zur Verfügung.

Kalibrierung

Der Verlauf der Widerstandsänderung ist bei den eingesetzten Manganinelementen bis in den Bereich hoher Drücke weitgehend linear. Weiterführende Literatur zur Kalibrierung von Manganinelementen findet man z.B. bei ROSENBERG [75], [77].

Dehnungsmessung (DMS)

Die auftretenden Dehnungen wurden im oberen Bereich der Versuchskörper durch hochauflösende Dehnmessstreifen mit einer Grenzdehnung von 10 % erfasst (Hottinger-Messtechnik, Typ LD 20). In Bereichen geringerer Dehnungen wurden Standard DMS mit Grenzdehnungen von 3 % eingesetzt (TML, Typ FLK 6). Bild 5.22 zeigt eine Aluminiumkapselung vor dem Einbau eines DMS. Detaillierte Angaben über Abmessungen und Positionierung der Messstreifen innerhalb der Kapselungen enthalten die Planunterlagen in Anhang D. Die Verstärkung der Messsignale erfolgt für die hochauflösenden DMS durch Geräte mit einer Grenzfrequenz von 1 MHz (Eigenbau des Institut für Massivbau) und für die Standard DMS durch Geräteeinheiten mit einer Grenzfrequenzen von 500 KHz (Hottinger Messtechnik).

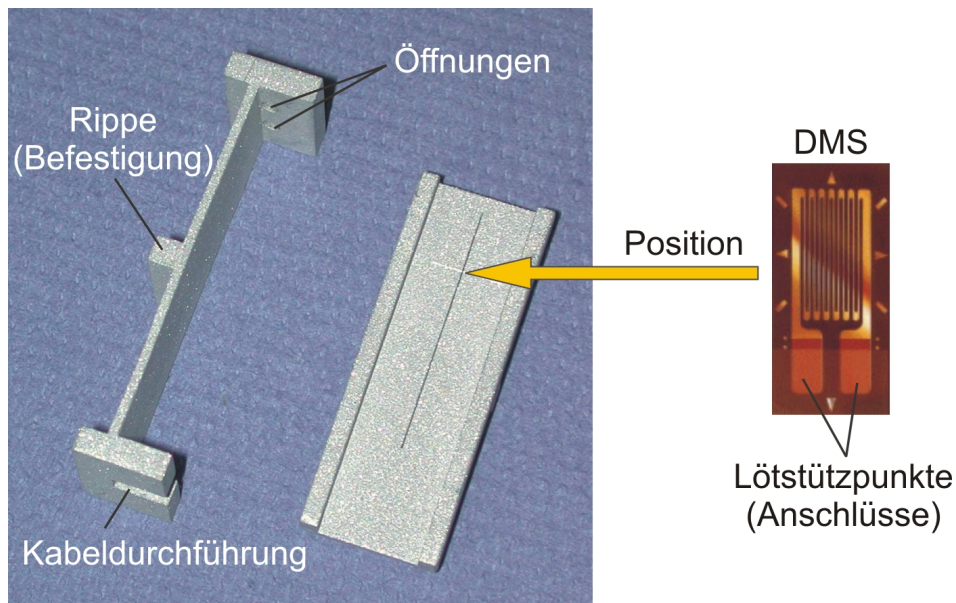


Bild 5.22: Kapselung eines DMS

5.4 Messung des Wärmestroms – ALTS

Durch unser Wärmeempfinden besitzen wir eine qualitative Vorstellung über den thermischen Zustand eines Systems und benutzen hierfür Begriffe wie "heiß" oder "kalt". Diese Beschreibungen erlauben nur sehr ungenaue Angaben über die Temperatur oder den thermischen Zustand eines Systems (ATKINS [3], BAEHR [7]). Für eine genaue Aussage benötigen wir, wie bei zeitlich schnell ablaufenden Vorgängen, ein Hilfsmittel (vgl. Kapitel 1, Abschnitt 1.1).

Temperatur ist einer direkten Messung nicht zugänglich. Das bedeutet, dass es nur durch Messung anderer physikalischer Erscheinungsformen gelingt, eine Aussage über vorhandene Temperaturen zu treffen. Zum Beispiel durch Messung der Ausdehnung einer Flüssigkeit oder eines Gases mit bekannten temperaturabhängigen physikalischen Eigenschaften oder durch Messung der ebenfalls temperaturabhängigen Widerstandsänderung bestimmter Metalle und Legierungen.

Um die Änderung des thermischen Zustandes während der Kompression von Beton zu erfassen, wurden Wärmestromsensoren in die Versuchskörper eingebaut. Aus dem Wärmestrom kann eine Aussage über die Energie entlang der HUGONIOT-Kurve abgeleitet werden. Das eingesetzte System ist ein ultraschneller Sensor auf Basis einer Atomlagen-Thermosäule. Der Sensor wird von der Firma Fortech-HTS [28] hergestellt und vertrieben.

Die geringen Schichtdicken im sub- μm Bereich besitzen eine geringe thermische Masse, wodurch Ansprechzeiten bis in den Bereich von Nanosekunden erreicht werden. Um Messungen innerhalb von Beton durchzuführen, muss der Sensor geschützt und in ein geeignetes Gehäuse eingebaut werden. Erste Erfahrungen mit einer „Rohform“ dieses Sensortyps gehen auf Untersuchungen von HERRMANN [42] zurück. In der vorliegenden Arbeit wurden die Sensoren in Stufen weiterentwickelt und drei unterschiedliche Bauformen innerhalb der Versuchsreihe eingesetzt. Vergleichbare Untersuchungen in Betonkörpern fanden nach derzeitigem Kenntnisstand bislang nicht statt.

5.4.1 Sensoreigenschaften

Aufbau und Funktion des Sensors

Die Atomlagen-Thermosäule (ALTS) besteht aus einer dünnen Schicht ($1\ \mu\text{m}$) des Hochtemperatursupraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO). Diese Schicht wird durch mehrere Millionen Moleküllagen atomarer Dicke gebildet und auf ein einkristallines Substrat aus Strontiumtitanat (SrTiO_3) aufgebracht. Gegenüber der Oberflächennormalen sind die Moleküllagen des Supraleiters um einen definierten Winkel (Kippwinkel) geneigt und bestehen wechselweise aus gut leitenden Kupferoxid-Schichten (CuO) und weniger gut leitenden Zwischenschichten aus Ytterbium (Y)

und Barium (Ba). An den Seitenflächen der aktiven Schicht sind für den Kontakt der Anschlussdrähte Goldstreifen aufgedampft. Mit Ausnahme der Eckbereiche ist die aktive Schicht zum Schutz vor mechanischem und chemischem Angriff mit einer Beschichtung aus Siliziumdioxid (SiO_2) überzogen (vgl. Bild 5.23). Das Foto in Bild 5.23 zeigt den Sensor auf einem Träger aus PVC.

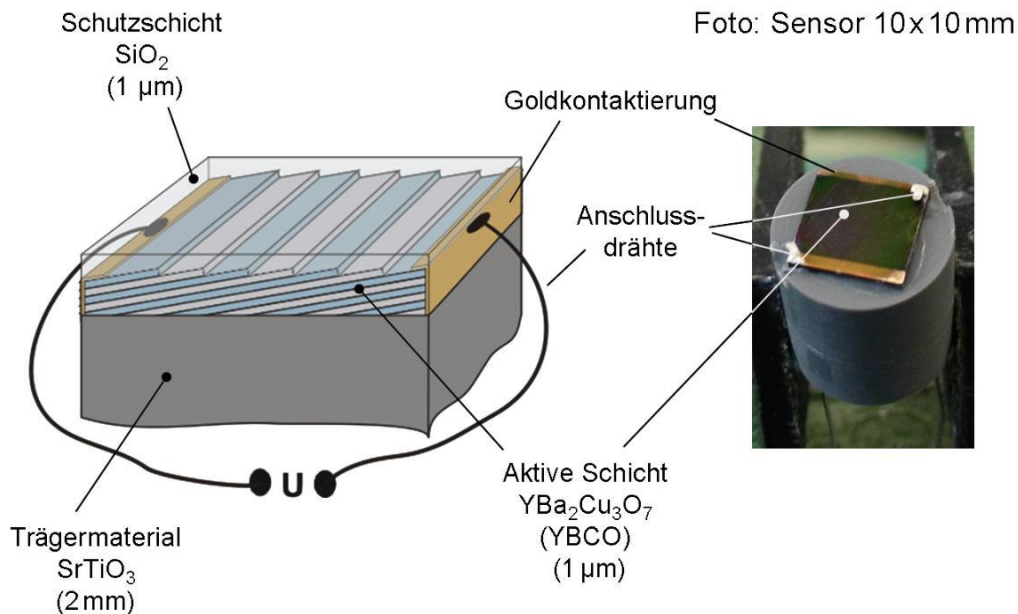


Bild 5.23: ALTS – (links) schematischer Aufbau; (rechts) Sensor mit Fläche 10 x 10 mm auf Sensorträger aus PVC

Die Einstrahlung einer Wärmequelle führt zu einer Erwärmung der Sensoroberfläche. Unter der Voraussetzung, dass sich das Substrat selbst nicht erwärmt (ideale Wärmesenke; vgl. BETZ [9], ZEUNER [96]) bildet sich zwischen Ober- und Unterseite des Sensors ein Temperaturunterschied aus. Durch den Temperaturgradienten entsteht eine (thermo)elektrische Spannung proportional zum Temperaturunterschied. Die Neigung der Moleküllagen bewirkt eine Spannungskomponente des elektrischen Feldes senkrecht zur Richtung der Wärmeeinstrahlung. Diese Komponente wird an den seitlichen Goldkontakten der Schicht abgegriffen (vgl. Bild 5.24, links). Der zugrunde liegende Mechanismus ist ein thermoelektrischer Effekt, der als (transversaler) SEEBECK-Effekt bezeichnet wird. Er liegt in der besonderen Struktur des Sensors begründet.

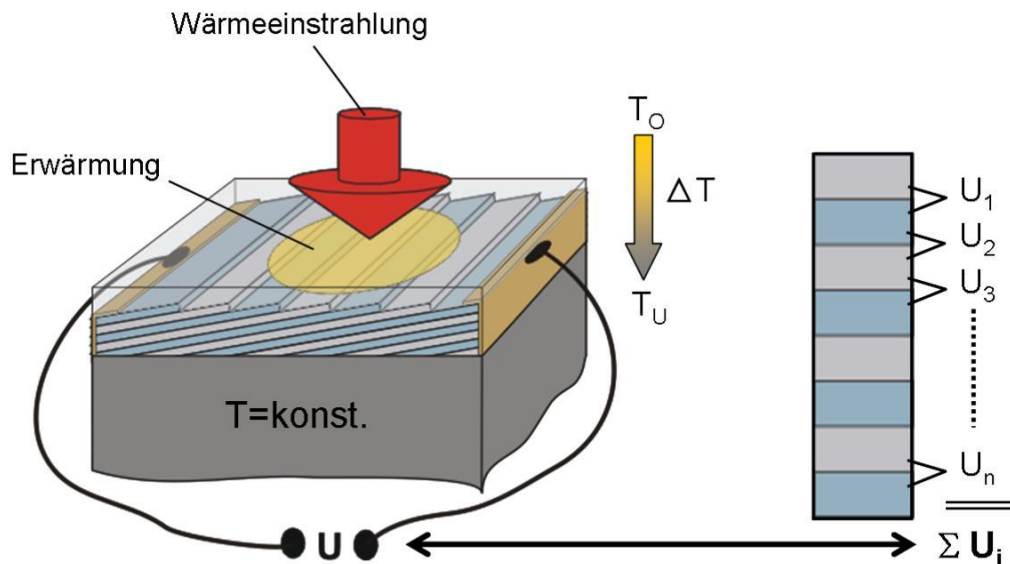


Bild 5.24: ALTS – Funktionsprinzip

Zur Verdeutlichung ist im rechten Teil von Bild 5.24 schematisch die Abfolge der Schichten dargestellt. Die einzelnen Schichten besitzen unterschiedliche elektrochemische Potentiale. Beim Vorhandensein eines Temperaturgradienten entstehen an den Schichtübergängen Teilspannungen ($U_1 \dots U_n$). Diese Spannungen sind auf den SEEBECK-Effekt zurückzuführen.

Aufgrund der Geometrie des Sensors sind in Breitenrichtung (10 mm) weitaus mehr Schichtübergänge vorhanden als in Dickenrichtung ($1 \mu\text{m}$). Eine Addition aller Teilspannungen in Breitenrichtung führt zu einer Verstärkung des Messsignals U_j .

Eine zusätzliche Verstärkung des Messsignals erfolgt durch den Einsatz von Verstärkern, deren Verstärkungsfaktor der Intensität der Wärmeeinstrahlung angepasst werden kann. Die durch Fortech-HTS konfektionierten Geräte ermöglichen an jedem Kanal der Geräteeinheit eine in drei Stufen regelbare Verstärkung des Messsignals um die Faktoren 1000, 2000 oder 3000. Werksseitig erfolgt eine Voreinstellung auf den Faktor 2000. Vier Kanäle werden als Verstärkereinheit zusammengefasst und in ein Gehäuse eingebaut. Eine Versorgung der Geräte erfolgt über eine Gleichspannung von 20 V.

Kalibrierung

Der Sensor lässt sich mit Laserstrahlung oder einem Wärmestrahler in Bezug auf den Wärmestrom kalibrieren. Die Kalibrierung des Wärmestrommesssystems (Sensor und Verstärker) wurde mit einem Wärmestrahler bekannter Strahlungsleistung von der Herstellerfirma (Fortech-HTS) durchgeführt. Das Ergebnis ist für jede Atomlagen-Thermosäule ein flächenbereinigter Kalibrierwert in

[mV/W]. Außerdem wurde mit einem CO₂-Laser die Zeitkonstante des Systems ermittelt. In Anhang B ist der Signalverlauf eines Kalibrierversuchs dargestellt.

Funktionskontrolle

Eine einfache Funktionskontrolle der fertig konfektionierten Messelemente kann mit einem Blitzgerät erfolgen. Die Sensoren werden in konstantem Abstand zu einer Blitzquelle positioniert und belichtet. Gleichzeitig wird der Spannungsverlauf mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Auf diese Weise wurden die Zeitkonstanten jeweils für die Sensoren und das Messsystem ermittelt. Anhang B zeigt exemplarisch das Prüfergebnis einer ALTS.

5.4.2 Betrachtungen zu Wärmestrom und Temperatur

Mit Hilfe einer Wärmestrommessung über vorherrschende Temperaturen in Beton eine Aussage zu treffen, ist schwierig. Um dies zu verdeutlichen, wurde das nachfolgend beschriebene Experiment durchgeführt.

Ein Heißluftgebläse wird so eingestellt, dass die Temperatur des erzeugten Luftstroms 95° Celsius beträgt. Gleichzeitig wird Wasser in einem Becherglas ebenfalls auf 95° Celsius erhitzt. Die Temperatur wird in beiden Fällen mit einem Thermoelement gemessen.

Anschließend werden die Wärmeströme im jeweiligen Medium durch einen kalibrierter Sensor erfasst und mit einem Oszilloskop aufgezeichnet (vgl. Bild 5.25 und Bild 5.26). Ein Vergleich der Spannungsamplituden zeigt, dass trotz derselben Temperatur im Luftstrom und im Wasser die erfassten Wärmeströme durch den Sensor um drei Zehnerpotenzen auseinander liegen. Dies ist auf die unterschiedlichen Teilchendichten der Ströme und die unterschiedlichen Wärmeübergangszahlen von Luft bzw. Wasser auf die Sensoroberfläche zurückzuführen.

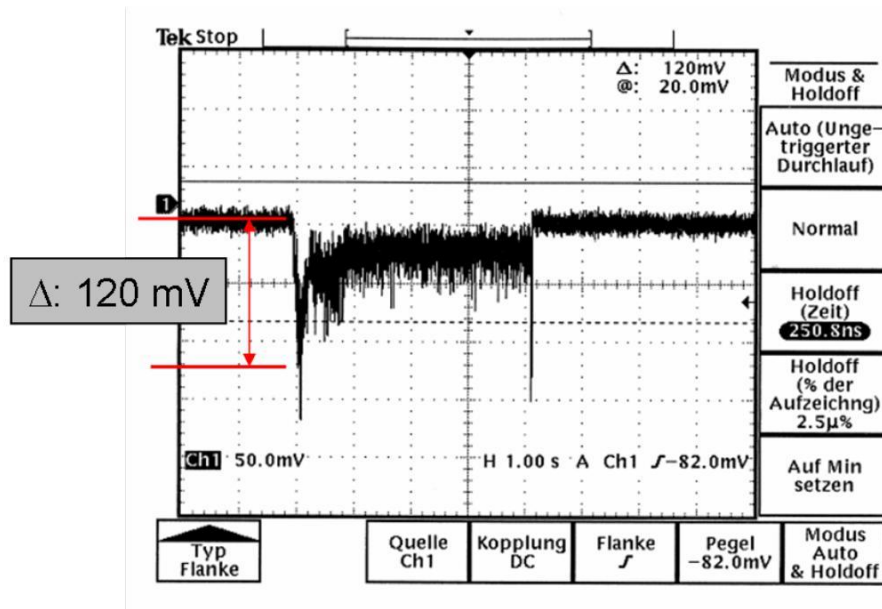


Bild 5.25: Signalverlauf bei einem Luftstrom

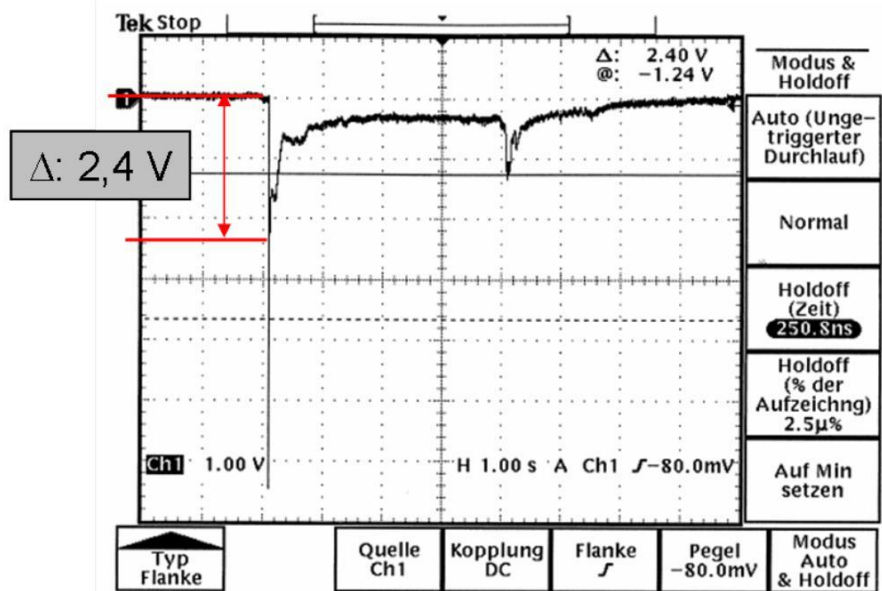


Bild 5.26: Signalverlauf in Wasser

Durch den inneren Aufbau des Sensors lässt sich der Wärmestrom als Wärmeleitung durch ein Schichtsystem auffassen. Bei einem Temperaturgradienten zwischen der Oberseite (T_o) des Sensors und der Substratgrenze (T_s) berechnet sich der Wärmestrom Q senkrecht zur Fläche A mit der Dicke s und der Wärmeleitfähigkeit λ mit dem Wärmedurchgangsgesetz (z.B. STÖCKER [86]):

$$Q = \lambda \cdot A/s \cdot (T_o - T_s) \quad (5.1)$$

Berücksichtigt man beim Wärmedurchgang die Eigenschaften der unterschiedlichen Einzelschichten (s_i, λ_i) sowie deren Schichtübergänge (Wärmeübergangszahl α_i), berechnet sich der Wärmestrom wie folgt:

$$Q = 1/(\sum s_i/\lambda_i + 1/\sum \alpha_i) \cdot A \cdot (T_o - T_s) \quad (5.2)$$

Tabelle 5.3: Physikalische Eigenschaften des Schichtsystems (ZEUNER [96], KNAUSS [56])

Fortech ALTS - Sensor YBCO/SrTiO ₃			
Komponente	Dichte ρ [g/cm ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Dicke s [μ m]
Beschichtung (SiO ₂)	2,21	1,4	1
YBCO	6,68	1,5 (2,0 experimentell)	1
Substrat (SrTiO ₃)	5,12	10	2000

Übergangswiderstand SiO₂-YBCO: $\alpha=0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Km}^2/\text{W}$

Der Luftstrom im Experiment erzeugt einen Wärmestrom durch den Sensor von 1 Watt. Er ist proportional zur Spannung und über die „Kalibrierbeziehung“ zugänglich. Mit den Angaben in Tabelle 5.3 ergibt sich aus Gleichung (5.2) zwischen Oberseite und Schicht-Substratgrenze eine Temperaturdifferenz von:

$$(T_o - T_s) = \left[\frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}}{1,4 \text{ W}} + 0,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \left[\frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}}{2,0 \text{ W}} \right]^{-1} \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \text{m}^2 \right] = 0,791 \text{ K} \quad (5.3)$$

Das Ergebnis macht deutlich, dass die Temperatur an der Oberfläche des Sensors trotz einer Temperatur des Luftstroms von 95° C nur geringfügig gegenüber der Umgebungstemperatur ansteigt. Der geringe Anstieg der Oberflächentemperatur zeigte sich auch in Versuchen zur Temperaturkalibrierung der Firma FORTECH-HTS (FORTECH [28]).

Bild 5.27 skizziert die Bauweise eines für diesen Versuch verwendeten Sensors. Dieser unterscheidet sich von der Standardbauweise durch ein zusätzlich aufgedampftes Goldmäander. Über die temperaturabhängige Widerstandsänderung des Goldmäanders ist die Oberflächentemperatur direkt zugänglich. Für

einen Luftstrom von 95°C beträgt der Wärmestrom durch den Sensor wie zuvor 1 Watt. Über die Kalibrierung wurde eine Temperaturerhöhung an der Oberfläche des Sensors von durchschnittlich 5 bis $6,5^{\circ}\text{C}$ ermittelt. Der Unterschied zum Berechnungsergebnis der eigenen Versuche nach Gleichung (5.3) ist neben den vereinfachten Annahmen über den Aufbau und die physikalischen Eigenschaften des Sensors (vgl. Tabelle 5.3) vor allem auf eine größere Sensorfläche bei den FORTECH-Versuchen zurückzuführen. Alternativ zum beschriebenen Goldmäander kann auch ein Platinsteg verwendet werden (PT-100 Widerstandsthermometer).

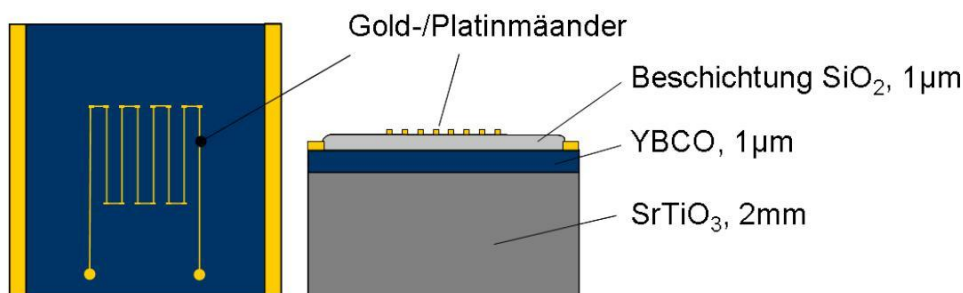


Bild 5.27: ALTS-Sensor mit Goldmäander

Fazit

Da sowohl die Übergangskoeffizienten auf die Sensorfläche und an den Schichtgrenzen und innerhalb des YBCO-Kristalls, als auch der Einfluss der Schutzbeschichtung nicht bekannt sind, liefert Gleichung (5.3) nur eine grobe Näherung. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Temperaturkalibrierung zeigt aber, dass die grundlegenden Zusammenhänge dadurch erfasst werden. Es ist zu beachten, dass das Ergebnis der Temperaturkalibrierung des Luftstroms nicht auf Wärmeströme in anderen Materialien, z.B. Beton übertragbar ist. Aus den genannten Gründen werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Wärmestrommessungen nicht zur Berechnung von Temperaturen benutzt. Aus den Messergebnissen werden Werte für die innere Energie, insbesondere für den thermischen Anteil entlang der HUGONIOT-Kurve von Beton abgeleitet. Die Untersuchungsergebnisse werden in Abschnitt 5.5.5 vorgestellt.

5.4.3 Vorversuche zum Einsatz der ALTS in Beton

Die Schutzbeschichtung der ALTS wird bei einer Temperatur von ca. 450°C aufgebracht. Aufgrund der geringen Schichtdicke erfolgt eine rasche Abküh-

lung, sodass SiO_2 amorph vorliegt. Bei Kontakt mit Frischbeton ist nach Gleichung (5.4) eine Reaktion mit Bestandteilen des Zements (KOH) zu erwarten:



Um die grundsätzliche Eignung der ALTS in einer alkalischen Umgebung zu testen und um zu beurteilen, ob und in welchem Maße ein Abtrag der Schutzbeschichtung die Funktion des Sensors beeinträchtigt, wurden Vorversuche durchgeführt.

Vorversuche – Fortech HTS

Ein quadratischer Sensor (Fläche 10 x 10 mm) und ein Sensor der Bauart A (vgl. Bild 5.30) wurden in eine Betonprobemischung eingebaut. Bild 5.28 zeigt die Situation unmittelbar nach Einbau der Testsensoren.

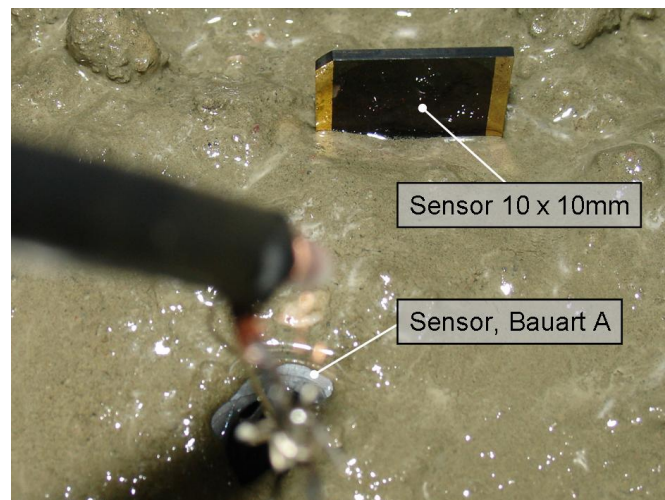


Bild 5.28: Vorversuche-Fortech HTS

Als Indikator für Veränderungen oder Beschädigungen am Sensor wird die Widerstandsänderung des Sensors herangezogen. Widerstandsmessungen wurden bis zum Erhärten des Betons kontinuierlich durchgeführt. Anschließend erfolgten die Kontrollmessungen stichprobenartig bis zum Ausbau der Sensoren am dritten Tag. Bei der visuellen Begutachtung nach dem Ausbau der Sensoren zeigten sich an beiden Sensoren farbliche Veränderungen an den anfangs mit Zementleim benetzten Oberflächen. Die Widerstandswerte veränderten sich, verglichen mit dem Zustand vor dem Einbau, nur geringfügig.

Vorversuche – IfMB

In weiteren Tests wurden Bereiche der Sensoroberfläche mit Zementleimpaste (CEM 32,5 R) und einem Schnellzement (Produktbezeichnung: Racofix) bestrichen (vgl. Bild 5.29). Bis zum Abbinden der beiden Komponenten wurden in kurzen Zeitintervallen die Widerstände der Sensoren kontrolliert. Nach dem Erhärten wurde die Paste entfernt und die Oberfläche auf Veränderungen untersucht. Vereinzelt waren Blasenbildung zu erkennen, was stellenweise zur Ablösung der Beschichtung führte. Deutliche Veränderungen der Oberfläche zeigten sich in Randbereichen des mit Zementpaste bestrichenen Sensors.

Zusätzliche Tests mit CEM 32,5 R an der vorgeschädigten Fläche zeigten, dass eine Auflösung der Schutzbeschichtung die Funktion des Sensors nicht beeinflusst. Tests mit Schnellzement ließen, verglichen mit der Ausgangssituation, keinerlei Veränderungen erkennen.

Dennoch wurde für den Einsatz in den Sprengversuchen eine Beschichtung vorgesehen, um die aktive Schicht der Sensoren ausreichend vor mechanischen Beanspruchungen beim Zusammenbau und während des Betoniervorgangs zu schützen. Bild 5.29 zeigt unterschiedliche Zeitpunkte der Vorversuche.

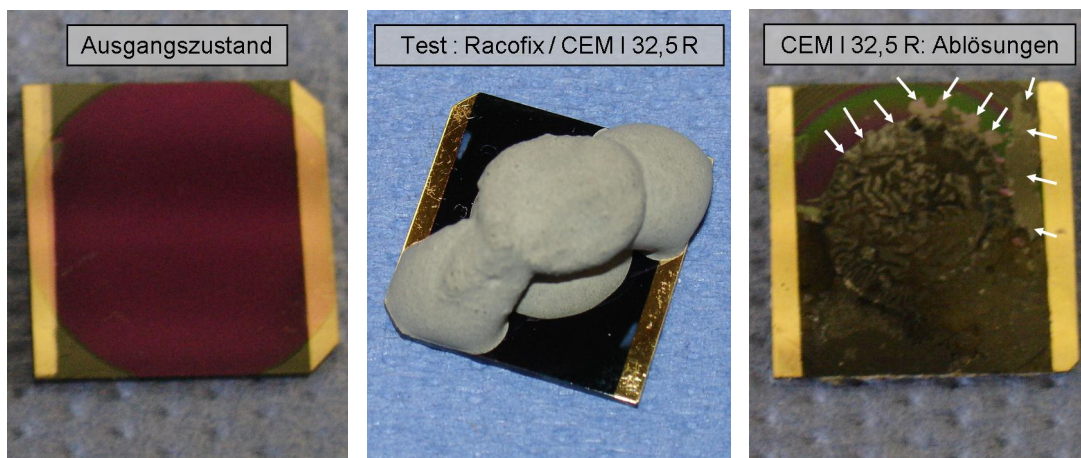


Bild 5.29: Vorversuche IfMB

5.4.4 ALTS - Konfektionierung / Reparatur

Ausgangssituation – Sensor Bauart A

In der ersten Versuchsreihe mit ALTS (Versuchskörper Nr. 5-8) wurden vom Hersteller konfektionierte Sensoren runder Bauform (Bauart A) mit einer aktiven Fläche von 5 x 2 mm (1 cm²) eingesetzt. Bild 5.30 zeigt einen am Positionsgitter befestigten Sensor und eine Detailaufnahme der Stirnseite.

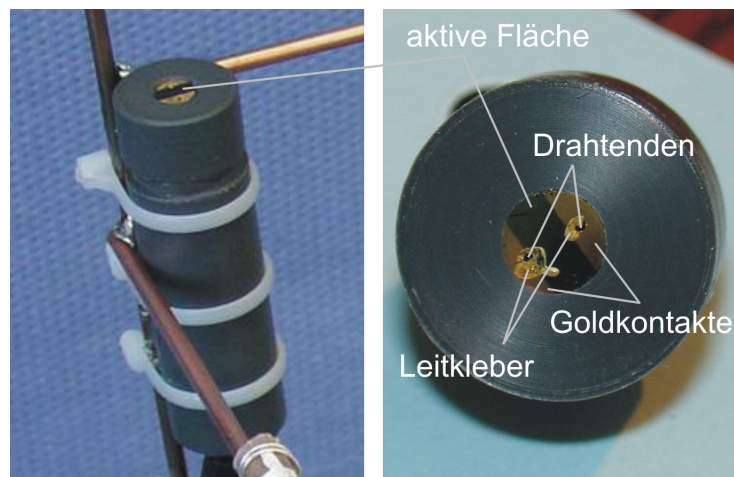


Bild 5.30: Sensor Bauart A in Kunststoffgehäuse; (links) befestigt an Positionsgitter, (rechts) Detail

Die Verkabelung der Sensoren erfolgt mit dünnen Drähten. Diese sind im Bereich der Goldkontaktierungen mit aufgestauchten Enden ausgeführt und werden dort mit einem speziellem Leitkleber an den Kontakten fixiert. An den freien Drahtenden erfolgt der Anschluss an Koaxialkabel vom Typ RG - 58. Die Sensoren werden auf einem Kunststoffträger befestigt und anschließend in das Gehäuse eingeschoben. An einigen Sensoren dieser Bauart wurde nach dem Betonieren der Versuchskörper ein erheblicher Anstieg des Widerstandes bis in den M Ω -Bereich beobachtet. Diese Sensoren konnten für die späteren Messungen nicht mehr eingesetzt werden. Mechanismen, die zu diesem Funktionsausfall der Sensoren führen können, sind:

- Unterätzungen der aktiven Schicht infolge des chemischen Abtrags der Schutzbeschichtung bedingt durch die längere Verweildauer im Frischbeton
- Beschädigungen der Kontaktierungen und/oder der Klebepunkte durch mechanische oder chemische Einflüsse

Die Beschädigung an einem Teil des Sensors ist unter messtechnischen Gesichtspunkten als Ausfall einer Komponente eines elektrischen Schaltkreises

(Kurzschluss) zu betrachten. Dies führt zu einer Erhöhung des Widerstandes.

Für die weiteren Versuchskörper wurden Sensoren am IfMB gefertigt. Als Basis dienten Sensoren mit einer Fläche von 10 x 10 mm (vgl. Bild 5.29, links). Zur Reduktion der zuvor beschriebenen Beanspruchungen wurden folgende Veränderungen umgesetzt:

- Anschlusspunkte und Kontaktierungen werden geschützt.
- Die aktive Schicht des Sensors wird gegenüber der Stirnseite des Gehäuses zurückgesetzt.
- Der zurückgesetzte Bereich wird vor dem Betonieren mit Schnellzement gefüllt. Dadurch wird die Kontaktzeit mit dem alkalischen Milieu des Frischbetons stark reduziert und es entsteht keine mechanische Beanspruchung aus dem Betoniervorgang.
- Alle Hohlräume innerhalb des Gehäuses werden vergossen (Vermeidung von Kurzschlüssen, Dichtigkeit).

In Bild 5.31 sind Schnitte der Gehäusekonstruktion für Sensoren von 10 x 10 mm (Bauart B) dargestellt. Bild 5.32 zeigt die dreiteilige Konstruktion vor dem Zusammenbau.

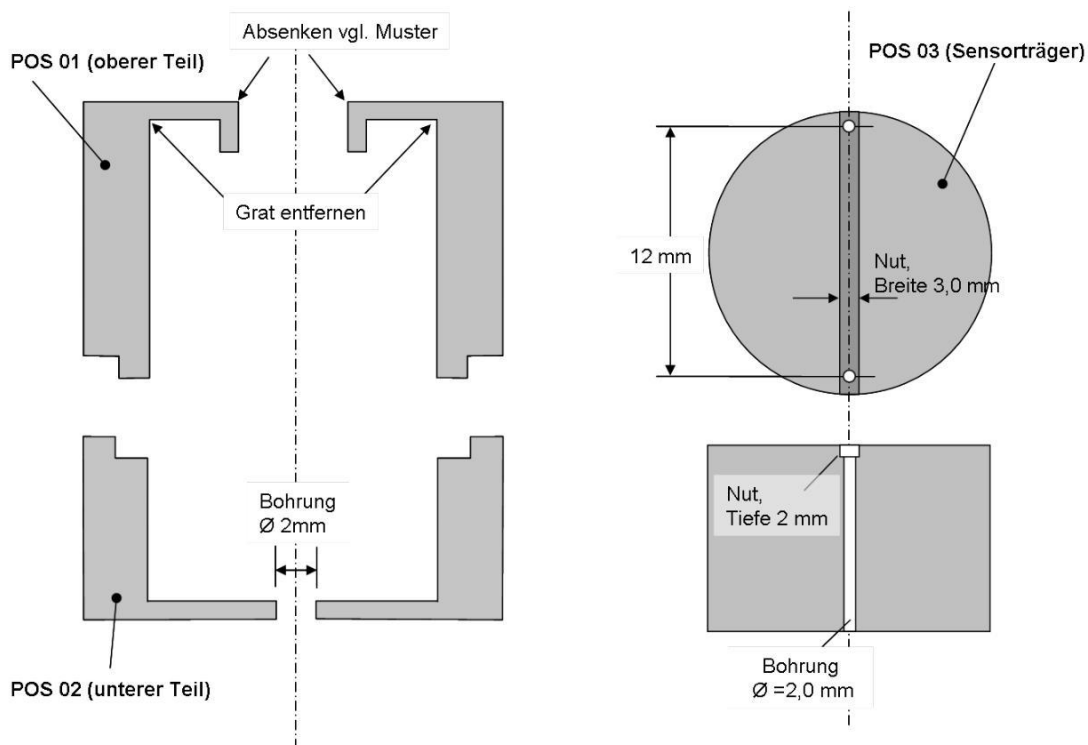


Bild 5.31: Gehäuse der ALTS (Bauart B), Schnittdarstellung

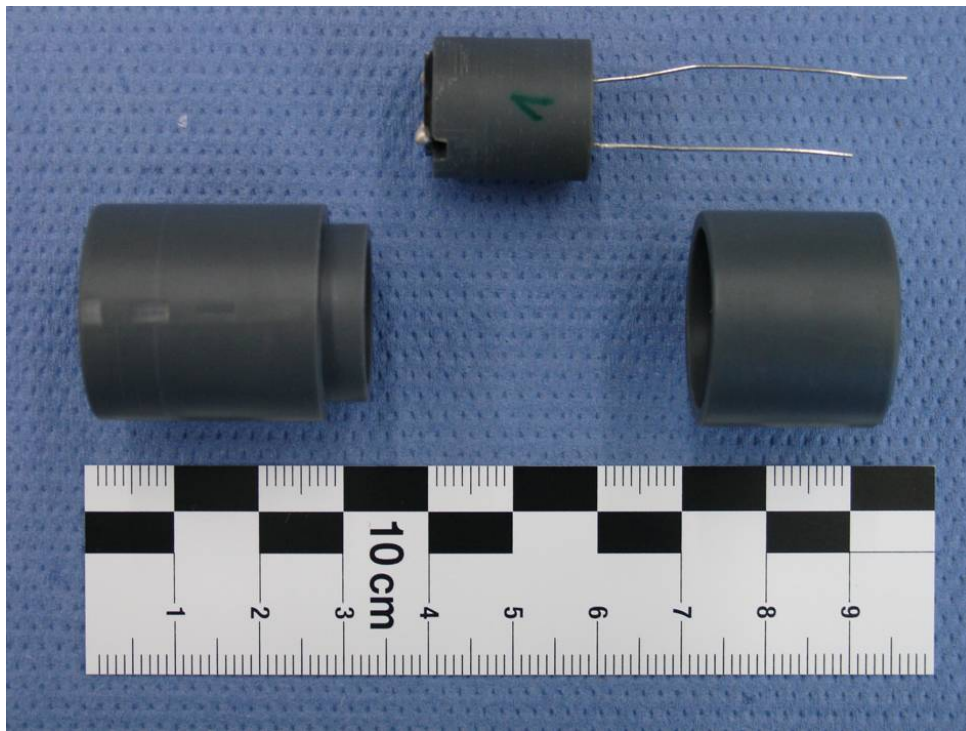


Bild 5.32: Dreiteiliges Gehäuse der ALTS (Bauart B) vor dem Zusammenbau

ALTS - Sensor Bauart B

Die quadratischen Sensoren (10 x 10 mm) sind mit seitlichen Goldstreifen versehen und besitzen Aussparungen der Schutzbeschichtung in den Eckbereichen. Diese Bereiche sind mit Bohrungen zur Aufnahme der Anschlussdrähte versehen. Die Anschlussdrähte sind sensorseitig mit aufgestauchten Enden ausgeführt (vgl. Bauart A) und werden nach dem Durchführen durch die Bohrungen mit Leitkleber an der Oberseite des Sensors fixiert (elektrischer und mechanischer Verbund mit den Goldkontaktierungen). Bild 5.33 zeigt die Ausgangssituation vor Fertigstellung der Bauart B und eine Detailskizze des Anschlusses.

An dieser Stelle wird bereits die Erkenntnis vorweggenommen, dass die Verbindungsstelle Drahtende-Kontaktierung entscheidend für einen erfolgreichen Einsatz der Sensoren ist. Die Klebeverbindung reagiert sehr empfindlich auf geringste mechanische Beanspruchungen. Die Folge ist ein Bruch der Klebestelle, was zu einer Unterbrechung des elektrischen Kontakts zwischen Sensor und Anschlussleitung führt.

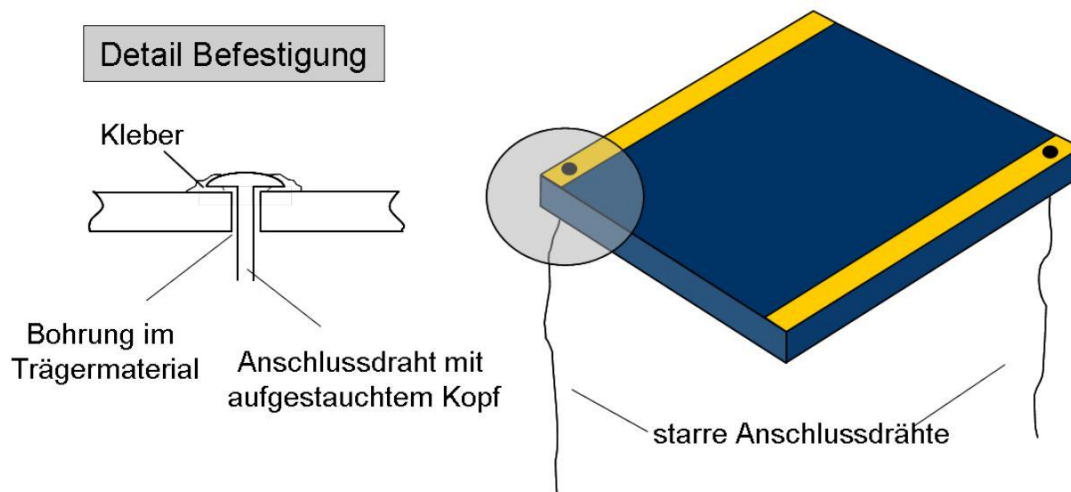


Bild 5.33: Auslieferungszustand Sensor B und Problematik des Anschlusses

Um die Kontaktstelle zu entlasten werden die Sensoren auf einem Teil des Gehäuses (Sensorträger, POS 3 in Bild 5.31) befestigt und die Durchführungen zur Aufnahme der Anschlussdrähte mit handelsüblichem Sekundenkleber vergossen. Beide Anschlussdrähte sind dadurch in ihrer Lage fixiert. Als zusätzlicher Schutz wurde die Kontaktstelle mit einem elastischen Abdeckmaterial (Produktbezeichnung: N1) überzogen. Nach Verkabelung des Sensors erfolgt der Einbau in das Gehäuse. Abschließend werden die Hohlräume mit Epoxidharz verfüllt. Anschließende Kontrollmessungen der Widerstände ergaben eine gute Übereinstimmung mit den Ausgangswerten. Am darauffolgenden Tag wurde bei fast allen Sensoren ein Widerstandsanstieg festgestellt, der eine Verwendung der Sensoren für eine Messung ausschloss. Um die Versuchsreihe wie geplant durchzuführen, wurden Reparaturmaßnahmen an den Elementen durchgeführt.

Reparaturmaßnahmen

Das Gehäuse wurde mit einem Fräser an der Stirnseite in dünnen Schichten abgetragen, bis die Anschlusspunkte zugänglich waren. Bild 5.34 zeigt das geöffnete Gehäuse nach Abschluss der Fräsarbeiten.

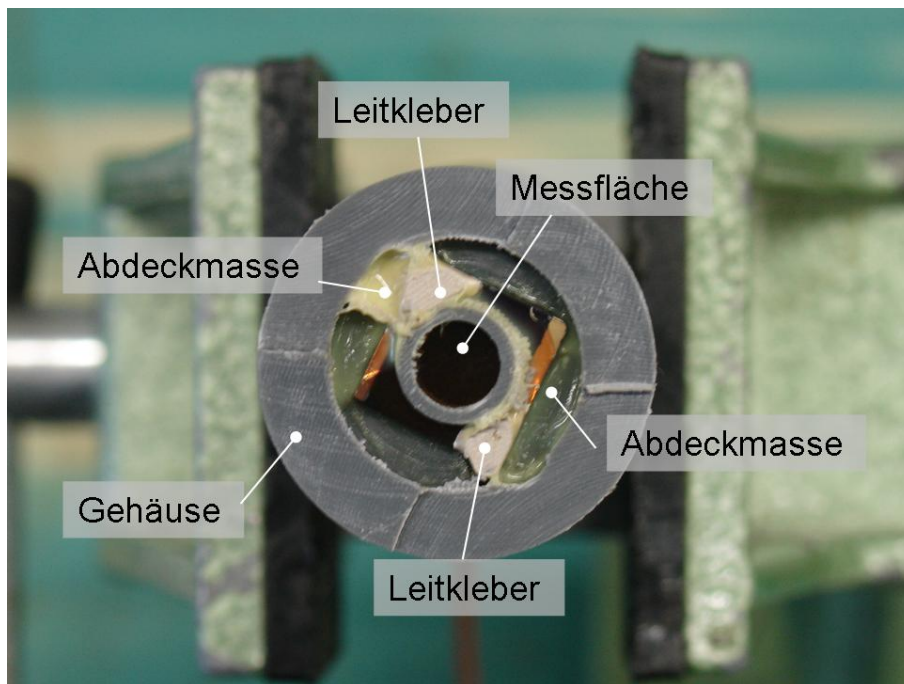


Bild 5.34: ALTS nach Öffnen des Gehäuses

Abdeckmasse und Leitkleberkontakte wurden mit einem Skalpell vorsichtig entfernt, um die Köpfe der Anschlussdrähte freizulegen. Hierbei zeigten sich Risse und Hohlräume in der Klebeverbindung. Nach dem vollständigen Freilegen der Anschlüsse wurde die Kontaktstelle gereinigt und anschließend ein dünnflüssiger Leitlack in mehreren Lagen aufgetragen. Durch diese Maßnahme wurde eine einwandfreie elektrische Verbindung zwischen Anschlussdrähten und Sensor erzielt. Begleitend zu den Arbeitsschritten wurden Kontrollmessungen durchgeführt und abschließend die Zeitkonstante des Sensors geprüft (vgl. Seite 113). Auf diese Weise wurden alle für die Versuchskörper Nr. 9 - 11 vorgesehenen Sensoren (12 Stück) instandgesetzt.

Durch die Reparaturmaßnahme war eine wasserdichte Ausführung des Gehäuses nicht mehr möglich. Deshalb wurden die Sensoren in den Versuchen Nr. 9 - 11 nachträglich in die Versuchskörper eingebaut (vgl. Bild 5.7 in Abschnitt 5.1.2). Die Lage der ALTS innerhalb der Versuchskörper wurde so festgelegt, dass eine Beeinflussung der Messung durch die nachträglich verfüllten Hohlräume hinter den Sensoren auszuschließen war. Alle Messkurven aus diesen Versuchen sind im Anhang C dargestellt.

5.4.5 ALTS - Bauart C

Eine Beanspruchung der Klebestelle, als deren Folge immer ein Bruch der Verbindung eintritt, kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Selbst beim Ein-

bau funktionstüchtiger Sensoren kann es durch die entstehende Hydratationswärme beim Erhärten des Betonkörpers zu einer thermischen Beanspruchung der Klebestelle kommen, wodurch die Verbindung aufbricht.

Aus diesem Grund ist für eine zuverlässige Anwendung der Sensoren die Herstellung einer mechanisch stabilen, elektrisch leitfähigen Verbindung zwischen Kontaktierungsstreifen und Anschlussleitung unverzichtbar. Grundsätzlich vorstellbar ist ein „Bonden“ der Anschlussdrähte auf die Kontaktierung des Sensors. Das Verfahren wird industriell bei der Herstellung von Computerchips angewandt. Wegen der zu geringen Stückzahl konnte dieses Verfahren nicht eingesetzt werden. Im folgenden wird eine eigene Weiterentwicklung des Sensors (Bauart C) vorgestellt, die die genannten Anforderungen ebenfalls erfüllt.

Bauweise

Über eine Klemmvorrichtung wird ein mechanisch stabiler Anschluss zwischen den seitlichen Kontaktierungsstreifen des Sensors und den Anschlussleitungen erzielt. Die Eignung der Bauweise zur Wärmestrommessung in Beton konnte in einer ergänzenden Versuchsreihe gezeigt werden. In dieser Versuchsreihe wurden Betonwürfel (200 mm Kantenlänge) mit unterschiedlichen Ladungsmengen PETN angesprengt (vgl. Anhang C).

Bild 5.35 zeigt einen Sensor mit abgenommenem Gehäuseoberteil. Weitere Zwischenstufen der Fertigung, Planunterlagen des Gehäuses sowie der Versuchsaufbau sind im Anhang D dargestellt.

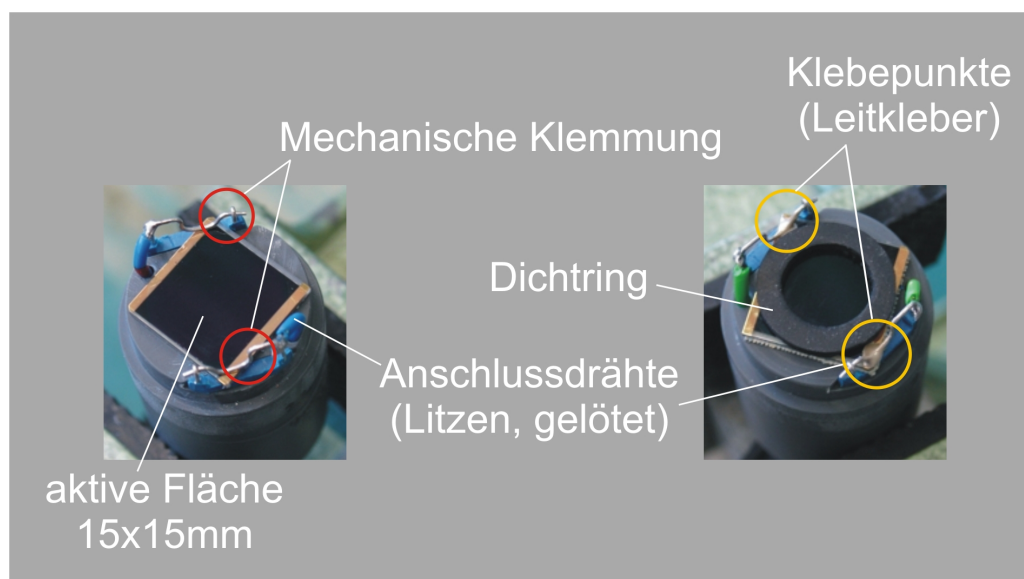


Bild 5.35: Sensor Bauart C mit abgenommenem Gehäusedeckel

Die wesentlichen Änderungen und Vorteile dieser Bauart lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine mechanische Klemmung auf die Kontaktierungsstreifen wird über Federbügel hergestellt. Die Bügel können geöffnet und wieder geschlossen werden.
- Als Anschlussleitungen werden flexible Litzen eingesetzt, die durch Lötunkte an den Bügeln fixiert werden. Daraus resultiert eine Unempfindlichkeit des Sensors gegenüber Erschütterungen und mechanischer Beanspruchung.
- Zur Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Bügeln und Kontakten werden die Klemmpunkte vor dem Zusammenbau zusätzlich mit Leitkleber abgedeckt.
- Zwischen Gehäuseoberteil und Sensorfläche wird eine Dichtung eingebaut.

5.5 Datenauswertung – Messergebnisse

Für die Beschreibung des Materialverhaltens von Beton werden neben bestimmten Datenpunkten aus den Messkurven (z.B. Signalankunft und Signalanstiegszeit) auch daraus abgeleitete Größen wie Geschwindigkeit und Druck verwendet. Am Beispiel der Kohle-Masse-Widerstände (KMW) wird das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung der Messkurven beschrieben. Gleichzeitig werden die Unterschiede zu den Signalverläufen bei Manganinelementen (MA) und Dehnmessstreifen (DMS) dargestellt und Ursachen erläutert.

5.5.1 Signalverläufe

In Bild 5.36 ist der in eine Druck-Zeit-Beziehung umgerechnete Messschrieb eines KMW dargestellt. Der Signalverlauf lässt drei wesentliche Bereiche erkennen:

- Bereich I ist der Bereich vor einem Signalanstieg. Hier treten häufig Signalschwankungen auf. Ein Vergleich dieser Signale mit den Signalverläufen der Nullmessung gibt darüber Auskunft, ob die Schwankungen tatsächlich als Störungen aufzufassen sind oder als Grundrauschen interpretiert werden können. Der Bereich endet mit dem Beginn eines ersten sichtbaren Signalanstiegs.
- Bereich II enthält den Signalanstieg, der sich unter dem Einfluss der Belastung ändernden Messgröße und den Maximalwert der Messgröße.
- Bereich III erstreckt sich ausgehend vom Maximalwert bis zum Versagen des Messelements. Nach Erreichen des Peakwertes fällt die Kurve rasch

ab (Bild 5.36). In diesem Bereich treten vereinzelt Signalamplituden auf, die über den Maximalwert des Bereiches II hinausgehen (vgl. Bild 5.37). Die Ursache liegt in einer Ionisierung der Umgebung (Luft) durch Reaktionsprodukte aus der Explosion des Sprengstoffs. Dadurch stellen sich Leitfähigkeitsänderungen an den Messelementen ein, die zu ähnlichen Kurvenverläufen wie aus der mechanischen Belastung führen. Signale dieser Art werden als Störungen bewertet.

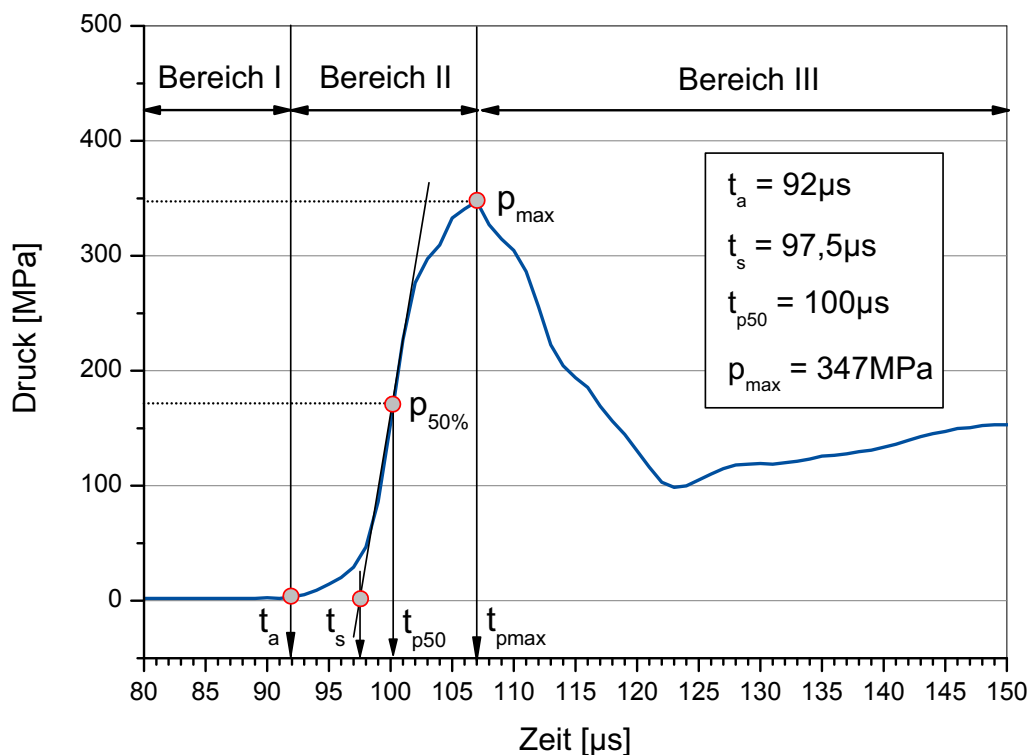


Bild 5.36: Auswertung des Signalverlaufs eines KMW im unteren Druckbereich nach HOLLENBERG [49]

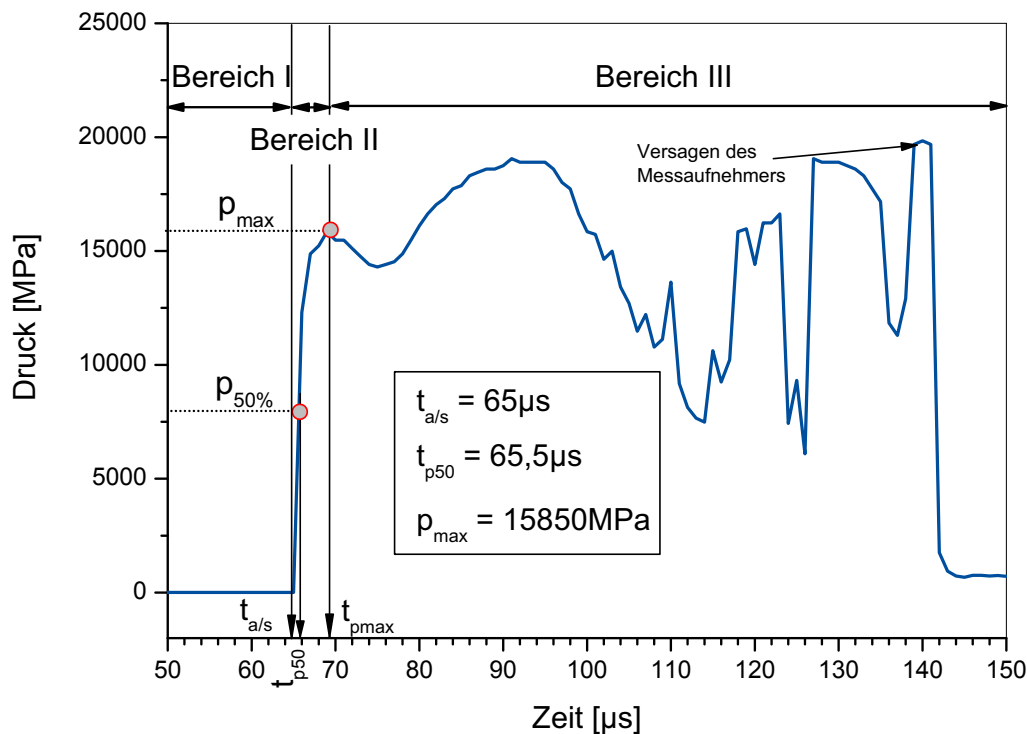


Bild 5.37: Auswertung des Signalverlaufs eines KMW im oberen Druckbereich nach HOLLENBERG [49]

Auswertung

Für die Auswertung werden bestimmte Zeitpunkte definiert (vgl. Bild 5.36 und Bild 5.37):

- Ankunftszeit t_a : Erster sichtbarer Anstieg des Messsignals
- Definierte Ankunftszeit t_s : Ankunftszeit der Welle/Stoßwelle; Schnittpunkt der Tangente an die Flanke des Messsignals mit der „Nullmessung“
- Ankunftszeit t_p : Zeitpunkt des Erreichens des Peakwertes p_{\max}
- Ankunftszeit t_{p50} : Zeitpunkt, an dem 50 % des Peakwertes erreicht werden
- Signalanstiegszeit: Die Zeitdauer zwischen den Zeitpunkten, an denen 10 % bzw. 90 % des maximalen Druckwertes erreicht werden

Die entsprechenden Definitionen werden auf die Kurvenverläufe von Manganin-elementen (Bild 5.38) und von DMS (Bild 5.39) sinngemäß übertragen.

Signalformen von KMW, MA und DMS

Wesentliches Merkmal des Signalverlaufs von KMW ist ein sich an die Signalflanke anschließender und bis zum Erreichen des maximalen Druckwertes zunehmend abflachender Kurvenverlauf. Der keramische Widerstandskörper (Bild 5.19)

und die Kapselung aus Epoxidharz besitzen ein nichtlineares elastisch-plastisches Kompressionsverhalten (vgl. Kapitel 2). Der Druckpeak stellt sich erst ein, wenn beide Materialien nahezu vollständig zusammengedrückt sind.

Kennzeichnend für Folienaufnehmer ist ein annähernd dreieckförmiger Signalverlauf (vgl. Bild 5.38 bzw. Bild 5.39). Die Flanke des Signals ist eine direkte Verbindung zwischen dem Zeitpunkt der Signalankunft t_a und dem maximalen Spannungs- bzw. Dehnungswert. Für diesen Typ Messaufnehmer ist wegen der extrem kurzen Anstiegszeiten (ca. 1 μs) keine Angabe von Zwischenzeitpunkten erforderlich. Verglichen mit den Kohle-Masse-Widerständen sind die Signale der Folienaufnehmer als wesentlich direkter zu charakterisieren.

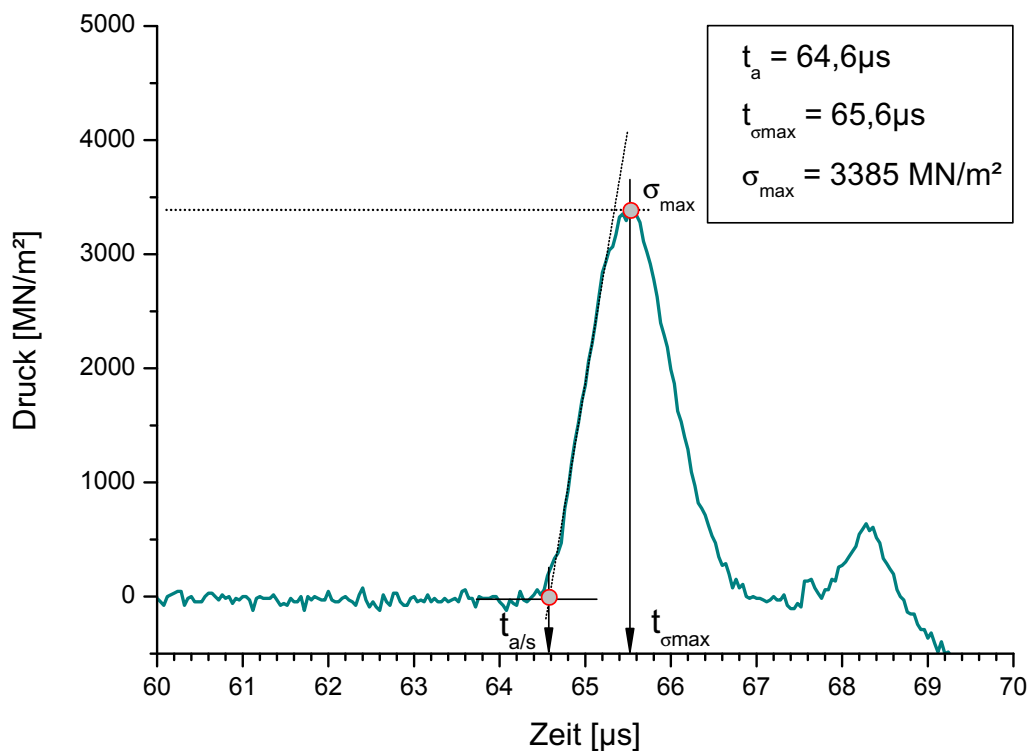


Bild 5.38: Typischer Signalverlauf eines Manganin-Aufnehmers

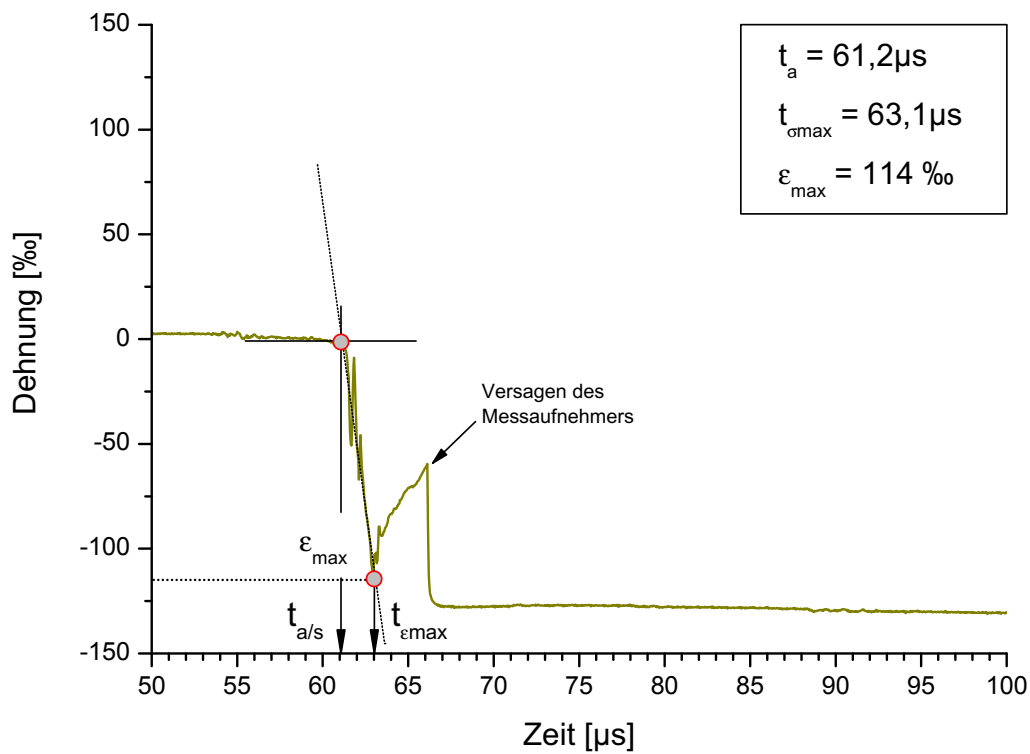


Bild 5.39: Typischer Signalverlauf eines DMS

Die Ergebnisse der beschriebenen Signalauswertung sind beispielhaft für Versuch Nr. 2 in Tabelle 5.4 zusammengefasst. In den Darstellungen der Signalverläufe in Anhang C sind die entsprechenden Daten aller übrigen Versuche aufbereitet.

Tabelle 5.4: Auswertung von Versuch Nr. 2

VK 2 -- 640g Ladung						
Messelement	Weg [mm]	ta	ts	tp	tp50	Peakwert
KMW 201	0	65	65	69	65,5	15850
KMW 202	23,5	69	71,5	74	72,2	5123
KMW 203	31,5	72	72	75	73,3	2916
KMW 204	43,5	74	75	79	76,5	2731
KMW 205	52,5	76	77	81	78,5	1801
KMW 206	122,5	92	97,1	107	100	347
KMW 207	161,5	101	109,8	120	113	102,6
KMW 208	204,5	112	120	146	131	47,4
Messelement	Weg [mm]	ta	ts	tp	tp50	Peakwert
DMS 201	31,5	61,4	-	62,9	-	11,42
DMS 202	52,5	67,4	-	69,5	-	5,34
DMS 203	122,5	91,7	-	94,8	-	2,06
DMS 204	161,5	-	-	-	-	-
DMS 205	204,5	-	-	-	-	-
DMS 206	204,5	-	-	-	-	-
Messelement	Weg [mm]	ta	ts	tp	tp50	Peakwert
MA 201-ax	23,5	57,6	-	58,2	-	6234
MA 202-ax	31,5	59,6	-	60,4	-	5667
MA 203-ax	43,5	kein Messsignal				
MA 204-ax	52,5	64,5	-	65,6	-	3371
MA 205-ax	81,5	76,6	-	79,8	-	2721
MA 206-rad	23,5	57,4	-	59,7	-	7467
MA 207-rad	43,5	63,4	-	65,8	-	4034
MA 208-rad	81,5	75,2	-	77,9	-	4334

Unterschiedliche Auswerteverfahren für KMW – Weg-Zeit-Beziehungen

In den bereits genannten Untersuchungen von OCKERT [69] und HERRMANN [42] wenden die Autoren eine andere Vorgehensweise bei der Auswertung der Messschriebe an. OCKERT benutzt zur Ableitung einer Weg-Zeit-Beziehung aus den Messschrieben der KMW den Zeitpunkt, an dem das Druckmaximum erreicht wird ($t_{p,max}$). HERRMANN ermittelt seine Weg-Zeit-Beziehung aus der Ankunftszeit t_a . Er bezieht zusätzlich Manganinelemente und Dehnmessstreifen mit in die Auswertung ein. In der vorliegenden Arbeit wurde für Weg-Zeit-Beziehungen ausschließlich die Ankunftszeit t_{p50} zugrunde gelegt.

Die Kurvenverläufe in Bild 5.40 verdeutlichen den Einfluss der unterschiedlichen Auswerteverfahren auf das Ergebnis einer daraus abgeleiteten Weg-Zeit-Beziehung. Es ist ersichtlich, dass die Kurvenverläufe der Auswerteverfahren von Herrmann und Ockert Grenzkurven darstellen. Bei einheitlicher Auswertung nach dem beschriebenen „ t_{p50} -Verfahren“ nähern sich die Kurven dem Kurvenverlauf der eigenen Auswertung von „oben“ (Herrmann) und von „unten“ (Ockert) an.

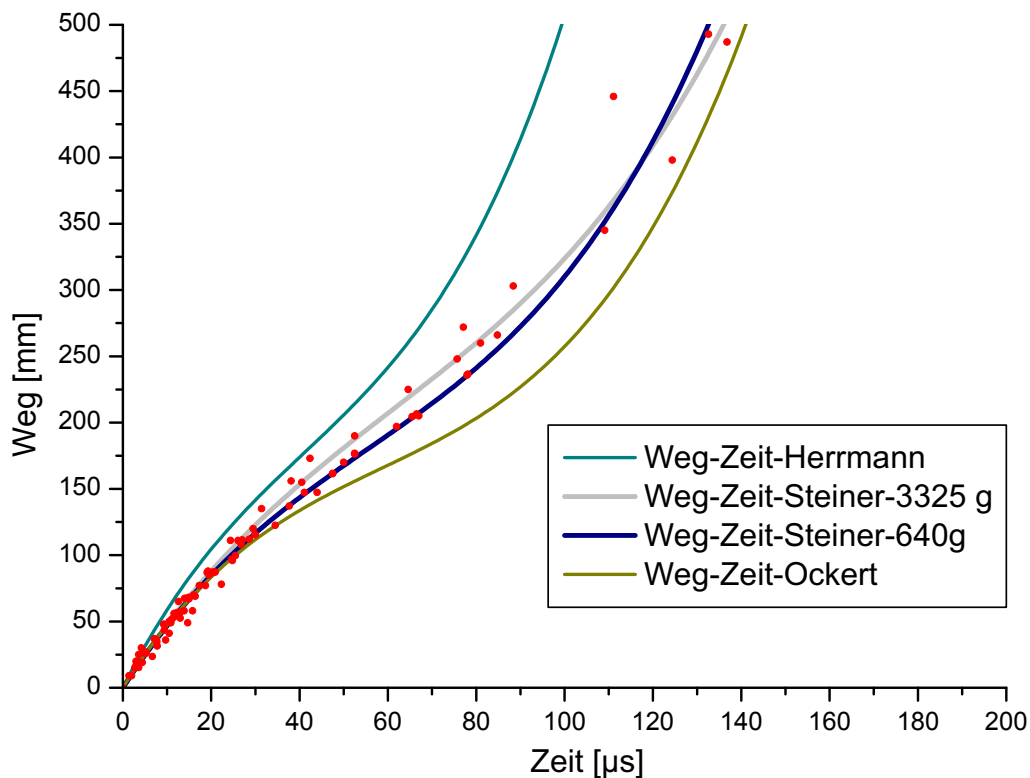


Bild 5.40: Weg-Zeit-Beziehungen unterschiedlicher Autoren und Auswerteverfahren

Interpretation der Kurvenverläufe in Bild 5.40

Im Bereich extremer Stoßbelastungen (bis ca. 120 mm Weg) sind zwischen den Kurven der eigenen Auswertung und denen von Ockert keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. Die Auswertung von Herrmann mit früheren Ankunftszeiten t_a zeigt bereits einen abweichenden Verlauf. Deutlicher werden die Unterschiede ab einer Wellenlaufzeit von ca. 40 μs . Die Stoßwelle zeigt hier bereits ein Auseinanderlaufen der Wellenfront und eine geringere Amplitude. Der Effekt verstärkt sich mit zunehmender Laufzeit (vgl. Bild 4.15 in Kapitel 2).

Der Gültigkeitsbereich der dargestellten Weg-Zeit-Beziehungen endet strenggenommen an jenem Punkt, an dem die Geschwindigkeit der Welle wieder die elastische Ausbreitungsgeschwindigkeit erreicht. Dieser Sachverhalt wird im Abschnitt 5.5.2, „Ausbreitungsverhalten der Druckwelle“ genauer beschrieben.

Eine Folge der verschiedenen Vorgehensweisen sind Unterschiede der aus diesen Datenpaaren abgeleiteten Größen. Besonders wird dadurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Belastungswelle U_s beeinflusst, da sie durch Differentiation aus einer Weg-Zeit-Beziehung hervorgeht, die sich selbst aus Datenpunkten (Ankunftszeit und Position im Versuchskörper) über eine Regressionskurve ableitet. Weiterführende Erläuterungen hierzu enthält Abschnitt 5.5.2.

Um Ergebnisse der eigenen Untersuchungen mit denen der Untersuchungen

von OCKERT [69] und HERRMANN [42] vergleichen zu können, wurden alle Messschriebe dieser Untersuchungen nach dem beschriebenen Verfahren erneut ausgewertet. Gleichzeitig führt dies zu einer Vergrößerung der Datenbasis, aus der weitere Ergebnisse abgeleitet werden.

Einfluss von Kapselungen und Messelementen

Kohle-Masse-Widerstände und Folienaufnehmer besitzen nicht nur unterschiedliche Signalformen, sondern wegen ihres unterschiedlichen Aufbaus auch verschiedene Ansprechzeiten. Besonders MA-Elemente zeigen aufgrund ihrer geringen Eigenkapazität einen unmittelbaren Signalanstieg bei Belastung. KMW reagieren insgesamt träger und die Signalantwort erfolgt geringfügig verzögert. Dies erschwert die Auswertung insbesondere dann, wenn Signalkünfte unterschiedlicher Elemente innerhalb einer Messebene zu vergleichen sind. Bild 5.41 zeigt den Signalverlauf eines MA-Aufnehmers mit veränderter Kapselung (vgl. Bild 5.4). Das Signal dieses Aufnehmers (Bezeichnung „neu“ in Bild 5.41) verschiebt sich auf der Zeitachse in Richtung des KMW. Die Form des Signals bleibt nahezu unverändert. Die Untersuchung verdeutlicht, dass bei der Interpretation von Messsignalen stets der Einfluss der Kapselungsart auf den Signalverlauf in die Betrachtungen mit einzubeziehen ist.

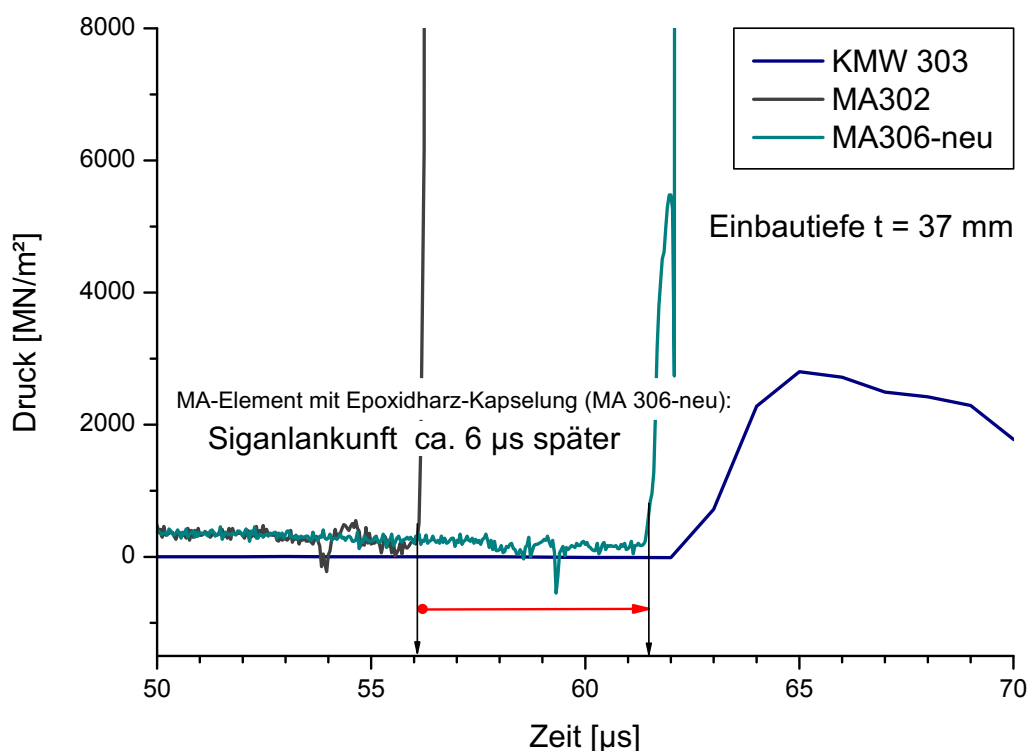


Bild 5.41: Signalankunft bei unterschiedlichen Kapselungsverhältnissen

5.5.2 Messgrößen-Zeit-Verläufe

Eindringcharakteristik der Druckwelle und Wellenform

Beim Übergang vom Sprengstoff in den Beton erfährt die Stoßwelle eine starke Dämpfung. Die Grundlagen dieses Vorgangs wurden in Kapitel 4.4 erläutert. Bild 5.42 zeigt Untersuchungsergebnisse zur Eindringcharakteristik der Druckwelle, die erstmals den Einfluss der Ladungsgröße auf das Eindringverhalten mitberücksichtigen. Bei Verwendung einer Sprengstoffmenge von 640 g fällt der Druck bereits nach einer Laufstrecke der Welle von ca. 100 mm auf 70 % seines Maximalwertes ab. Die Druckabnahme ist ebenso bei Ladungskegeln mit Sprengstoffmengen von 3325 g festzustellen, jedoch mit weniger starker Ausprägung. In diesem Fall ist das Eindringverhalten der Stoßwelle mit einer größeren Tiefenwirkung verbunden und bietet dadurch den Vorteil einer besseren Signalauflösung bei der Messwerterfassung. Der Maximaldruck ist abhängig von der Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffs und wird nicht durch die Sprengstoffmenge bestimmt.

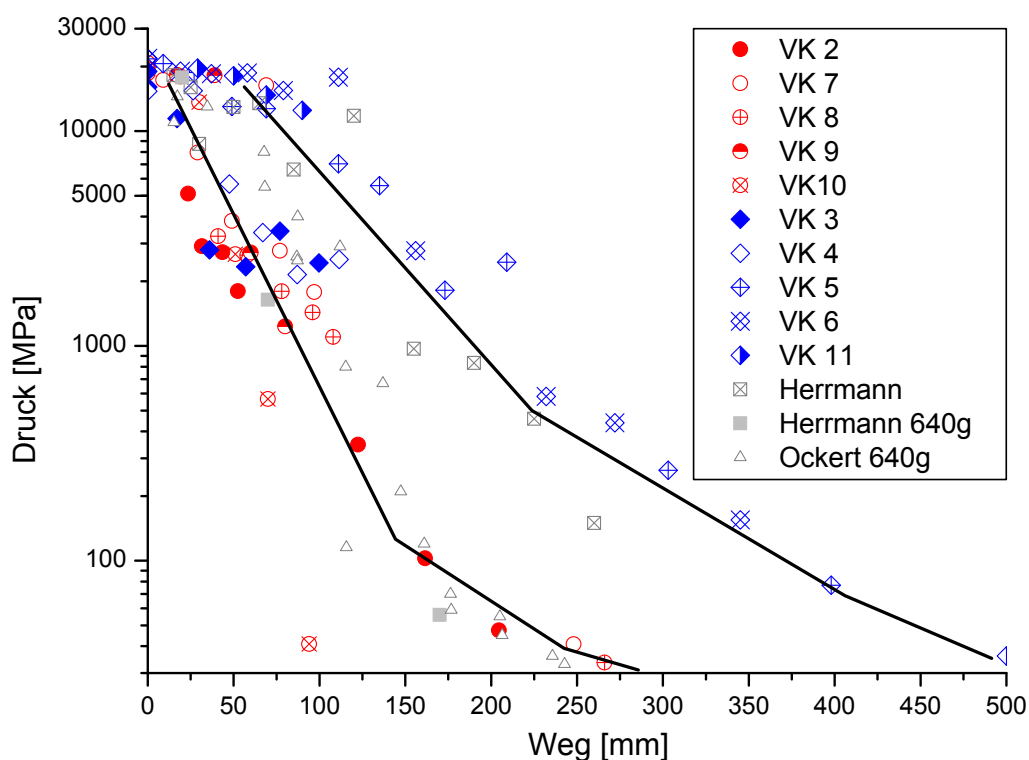


Bild 5.42: Eindringverhalten der Stoßwelle in axialer Richtung

Gleichzeitig mit der räumlichen Ausbreitung ändert sich die Form der Welle. Dieses Verhalten wurde hier erstmals mit Messtechnik erfasst. Bild 5.43 zeigt Druck-Zeit-Verläufe von KMW mit derselben Einbautiefe.

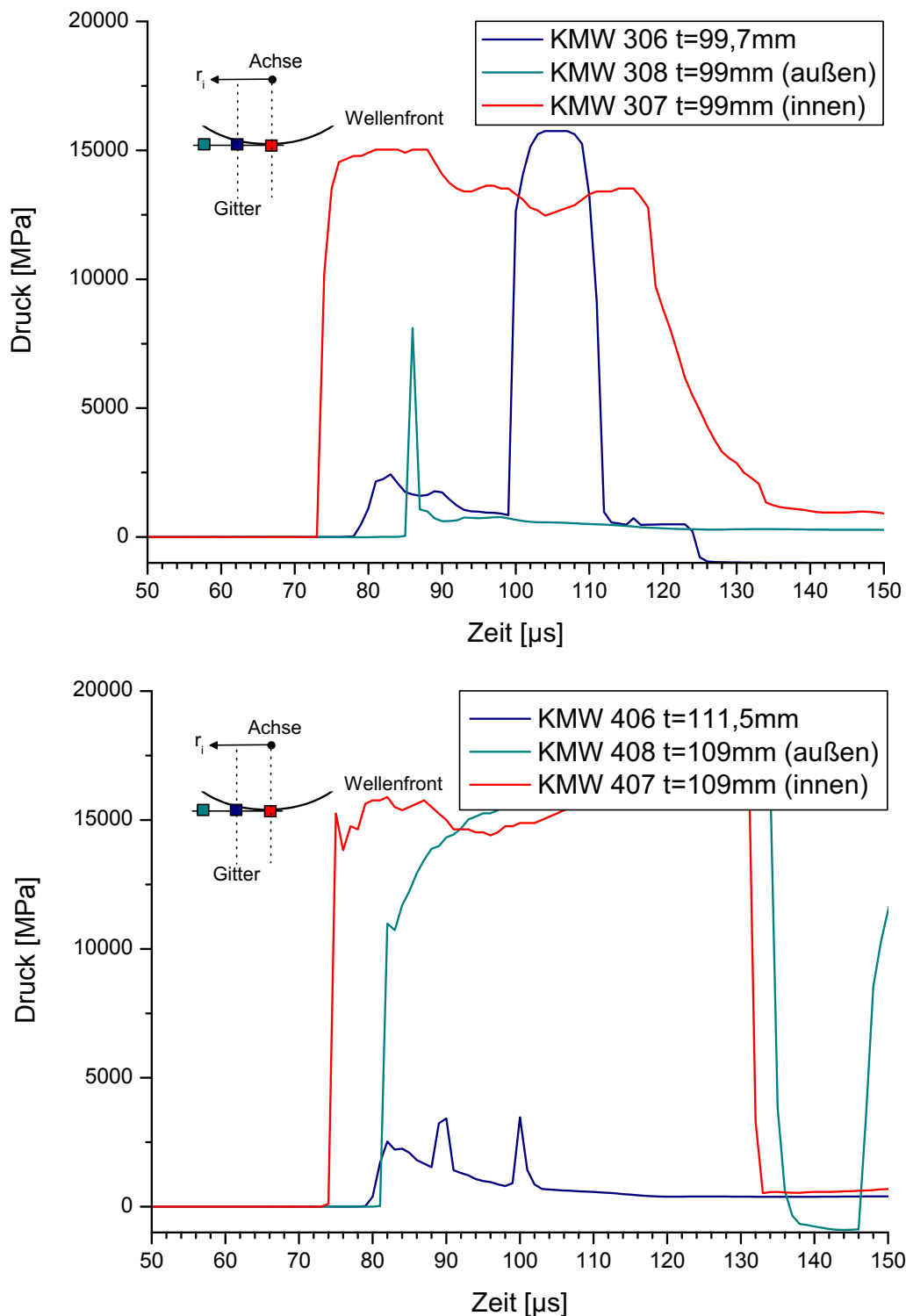


Bild 5.43: Druck-Zeit-Verläufe von KMW mit unterschiedlichen Abständen von der Belastungsachse

Mit zunehmendem Abstand von der Belastungsachse ergeben sich spätere Ankunftszeiten der Wellenfront an den Messelementen. Diese Beobachtung steht in Einklang mit dem in den Kapiteln 2 und 4 beschriebenen Formänderungsverhalten der Belastungswelle von einer ebenen hin zur kugelförmigen Welle. Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen eine Aussage über den sich mit zunehmendem Abstand von der Belastung ändernden Bereich der Wellenfront mit

horizontaler Tangentialebene. In den Versuchen Nr. 5-8 wurden diese Erkenntnisse genutzt und die KMW mit zunehmender Einbautiefe trichterförmig (veränderliches r_i) angeordnet.

Wellenausbreitung entlang der Oberfläche

Um die Ausbreitung der Belastungswelle an der Oberfläche der Versuchskörper zu untersuchen, wurden dort in unterschiedlichen Abständen zur Belastungsachse KMW und DMS positioniert (vgl. Bild 1.1). Bei den KMW zeigt sich ausgehend vom Rand der Sprengladung ein sehr rascher Abfall des Drucks. Verglichen mit Drücken in Belastungsrichtung sind die Druckwerte entlang der Oberfläche deutlich geringer. Im Hinblick auf numerische Simulationen sollte aber auch diesen Werten Aufmerksamkeit geschenkt werden (vgl. Abschnitt 2.5, Bild 2.24). Eine Auswertung von DMS konnte nur an einer Stelle erfolgen. Tabelle 5.5 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen. Die Signalverläufe der einzelnen Messelemente sind in Anhang C dargestellt.

Tabelle 5.5: Wellenausbreitung entlang der Oberfläche

Messergebnisse			
Messelement	Achsabstand R [mm]	Druck [MPa]	Ladung [g]
KMW 710	150	113,6	640
KMW 711	300	12,5	640
KMW 712	450	5	640
KMW 810	150	91,7	640
KMW 906	100	91,6	640
KMW 907	150	37	640
KMW 908	200	29	640
KMW 1006	150	1947	640
KMW 1007	200	28	640
KMW 1008	250	13	640
KMW 1106	150	10846	3325
KMW 1107	250	56	3325
Messelement	Achsabstand R [mm]	Dehnung [‰]	Ladung [g]
DMS 502	200	4,95	640

Deviatorik. Versagensfläche

In Kapitel 2, Abschnitt 2.4 wurden für den axialsymmetrischen Spannungszustand (Plane-Wave) der hydrostatische Druck p und die Vergleichsspannung σ_{eq} angegeben. Bei eindimensionalen Kompressionswellen ergeben sich daraus Punkte auf dem Druckmeridian (vgl. Teilbild in Bild 5.44). Wird die Festigkeit

des Betons überschritten, so bewegt man sich entlang der Versagensfläche hin zu den höheren Drücken (RIEDEL [74]). Durch Angabe der Vergleichsspannung über dem hydrostatischen Druck ist eine Aussage über die Gestalt der Versagensfläche von Beton möglich. Sind die Spannungsanteile in Belastungsrichtung (σ_{ax}) und quer dazu (σ_{ax}) bekannt, kann eine Vergleichsspannung, z.B. nach v. MISES berechnet werden. Diese Spannungsanteile wurde im Rahmen dieser Arbeit aus Messungen mit MA-Elementen ermittelt, die zugehörigen volumetrischen Druckwerte wurden mit KMW erfasst. Aus den genannten Beziehungen in Kapitel 2, Abschnitt 2.4 erhält man Datenpaare entlang der Versagensfläche. Die grundsätzliche Annahme bei dieser Auswertung ist, dass die mit den KMW ermittelten Druckwerte dem hydrostatischen Druck entsprechen. Dies wird damit begründet, dass der Spannungszustand des KMW wegen seines inneren Aufbaus und der Art seiner Kapselung (vgl. Bild 5.19) dem einer Materialprobe im Triaxialtest ähnlich ist (vgl. Kapitel 4, Bild 4.10).

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 5.44 dargestellt. Wegen der Empfindlichkeit der Manganelemente, dem Einfluss der Kapselung und wegen des Einflusses der Inhomogenität der Versuchskörper ist keine befriedigende Aussage über die Form der Versagensfläche von Beton möglich. Dennoch lassen sich aus den Untersuchungen Anhaltswerte für die Form der Versagensfläche bei hohen hydrostatischen Drücken ableiten. Weitere Untersuchungen an kleineren, weitestgehend homogenen Versuchskörpern und mit nicht gekapselten Manganelementen sollten durchgeführt werden, um weitere Aufschlüsse zu erhalten.

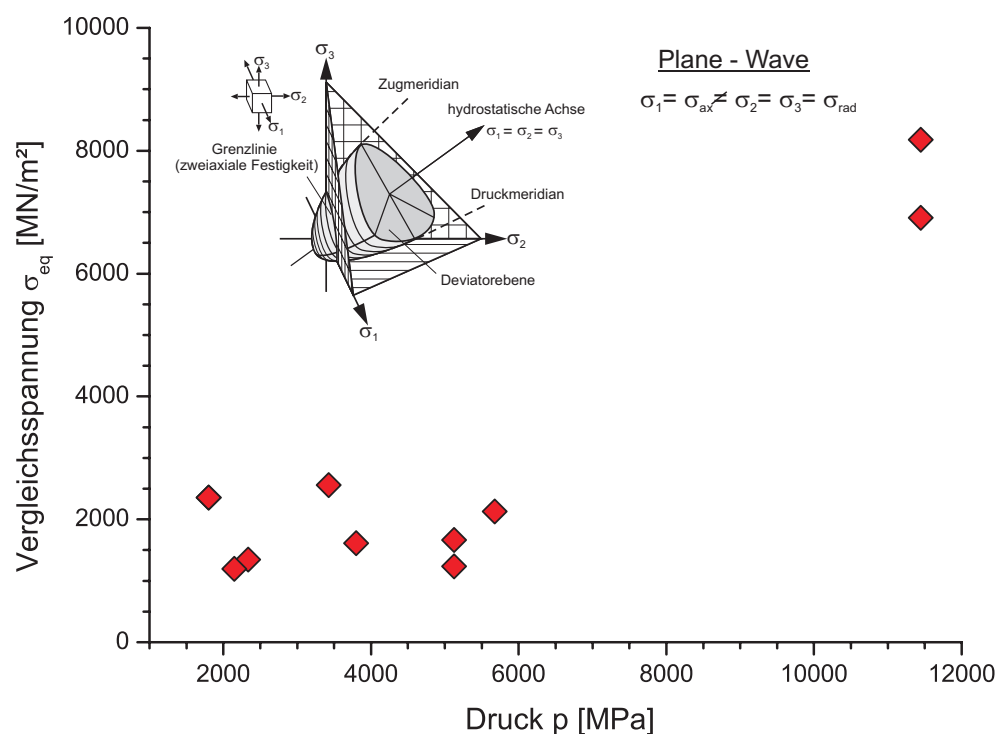


Bild 5.44: Versagenszustand – Vergleichsspannung

Ausbreitungsverhalten der Druckwelle

Die sich im Versuchskörper ausbreitende Druckwelle wird durch Angabe der Position ihrer Wellenfront und durch ihre Geschwindigkeit charakterisiert. Ein analytischer Zusammenhang zwischen Weg (Positionen der Messaufnehmer) und Zeit (Signalankunft der Druckwelle an den Messelementen) wird über eine polynomiale Funktion 3. Grades hergestellt. Diese erhält man durch Regression der Weg-Zeit Datenpaare (vgl. Abschnitt 5.5.1, Bild 5.40).

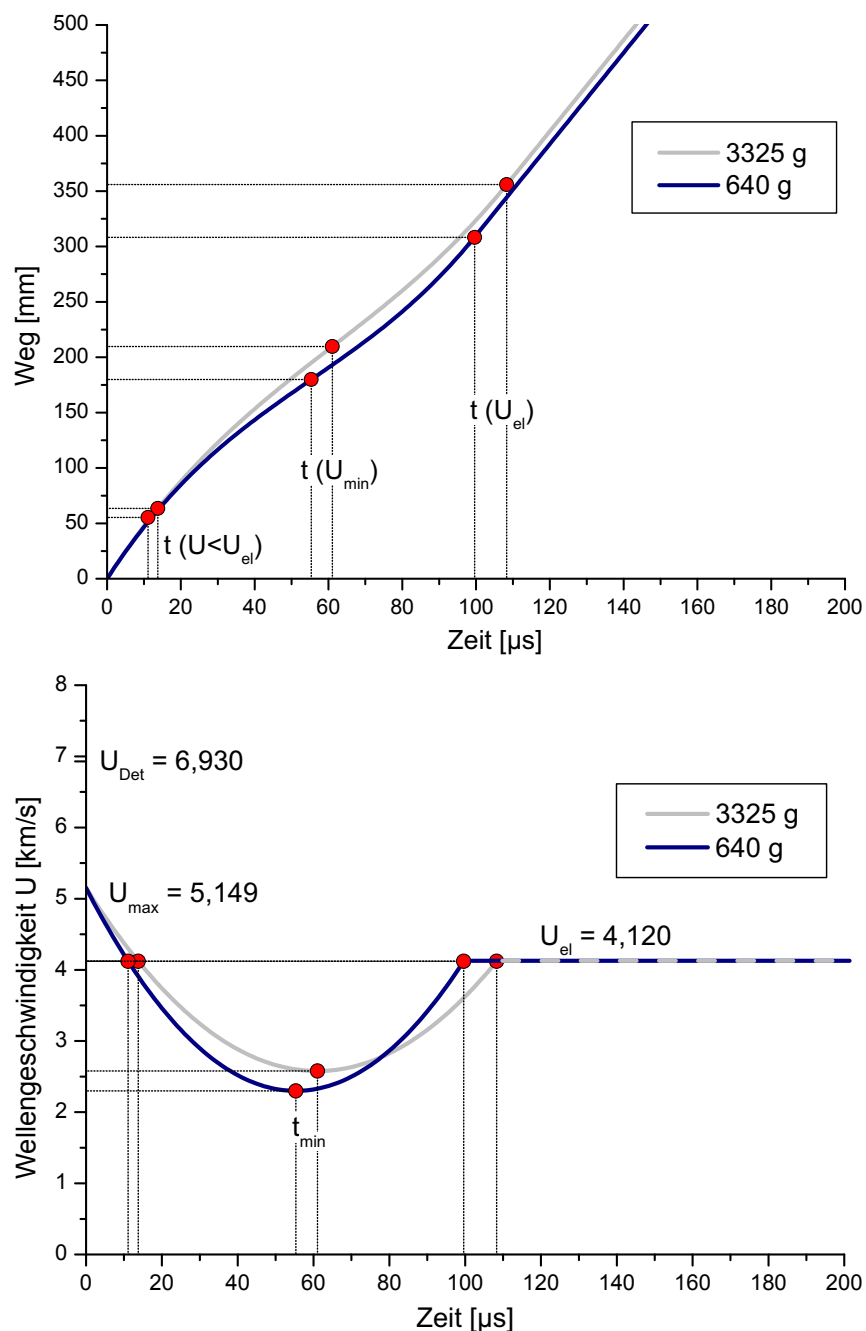


Bild 5.45: Weg-Zeit- und Geschwindigkeit-Zeit-Beziehung

Der obere Teil von Bild 5.45 zeigt die den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zugrunde liegenden Regressionskurven. Dabei ist zu beachten, dass die dargestellten Regressionskurven einen beschränkten Gültigkeitsbereich besitzen. Da ab dem Zeitpunkt, an dem die elastische Wellengeschwindigkeit wieder erreicht wird, die Weg-Zeit-Beziehung linear verlaufen muss, wird ab dem Zeitpunkt $t=t(U_{el})$ die Tangente an die Kurve verwendet. Dies wird ersichtlich, wenn man die Wellengeschwindigkeit aus der Weg-Zeit-Beziehung ableitet. Der Kurvenverlauf im unteren Teil von Bild 5.45 ist typisch für das Geschwindigkeitsprofil der Stoßwelle im Beton. Auf eine anfangs starke Abnahme der Geschwindigkeit erfolgt ab dem Zeitpunkt t_{min} ein erneuter Anstieg. Dieser Anstieg ist durch die elastische Wellenausbreitungsgeschwindigkeit begrenzt.

Bild 5.46 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem in Kapitel 2 beschriebenen nichtlinearen Materialverhalten von Beton und der Wellengeschwindigkeit im Versuchskörper bei Verwendung eines kleinen Ladungskegels.

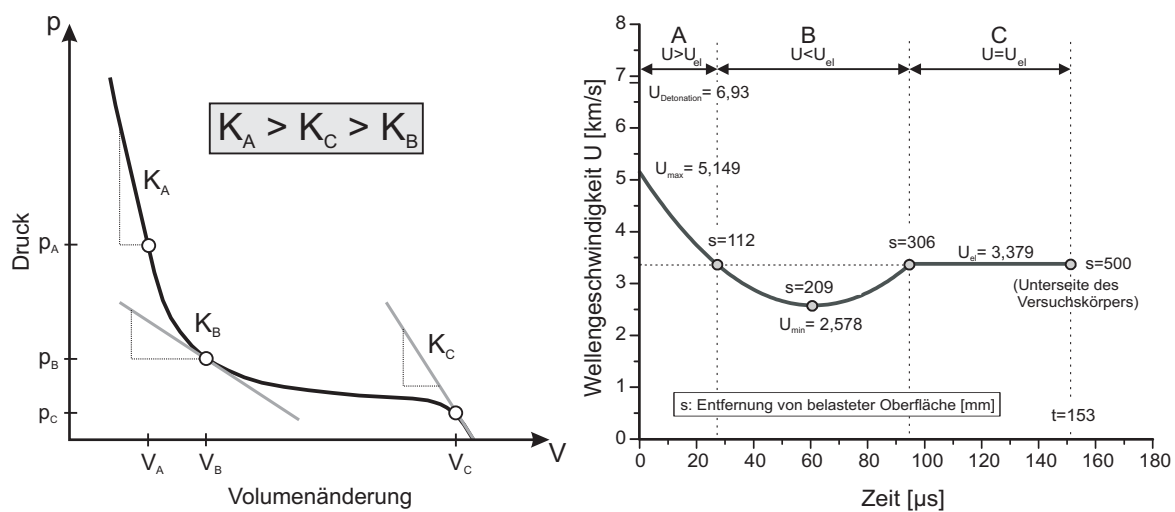


Bild 5.46: (links) Nichtlineares Materialverhalten; (rechts) Wellengeschwindigkeit innerhalb des Versuchskörpers: $t=0$: Eintritt der Welle an der Oberseite; $t=153$ μs : Ankunft der Welle an der Unterseite

Das Geschwindigkeitsprofil der Stoßwelle ist auch an einem Sägeschnitt des Versuchskörpers identifizierbar (vgl. Bild 5.47):

- Die Abnahme der Wellengeschwindigkeit geht einher mit der Zerstörung des Betons (Kraterbereich).

- Darunterliegendes Material wird nicht zerstört, sondern verdichtet. Dies hat einen Anstieg der Wellengeschwindigkeit zur Folge.
- Der Geschwindigkeitsanstieg endet beim Übergang der Welle in den ungestörten Bereich. Dort kann von elastischem Materialverhalten ausgegangen werden.

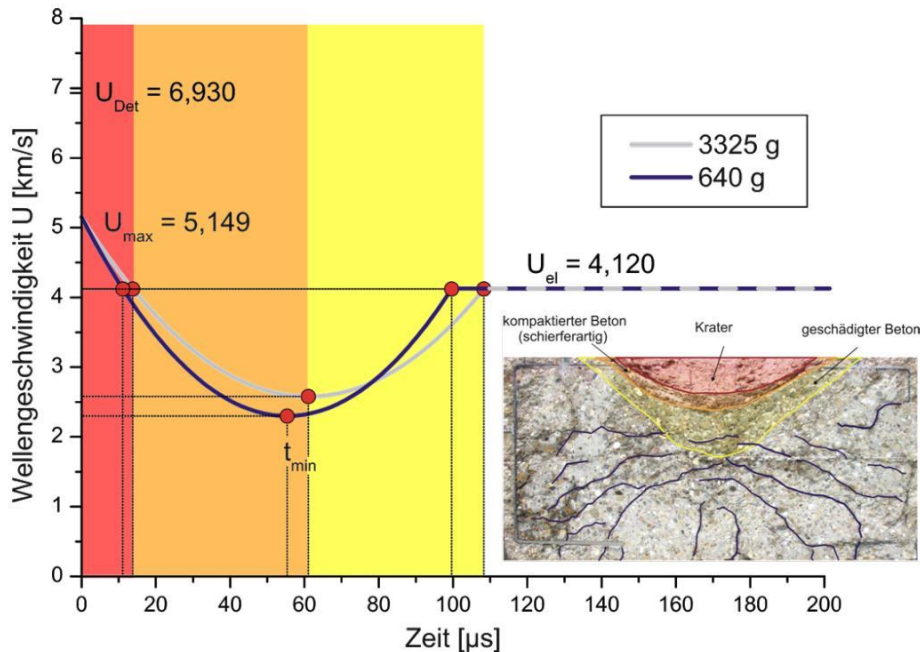


Bild 5.47: Identifikation des Geschwindigkeitsprofils der Stoßwelle am Sägeschnitt eines Versuchskörpers

Eine Beschreibung der Eigenschaften des Betons in den unterschiedlichen Versagensbereichen des Versuchskörpers erfolgt in Abschnitt 5.6.

5.5.3 Hugoniot-Daten für Beton

Um HUGONIOT-Daten für Beton zu ermitteln, müssen die Stoßwellengeschwindigkeit U_s und der Druck p innerhalb der Versuchskörper bekannt sein. Bei gegebener Anfangsdichte ρ_0 oder gegebenem Anfangsvolumen V_0 erhält man aus der Gleichung der RAYLEIGH-Geraden (2.25) Punkte der HUGONIOT-Kurve.

Bild (5.48) zeigt HUGONIOT-Daten aus unterschiedlichen Versuchsreihen am Institut für Massivbau. Die den Punkten zugrunde liegenden Messschriebe wurden einheitlich nach dem auf Seite 130 beschriebenen Verfahren ausgewertet. Die jeweilige Ladungsgröße wurde berücksichtigt. Aufgrund der kurzen Belastungsdauer und der sich insbesondere im oberen Bereich der Versuchskörper stark ändernden Wellengeschwindigkeit ist dort die Streuung der Ergebnisse besonders ausgeprägt.

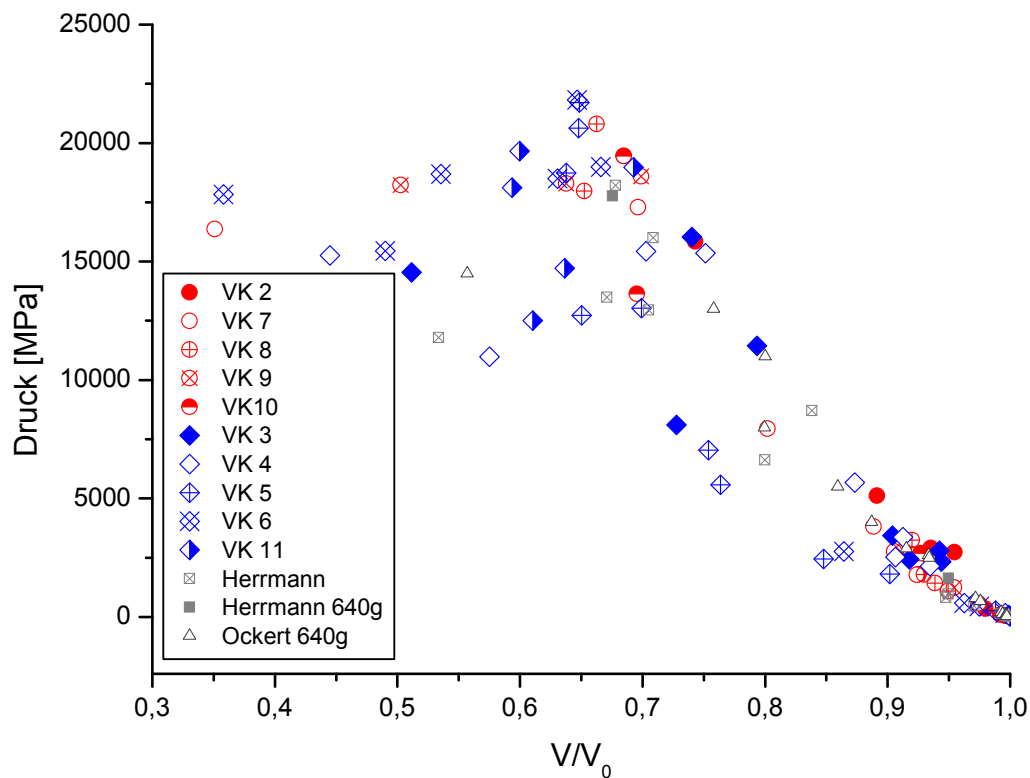


Bild 5.48: HUGONIOT-Daten unterschiedlicher Versuche am IfMB

Eine andere Möglichkeit, HUGONIOT-Daten zu ermitteln, besteht darin, mit DMS die Materialstauchungen ε im Beton zu messen (vgl. z.B. Tabelle 5.4 und Anhang C) und über die Beziehung

$$\varepsilon_V = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (5.5)$$

die Volumenänderung V/V_0 zu berechnen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die durch Messung ermittelten Materialstauchungen in Richtung der Belastungsachse der volumetrischen Dehnung ε_V entsprechen.

Bild 5.49 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung und zum Vergleich HUGONIOT-Daten, die, wie allgemein üblich, mit der Gleichung der RAYLEIGH-Geraden berechnet wurden. Die Auflösung der eingesetzten DMS ermöglicht es, HUGONIOT-Punkte im Druckbereich unterhalb von 10000 MPa anzugeben. Aufgrund der Zugänglichkeit zu weiteren Rohdaten (HERRMANN [42]) wurden die Ergebnisse der eigenen Dehnungsmessungen durch Datenmaterial früherer Versuche am IfMB ergänzt. Diese Daten wurden nach den in Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Verfahren neu ausgewertet.

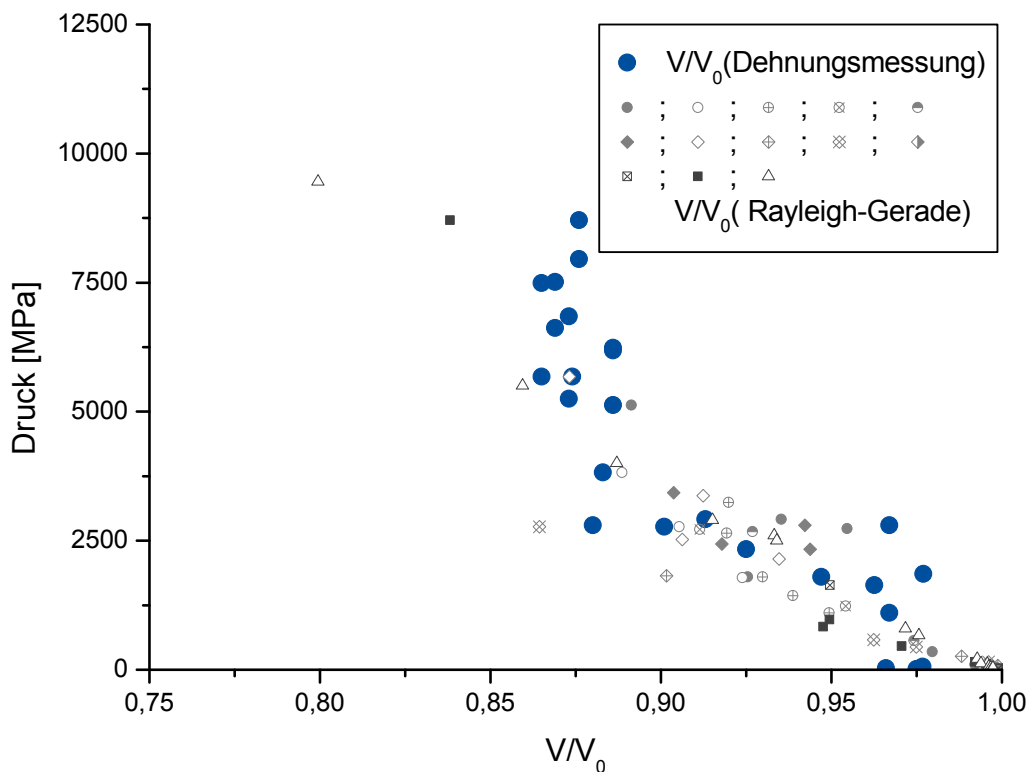


Bild 5.49: HUGONIOT-Daten aus Dehnungsmessungen

5.5.4 HUGONIOT-Daten – Vergleich mit Daten aus der Literatur

Zur Einordnung der Ergebnisse der eigenen HUGONIOT-Versuche zeigt Bild 5.50 einen Vergleich mit ebenfalls experimentell ermittelten HUGONIOT-Daten unterschiedlicher Autoren, dargestellt in Form einer Druck-Dichte-Beziehung. HOLMQUIST, JOHNSON & COOK [50] leiten ihre Daten aus Beschussversuchen ab, GRADY [32] ermittelt seine HUGONIOT-Daten im Flyer-Plate-Impact Versuch. HERRMANN [42], OCKERT [69] und RUPPERT [80] gewinnen HUGONIOT-Daten, wie auch im Fall der hier vorgestellten Untersuchungen, aus Sprengversuchen. Gewählt wurde aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Daten eine, auf die jeweilige Ausgangsrohichte bezogene Darstellung der Abzissenwerte.

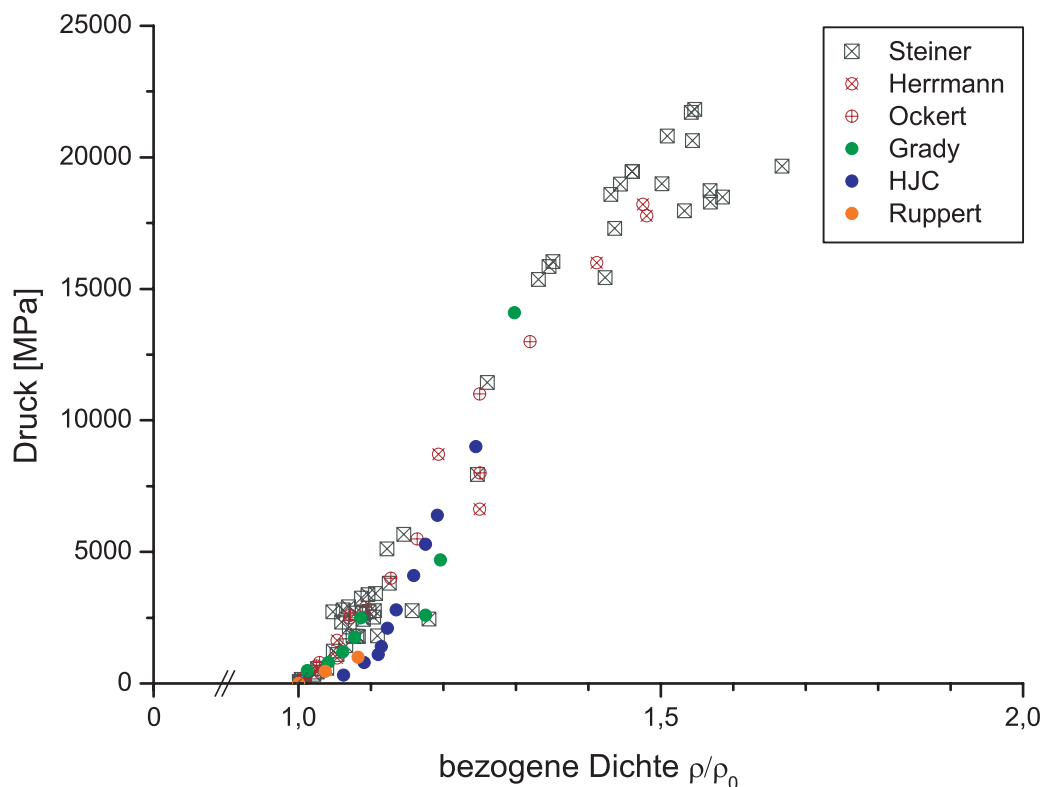


Bild 5.50: HUGONIOT-Daten unterschiedlicher Autoren

5.5.5 Wärmestrom und Energie

Der Wärmestrom definiert die innerhalb eines bestimmten Zeitabsschnitts übertragene Wärmemenge und entspricht physikalisch einer Leistung. Die Leistung wird im SI-Einheitensystem in Watt [W] angegeben. Die Grundeinheit der Energie im SI-Einheitensystem ist das 1 Joule [J]. Leistung [W] und Energie [J] sind über die Zeit [s] miteinander verknüpft:

$$1\text{J} = 1\text{W} \cdot \text{s}$$

Aus dem Produkt der mit den ALTS ermittelten Wärmeströme (Watt) und der zugehörigen Signaldauer (μ -Sekunden) lässt sich die Änderung der Energie bei der Kompression des Betons angeben. Die Änderung dieser Energie entspricht der bei diesem Vorgang kurzfristig entstehenden Wärme.

Bild 5.51 zeigt den Verlauf der Energie entlang der 0 Kelvin Isothermen von Beton nach Berechnungen von OCKERT [69]. Die aus den Wärmestrommessungen ermittelten Energiedifferenzen sind in Bild 5.52 zusammen mit einem Abschnitt der Kurve von Ockert über der Volumenänderung aufgetragen. Die Volumenänderung an Messstellen von ALTS entspricht der Abszisse der HUGONIOT-Daten, die man durch Auswertung von KMW in der gleichen Messebene erhält

(vgl. Bild 5.48). Die angegebenen Energiedifferenzen sind zur Vergleichbarkeit mit der berechneten Kurve auf ein Modellvolumen von $V_{\text{Modell}}=1,0 \times 1,0 \times 0,1 = 0,1 \text{ cm}^3$ bezogen. Dies entspricht dem Volumen das vom Sensorkopf innerhalb des Versuchskörpers eingenommen wird.

In Bezug zur Isotherme sind die Energiedifferenzen stark überhöht dargestellt (vgl. Bild 5.52). Es zeigt sich für den untersuchten Druckbereich bis 20000 MPa kein nennenswerter Energiezuwachs gegenüber den berechneten Werten von Ockert. Ein signifikanter Zuwachs ist erst im Bereichen mit Volumenänderungen von 50 % und mehr gegenüber dem Ausgangsvolumen vorhanden (vgl. OCKERT [69]). Aufgrund der genannten Schwierigkeiten beim Einsatz von ALTS und dem Einfluss der Heterogenität von Beton sollten die Ergebnisse durch Einsatz anderer Messmethoden in weiteren Untersuchungen überprüfen werden (vgl. Kapitel 6). Tabelle (5.6) fasst die Ergebnisse einzelner Berechnungsschritte zusammen.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Wärmestrommessungen

ALTS Typ A/B - Wärmestrom					
Messelement	Einbautiefe [mm]	Spannung [V]	Signaldauer [μs]	Wärmestrom [W]	Energie [J/kg]
82	22	12,1	7	121	0,3683
101	27	13	5	130	0,2826
71/72	32	11,6	7	116	0,3530
61/62	32	10	4	100	0,1739
92	40	12	4	120	0,2087
83	42	11	10	110	0,4783
63	49	11,6	8	116	0,4035
111	49	7,1	9	71	0,2778
73	49	11,1	10	111	0,4826
52	50	7,14	8	71,4	0,2483
103	68	2,5	9	25	0,0978
112	69	9	5	90	0,1957
113	89	10	13	100	0,5652
114	109	5,1	13	51	0,2883

Sensorempfindlichkeit: 100mV/W

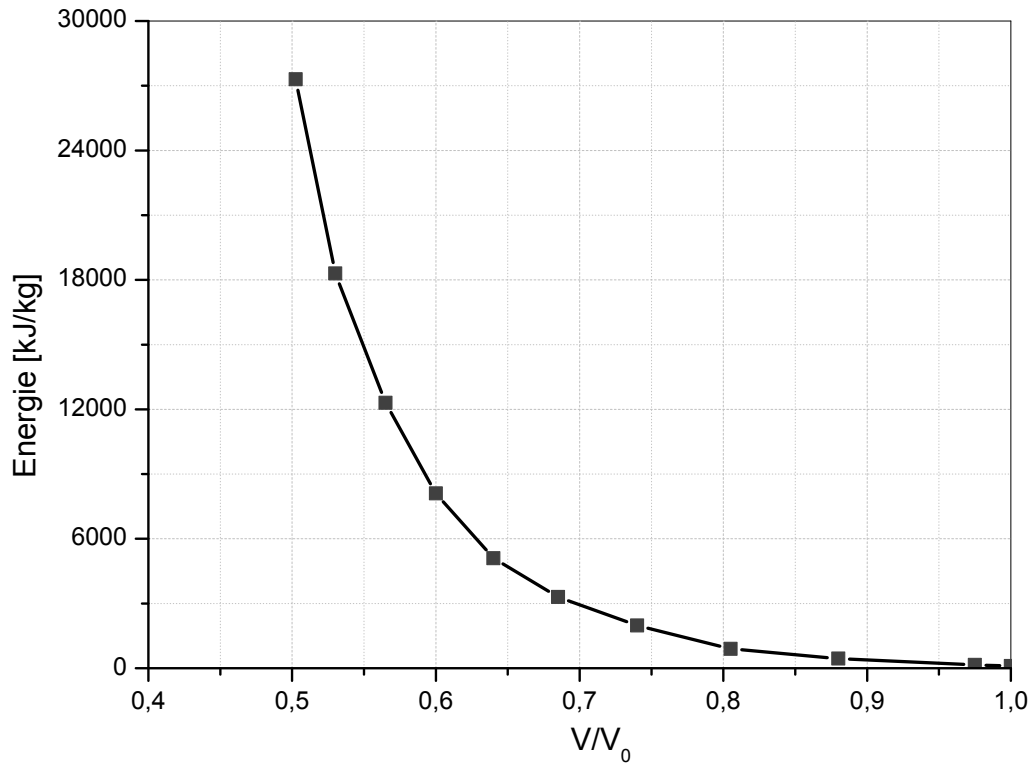


Bild 5.51: Energie entlang 0K-Isotherme von Beton nach Berechnungen von OCKERT [69]

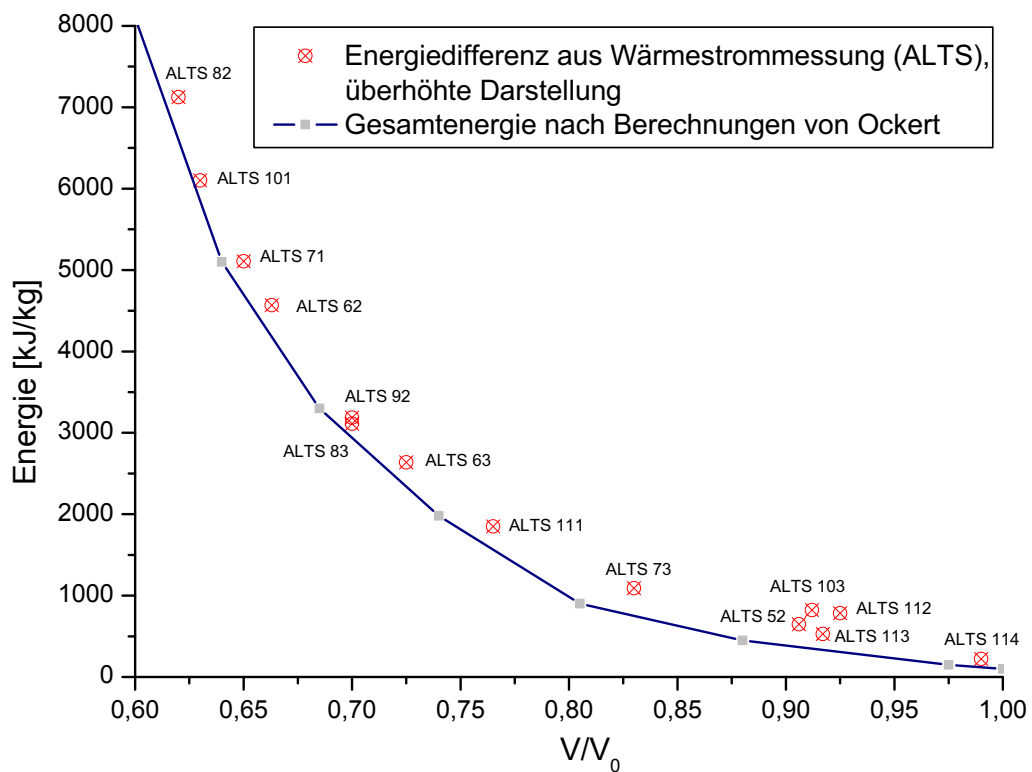


Bild 5.52: Energiedifferenz gegenüber der 0K-Isotherme von Beton, experimentell ermittelt

Tabelle 5.7: ALTS C, Berechnungen

ALTS Typ C - Wärmestrom					
Messelement	Einbautiefe [mm]	Spannung [V]	Signaldauer [μ s]	Wärmestrom [W]	Energie [J/kg]
C1	20	9,2	3	92	0,1200
C2	45	4,5	4	45	0,0783
C3	65	5,3	5	53	0,1152

Sensorempfindlichkeit: 100mV/W

Bild 5.53 zeigt exemplarisch die in einer ergänzenden Versuchsreihe ermittelten Signalverläufe von Atomlagenthermosäulen der Bauart C. Tabelle 5.7 enthält die berechneten Werte. Die Signalverläufe aller übrigen ALTS enthält Anhang C.

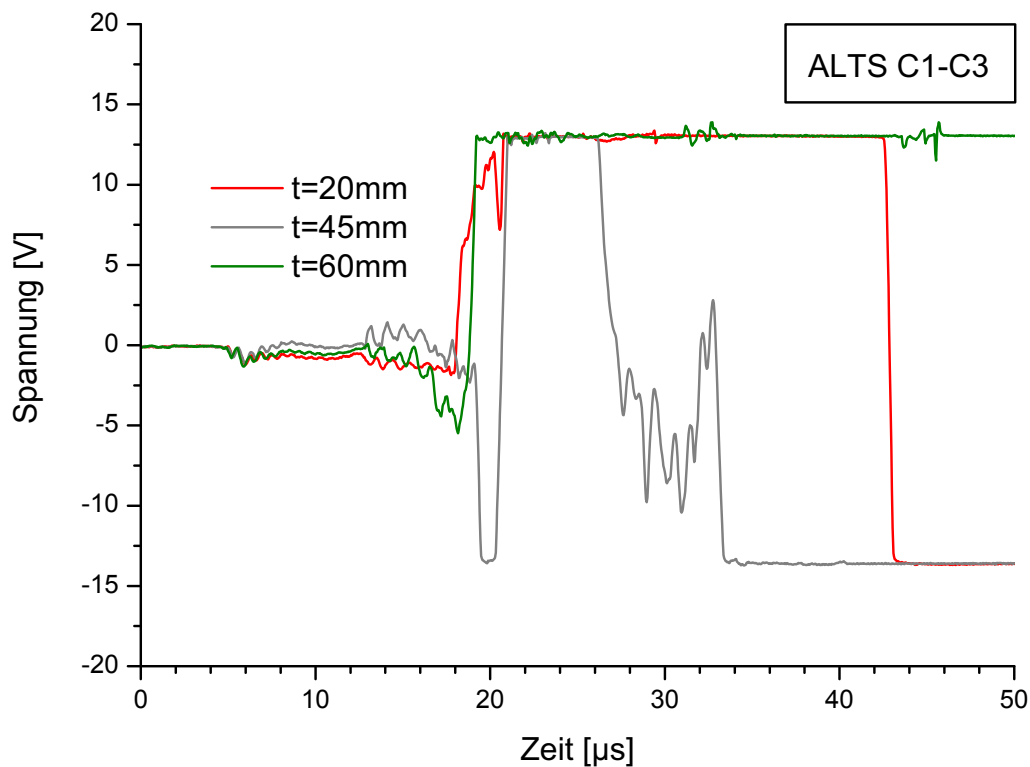


Bild 5.53: Signalverlauf der ALTS, Bauart C

5.5.6 Überlegungen zu Temperaturberechnungen

Temperatur ist einer direkten Messung nicht zugänglich. Die damit im Zusammenhang stehenden Schwierigkeiten einer experimentellen Ermittlung wurden in Abschnitt 5.4.2 gezeigt. Nachfolgend werden Möglichkeiten skizziert, mit denen unter der Annahme bestimmter Randbedingungen aus den Ergebnissen der Wärmestrommessungen Temperaturwerte abgeleitet werden können.

Möglichkeit A

Setzt man die Energie aus den Ergebnissen der Wärmestrommessungen gleich der Strahlungsenergie, die ein Betonkörper mit einer bestimmten Temperatur absorbiert („grauer Strahler“), lässt sich die Temperatur mit dem STEFAN-BOLTZMANNschen Gesetz berechnen:

$$E = \sigma \cdot T^4, \quad \text{mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [WmK}^{-4}\text{]} \quad (5.6)$$

Die Voraussetzung für diesen Vergleich ist die Annahme, dass die Änderung der Energie bei der Materialkompression vollständig in Wärme umgewandelt wird.

Möglichkeit B

Der thermische Anteil der inneren Energie wird mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$E_{\text{th}} = m \cdot c_V \cdot T \quad (5.7)$$

Der Energieanteil ist aus den Wärmestrommessungen bekannt. Vernachlässigt man die Volumenänderung des Betons während der Kompression ist die Wärmekapazität c_V konstant und die Temperatur kann aus Gleichung (5.7) berechnet werden.

Beide Möglichkeiten lassen wegen der genannten Einschränkungen nur eine grobe Abschätzung der tatsächlichen Verhältnisse zu. Weiterführende Überlegungen zur Temperaturmessung durch Anwendungen anderer Messmethoden enthält der Ausblick in Kapitel 6.

5.6 Schädigung der Versuchskörper

Bild 5.54 zeigt im linken Teil typische Formen von lokalem Betonversagen wie Spalling und Scabbing sowie starke Rissbildung. Der rechte Bildteil zeigt an einem Schnitt durch den Versuchskörper das Ergebnis eines Sprengversuchs bei Verwendung von 640 g Sprengstoff. Auch hier sind die typischen lokalen

Schädigungsmechanismen zu erkennen.

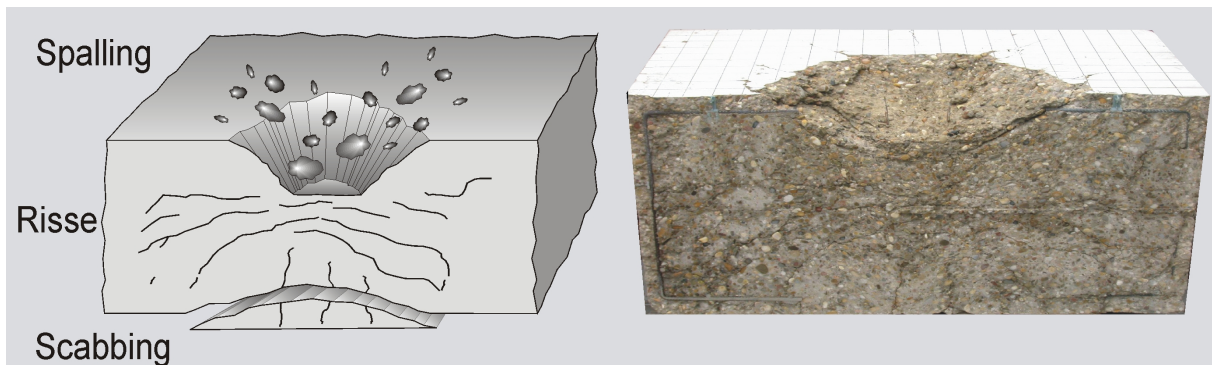


Bild 5.54: Typisches lokales Materialversagen bei Stoßbelastung

Im oberen Bereich der Versuchskörper führt die Belastung zu einem Materialauswurf (Spalling), wodurch sich ein Krater ausbildet. Der mittlere Durchmesser eines Kraters beträgt ca. 50 cm bei durchschnittlich 12 cm Tiefe. Der untere Bereich ist stark von Rissen durchzogen, deren Entstehung auf die als Zugwelle an der Unterseite des Versuchskörpers reflektierte Belastungswelle zurückzuführen ist. Je nach Dicke des Versuchskörpers und Größe der Sprengladung führt dies auch zu schollenartigen Abplatzungen (Scabbing) an der Unterseite des Versuchskörpers, was im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen nicht beobachtet werden konnte.

In der Schnittdarstellung von Bild 5.55 sind die unterschiedlichen Versagensbereiche genauer dargestellt. Entlang der Begrenzungsfläche des Kraters zeigen sich überwiegend Brüche der Zuschlagskörner. Innerhalb des sich anschließenden schmalen Bandes ist die Porenstruktur des Betons vollständig zerstört. Der Beton ist in diesem Bereich zu einem Granulat kompaktiert („gebackener Sand“) und weist eine hohe Dichte auf. Er besitzt eine schieferartige Struktur und lässt sich in einzelnen Lagen mühelos von Hand entnehmen. Bei der Entnahme zerbricht das Material leicht. Durchschnittlich beträgt die Dicke dieser Schicht 2-3 cm. Innerhalb eines weiteren, sichelförmigen Bereichs ist der Beton sehr stark verformt. Die Zuschläge lassen sich hier ebenfalls von Hand aus der Matrix entnehmen. Dieser Bereich erstreckt sich in Belastungsrichtung bis in die Mitte des Versuchskörpers. Zwischen den Rissen im unteren Bereich des Versuchskörpers und in den Randbereichen ist das Betongefüge augenscheinlich intakt. In Untersuchungen von LEPPÄNNEN [63] wurden an vergleichbaren Stellen der Versuchskörper Bohrkerne entnommen und geprüft. Sie zeigen weitgehend ein intaktes Betongefüge und entsprechende Festigkeit.

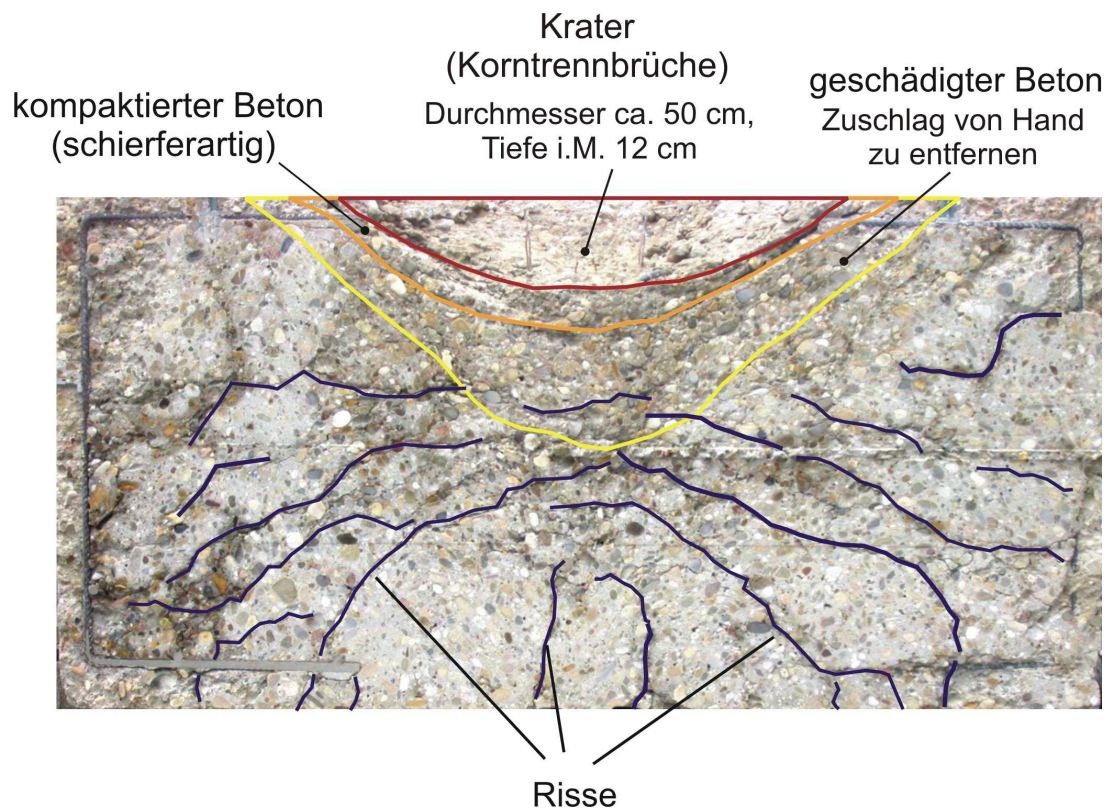


Bild 5.55: Schnittbild des Versuchskörpers nach Sprengung mit 640 g - Ladung



Bild 5.56: Vollständig zerstörter Versuchskörper nach Sprengung mit 3325 g - Ladung

Die Verwendung einer größeren Ladungsmenge von 3325 g lässt eine Beurteilung der Schädigung nur an Brückstücken des Versuchskörpers zu. Der überwiegende Teil der Bruchstücke weist Korntrennbrüche auf. Bruchstücke aus Randbereichen, in denen Bewehrung angeordnet wurde, lassen Verbundversagen erkennen. Bild 5.56 zeigt als Ergebnis einer Sprengladung von 3325 g einen vollständig zerstörten Versuchskörper. An der gekennzeichneten Stelle verbleibt infolge des Materialauswurfes an der Unterseite des Versuchskörpers ein kleiner Haufen festgepresster Sand (vgl. Bild 5.57). Die gekennzeichneten Momentaufnahmen des Versuchs zeigen die Entstehung dieser Zerstörung (Bild 5.57).

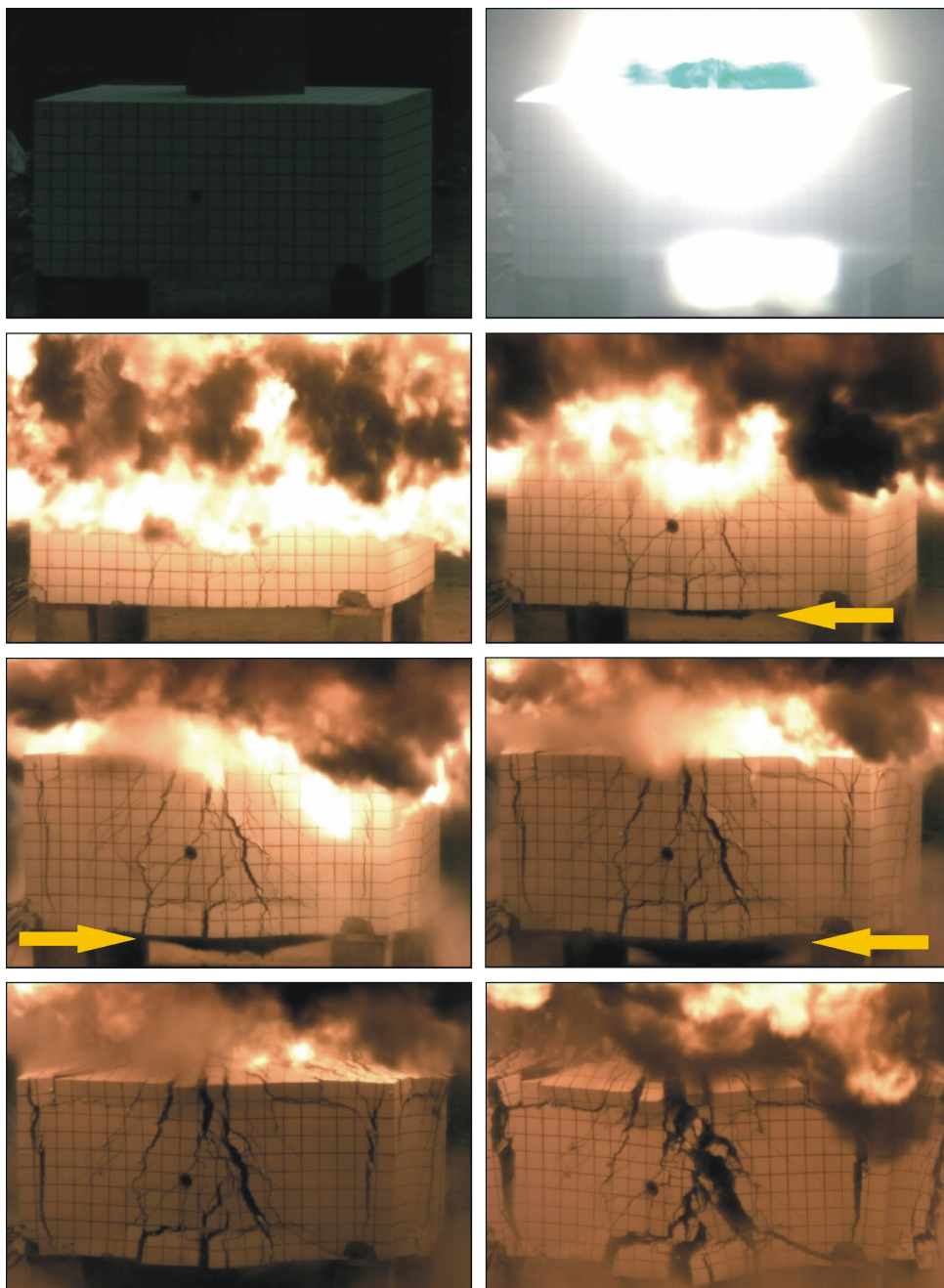


Bild 5.57: Momentaufnahmen der Zerstörung bei Sprengung mit 3325 g - Ladung; Aufnahmegeschwindigkeit 4000 Bilder/sec

5.7 Risslaufzeiten und Rissgeschwindigkeiten

Die ersten Versuchskörper (Nr. 1 und Nr. 2) zeigten nach Sprengung mit einer Ladung von 640 g ein nahezu einheitliches Rissbild in allen Seitenflächen. Auffallend ist die mittige Lage vertikaler Hauptrisse innerhalb der Seitenflächen. Bild 5.58 zeigt in einer abgewickelten Darstellung das entstandene Rissmuster.

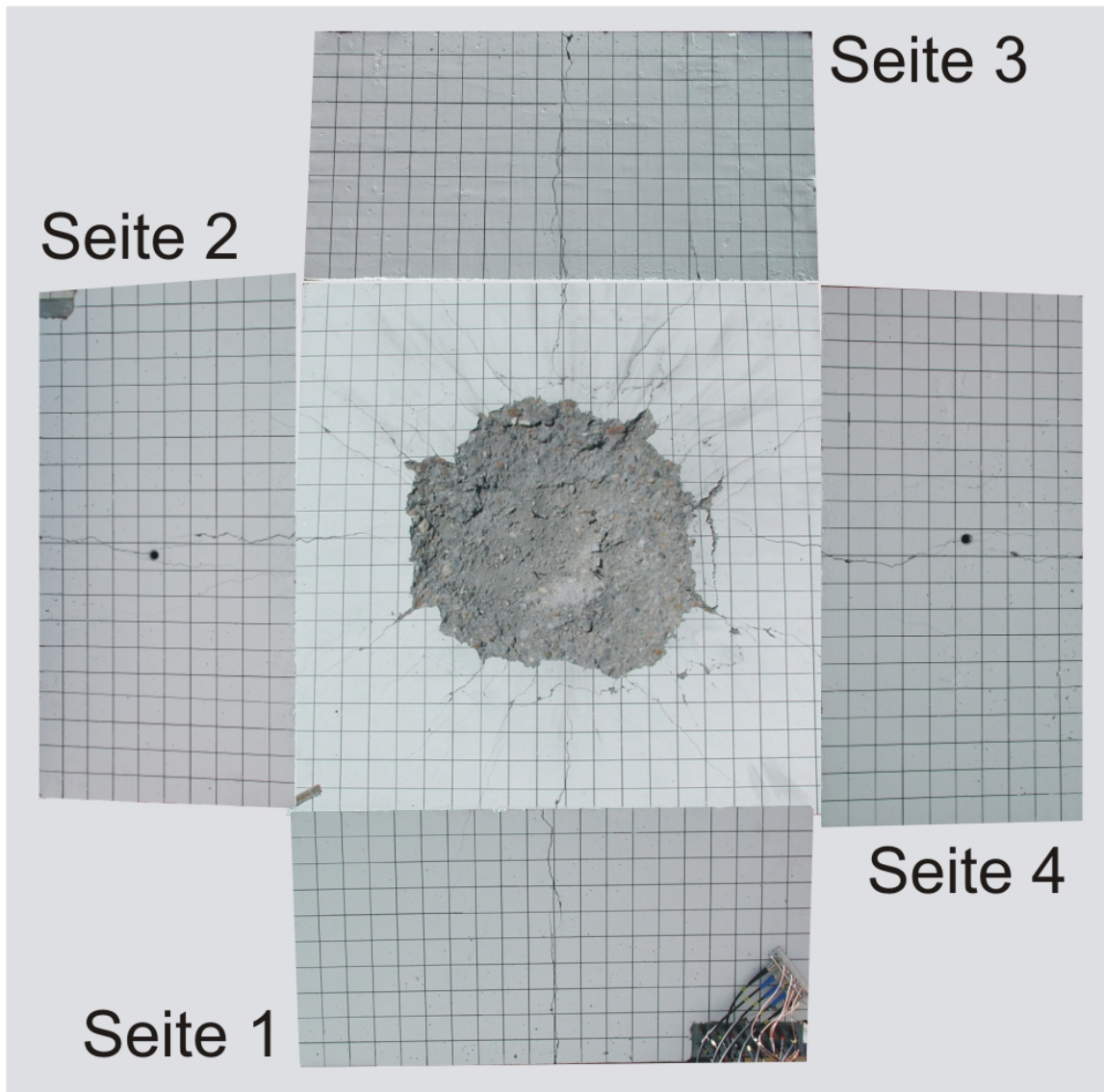


Bild 5.58: Rissmuster eines Versuchskörpers (640 g Sprengstoff)

Als Ursache für die Entstehung dieser Risse sind zwei Mechanismen vorstellbar. Der vorhandene Innendruck führt zu einer Konzentration von Kräften (Ringzug) in den Seitenmitten (=kürzester Weg) und damit zur Rissbildung, andererseits bewirkt die vertikale Komponente der Belastung eine Biegebeanspruchung mit Zugspannungen an der Unterseite des Versuchskörpers, was ebenfalls zur

Rissbildung führt. Aufnahmen des Versuchsablaufs mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigen, dass der Hauptriss an der Unterkante der Seitenfläche seinen Ursprung hat, was auf eine Biegebeanspruchung schließen lässt. Ausgehend von diesem Standpunkt wurden bei den Versuchskörpern Nr. 9 und Nr. 10 gleichzeitig zwei unterschiedliche Methoden zur Messung der Risslaufzeit in der Seitenfläche angewandt und daraus mittlere Rissgeschwindigkeiten abgeleitet. Einbetonierte Rissbleche stellten den gewünschten Risseverlauf in der jeweiligen Seitenfläche sicher.

5.7.1 Silberleitlackstreifen in einem Stromkreis

An den Versuchskörpern Nr. 9 und Nr. 10 wurden Streifen aus einem elektrisch leitenden Lack an der Oberfläche einer Seitenfläche appliziert und jeder Streifen in eine Spannungsteilerschaltung eingebaut. Eine geringe Zugfestigkeit und das spröde Bruchverhalten des Lacks gewährleisten, dass bei einer Rissbildung die Streifen durchtrennt werden. Innerhalb der Teilerschaltung bewirkt der Bruch des Leiterstreifens eine Spannungsänderung gegenüber der konstanten Versorgungsspannung. Die Änderung der Spannung wird am Transientenrekorder in Messzyklen mit einer Frequenz von 25 MHz erfasst. Bild 5.59 zeigt die gerissenen Lackstreifen an Versuchskörper Nr. 9 nach Versuchsende.

Funktionsweise der Schaltung

Für die Versuche wurde eine Parallelschaltung von sieben Spannungsteilern konzipiert (Bild 5.59, rechts).

Unter der Annahme, dass der Widerstand eines Lackstreifens (LL_i) gegenüber den Widerständen R_i und R_{ij} vernachlässigbar klein ist, beträgt bei einer konstanten Spannung von 10 V der Gesamtwiderstand in jeder Schleife $10\text{ k}\Omega$ (z.B. $R_i = R_2 = 8\text{ k}\Omega$; $R_{ij} = R_{21} = 2\text{ k}\Omega$). Die Kombinationen von Widerständen und deren Reihenfolge innerhalb einer Schleife unterscheiden sich voneinander. Dadurch ist vor Versuchsbeginn (ungerissene Lackstreifen) in jedem Spannungsteiler eine andere Ausgangsspannung vorhanden (im Beispiel 2 V). Werden die Leitlackstreifen durchtrennt, kommt es nicht mehr zu einem Spannungsabfall an den Widerständen R_i und R_{ij} gegenüber der Versorgungsspannung von 10 V. Die Folge ist ein Spannungssprung innerhalb der entsprechenden Schleife, jeweils um die Differenz zwischen Ausgangsspannung und Versorgungsspannung. Der Spannungssprung wird für jeden Spannungsteiler an einem Kanal der Registerereinheit (TRA) aufgezeichnet.

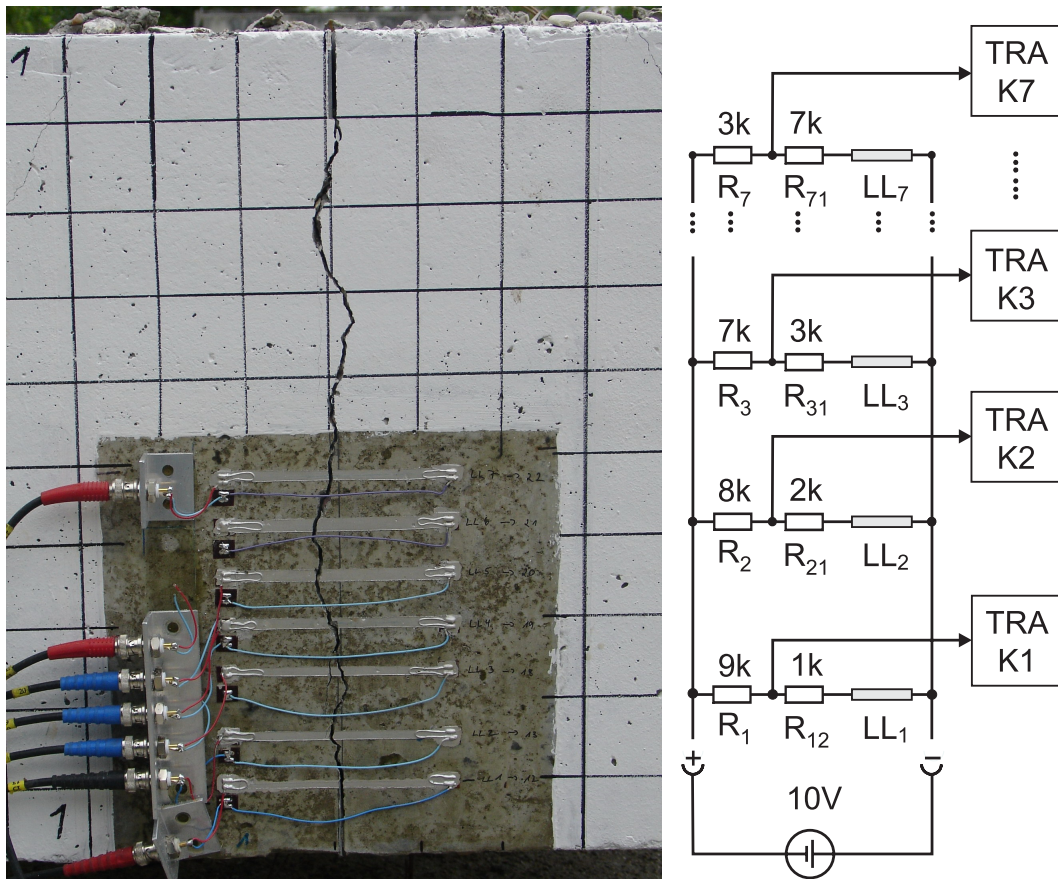


Bild 5.59: (links) Gerissene Leitlackstreifen nach dem Versuch; (rechts) Spannungsteilerschaltung

Exemplarische Berechnung einer Leiterschleife

Im ungerissenen Ausgangszustand kann der Widerstand LL_i jedes Lackstreifens als vernachlässigbar klein angenommen werden ($\approx 0\ \Omega$). Der Strom I_1 in der Leiterschleife Nr. 1 beträgt dann:

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{U}{R_1 + R_{12} + LL_1} = \frac{10\text{ V}}{(9 + 1 + 0) \cdot 10^{-3}\ \Omega} = 1 \cdot 10^{-3}\text{ A} = 1\text{ mA}$$

Damit erhält man den Spannungsabfall U_{R_i} am Widerstand R_1 bzw. R_2 :

$$U_{R1} = R_1 \cdot I_1 = 9 \cdot 10^3\ \Omega \cdot 1 \cdot 10^{-3}\text{ mA} = 9\text{ V}$$

$$U_{R2} = R_{12} \cdot I_1 = 1 \cdot 10^3\ \Omega \cdot 1 \cdot 10^{-3}\text{ mA} = 1\text{ V}$$

Vor Versuchsbeginn beträgt die Ausgangsspannung U_{TRA} am entsprechenden Kanal des Transientenrekorders 1 Volt. Für den Fall des gerissenen Streifens geht dessen Widerstand $LL_1 \rightarrow \infty$. Wegen

$$U_{R1} = R_1 \cdot I_1 = 9 \cdot 10^3\ \Omega \cdot 0\ \Omega = 0\text{ V}$$

kommt es beim Riss des Streifens nicht zu einem Spannungsabfall gegenüber der Versorgungsspannung. Bei Zerstörung des Lackstreifens erfolgt in diesem Fall ein Spannungssprung von 9 V, der am Transientenrekorder aufgezeichnet wird. Entsprechend der Wahl der einzelnen Widerstandspaare zeigt jeder Spannungsteiler einen charakteristischen Spannungssprung. Leitlackstreifen wurden in Kombination mit einem entsprechenden Schaltkreis bereits in früheren Untersuchungen zur Rissindikation von CURBACH [22] eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil der hier eingesetzten Schaltung liegt wegen der unterschiedlichen Ausgangsspannungen innerhalb der Leiterschleifen in der guten Funktionskontrolle der Leiterstreifen vor Versuchsbeginn. Andererseits ist aus dem Betrag eines Spannungssprungs sofort ersichtlich, welche Barriere durchtrennt wurde. Durch die Registrierung der Signalsprünge ist nachvollziehbar, in welcher Reihenfolge die Streifen durchtrennt werden. Dadurch ist eine Zuordnung zwischen Weg (Position eines Streifens) und Zeit (Spannungssprung) gegeben, woraus sich mittlere Rissgeschwindigkeiten berechnen lassen.

Ergebnisse der Untersuchungen mit Leitlackstreifen

Exemplarisch für die Auswertung der mit Leitlackstreifen versehenen Versuchskörper Nr. 9 und Nr. 10 ist der Messschrieb von Versuchskörper Nr. 9 in Bild 5.60 dargestellt. Unter Berücksichtigung des Zeitpunktes des Spannungssprungs und der Position der LL-Streifen, kann für einen die Seitenfläche durchlaufenden Riss eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $v_{\text{Riss}} = 650 \text{ m/s}$ angegeben werden.

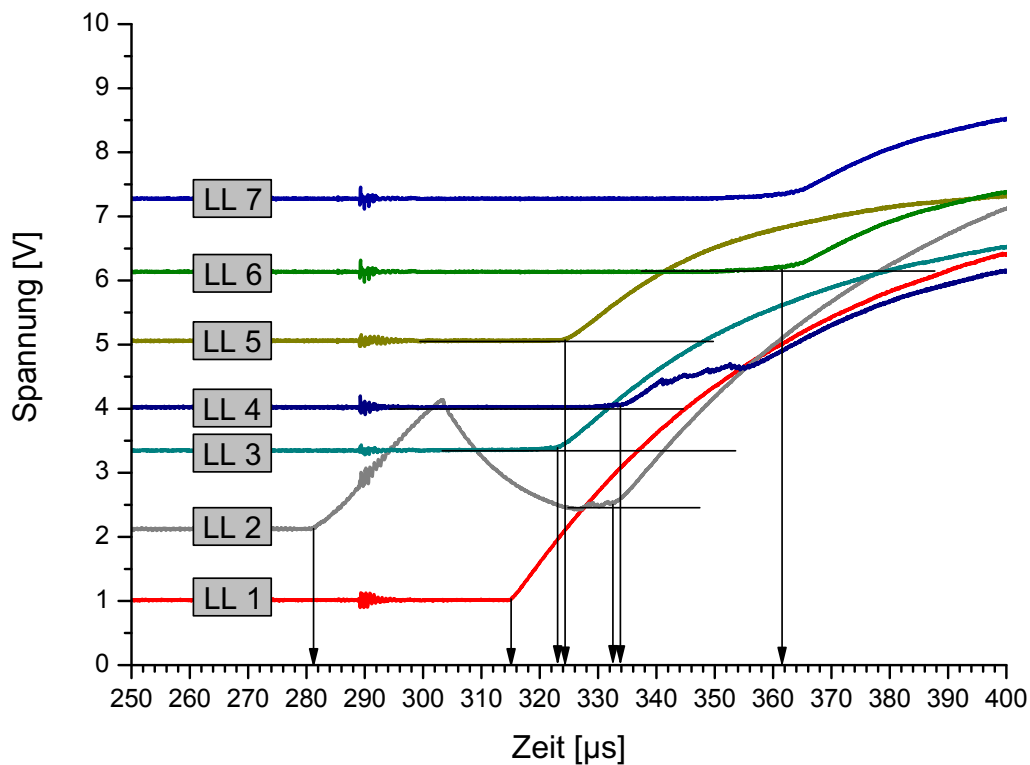


Bild 5.60: Leitlackstreifen, Versuch Nr. 9

5.7.2 Hochgeschwindigkeitskamera

Gleichzeitig zu den Untersuchungen mit den Leitlackstreifen wurde die Rissentwicklung an der gegenüberliegenden Seitenfläche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Weinberger-SpeedCam Visario) aufgezeichnet. Die Kamera wird über das Zündsignal getriggert und ermöglicht bei der gewählten Bildfrequenz Einzelbilder in einem zeitlichen Abstand von $100\ \mu\text{s}$. Das Ergebnis der Einzeldatenauswertung ist ein Weg-Zeit-Zusammenhang, mit dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Rissen innerhalb der Seitenfläche bestimmt wird. Problematisch bei diesen Untersuchungen ist die Helligkeit des Lichtblitzes bei der Explosion des Sprengstoffes. Dadurch übersteuert der Belichtungssensor der Kamera und der genaue Zeitpunkt der Rissentstehung ist nicht zu ermitteln. Eine Verkleinerung der Blendenöffnung am Objektiv der Kamera verbessert die Situation, die zeitliche Überlagerung von Rissentstehung und Lichtblitz ist auch durch diese Maßnahme nicht vollständig zu unterdrücken. (vgl. Bild 5.57). Dennoch erfasst die Kamera die wesentlichen Abläufe, um aus den Bildern Anhaltswerte für die Rissgeschwindigkeit abzuleiten. Darüber hinaus sind die Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera eine überaus gute Kontrollmöglichkeit der Signalverläufe, die mit Hilfe der Leitlackstreifen und der Spannungsteilerschaltung ermittelt wurden.

Kameraeinstellungen

Zusätzlich sind bei den Kameraeinstellungen Abhängigkeiten verschiedener Größen zu beachten. Eine Aufzeichnung von Einzelbildern mit dem oben genannten zeitlichen Abstand führt zu einer Belichtung von 512 x 192 Bildpunkten (Pixel) des Belichtungschips der Kamera. In Abhängigkeit der gewählten Brennweite am Kameraobjektiv und dem Abstand zum Versuchskörper ergeben sich aus der Pixelanzahl und der Größe des Belichtungssensors Breite und Höhe des Bildausschnitts. Bild 5.61 zeigt für den gewählten Aufnahmeabstand die sich ergebenden Möglichkeiten für Bildausschnitt und Auflösung.

Bildausschnitt und mögliche Auflösung

Eingabe	Frequenz [B/sec]	Pixel	Bildweite [m]	Bildhöhe [m]	Auflösung [mm/Pixel]	
					Querformat	Hochformat
Brennweite						
Aufnahmeabstand						
	1000	1536 x 1024	0,70	0,47	0,46	0,46
	2000	1024 x 768	0,47	0,35	0,46	0,46
	4000	768 x 512	0,35	0,23	0,46	0,46
	10000	512 x 192	0,23	0,09	0,46	0,46

Bild 5.61: Kameraeinstellungen

Bei allen Einstellungskombinationen ist zu beachten, dass eine dem Problem angepasste Auflösung (mm/Pixel) erreicht wird. Beispielsweise bedeuten 0,5 mm/Pixel bei einer zu erwartenden Rissbreite von 1 mm, dass der Riss durch zwei Bildpunkte dargestellt wird und ab 0,5 mm Rissbreite sichtbar ist. Lässt sich hingegen nur eine geringere Auflösung von z.B 0,8 mm/pixel umsetzen, so wird ein Riss erst sichtbar, wenn seine Breite 0,8 mm überschreitet. Diese Abhängigkeiten müssen bei der Wahl der Einstellungen stets berücksichtigt werden, um die gestellte Aufgabe befriedigend zu lösen.

Ergebnis

Die Auswertung der Einzelbilder erfolgt mit einer Grafik-Software. Dadurch wird die Position der Risspitze lokalisiert. Über das bekannte Zeitintervall zwischen zwei Einzelbildern und die ermittelte Wegdifferenz kann ein Anhaltswert für die Rissgeschwindigkeit ermittelt werden. Das Grundprinzip dieser Vorgehensweise ist in Bild 5.62 dargestellt. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus den Untersuchungen eine Geschwindigkeit zwischen 280 und 320 m/s.

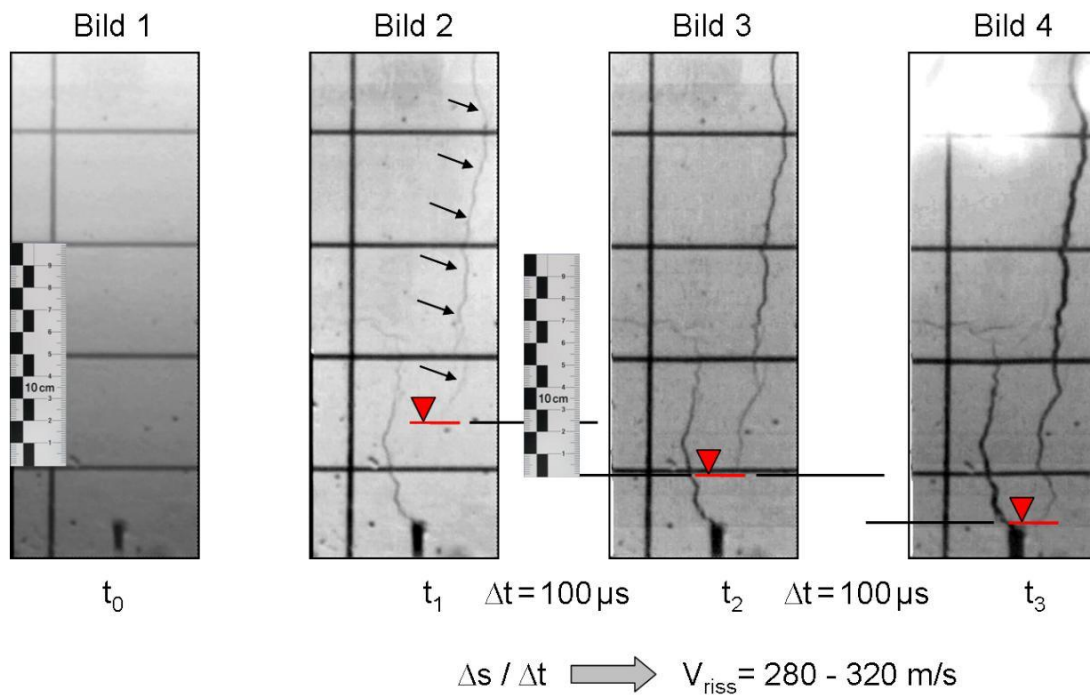


Bild 5.62: Prinzipielles Vorgehen bei der Auswertung der Einzelbilder

5.7.3 Diskussion der Ergebnisse beider Verfahren

Die in den vorangegangenen Abschnitten 5.7.1 und 5.7.2 ermittelten Rissgeschwindigkeiten wurden mit verschiedenen Verfahren gewonnen. Die unterschiedlichen Ergebnisse machen deutlich, wie sehr die angegebenen Rissgeschwindigkeiten von der jeweiligen Versuchstechnik abhängig sind.

Bei Anwendung der Hochgeschwindigkeitskameratechnik kann, bedingt durch die Auflösung der Kamera, die Position der Rissspitze erst dargestellt und somit erfasst werden, wenn der Riss eine Mindestbreite aufweist. Dies hat zur Folge, dass vom Zeitpunkt der tatsächlichen Rissentstehung bis zum Zeitpunkt an dem der Riss für die Kamera „sichtbar“ wird keine Information vorhanden ist. Die Grenze einer mit diesem Verfahren ermittelten Rissgeschwindigkeit ist durch die optische Auflösung (Pixel/mm) gegeben.

Im Gegensatz hierzu kann bei Verwendung von Leitlackstreifen in Kombination mit einer Spannungsteilerschaltung ein sich ausbreitender Riss unmittelbar nach seiner Entstehung erfasst werden. Entscheidend ist hier die Sprödheit des verwendeten Leitlackmaterials und somit die Ansprechzeit des Messelementes. Ein sich ausbreitender Riss kann mit dieser Methode messtechnisch erfasst werden, ohne dass eine Mindestrissbreite hierfür Voraussetzung ist.

Für die Ableitung von Rissgeschwindigkeiten sollte die vorgestellte Methode der Leitlackstreifen Anwendung finden, die Hochgeschwindigkeitskameratechnik kann und sollte ergänzend zur Kontrolle der Ergebnisse eingesetzt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht das Verhalten von Versuchskörpern aus Beton, die durch Sprengstoff in Form einer Kontaktladung belastet werden. Um das Materialverhalten unter dieser Belastung zu beschreiben, werden die physikalischen Vorgänge innerhalb der Versuchskörper mit Hilfe von Messtechnik direkt erfasst. Die besondere Herausforderung liegt im extrem kleinen Zeitfenster, in dem diese Veränderungen stattfinden. Hierfür wird eine räumlich und zeitlich hoch auflösende Messtechnik eingesetzt, die es erlaubt, Veränderungen im Bereich weniger Mikrosekunden aufzuzeichnen. Die eingesetzten Messelemente werden zum Schutz in Kapselungen aus Aluminium (Manganinelemente, Dehnmessstreifen), Epoxidharz (Kohle-Masse-Widerstände) oder PVC-Gehäuse (Atomlagenthermosäulen) eingebaut. Der Einfluss der Kapselungsmaterialien auf den Signalverlauf wird untersucht. Dabei zeigen sich innerhalb einer Messebene unterschiedliche Wellenankunftszeiten bei Manganinelementen und Kohle-Masse-Widerständen. Ein veränderter Aufbau der Aluminium-Kapselungen führt zu vergleichbaren Signalankunftszeiten beider Elemente.

Durch die Belastung werden Stoßwellen in den Beton eingetragen. Diese führen lokal zu extremen Drücken bis ca. 20000 MPa, großen Materialdehnungen und kurzzeitig zu einer Erhöhung der Temperatur. Aus den elektrischen Spannungssignalen der Messelemente werden mechanische Größen zur Beschreibung des Materialverhaltens abgeleitet. Insbesondere sind dies:

- Volumetrische Druckwerte, mit denen HUGONIOT-Daten gewonnen werden.
- Spannungsanteile in Belastungsrichtung und senkrecht dazu. Daraus werden Vergleichsspannungen berechnet, die eine Vorstellung von der Form der Versagenfläche bei hohen Drücken ermöglichen.
- Materialstauchungen, aus denen ebenfalls HUGONIOT-Daten abgeleitet werden.

Die Änderungen der thermischen Verhältnisse werden mit Wärmestromsensoren erfasst und nehmen eine gesonderte Stellung im Rahmen dieser Arbeit ein. Hauptbestandteil des Messsystems ist ein Hochtemperatursupraleiter auf Basis einer Atomlagenthermosäule. Der Sensor wurde im Rahmen dieser Untersuchungen in mehreren Schritten weiterentwickelt. Aus den Wärmestrommessungen werden Energiewerte entlang der HUGONIOT-Kurve von Beton gewonnen.

Unter vereinfachten Annahmen ist es möglich, daraus Anhaltswerte über die Temperatur anzugeben. Die Ergebnisse können bei numerischen Untersuchungen in der Formulierung von Stoffgesetzen berücksichtigt werden. Inwieweit und in welchem Maße sich tatsächlich Änderungen des Materialverhaltens bei stoffgesetzlichen Formulierungen mit Berücksichtigung der thermischen Einflüsse ergeben, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit sind Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Stoßwellen innerhalb der Versuchskörper. Mit Hilfe der Signalaufzeichnungen der Kohle-Masse-Widerstände werden Weg-Zeit-Beziehungen ermittelt und daraus der Geschwindigkeitsverlauf der Stoßwelle bestimmt.

Beim Übergang in den Versuchskörper ändert die Stoßwelle ihre Form und breitet sich räumlich aus. Dabei verkleinert sich mit zunehmender Wellenlaufzeit der Bereich mit horizontaler Tangentialebene an der Wellenfront. Durch geeignete Positionierung der Messelemente wurden diese Gesetzmäßigkeiten genauer untersucht. In den übrigen Versuchskörpern wird die Positionierung der Messelemente dem zugrundegelegten Wellenverlauf angepasst. Dadurch wird eine verbesserte Auflösung der Signale erreicht und die Möglichkeit einer genaueren Datenanalyse geschaffen.

Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ergänzen die Messungen im Innern der Versuchskörper. An Seitenflächen der Versuchskörper wird die Rissentwicklung aufgezeichnet und in Einzelbildern ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Risses innerhalb der Seitenfläche. Bei diesen Untersuchungen stört die Helligkeit des Lichtblitzes bei der Explosion des Sprengstoffs. Sie führt zu einem Übersteuern des Belichtungssensors. Deshalb werden zusätzlich zu dieser Untersuchung Leitlackstreifen auf eine Seitenfläche des Versuchskörpers appliziert und in eine Spannungsteilerschaltung eingebaut. Aus Spannungsänderungen beim Durchtrennen der Streifen (Riss) werden Rissgeschwindigkeiten abgeleitet.

Alternativen zur ALTS – Optische Messverfahren

Die Wärmestrommessungen weisen darauf hin, dass die Änderung der inneren Energie bei der Kompression von Beton im untersuchten Druckbereich gering ist. Wegen der genannten Schwierigkeiten beim Einsatz des verwendeten Messsystems sollten zur Gewinnung von Aussagen über kurzfristige Temperaturerhöhungen innerhalb der Versuchskörper weitere Untersuchungen mit anderen Messmethoden durchgeführt werden. Hierzu wurden im Vorfeld dieser Arbeit mit anderen Wissenschaftlern und Forschungseinrichtungen ([10], [44], [45], [94]) Überlegungen zum Einsatz optischer Verfahren angestellt. Verfügbare Messsysteme (meist Pyrometer) weisen Einsatzbereiche mit deutlich geringeren Signalanstiegszeiten auf. Für den Einsatz bei hohen Drücken und im Bereich schneller Signalanstiege müssen neue Systeme entwickelt und getestet wer-

den. Innerhalb der vorliegenden Forschungsarbeit im Bereich des Massivbau mit dem Fokus auf Betoneigenschaften kann die Entwicklung eines geeigneten Messsystems nicht geleistet werden. Dennoch sollen Anregungen zur Temperaturmessung auf Basis optischer Verfahren gegeben werden, deren Umsetzung ggf. im Rahmen interfakultativer Forschungsprojekte erfolgen kann.

Die meisten optischen Verfahren zur Messung von Temperatur beruhen auf der physikalischen Eigenschaft eines Körpers, oberhalb des absoluten Nullpunktes elektromagnetische Strahlung auszusenden. Mit einem faseroptischen Pyrometer wird die spektrale Verteilung der vom Körper emittierten Strahlung erfasst. Die Strahlung kann mit einer optischen Faser (LWL) im Beton aufgefangen werden. Fasern sind für bestimmte Wellenlängen undurchlässig. Die Verwendung optischer Köpfe vergrößert das Spektrum der Wellenlängen. Eine Photodiode am anderen Ende der Faser detektiert die Wellenlänge in der Faser. Das Auslesen von Signalen im Bereich von wenigen μ -Sekunden stellt für eine Photodiode kein Problem dar. Eine Auswertung erfolgt über das elektrische Spannungssignal an der Photodiode. Durch Rückrechnung kann die Temperatur ermittelt werden (Gesetze von PLANK, STEFAN-BOLTZMAN). Solche Systeme eignen sich für den Eigenbau. Bei der Auswertung müssen die veränderten Eigenschaften des Betons (grauer Strahler) gegenüber den Strahlungseigenschaften des schwarzen Bezugskörpers berücksichtigt werden.

Zur Versuchsmethode

In zunehmendem Maße werden bei der Planung öffentlicher Gebäude und industrieller Anlagen außergewöhnliche Lastfälle berücksichtigt. Auch werden bestehende Gebäude unter diesem Gesichtspunkt begutachtet. Unplanmäßig treten außergewöhnliche Lastfälle z.B bei Störfällen in Industrieanlagen oder bei terroristischen Anschlägen mit Sprengstoff auf. Um das Versagen der Konstruktion zu vermeiden, müssen die tragenden Bauteile konstruktiv entsprechend ausgebildet sein. Gefährdete Bereiche werden vollständig durch spezielle Materialien ersetzt oder durch geeignete Werkstoffe geschützt (Zerschellschichten). Zu diesem Zweck werden neue Materialien entwickelt, die einen Großteil der durch die Belastung in das Bauteil eingetragenen Energie in Wärme umwandeln. Dadurch werden die auftretende Spitzendrücke reduziert und das Ausmaß der Schädigung an den tragenden Elementen wird begrenzt.

Versieht man die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Versuchskörper an der Oberseite mit einer Zerschellschicht aus einem energiedissipierenden Material, so kann mit der vorgestellten Versuchsmethode die Auswirkungen der Schutzmaßnahme direkt erfasst werden. Anhand der aufgezeichneten Daten und aus dem Vergleich mit den Ergebnissen dieser Arbeit (Bezugsgrößen) kann die Wirksamkeit der Zerschellschicht beurteilt werden.

Für die Sprengung massiver Bauteile beim Sprengabbruch werden zur Reduzie-

rung der Ladungsarbeiten Kontaktladungen in Form verdämmter Sprengschnü-
 re eingesetzt. Durch die Verdämmung verändert sich der Lasteintrag durch die
 Sprengladung entscheidend. Der Einfluss sollte in künftigen Forschungsarbei-
 ten untersucht werden. Anregungen für weitere experimentelle Untersuchungen
 auf diesem Forschungsgebiet sind in Bild 6.1 zusammengefasst.

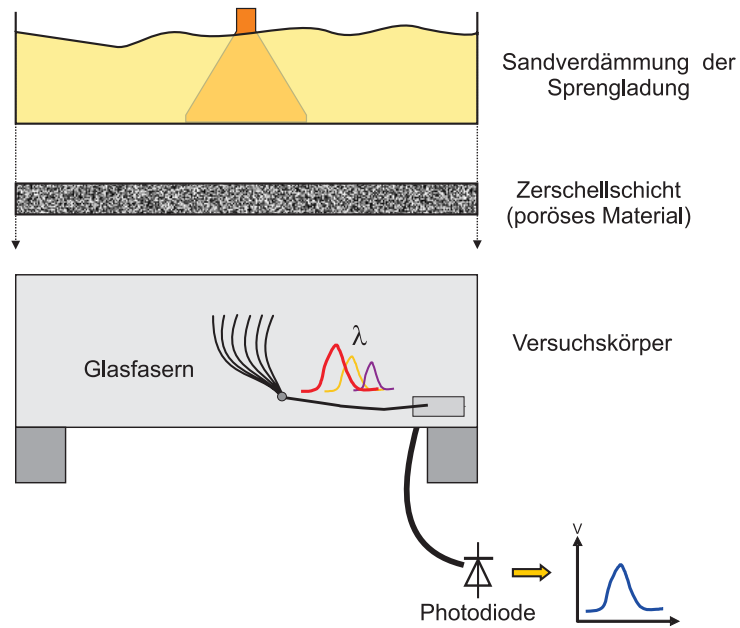


Bild 6.1: Ausblick

Literaturverzeichnis

- [1] ANDERSON, C.E.: *An overview of the theory of hydrocodes*. International Journal of Impact Engineering, 5:33–59, 1987.
- [2] ANDERSON, J.D.: *Explicit Finite Difference Methods: Some Selected Applications to Inviscid and Viscous Flows*. Springer, Berlin, 1996.
- [3] ATKINS, P.W.: *Wärme und Bewegung–Die Welt zwischen Ordnung und Chaos*, Band 8. Spektrum-Bibliothek, 1986.
- [4] AUSTING, J.L.; TULLIS, A.J.; JOHNSON, C.D. In: *5th International Symposium on Detonation*, Seiten 47–57, Pasadena, CA, August 1970.
- [5] AUTODYN: *Theory Manual*. Century Dynamics Ltd. Horsham, England, 1997.
- [6] BACHMANN, H.: *Die Massenträgheit in einem Pseudo-Stoffgesetz für Beton bei schneller Zugbeanspruchung*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993.
- [7] BAEHR, H.D.: *Thermodynamik*. Springer, 7. Auflage, 1989.
- [8] BARTLMÄ, F.: *Gasdynamik der Verbrennung*. Springer Verlag, 1975.
- [9] BETZ, J.: *Herstellung, Eigenschaften und Anwendungen von dünnen Schichten aus YBa₂Cu₃O_{7-d} und TlBaCaCuO*. Dissertation, Universität Regensburg - Fakultät für Physik, 1993.
- [10] BETZ, J.: *Persönliche Mitteilung*. ForTech - HTS, 93170 Bernhardswald, 2004-2007.
- [11] BIRKHEIMER, D.L.; LINDEMANN, R.: *Dynamic Tensile Strength of Concrete Materials*. ACI Journal, Seiten 47–49, Januar 1971.
- [12] BISCHOFF, P.H.; PERRY, S.H.: *Compressive behaviour of concrete at high strain rates*. Materials and Structures, 24:425–450, 1991.
- [13] CEB – BULLETIN D'INFORMATION NO. 156: *Concrete under multiaxial States of Stress – Constitutive Equation for Practical Design*. Prag, Oktober 1985.
- [14] CEB – BULLETIN D'INFORMATION NO. 213/214: *CEB-FIP Model Code 1990*. Lausanne, May 1993.
- [15] CEB – SYNTHESIS REPORT, BULLETIN D'INFORMATION NO. 187: *Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading*. Lausanne 1988.
- [16] CHAPMAN, E. L.: *On the Rate of Explosions in Gases*. Philosophical Magazine, 47:90–104, 1899.

- [17] CHEN W. F.: *Plasticity in Reinforced Concrete*. McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [18] CHEN W. F.; HAN D.J.: *Plasticity for Structural Engineers*. Springer, 1988.
- [19] CHEN W. F.; SALEEB A.F.: *Constitutive Equations for Engineering Materials*. Elsevier, 1994.
- [20] CHÉRET, R.: *Detonation of Condensed Explosives*. Springer-Verlag, 1992.
- [21] COOPER, P.W.: *Explosives Engineering*. Wiley-VCH, 2000.
- [22] CURBACH, M.: *Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1987.
- [23] DOBRATZ, B.M.; CRAWFORD, P.C.: *LLNL Explosives Handbook: Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants*. Technischer Bericht UCRL-5299; Rev.2, University of California; Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [24] DÖRING, W.: *On Detonation Process in Gases*. Annalen der Physik, 43:421–436, 1943.
- [25] DUGDALE, J.S.; MACDONALD, D.: *The Thermal Expansion of Solids*. Physics Review, 89:832–834, 1953.
- [26] EIBL, J.; IVÁNYI, G.: *Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton*. DAfStb - Heft 260, Ernst & Sohn 1976.
- [27] EIBL, S.: *Schockwellenbeanspruchung von Stahlbetonwänden durch Kontaktdetonationen*. Dissertation, Technische Universität München, 1995.
- [28] FORTECH HTS GMBH: *Schnelles Wärmestrom und Temperaturmesssystem – Dokumentation*. Bernhardswald, 1999.
- [29] GÖDDE, P.: *Rechnerische Untersuchung zur Betonfestigkeit unter hoher Belastungsgeschwindigkeit*. Dissertation, Universität Dortmund, 1986.
- [30] GINSBERG, M.L.; ASSAY, B.W.: *Commercial carbon composition resistors as dynamic stress gauges in difficult environments*. Review of Scientific Instruments, 62:2218–2227, September 1991.
- [31] GRADY, D.E.: *Impact compression properties of concrete*. In: *Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, Seiten 172–175, Panama City Beach, Florida, 1993.
- [32] GRADY, D.E.: *Shock Equation of States Properties of Concrete*. In: *IV. Computational Mechanics*, Seiten 405–414, 1996.
- [33] GRAN, J.K.; GROETHE, M.A.: *Strain Compensation in Piezoresistance Stress Measurement*. In: *17th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS17)*, 10-14 June Las Vegas, NV, 2002.

- [34] GRAN, J.K.; ROMANDER, C.M.; COLTON, J.D.: *Measurement of Concrete Response at High Stresses and High Strain Rates*. Technischer Bericht, SRI International, Menlo Park, CA 94025, 1984.
- [35] GRAN, J.K.; SEAMAN, L.: *Analysis of Piezoresistance Gauges for Stress in Divergent Flow Fields*. Journal of Engineering Mechanics, Seiten 36–44, June 1997.
- [36] GREGSON, V.R.: *A Shock Wave Study of Fondu-Fyre WA-1 and Concrete*. Technischer Bericht MSL-70-30, General Motors Materials and Structures Laboratory, 1971.
- [37] GREULICH, S.: *Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2004.
- [38] GRÜNEISEN, E.: *Zustand des festen Körpers*, Handbuch der Physik 1, Seiten 1–59. Thermische Eigenschaften der Stoffe. Springer-Verlag, 1926.
- [39] GRÜNEISEN, E.: *Zustand des festen Körpers*. In: GEIGER, H.; SCHEEL, K. (Herausgeber): *Handbuch der Physik*, Thermische Eigenschaften der Stoffe, Handbuch der Physik 1, Seiten 1–59. Springer-Verlag, 1926.
- [40] GUO, Z.; ZHOU, Y.; NECHVATAL, D.: *Auswertung von Versuchen zur mehrachsigen Betonfestigkeit, die an der Technischen Universität München durchgeführt wurden*. DAfStb – Heft 447, Beuth 1995.
- [41] HANSEN, T.C.: *Physical Structure of Hardened Cement Paste – A Classical Approach*. Materials and Structures, 19:423–436, 1986.
- [42] HERRMANN, N.: *Experimentelle Erfassung des Betonverhaltens unter Schockwellen*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003.
- [43] HERRMANN, W.: *Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials*. Journal of Applied Physics, 40(6):2490–2499, 1969.
- [44] HETZLER, U.: *Persönliche Mitteilung*. Isabellenhütte Dillenburg–www.isabellenhuette.de, 2004.
- [45] HÖFLER, H.: *Persönliche Mitteilung*. Fraunhofer Institut Physikalische Messtechnik – IPM, Freiburg, 2003.
- [46] HIERMAIER, S.: *Numerik und Werkstoffdynamik der Crash- und Impaktvorgänge*. Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, 2003. ISBN 3-8167-6342-1.
- [47] HIERMAIER, S.: *Hydrocodes – Simulation transienter Vorgänge mit expliziter Zeitintegration*. In: *Bau-Protect – Sicherheit der baulichen Infrastruktur vor außergewöhnlichen Einwirkungen*, Seiten 69–80. Universität der Bundeswehr München, Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau, 2006.
- [48] HOLLENBERG, K.: *Druckmessungen an Stosswellen in Flüssigkeiten und Festkörpern*. Habilitationsschrift, Universität Düsseldorf, Juni 1983.

- [49] HOLLENBERG, K.: *Zeitaufgelöste Stoßwellendruckmessungen an Stahlplatten mit Kohle-Masse-Widerständen*. In: *MEBAL*, 1985.
- [50] HOLMQUIST, T.J.; JOHNSON, G.R.; COOK, W.H.: *A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures*. In: *Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics, Quebec, Canada*, 1993.
- [51] HOY, D.E.P.: *Measurement of Stress Waves in Soil-Concrete Models using Manganin Gages*. *Experimental Techniques*, Seiten 34–36, 1989.
- [52] HSIEH, S.S.; TING, E.C.; CHEN, W.F.: *A Plasticity Fracture Model for Concrete*. *International Journal of Solids and Structures*, 18:181–197, 1982.
- [53] HUGONIOT, H.: *On the Propagation of Motion in Bodies and in Perfect Bodies in Particular*. *Journal de l'École Polytechnique*, 57:3–97, 1887.
- [54] JOUGUET, E.: *On the Propagation of Chemical Reactions in Gases*. *Journal de Mathématique Pures et Appliqué*, 85:347–425, 1906.
- [55] KLEIN, E.: *Ein Beitrag zur Beschreibung des Betonverhaltens unter extremer hydrostatischer Beanspruchung*. Technischer Bericht, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 1997, unveröffentlicht.
- [56] KNAUSS, H.; GAISBAUER, U.; WAGNER, S.; BUNTIN, D.; MASLOV, A.; SMORODSKY, B.; BETZ, J.: *Calibration Experiments of a new active fast Response Heat Flux Sensor to measure total Temperature Fluctuations, Part I. Introduction to the problem*. In: *ICMAR – International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, Novosibirsk, Russia, 2002.
- [57] KÖRMELING, H.A.; ZIELINSKI, A.J.; RHEINHARDT, H.W.: *Experiments on concrete under single and repeated uniaxial impact tensile loading*. Technischer Bericht 5-80-3, Delft University of Technology, August 1981.
- [58] KUBOTA, N.: *Propellants and Explosives – Thermochemical Aspects of Combustion*. Wiley-VCH, 2002.
- [59] KUPFER, H.: *Das Verhalten von des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. DAfStb – Heft 229, Ernst und Sohn 1973.
- [60] LARCHER, M.: *Numerische Simulation des Betonverhaltens unter Stoßwellen mit Hilfe des Elementfreien Galerkin-Verfahrens*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007.
- [61] LEE, E. L.; TARVER C.M.: *Phenomenological Model of Sock Initiation in Heterogeneous Explosives*. *Physic of Fluid*, 6(12), 1980.
- [62] LEE, J.H.: *Gasdynamics of Detonation*. *Acta Astronautica*, 1972.

- [63] LEPPAENEN, J.: *Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete*. International Journal of Impact Engineering, (31):843–860, 2005.
- [64] MEYERS, M.A.: *Dynamic Behaviour of Materials*. John Wiley & Sons, 1994.
- [65] MIE, G.: *Grundlagen einer Theorie der Materie*. Annalen der Physik, 39:1–40, 1912.
- [66] MISES, R.V.: *Mechanik der festen Körper im plastisch- deformablen Zustand*. Nachrichten der Wissenschaftlichen Gesellschaft, Göttingen, Seiten 335–338, 1913.
- [67] MÜLLER, H.S.: *Baustoffkunde und Konstruktionsbaustoffe*. Vorlesungsskriptum, Universität Karlsruhe (TH), 2007.
- [68] NIEDRIG, H.: *Hütte–Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, Band 28, Kapitel B-Physik, Seiten 1–240. Springer, 1989.
- [69] OCKERT, J.: *Ein Stoffgesetz für die Schockwellenausbreitung in Beton*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1997.
- [70] OTTOSEN, N.S.: *A Failure Criterium for Concrete*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 103:527–535, 1977.
- [71] RANKINE, W.J.M.: *On the Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance*. Philosophical Transactions, 160:277–288, 1870.
- [72] REINHARDT, H.-W: *Beton*, Kapitel IV, Seiten 355–478. Ernst und Sohn, Betonkalender 2007.
- [73] RIEDEL, W.: *Beton unter dynamischen Lasten – Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter*. Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, 2000. ISBN 3-8167-6340-5.
- [74] RIEDEL, W.; KAWAI, N.: *Numerical Simulation of Mortar Strength Measurements at Highest Strain Rates*. In: *International Symposium of the Effects of Munitions with Structures – ISIEMS*, 17.-21. September 2007.
- [75] ROSENBERG, Z.; YAZIV, D.; PARTOM, Y.: *Calibration of foil-like manganin gauges in planar shock wave experiments*. Journal of Applied Physics, 51(7):3702–3705, July 1980.
- [76] ROSENBERG, Z.; YAZIV, D.; PARTOM, Y.: *Direct measurement of strain in plane impact experiments by a longitudinal resistance gauge*. Journal of Applied Physics, 51(9):4790–4798, September 1980.
- [77] ROSENBERG, Z.; YAZIV, D.; PARTOM, Y.: *Release wave calibration of manganin gauges*. Journal of Applied Physics, 51(12):6055–6057, December 1980.
- [78] ROSENBERG, Z.; YAZIV, D.; PARTOM, Y.: *The response of manganin gauges shock loaded in the 2-D straining mode*. Journal of Applied Physics, 52(2):755–758, February 1981.

- [79] RUPPERT, M.: *Zur numerischen Simulation von hochdynamisch beanspruchten Betonstrukturen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München, 2000.
- [80] RUPPERT, M.; GEBEKKEN, N.: *Material formulation for concrete, high strain-rates and pressures, elasticity-plasticity-damage*. In: 9. *Int. Symp. zur Interaktion der Wirkung von Munition mit Bauwerken, Berlin-Strausberg*, 1999.
- [81] SCHMIDT-HURTIENNE, B.: *Ein dreiaxiales Schädigungsmodell für Beton unter Einschluss des Dehnrateneffekts bei Hochgeschwindigkeitsbelastung*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 2001.
- [82] SCHULER, H.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Schädigung von stoßbeanspruchtem Beton*. Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, 2004. ISBN 3-8167-6463-0.
- [83] SCHULER, H.; HANSON, H.: *Fracture Behaviour of High Performance Concrete (HPC) investigated with a Hopkinson-Bar*. *Journal de Physique IV*, (134):1145–1151, 2006.
- [84] SLATER, J.C.: *Introduction to Chemical Physics*. Dover Publications, Inc., 1939.
- [85] STANKIEWICZ, J.; WHITE, R.L.: *Carbon Resistors as Pressure Gauges*. *The Review of Scientific Instruments*, 42:1067–1068, 1971.
- [86] STÖCKER, H.: *Taschenbuch der Physik*. Deutsch, 5. Auflage, 2004.
- [87] SWEGLE, J.W.; GRADY, D.E.: *Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times*. *Journal of Applied Physics*, 58:693, 1985.
- [88] VON NEUMANN, J.: *Theory of Detonation Waves*. In: *J. von Neumann, Collected Works*, Band 6. Macmillan, New York, 1942.
- [89] WATSON, R. W.: *Gauge for determining shock pressures*. *Review of Scientific Instruments*, 38:978–980, 1967.
- [90] WEERHEIJM, J.: *Concrete under Impact Tensile Loading and Lateral Compression*. Dissertation, Technische Universität Delft, 1992.
- [91] WIKIPEDIA - DIE FREIE ENZYKLOPÄDIE.
- [92] WILLAM, K.J.; WARNKE, E.P.: *Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete*. In: *IABSE Proceedings, Vol 19*, 1975.
- [93] WITTENBURG, J.: *Festigkeitslehre*. Springer, 2001.
- [94] WÜRFEL, P.: *Persönliche Mitteilung*. Institut für Angewandte Physik, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [95] ZEL'DOVICH, Y. B.: *On the Theory of the Propagation of Detonation in Gaseous Systems*. *Physiki Usbeki*, 10:542–568, 1940.

- [96] ZEUNER, S.: *Atomlagenthermosäulen in Hochtemperatur-Supraleitern als schnelle Strahlungsdetektoren*. Dissertation, Universität Regensburg - Fakultät für Physik, 1994.
- [97] ZHENG, S.: *Beton bei variierender Dehngeschwindigkeit untersucht mit einer neuen modifizierten Split-Hopkinson Bar-Technik*. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1996.
- [98] ZIELINSKI, A.J.: *Fracture of Concrete and Mortar under Uniaxial Impact Tensile Loading*. Dissertation, Delft University of Technology, 1982.
- [99] ZIELINSKI, A.J.: *Model for Tensile Fracture of Concrete at High Rates of Loading*. Cement and Concrete Research, 14:215–224, 1984.
- [100] ZUKAS, J.A.: *High Velocity Impact Dynamics*. Wiley & Sons, 1990.

A Betonkennwerte

angestrebte Betonqualität	C30/37
Menge je m³ Beton	[kg]
Zement:	319,0
Zuschlagstoffe:	1811,0
Wasser gesamt:	191,0
aus Eigenfeuchte:	0,0
Zugabewasser:	191,0
Mischungsverhältnis: Z/Z:W/Z:G/Z	
Z/Z	1
W/Z	0,60
G/Z	5,69
verwendeter Zement:	CEM I 32,5 R
Gesamtmenge verarb. Zement:	390
Menge je Mischung	[kg]
Zement:	65,0
Zuschlagstoffe:	371,0
Zugabewasser:	39,0
Betonmenge pro Mischung:	475,0
gesamte Betonmenge:	2850,0

Zuschlagstoffe je Mischung				
Körnung [mm]	getrocknet	Gewicht [%]	Teilmengen [kg]	Teilsummen [kg]
0/2	ja	30	111,0	111,0
2/8	nein	38	141,0	252,0
8/16	nein	32	119,0	371,0
16/32	0	0	0,0	371,0
Summen		100		371,0

Bild A.1: Betonrezeptur aller Versuchskörper

Tabelle A.1: Betonkennwerte der Versuchskörper

Versuch	β_w [MN/m ²]	$\beta_{sz,zyl}$ [MN/m ²]	ρ_0 [kg/m ³]	E [MN/m ²]	G [MN/m ²]	$U_{s,el}$ [m/s]
1	42,2	-	2322	26136	10890	4184
2	44,9	3,02	2326	25659	10691	4142
3,4	53,57	3,24	2320	27041	11267	4258
5, 6, 7, 8	45,1	2,93	2348	24522	10218	4031
9, 10, 11	42,14	2,39	2311	25837	10765	4170

Prüfergebnisse

Zur Prüfung nach DIN EN 12390 wurden am _____ Zylinder mit folgenden Angaben angeliefert.

Baustelle: _____

Bauteil: _____

Betonfestigkeitsklasse: **C** 30/37 Sorten-Nr.: _____

Lagerung nach Anlieferung gemäß DIN EN 12390

Herstellungstag: 11.05.2004 Prüftag: 08.06.2004 Prüfalter 28 Tage

Bez.	Abmessungen in mm			Masse [kg]	Rohdichte [kg/m ³]	Höchstlast [kN]	maßgeb. Last F_M [kN]
	Durchmesser	Höhe v. Abgl.	Höhe n. Schleifen				
4	150		297	12,15	2,315	705	717
5	150		297	12,19	2,323	755	
6	150		296	12,13	2,319	690	
							β_D
1	150		297	12,24	2,332	754	43
2	150		296	12,38	2,367	743	42
3	150		296	12,30	2,351	735	42

Oberlast F_O : =1/3 F_M

236

Meßlänge (l): **150** mm

Unterlast F_U : =0,5N/mm²

10

Bez.	Ablesung [μ m]		b_l [μ m]	F [kN]	E-Modul [N/mm ²]	ϵ_F [N]* l [mm] ----- A [mm ²]* ϵ_{Ab} [μ m] * 10 ⁻³
	Oberlast	Unterlast				
1	81,4	7,5	73,9	226	25959	
2	84,6	11,3	73,3	226	26171	
3	84,1	11,1	73	226	26279	
Mittel:					26136	

Bild A.2: Bestimmung des E-Modul, am Bsp. der Versuchskörper 3, 4

B Kalibrierkurven

KMW

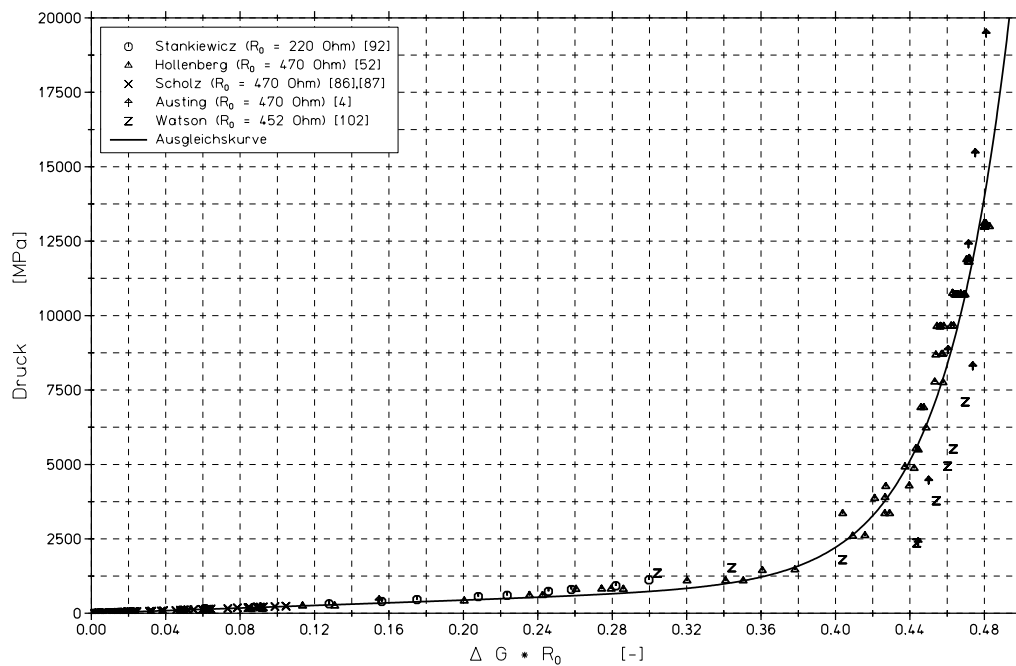


Bild B.1: Verwendete Kalibrierkurve für KMW nach [69]

Mathematische Formulierung der Kalibrierkurve:

$$p = p_0 \cdot (2,655 + 2,178 \cdot 10^3 \cdot X_G + 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot e^{28,34 \cdot X_G}); \quad p_0 = 1 \text{ MPa}$$

Widerstandsverlauf:

$$R_M(t) = \frac{1}{\frac{U_{M_0}}{U_M(t)} \cdot \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{M_0}} \right) - \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_I} \right)}$$

Dimensionlose Größe X_G :

$$X_G = R_0 \cdot \left(\frac{1}{R_I + R_M(t)} - \frac{1}{R_I + R_{M_0}} \right)$$

ALTS

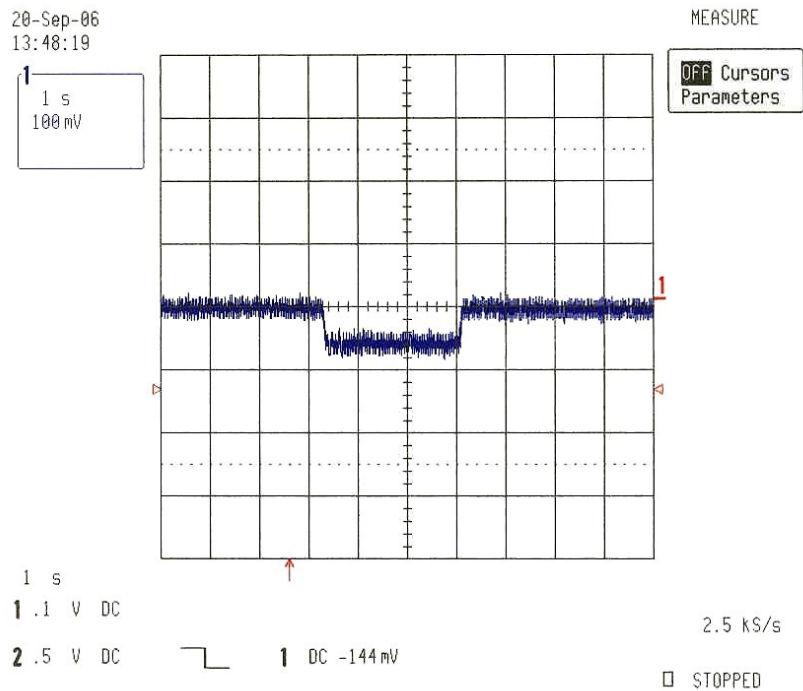


Bild B.2: Grobkalibrierung mit IR-Strahler

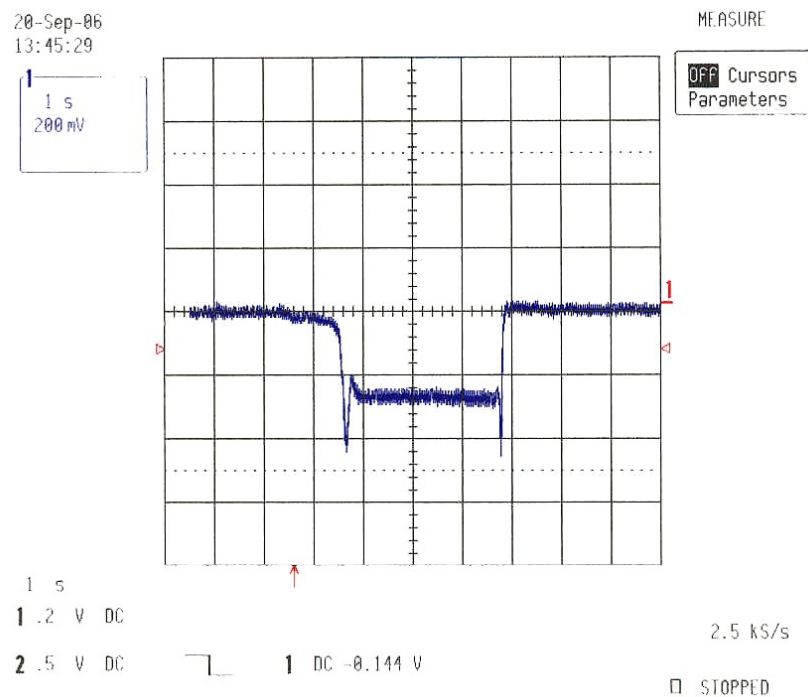


Bild B.3: Grobkalibrierung Nr. 2 mit IR-Strahler

Zeitkonstante des Systems

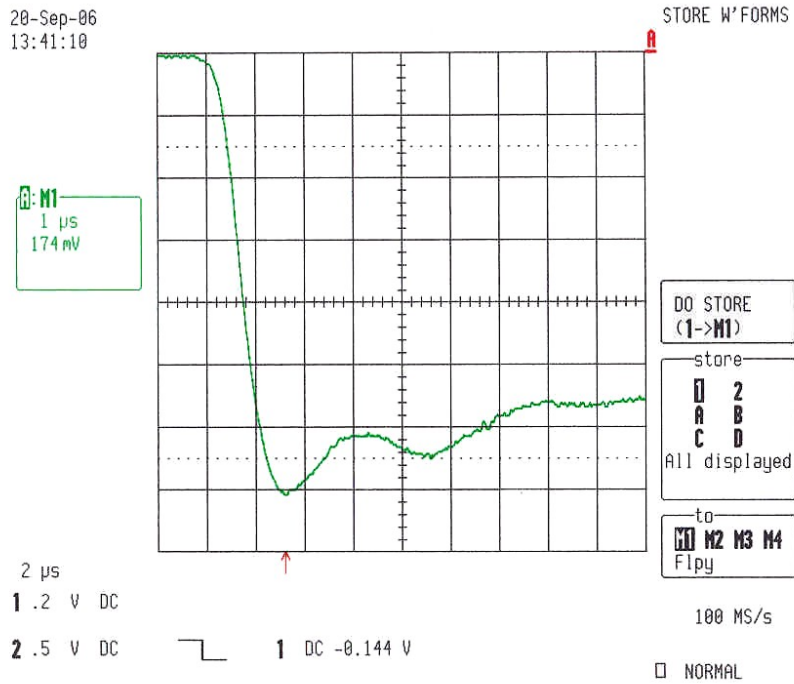


Bild B.4: Zeitkonstante des Systems, ermittelt mit CO_2 -Laser

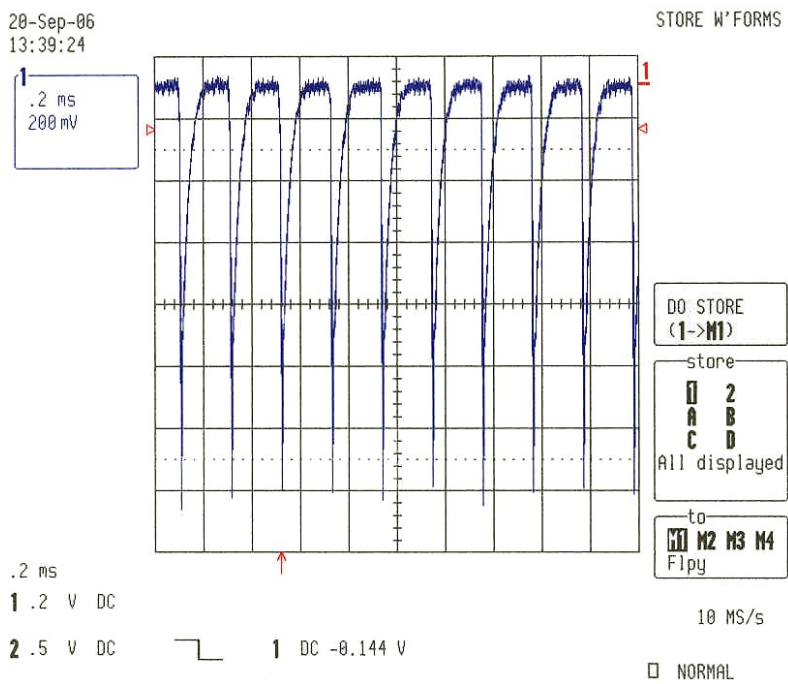


Bild B.5: Pulsstruktur des CO_2 -Lasers

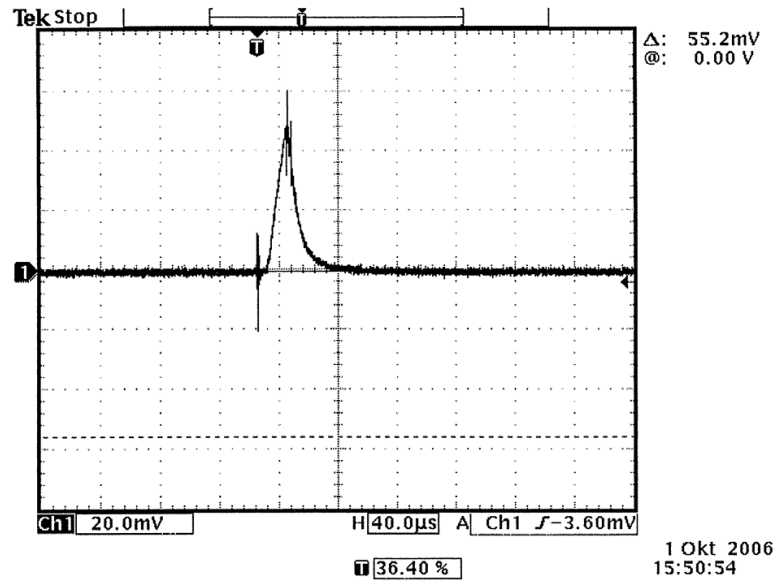


Bild B.6: Kontrolle der Zeitkonstanten nach Zusammenbau mit Blitzlicht

C Messkurven

Tabelle C.1: Übersicht der eingebauten Messaufnehmer

Versuch Nr.	Messelement				
	KMW	MA	DMS	ALTS	LL
2	●	●	●	○	○
3	●	●	●	○	○
4	●	●	●	○	○
5	●	○	●	●	○
6	●	○	○	●	○
7	●	○	●	●	○
8	●	○	●	●	○
9	●	○	○	●	●
10	●	○	○	●	●
11	●	○	○	●	○

● vorhanden

○ nicht vorhanden

Kohle-Masse-Widerstände (KMW)

Versuch Nr. 2 – kleine Ladung

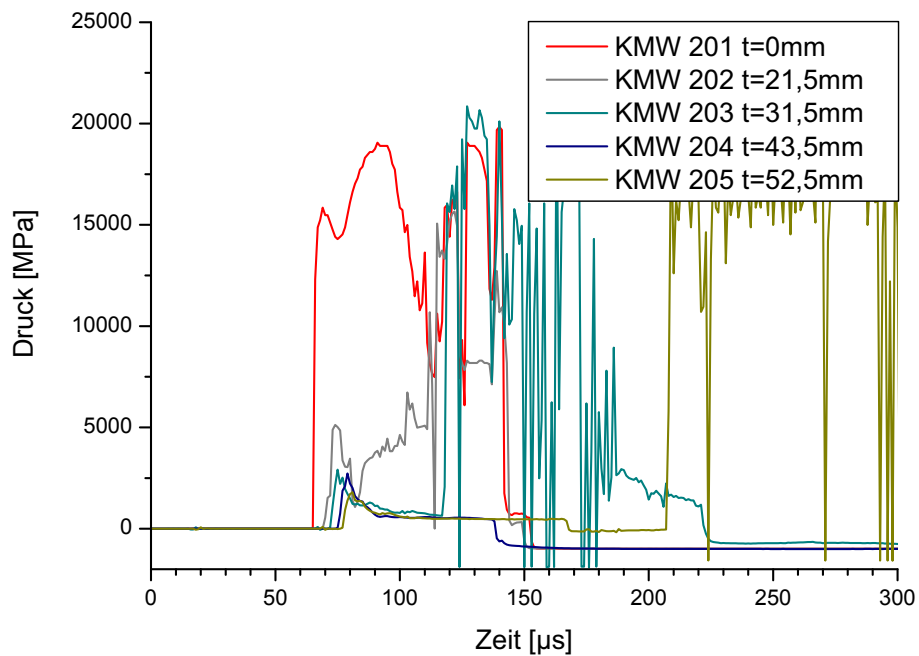


Bild C.1: KMW 201-205, oberer Druckbereich

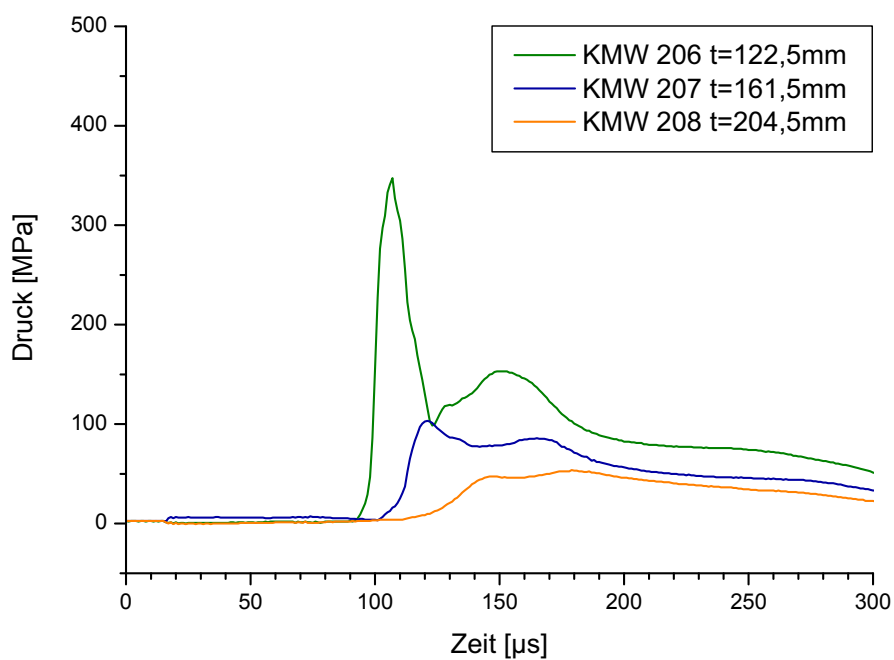


Bild C.2: KMW 206-208, unterer Druckbereich

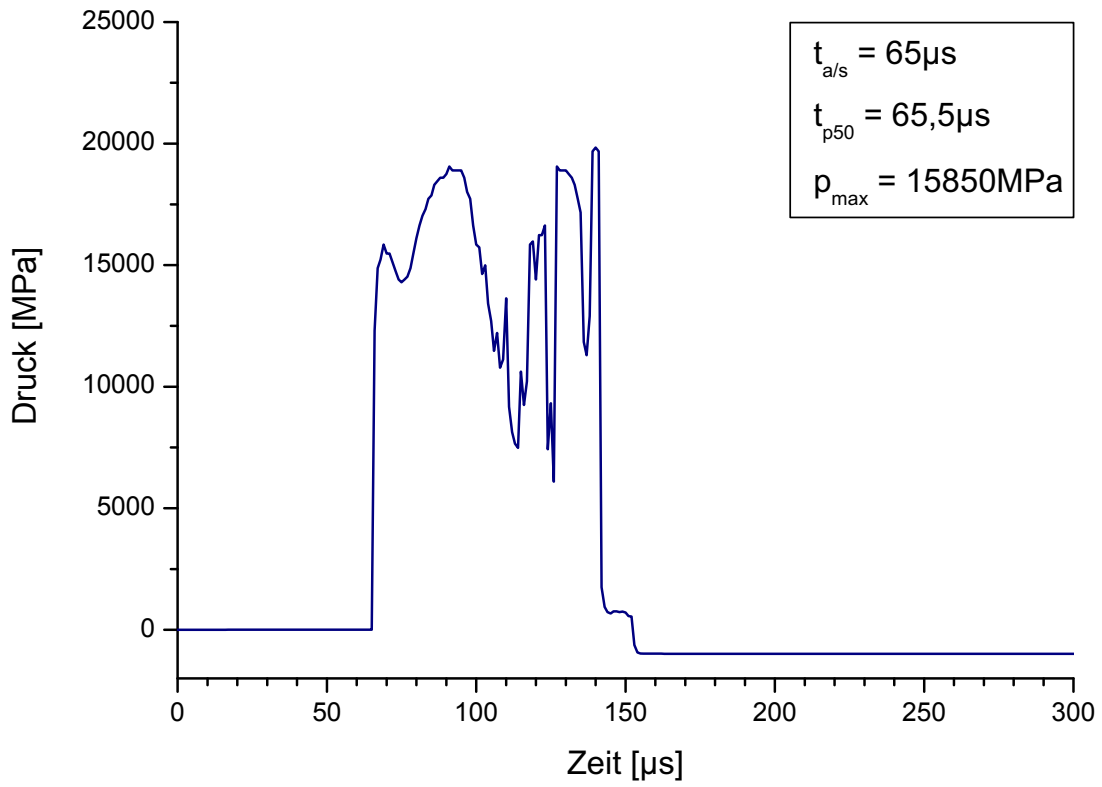


Bild C.3: KMW 201, Einbautiefe 0 mm

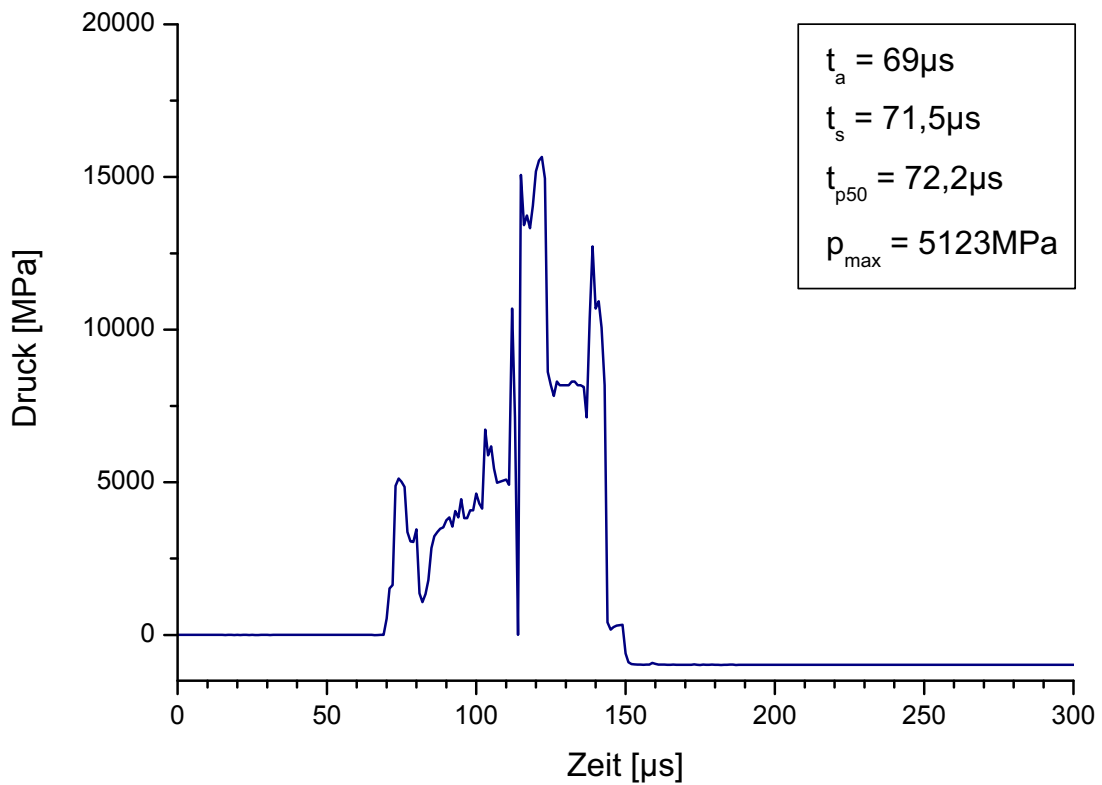


Bild C.4: KMW 202, Einbautiefe 23,5 mm

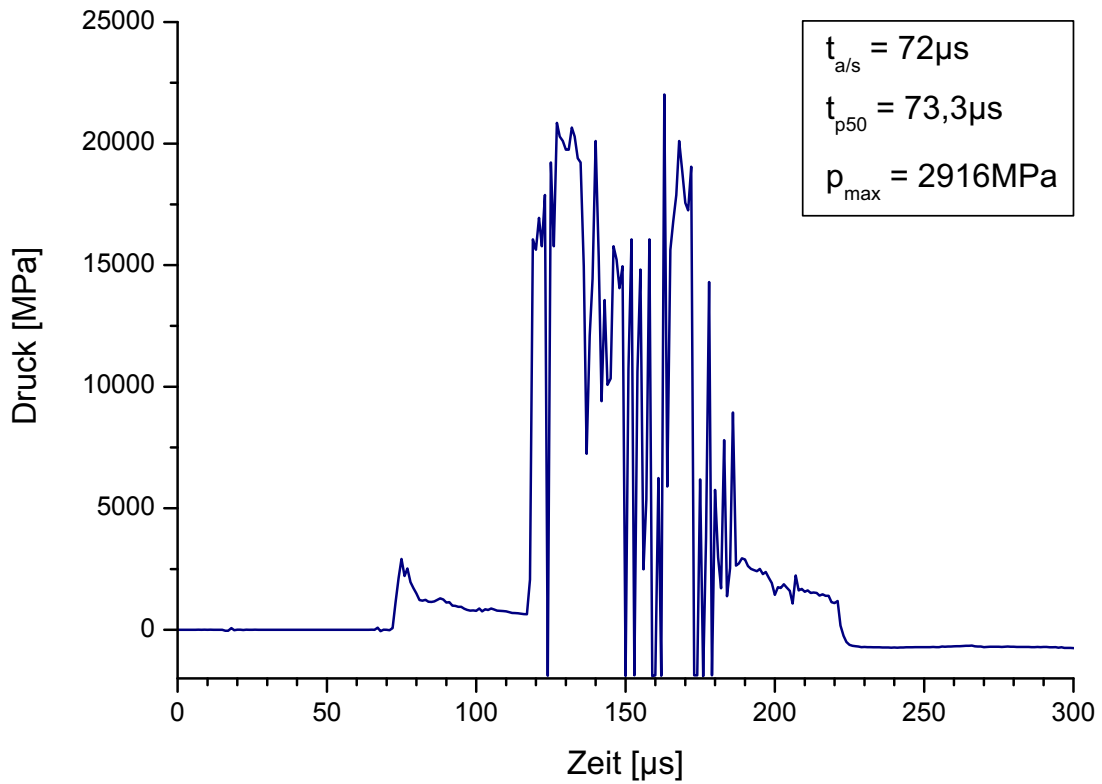


Bild C.5: KMW 203, Einbautiefe 31,5 mm

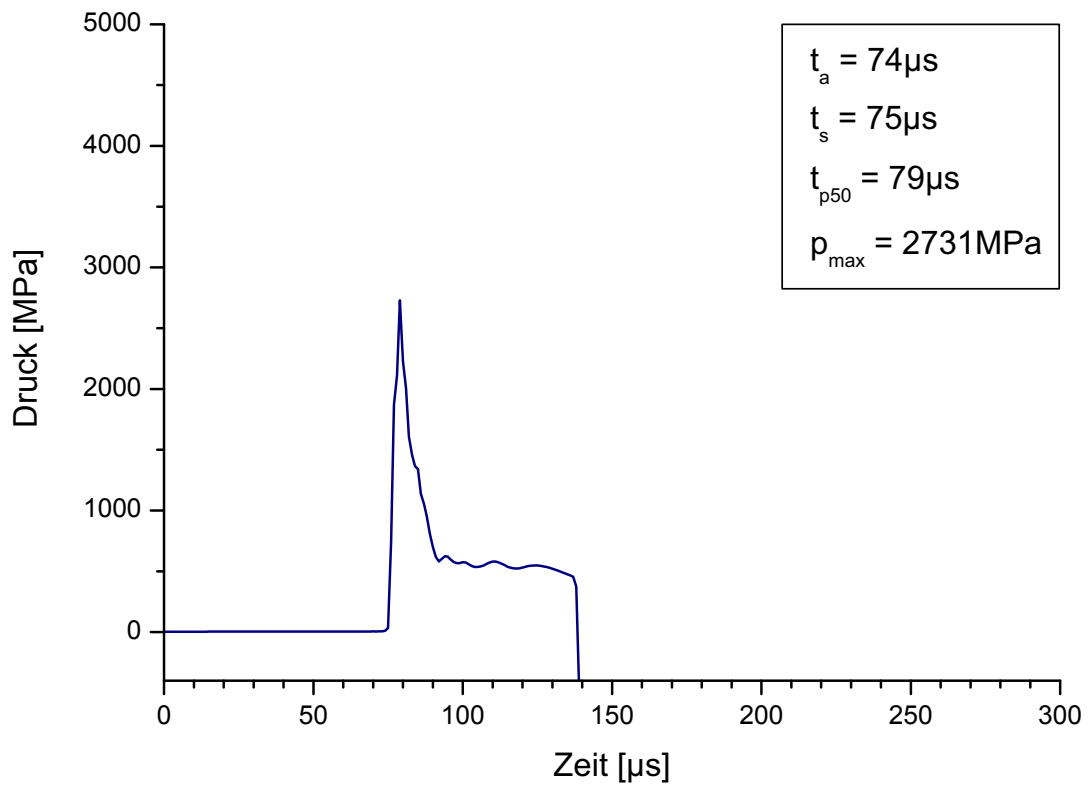


Bild C.6: KMW 204, Einbautiefe 43,5 mm

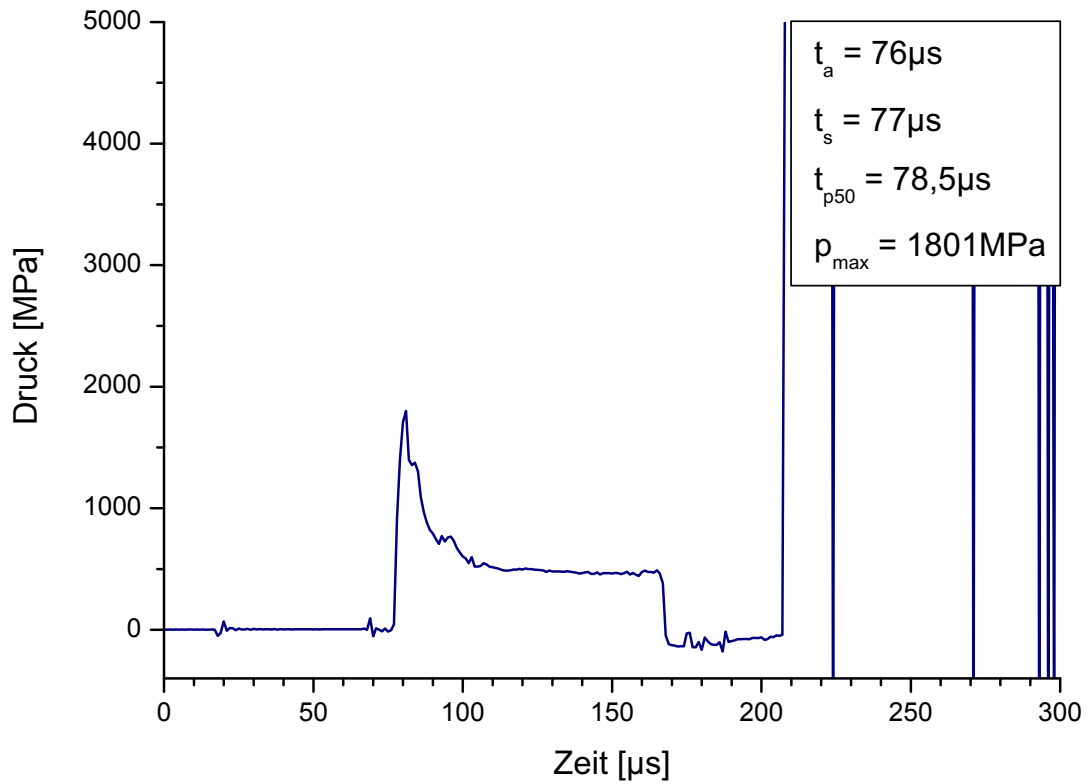


Bild C.7: KMW 205, Einbautiefe 52,5 mm

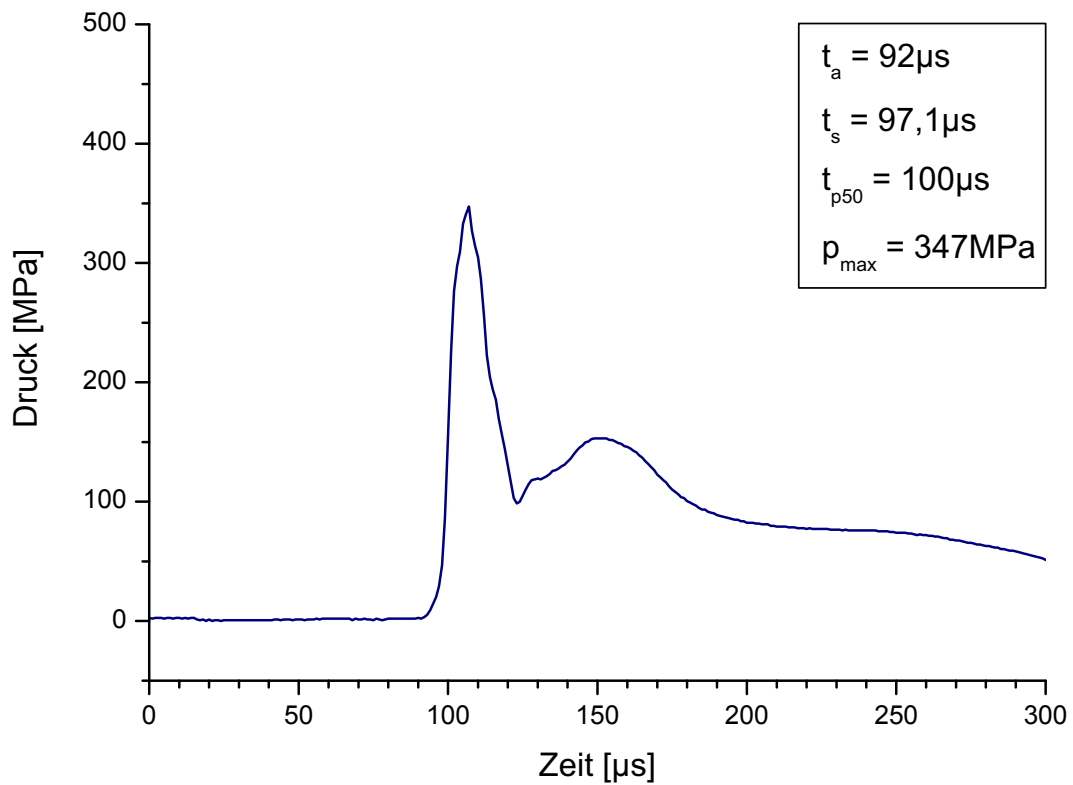


Bild C.8: KMW 206, Einbautiefe 122,5 mm

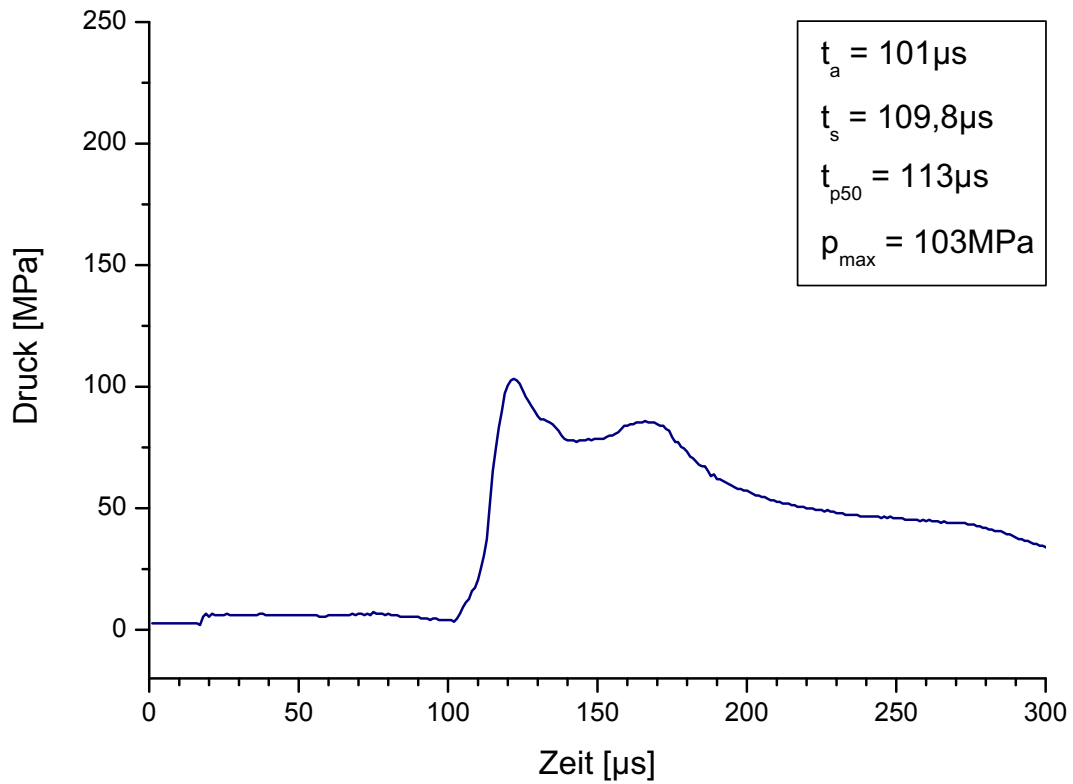


Bild C.9: KMW 207, Einbautiefe 161,5 mm

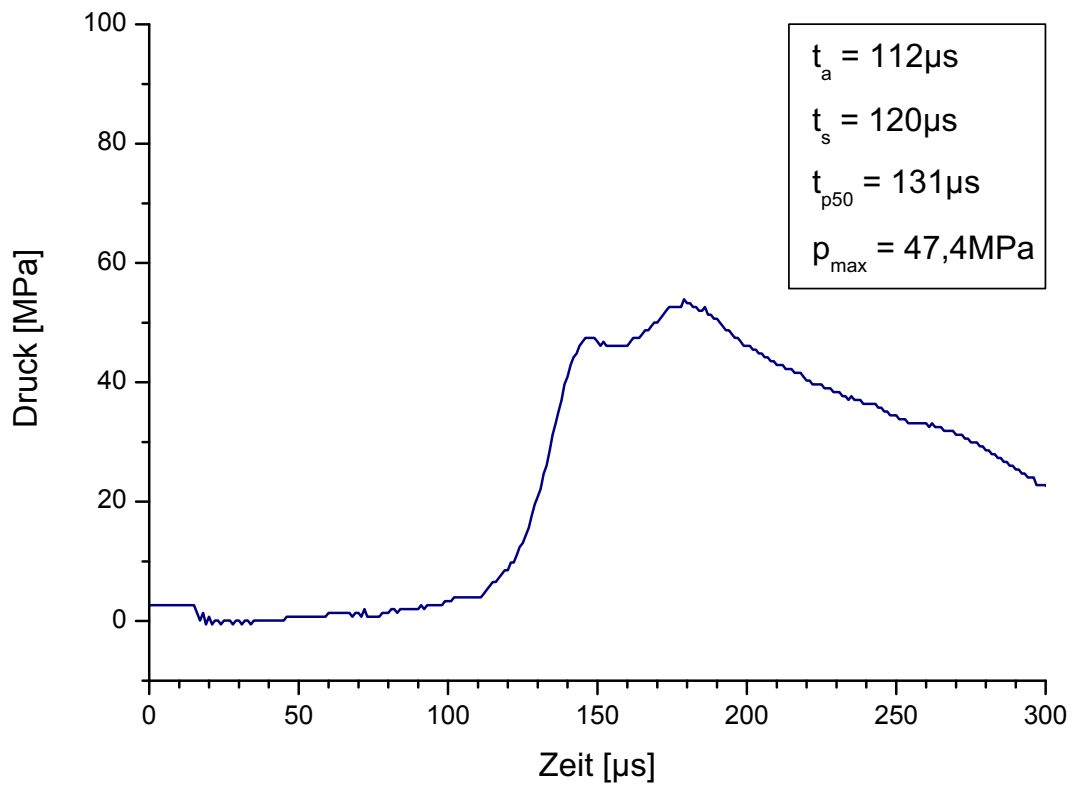


Bild C.10: KMW 208, Einbautiefe 204,5 mm

Versuch Nr. 3 – große Ladung

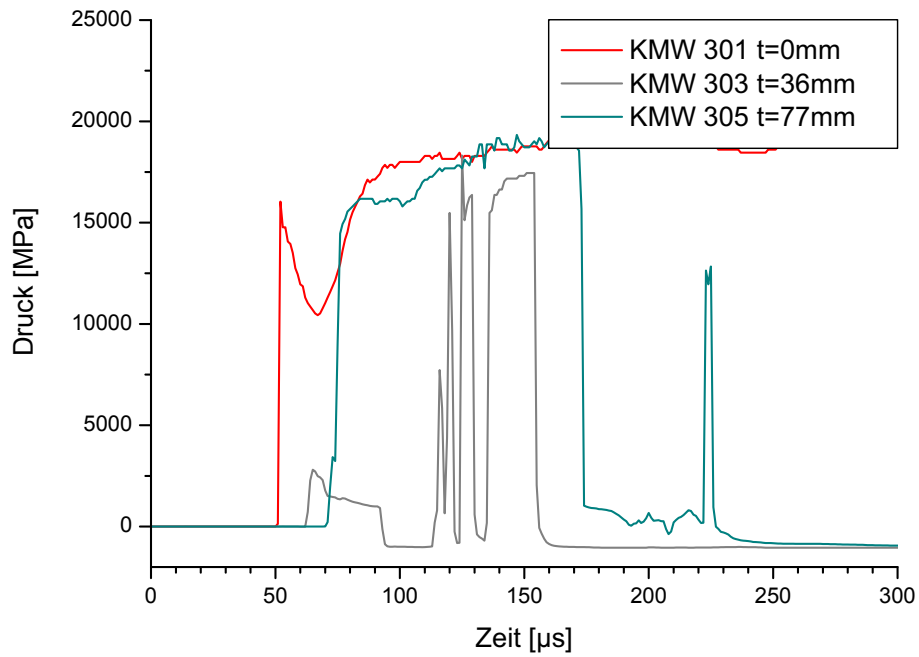


Bild C.11: KMW 301, 303, 305 – oberer Druckbereich

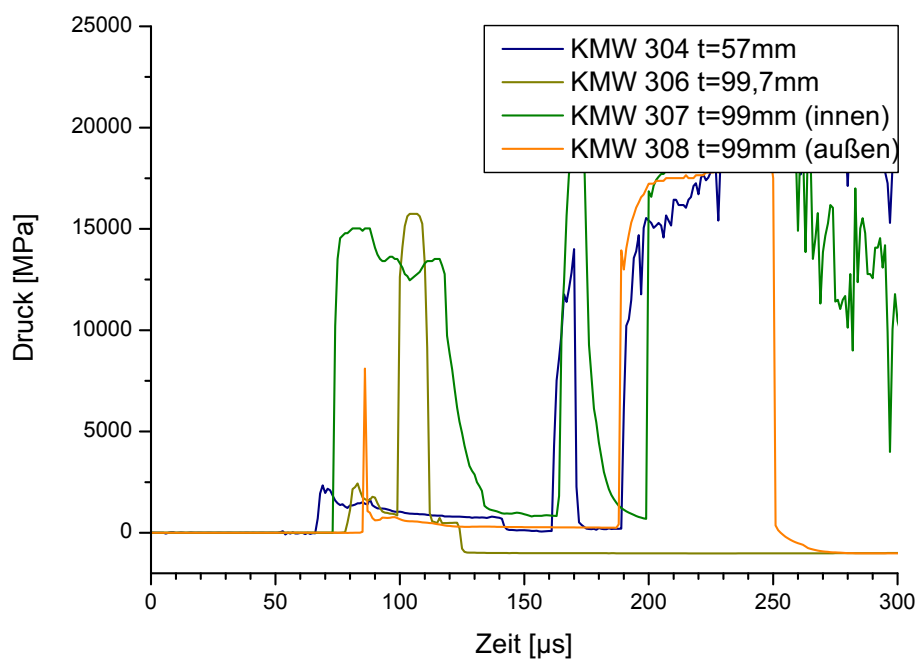


Bild C.12: KMW 302, 304, 306, 308 – unterer Druckbereich

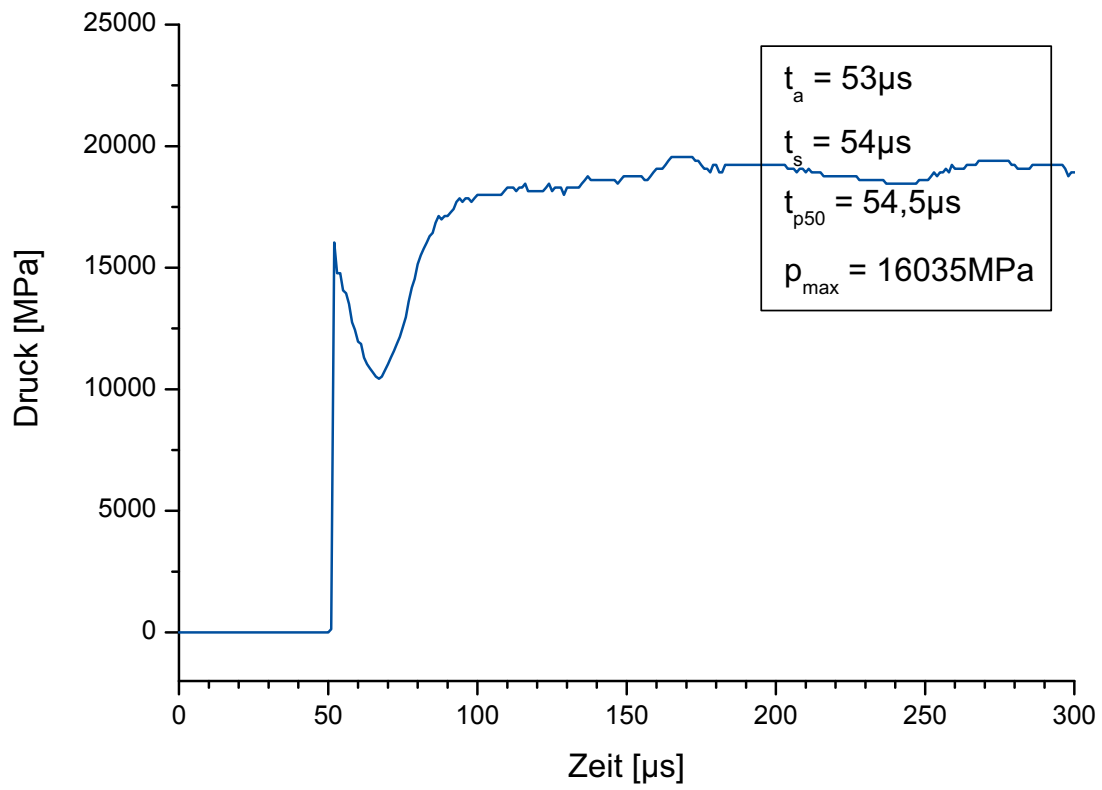


Bild C.13: KMW 301, Einbautiefe 0 mm

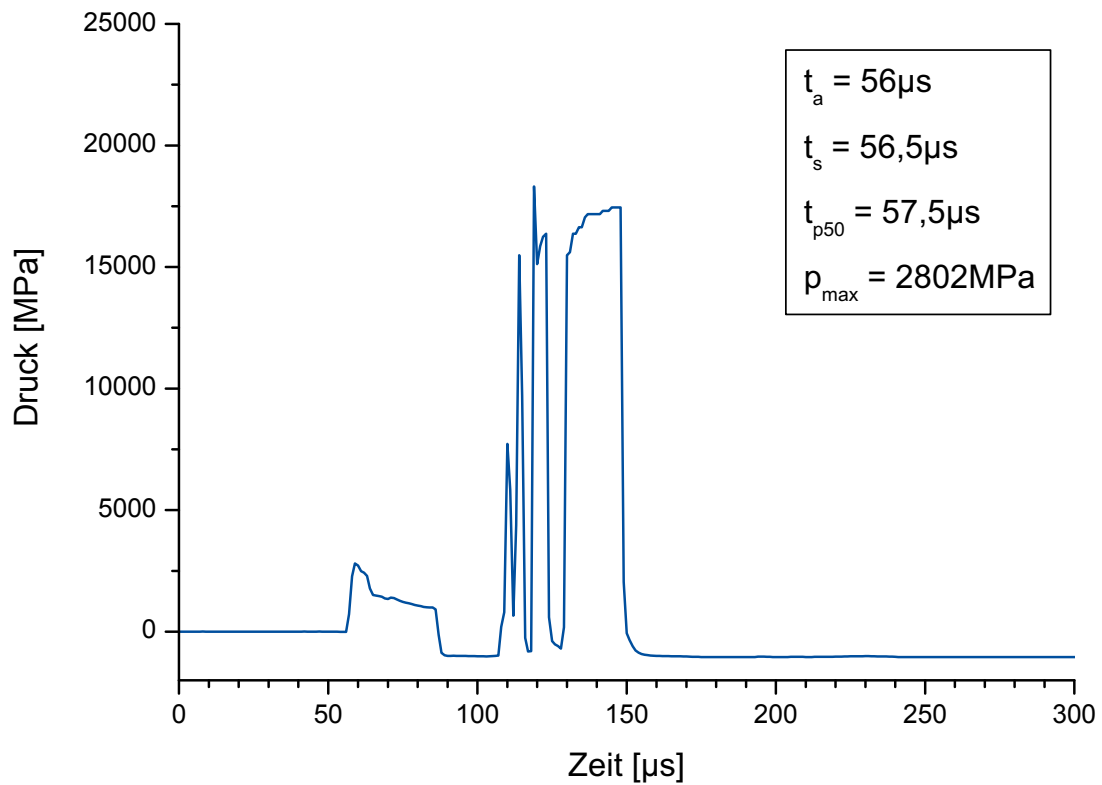


Bild C.14: KMW 302, Einbautiefe 17 mm

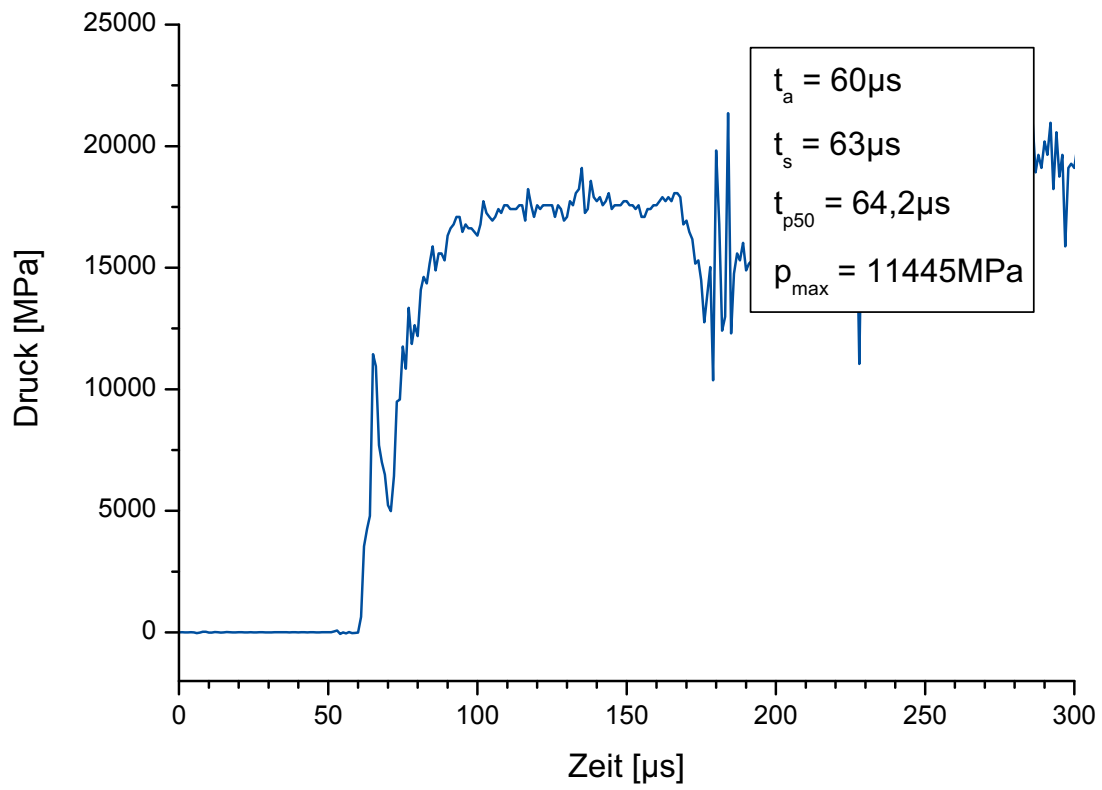


Bild C.15: KMW 303, Einbautiefe 36 mm

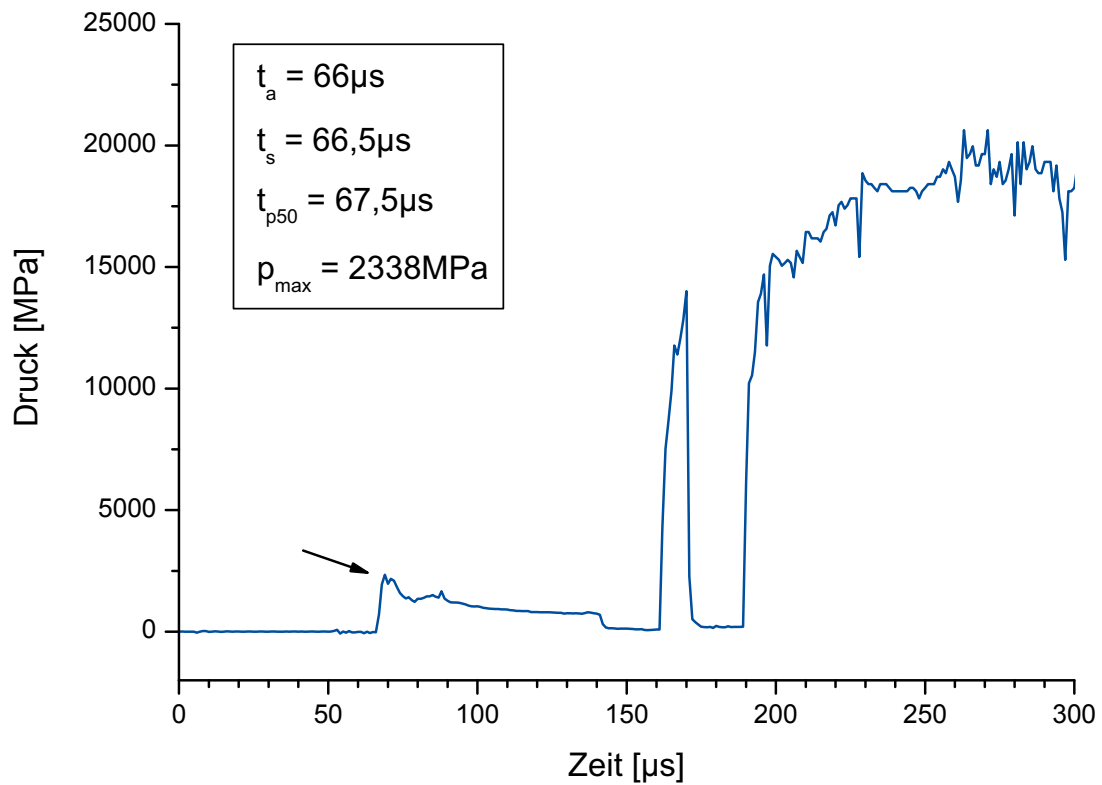


Bild C.16: KMW 304, Einbautiefe 57 mm

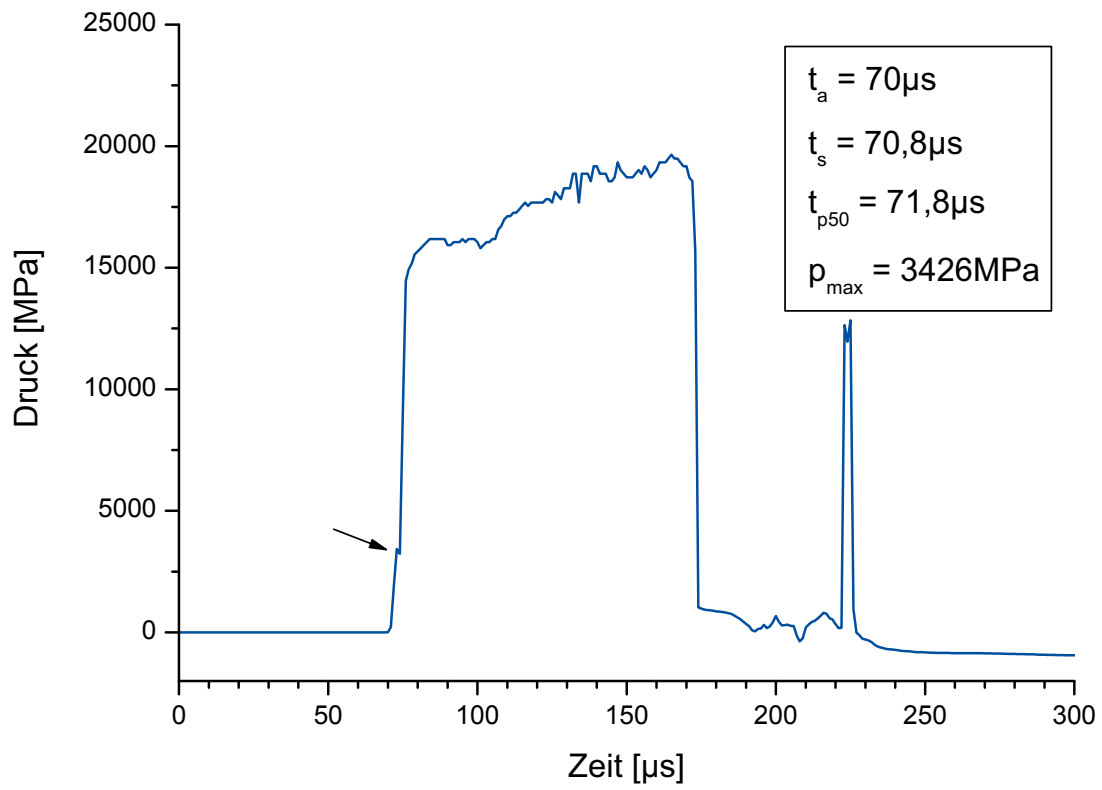


Bild C.17: KMW 305, Einbautiefe 77 mm

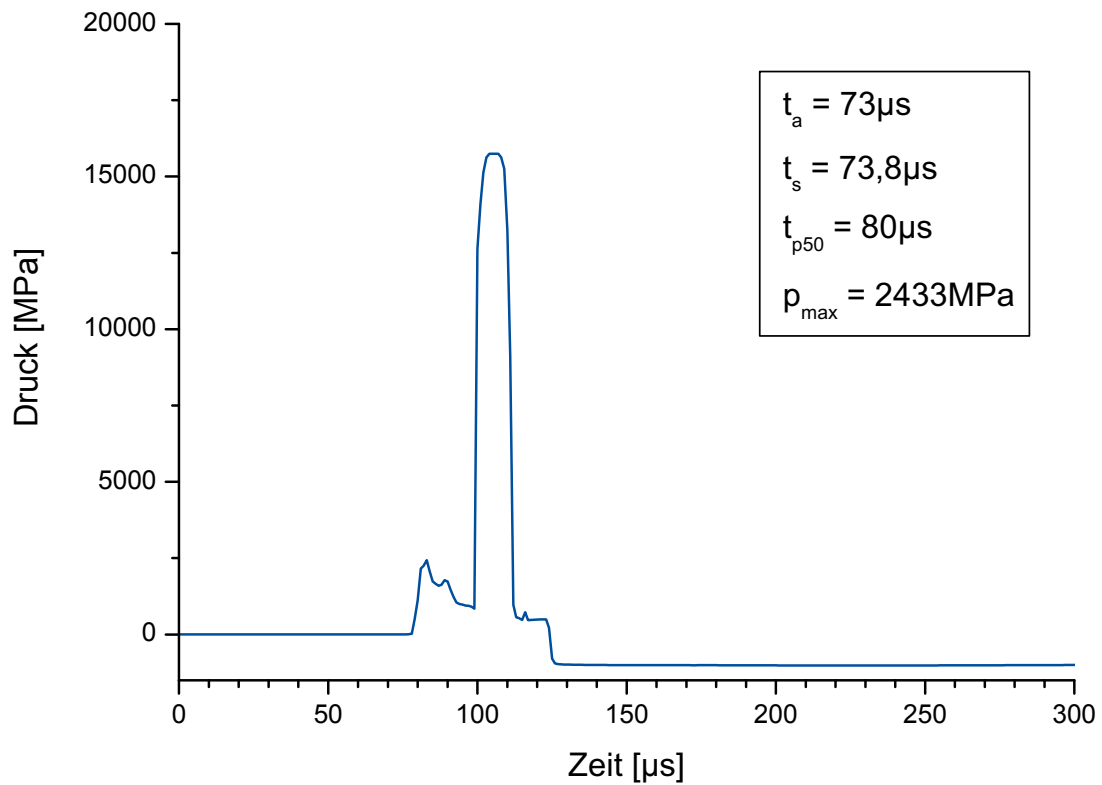


Bild C.18: KMW 306, Einbautiefe 99,7 mm

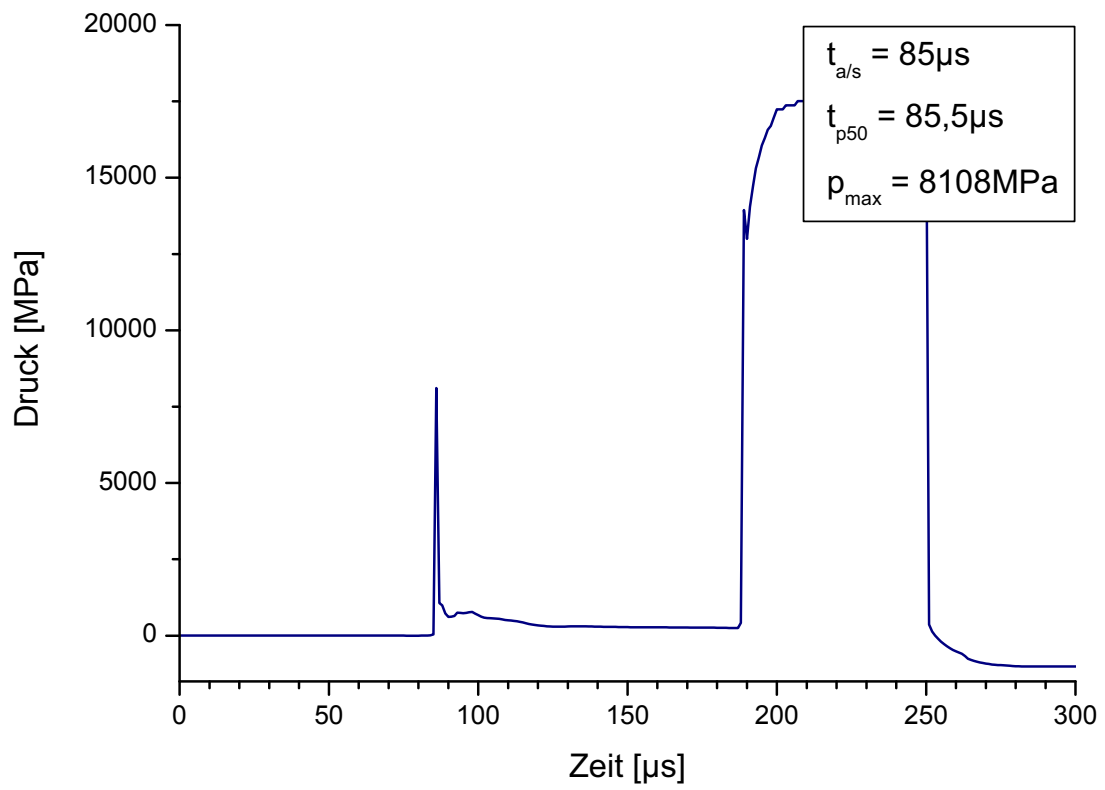


Bild C.19: KMW 308, Einbautiefe 99 mm; $r_a = 150$ mm

Versuch Nr. 4 – große Ladung

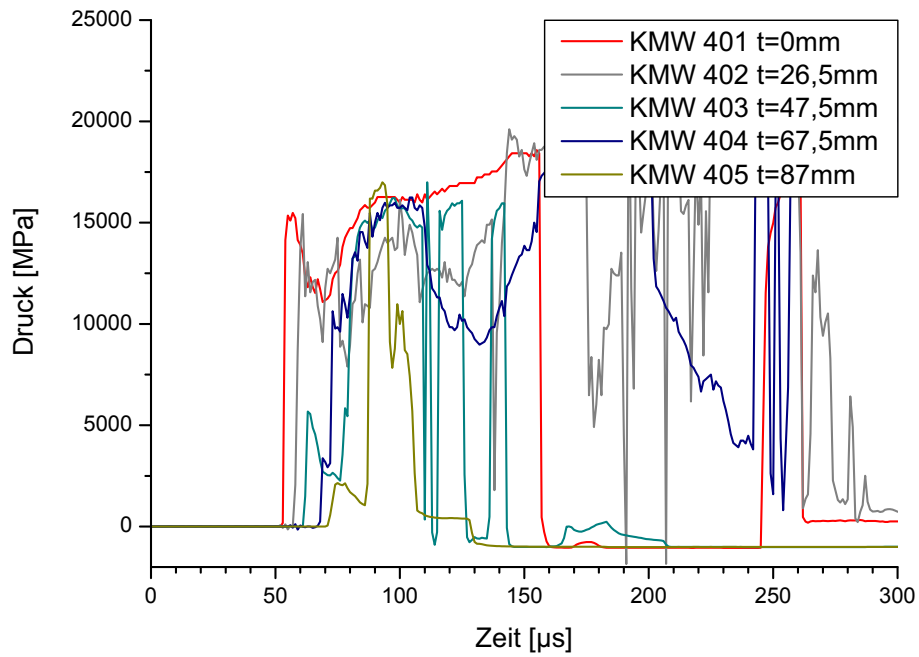


Bild C.20: KMW 401-405 – oberer Druckbereich

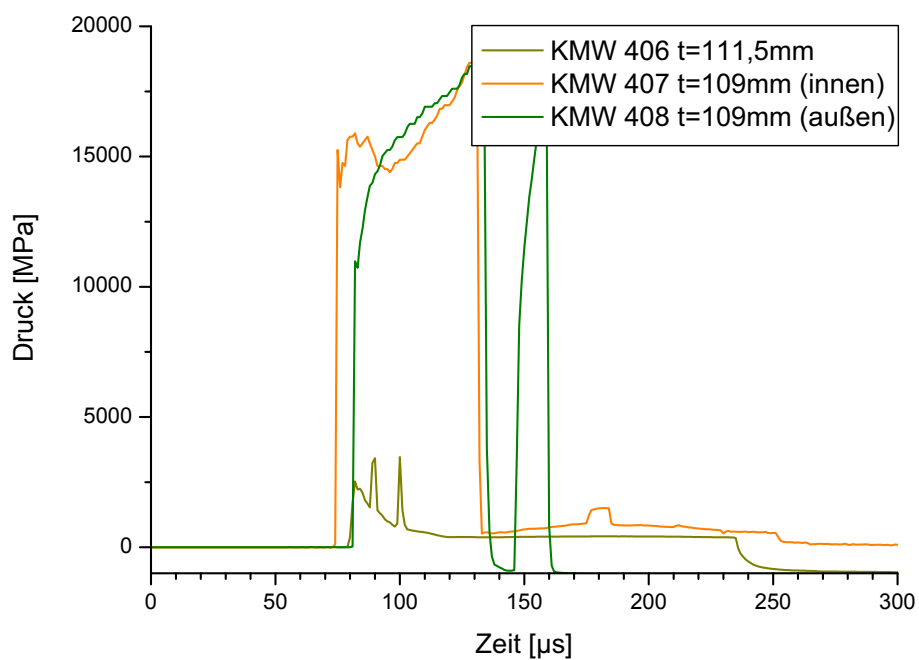


Bild C.21: KMW 406-408 – unterer Druckbereich

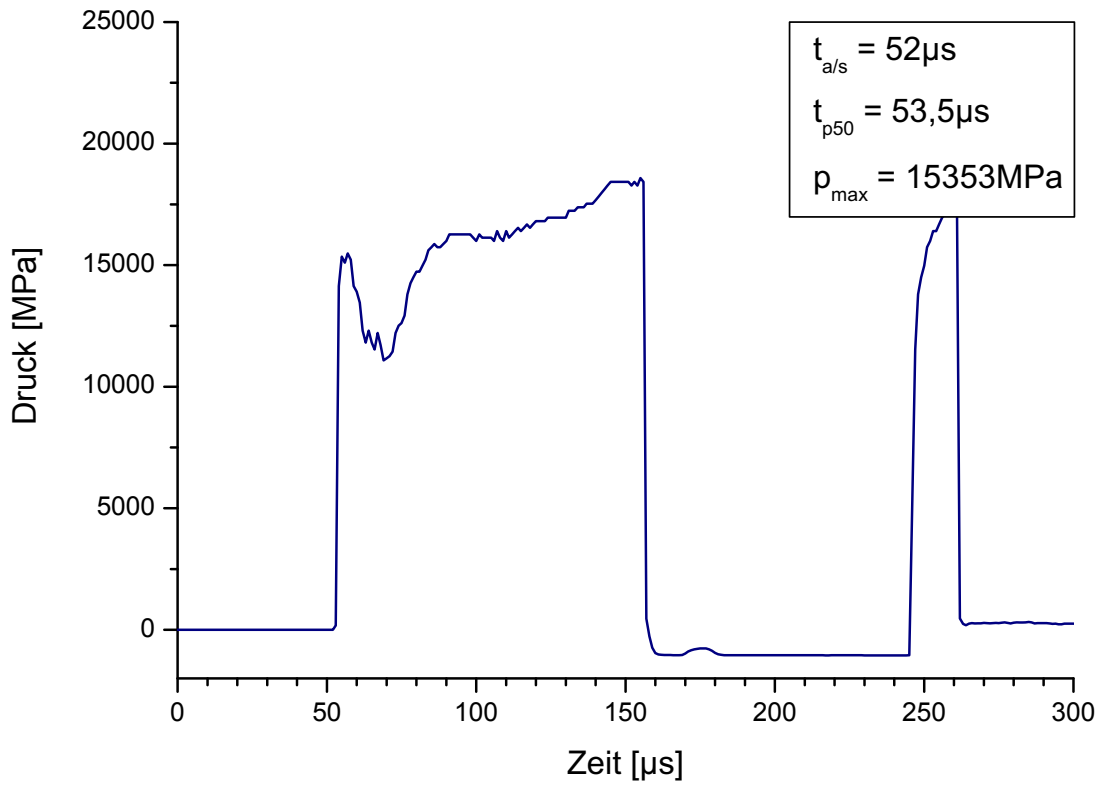


Bild C.22: KMW 401, Einbautiefe 0 mm

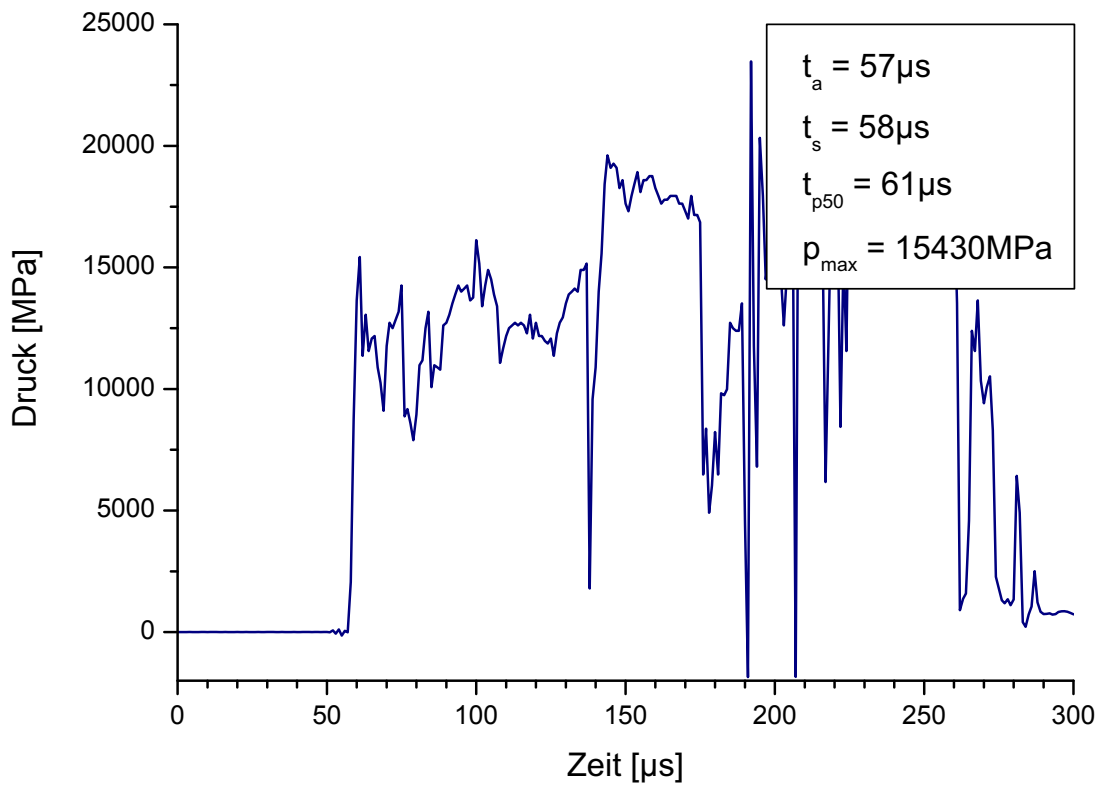


Bild C.23: KMW 402, Einbautiefe 26,5 mm

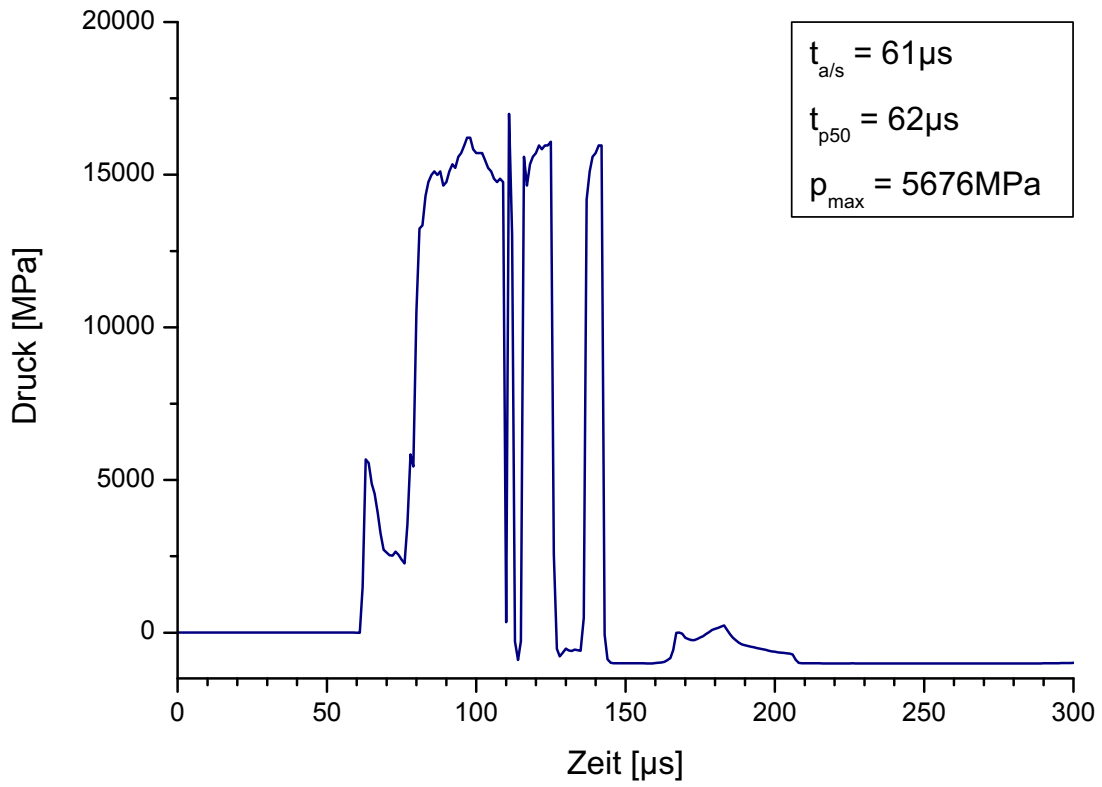


Bild C.24: KMW 403, Einbautiefe 47,5 mm

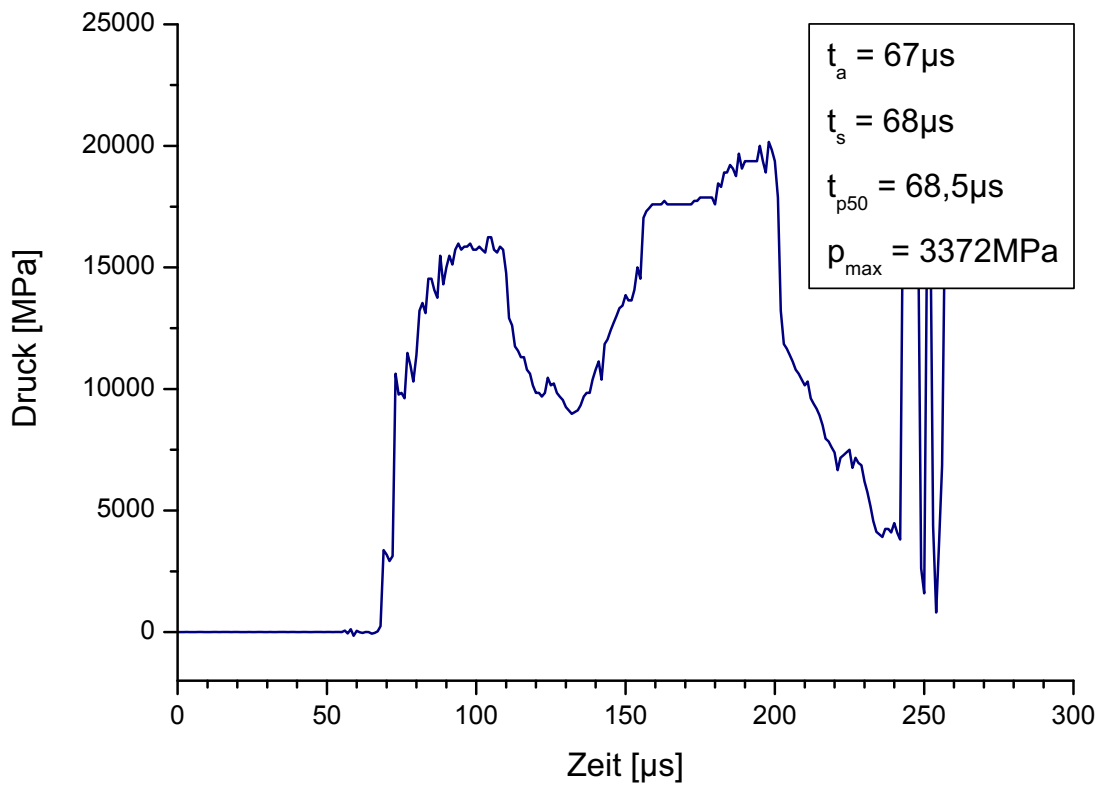


Bild C.25: KMW 404, Einbautiefe 67 mm

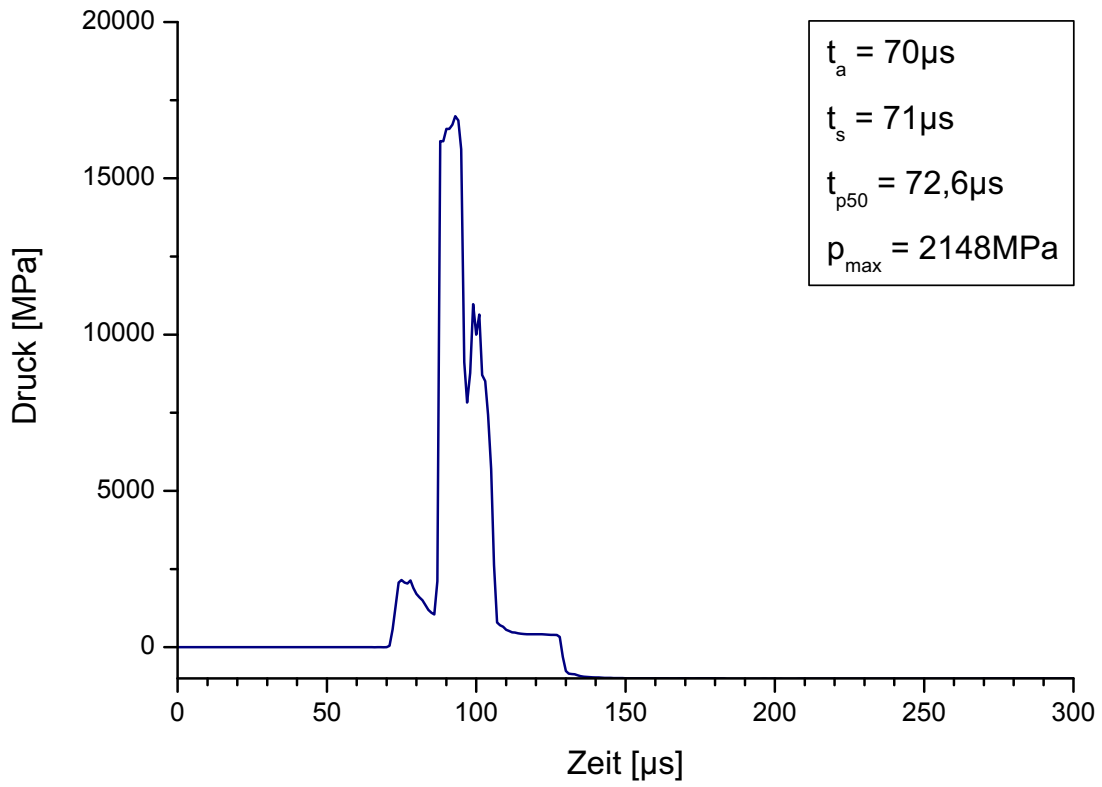


Bild C.26: KMW 405, Einbautiefe 87 mm

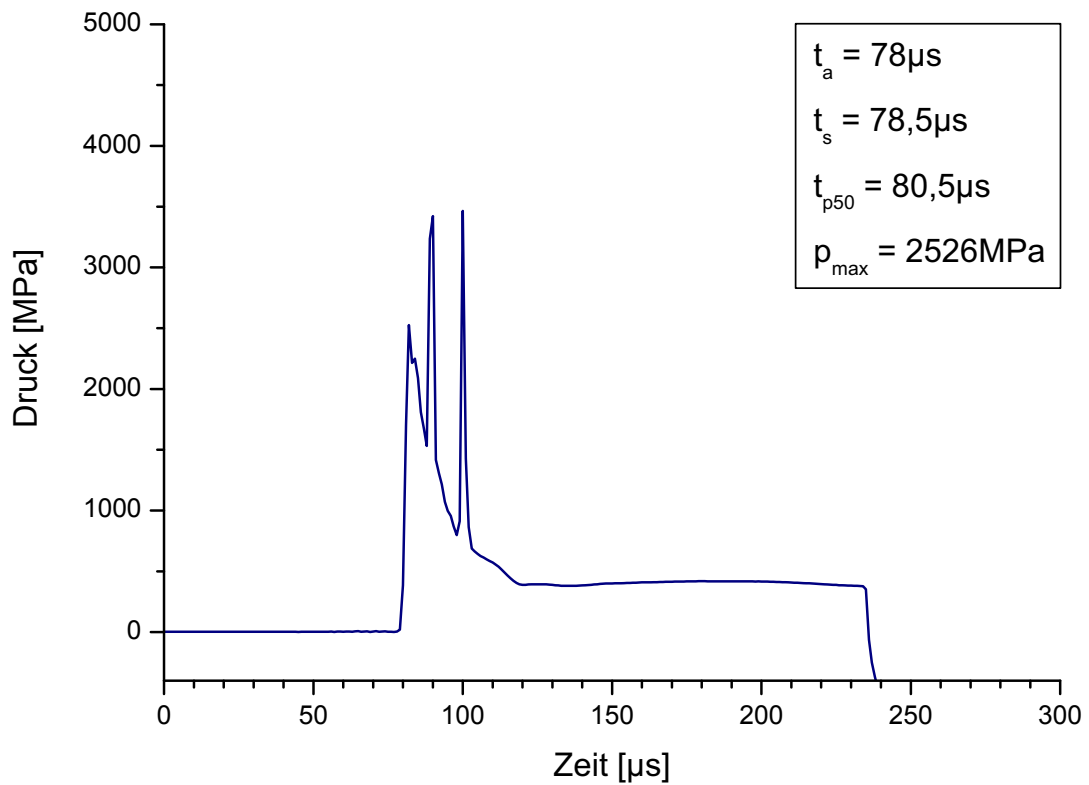
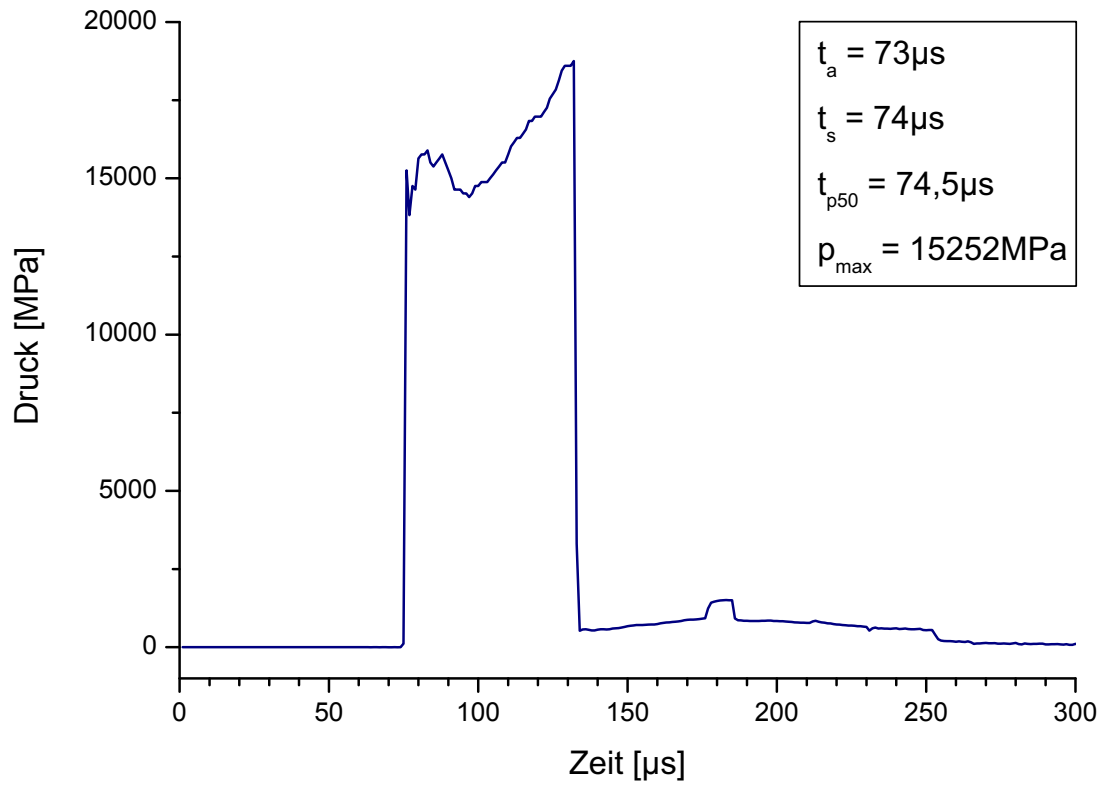
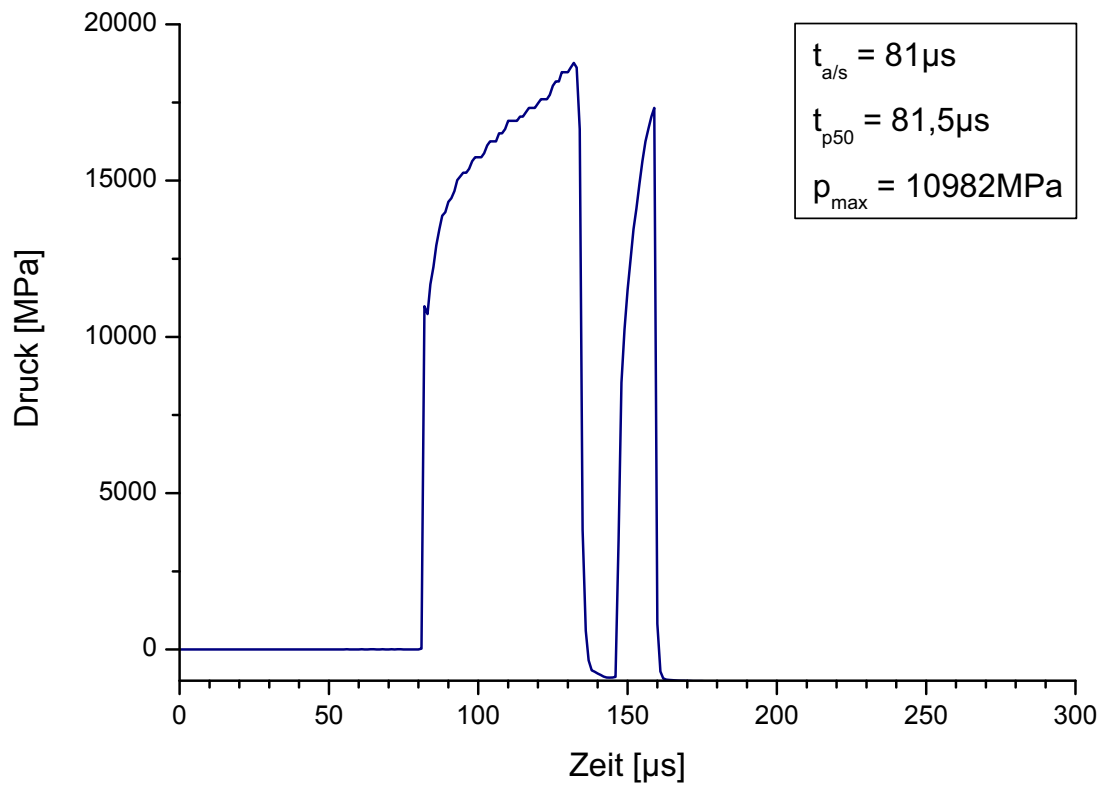


Bild C.27: KMW 406, Einbautiefe 111,5 mm

Bild C.28: KMW 407, Einbautiefe 109 mm; $r_i = 0$ mmBild C.29: KMW 408, Einbautiefe 109 mm; $r_a = 150$ mm

Versuch Nr. 5 – große Ladung

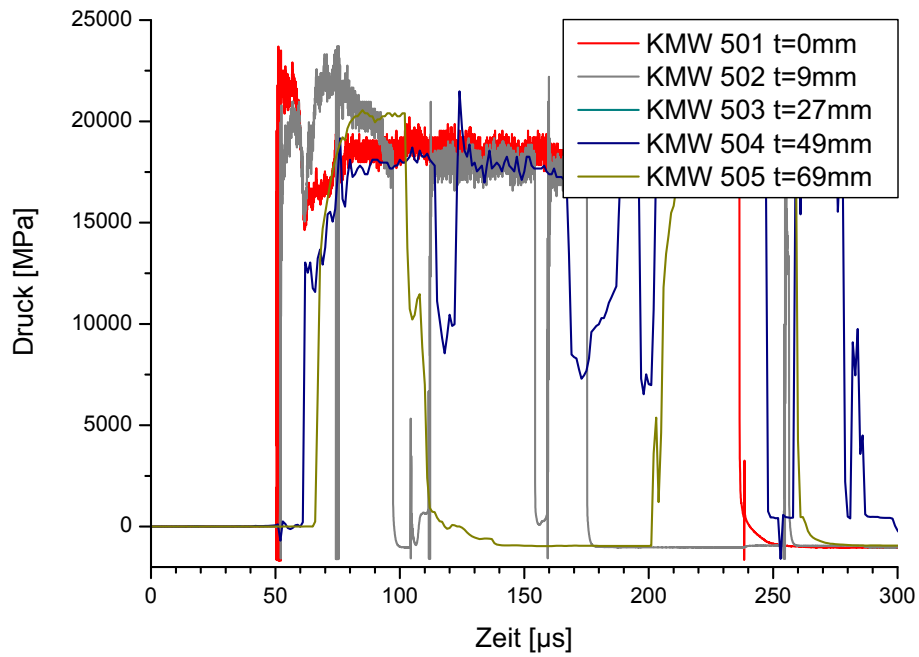


Bild C.30: KMW 501-505 – oberer Druckbereich

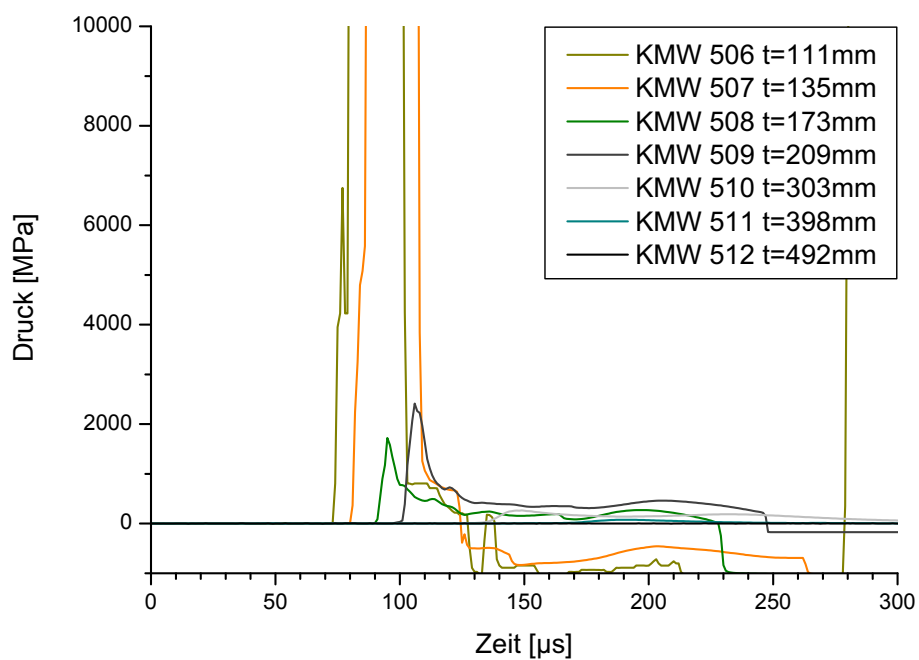


Bild C.31: KMW 506-512 – unterer Druckbereich

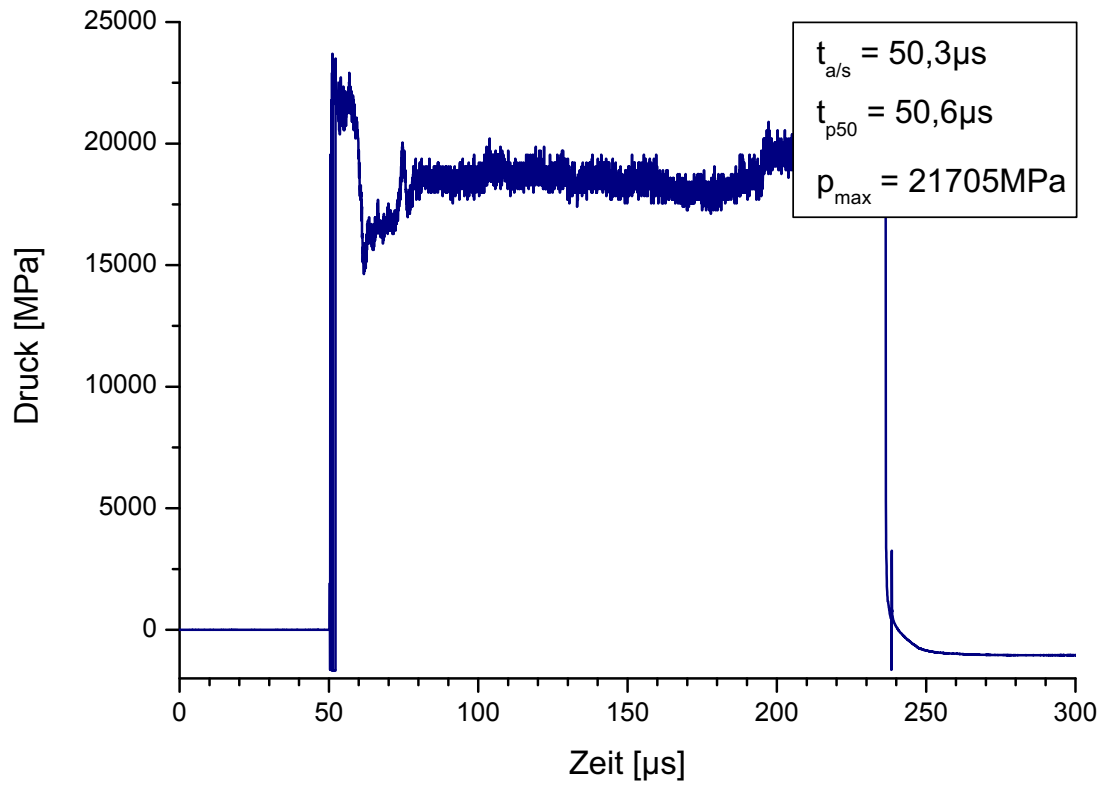


Bild C.32: KMW 501, Einbautiefe 0 mm

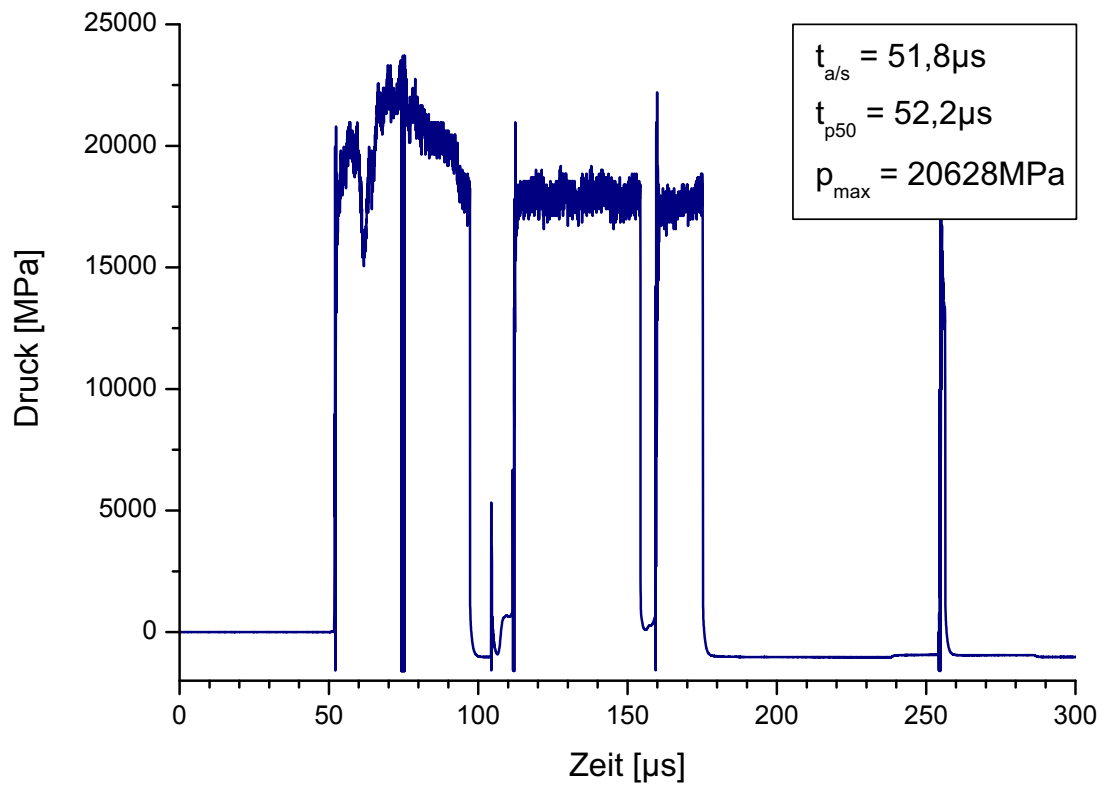


Bild C.33: KMW 502, Einbautiefe 9 mm

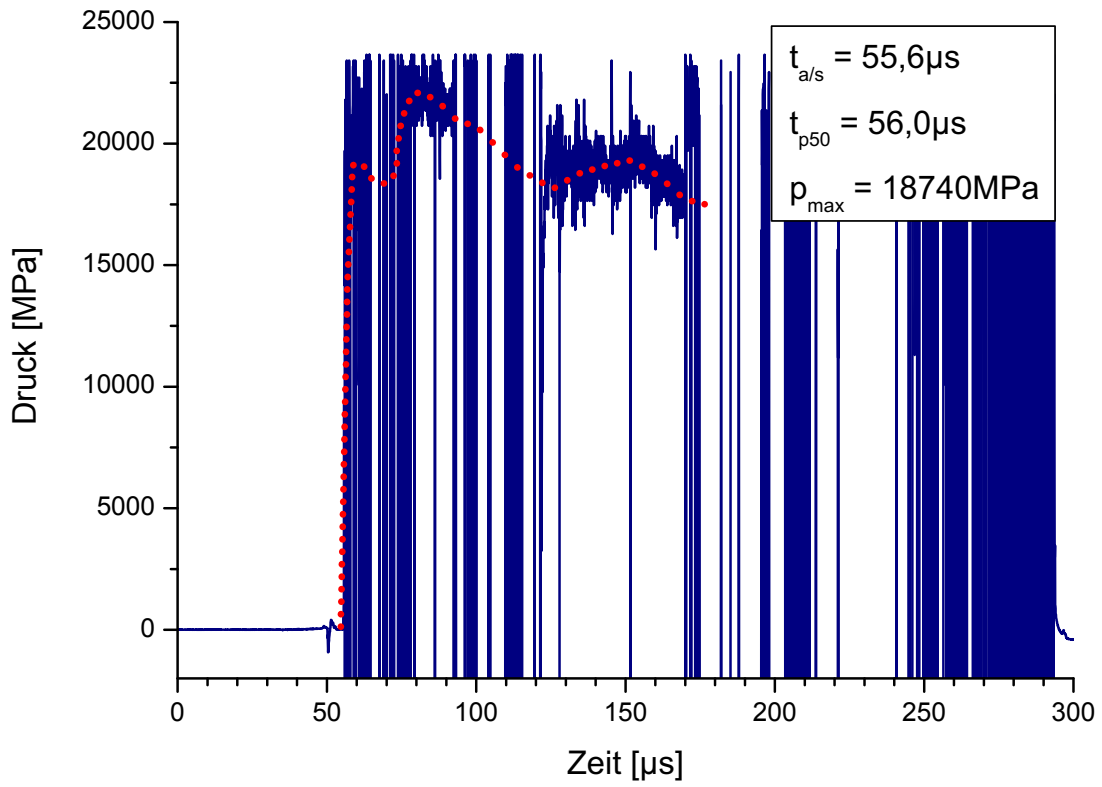


Bild C.34: KMW 503, Einbautiefe 27 mm

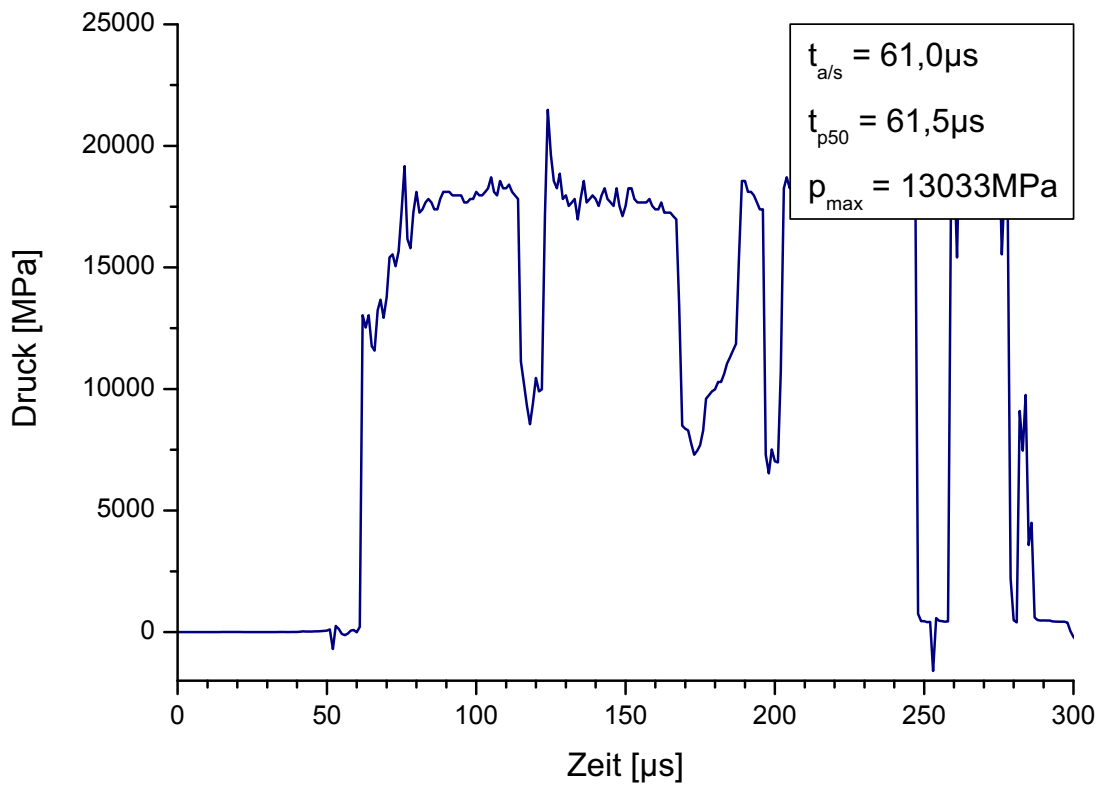


Bild C.35: KMW 504, Einbautiefe 49 mm

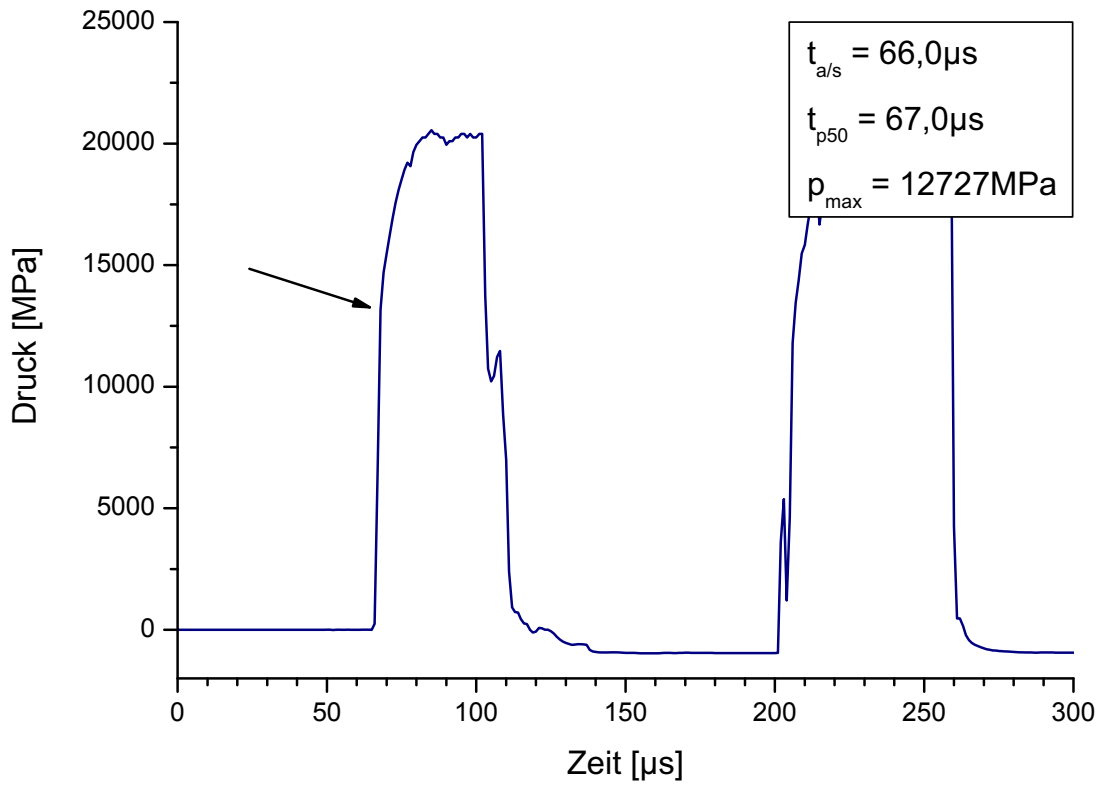


Bild C.36: KMW 505, Einbautiefe 69 mm

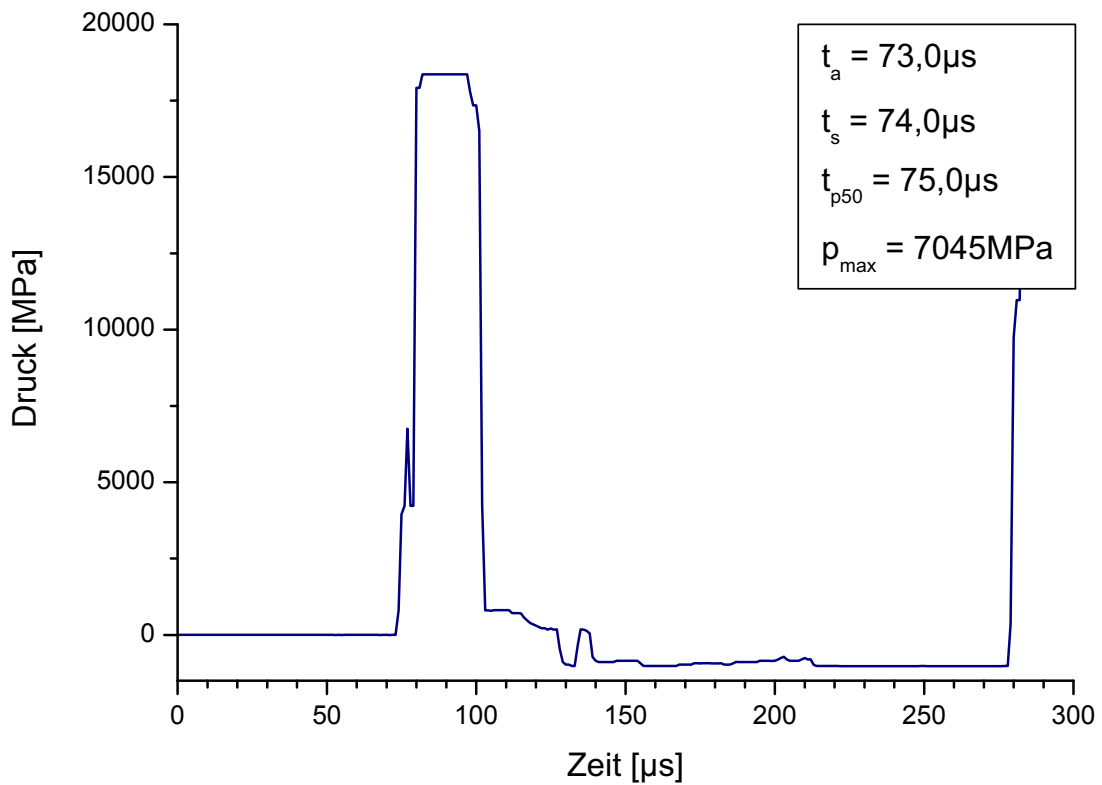


Bild C.37: KMW 506, Einbautiefe 111 mm

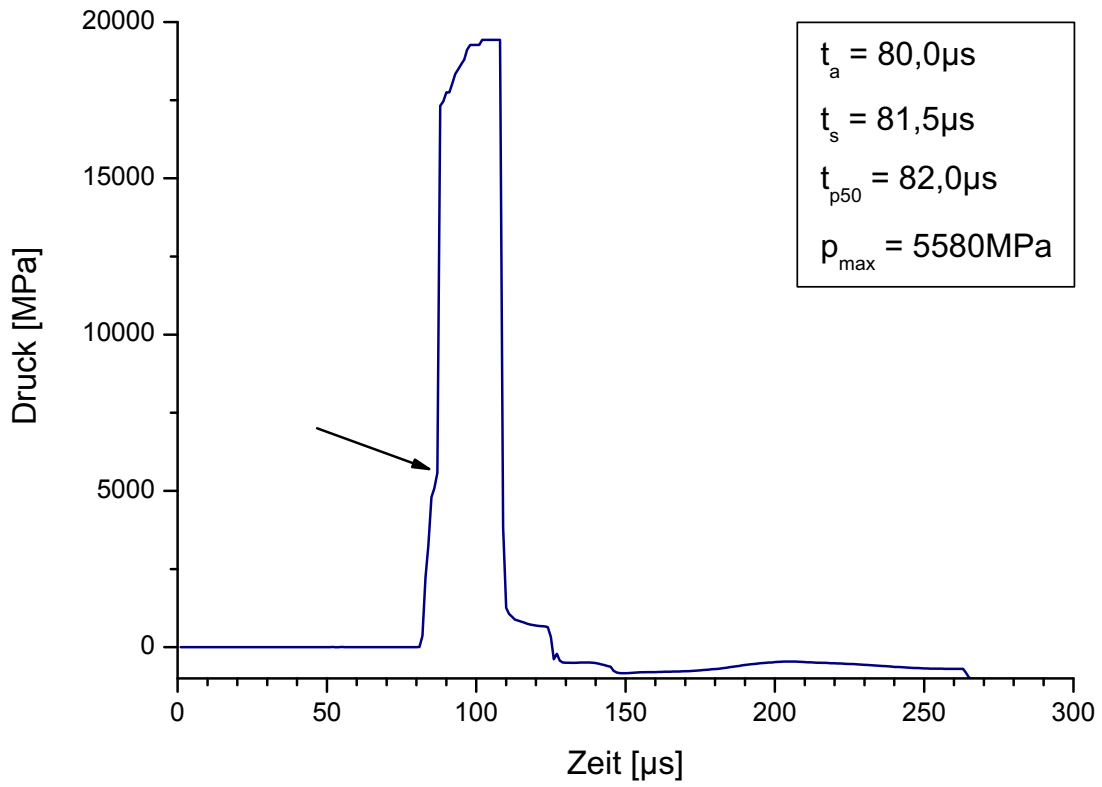


Bild C.38: KMW 507, Einbautiefe 135 mm

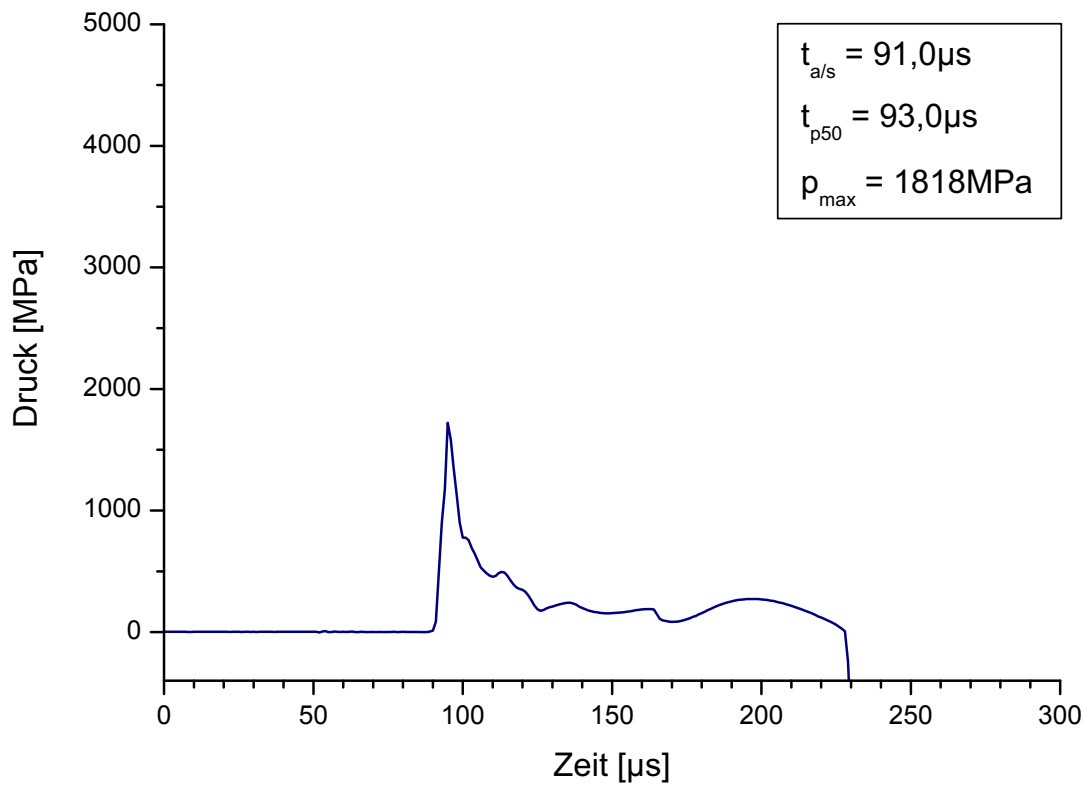


Bild C.39: KMW 508, Einbautiefe 173 mm

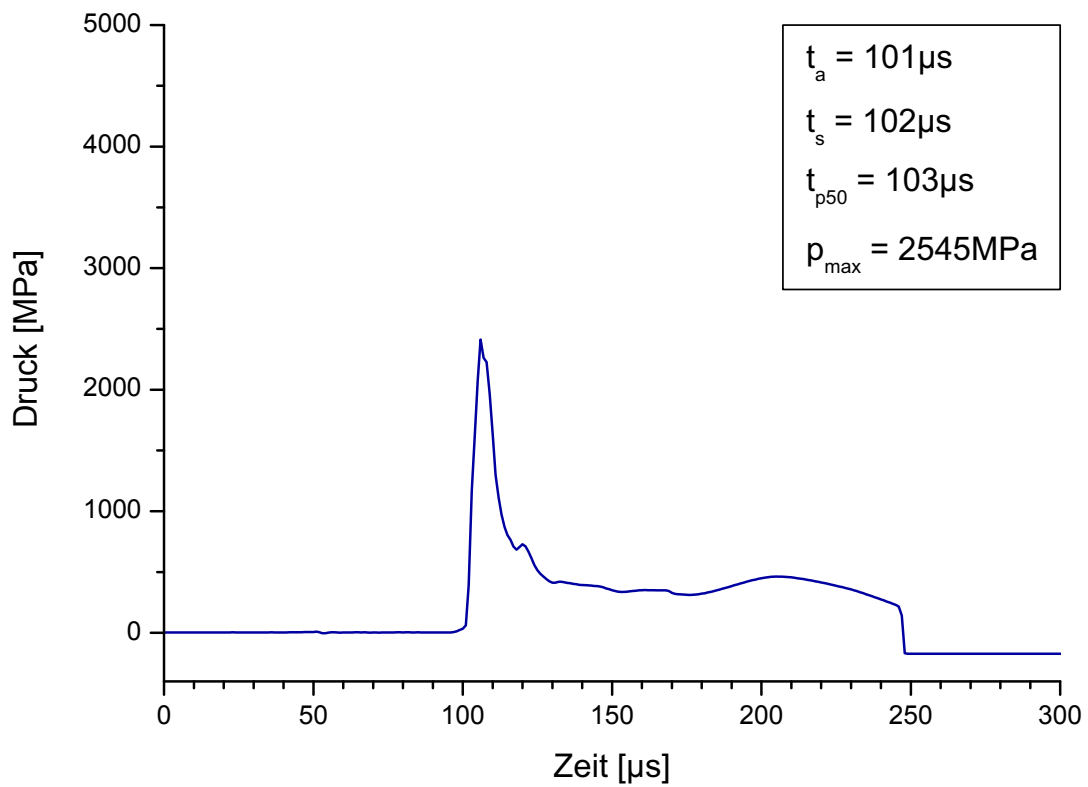


Bild C.40: KMW 509, Einbautiefe 209 mm

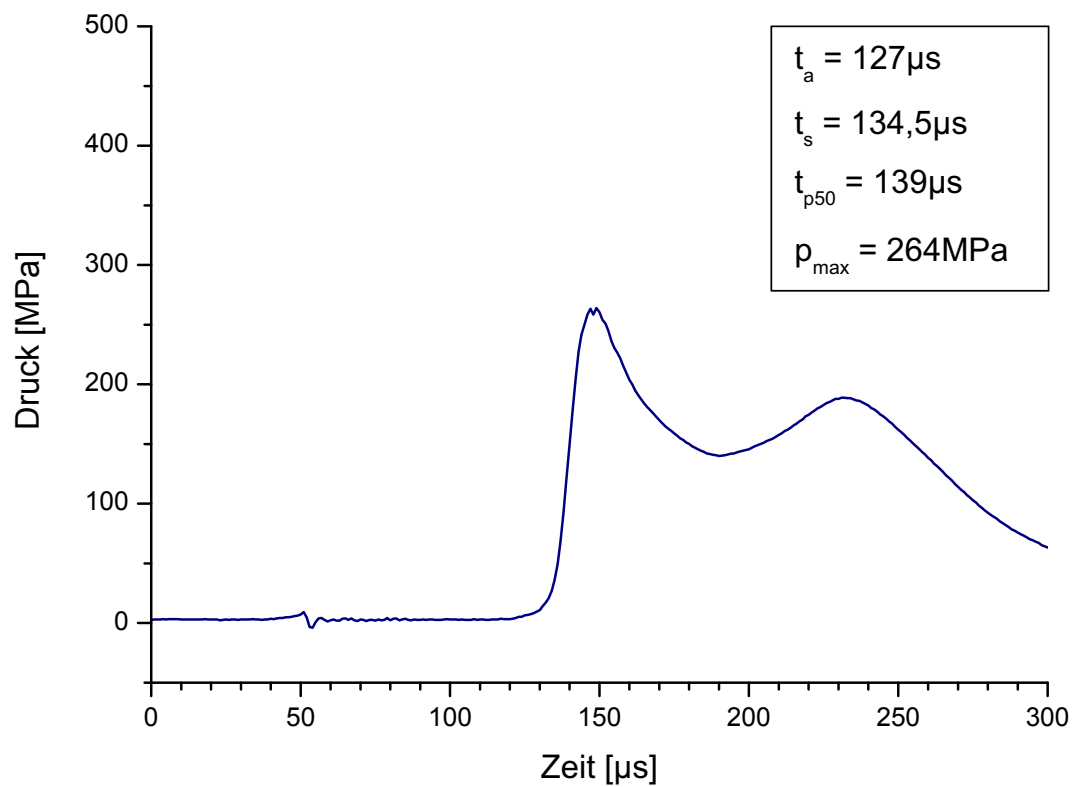


Bild C.41: KMW 510, Einbautiefe 303 mm

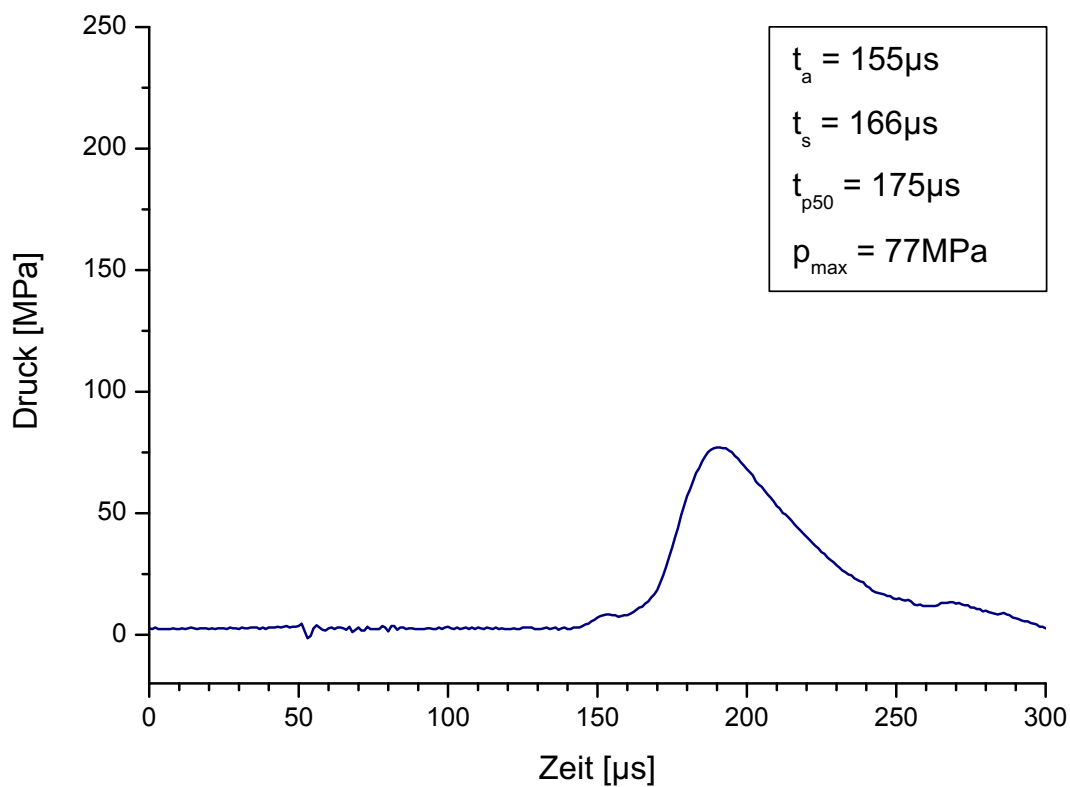


Bild C.42: KMW 511, Einbautiefe 398 mm

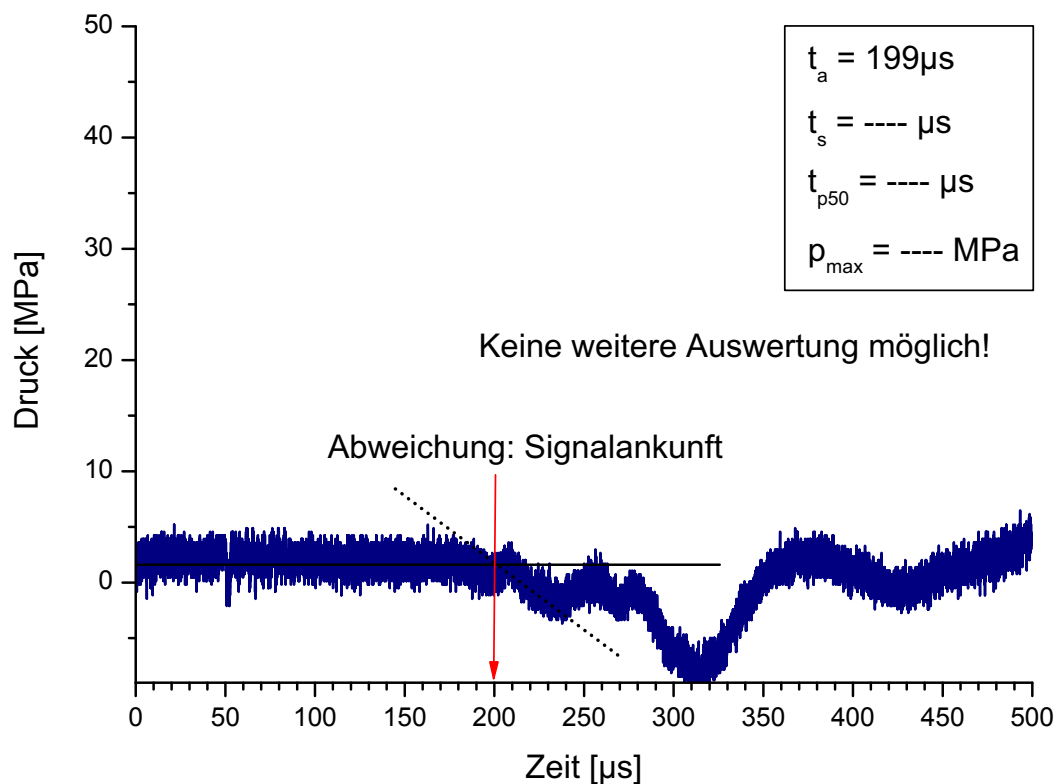


Bild C.43: KMW 512, Einbautiefe 492 mm

Versuch Nr. 6 – große Ladung

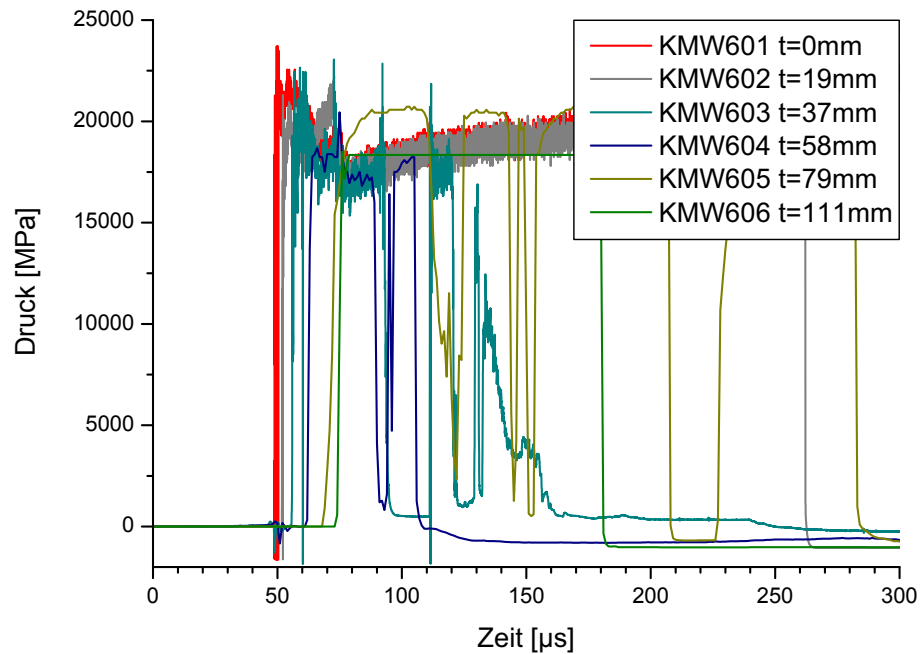


Bild C.44: KMW Versuch Nr. 6, oberer Druckbereich; KMW 601-605

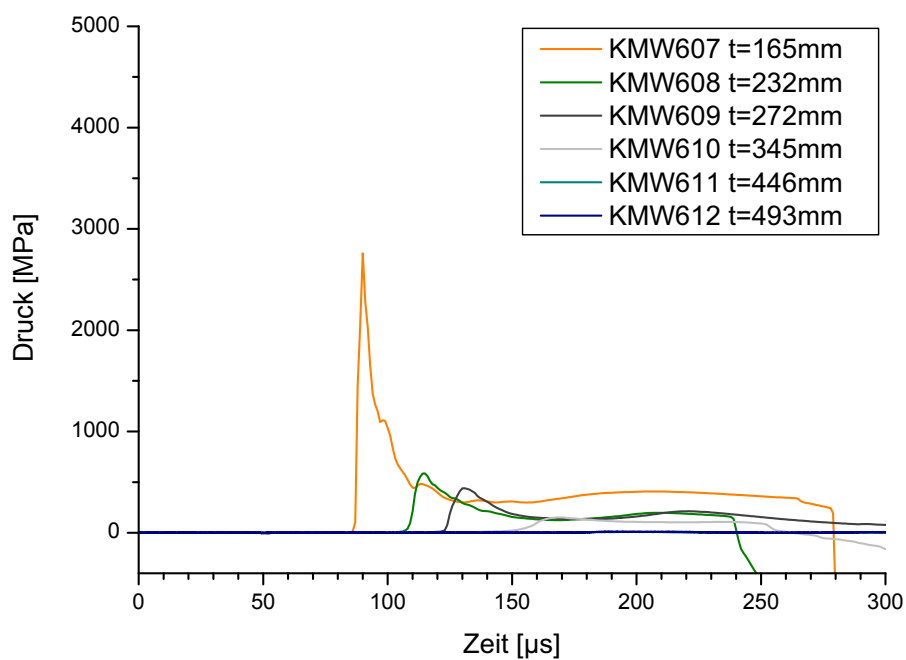


Bild C.45: KMW Versuch Nr. 6, unterer Druckbereich; KMW 606-612

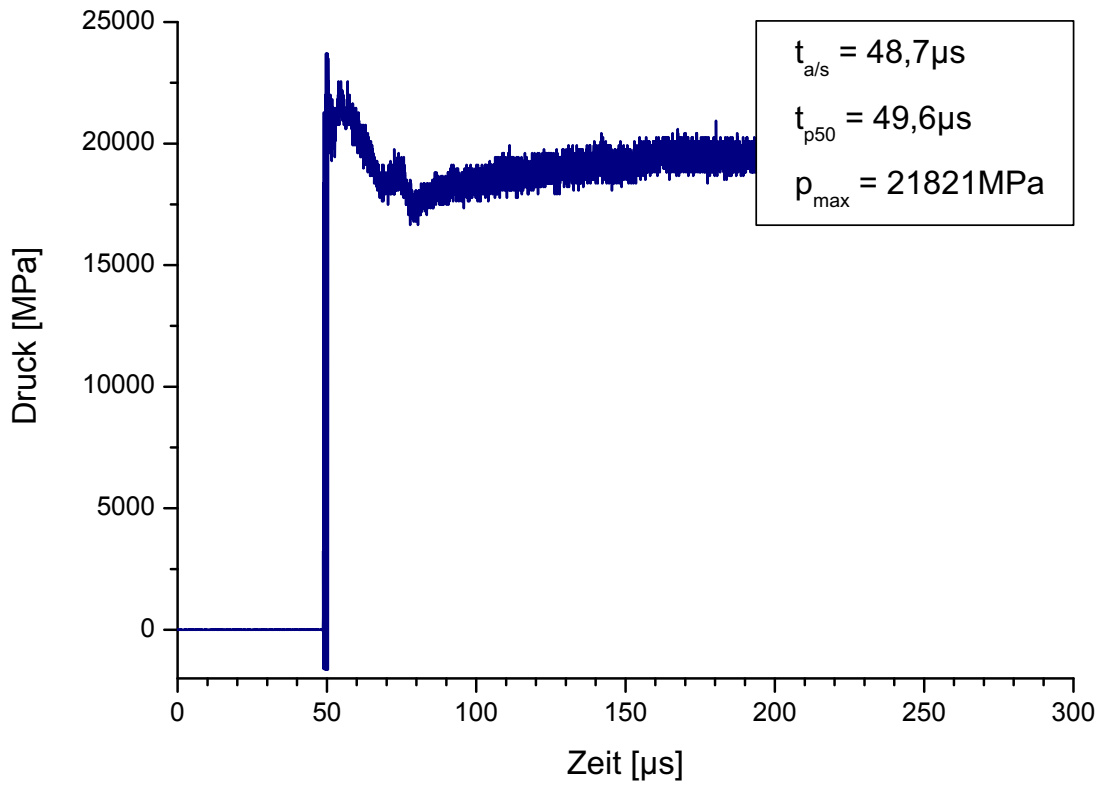


Bild C.46: KMW 601, Einbautiefe 0 mm

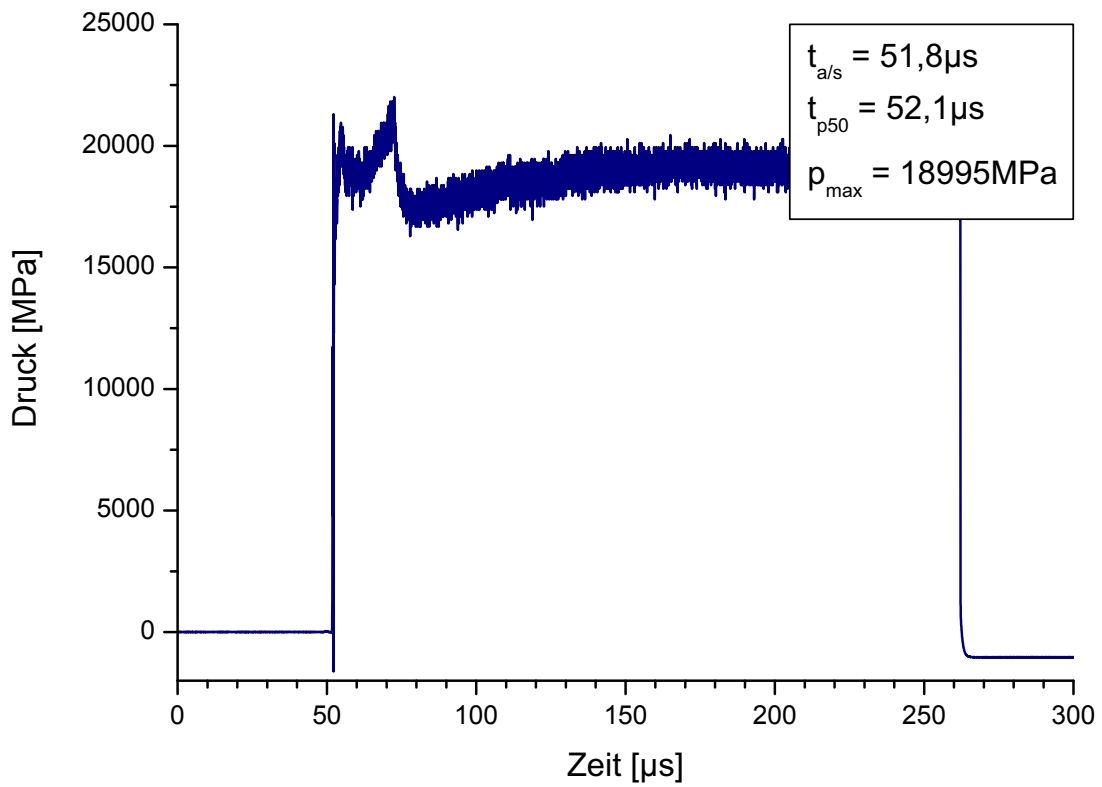


Bild C.47: KMW 602, Einbautiefe 19 mm

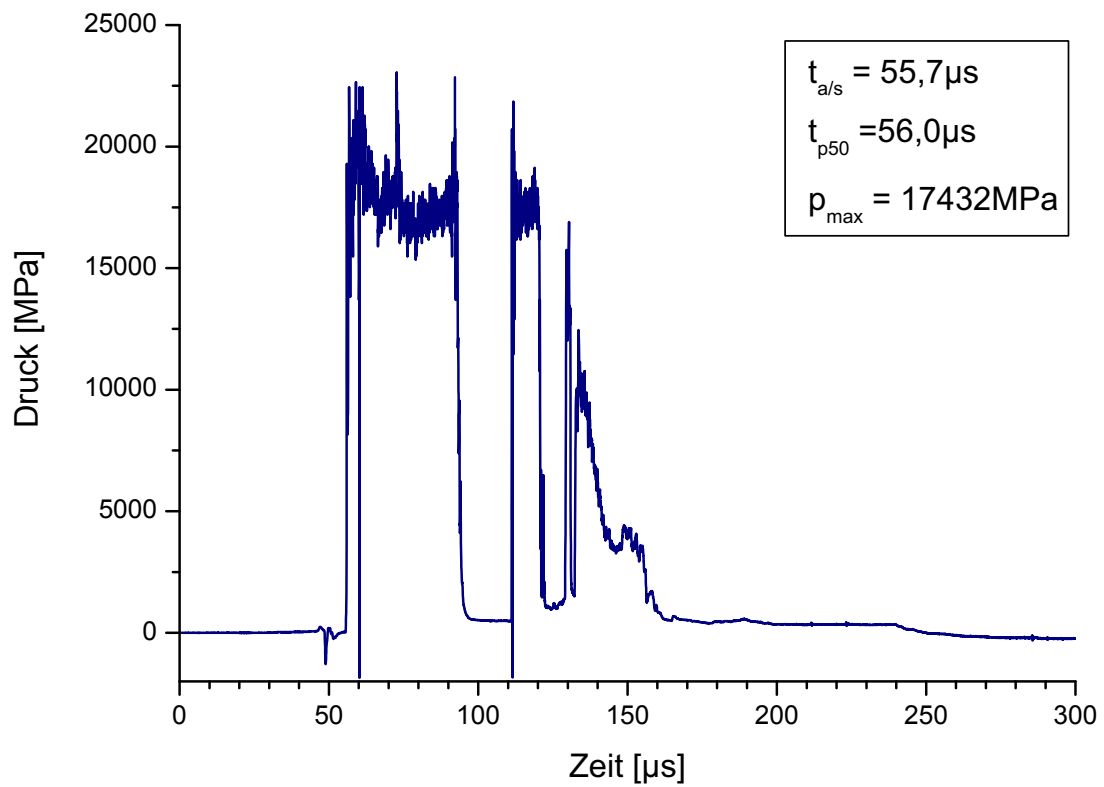


Bild C.48: KMW 603, Einbautiefe 37 mm

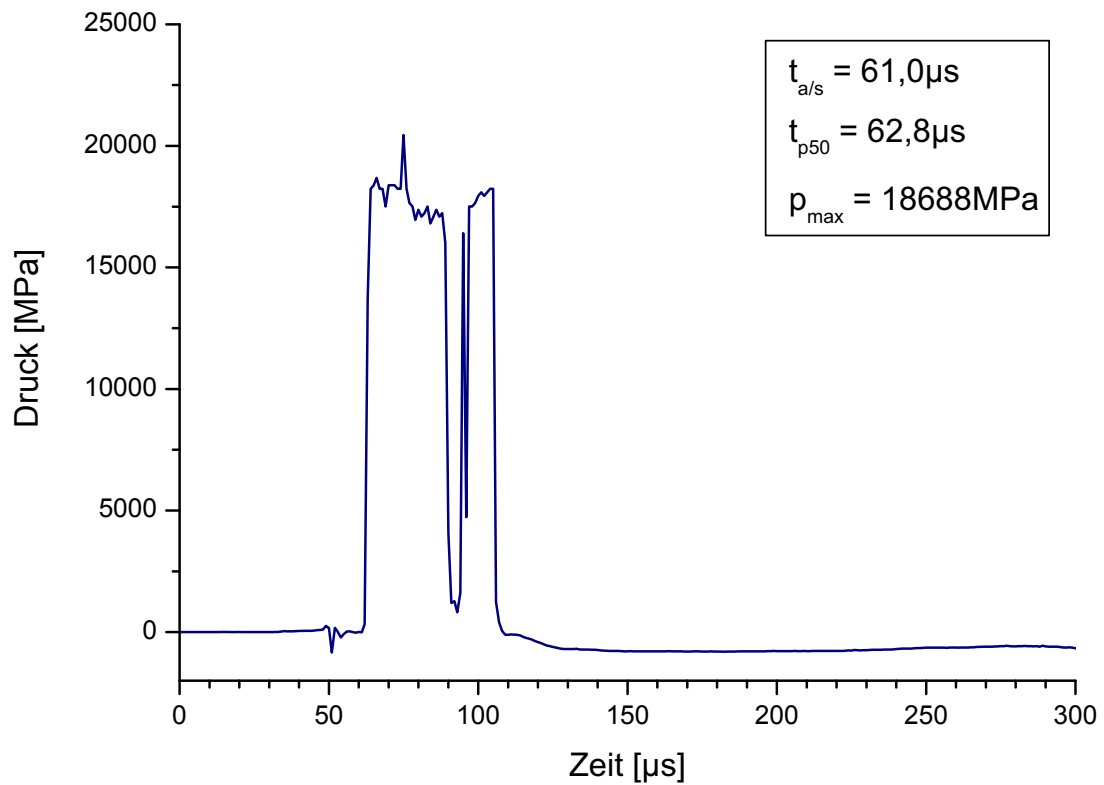


Bild C.49: KMW 604, Einbautiefe 58 mm

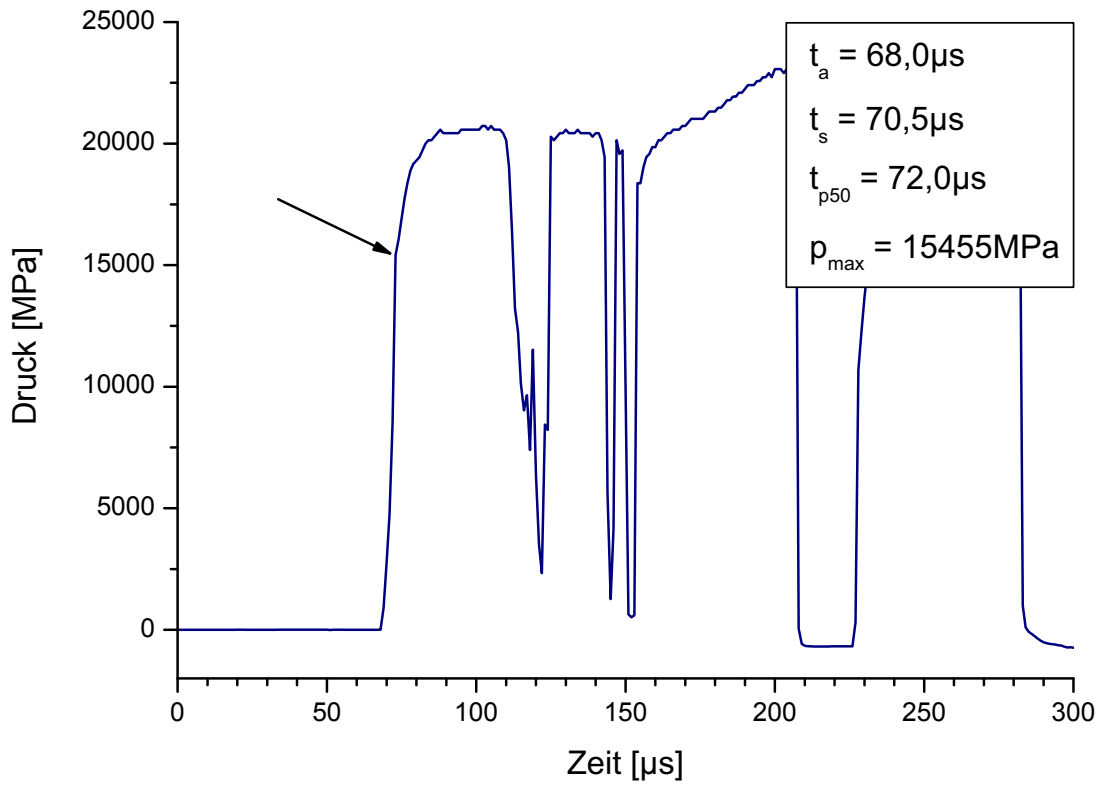


Bild C.50: KMW 605, Einbautiefe 79 mm

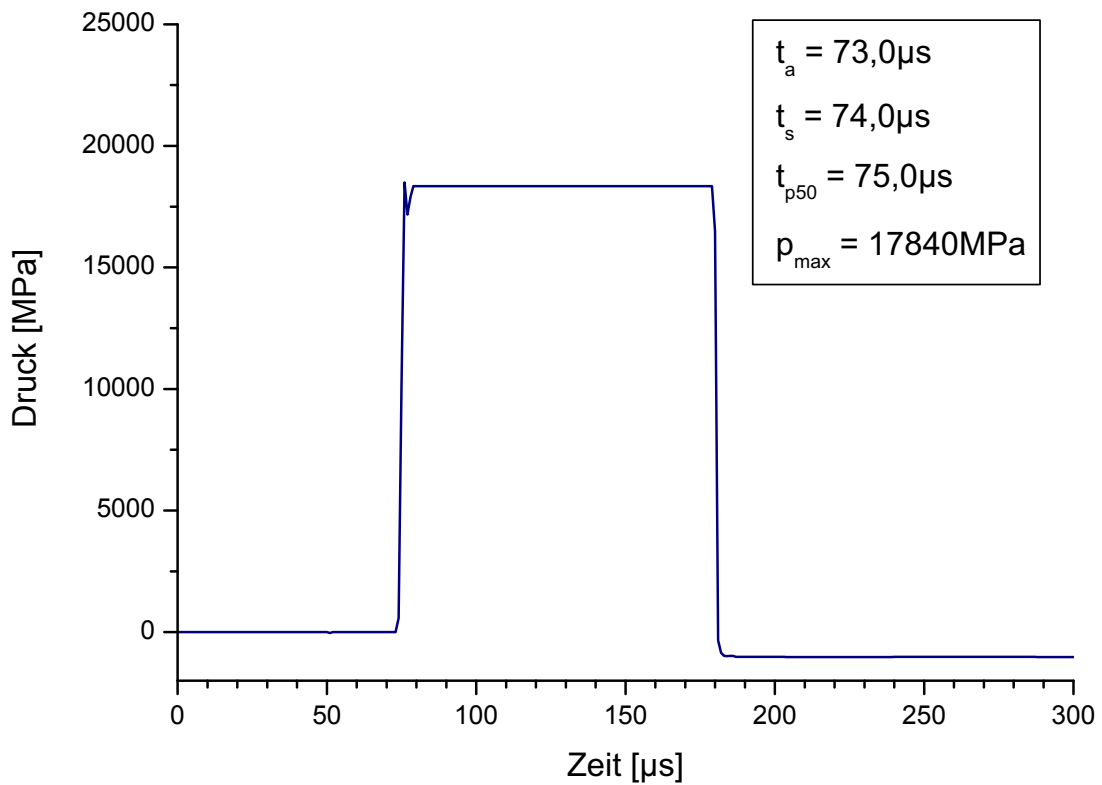


Bild C.51: KMW 606, Einbautiefe 111 mm

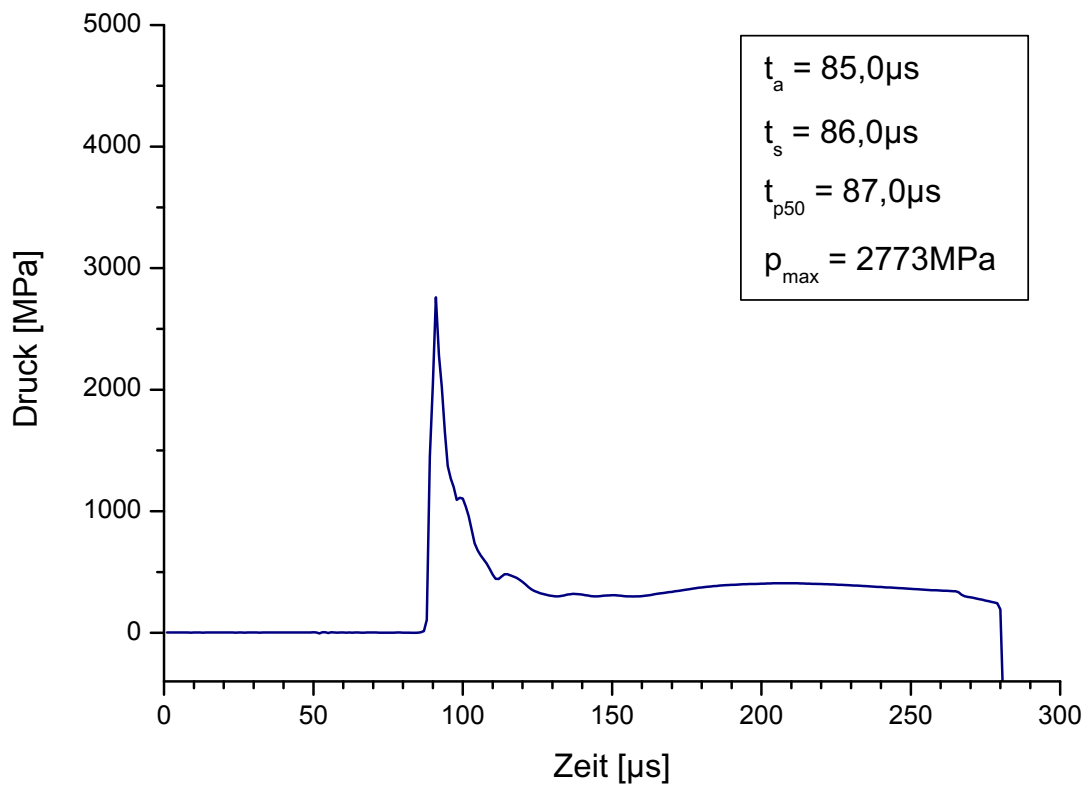


Bild C.52: KMW 607, Einbautiefe 156 mm

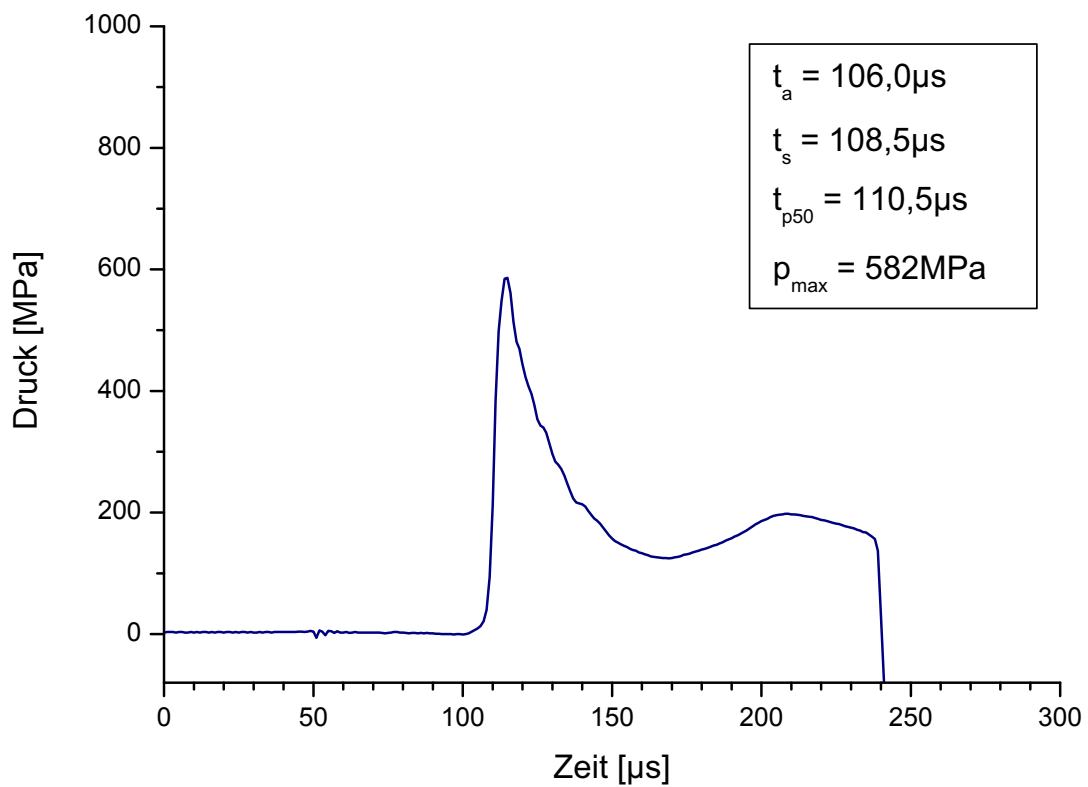


Bild C.53: KMW 608, Einbautiefe 232 mm

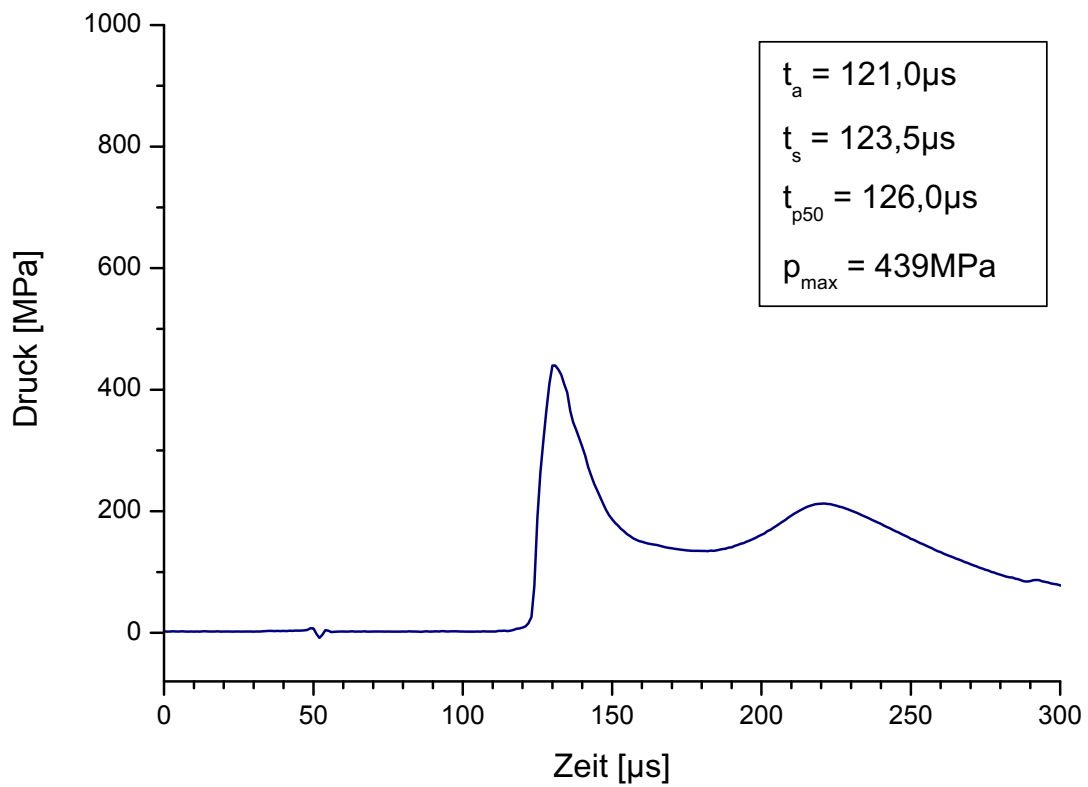


Bild C.54: KMW 609, Einbautiefe 272 mm

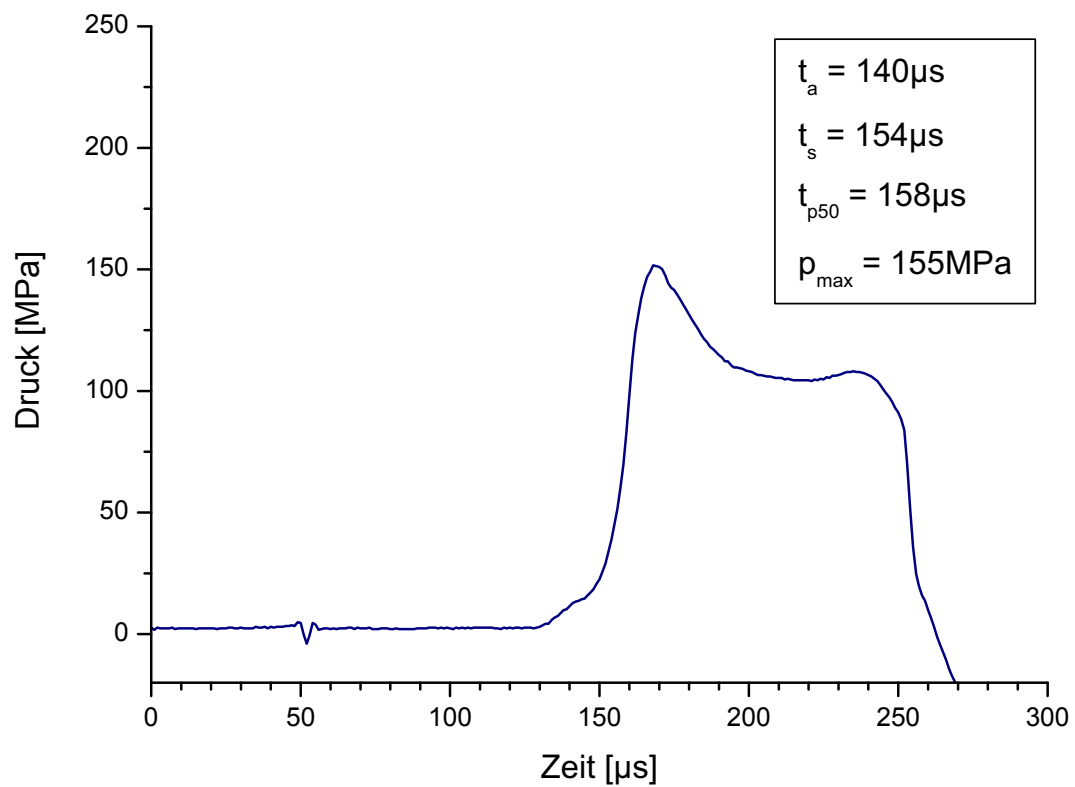


Bild C.55: KMW 610, Einbautiefe 345 mm

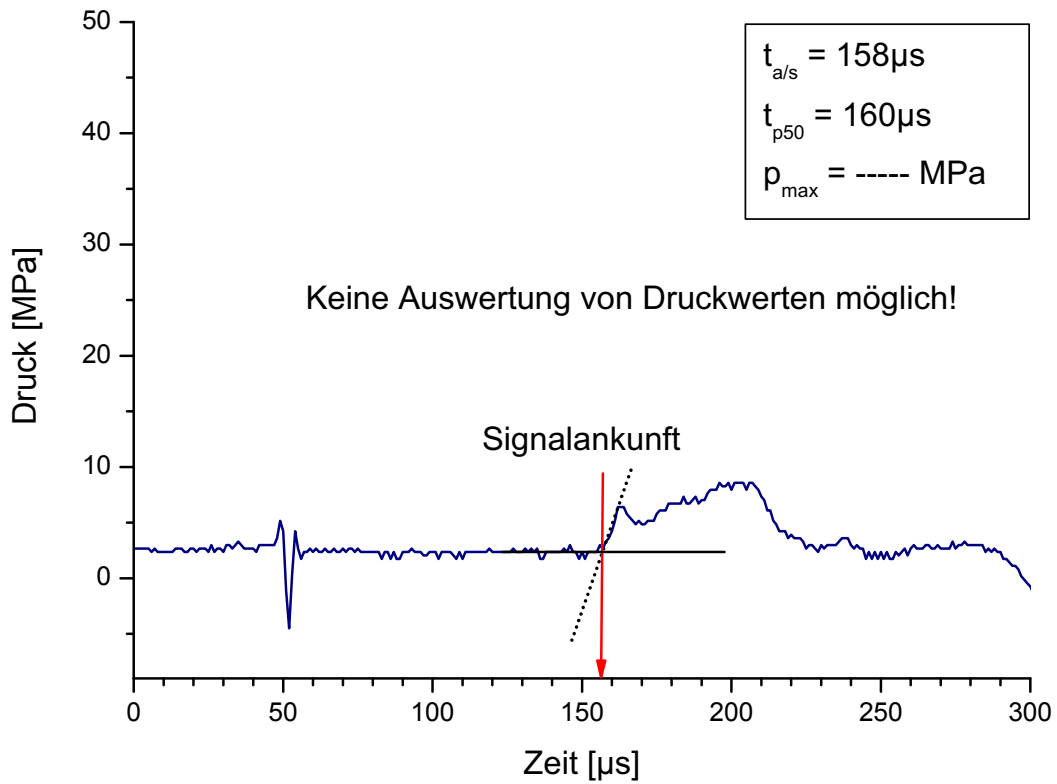


Bild C.56: KMW 611, Einbautiefe 446 mm

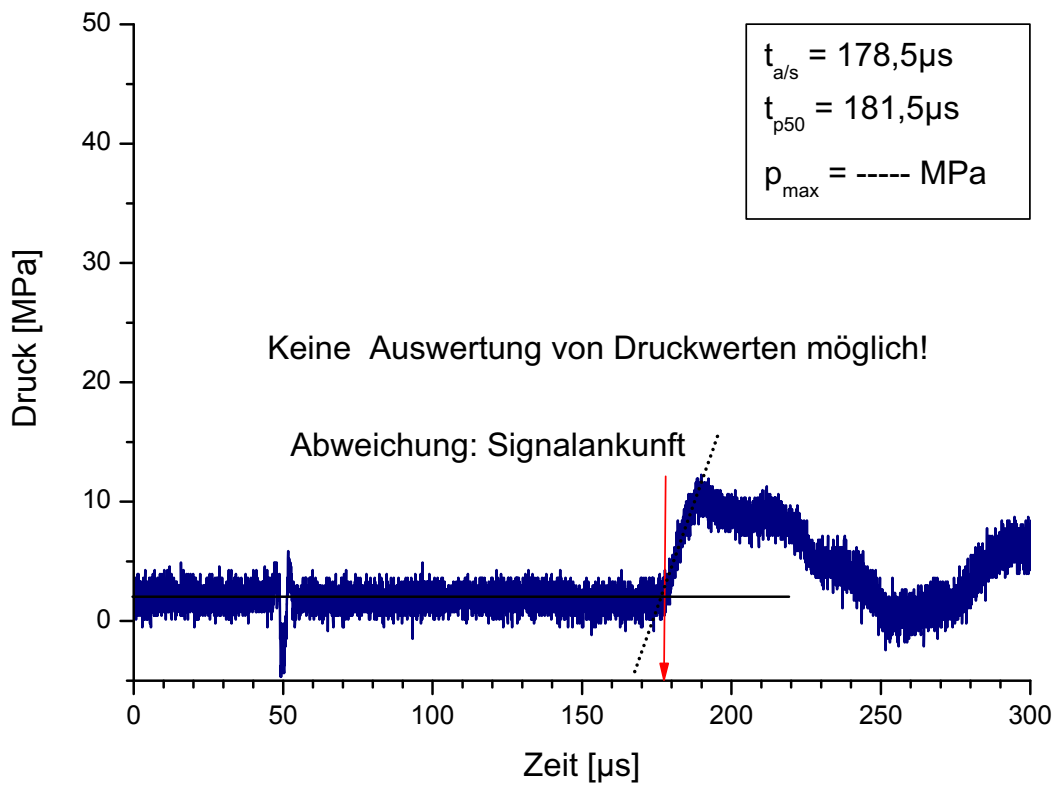


Bild C.57: KMW 612, Einbautiefe 493 mm

Versuch Nr. 7 – kleine Ladung

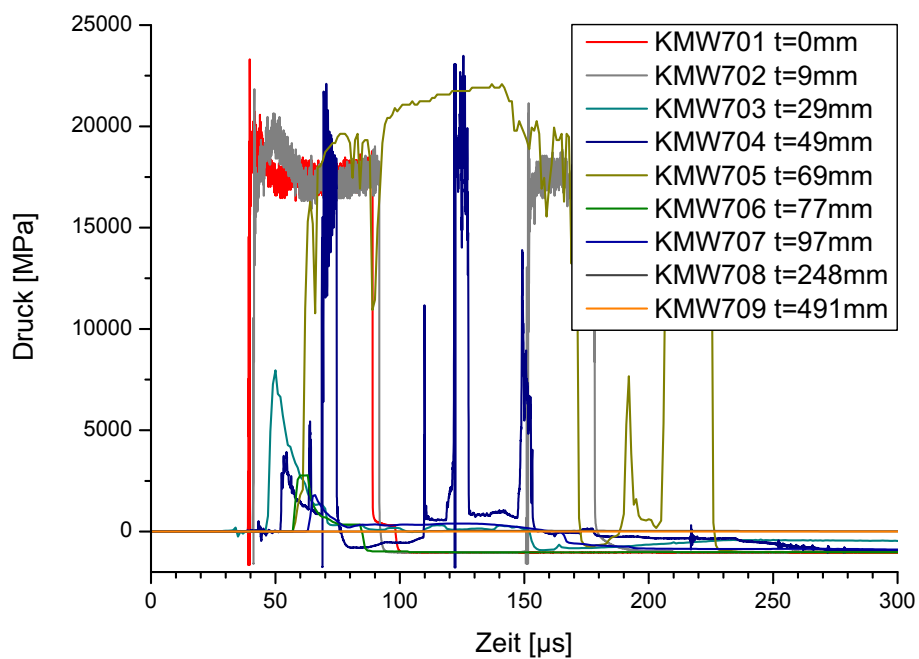


Bild C.58: KMW Versuch Nr. 7, KMW 701-708

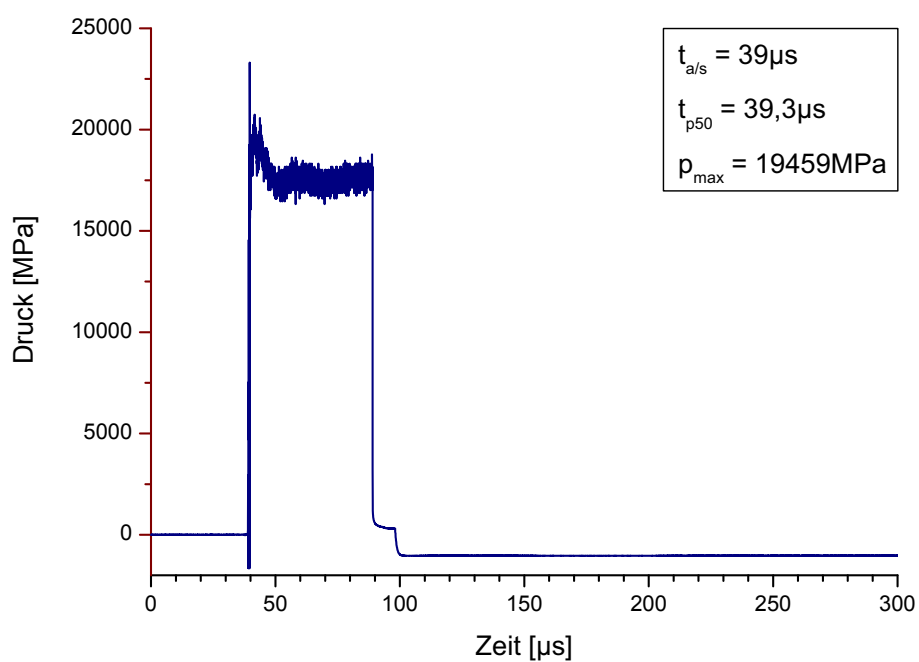


Bild C.59: KMW 701, Einbautiefe 0 mm

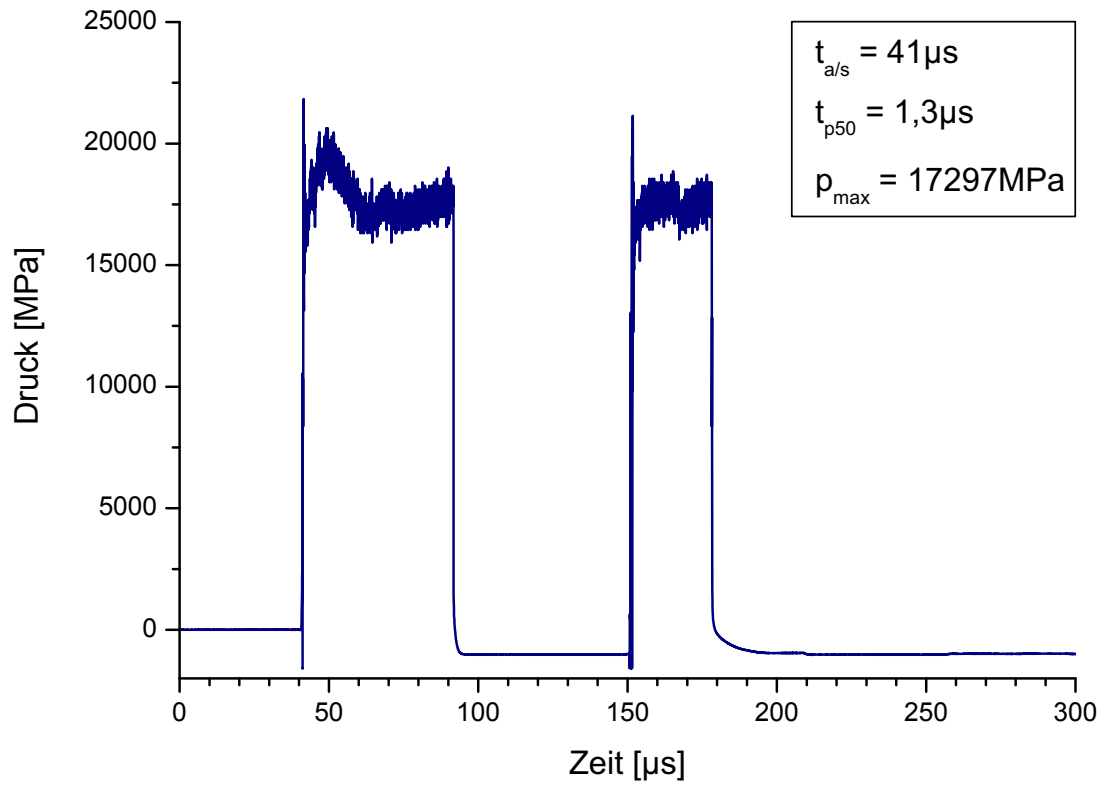


Bild C.60: KMW 702, Einbautiefe 9 mm

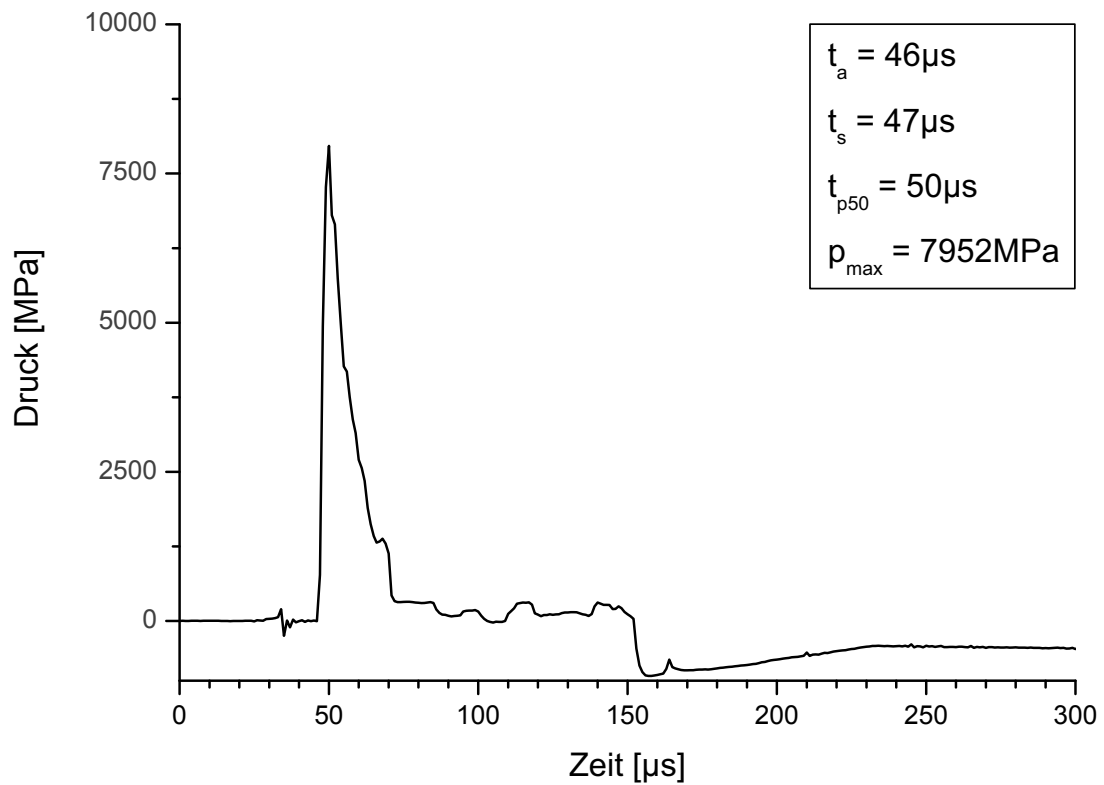


Bild C.61: KMW 703, Einbautiefe 29 mm

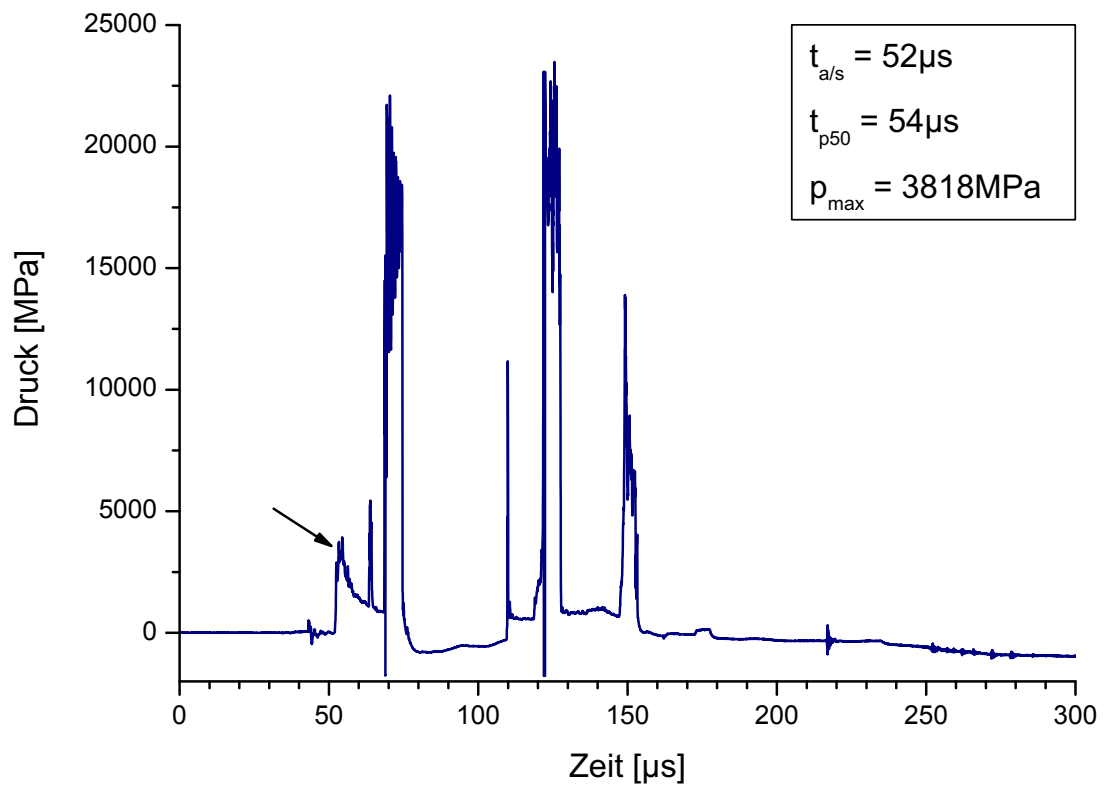


Bild C.62: KMW 704, Einbautiefe 49 mm

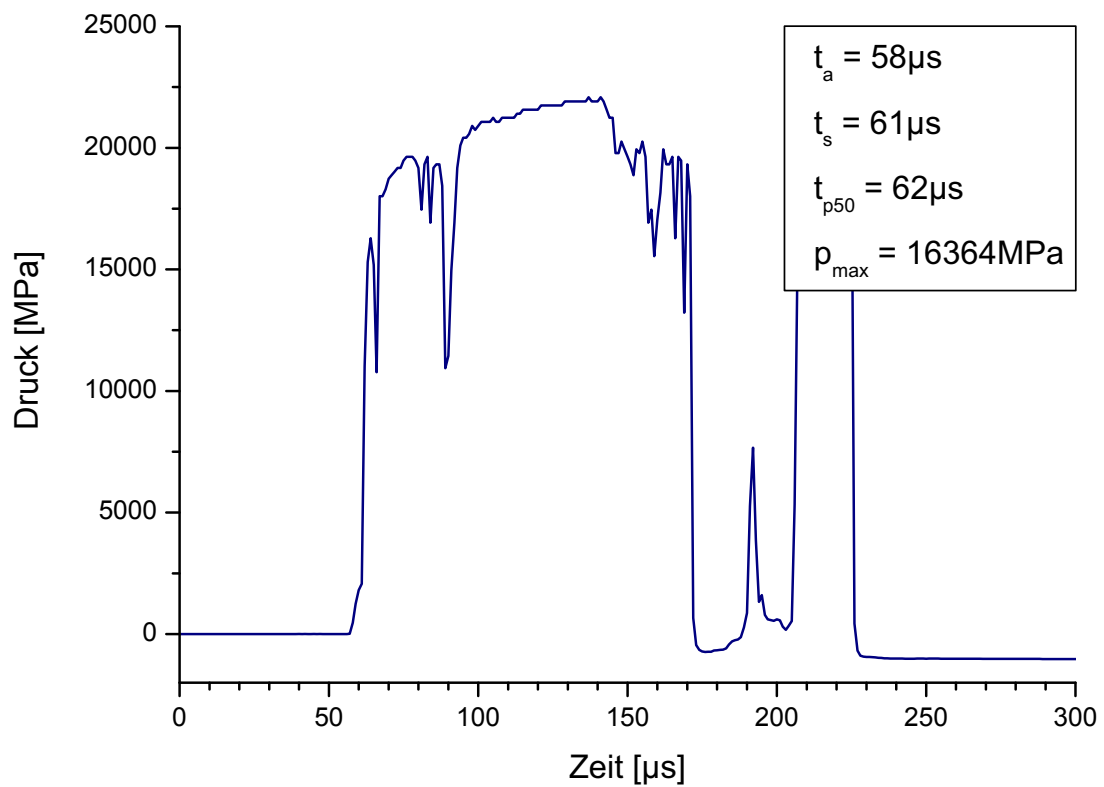


Bild C.63: KMW 705, Einbautiefe 69 mm

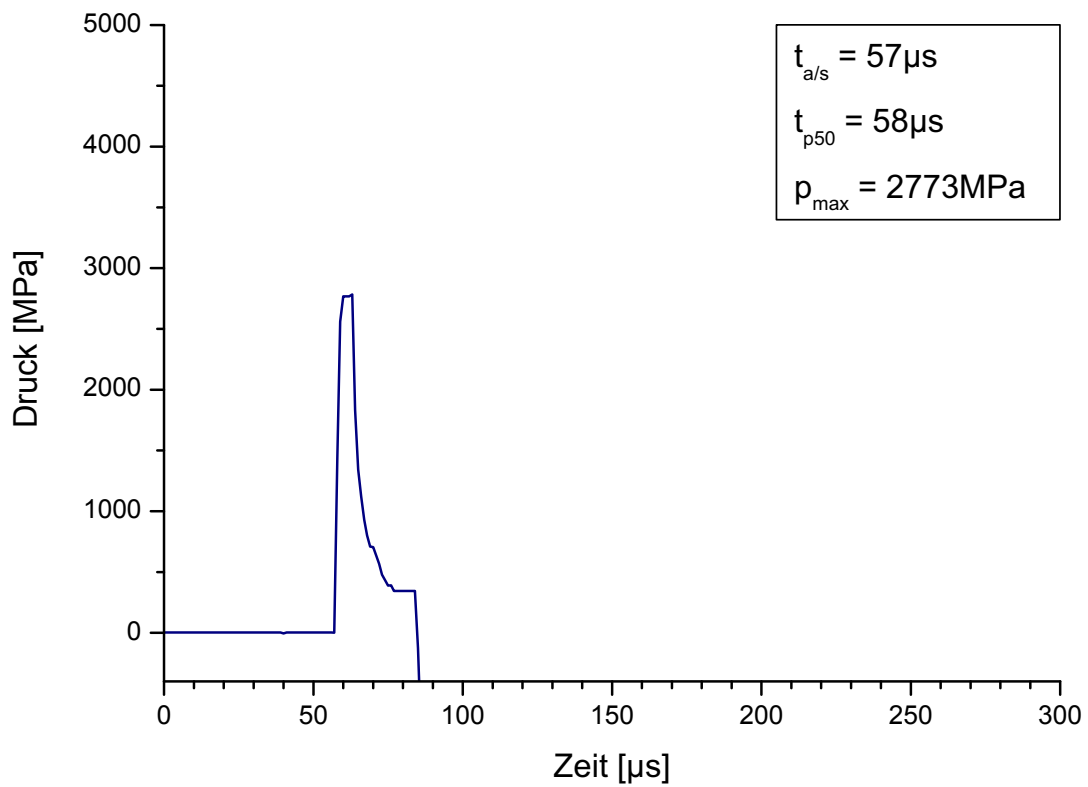


Bild C.64: KMW 706, Einbautiefe 77 mm

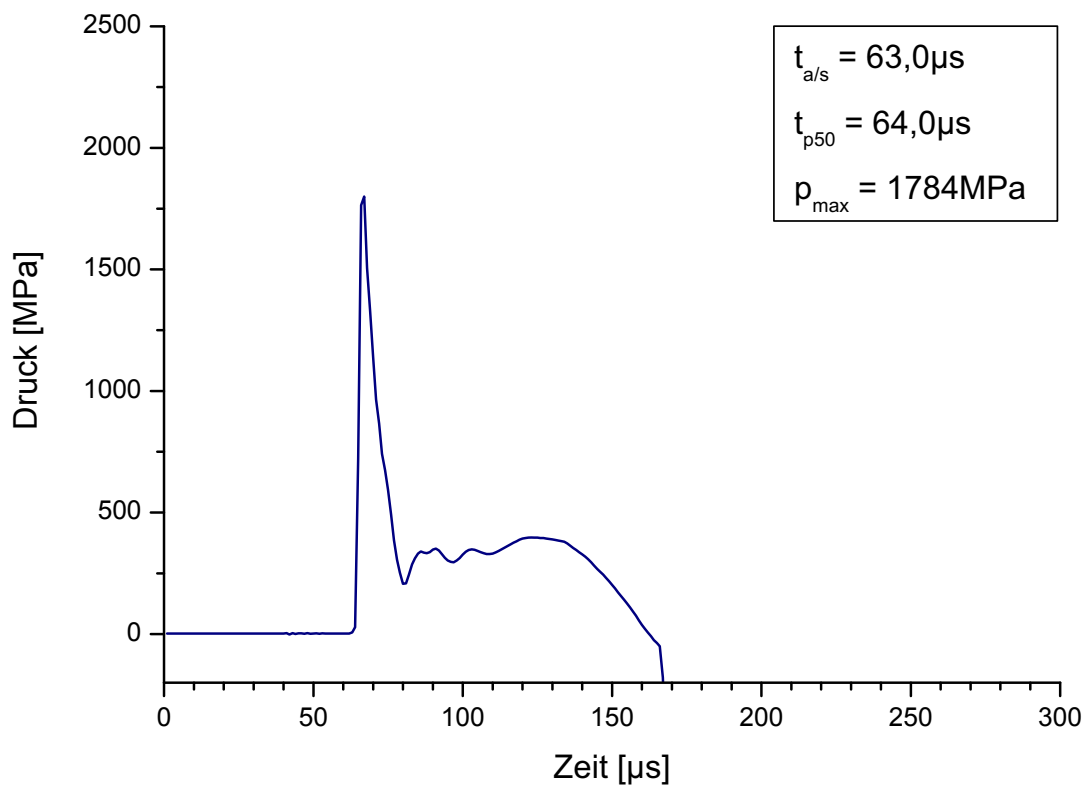


Bild C.65: KMW 707, Einbautiefe 97 mm

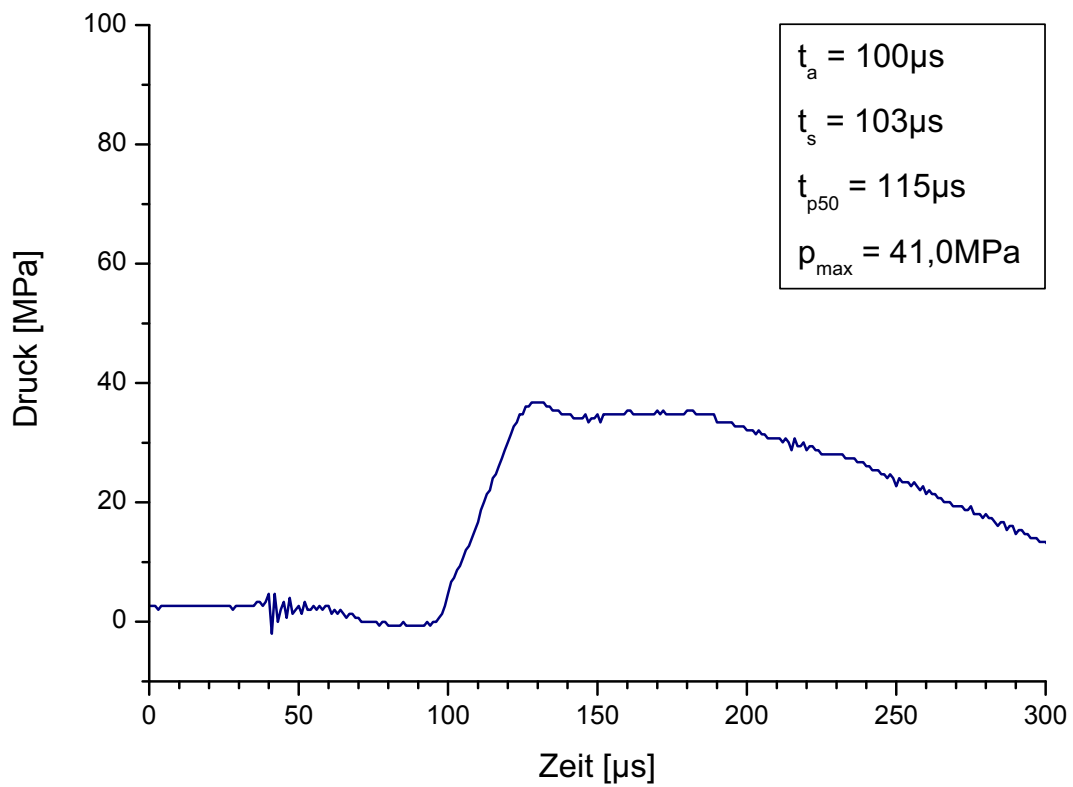


Bild C.66: KMW 708, Einbautiefe 248 mm

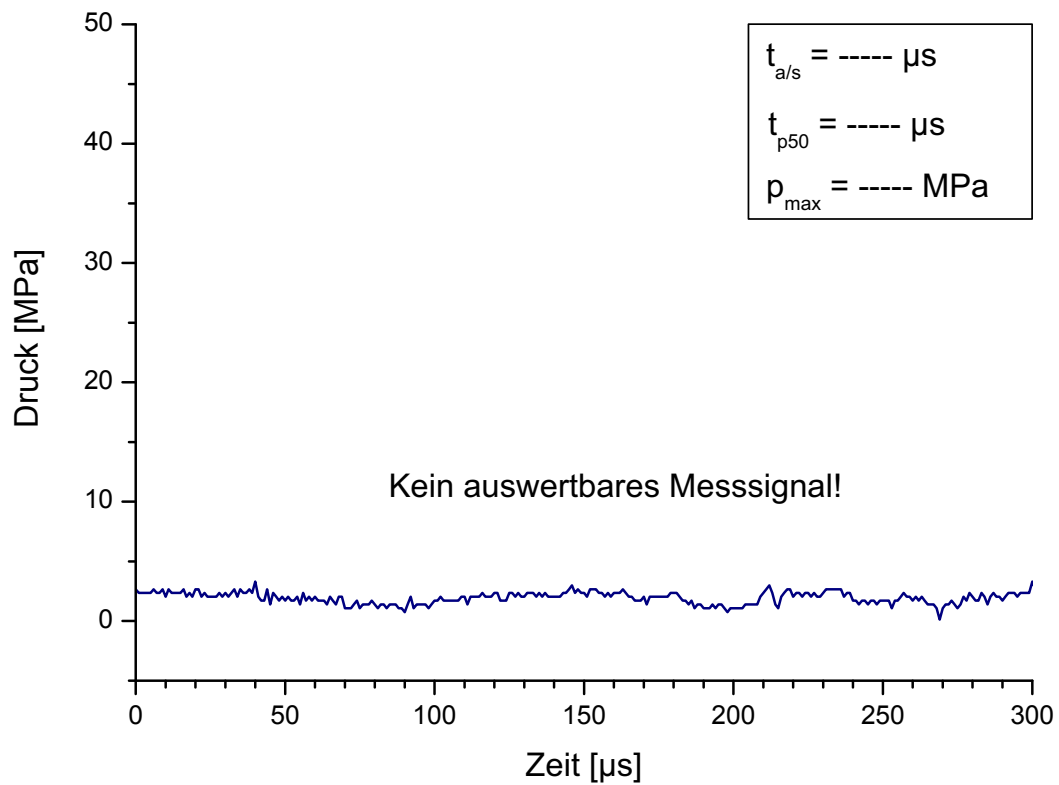


Bild C.67: KMW 709, Einbautiefe 491 mm

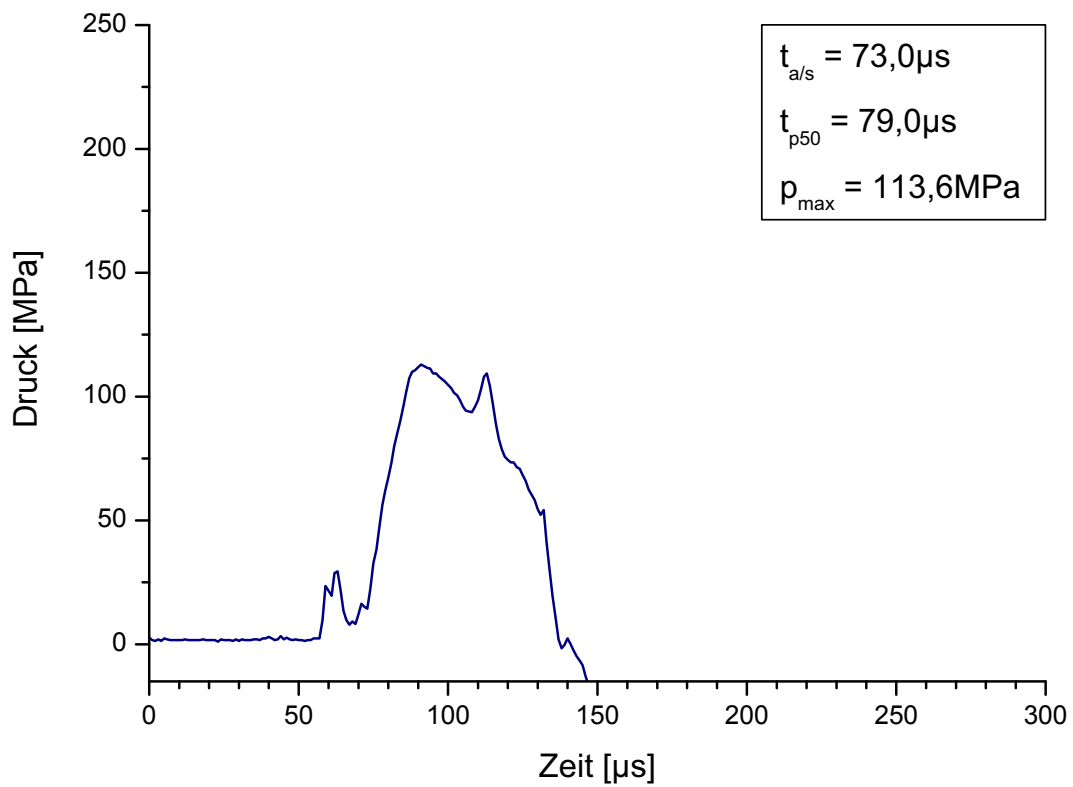


Bild C.68: KMW 710, Einbau R 150 mm

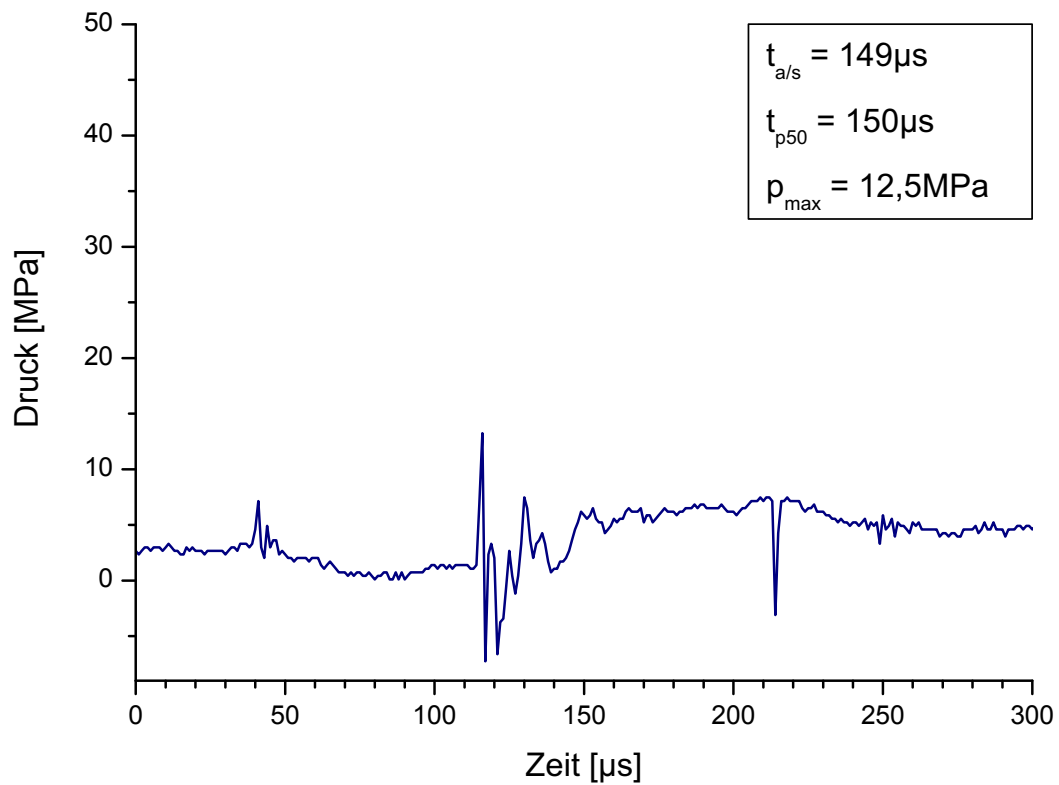


Bild C.69: KMW 711, Einbau R 300 mm

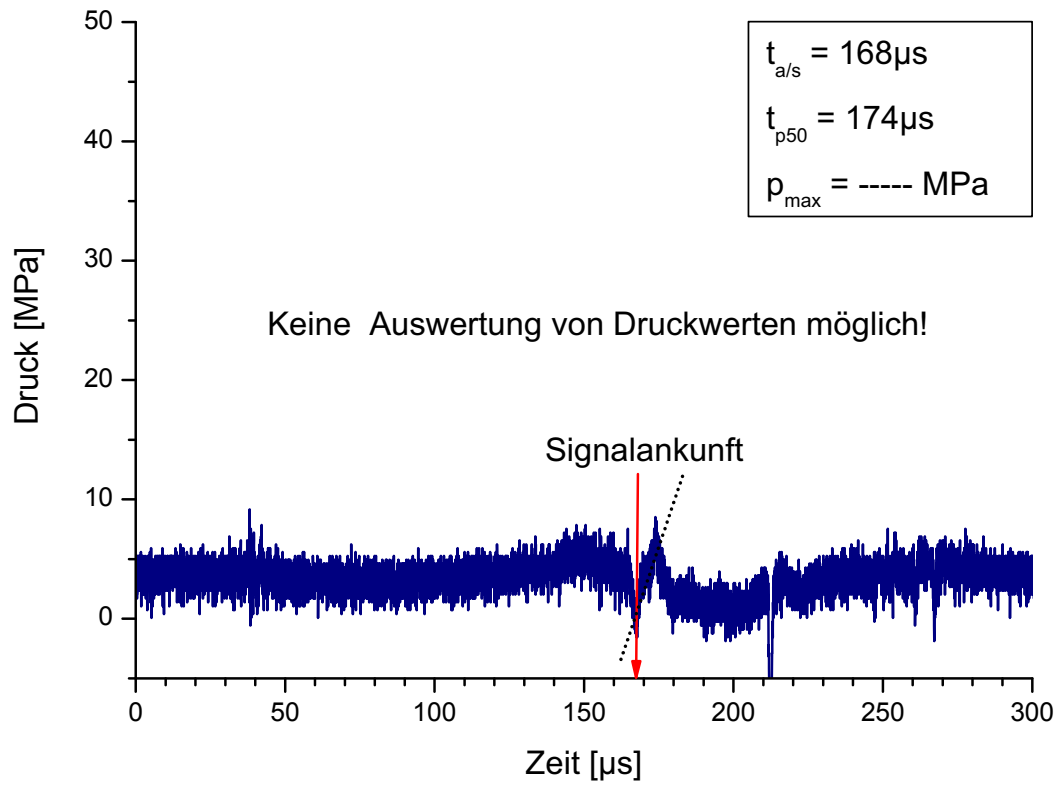


Bild C.70: KMW 712, Einbau R 450 mm

Versuch Nr. 8 – kleine Ladung

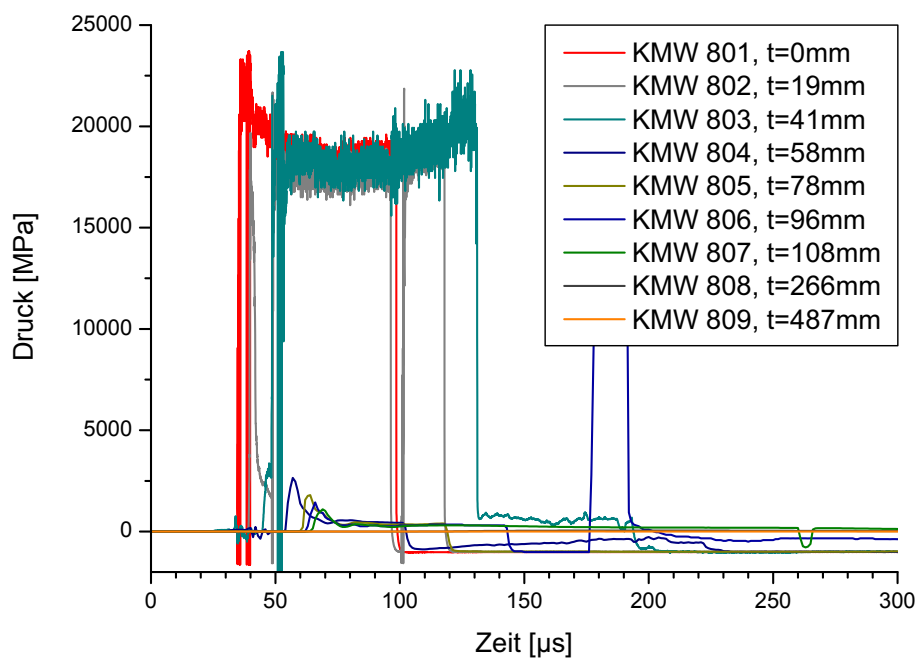


Bild C.71: KMW Versuch Nr. 8, oberer Druckbereich; KMW 801-804

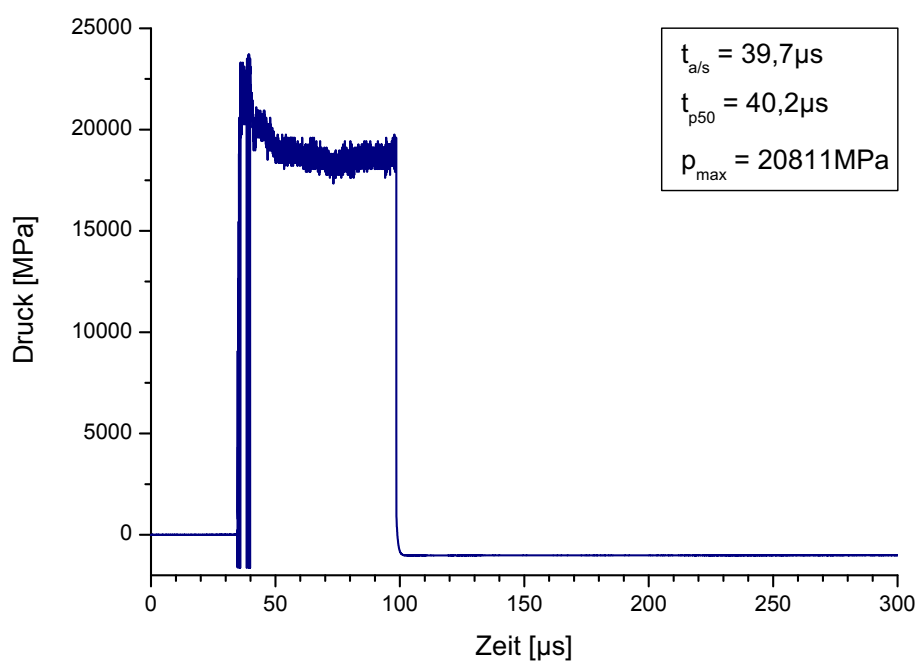


Bild C.72: KMW 801, Einbautiefe 0 mm

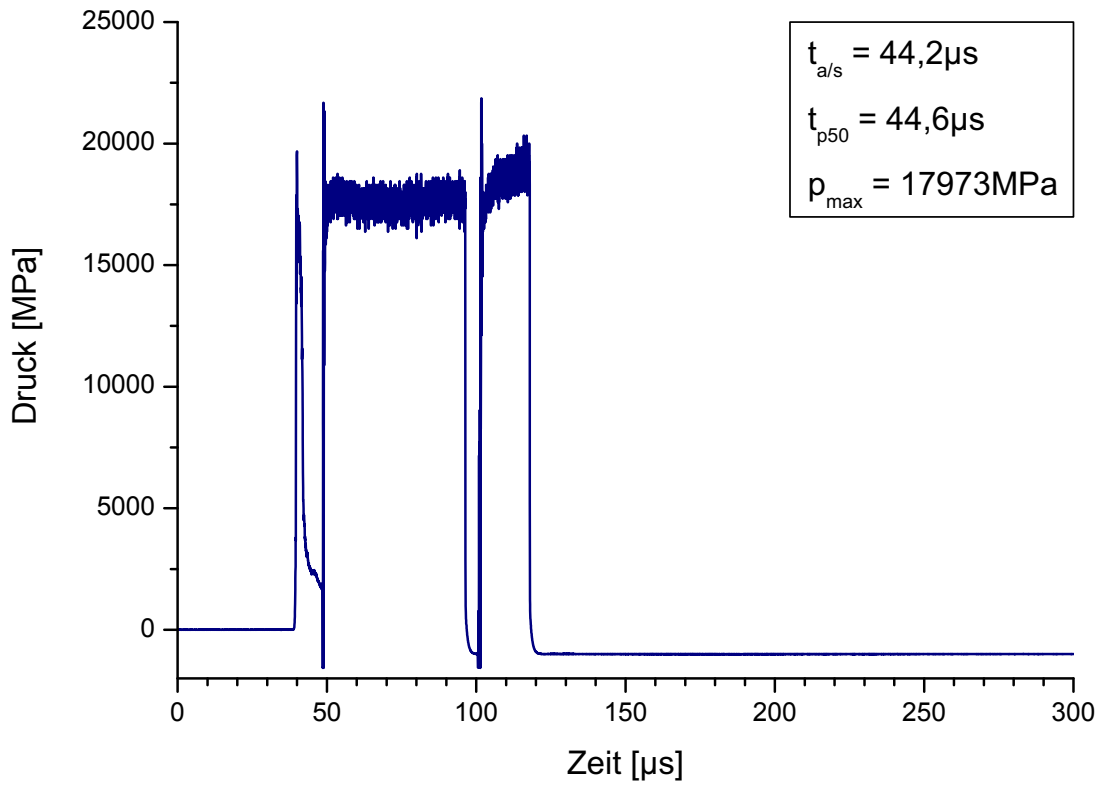


Bild C.73: KMW 802, Einbautiefe 19 mm

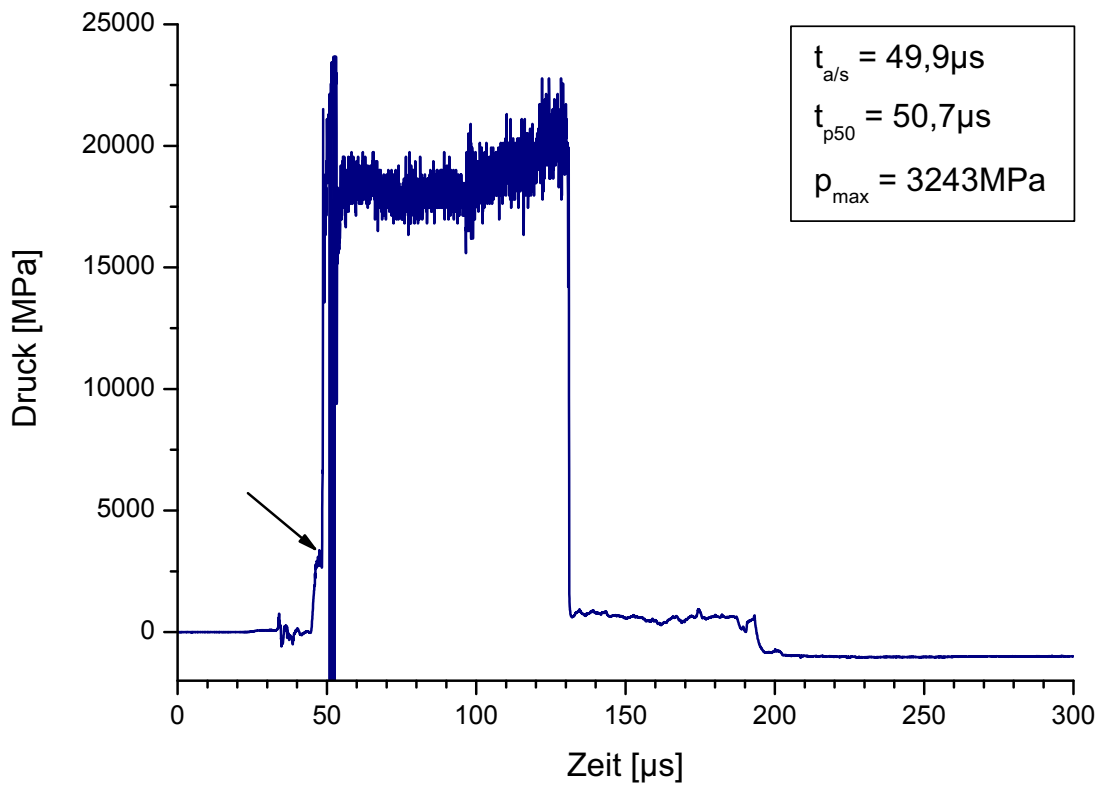


Bild C.74: KMW 803, Einbautiefe 41 mm

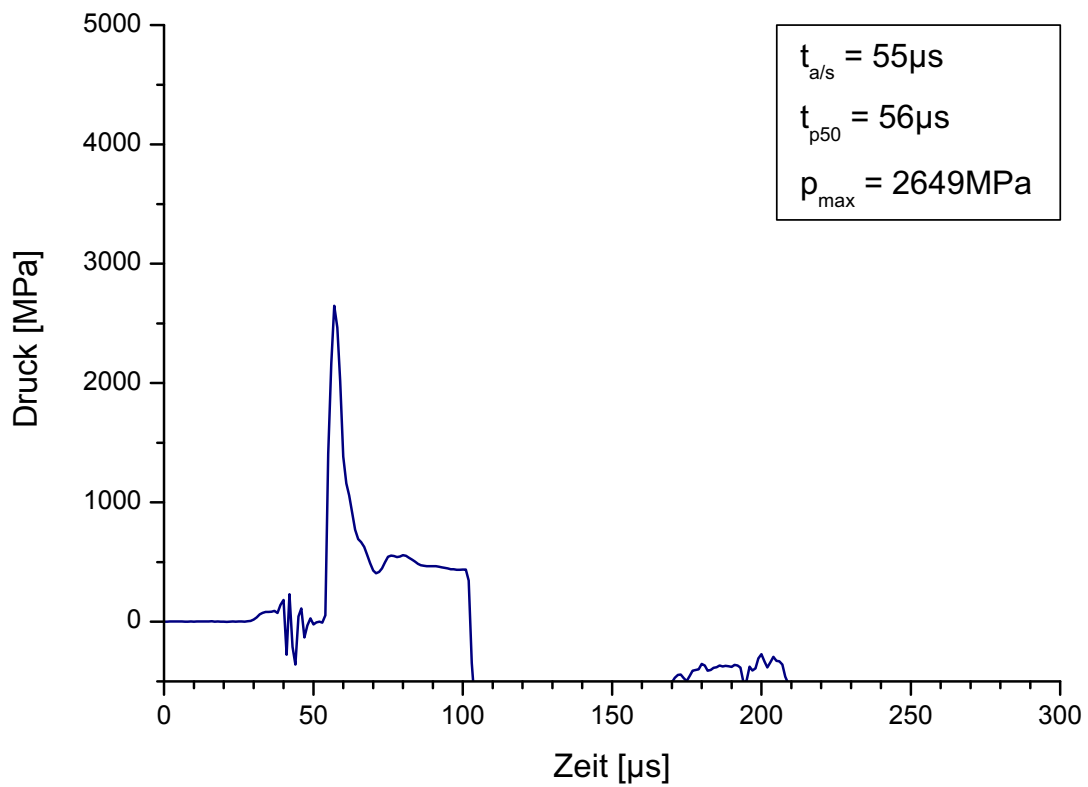


Bild C.75: KMW 804, Einbautiefe 58 mm

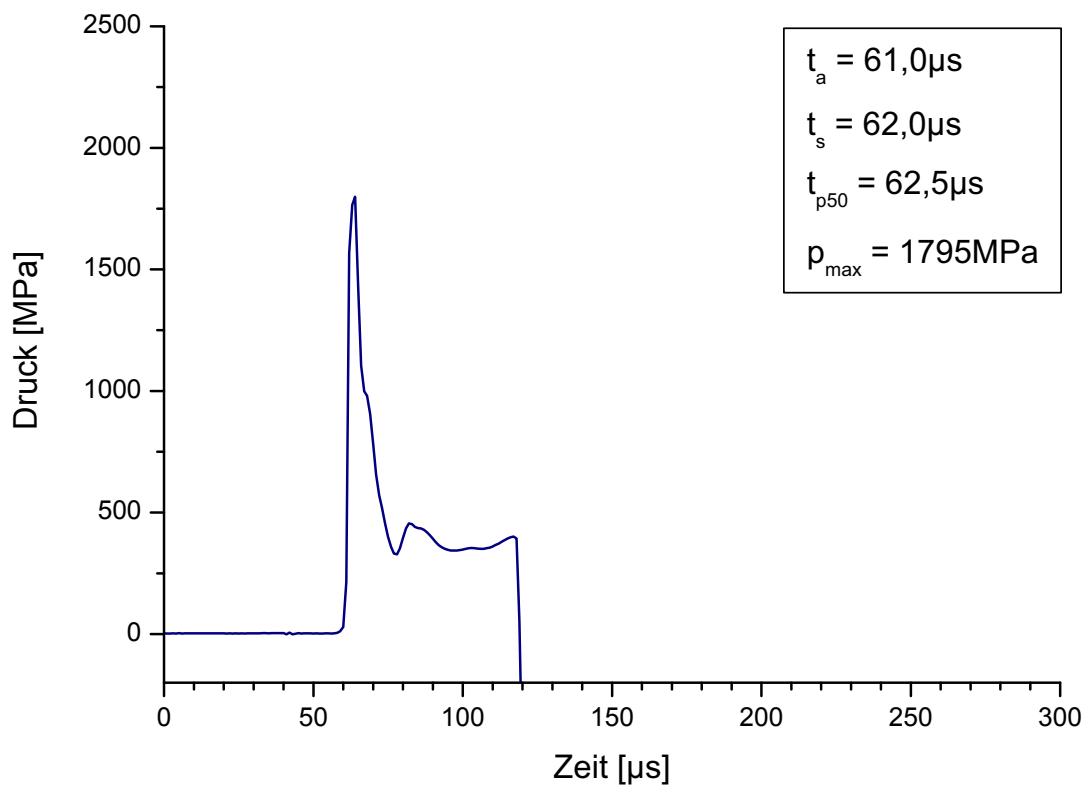


Bild C.76: KMW 805, Einbautiefe 78 mm

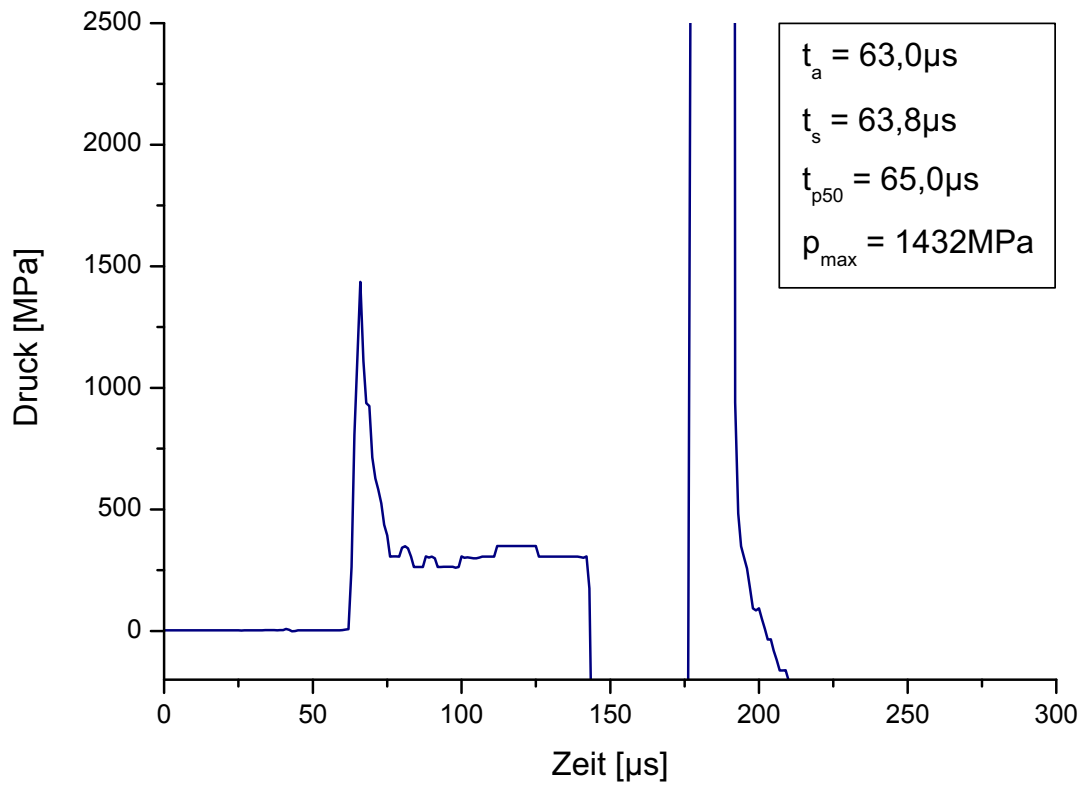


Bild C.77: KMW 806, Einbautiefe 96 mm

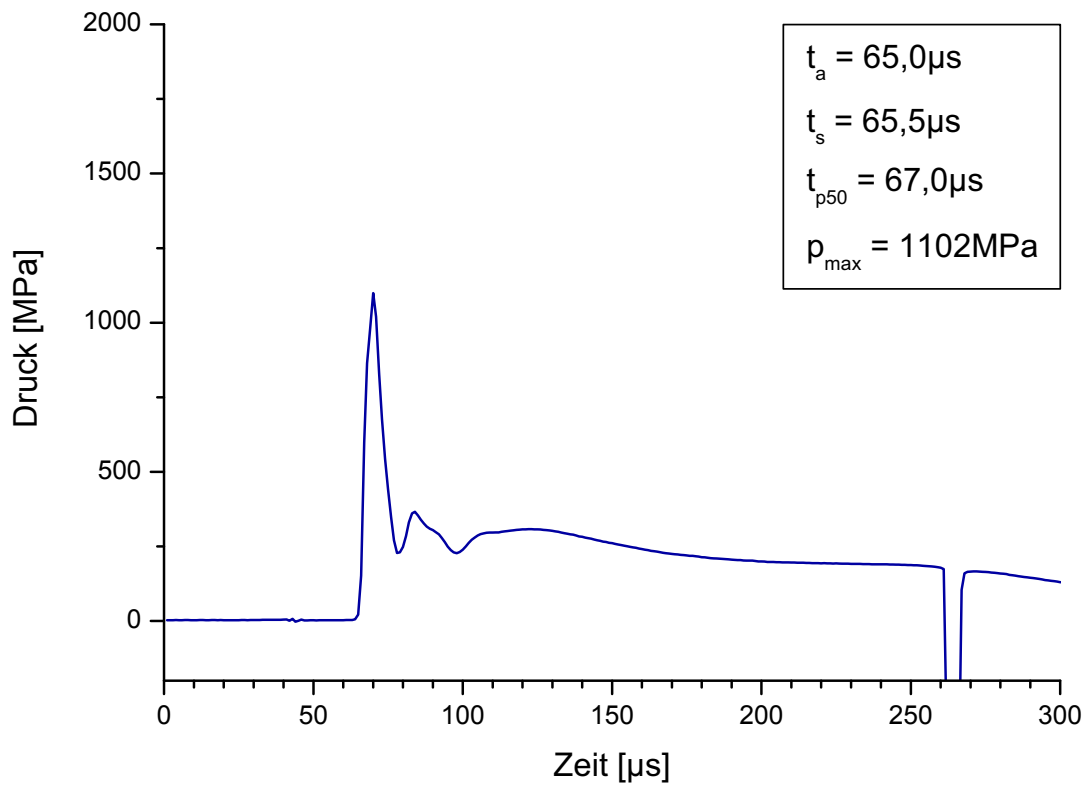


Bild C.78: KMW 807, Einbautiefe 108 mm

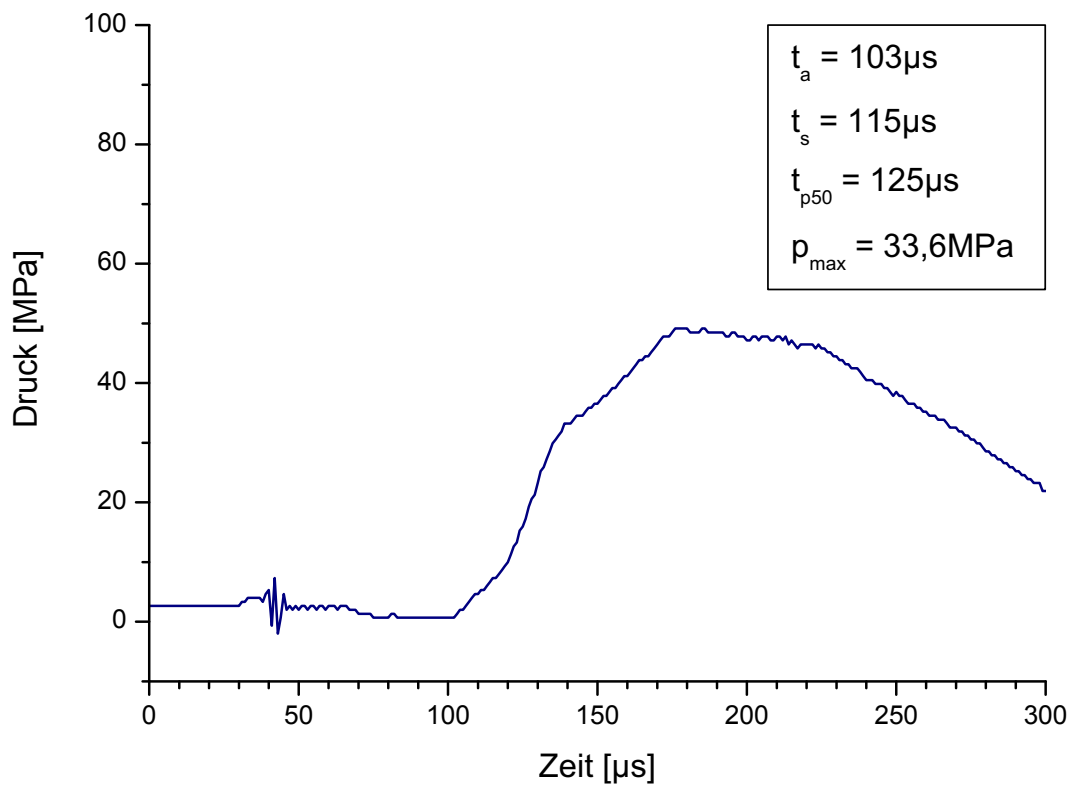


Bild C.79: KMW 808, Einbautiefe 266 mm

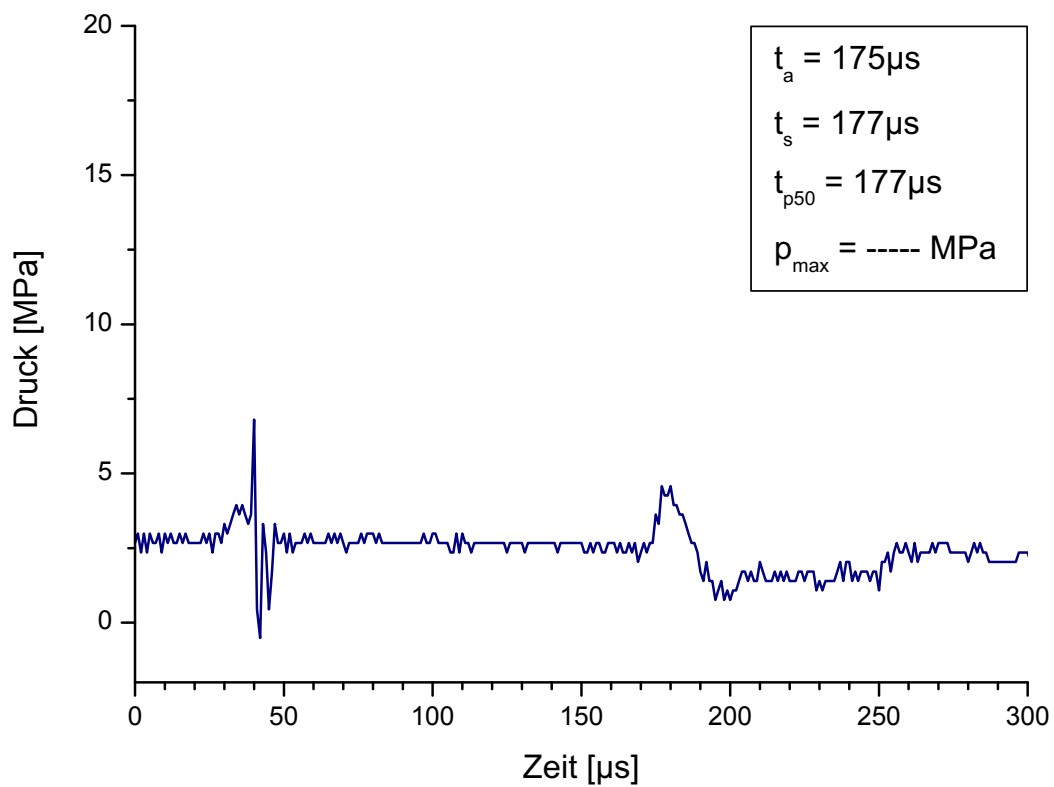


Bild C.80: KMW 809, Einbautiefe 487 mm

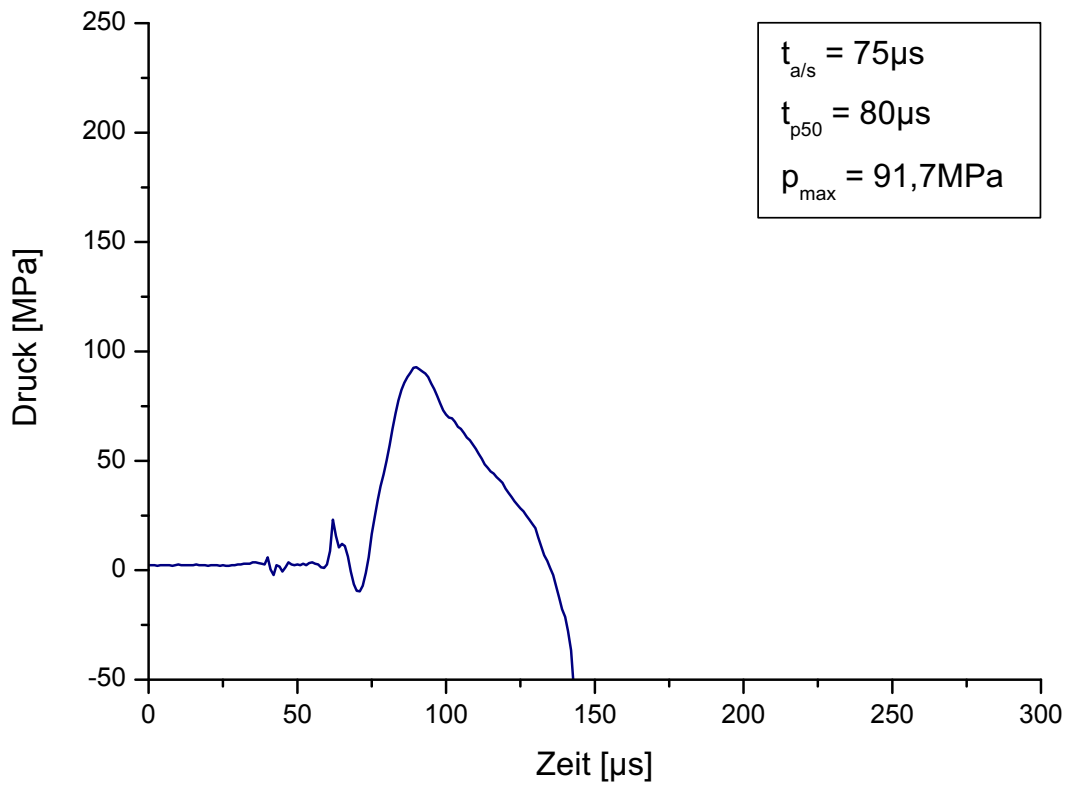


Bild C.81: KMW 810, Einbau R 150 mm

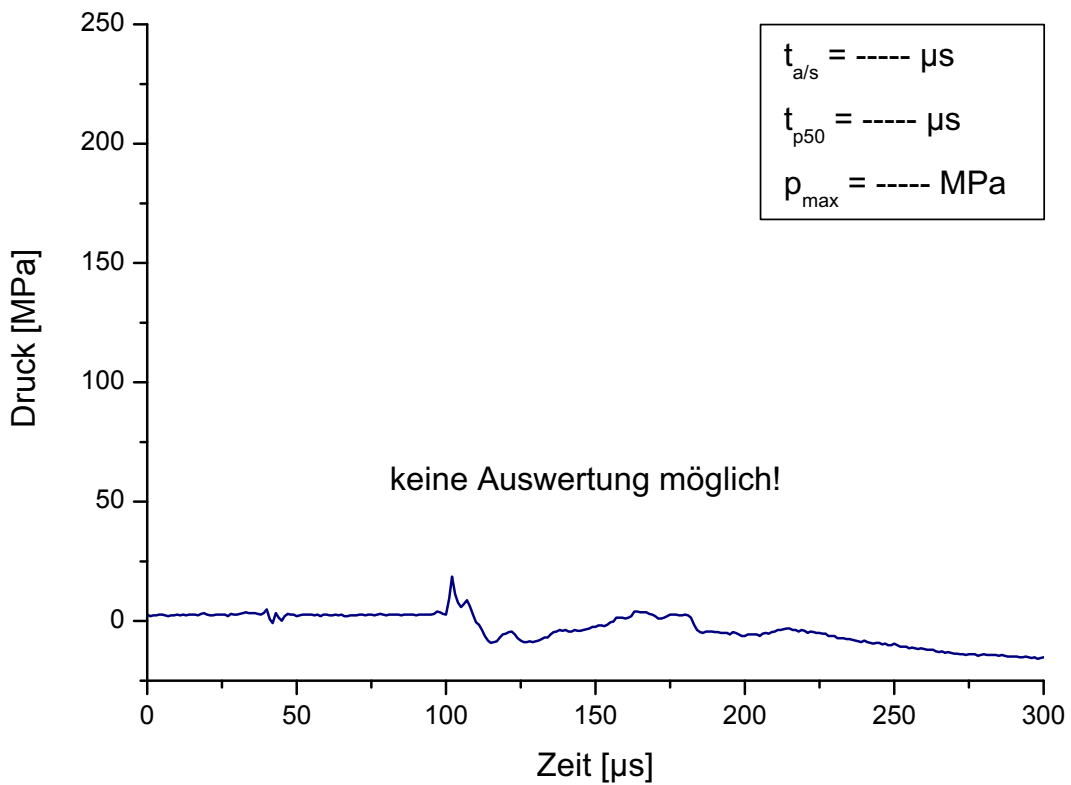


Bild C.82: KMW 811, Einbau R 300 mm

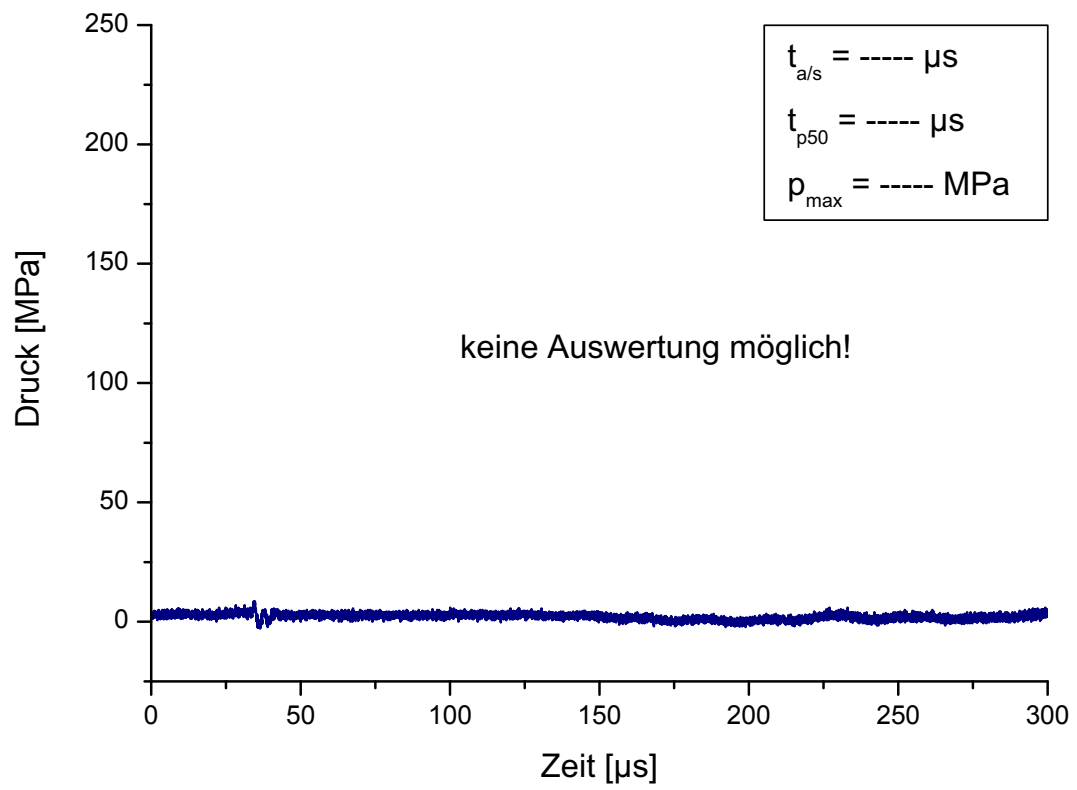


Bild C.83: KMW 812, Einbau R 450 mm

Versuch Nr. 9 – kleine Ladung

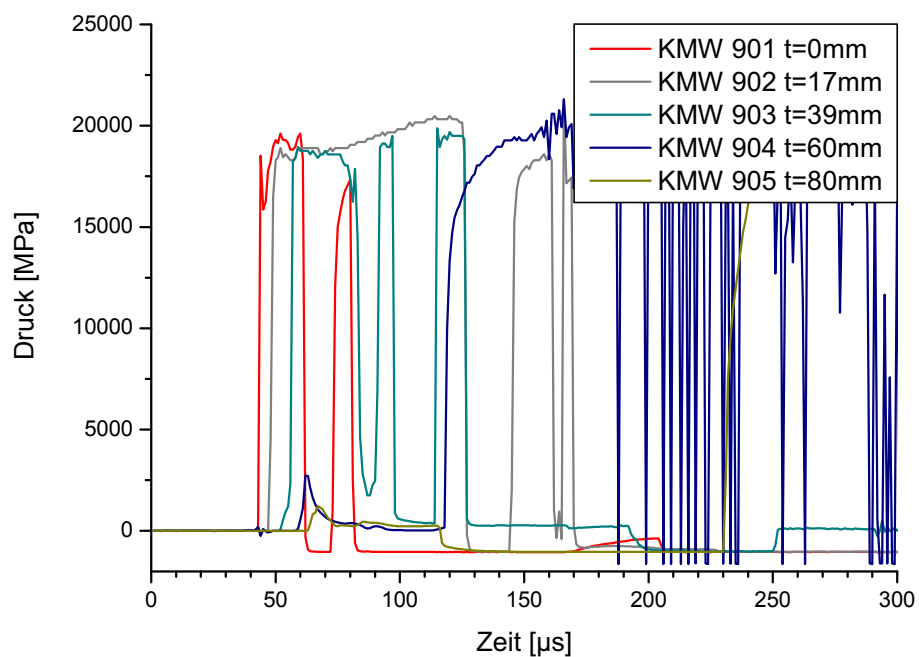


Bild C.84: KMW Versuch Nr. 9, KMW 901-905

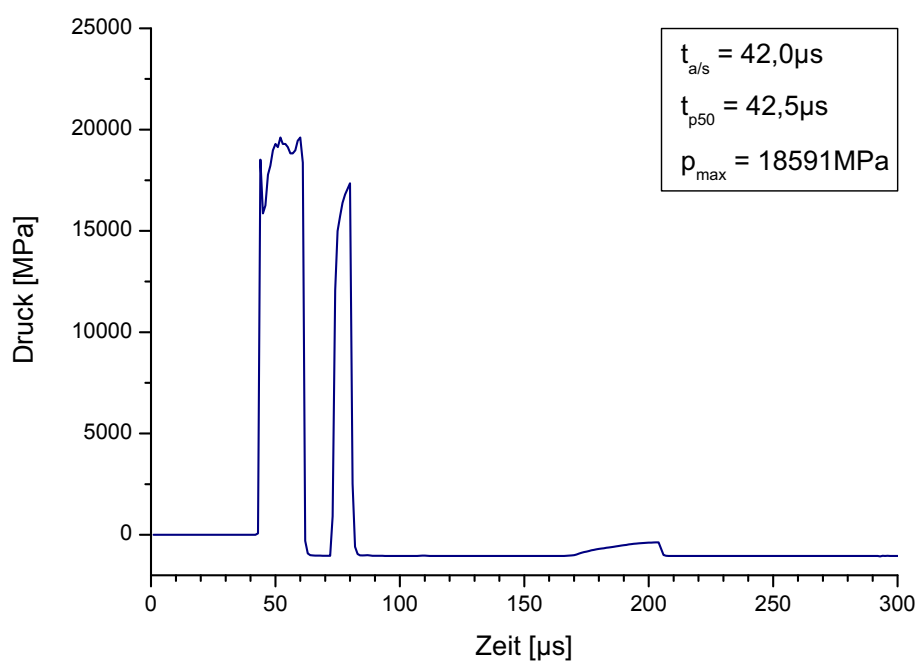


Bild C.85: KMW 901, Einbautiefe 0 mm

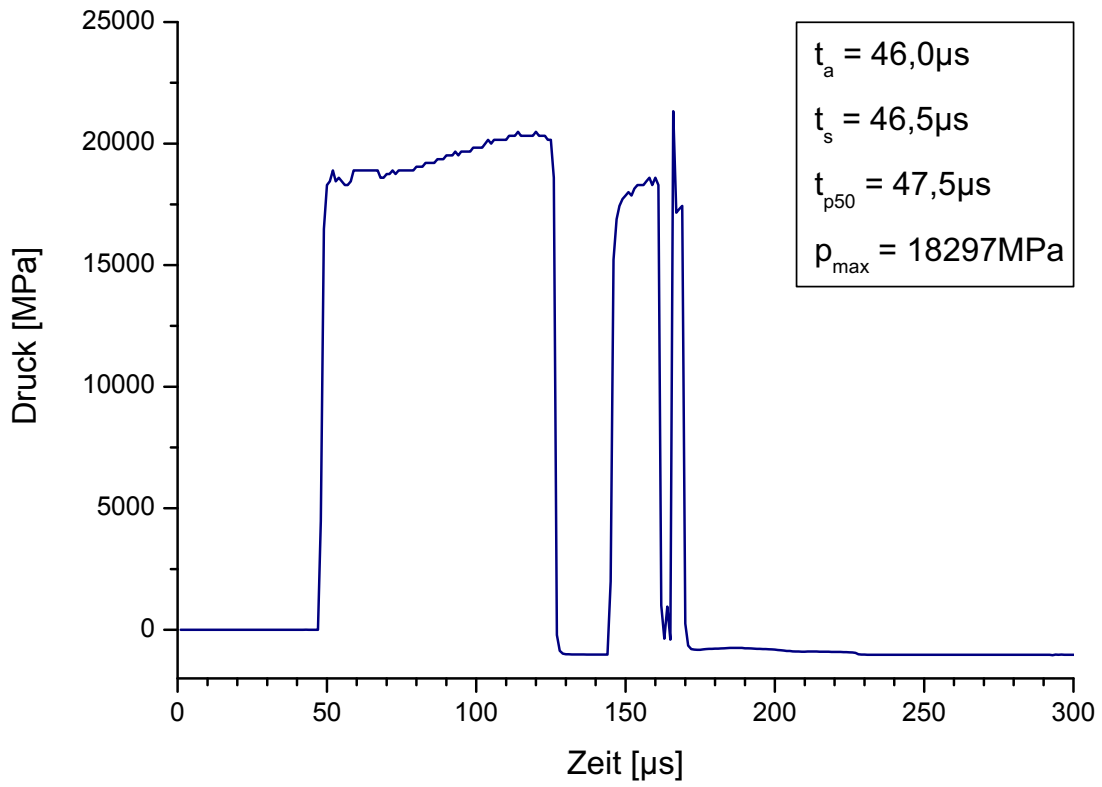


Bild C.86: KMW 902, Einbautiefe 17 mm

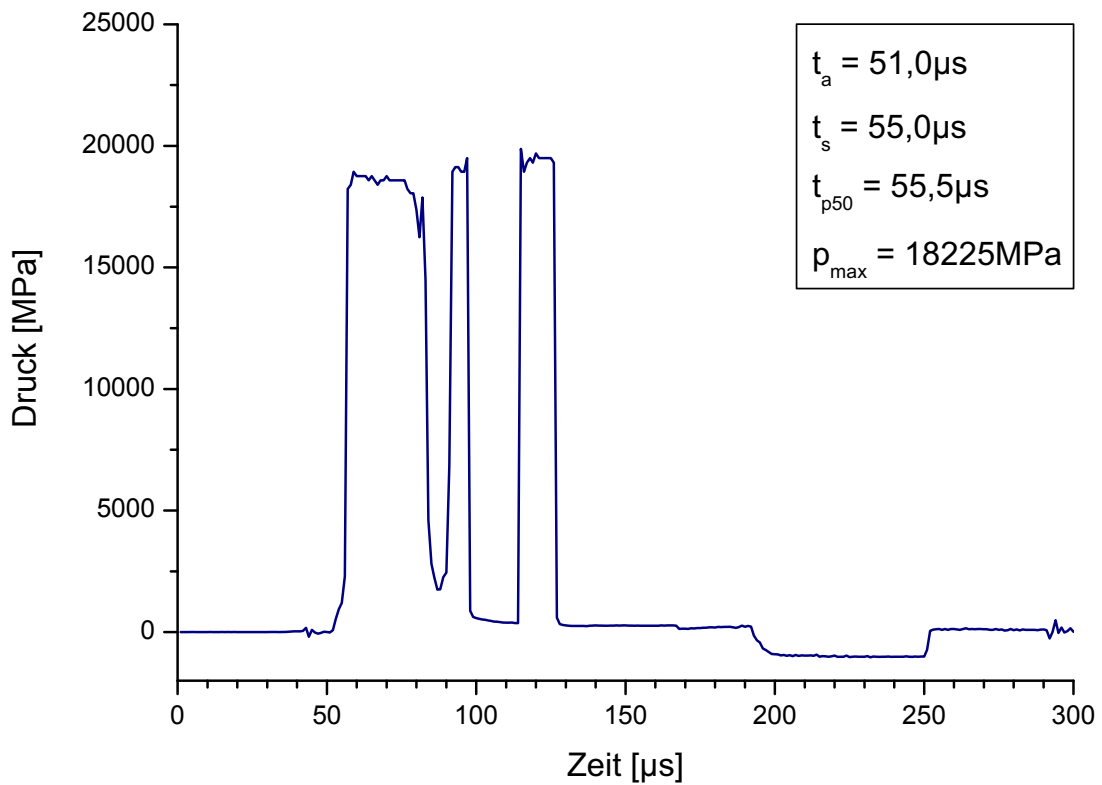


Bild C.87: KMW 903, Einbautiefe 39 mm

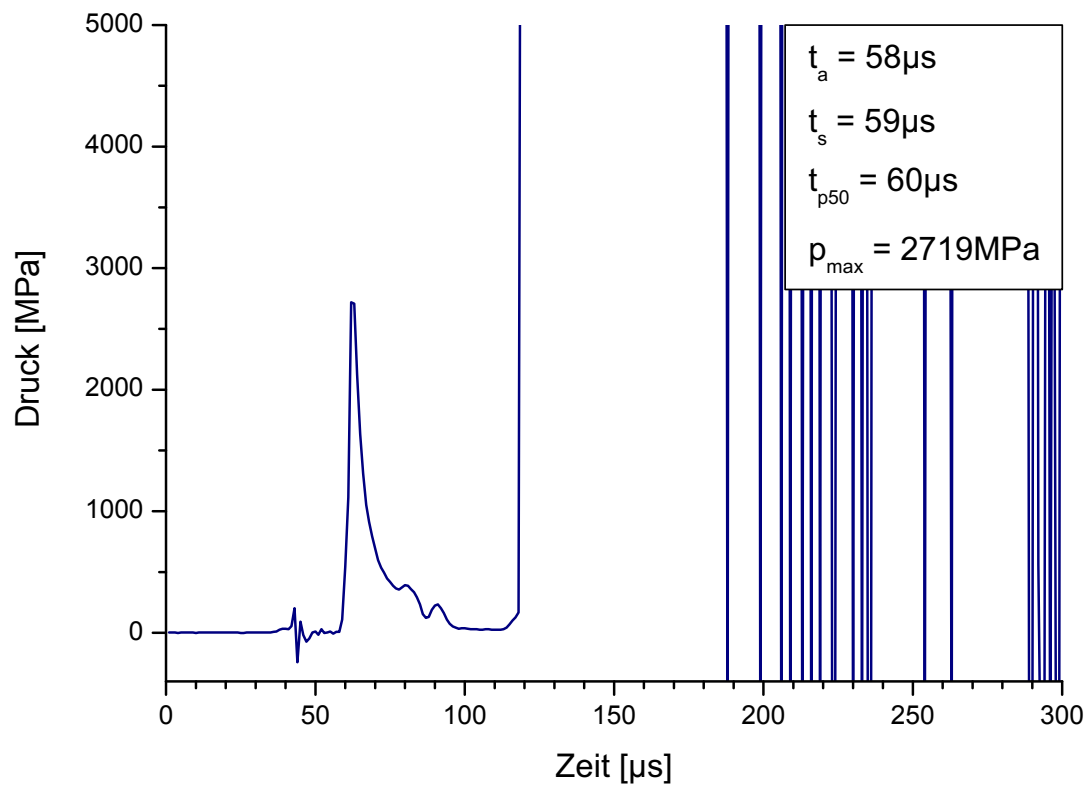


Bild C.88: KMW 904, Einbautiefe 60 mm

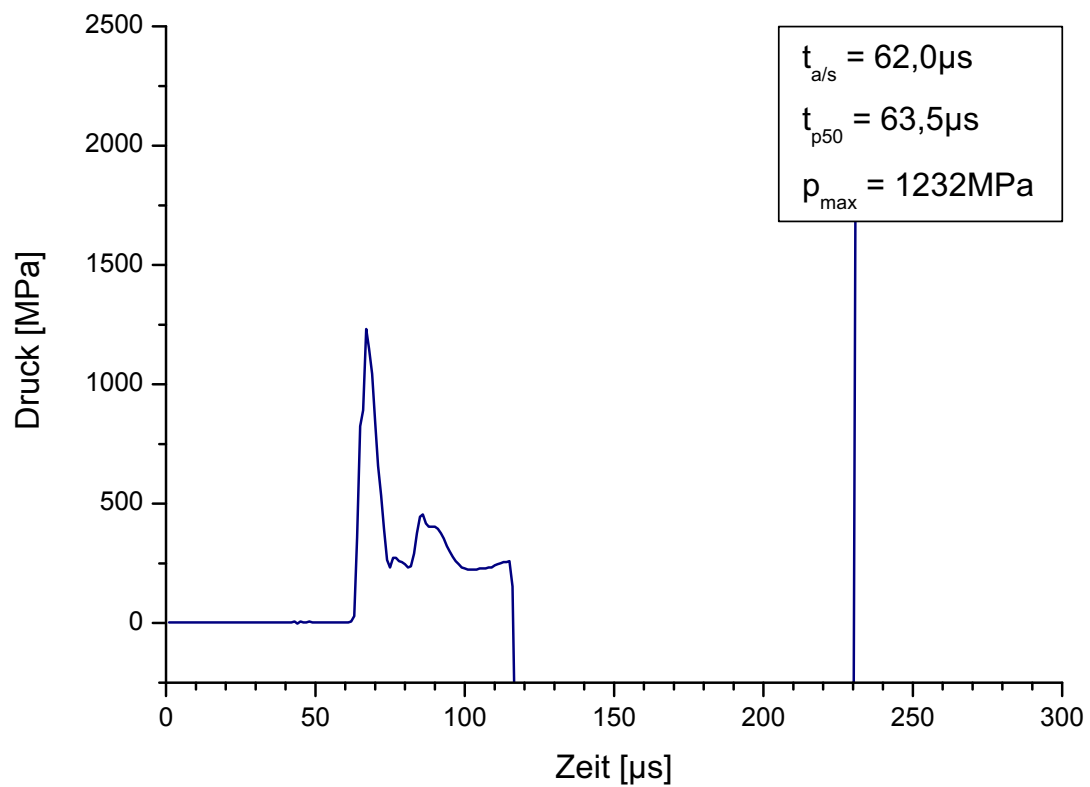


Bild C.89: KMW 905, Einbautiefe 80 mm

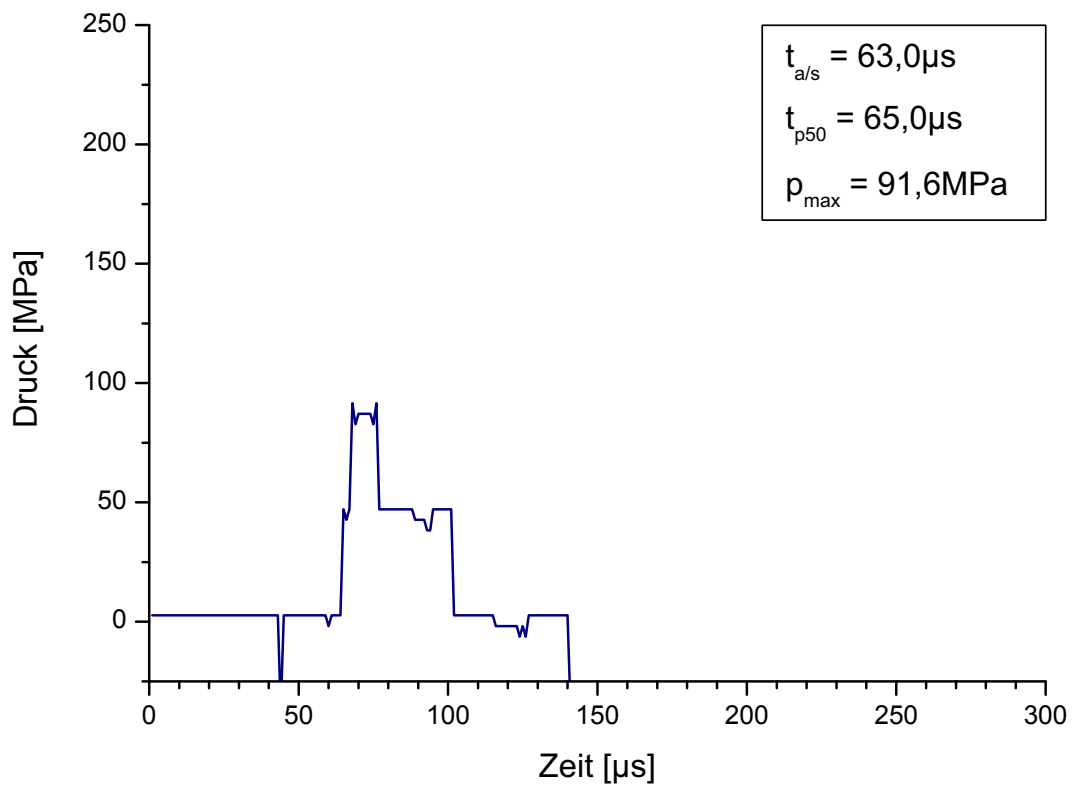


Bild C.90: KMW 906, Einbau R 100 mm

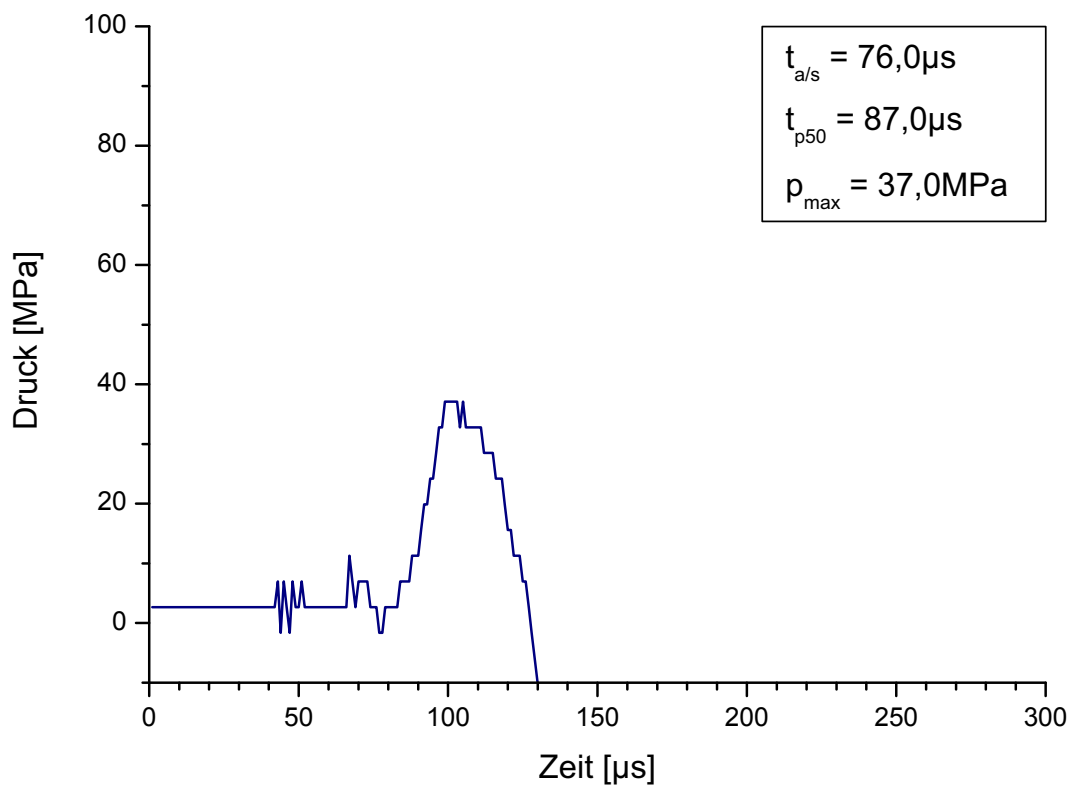


Bild C.91: KMW 907, Einbau R 150 mm

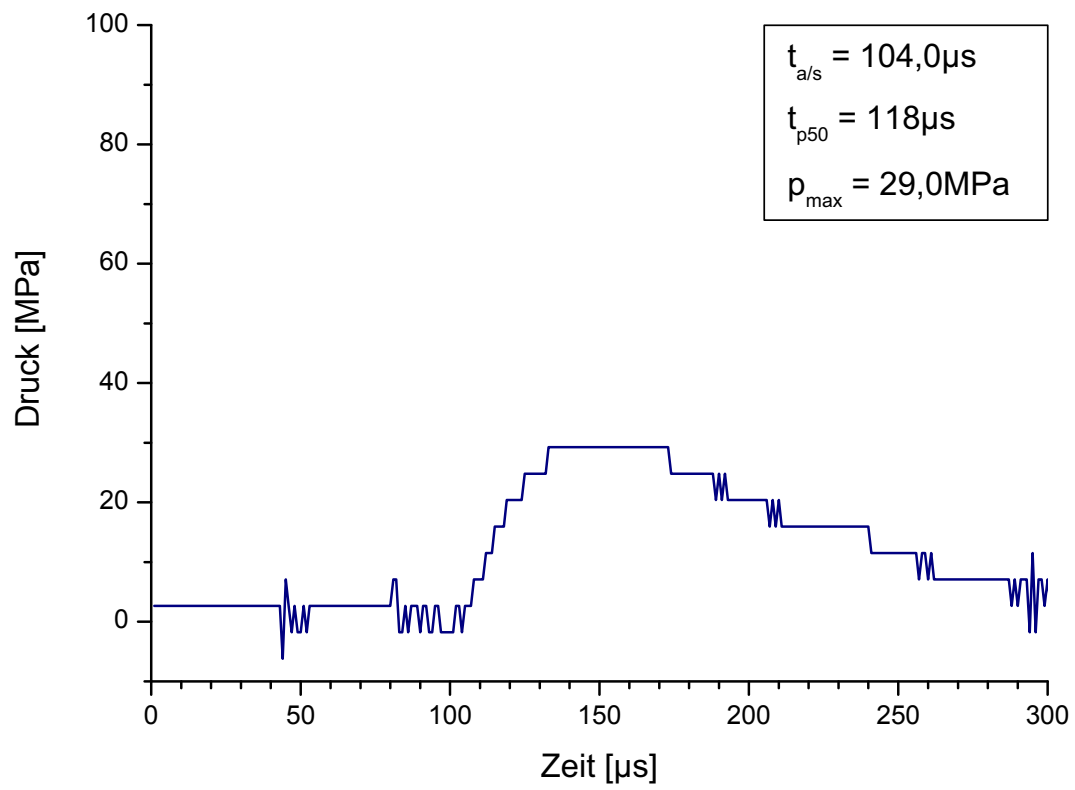


Bild C.92: KMW 908, Einbau R 200 mm

Versuch Nr. 10 – kleine Ladung

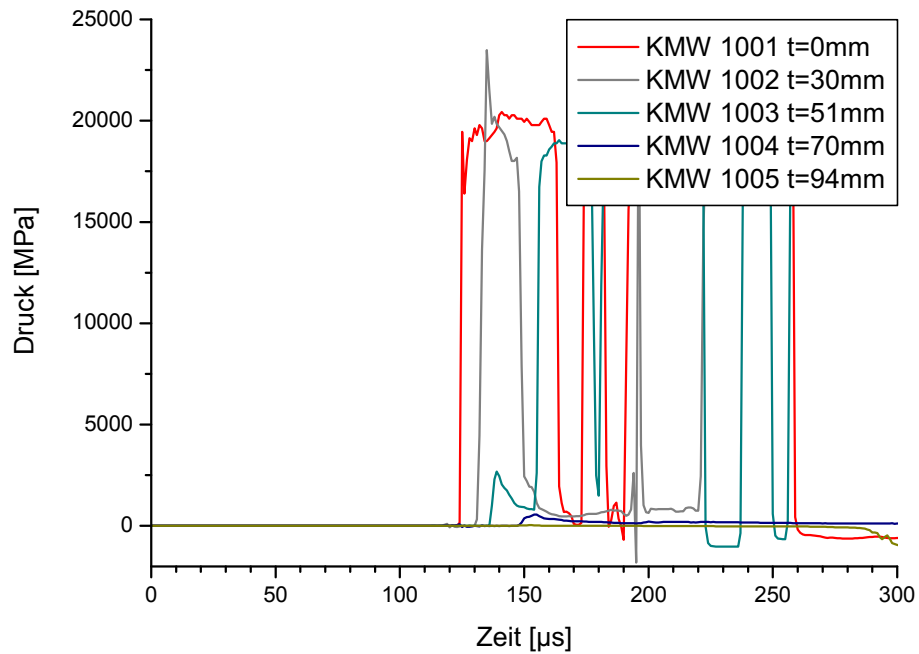


Bild C.93: KMW Versuch Nr. 10, KMW 1001-1005

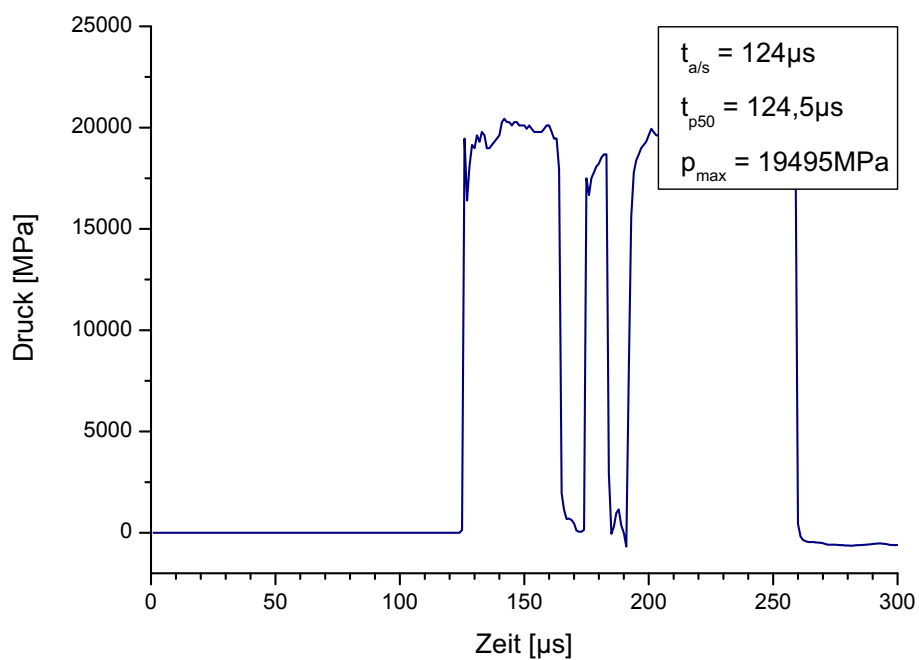


Bild C.94: KMW 1001, Einbautiefe 0 mm

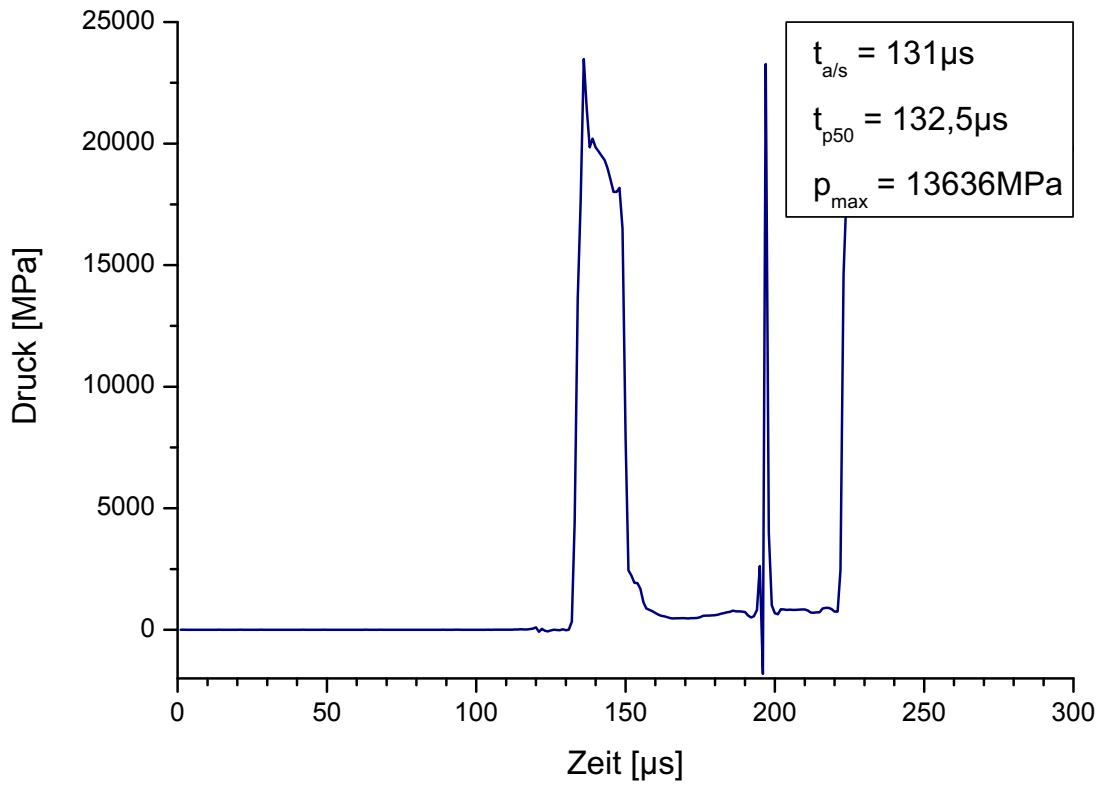


Bild C.95: KMW 1002, Einbautiefe 30 mm

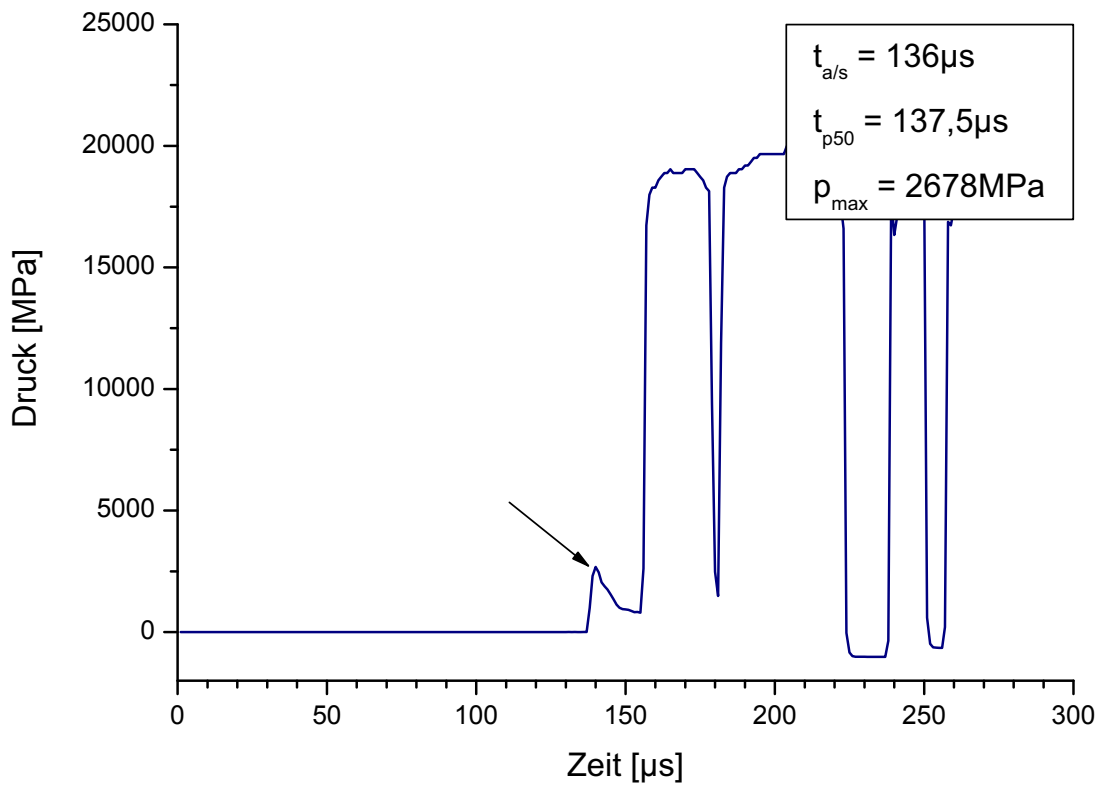


Bild C.96: KMW 1003, Einbautiefe 51 mm

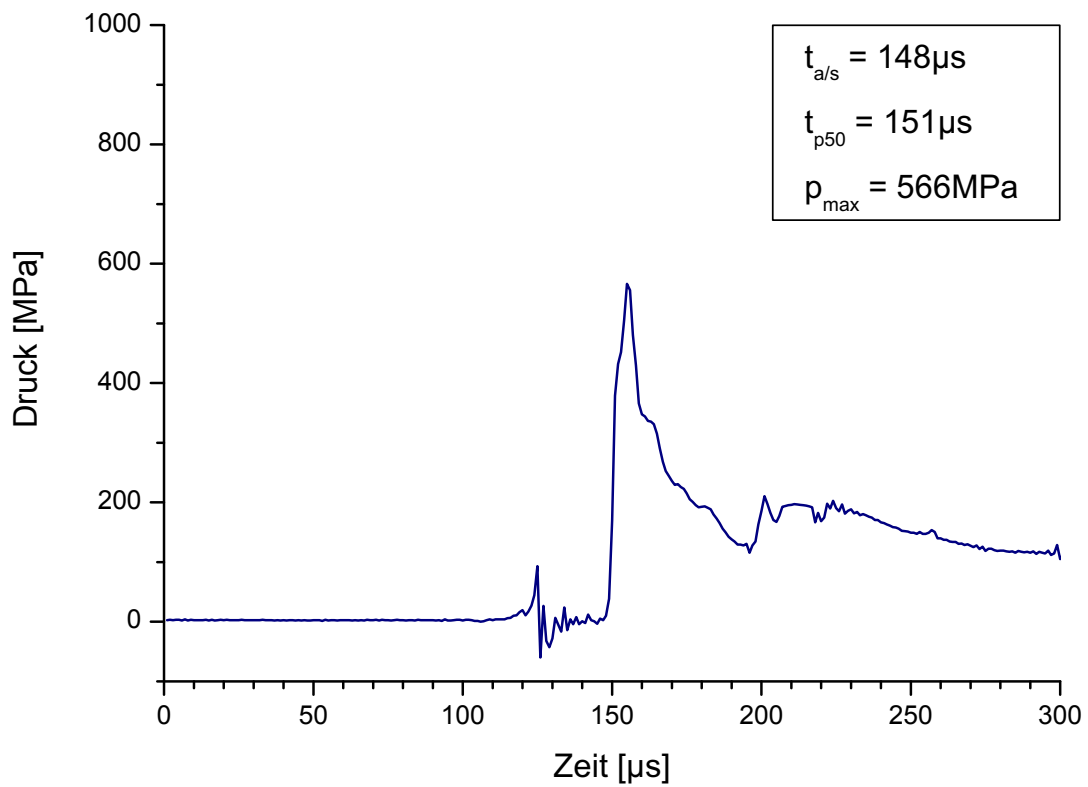


Bild C.97: KMW 1004, Einbautiefe 70 mm

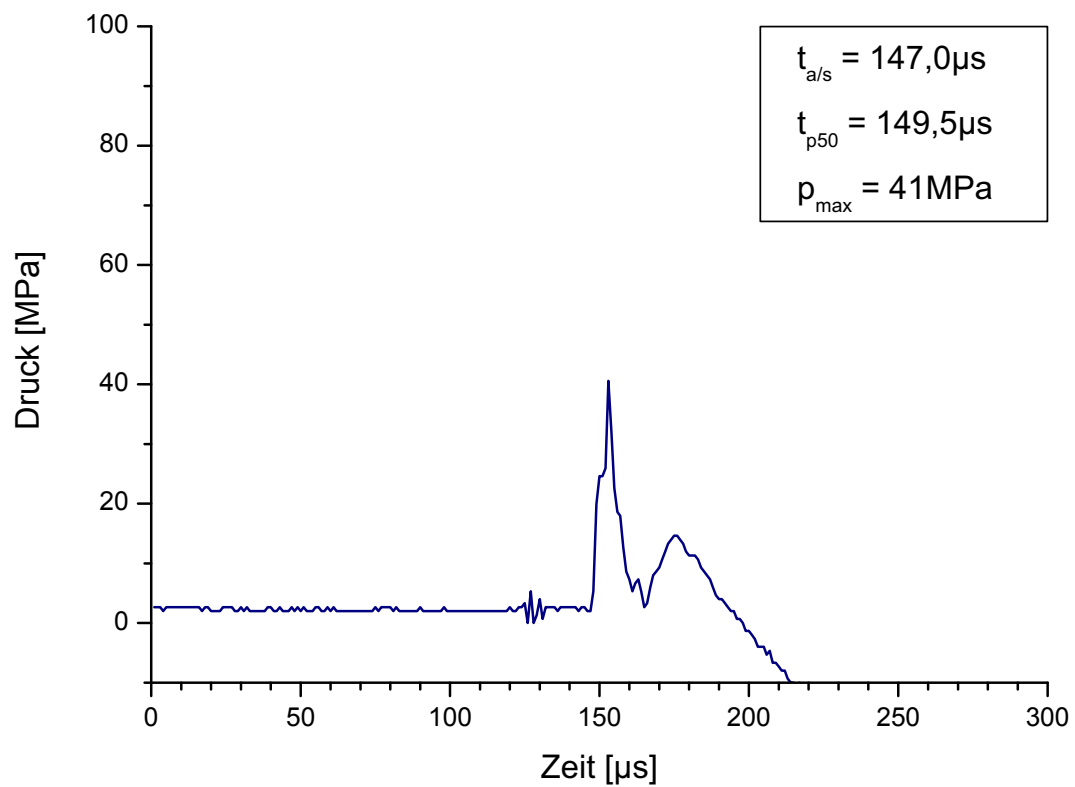


Bild C.98: KMW 1005, Einbautiefe 94 mm

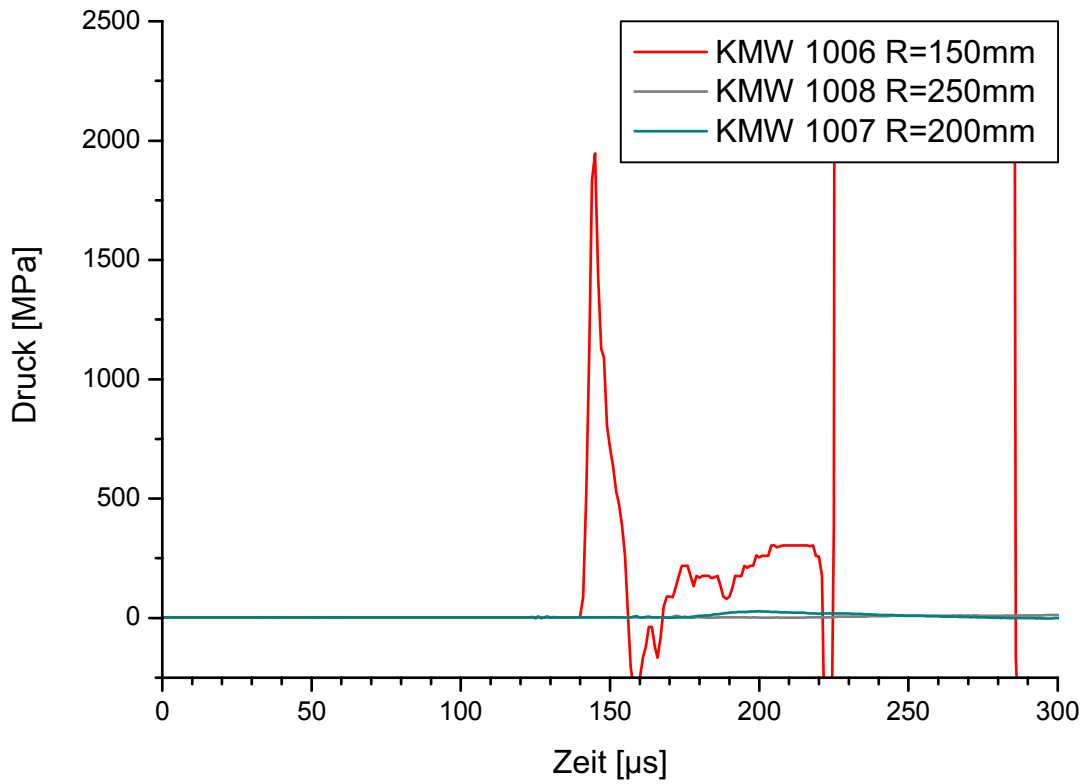


Bild C.99: KMW Versuch Nr. 10, radiale KMW 1006-1008

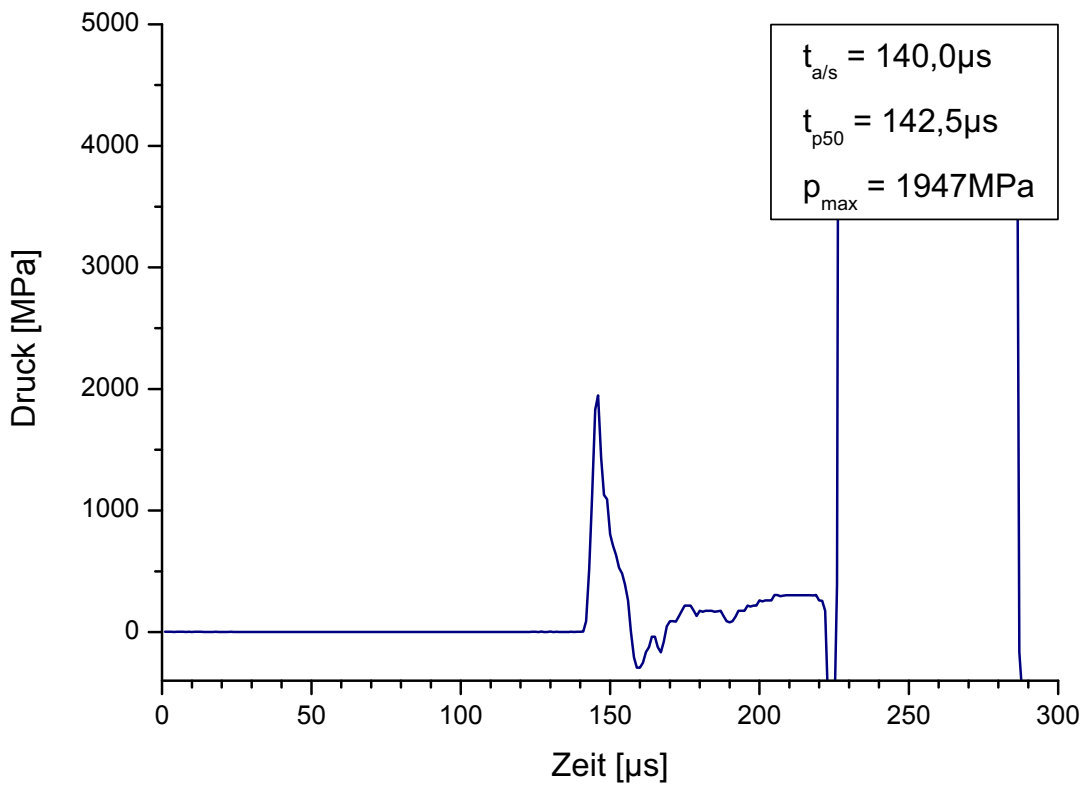


Bild C.100: KMW 1006, Einbau R 150 mm

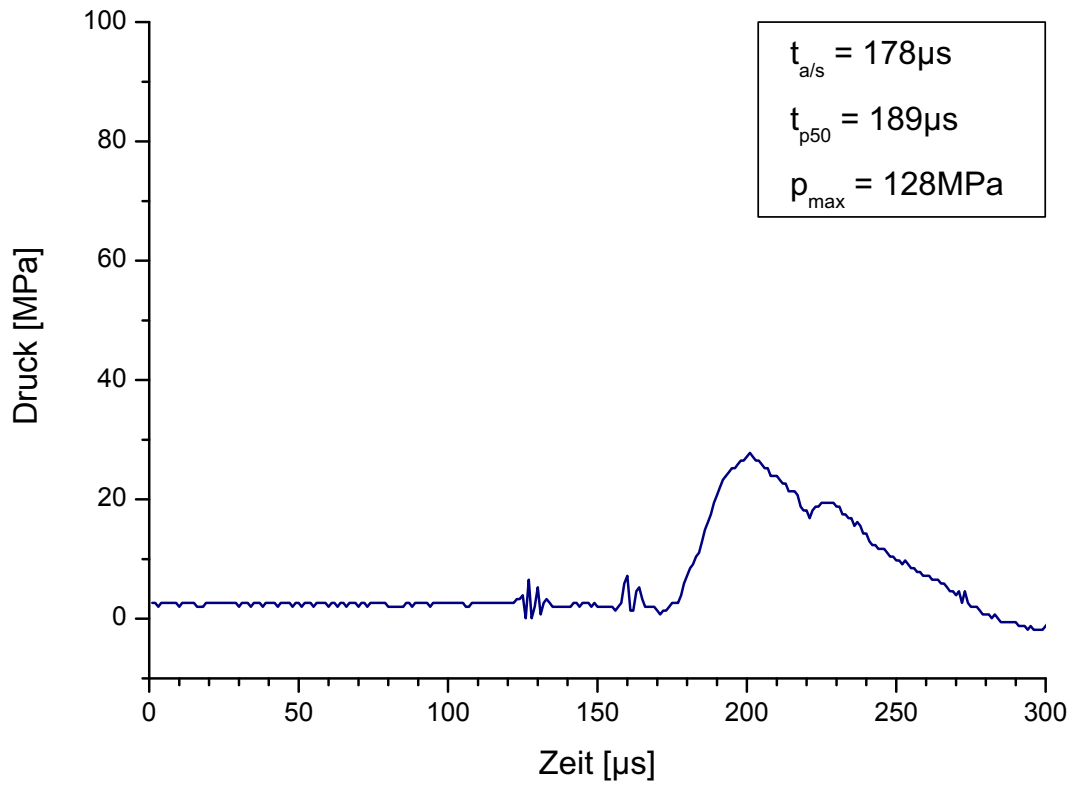


Bild C.101: KMW 1007, Einbau R 200 mm

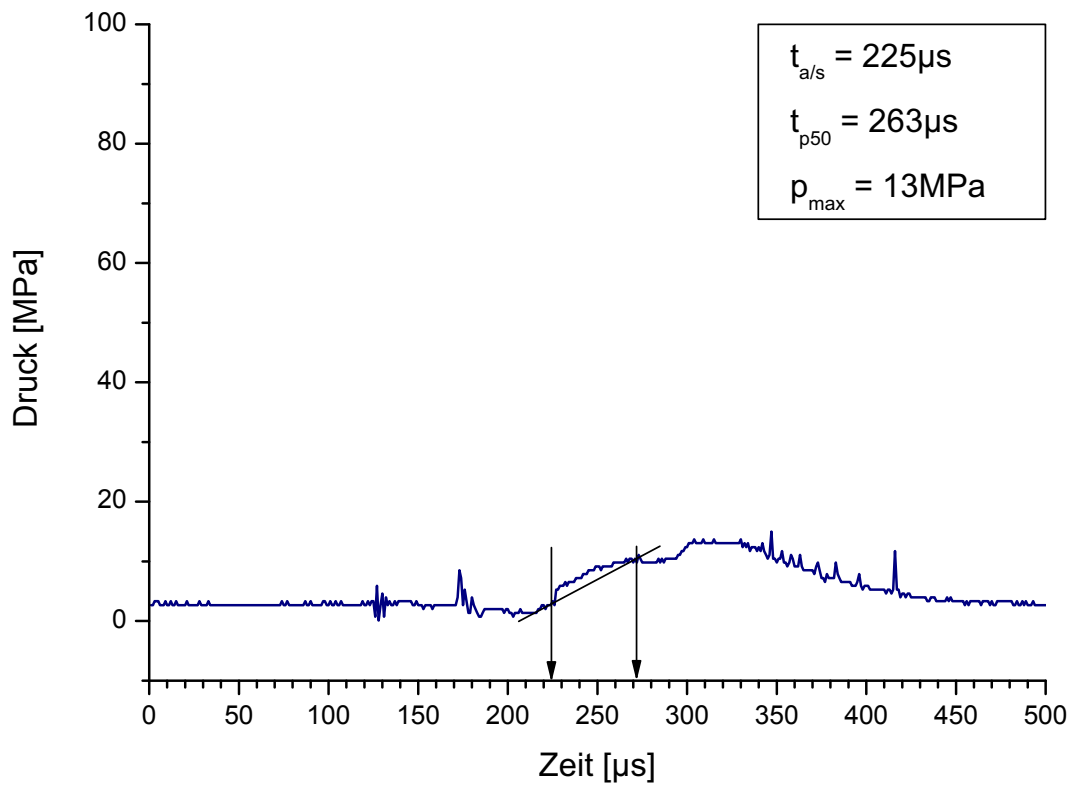


Bild C.102: KMW 1008, Einbau R 250 mm

Versuch Nr. 11 – große Ladung

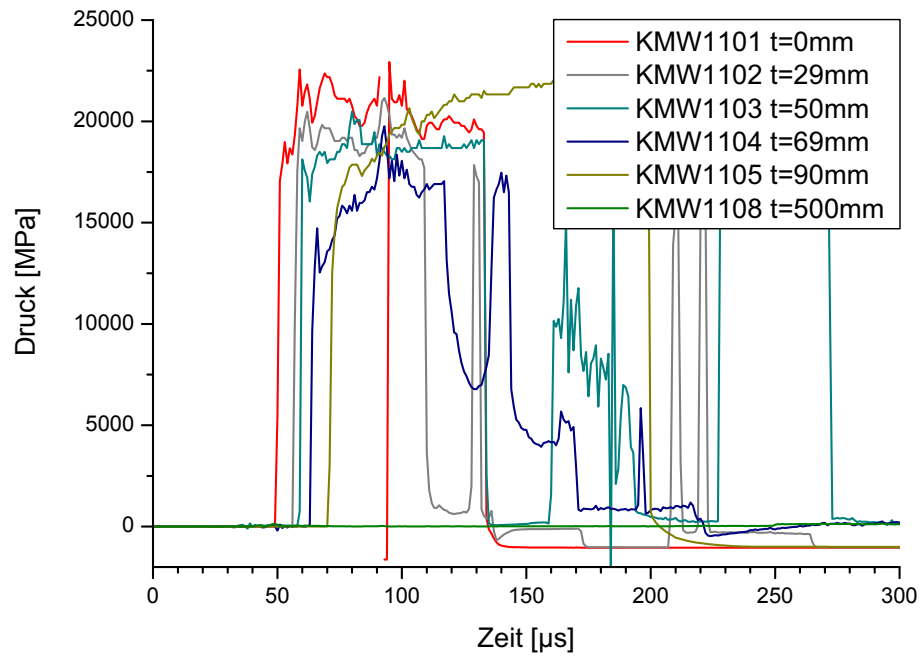


Bild C.103: KMW Versuch Nr. 11, KMW 1101-1105 und 1108

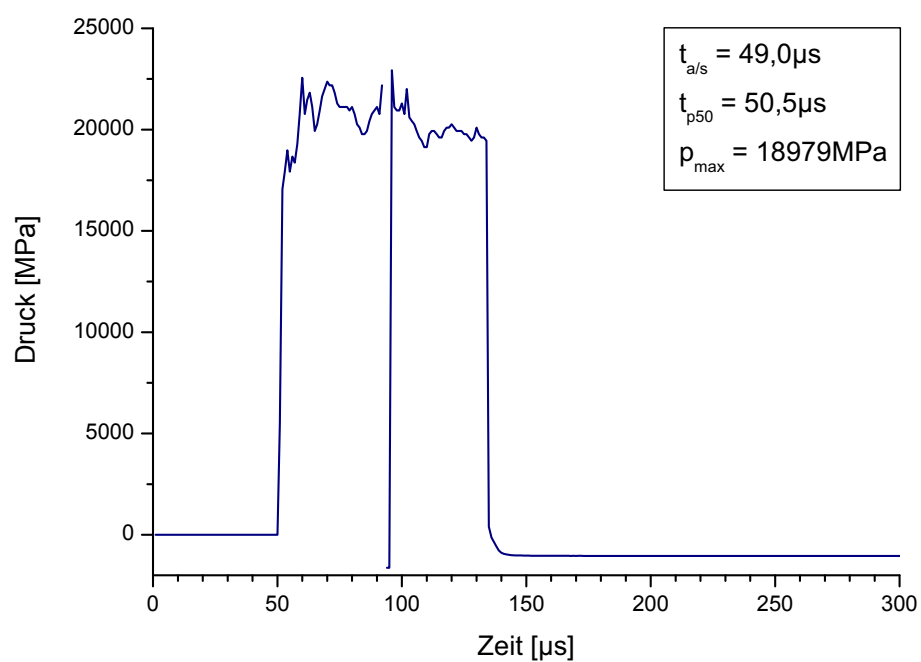


Bild C.104: KMW 1101, Einbautiefe 0 mm

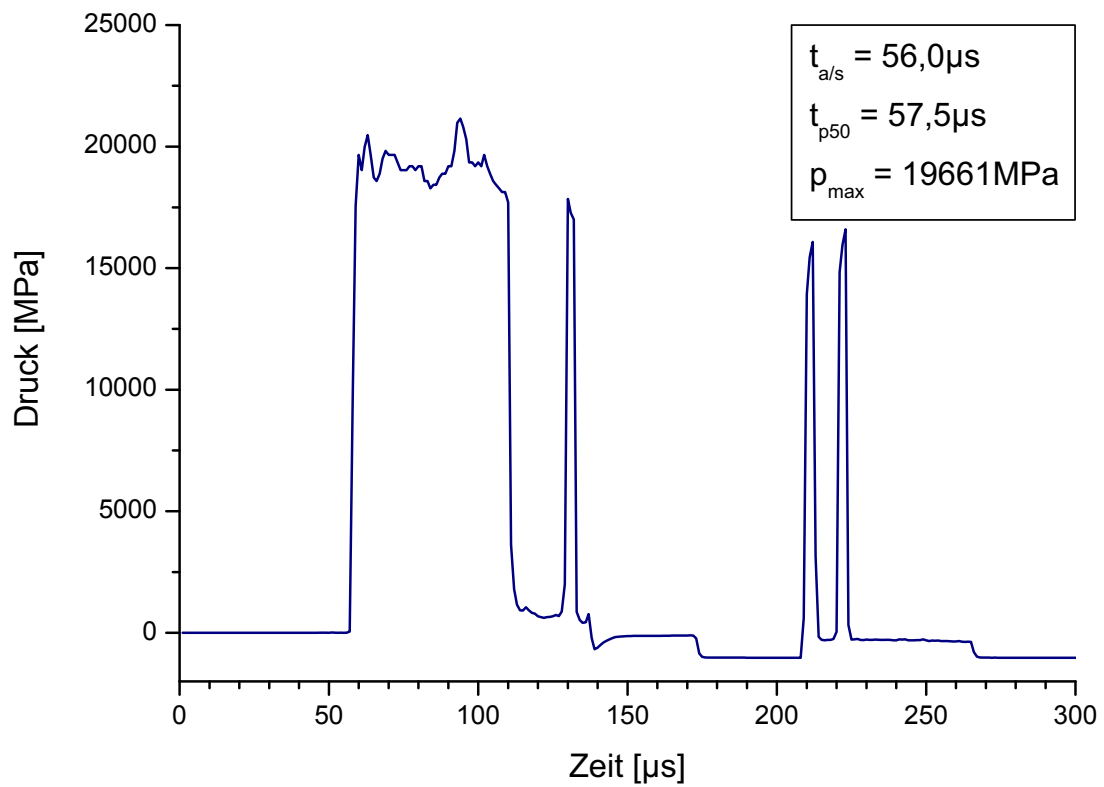


Bild C.105: KMW 1102, Einbautiefe 29 mm

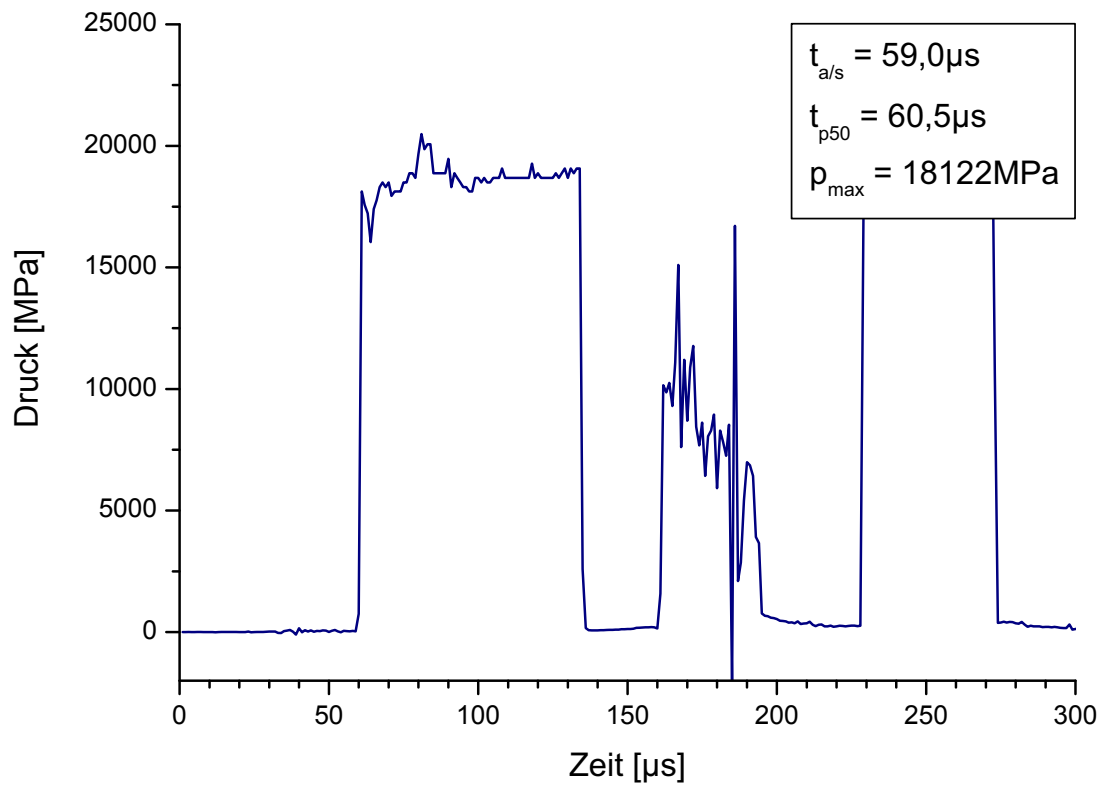


Bild C.106: KMW 1103, Einbautiefe 50 mm

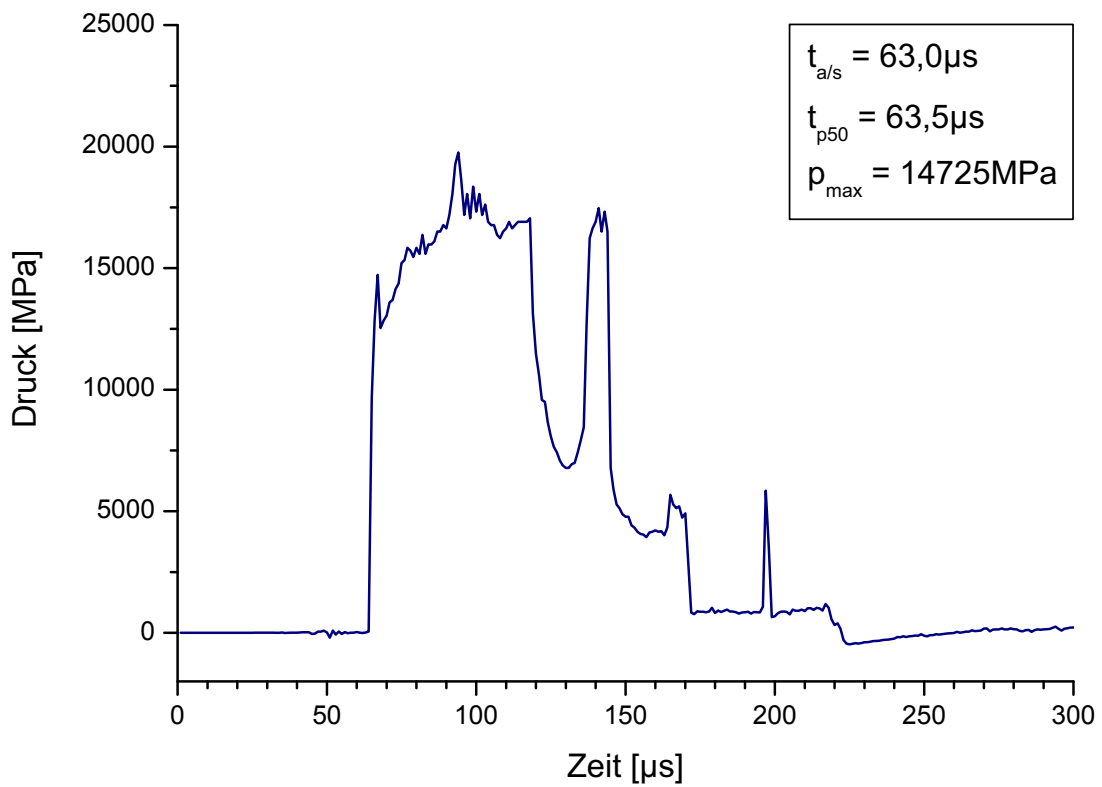


Bild C.107: KMW 1104, Einbautiefe 69 mm

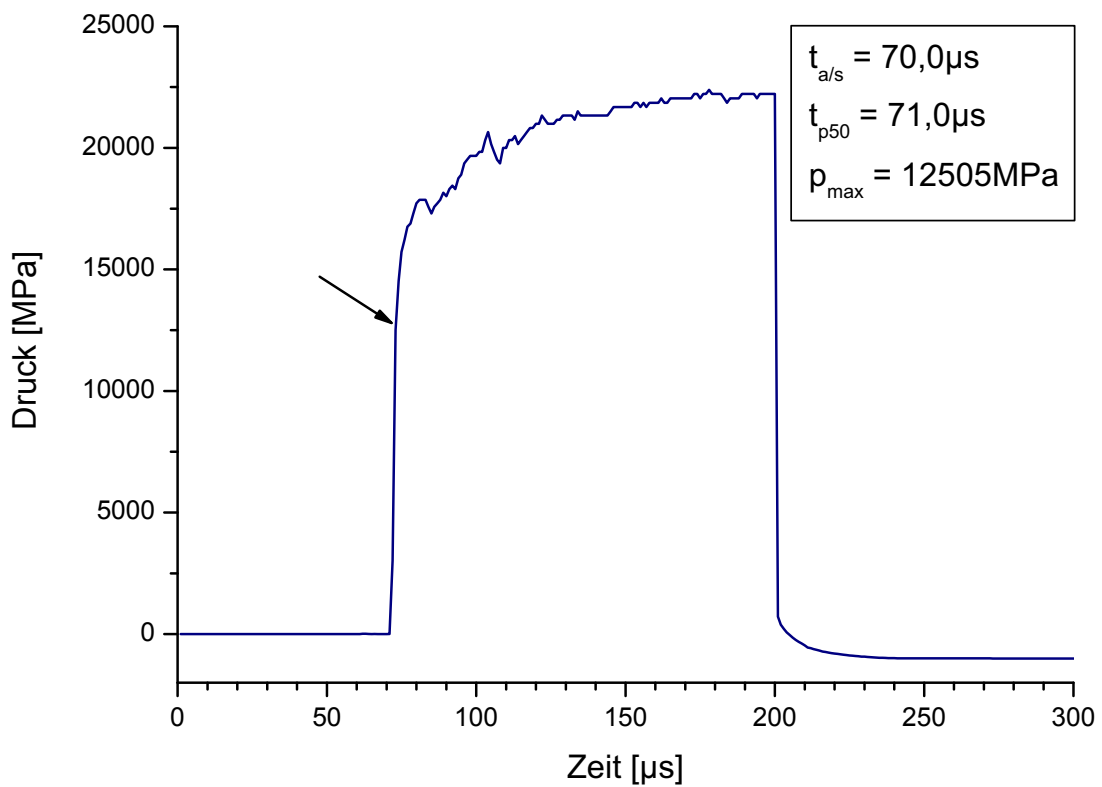


Bild C.108: KMW 1105, Einbautiefe 90 mm

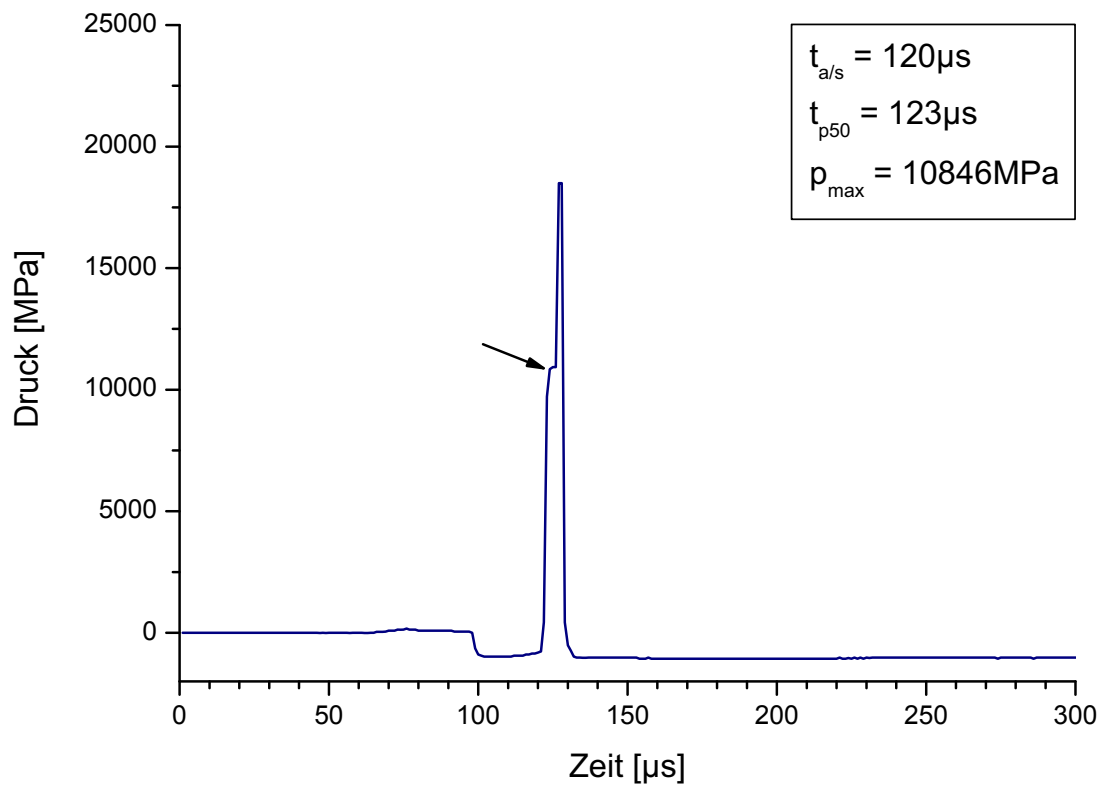


Bild C.109: KMW 1106, Einbau R 150 mm

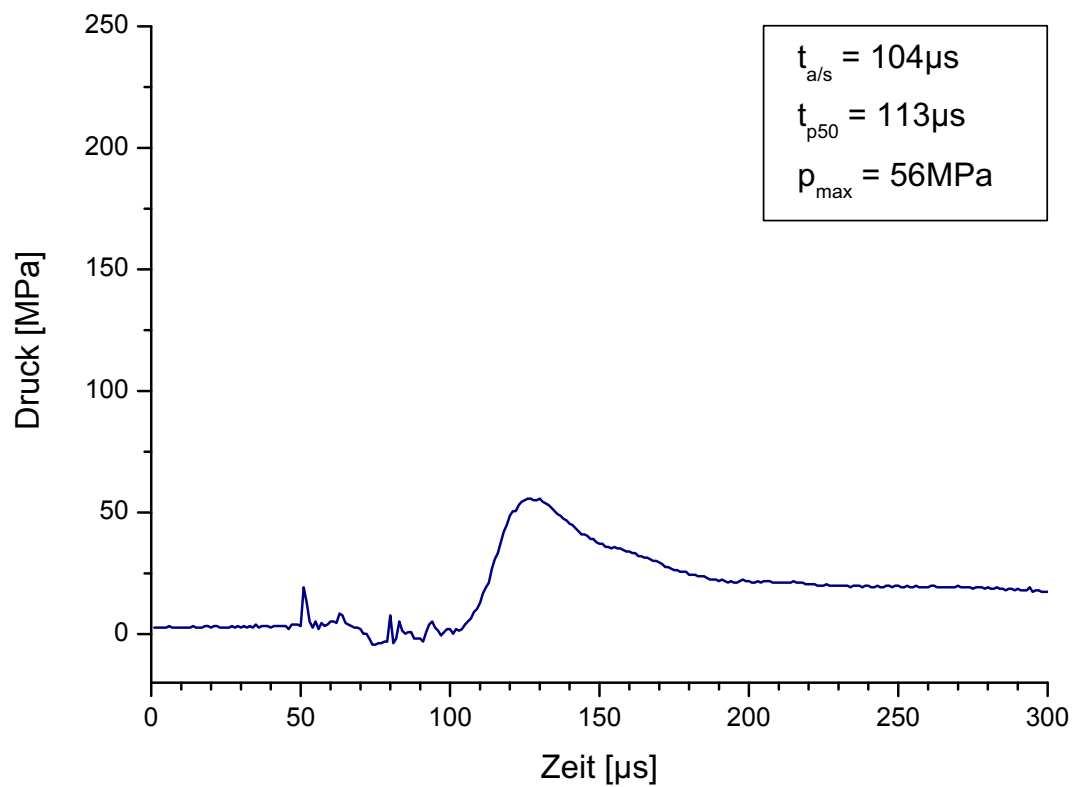


Bild C.110: KMW 1107, Einbau R 250 mm

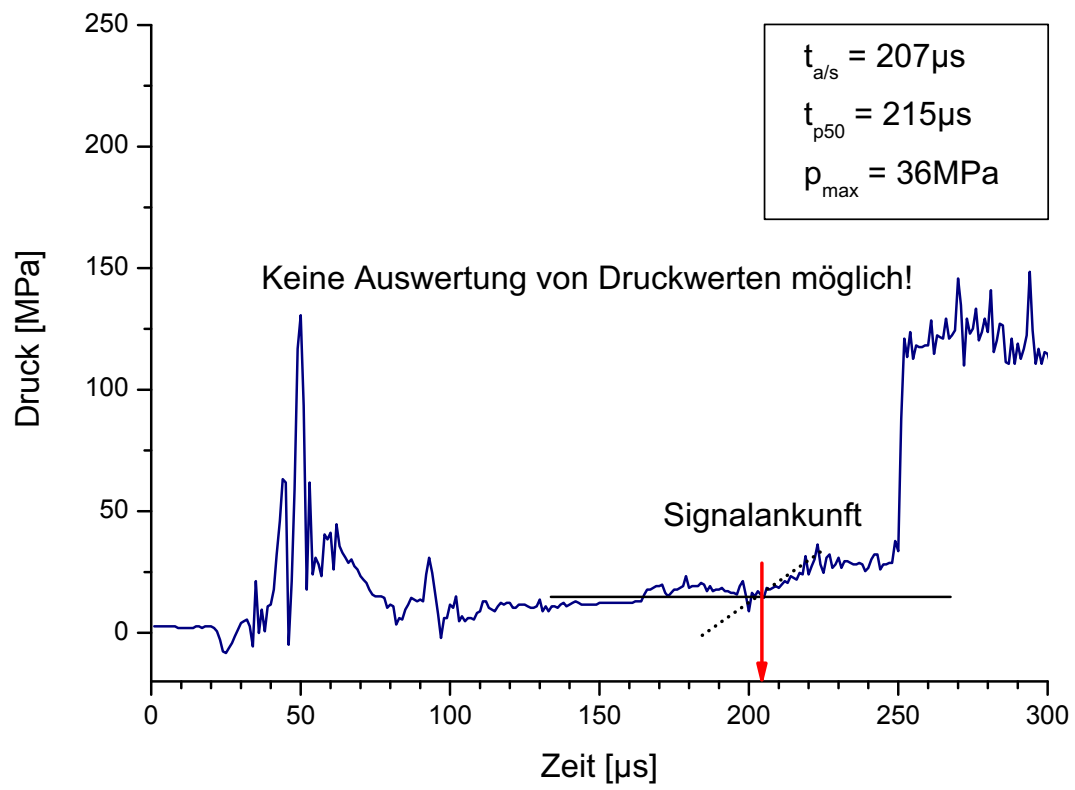


Bild C.111: KMW 1108, Einbautiefe 500 mm

Manganin-Aufnehmer (MA)

Versuch Nr. 2

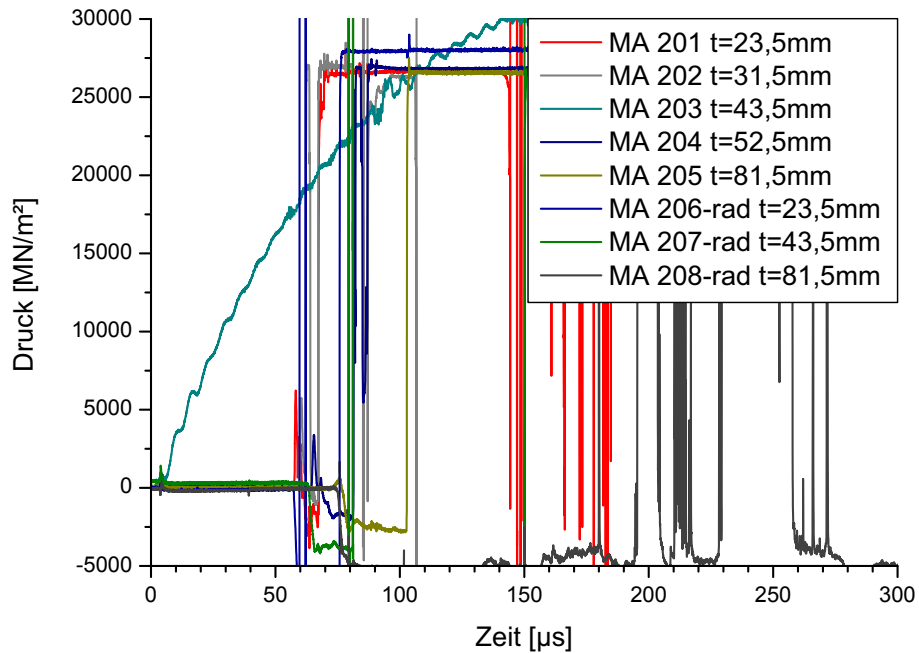


Bild C.112: Versuch Nr. 2, MA 201-208

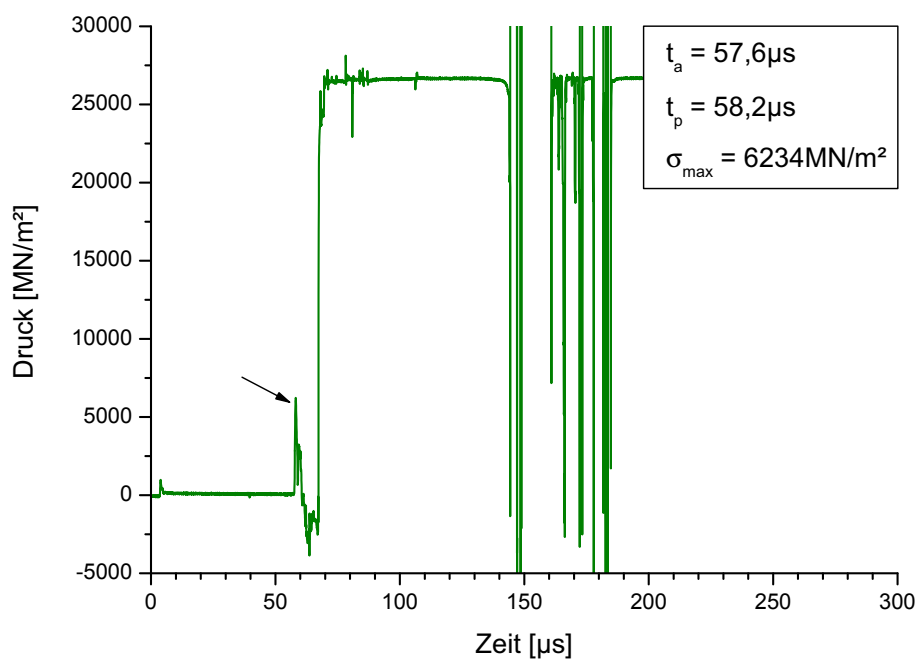


Bild C.113: MA 201-axial, Einbautiefe 23,5 mm

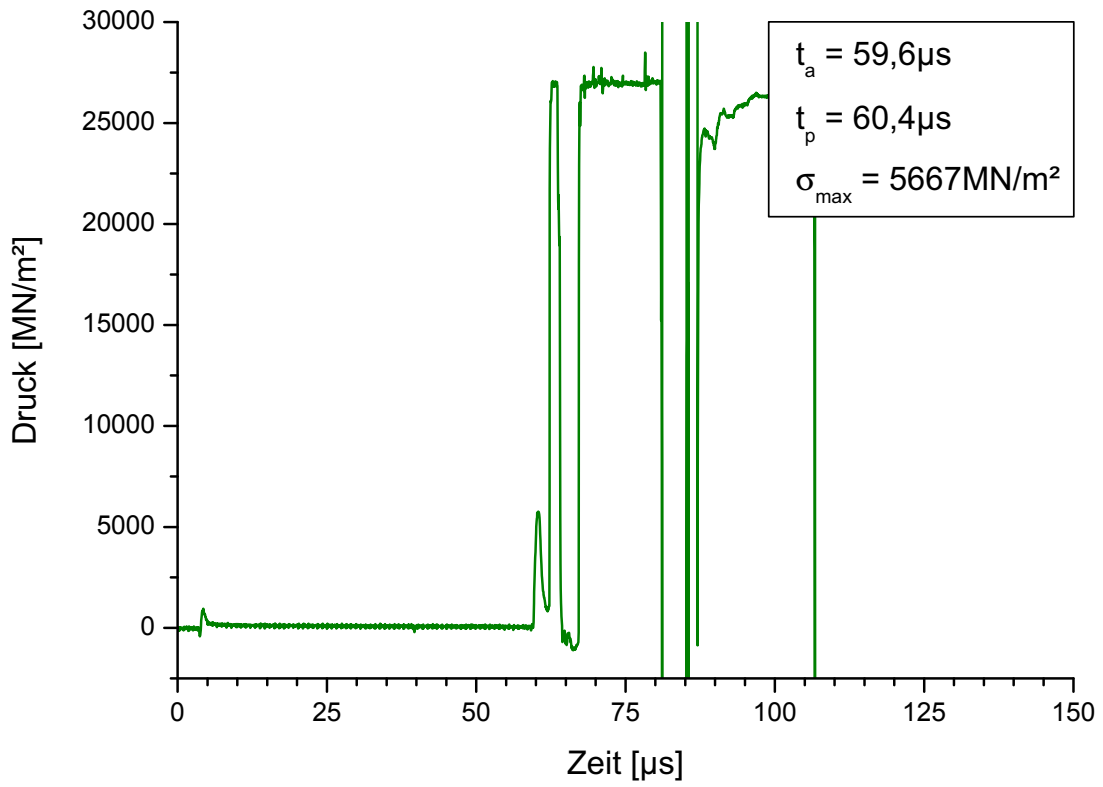


Bild C.114: MA 202-axial, Einbautiefe 31,5 mm

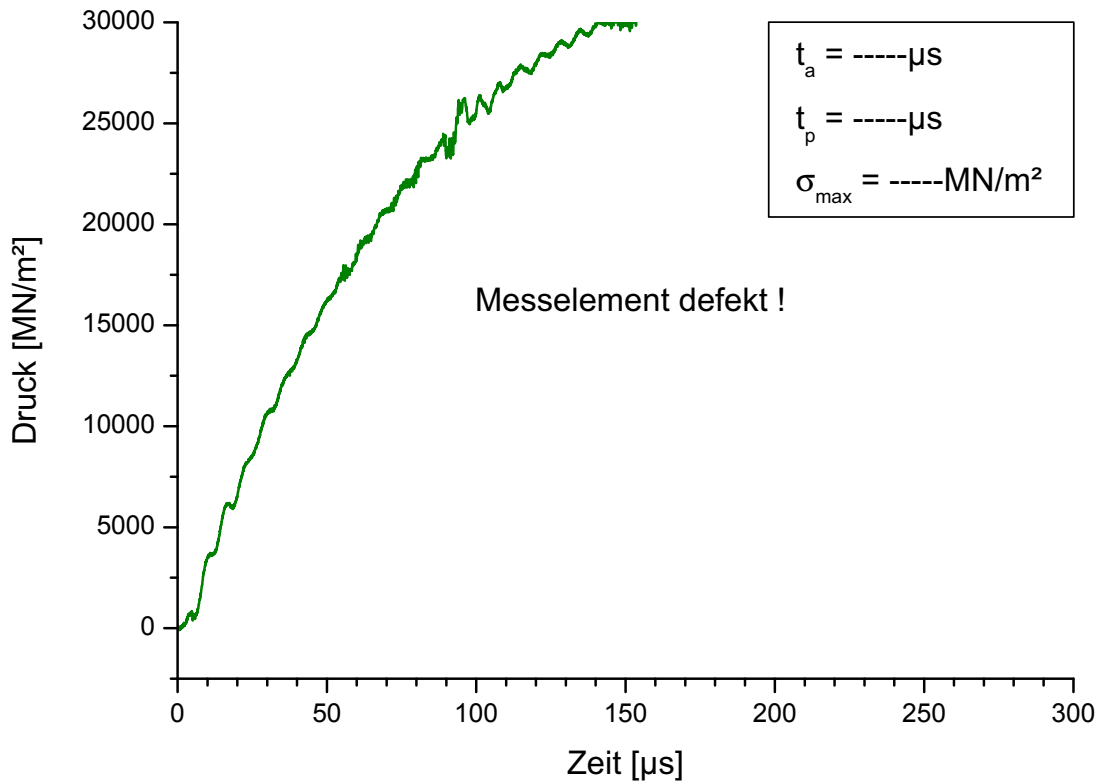


Bild C.115: MA 203-axial, Einbautiefe 43,5 mm

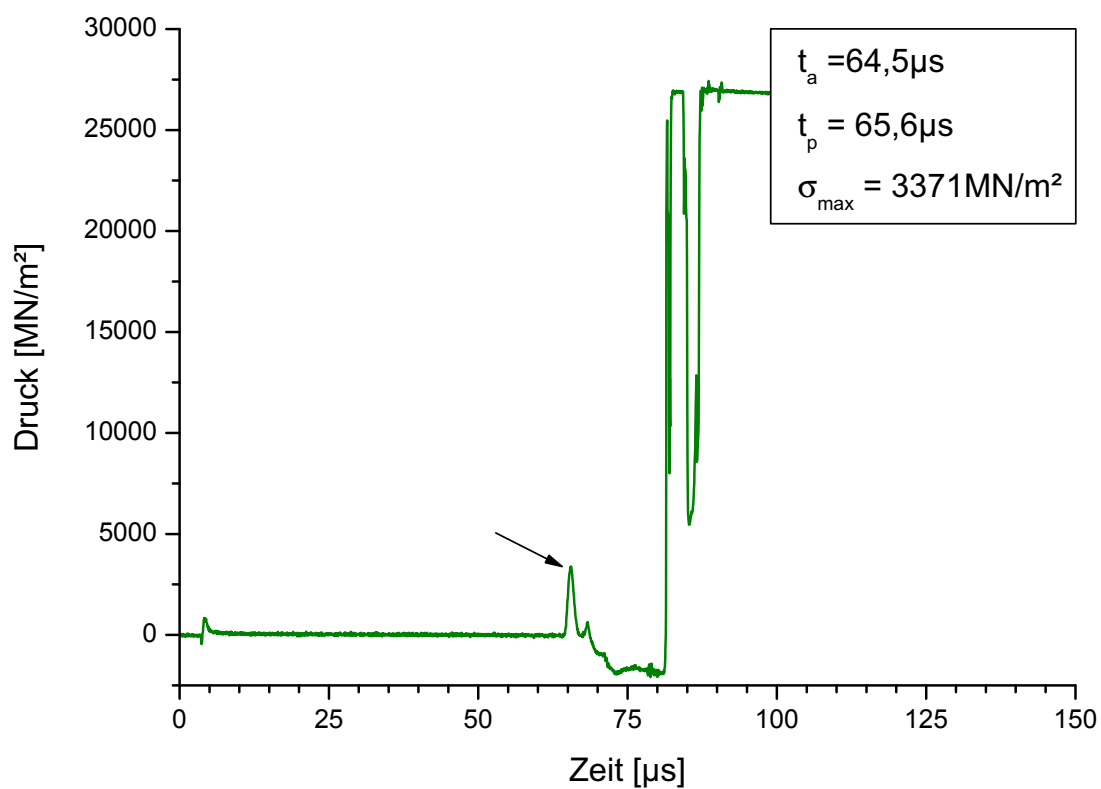


Bild C.116: MA 204-axial, Einbautiefe 52,5 mm

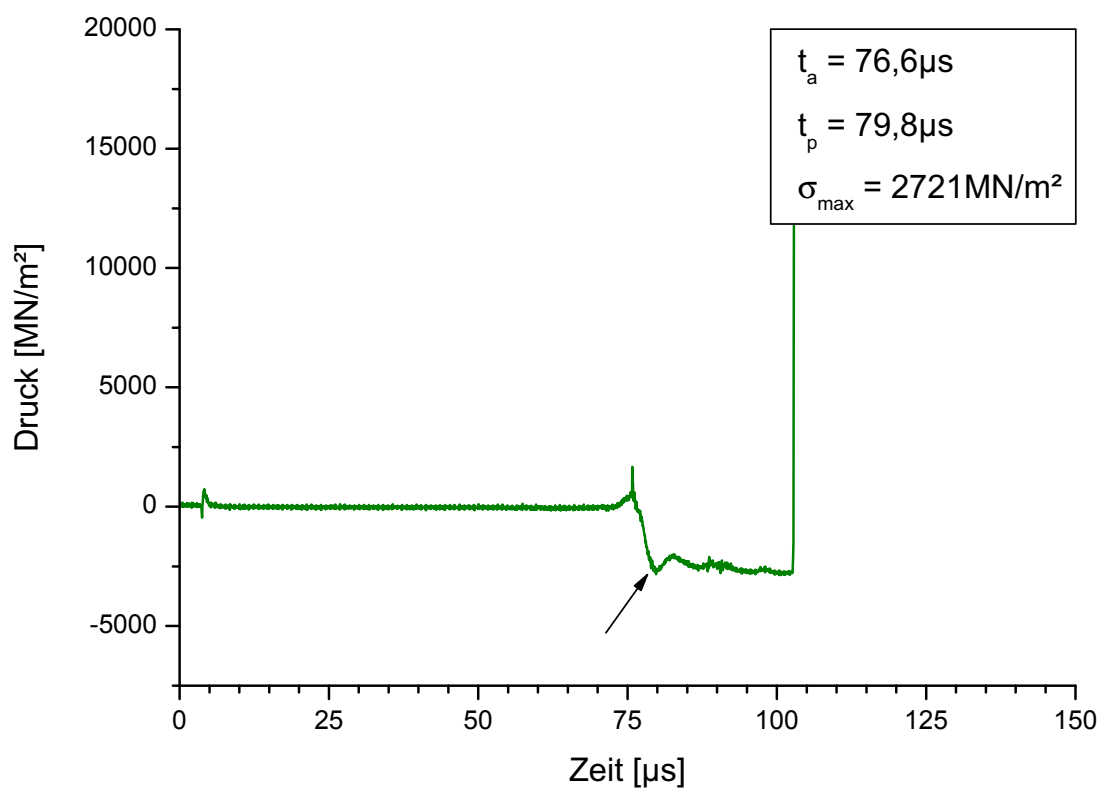


Bild C.117: MA 205-axial, Einbautiefe 81,5 mm

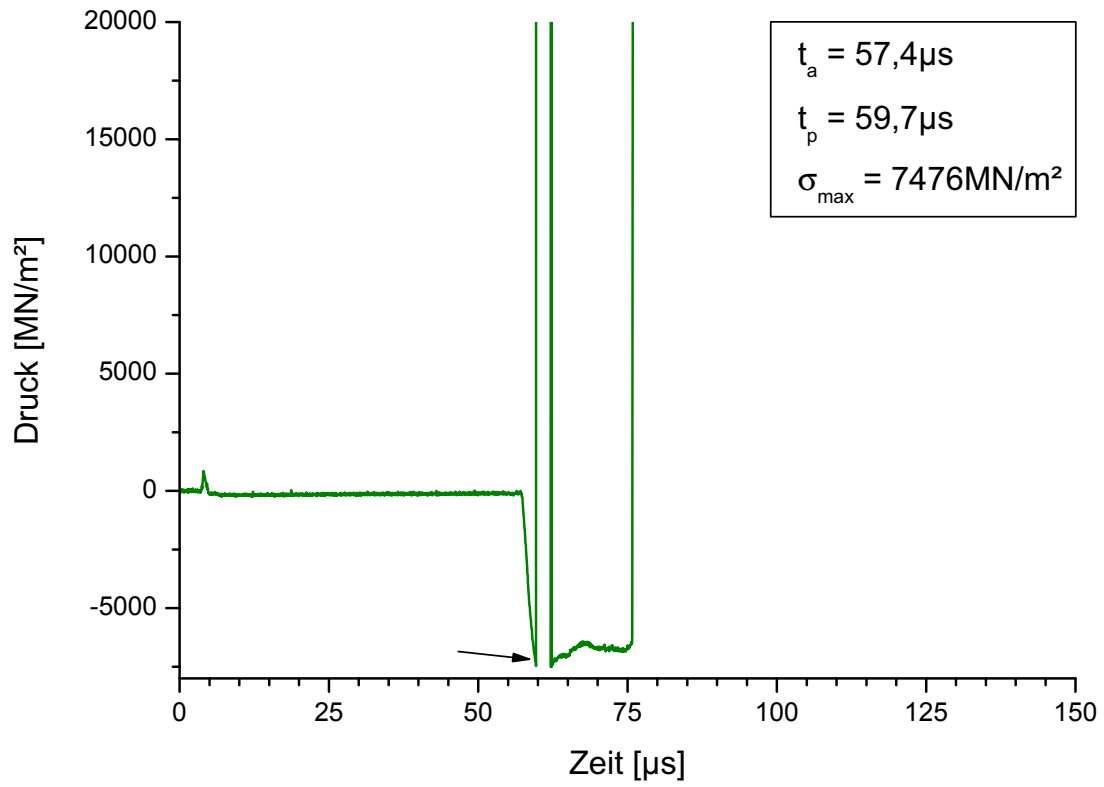


Bild C.118: MA 206-radial, Einbautiefe 23,5 mm

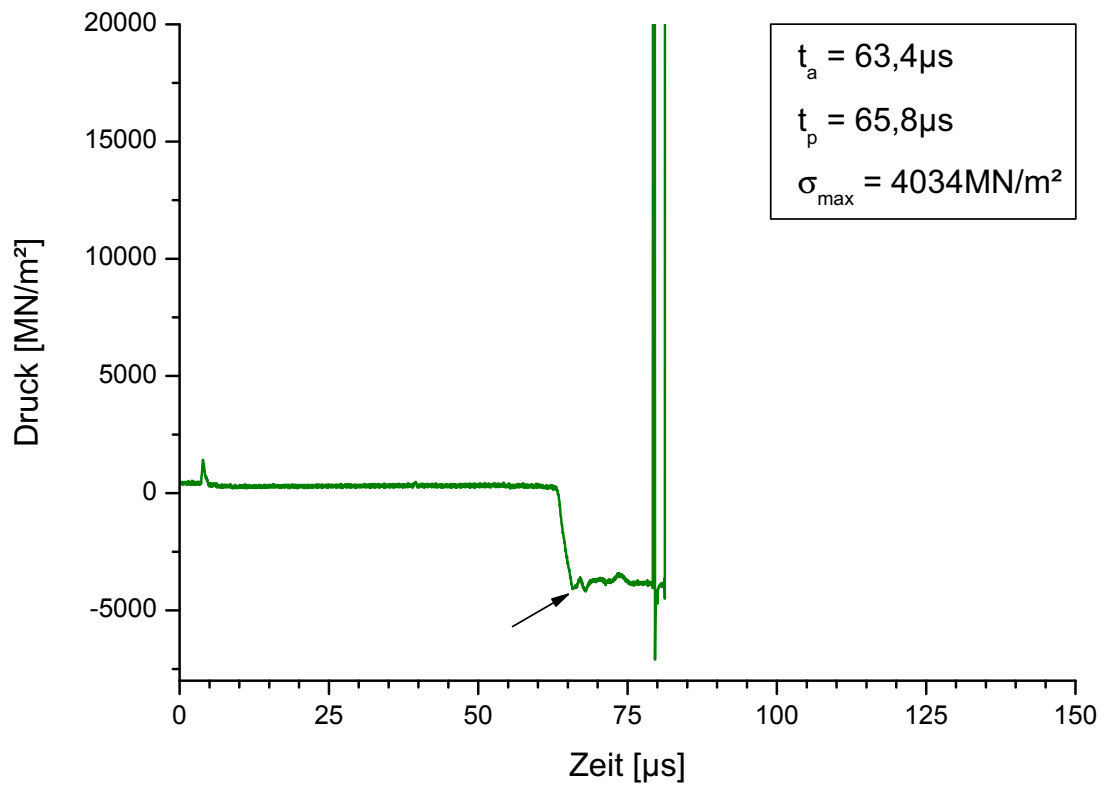


Bild C.119: MA 207-radial, Einbautiefe 43,5 mm

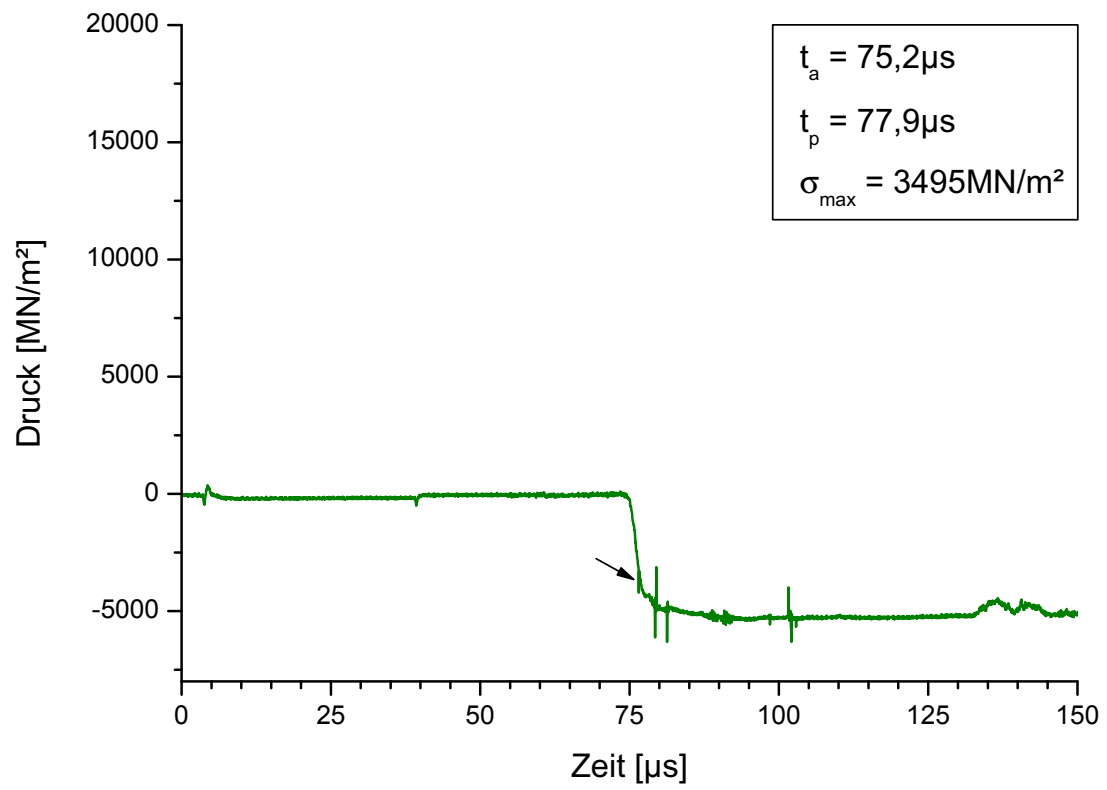


Bild C.120: MA 208-axial, Einbautiefe 81,5 mm

Versuch Nr. 3

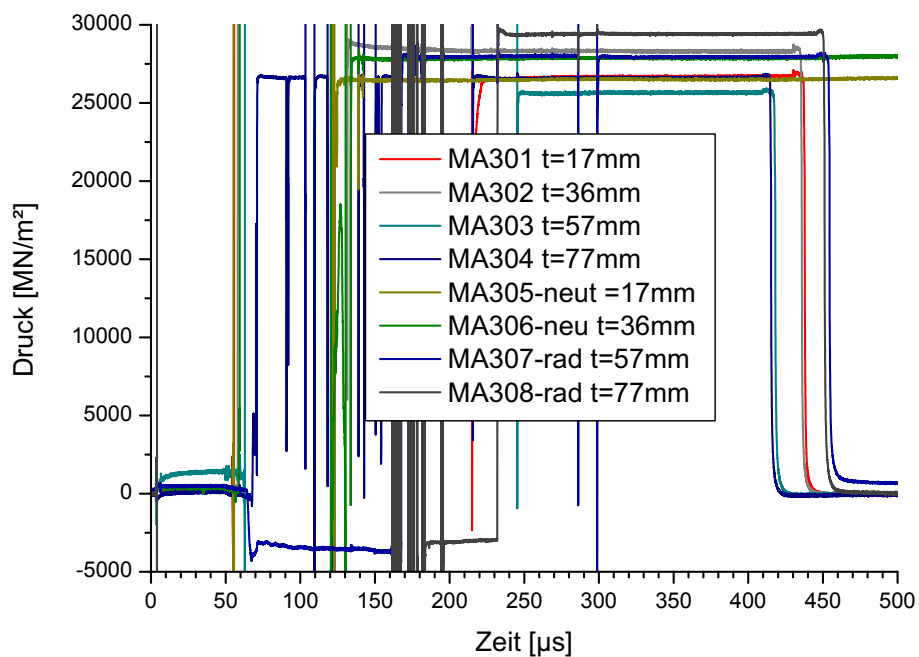


Bild C.121: Versuch Nr. 3, MA 301-308

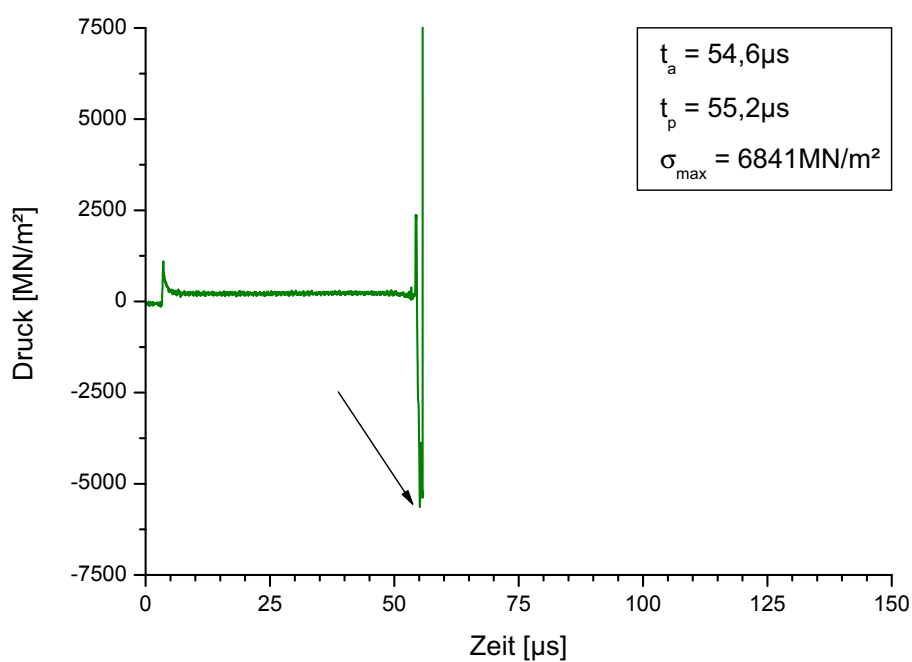


Bild C.122: MA 301-axial, Einbautiefe 17 mm

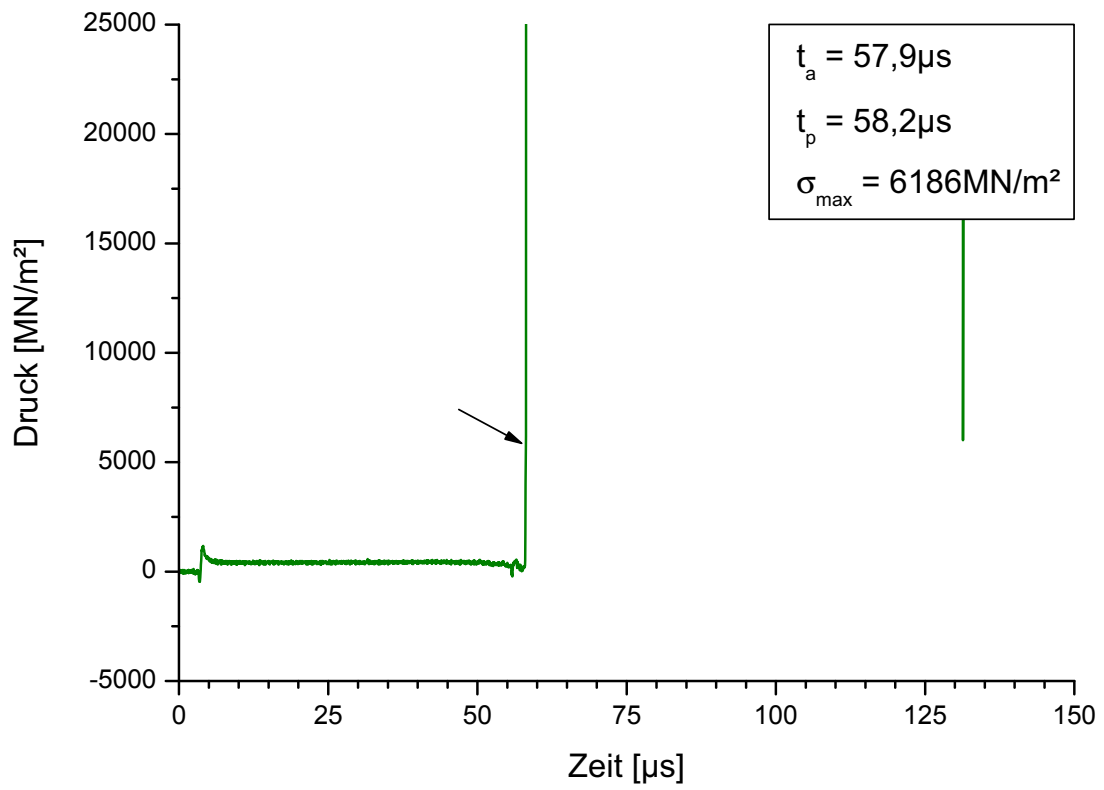


Bild C.123: MA 302-axial, Einbautiefe 36 mm

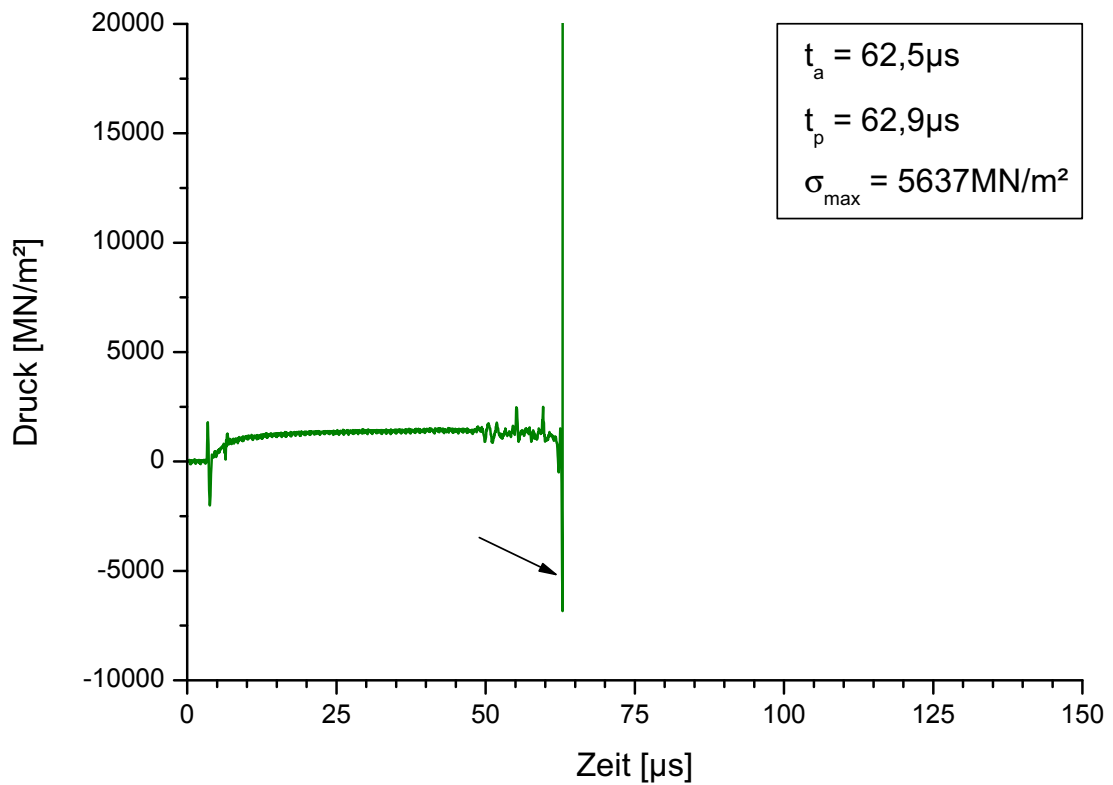


Bild C.124: MA 303-axial, Einbautiefe 57 mm

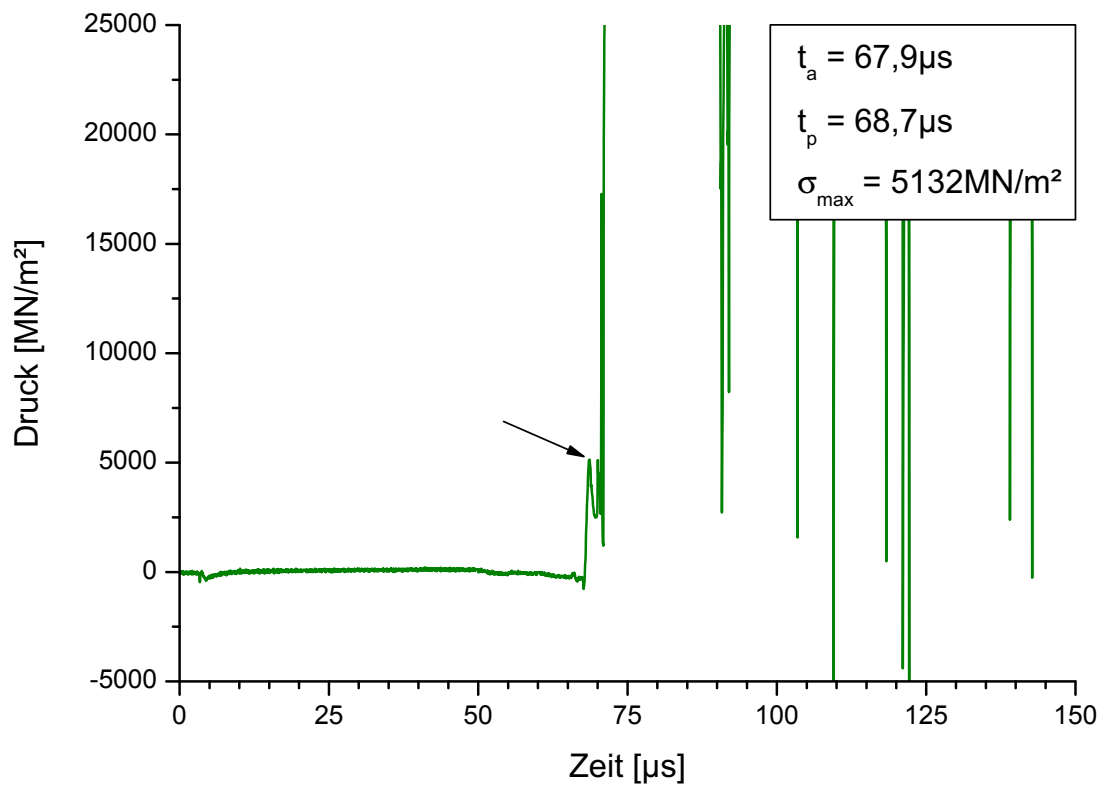


Bild C.125: MA 304-axial, Einbautiefe 77 mm

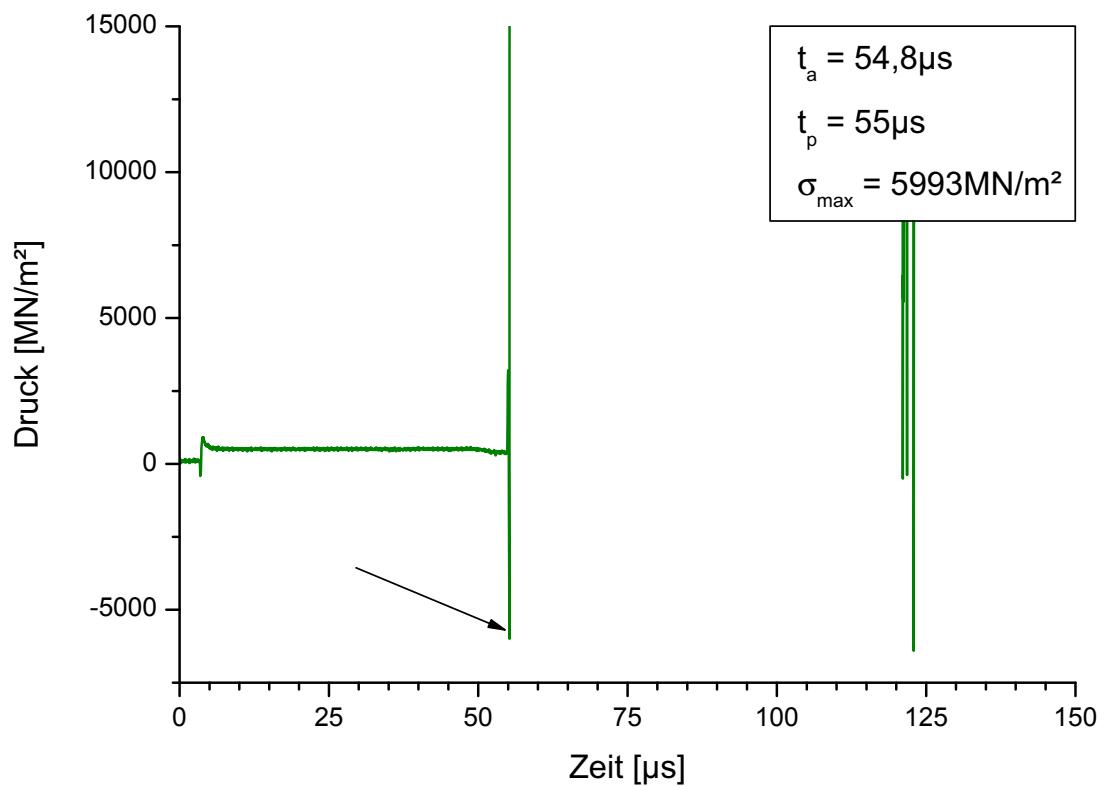


Bild C.126: MA 305-axial-neu, Einbautiefe 17 mm

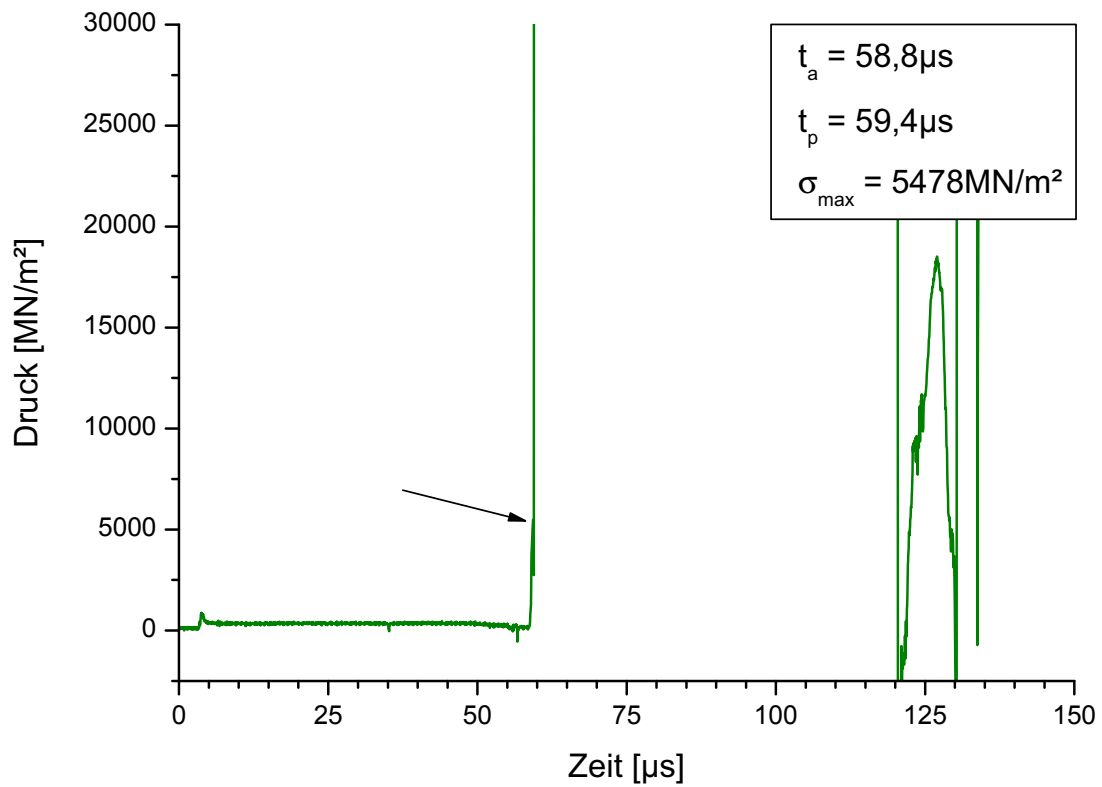


Bild C.127: MA 306-axial-neu, Einbautiefe 36 mm

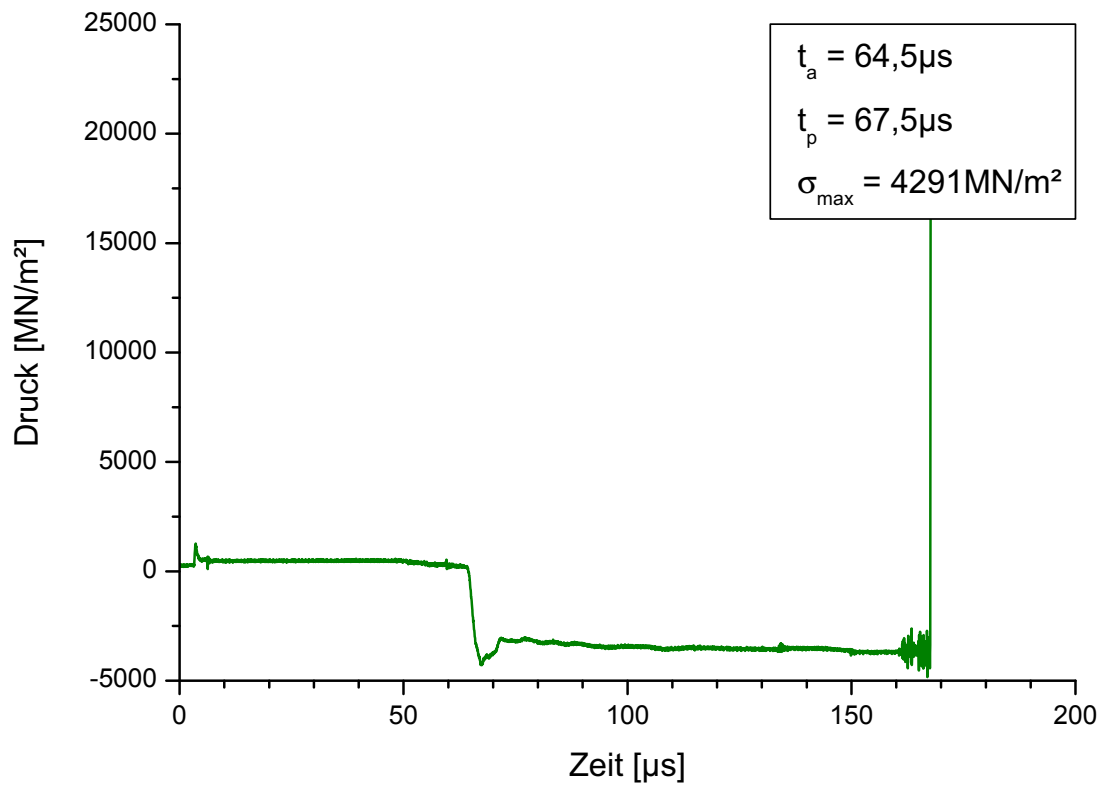


Bild C.128: MA 307-radial, Einbautiefe 57 mm

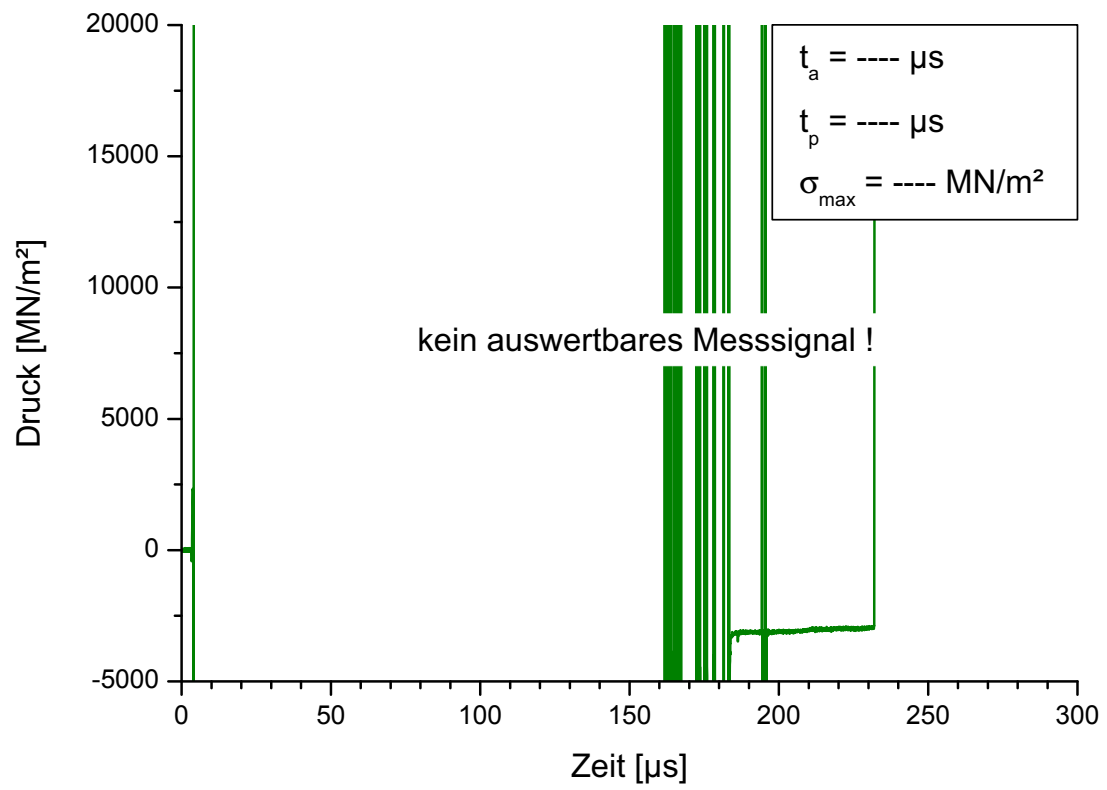


Bild C.129: MA 308-radial, Einbautiefe 77 mm

Versuch Nr. 4

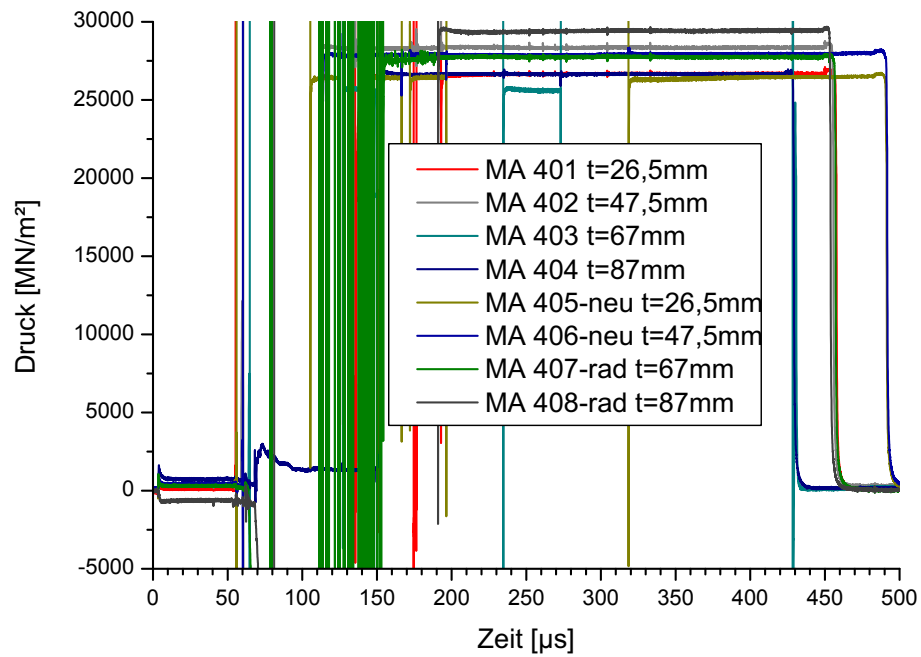


Bild C.130: Versuch Nr. 4, MA 401-408

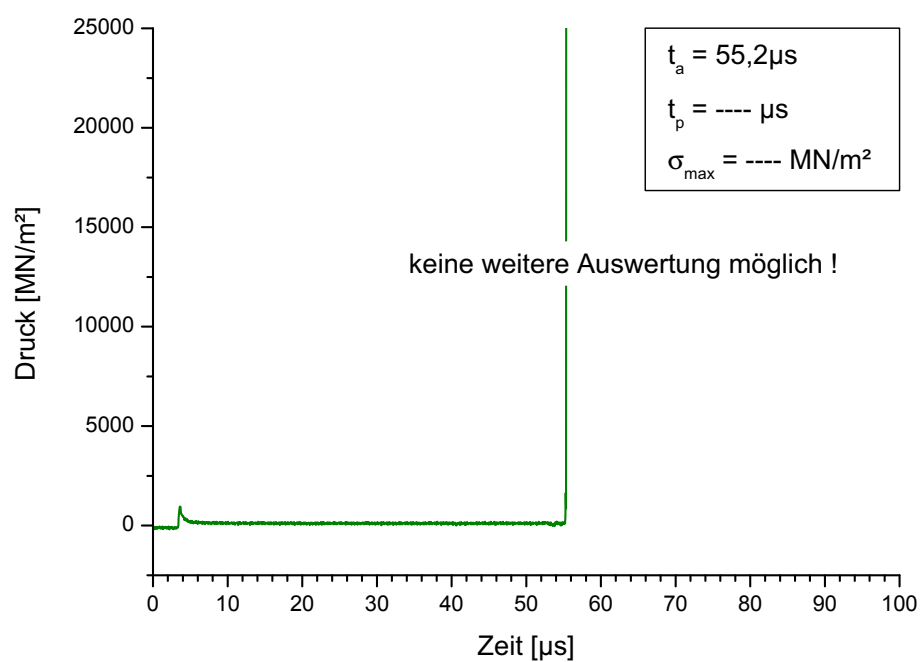


Bild C.131: MA 401-axial, Einbautiefe 26,5 mm

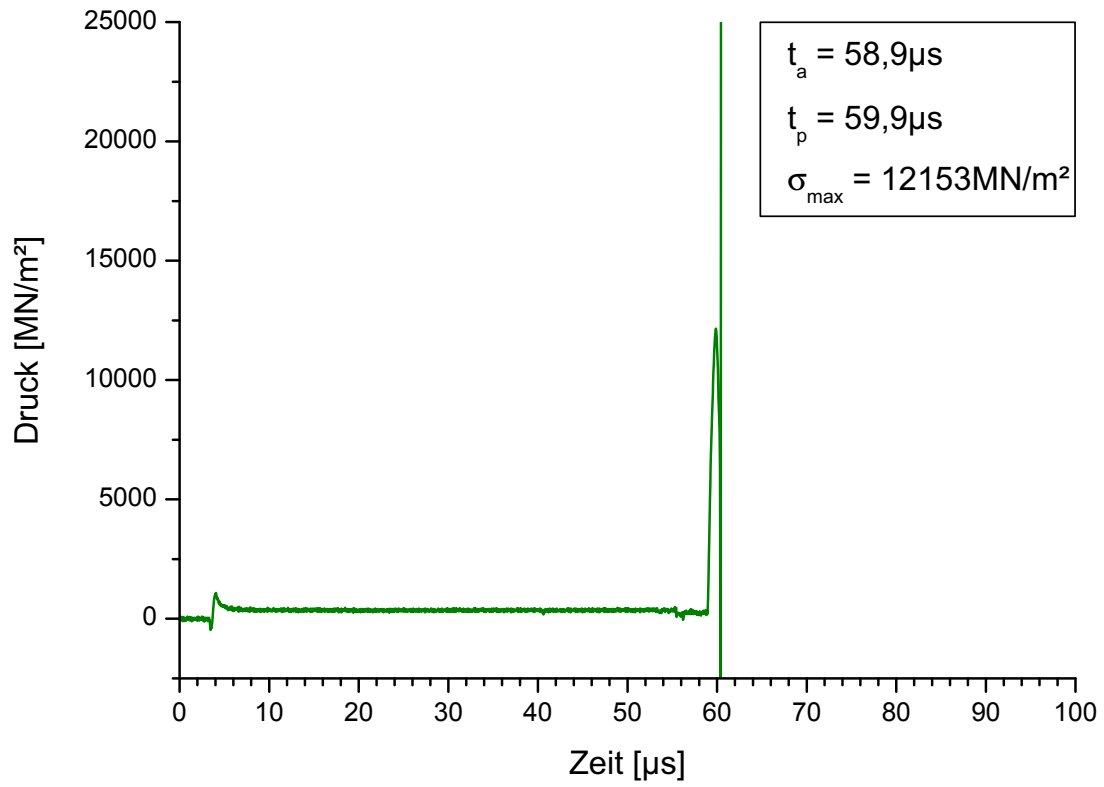


Bild C.132: MA 402-axial, Einbautiefe 47,5 mm

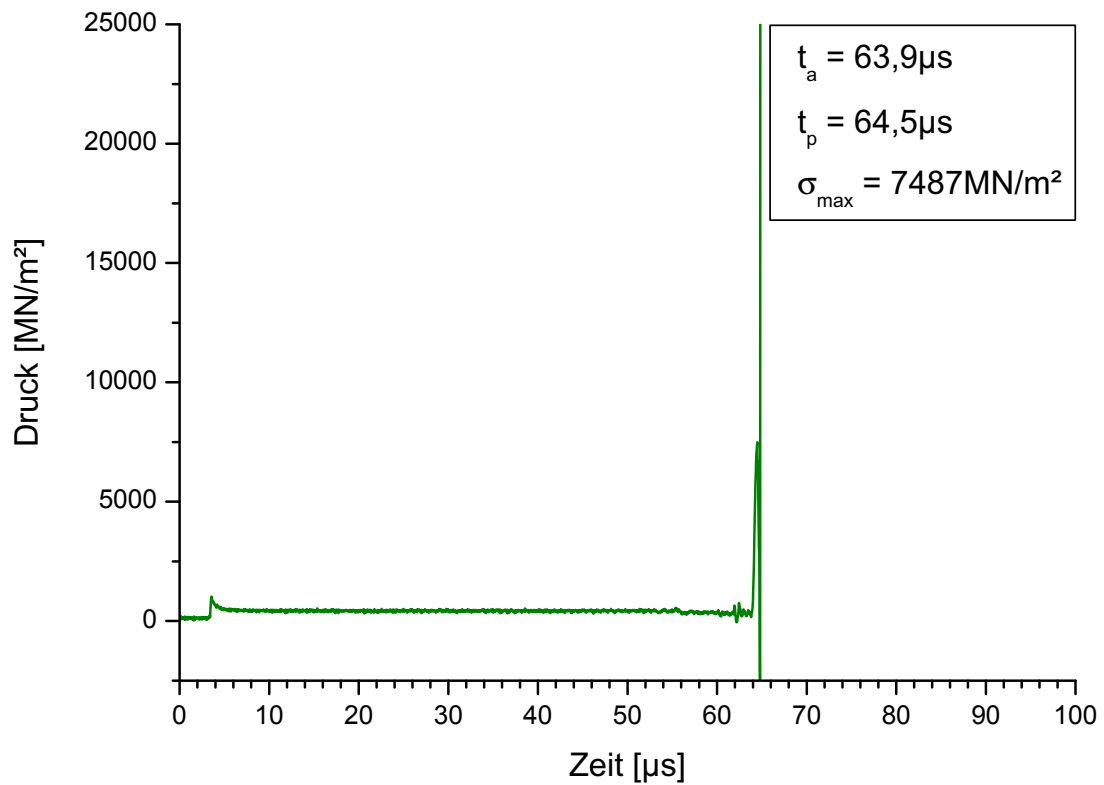


Bild C.133: MA 403-axial, Einbautiefe 67 mm

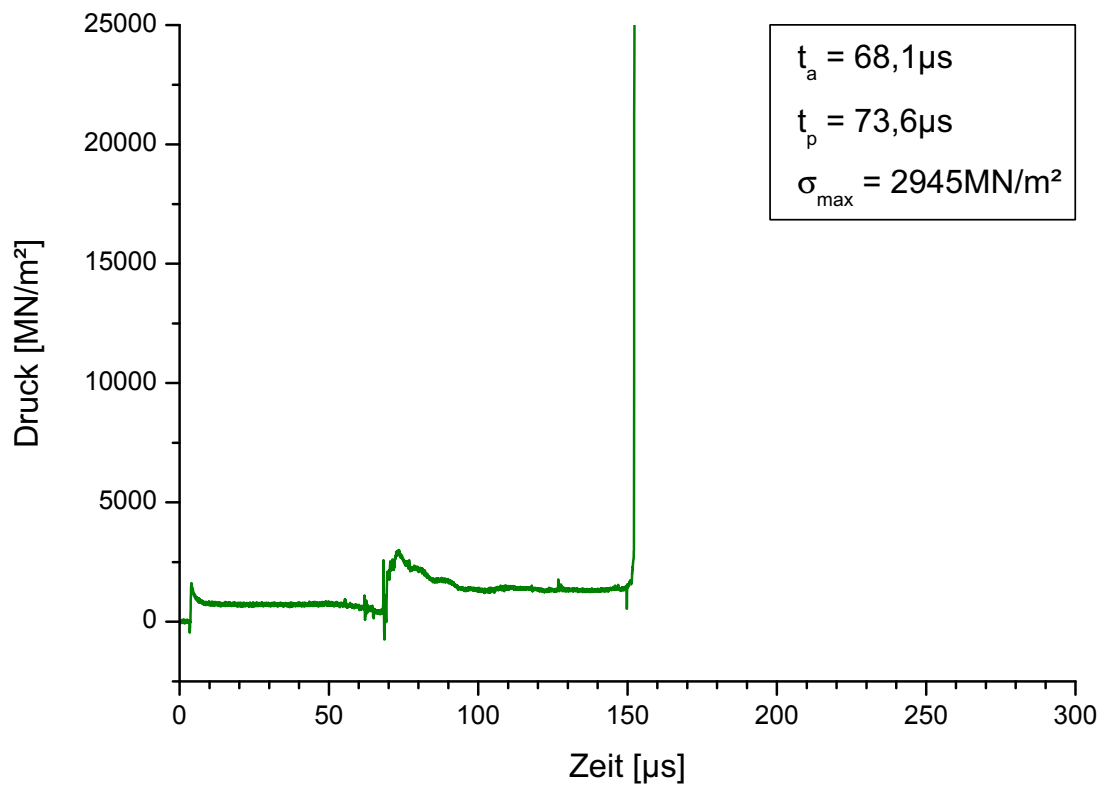


Bild C.134: MA 404-axial, Einbautiefe 87 mm

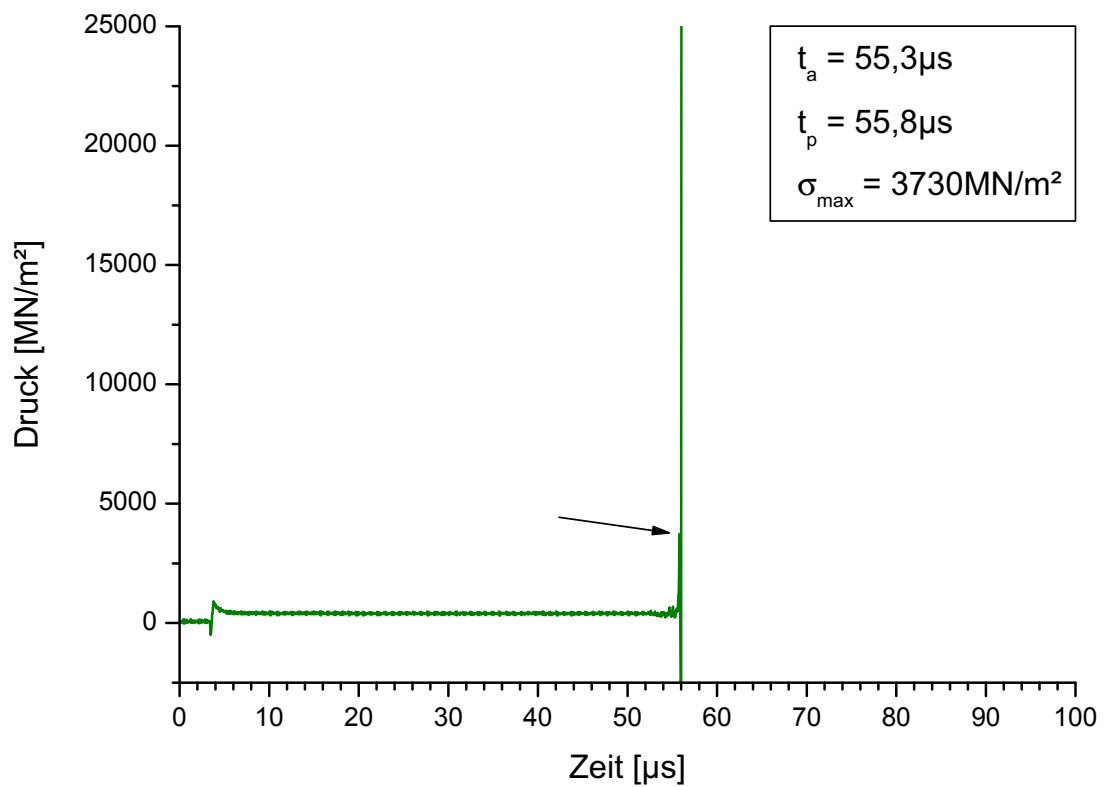


Bild C.135: MA 405-axial-neu, Einbautiefe 26,5 mm

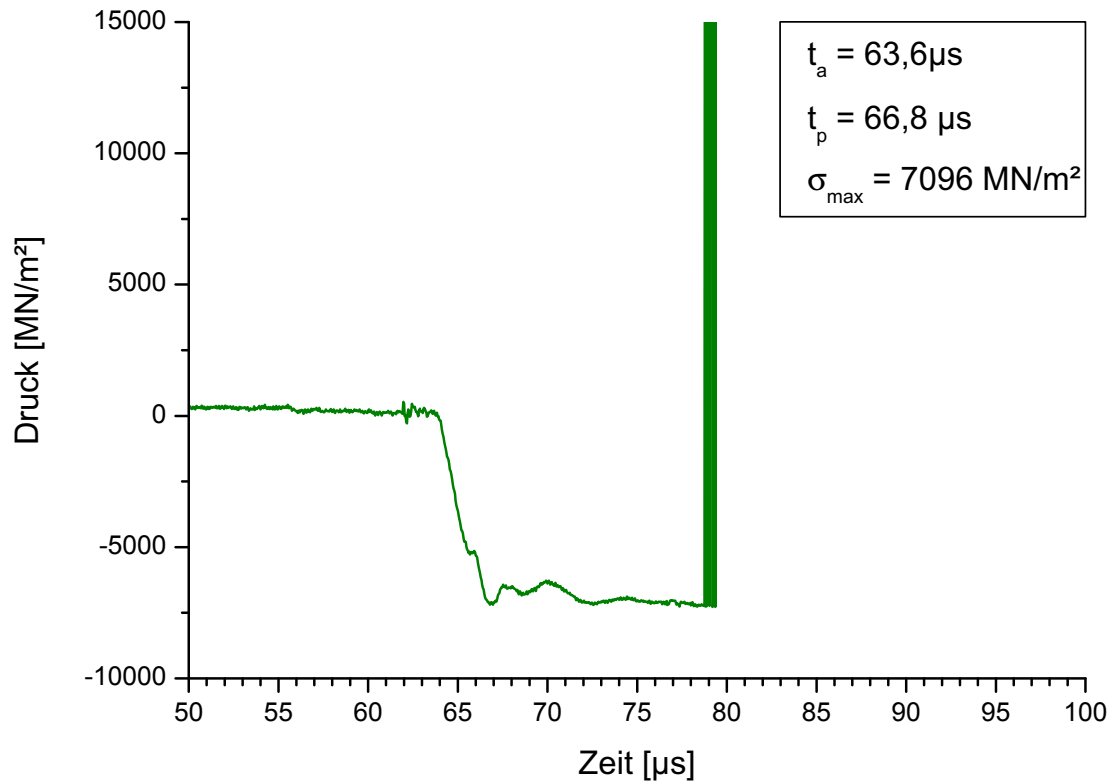


Bild C.136: MA 406-axial-neu, Einbautiefe 47,5 mm

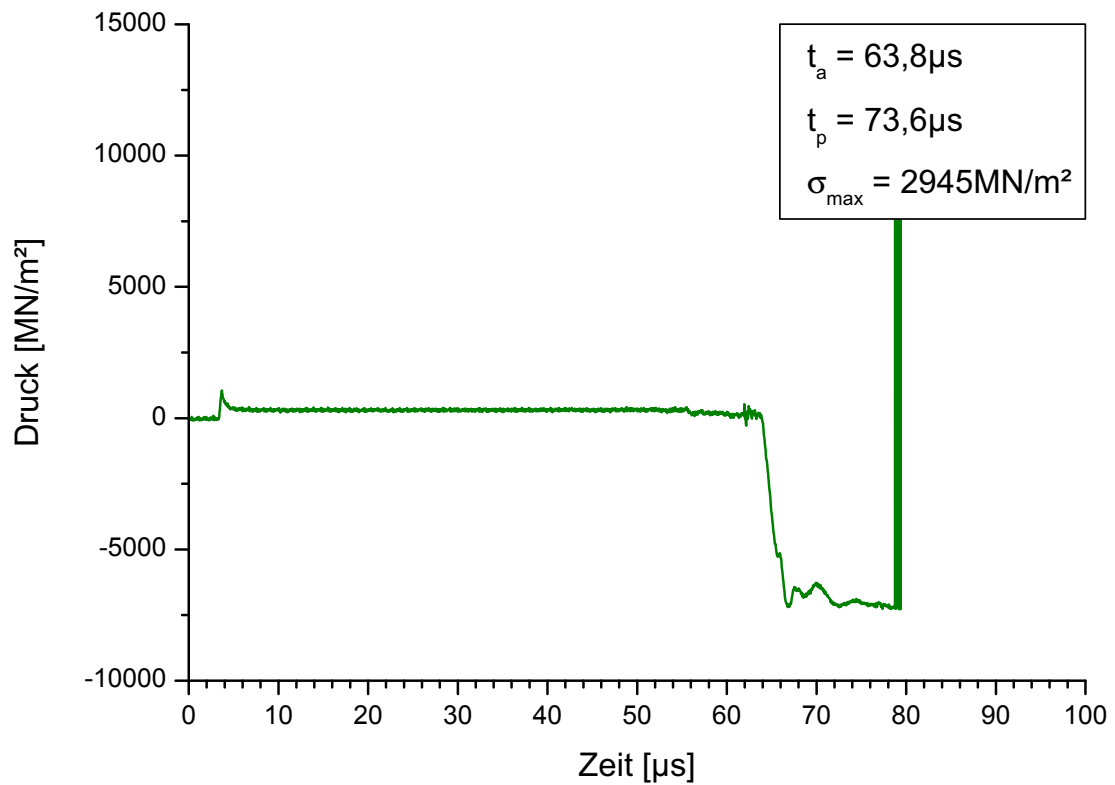


Bild C.137: MA 407-radial, Einbautiefe 67 mm

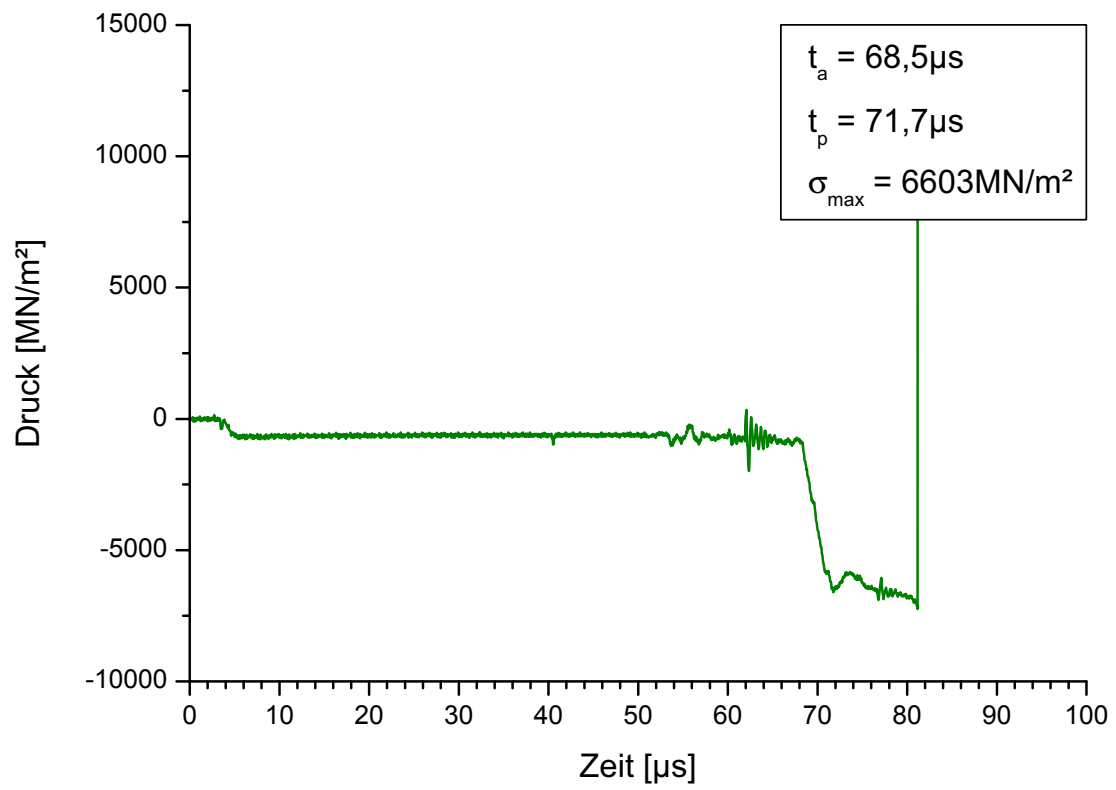


Bild C.138: MA 408-radial, Einbautiefe 87 mm

Dehnmessstreifen (DMS)

Versuch Nr. 2

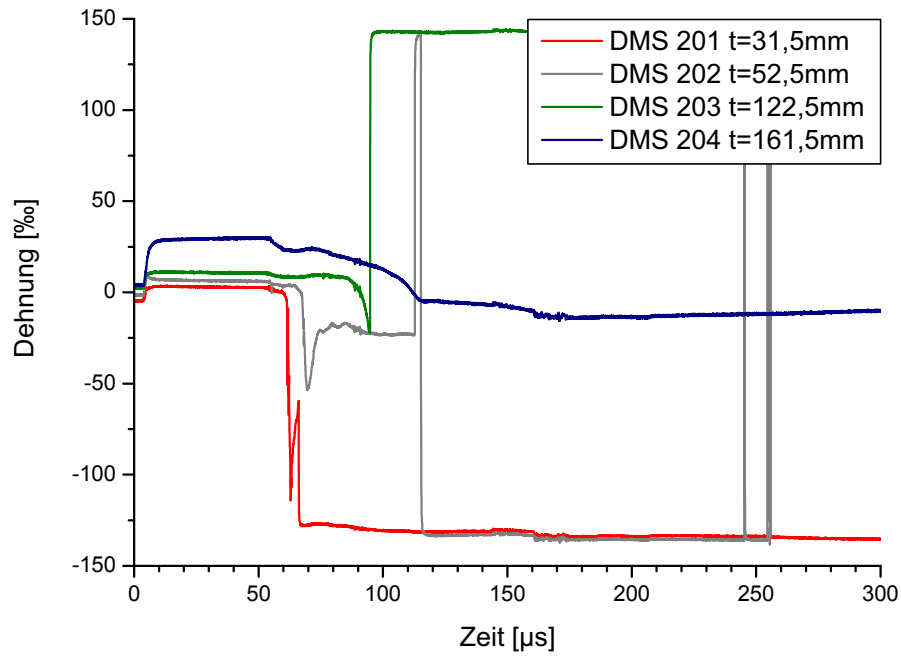


Bild C.139: Versuch Nr. 2, DMS 201-204

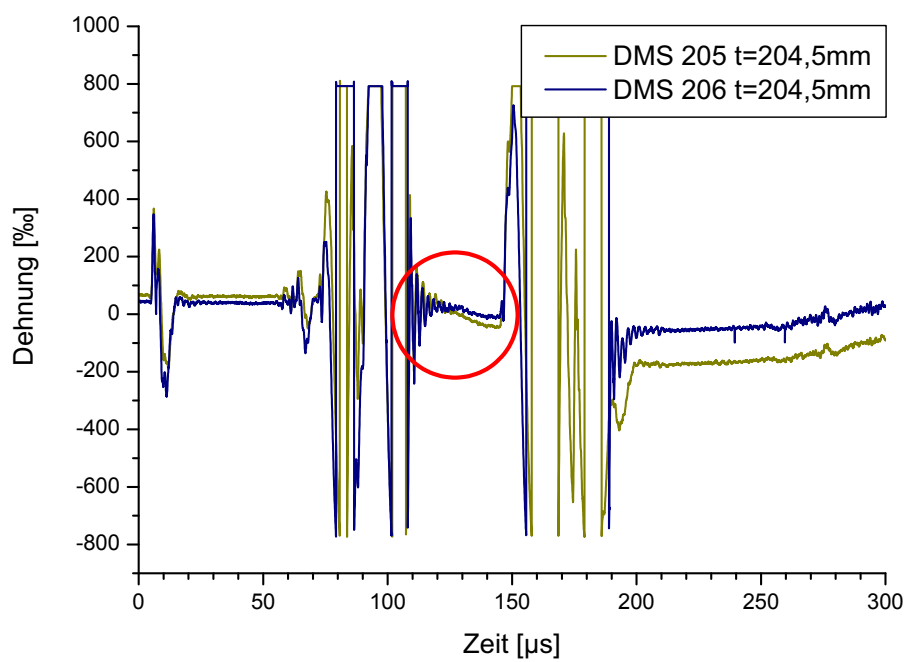


Bild C.140: Versuch Nr. 2, DMS 205-206

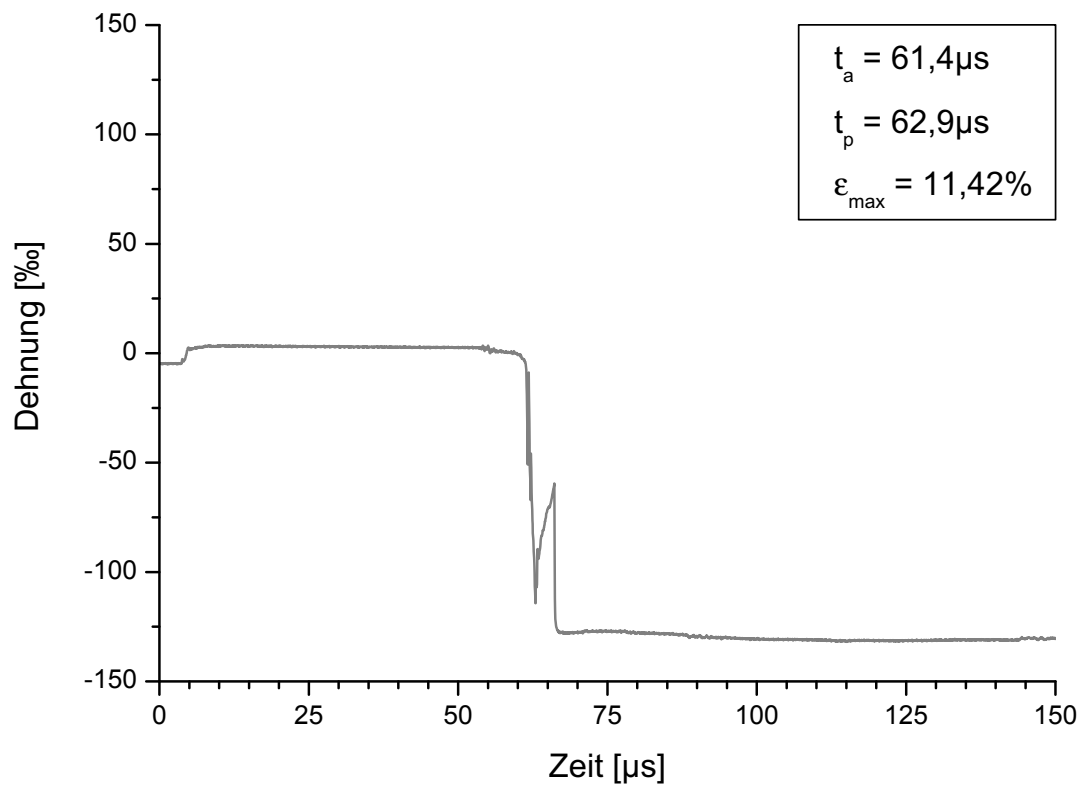


Bild C.141: DMS 201, Einbautiefe 31,5 mm

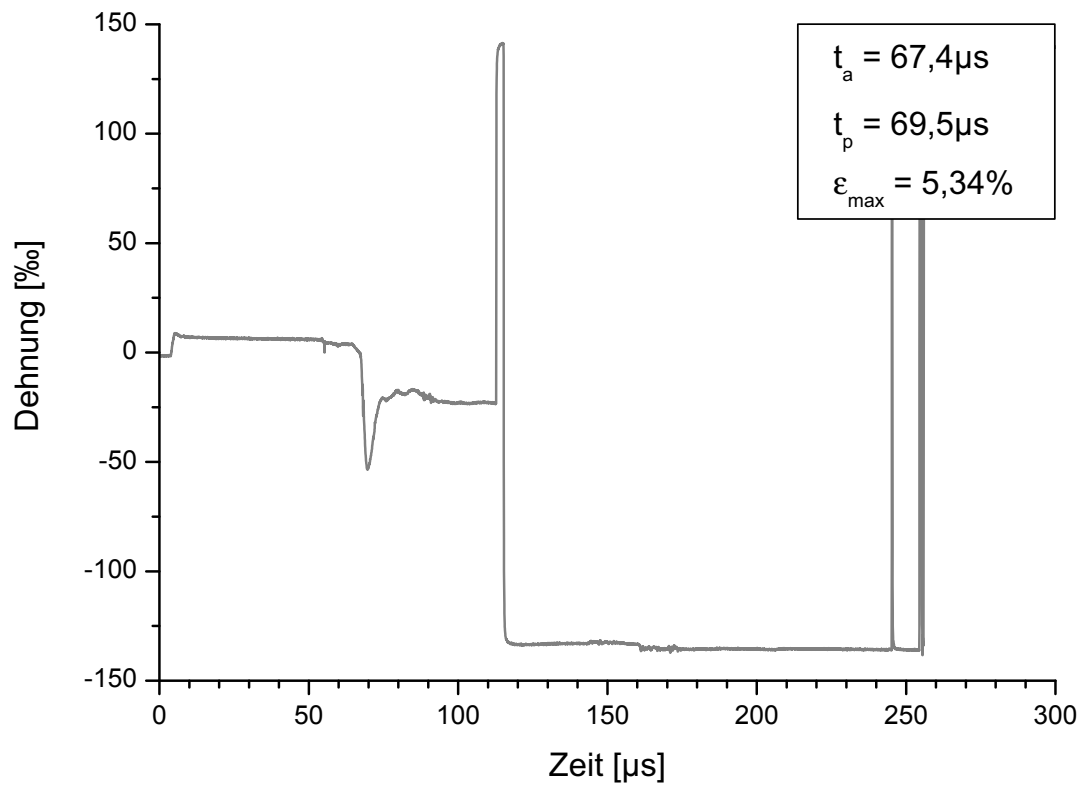


Bild C.142: DMS 202, Einbautiefe 52,5 mm

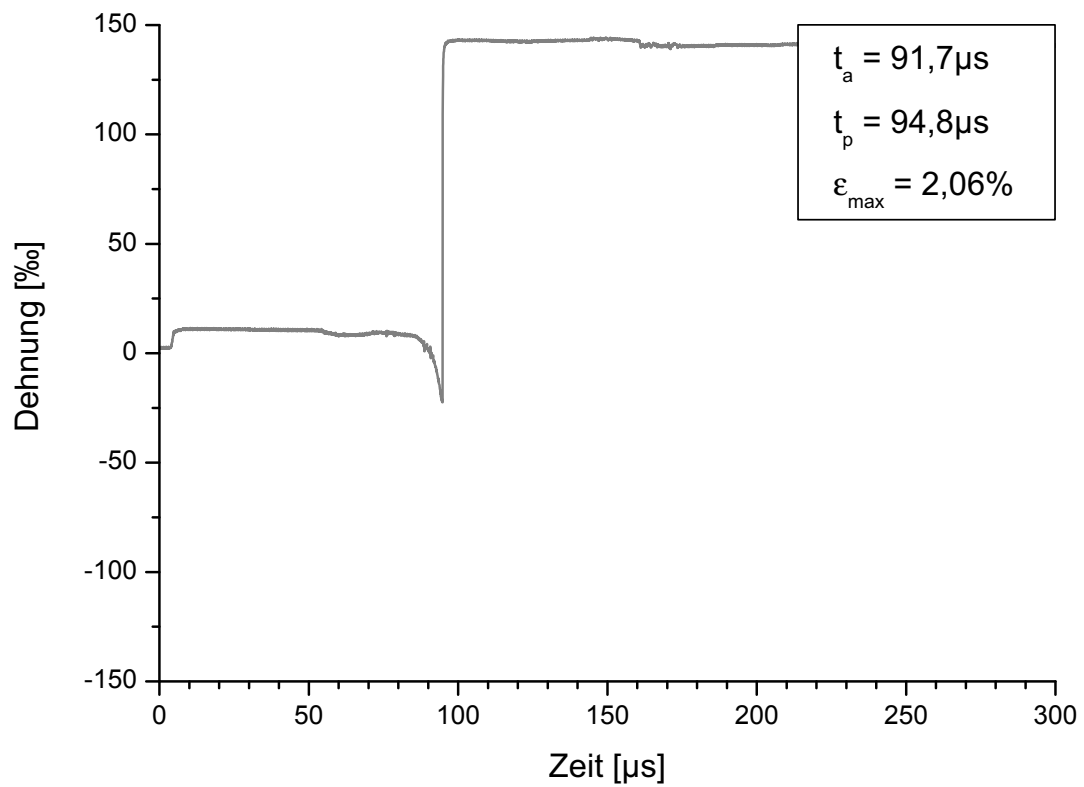


Bild C.143: DMS 203, Einbautiefe 122,5 mm

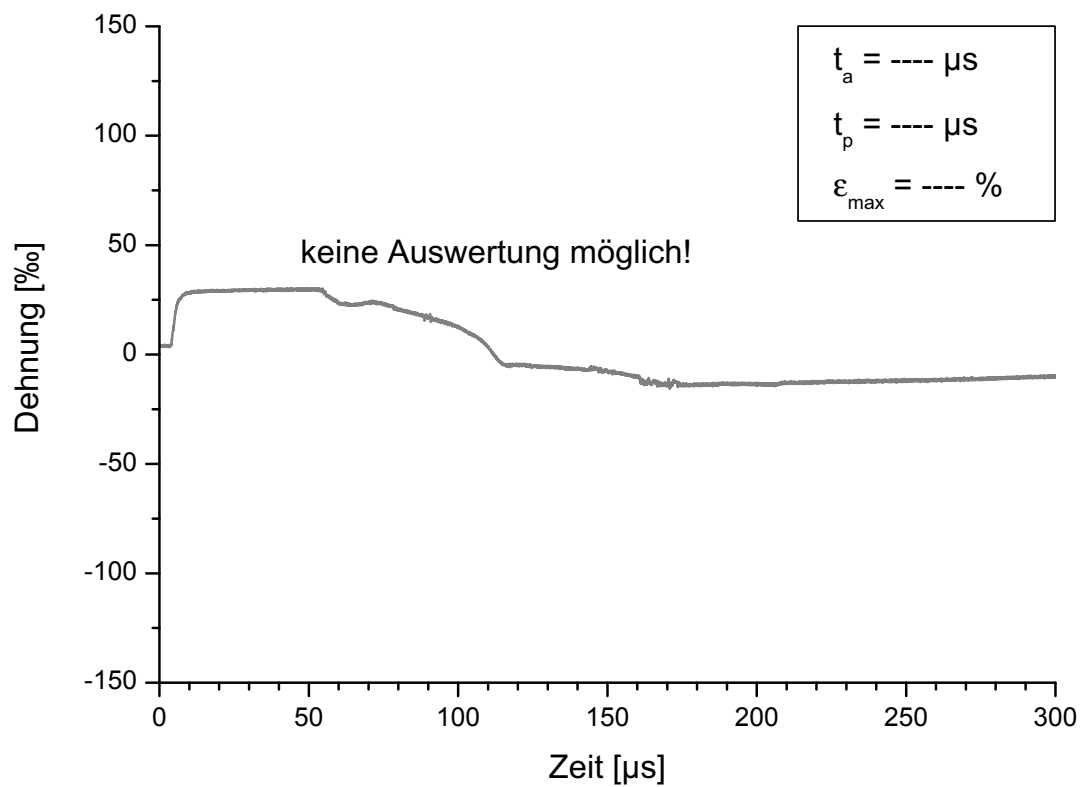


Bild C.144: DMS 204, Einbautiefe 161,5 mm

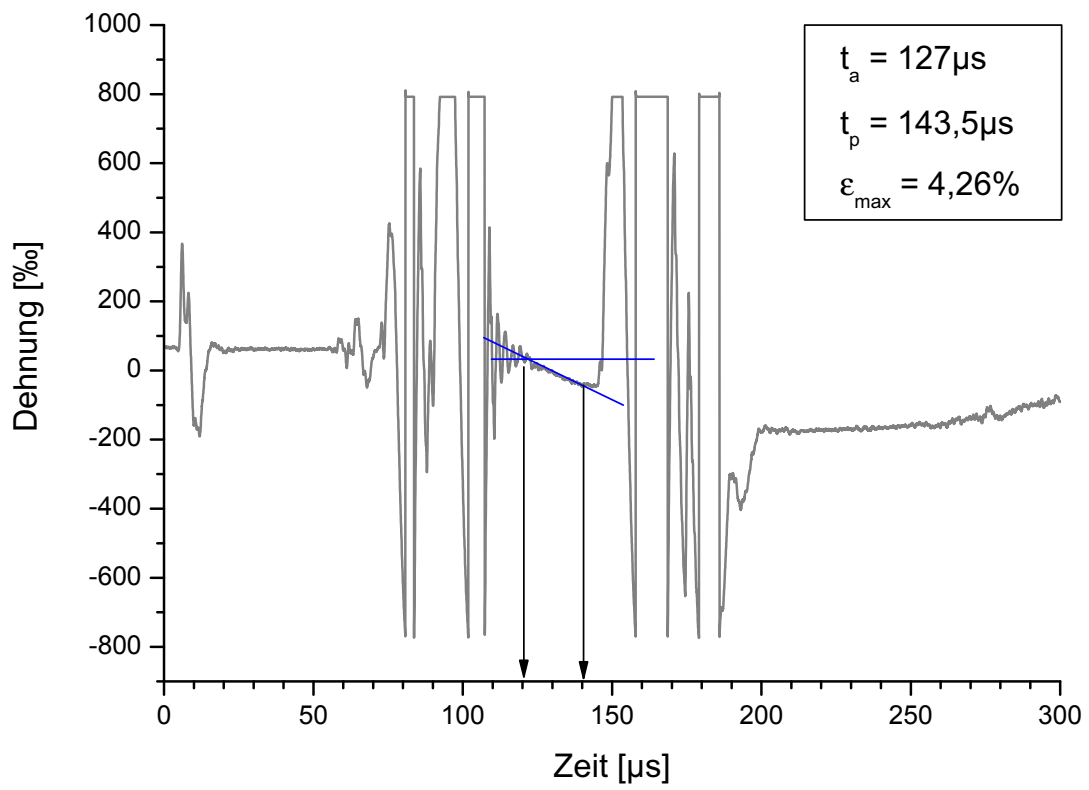


Bild C.145: DMS 205, Einbautiefe 204,5 mm

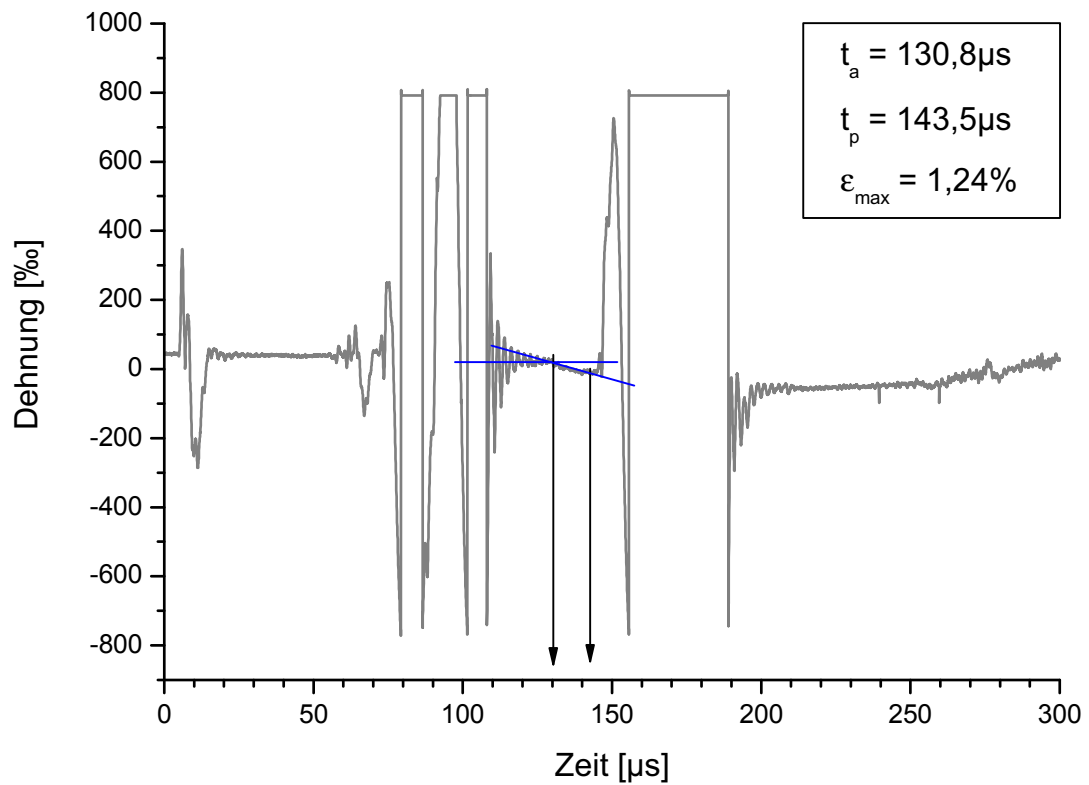


Bild C.146: DMS 206, Einbautiefe 204,5 mm

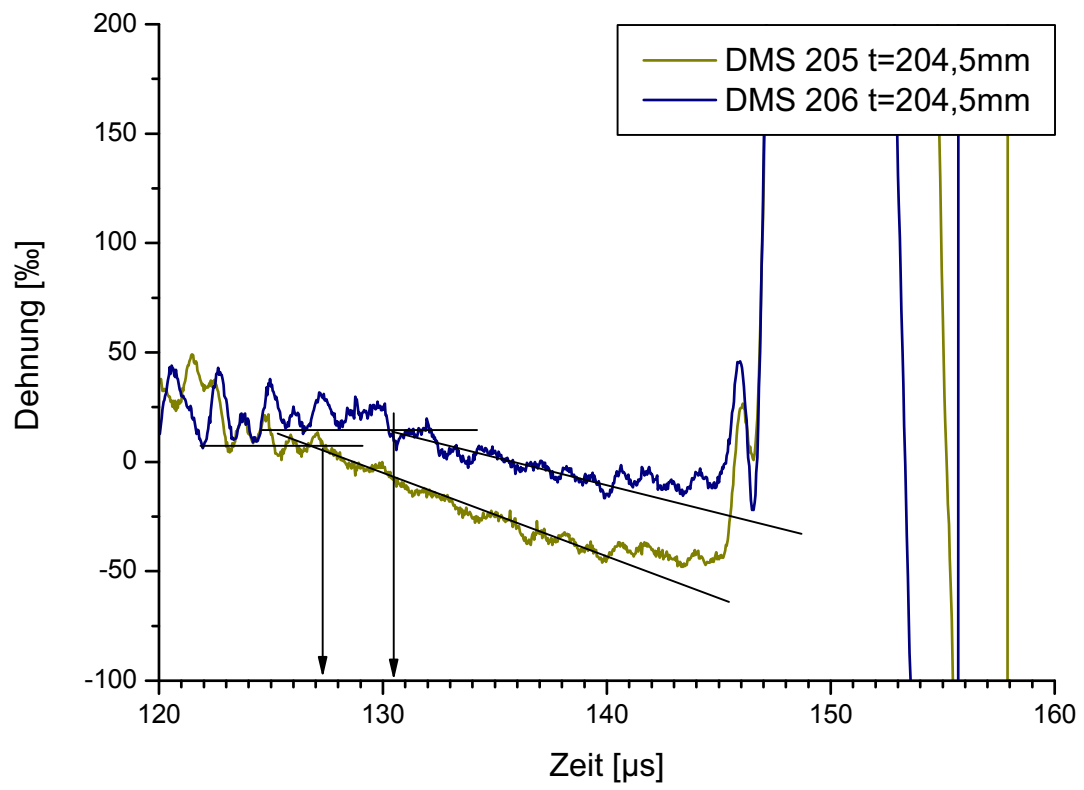


Bild C.147: DMS 205 und 206 Vergleich, Einbautiefe 204,5 mm

Versuch Nr. 3

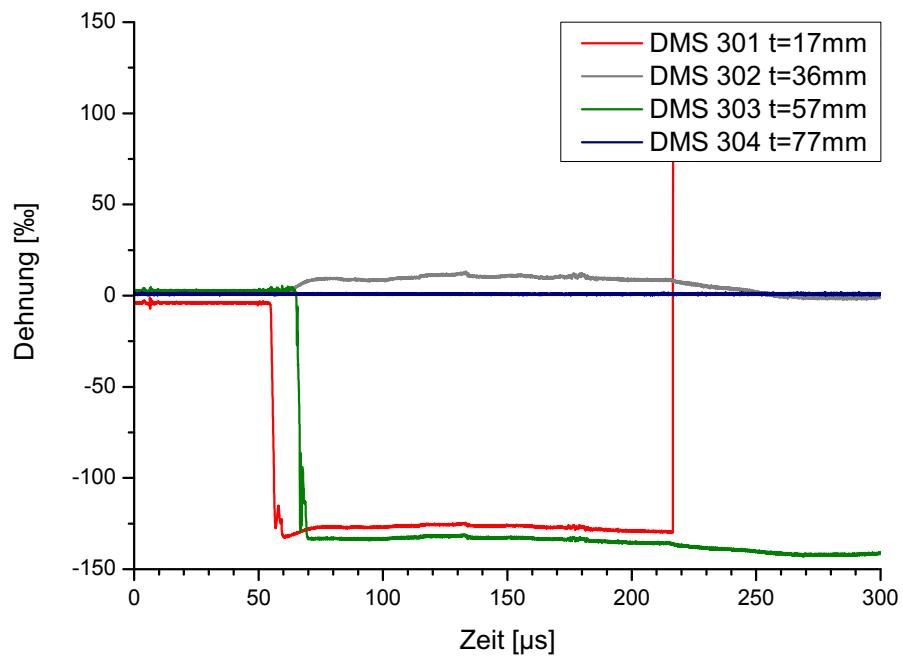


Bild C.148: Versuch Nr. 3, DMS 301-305

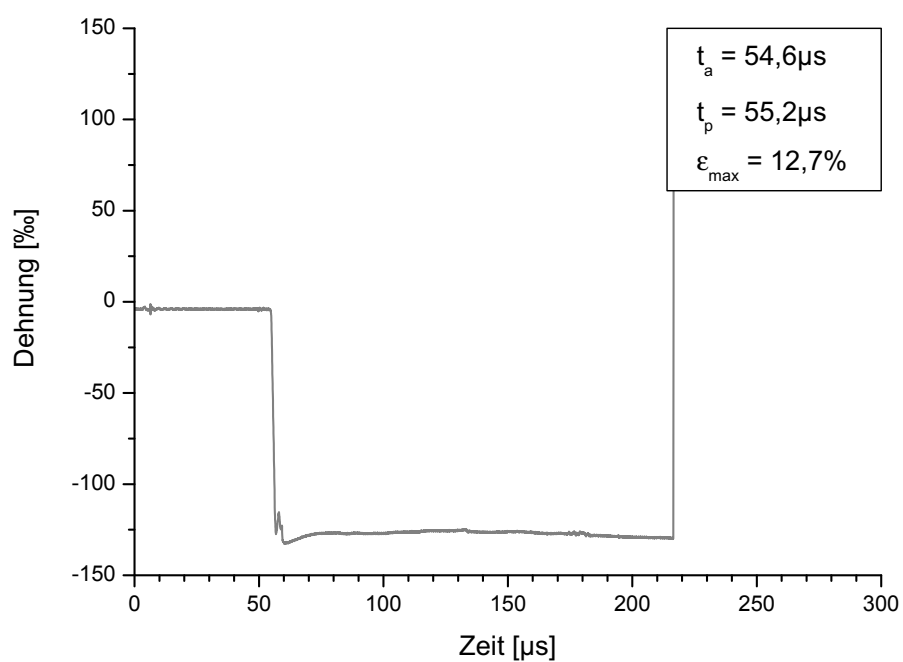


Bild C.149: DMS 301, Einbautiefe 17 mm

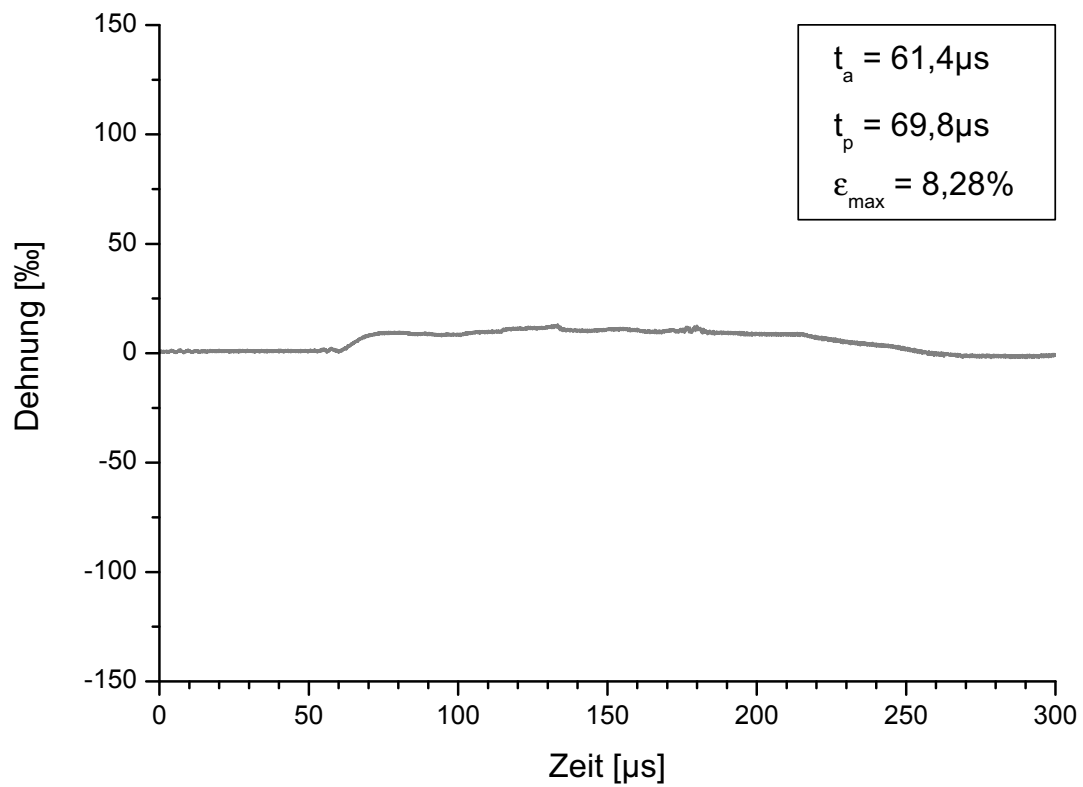


Bild C.150: DMS 302, Einbautiefe 36 mm

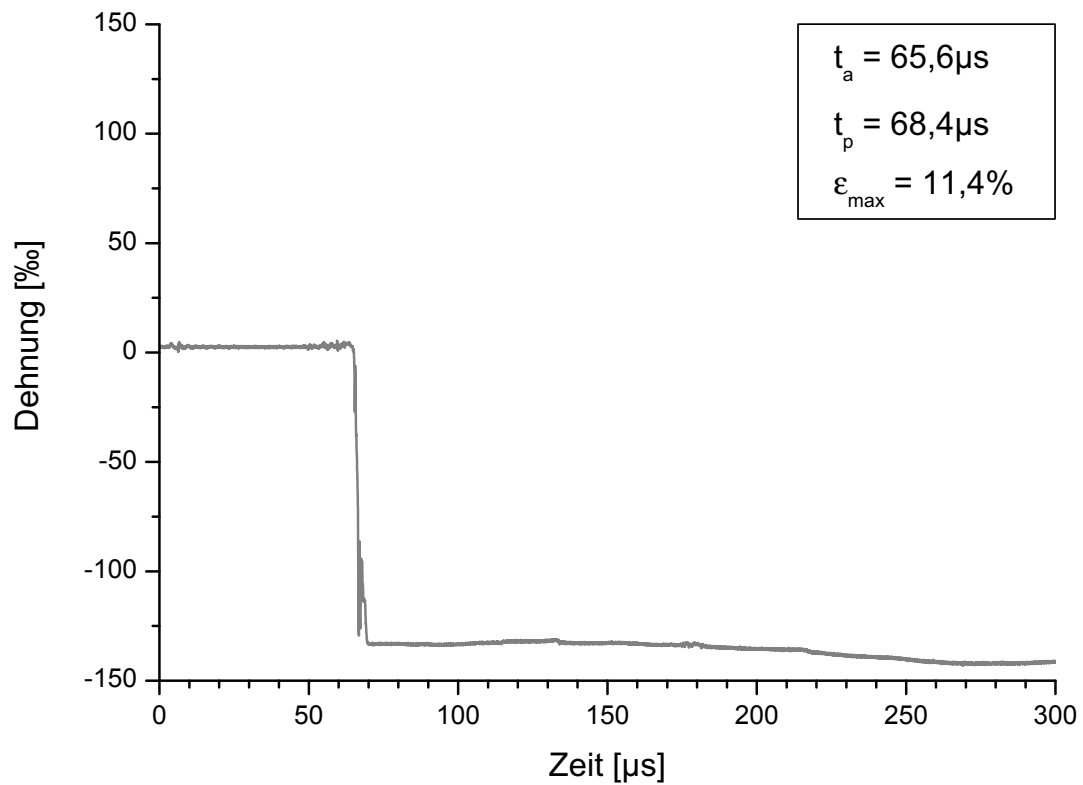


Bild C.151: DMS 303, Einbautiefe 57 mm

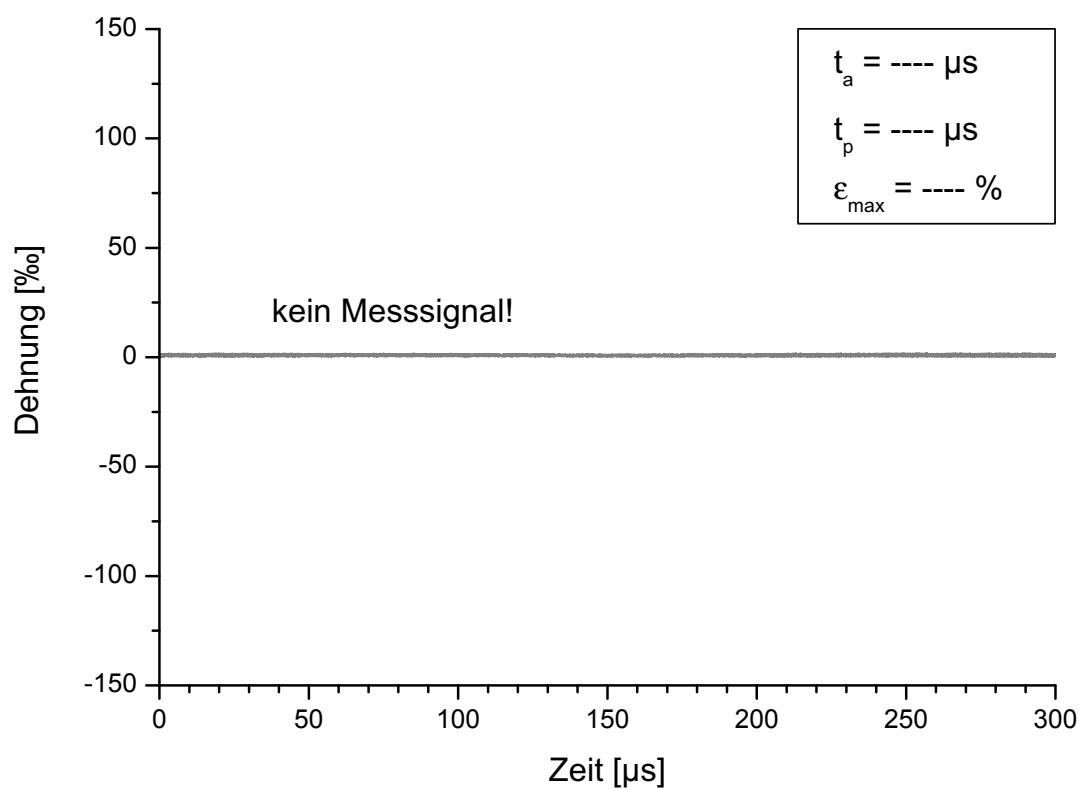


Bild C.152: DMS 304, Einbautiefe 77 mm

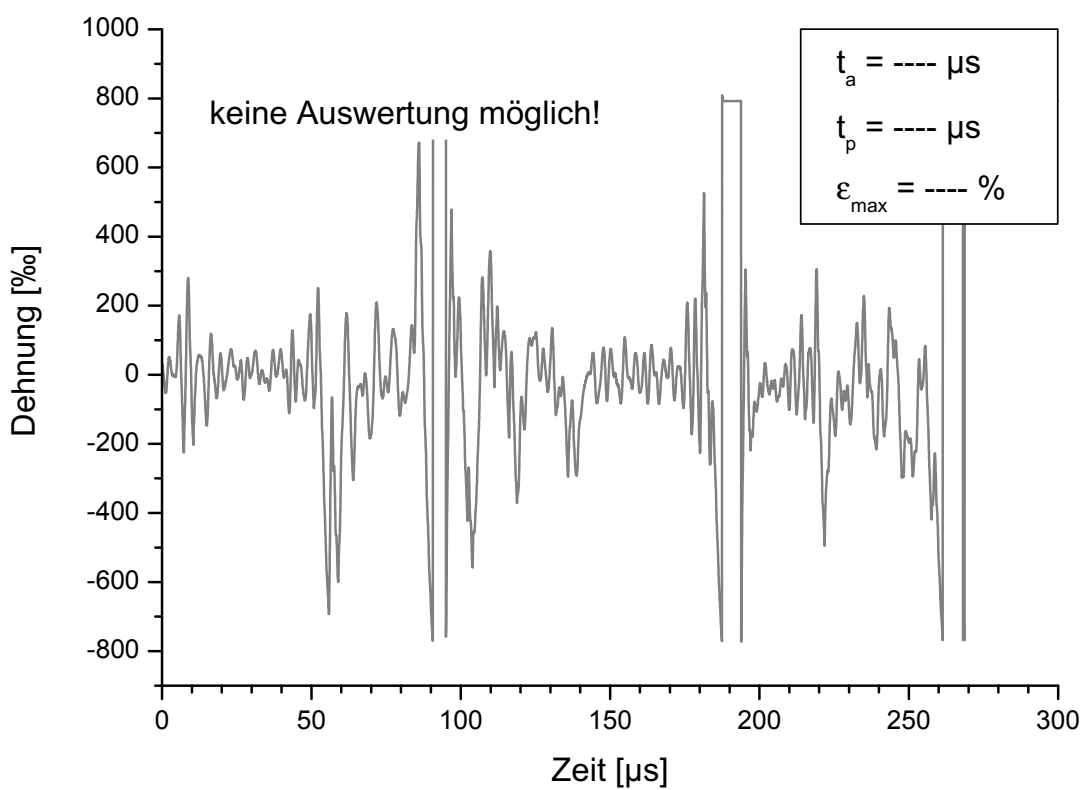


Bild C.153: DMS 305, Einbautiefe 500 mm

Versuch Nr. 4

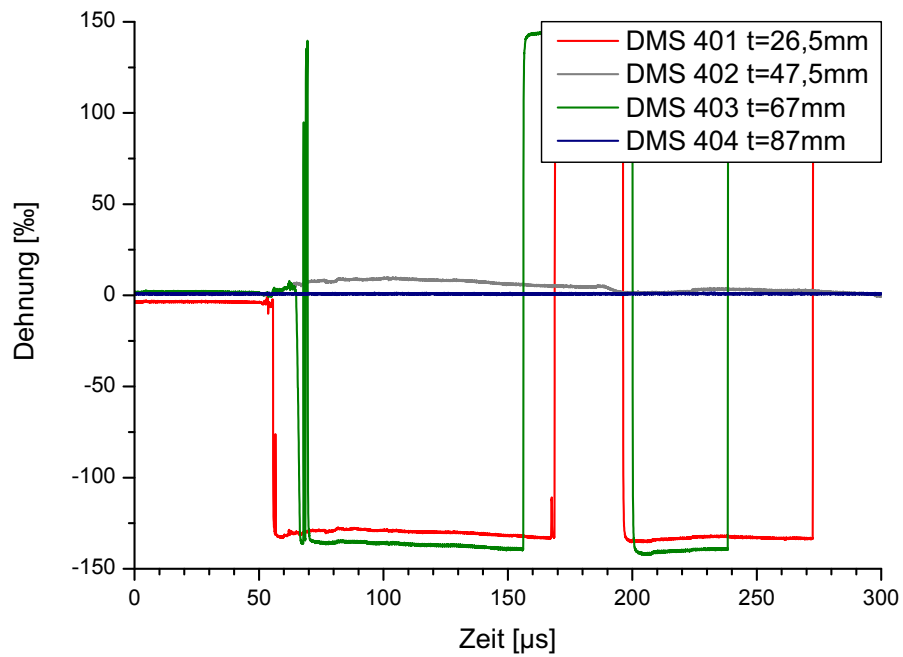


Bild C.154: Versuch Nr. 4, DMS 401-404

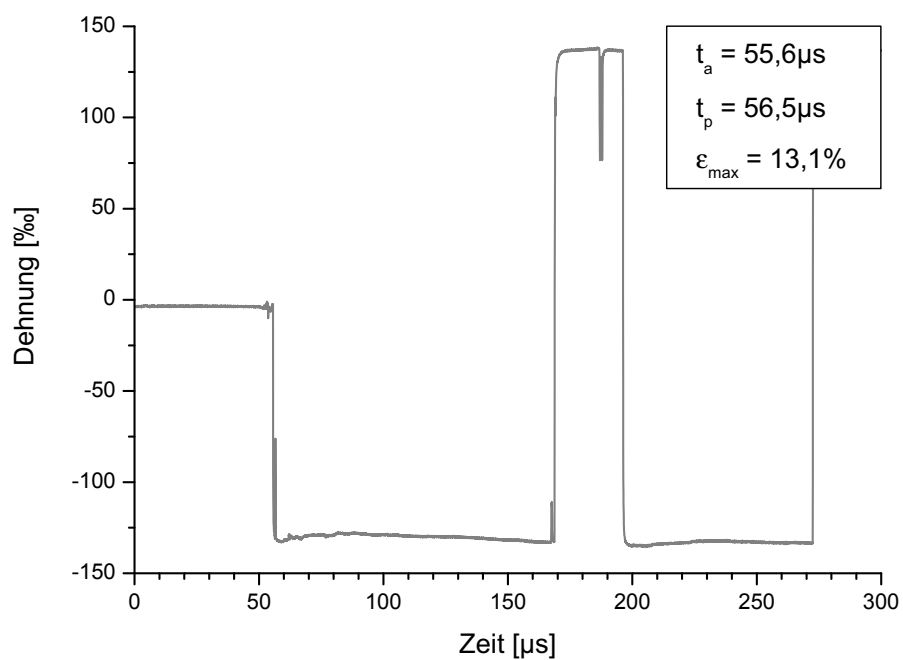


Bild C.155: DMS 401, Einbautiefe 26,5 mm

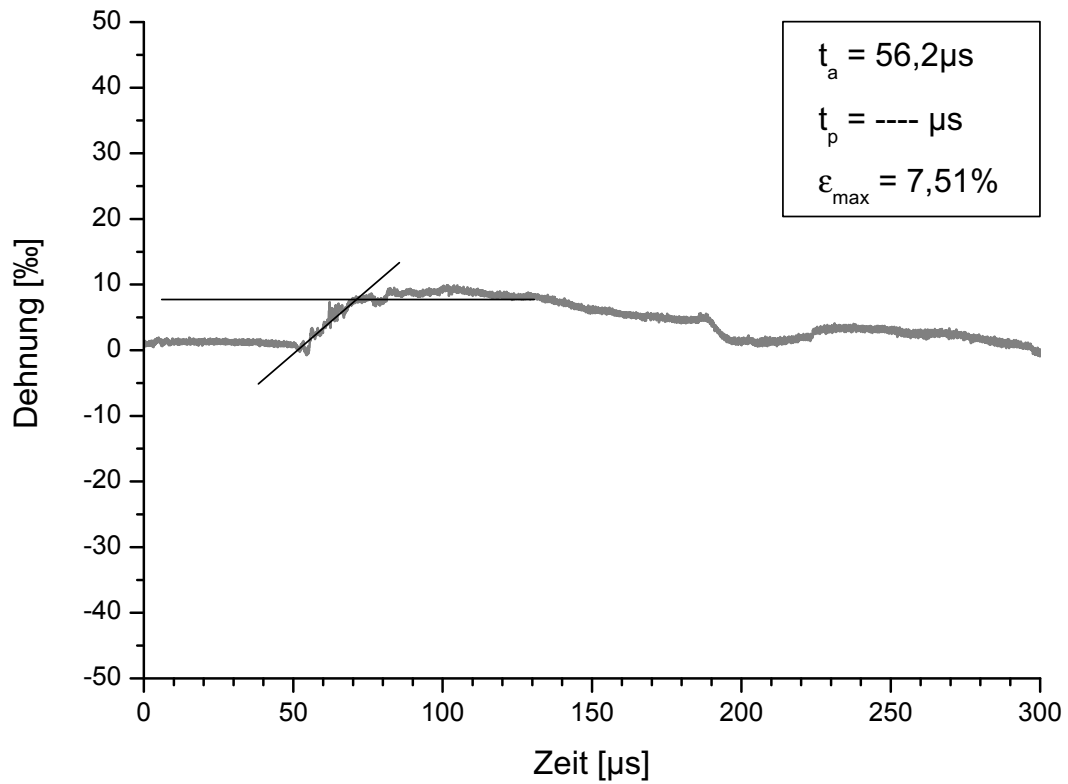


Bild C.156: DMS 402, Einbautiefe 46,5 mm

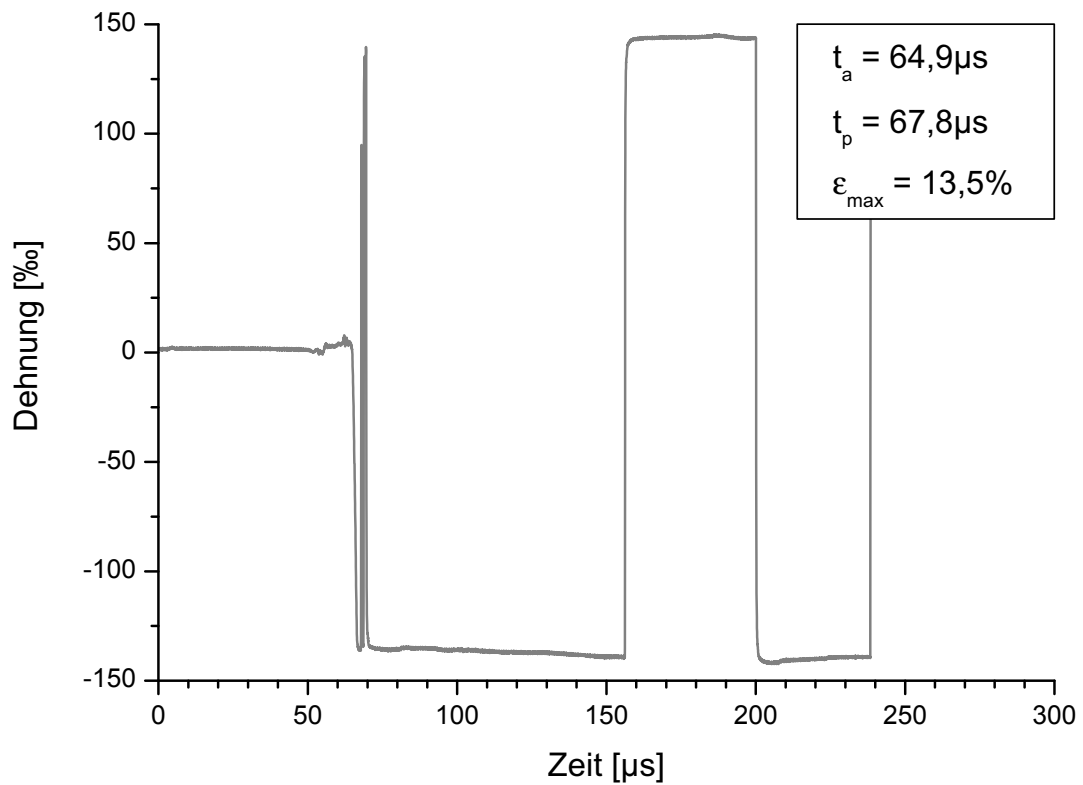


Bild C.157: DMS 403, Einbautiefe 67 mm

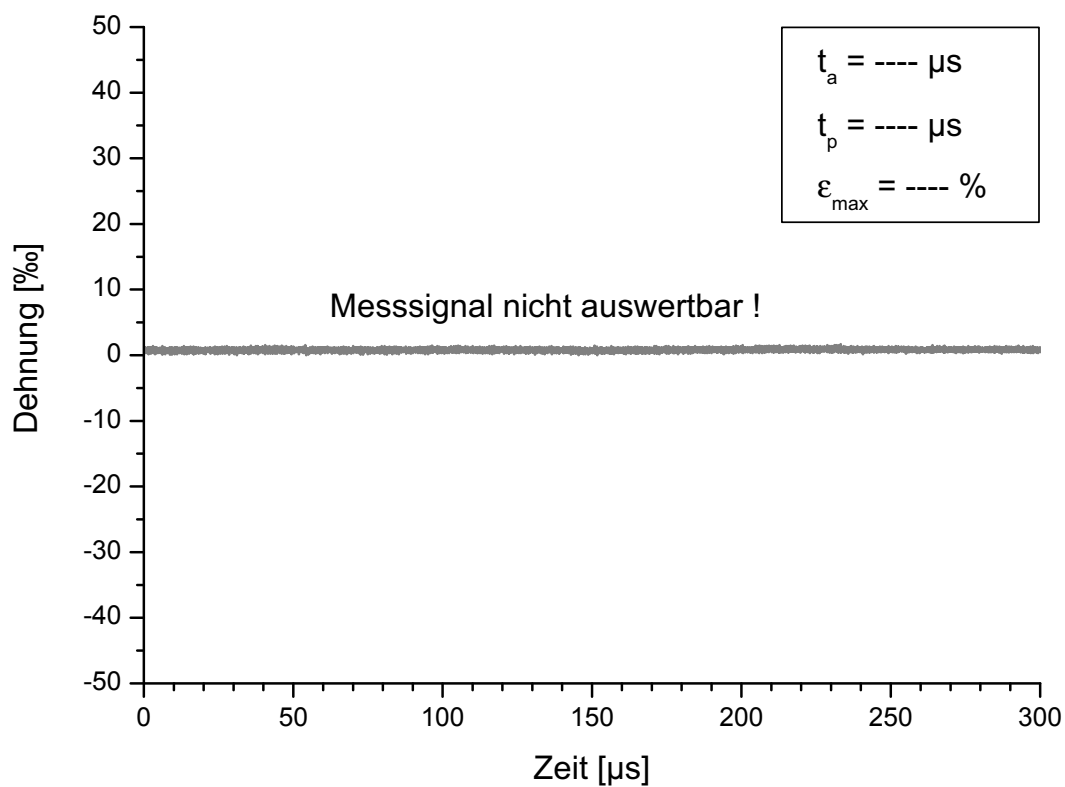


Bild C.158: DMS 404, Einbautiefe 87 mm

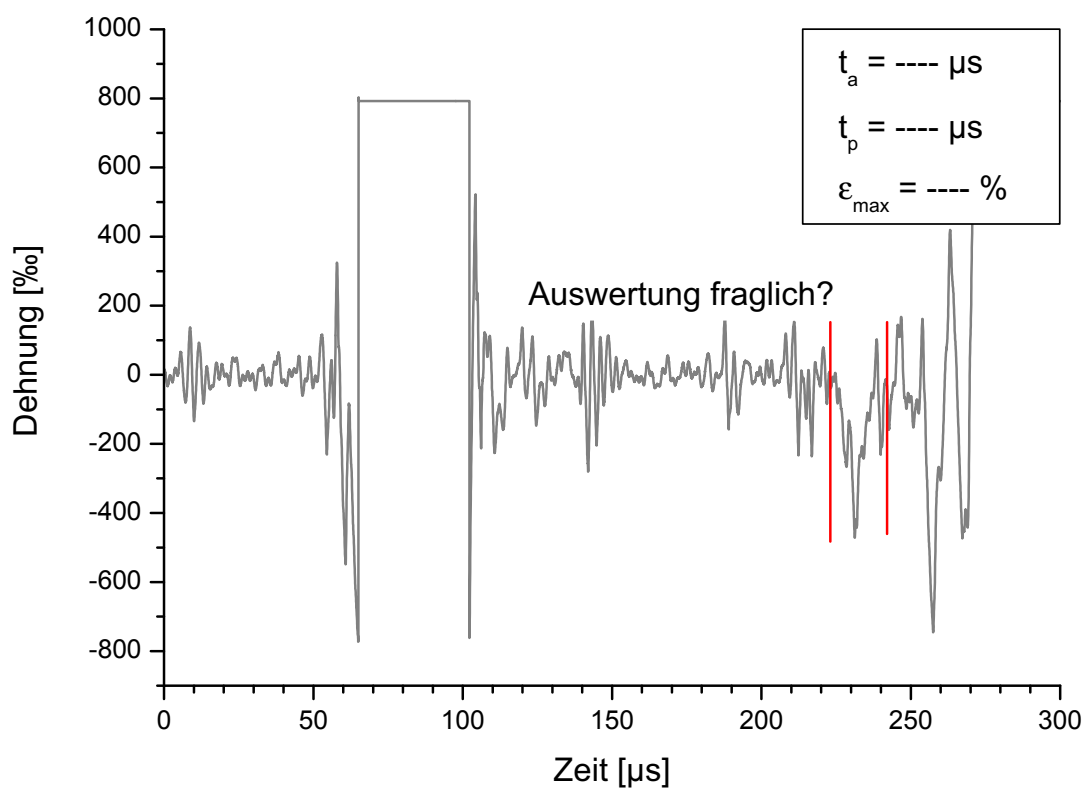


Bild C.159: DMS 405, Einbautiefe 500 mm

Versuch Nr. 5

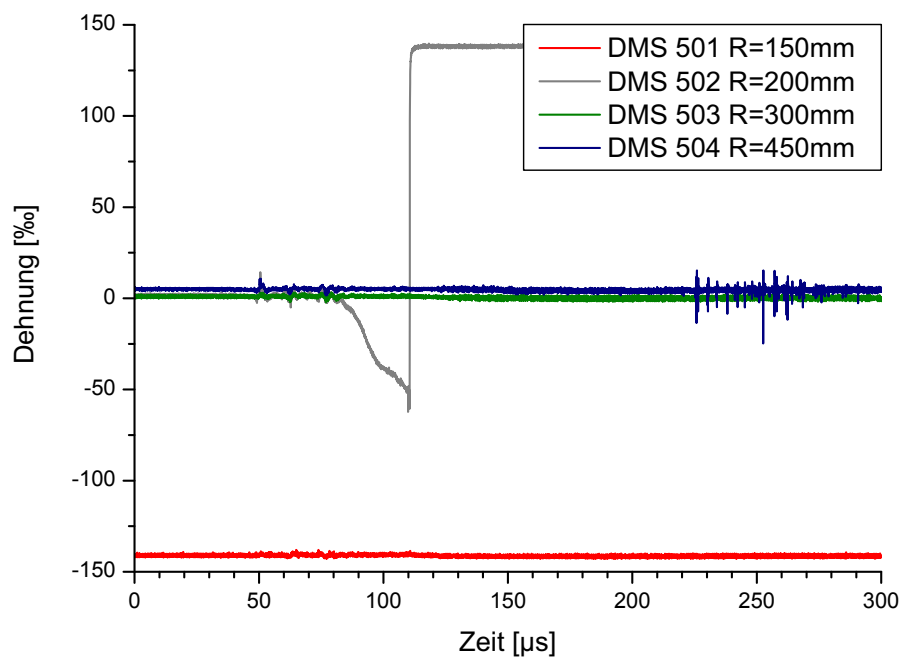


Bild C.160: Versuch Nr. 5, DMS 501-505

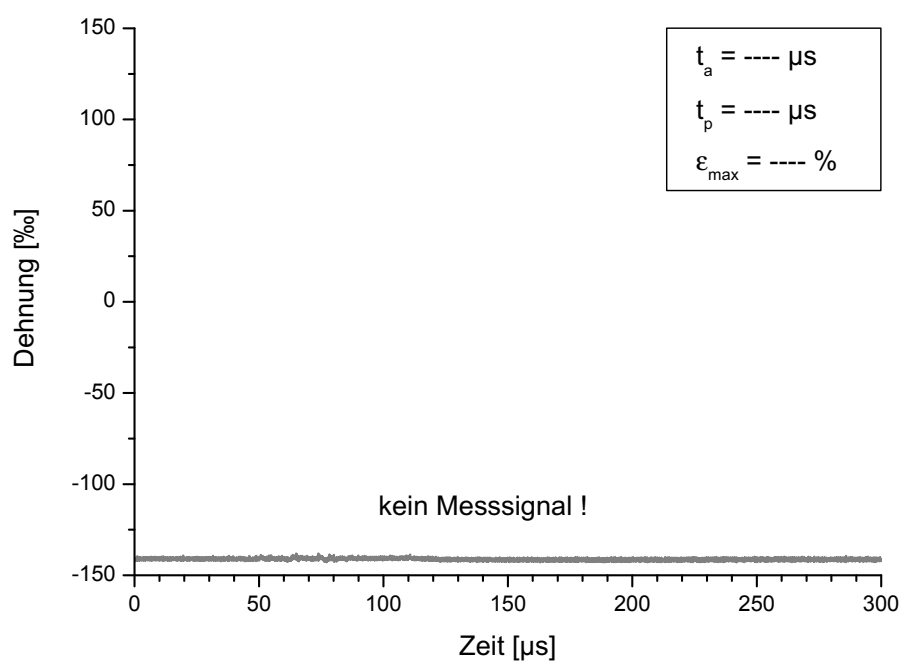


Bild C.161: DMS 501, Einbau R 150 mm

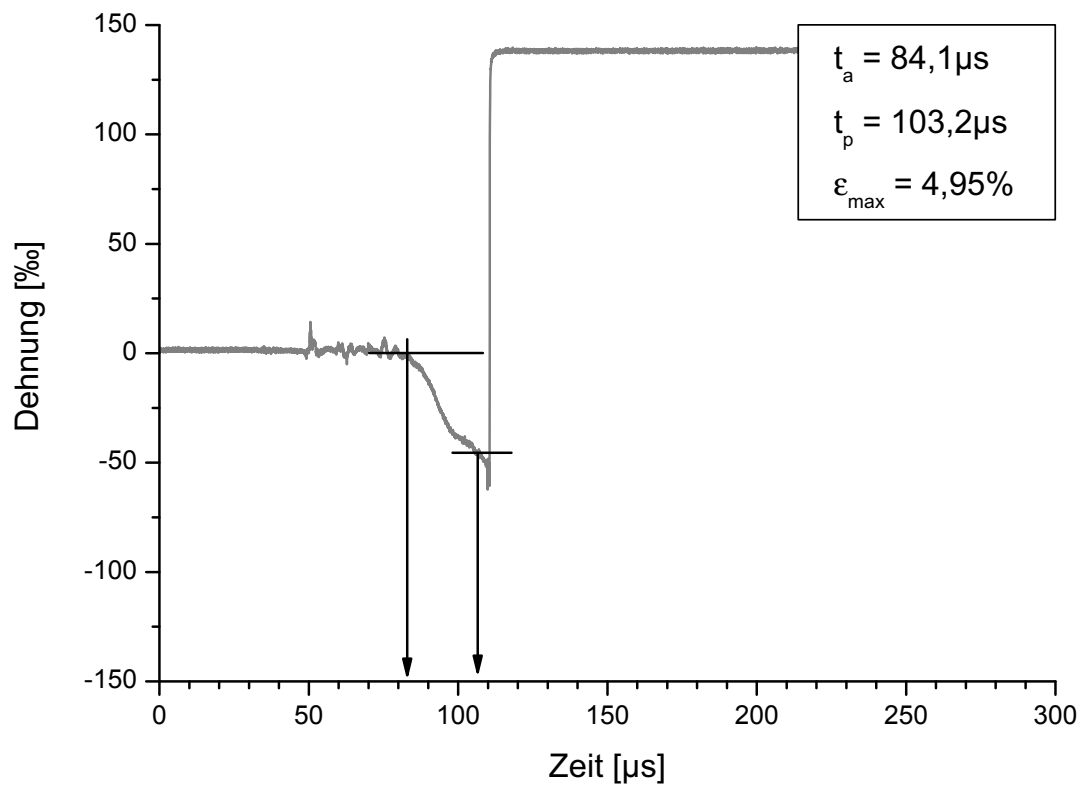


Bild C.162: DMS 502, Einbau R 250 mm

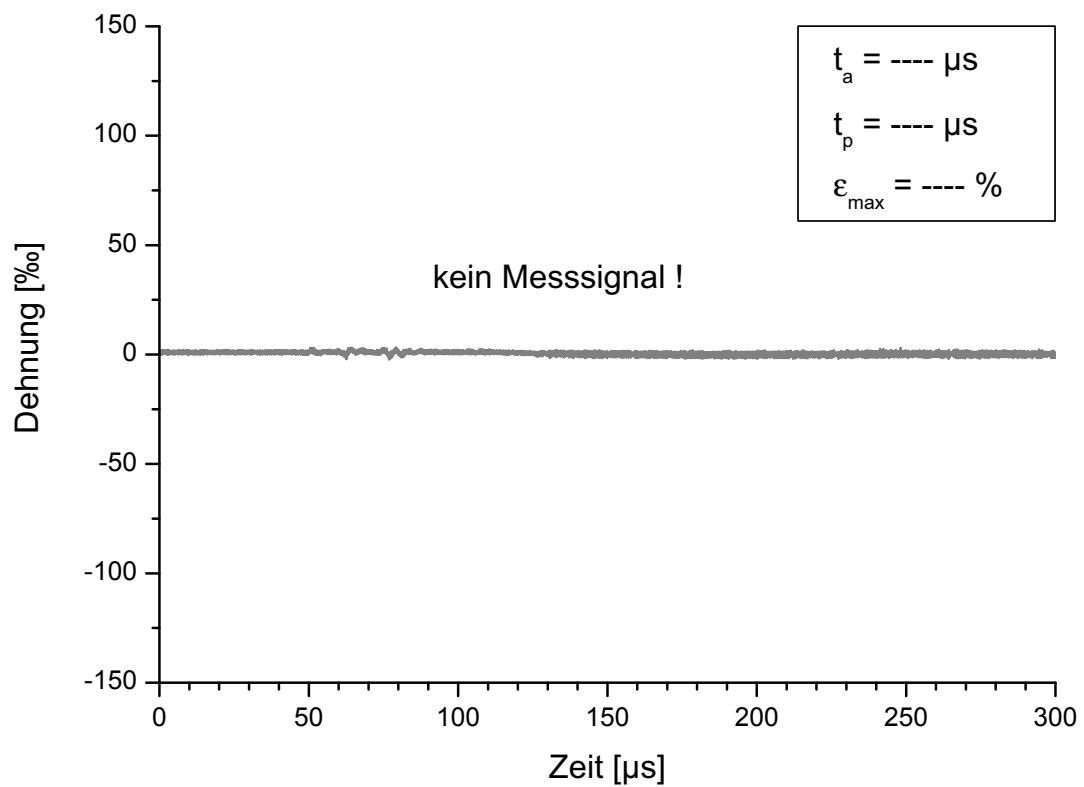


Bild C.163: DMS 503, Einbau R 300 mm

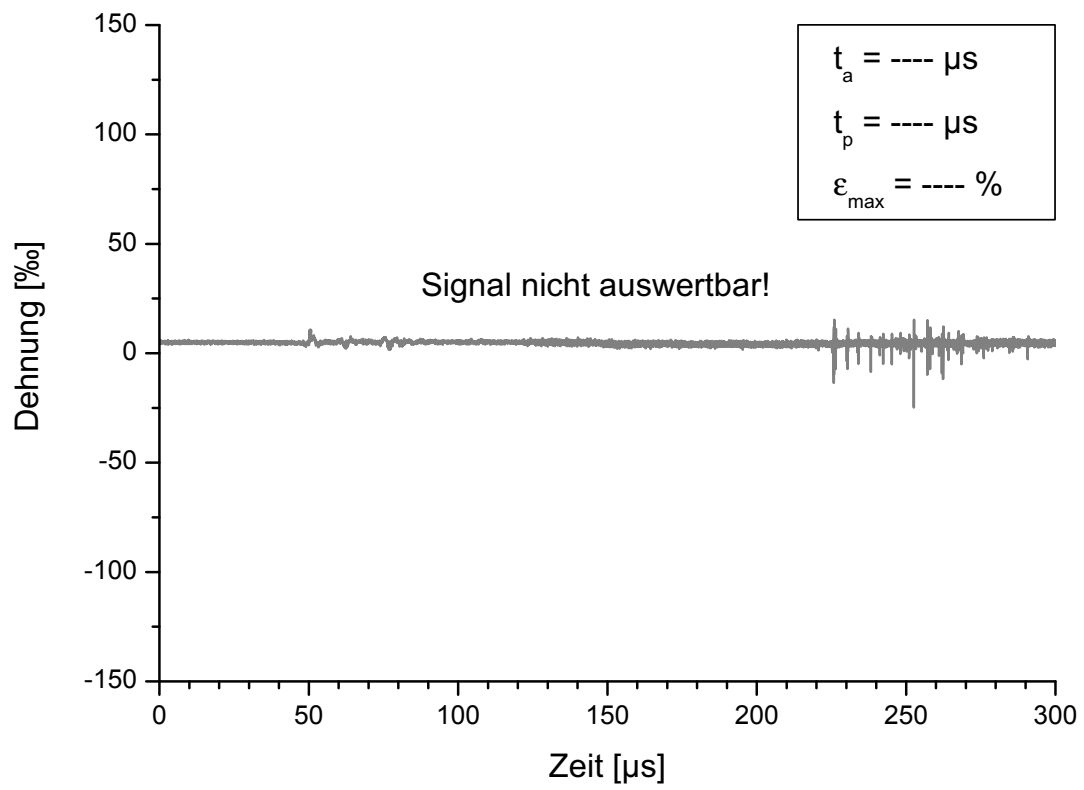


Bild C.164: DMS 504, Einbau R 450 mm

Versuch Nr. 7 und Nr. 8

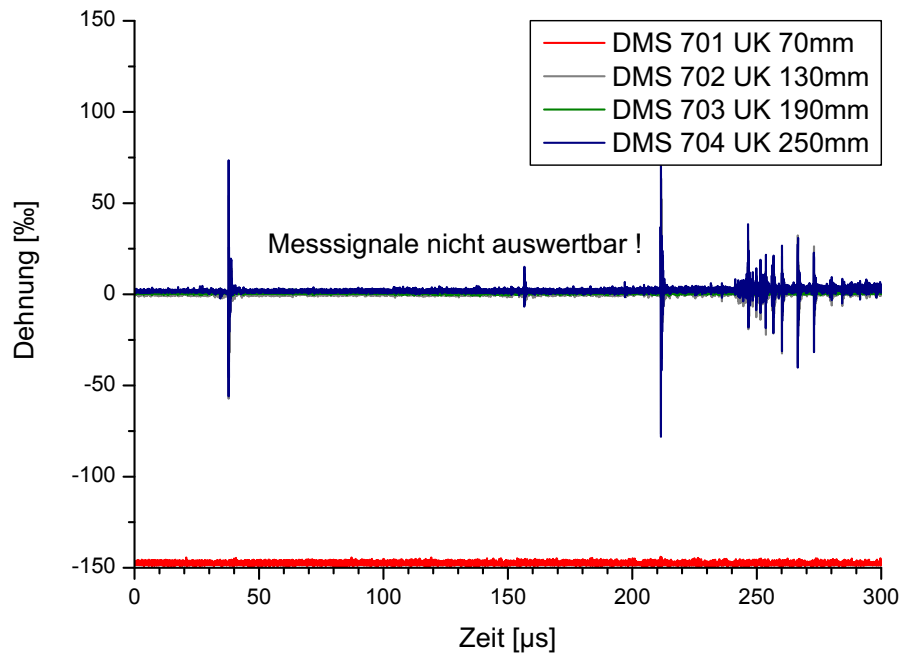


Bild C.165: Versuch Nr. 5, DMS 701-704: auf Seitenfläche

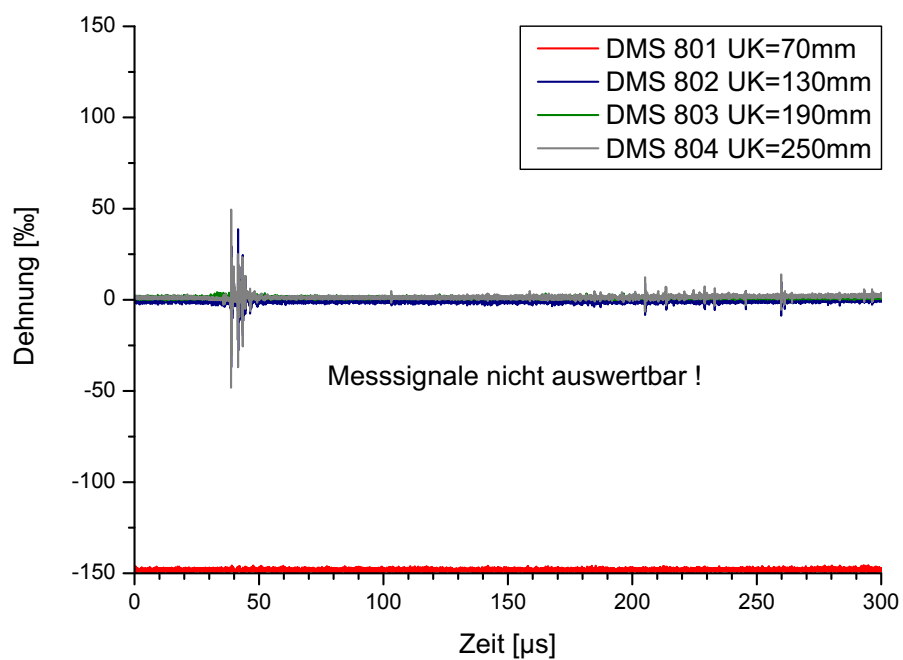


Bild C.166: Versuch Nr. 8, DMS 801-504; auf Seitenfläche

Thermosäulen-ALTS

Versuch Nr. 5

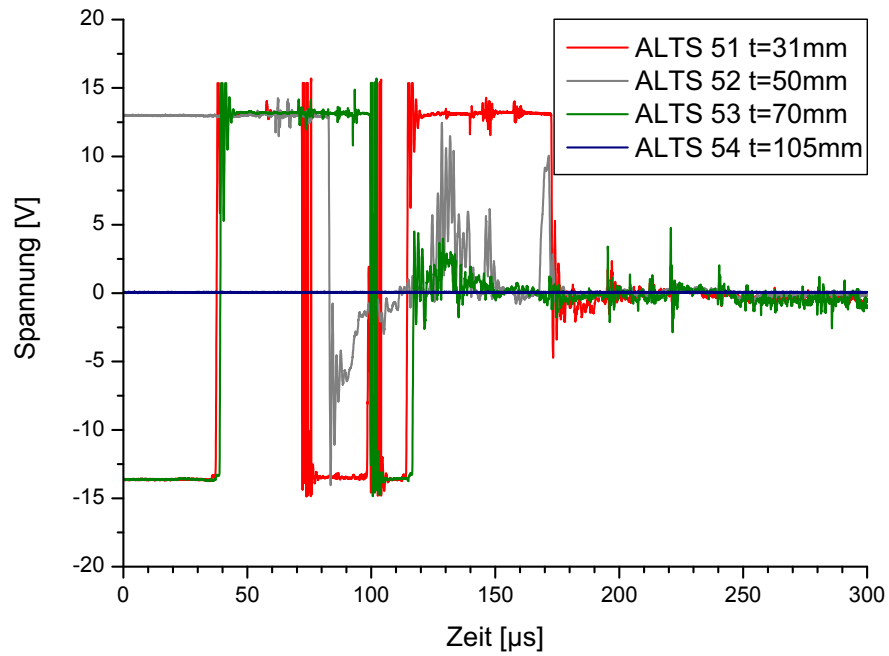


Bild C.167: Versuch Nr. 5, ALTS-B 51-54

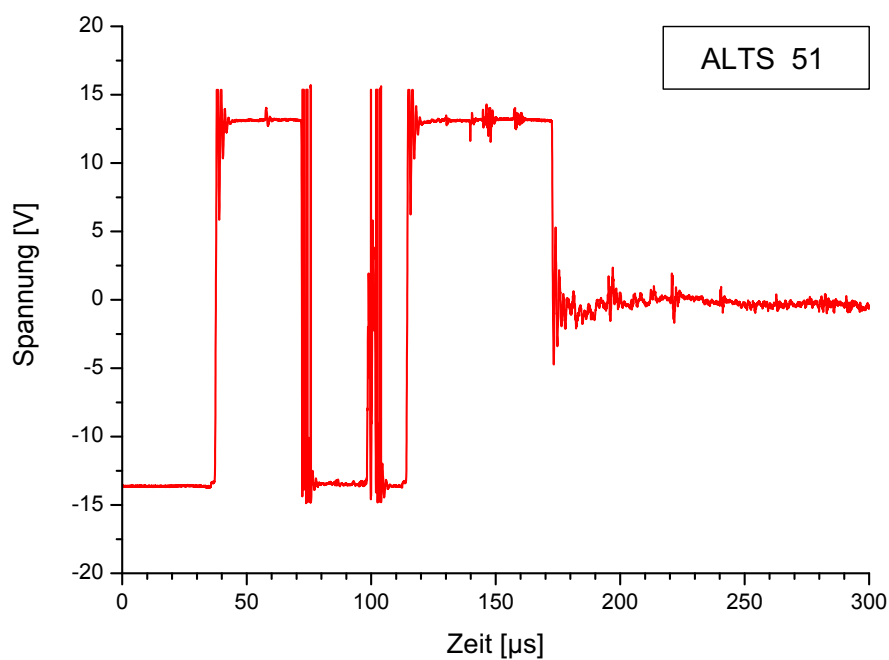


Bild C.168: ALTS-B 51, Einbautiefe 32 mm

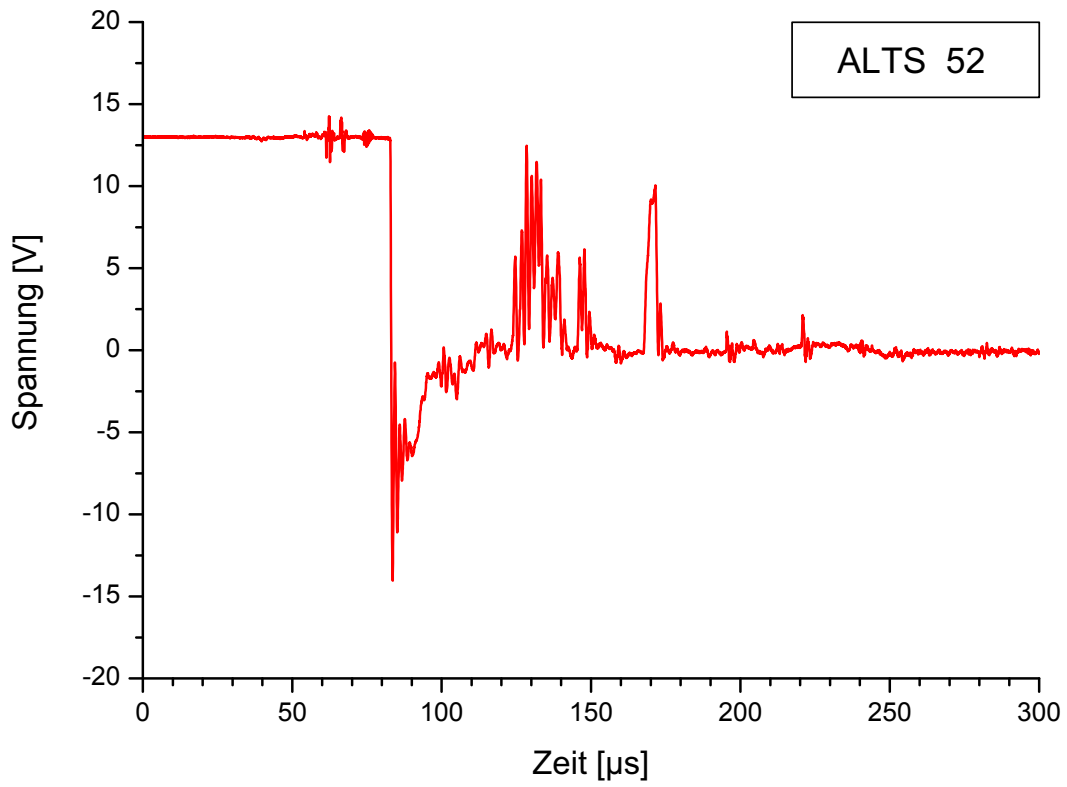


Bild C.169: ALTS-B 52, Einbautiefe 50 mm

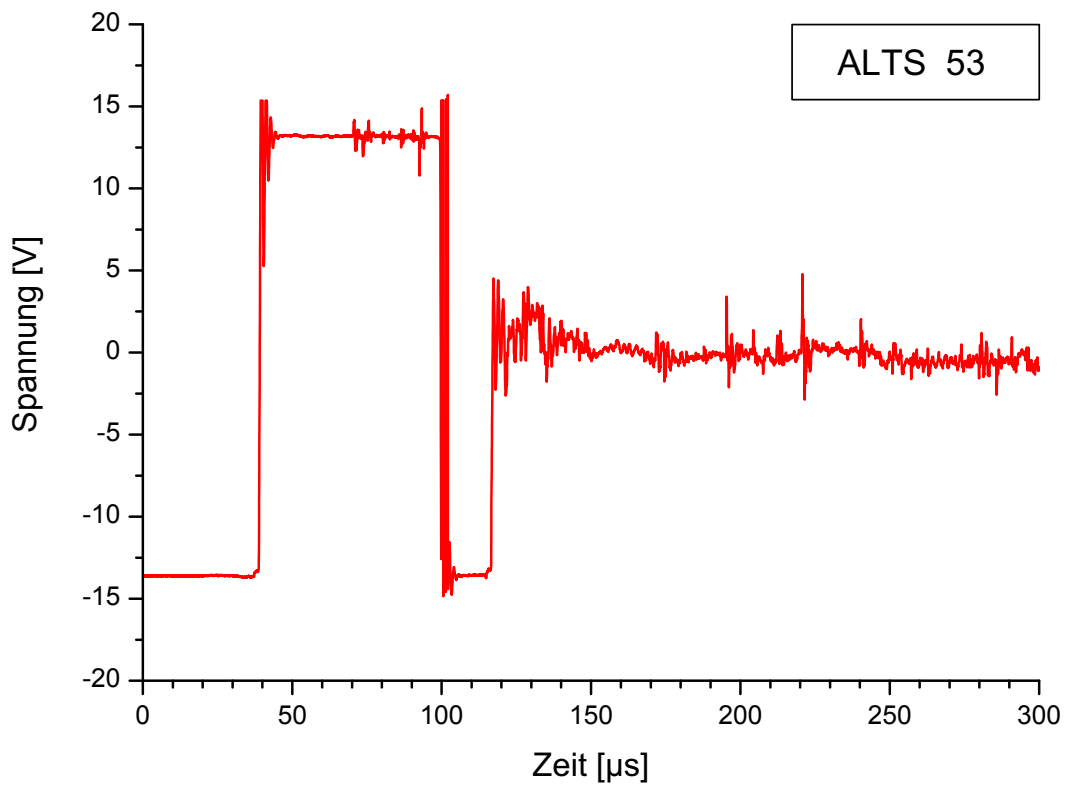


Bild C.170: ALTS-B 53, Einbautiefe 70 mm

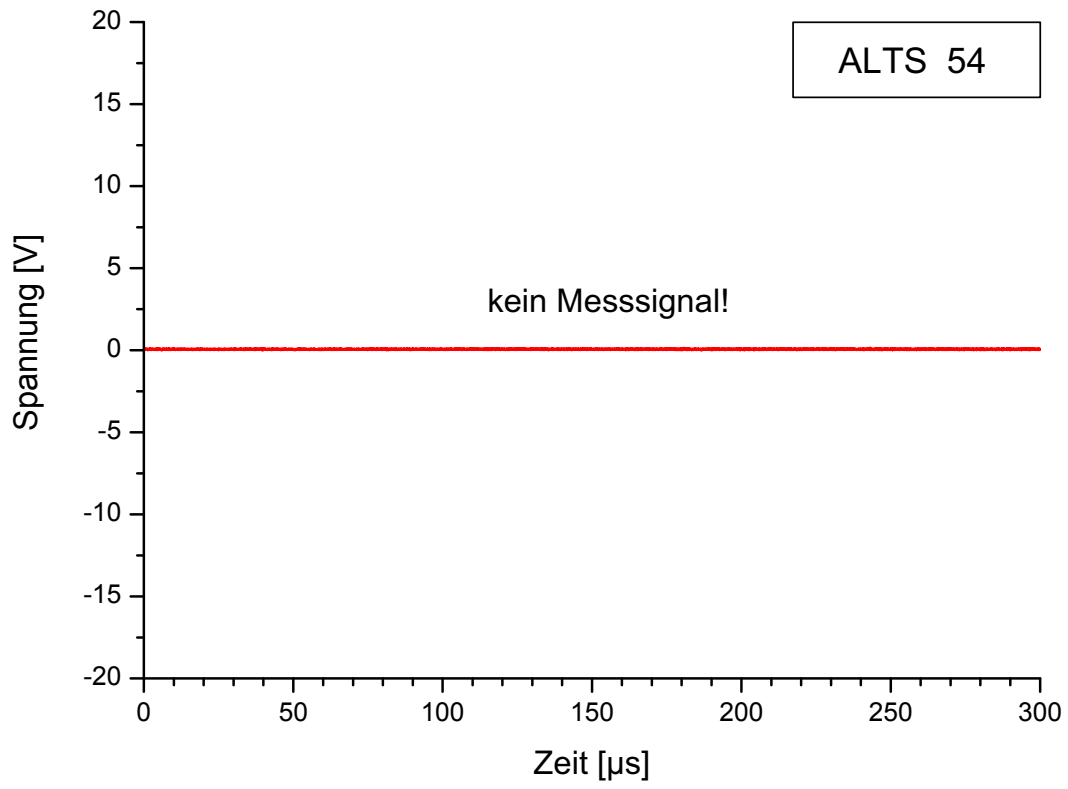


Bild C.171: ALTS-B 54, Einbautiefe 105 mm

Versuch Nr. 6

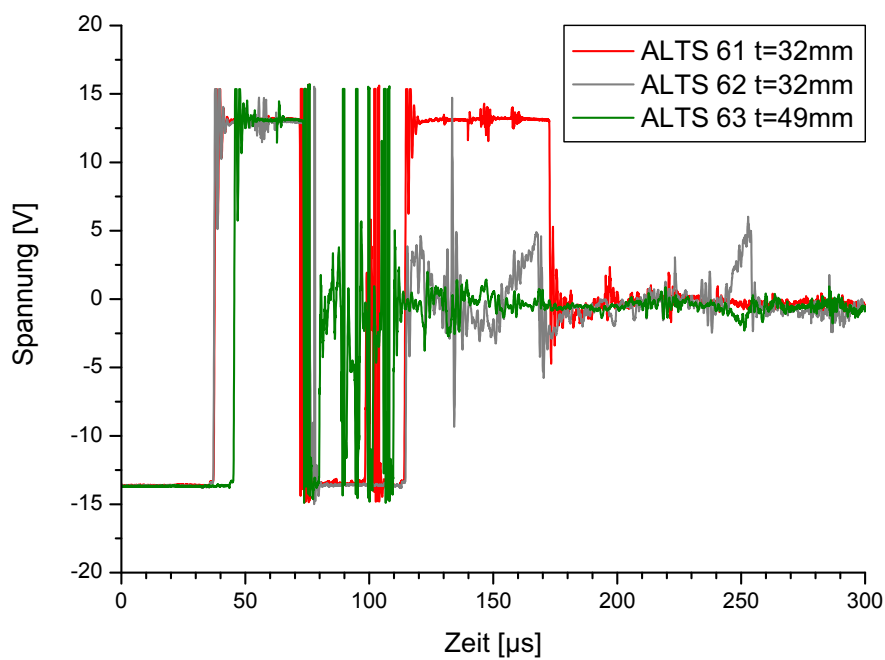


Bild C.172: Versuch Nr. 6, ALTS-B 61-63

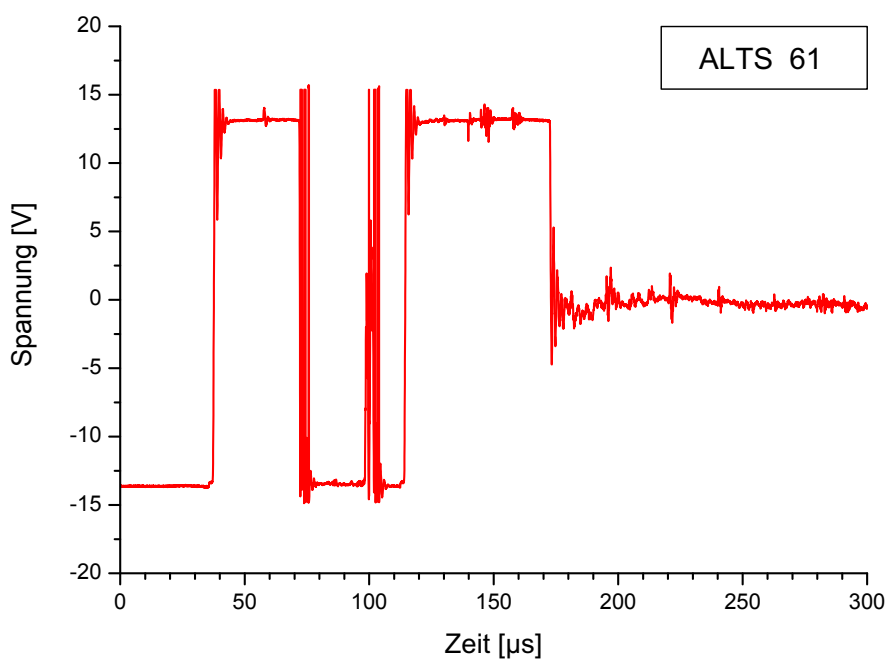


Bild C.173: ALTS-B 61, Einbautiefe 32 mm

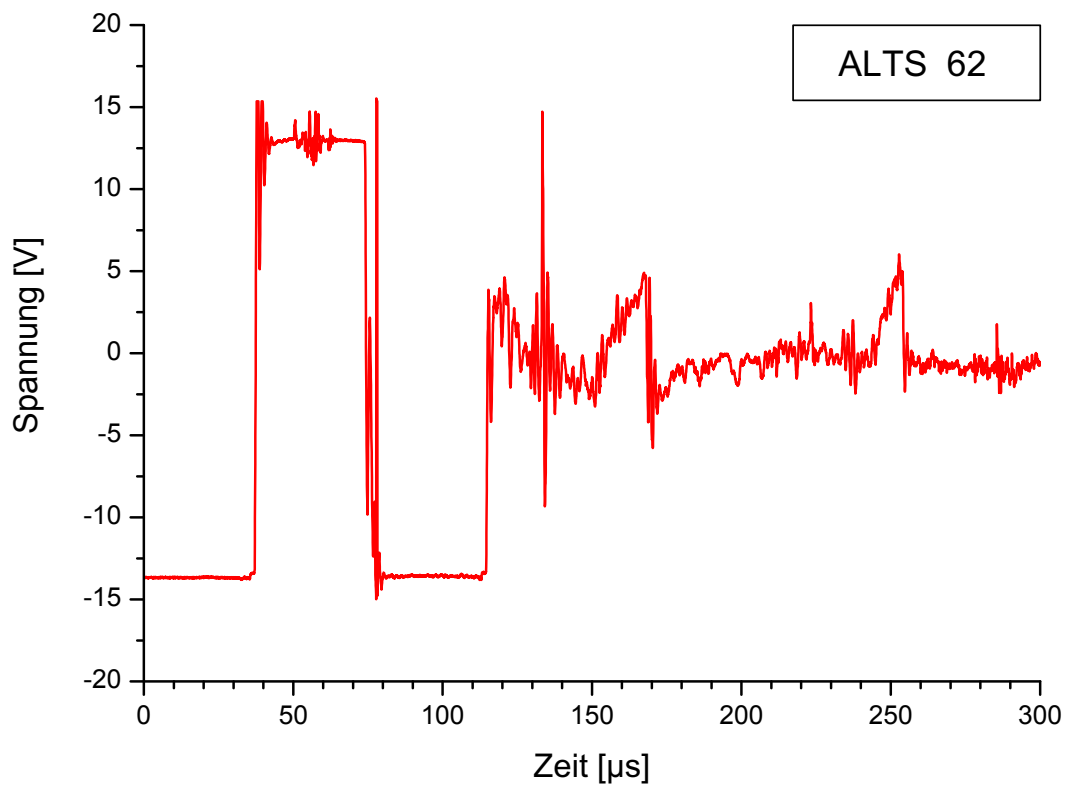


Bild C.174: ALTS-B 62, Einbautiefe 32 mm

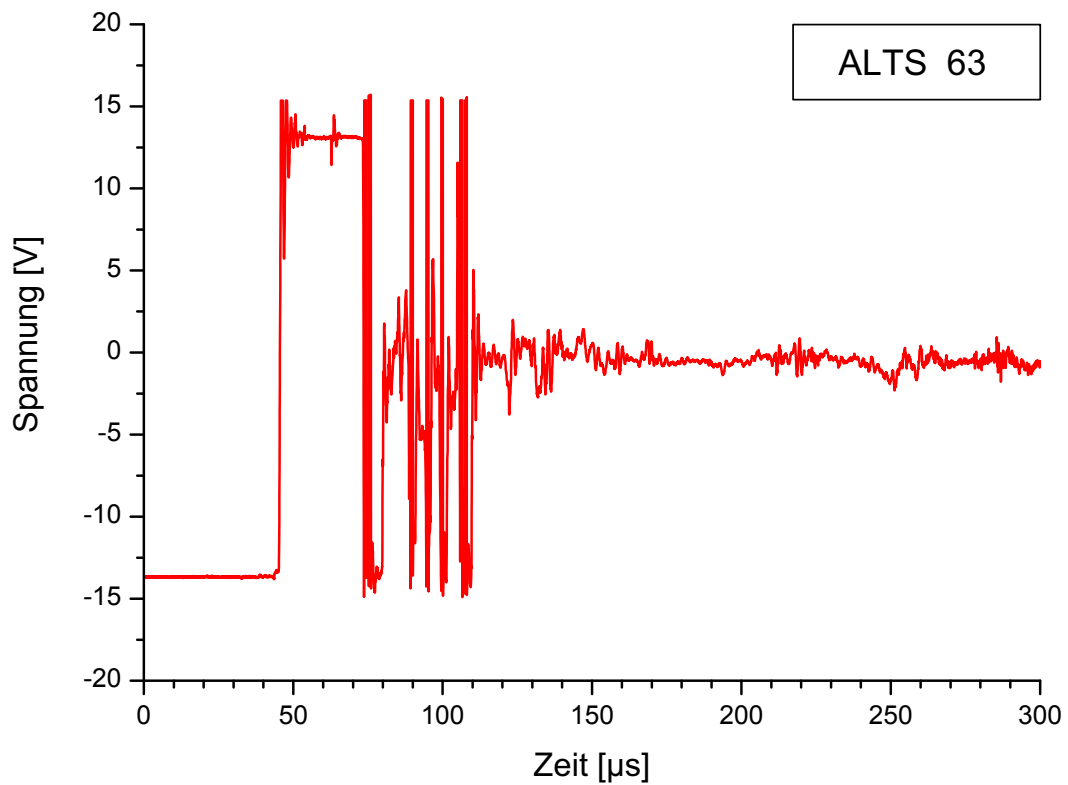


Bild C.175: ALTS-B 63, Einbautiefe 49 mm

Versuch Nr. 7

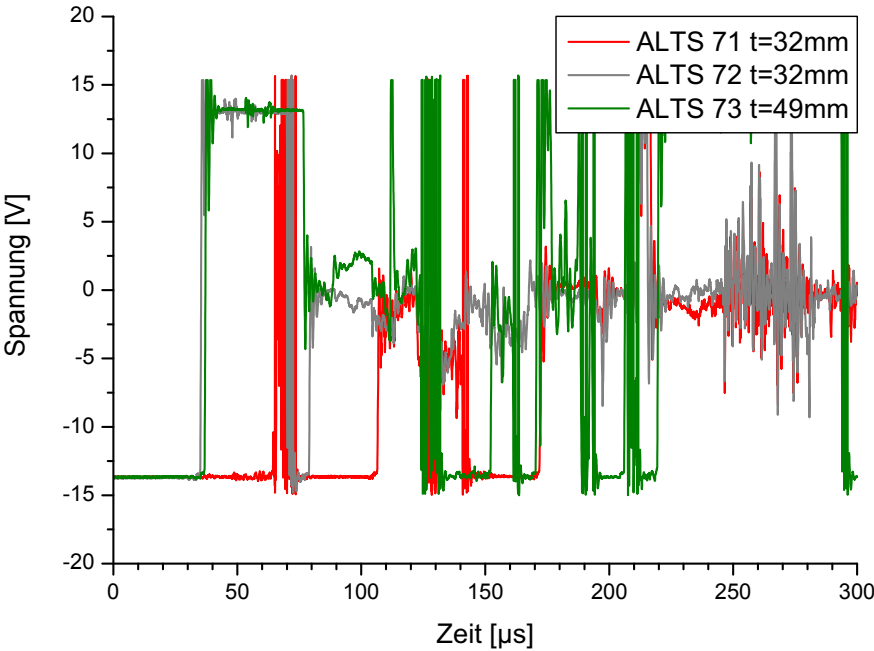


Bild C.176: Versuch Nr. 7, ALTS-B 71-74

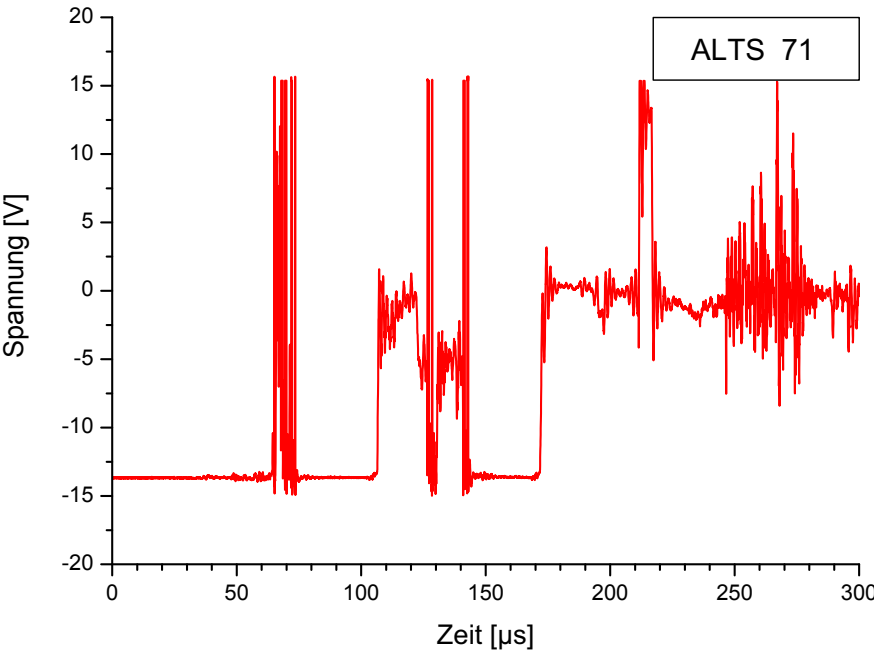


Bild C.177: ALTS-B 71, Einbautiefe 32 mm

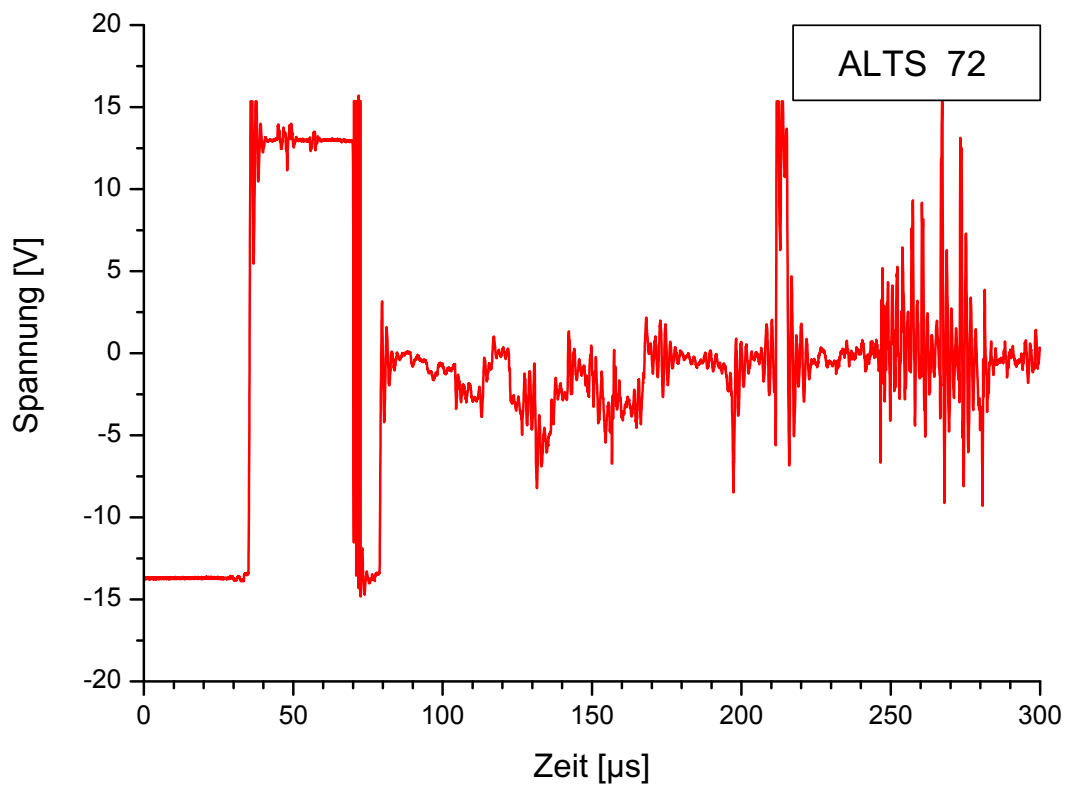


Bild C.178: ALTS-B 72, Einbautiefe 49 mm

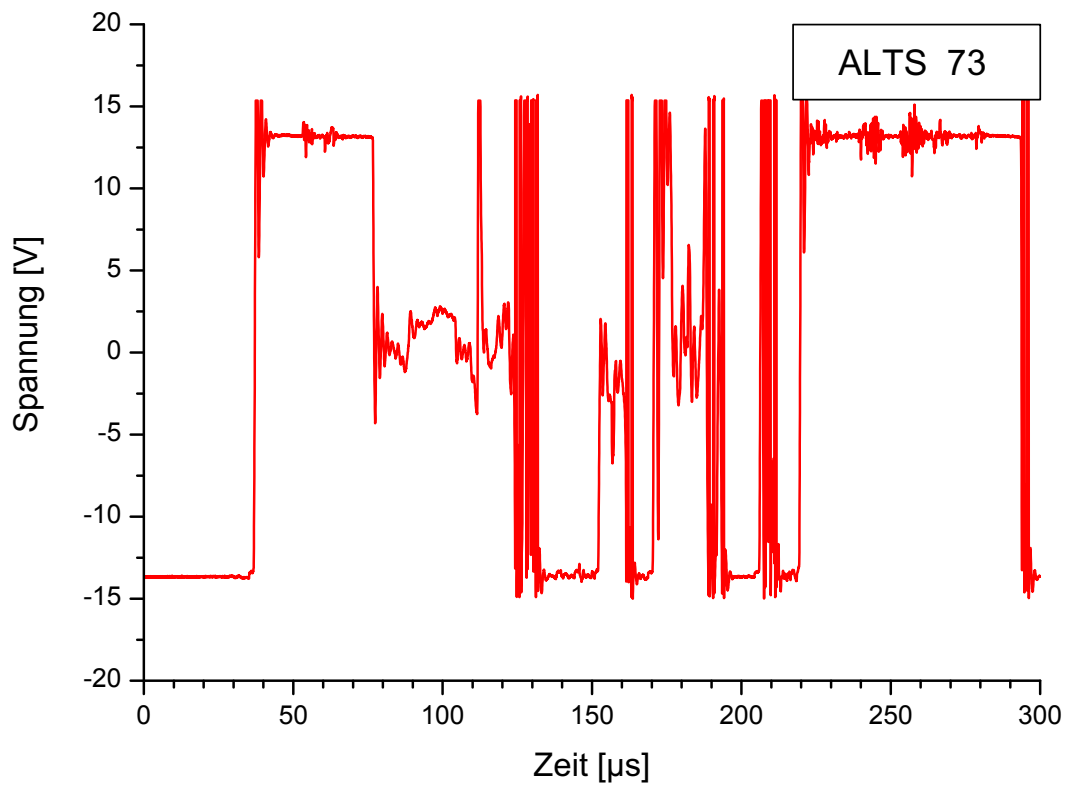


Bild C.179: ALTS-B 73, Einbautiefe 32 mm

Versuch Nr. 8

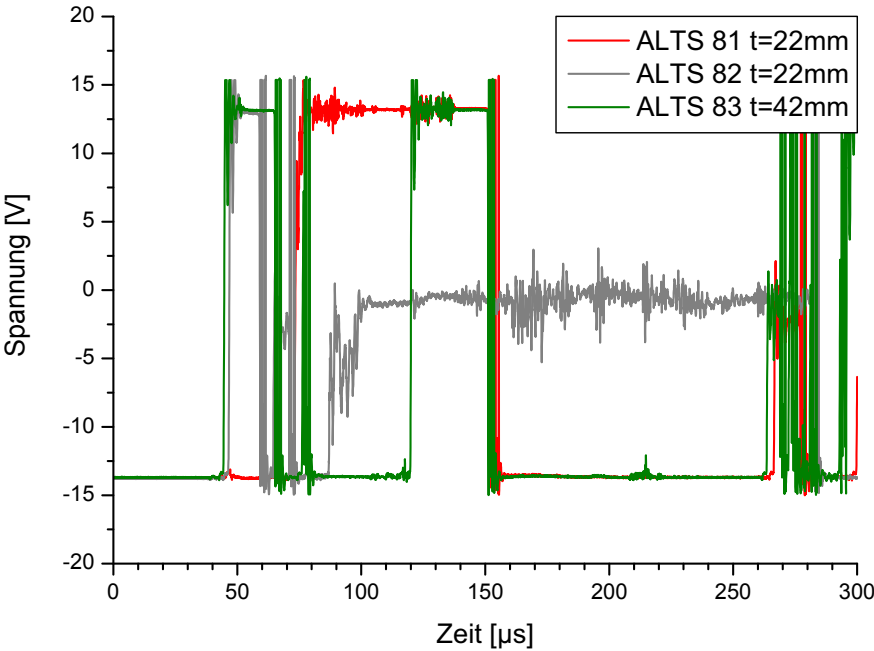


Bild C.180: Versuch Nr. 8, ALTS-B 81-84

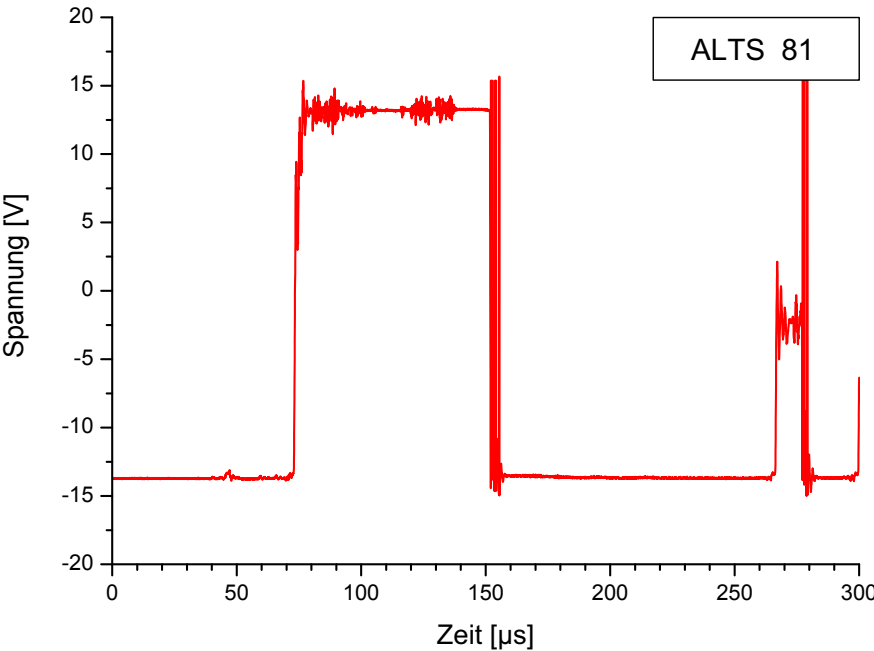


Bild C.181: ALTS-B 81, Einbautiefe 22 mm

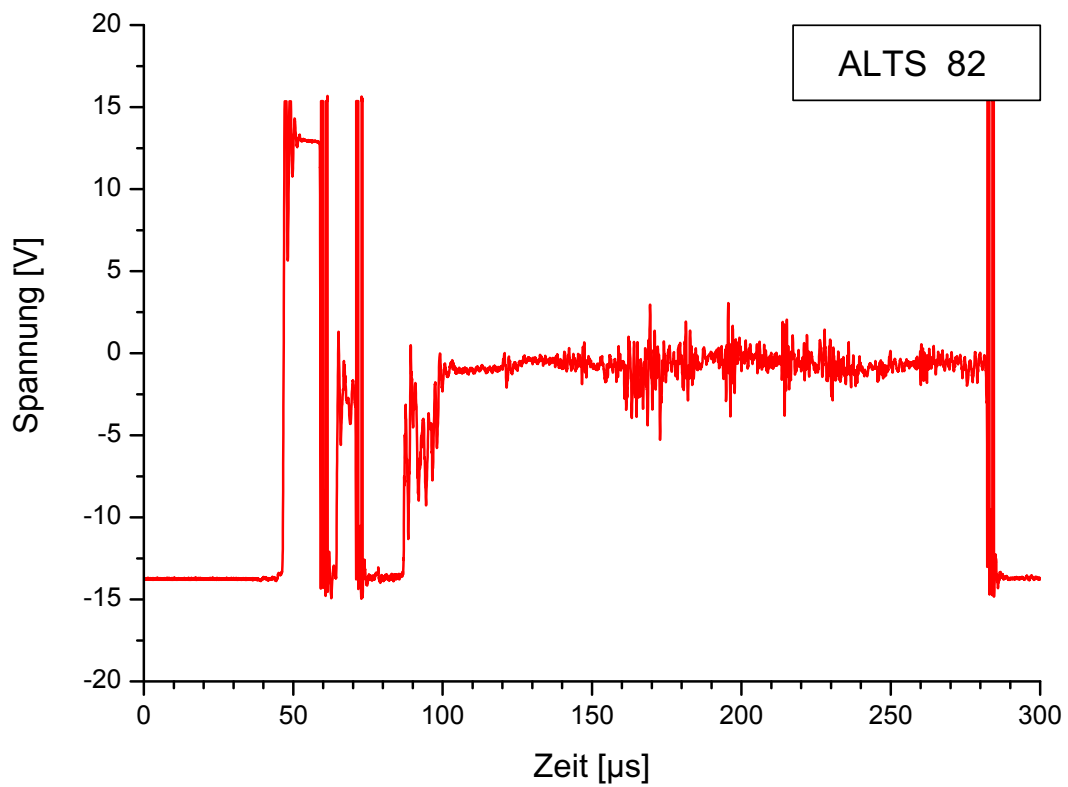


Bild C.182: ALTS-B 82, Einbautiefe 22 mm

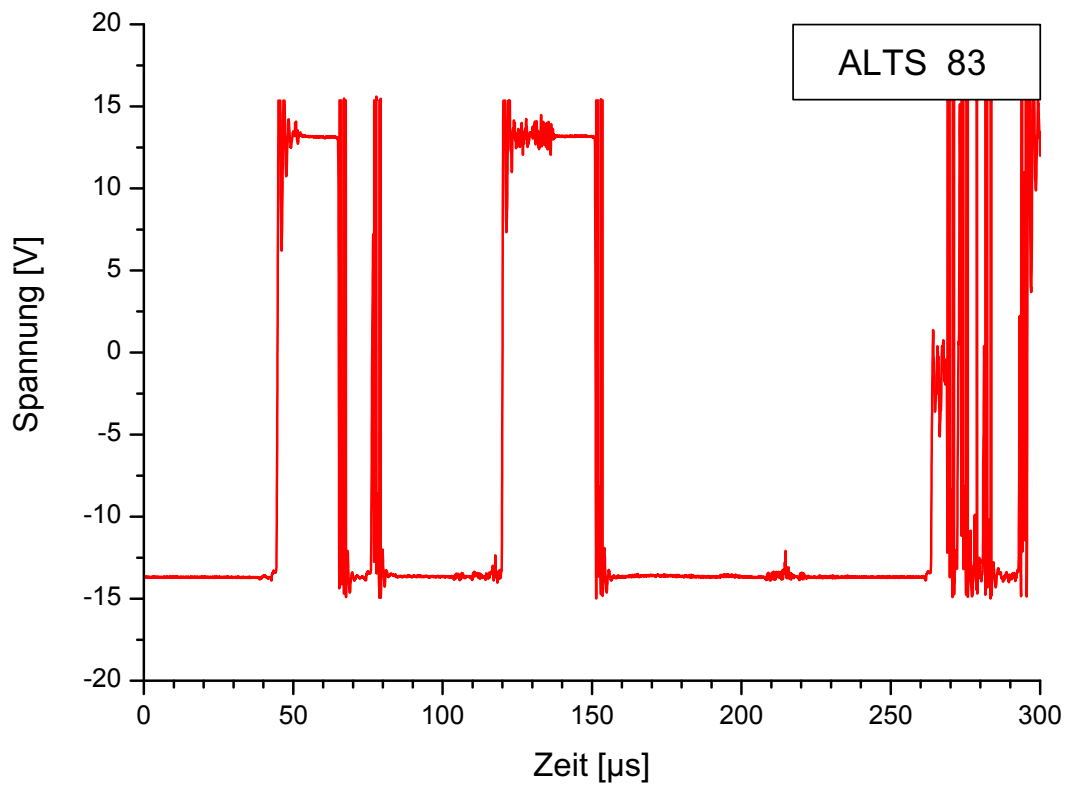


Bild C.183: ALTS-B 83, Einbautiefe 42 mm

Versuch Nr. 9

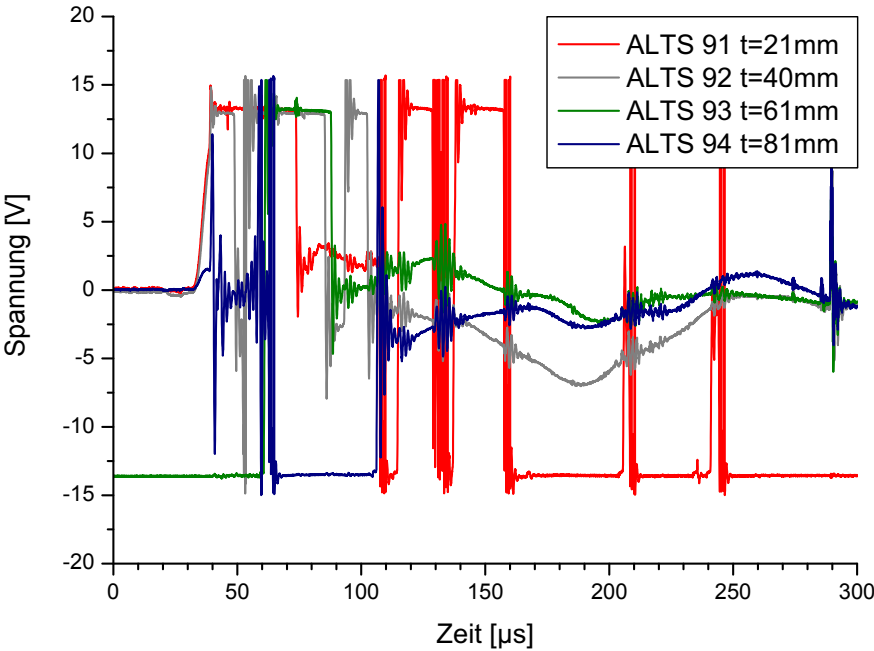


Bild C.184: Versuch Nr. 9, ALTS-B 91-94

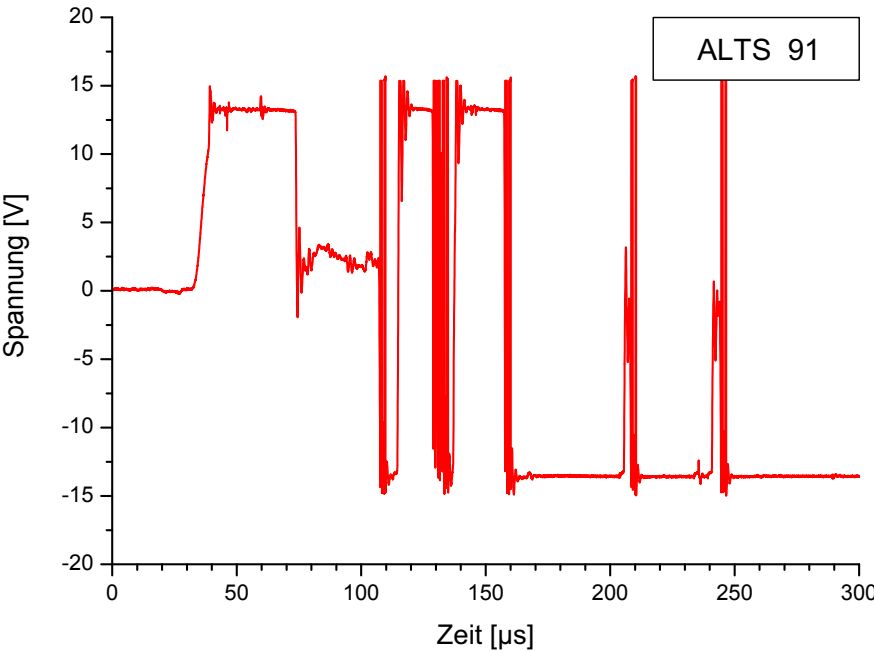


Bild C.185: ALTS-B 91, Einbautiefe 21 mm

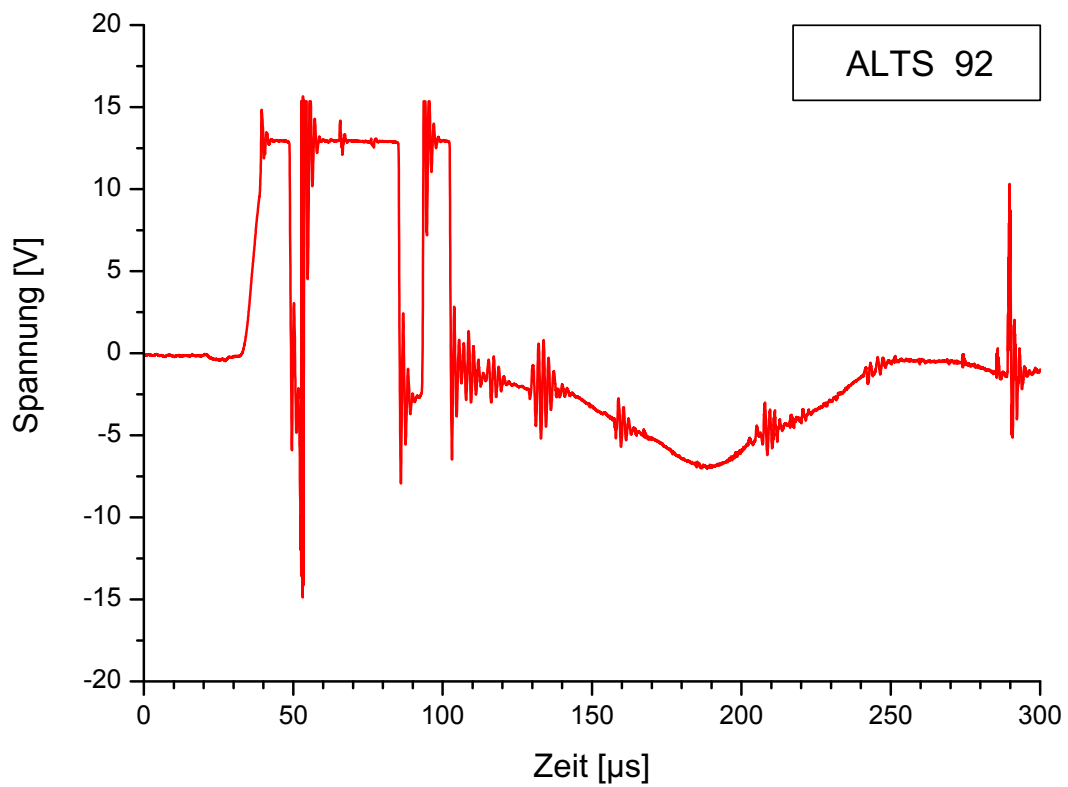


Bild C.186: ALTS-B 92, Einbautiefe 40 mm

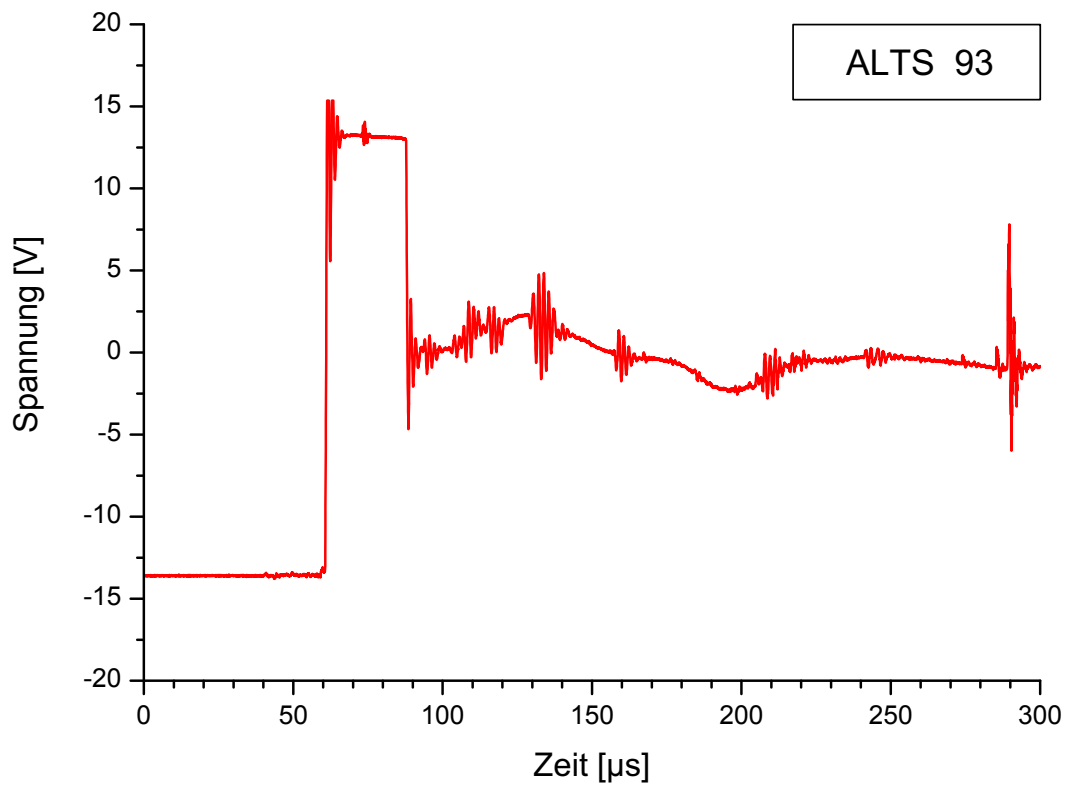


Bild C.187: ALTS-B 93, Einbautiefe 61 mm

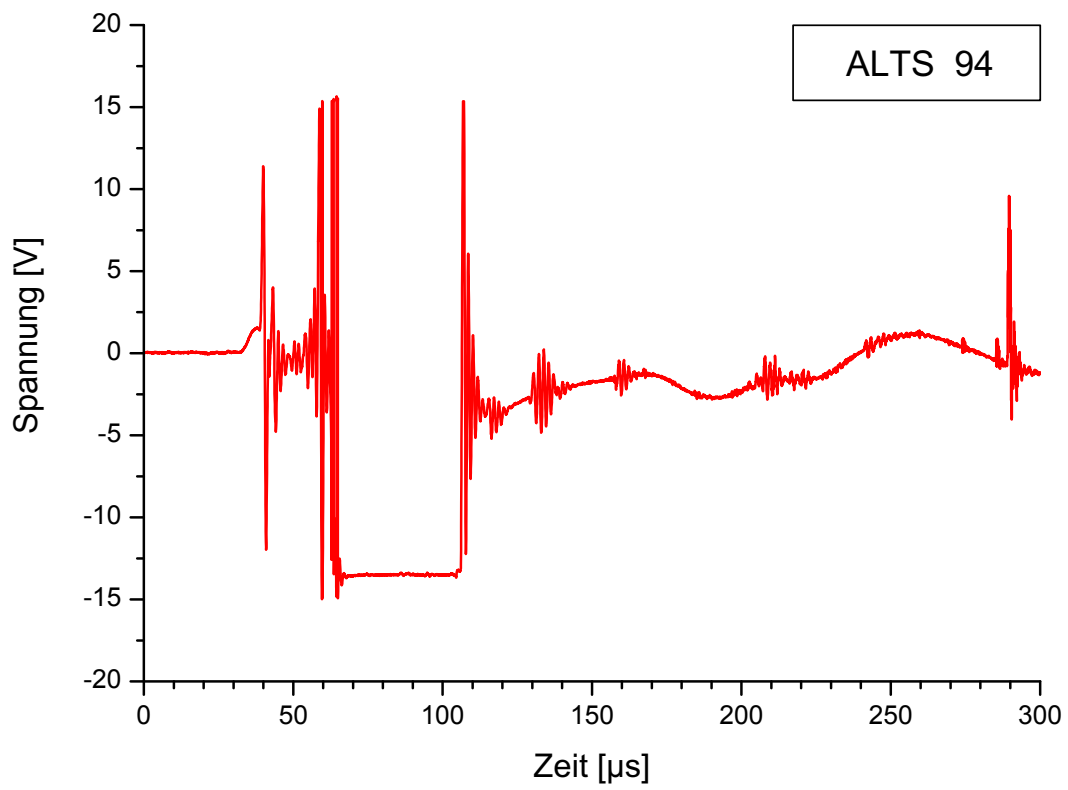


Bild C.188: ALTS-B 94, Einbautiefe 81 mm

Versuch Nr. 10

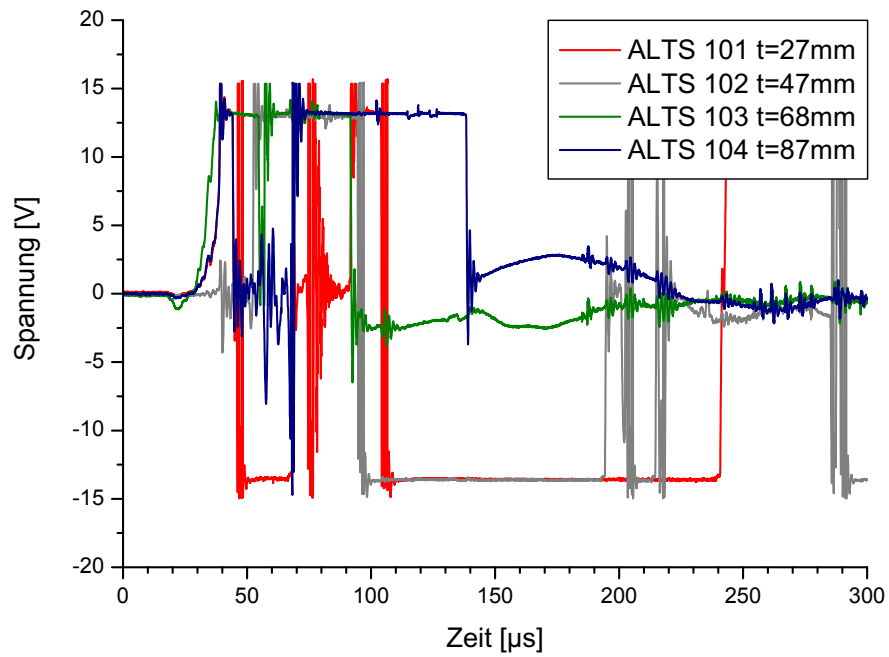


Bild C.189: Versuch Nr. 10, ALTS-B 101-104

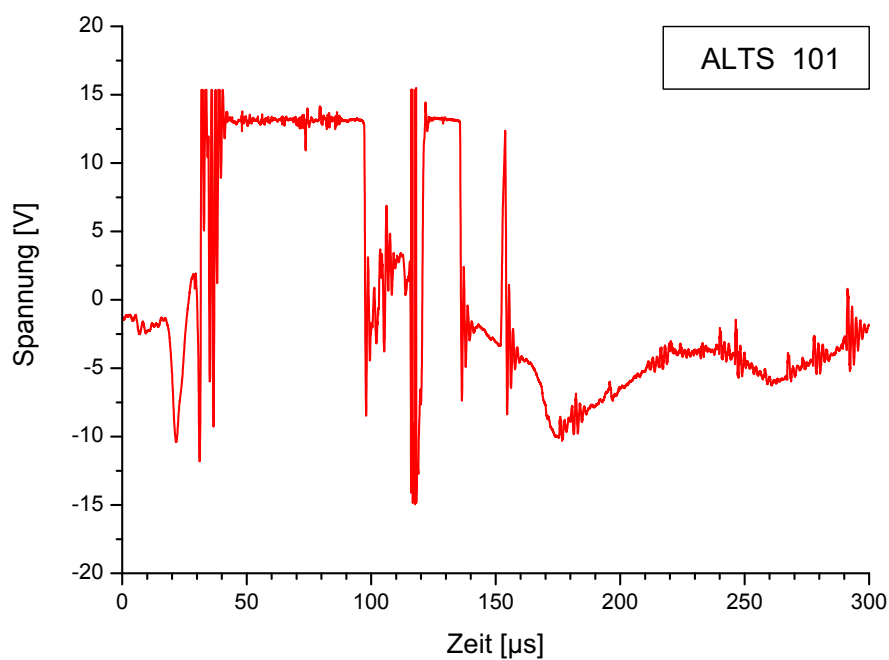


Bild C.190: ALTS-B 101, Einbautiefe 21 mm

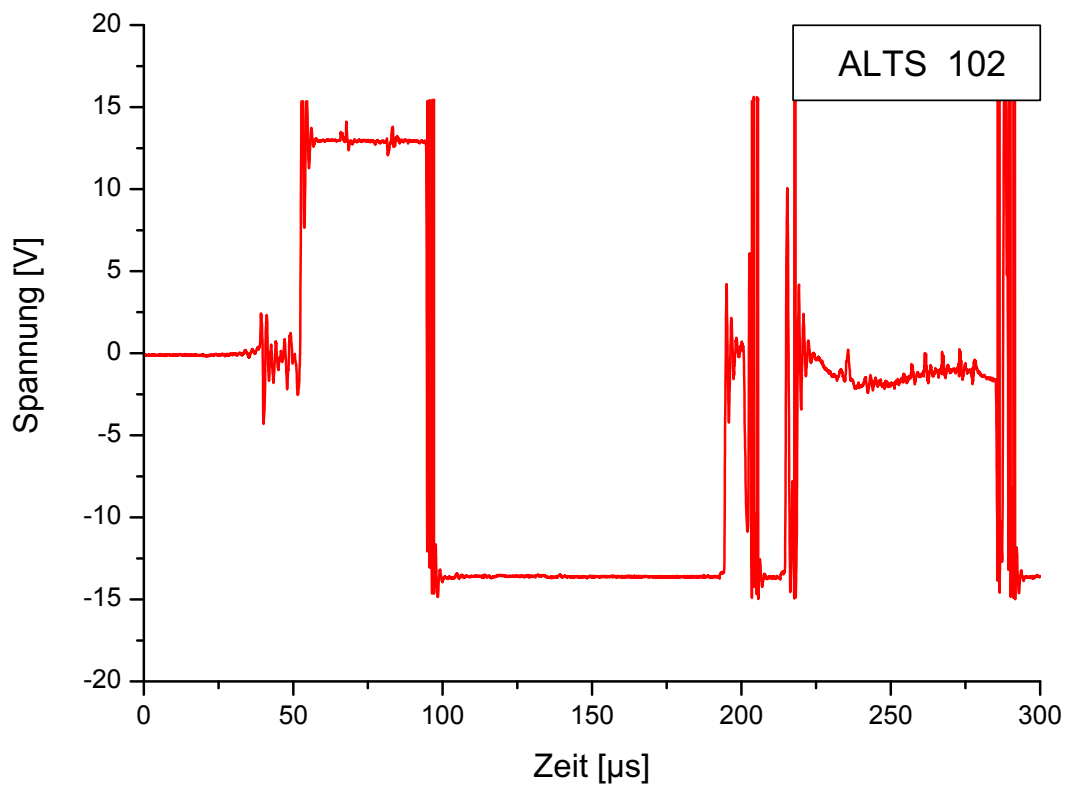


Bild C.191: ALTS-B 102, Einbautiefe 40 mm

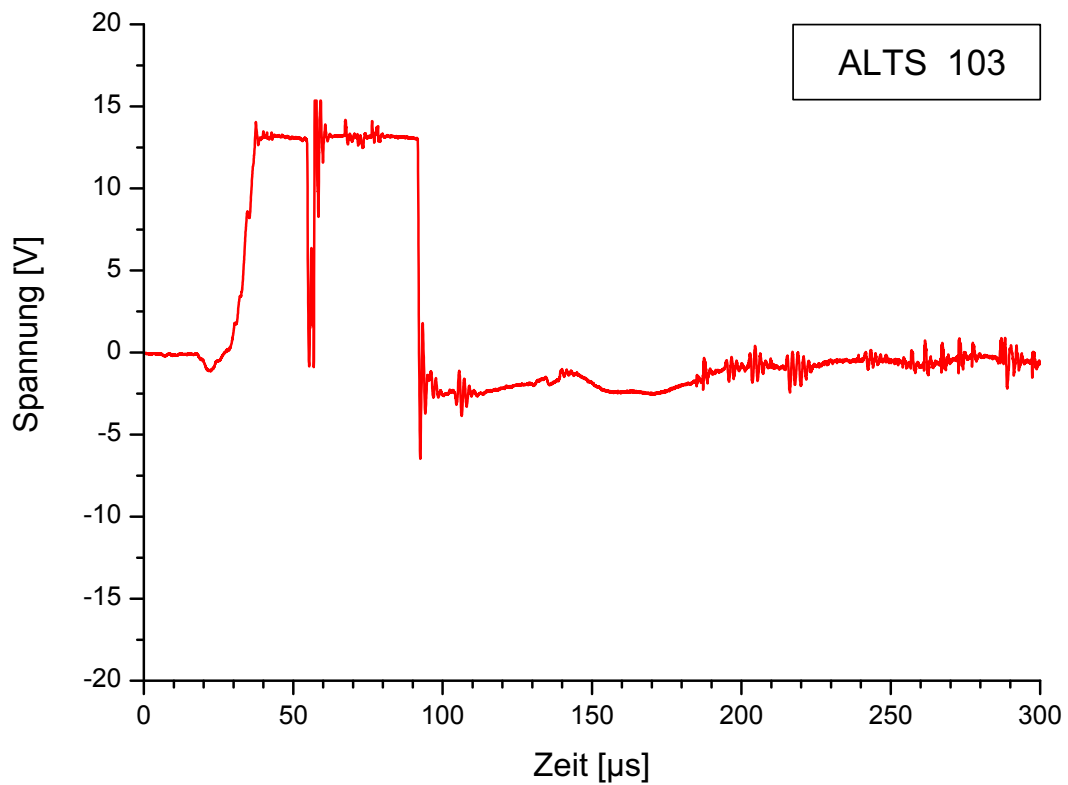


Bild C.192: ALTS-B 103, Einbautiefe 61 mm

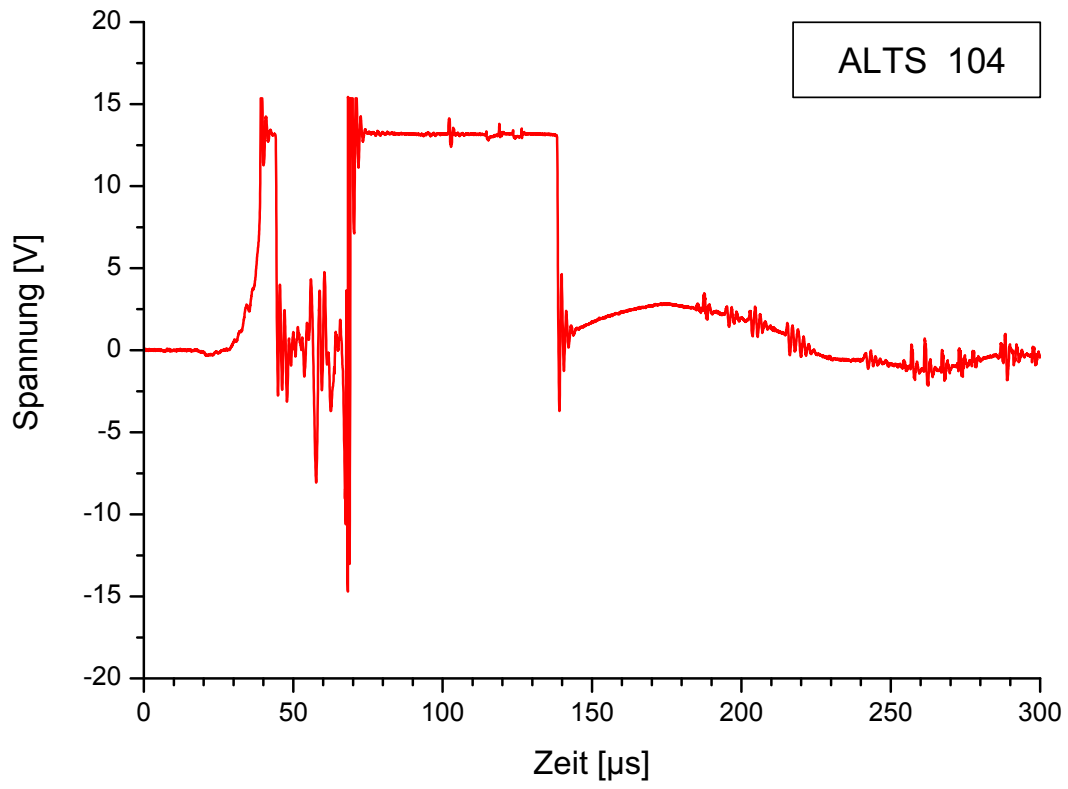


Bild C.193: ALTS-B 104, Einbautiefe 81 mm

Versuch Nr. 11

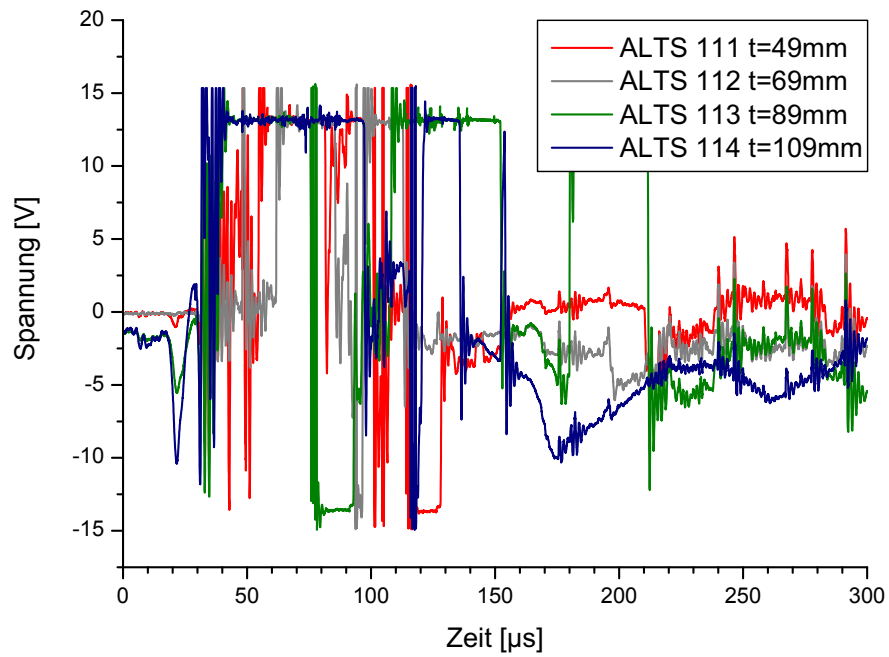


Bild C.194: Versuch Nr. 11, ALTS-B 111-114

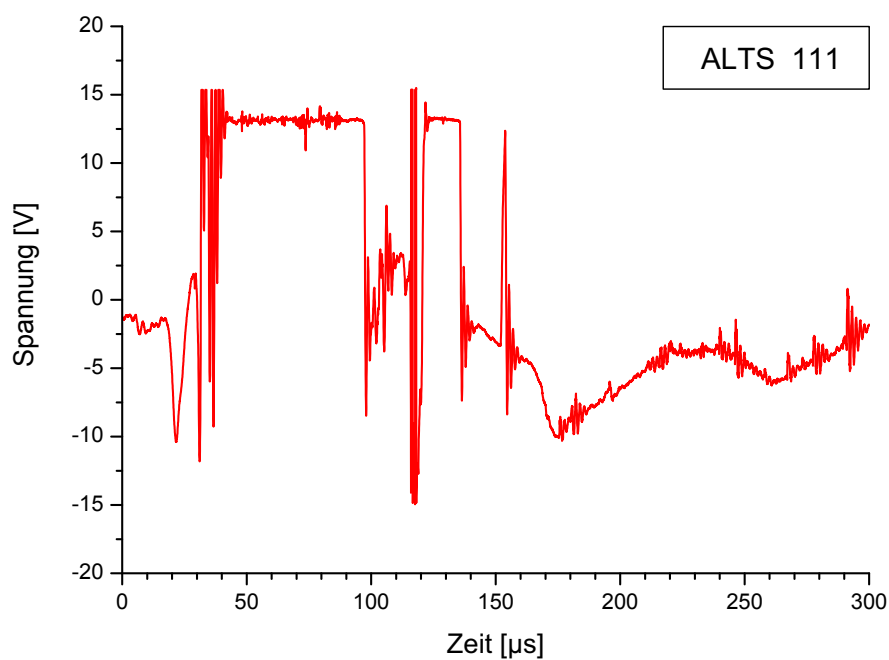


Bild C.195: ALTS-B 111, Einbautiefe 49 mm

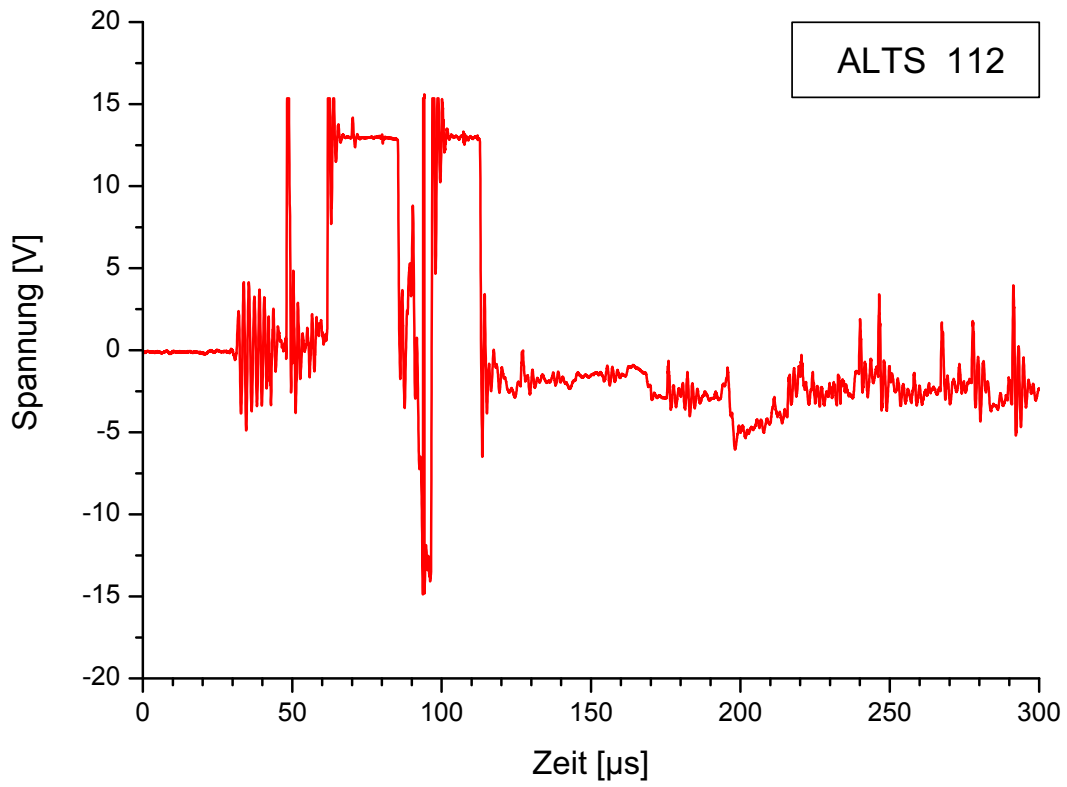


Bild C.196: ALTS-B 112, Einbautiefe 69 mm

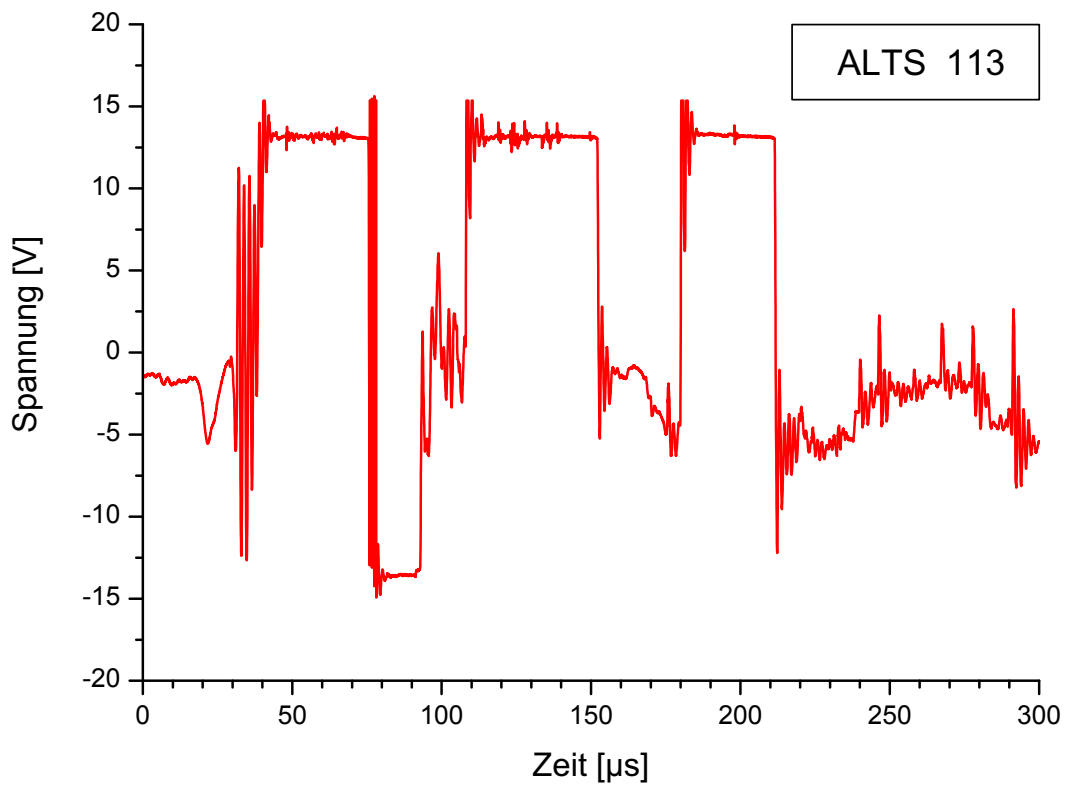


Bild C.197: ALTS-B 113, Einbautiefe 89 mm

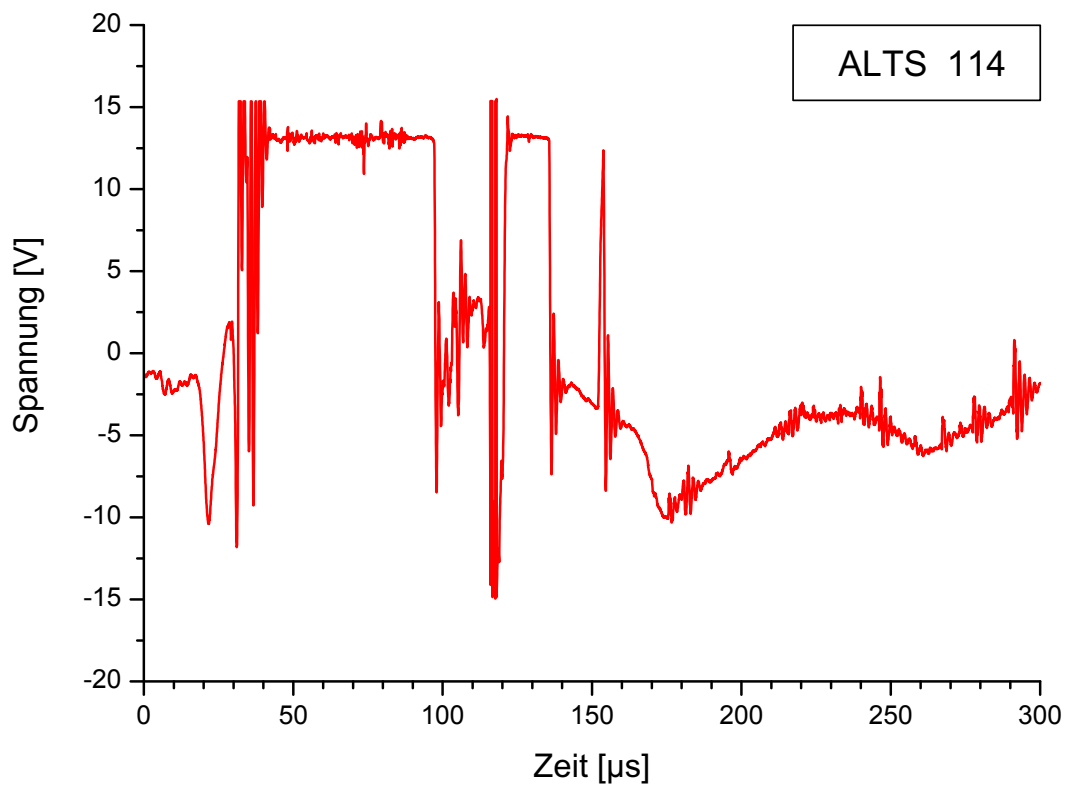


Bild C.198: ALTS-B 114, Einbautiefe 109 mm

Versuch Nr. C

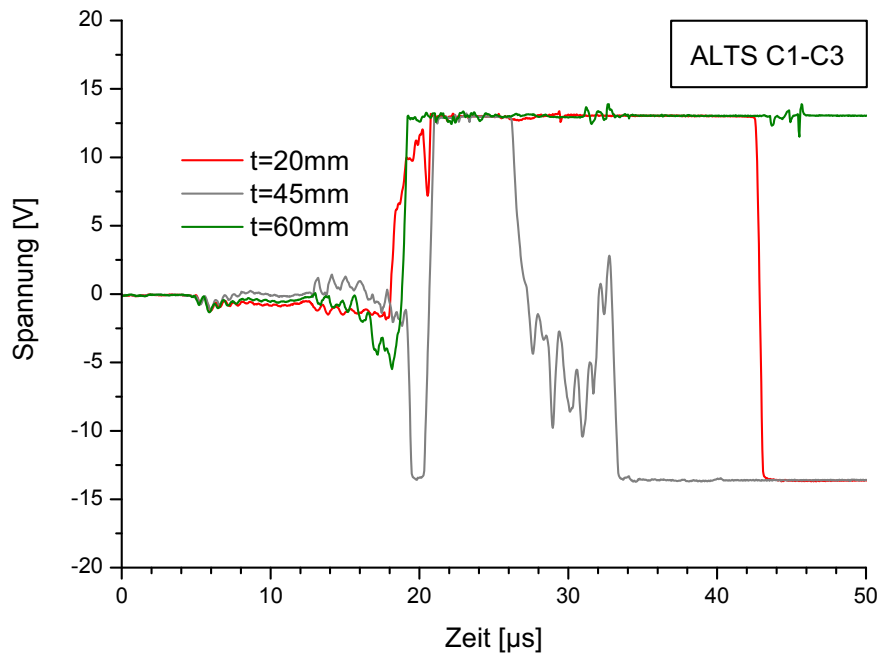


Bild C.199: Versuch Nr. C, ALTS C1-C3

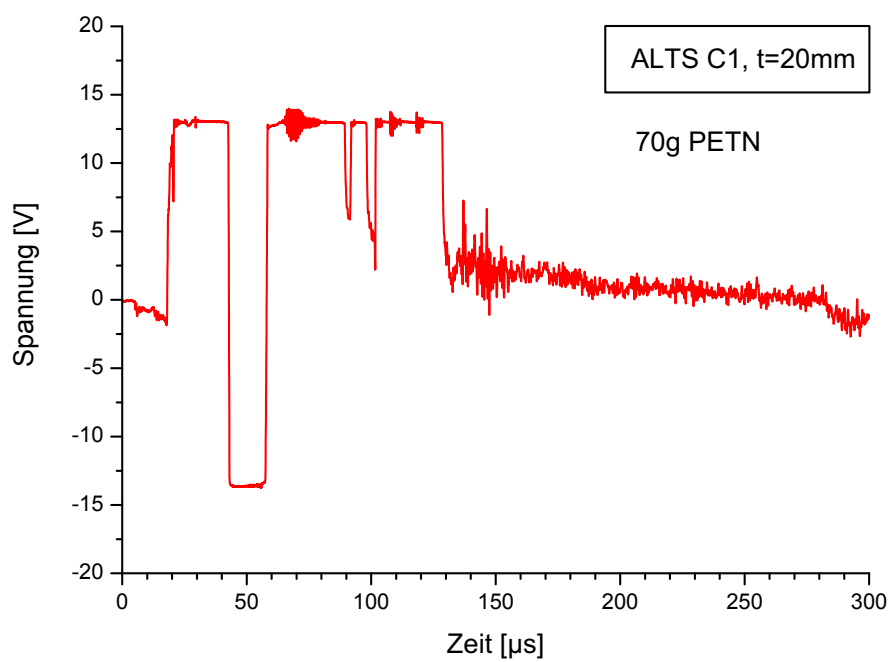


Bild C.200: ALTS C1, Einbautiefe 20 mm

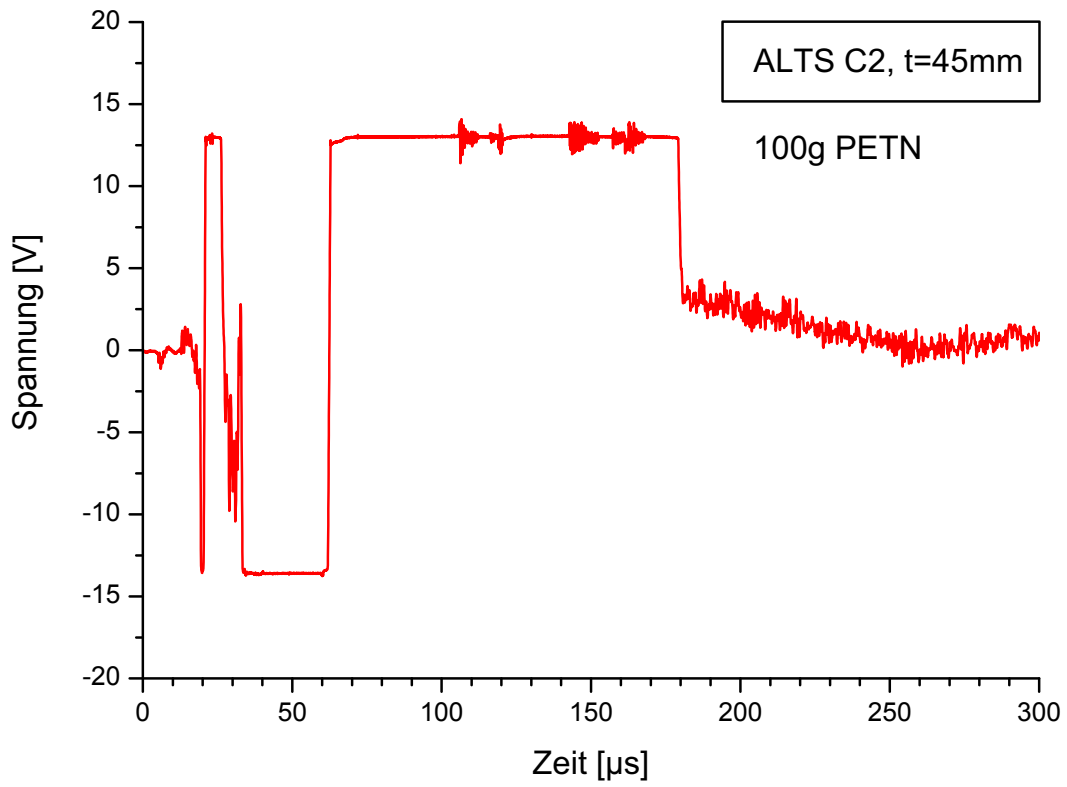


Bild C.201: ALTS C2, Einbautiefe 45 mm

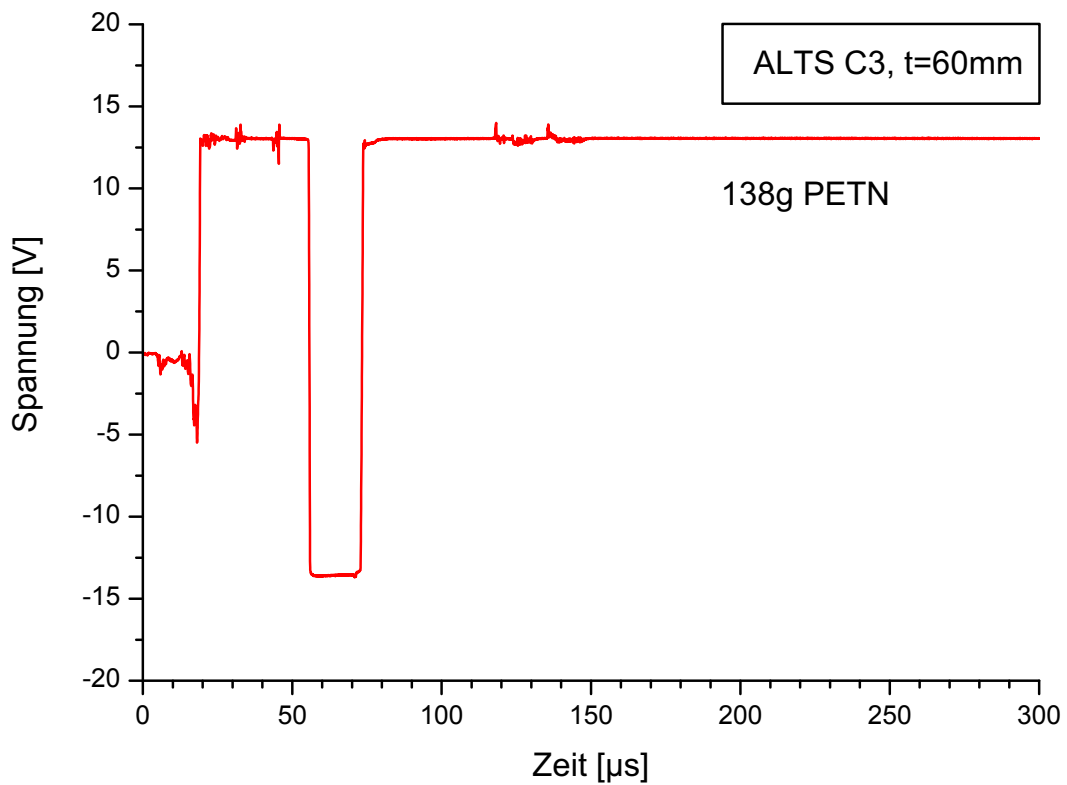
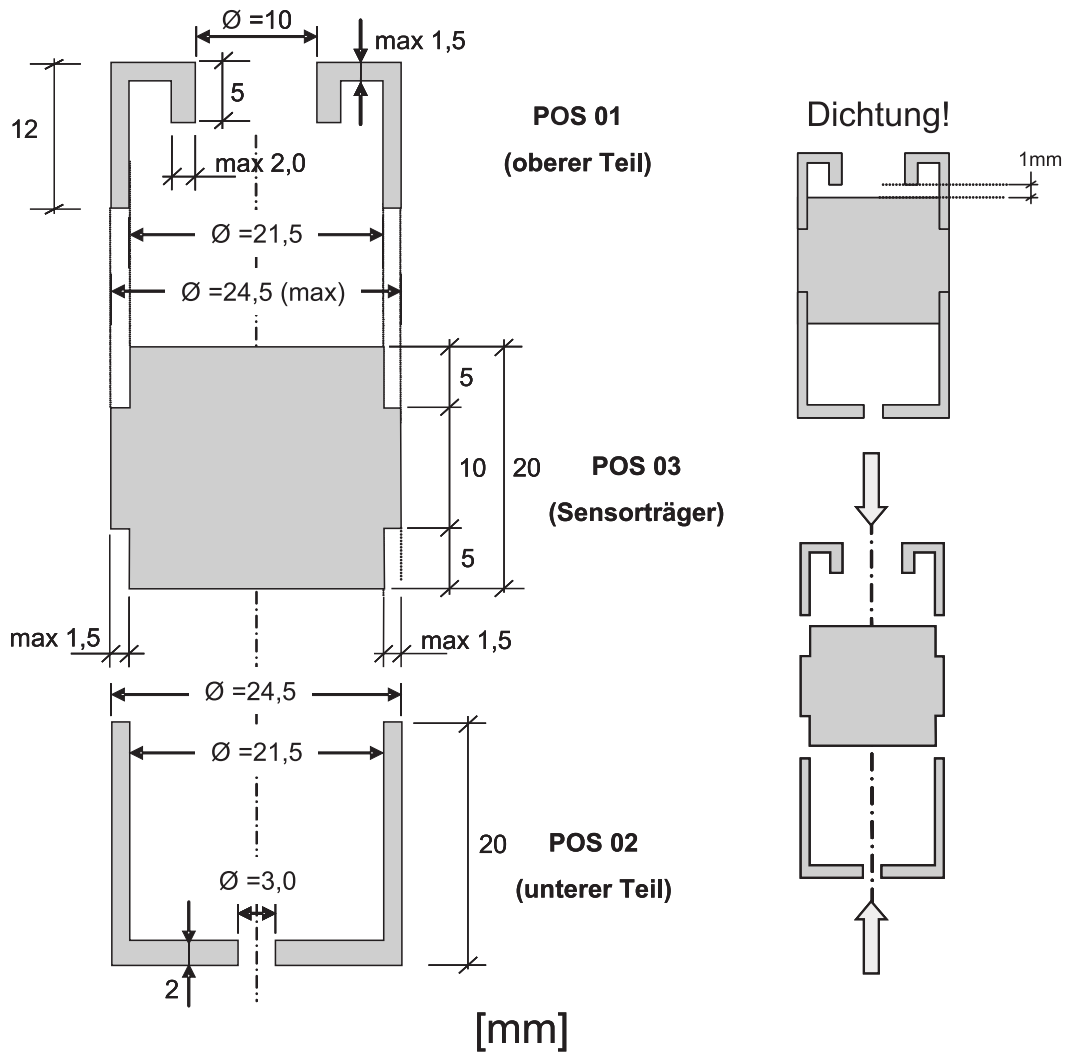


Bild C.202: ALTS C3, Einbautiefe 60 mm

D Planunterlagen



Material: PVC – Stangenmaterial
 Stückzahl: 3 Gehäuse

Bild D.1: ALTS-Gehäuse Bauform C

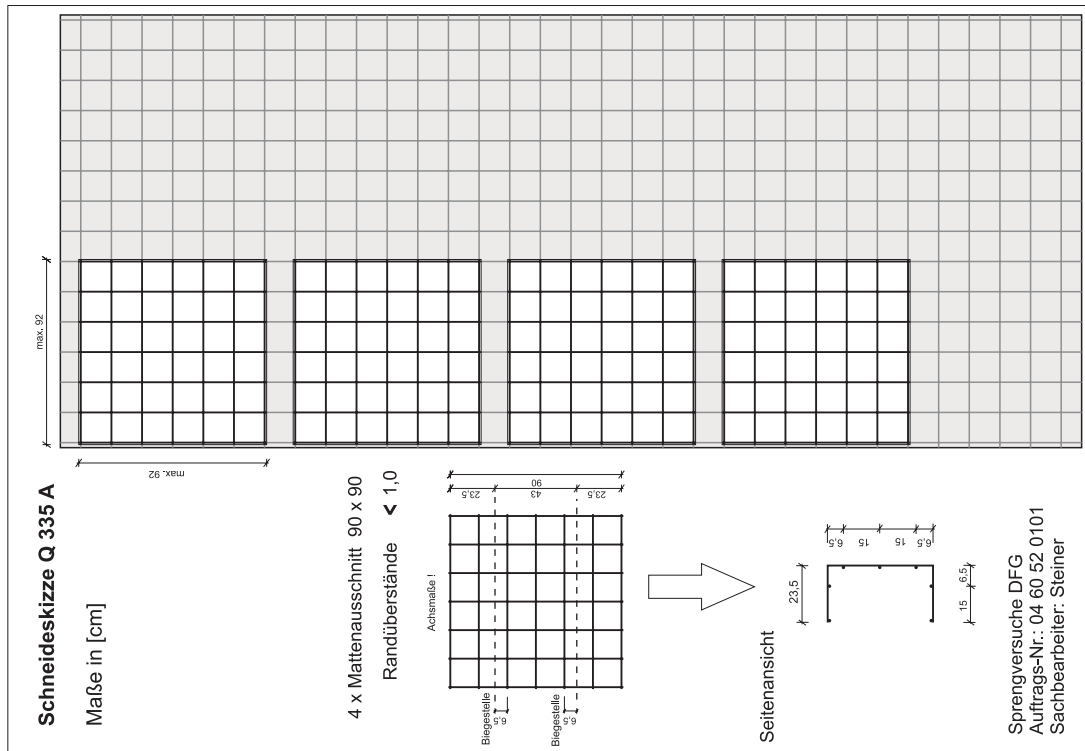
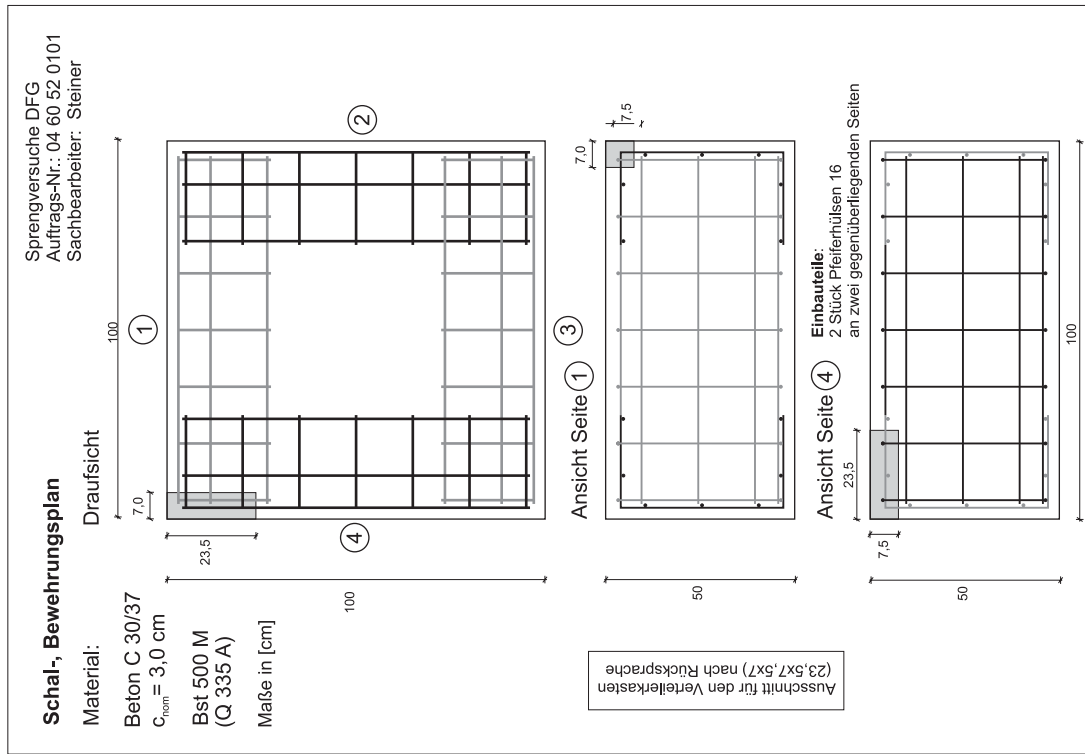


Bild D.2: Bewehrungsplan und Schneideskizze

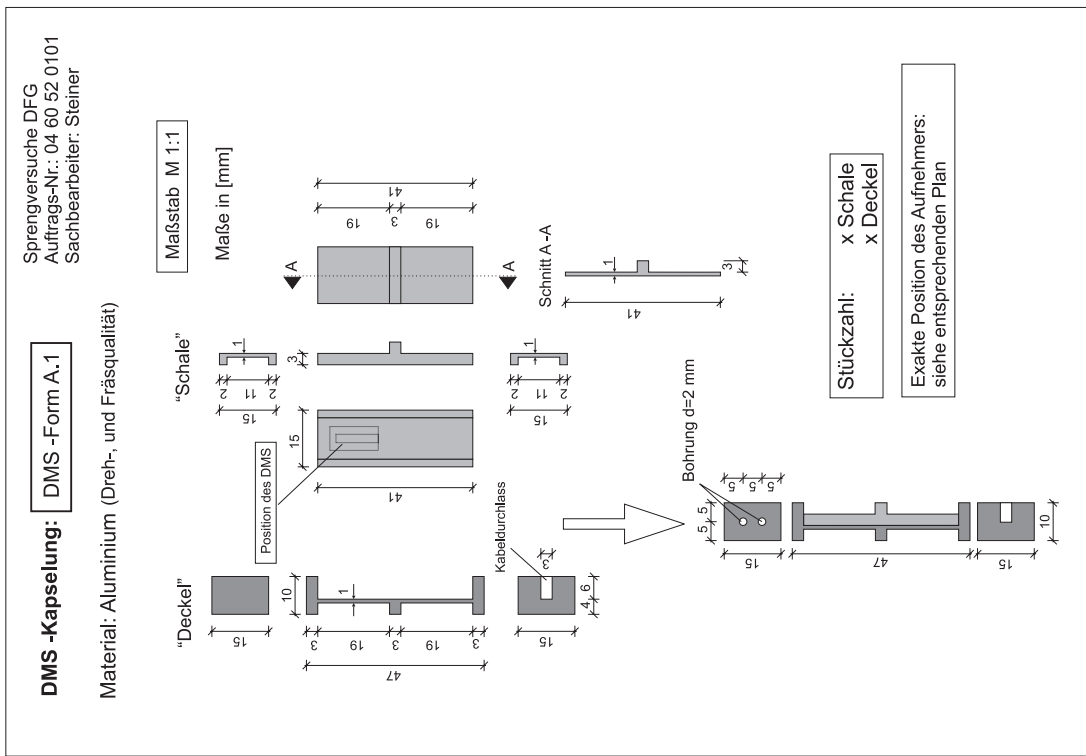


Bild D.3: Kapselungen DMS

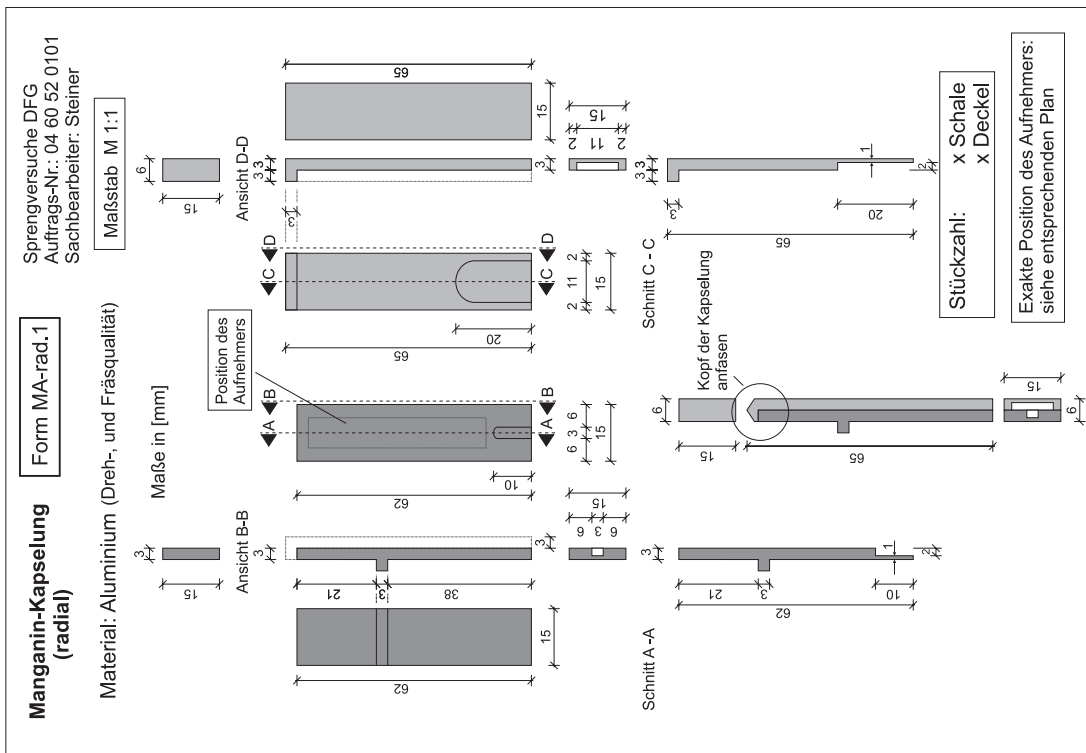


Bild D.4: Kapselungen Manganin (radial)

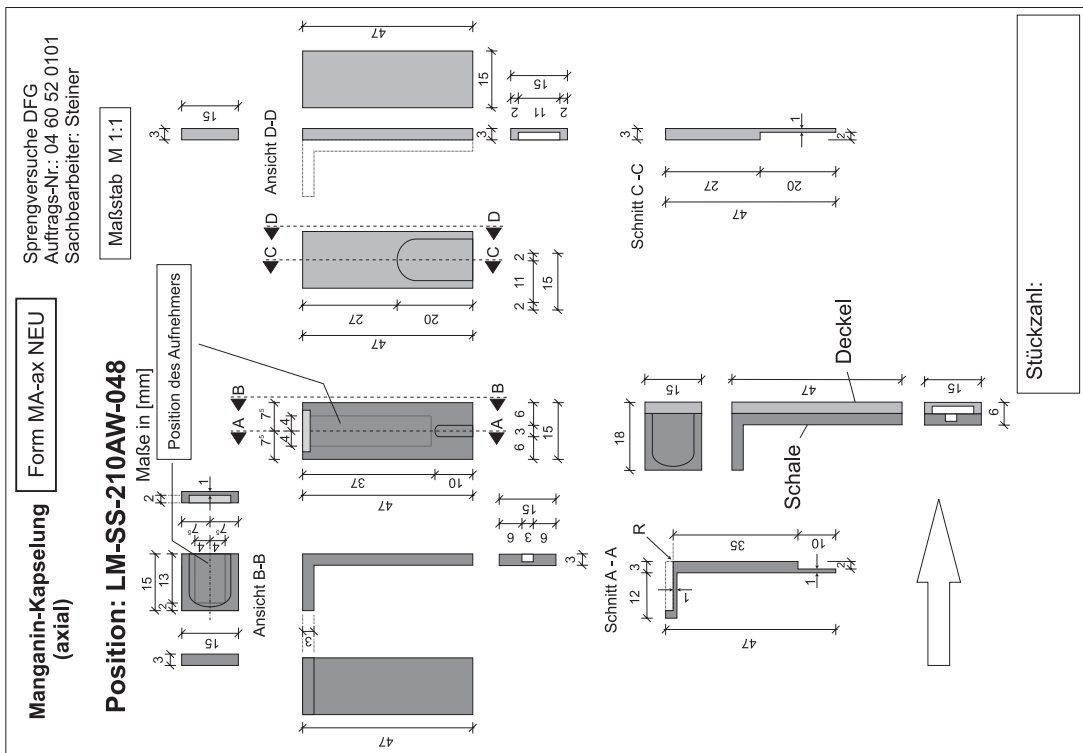
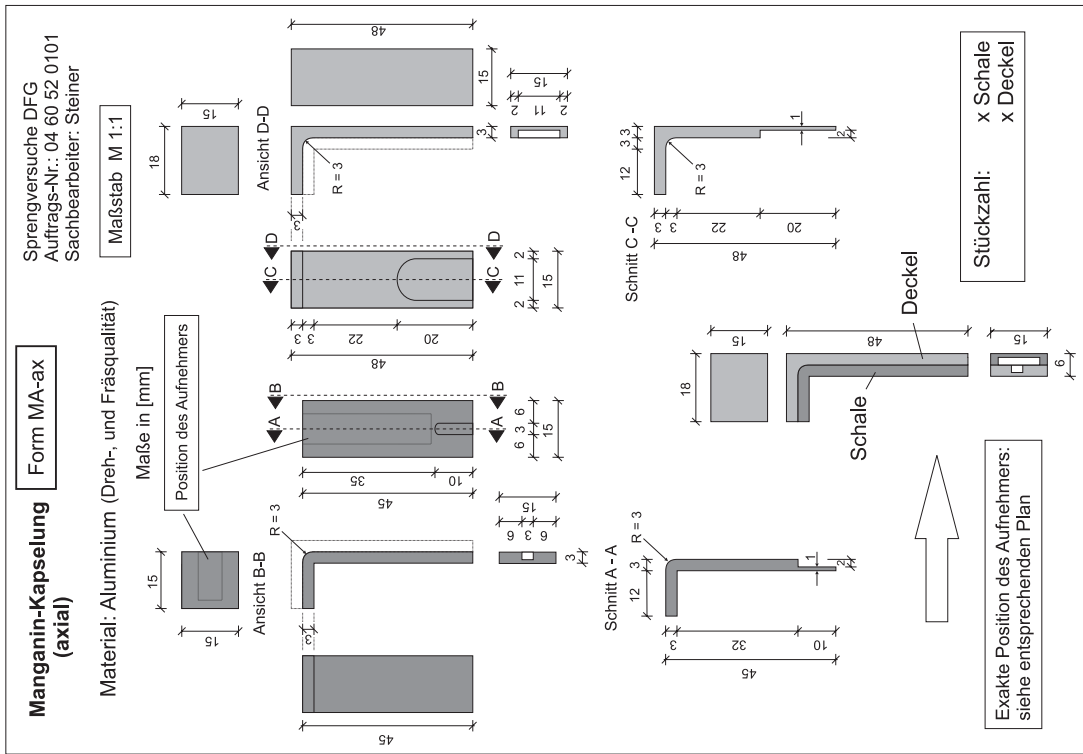


Bild D.5: Kapselungen Manganin (axial); (links) alte Bauform, (rechts) neue Form

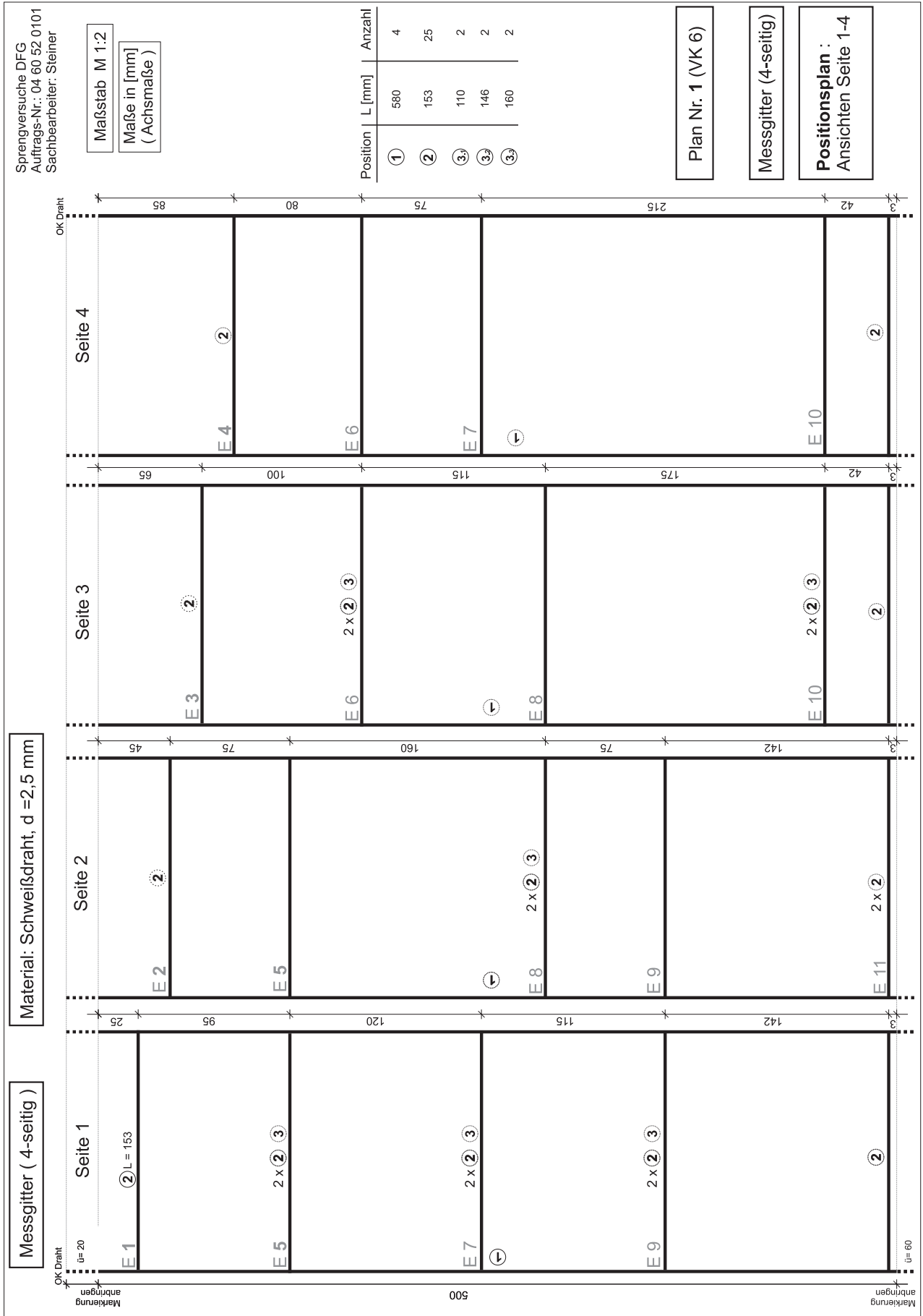


Bild D.6: Konstruktionsplan-Messgitter

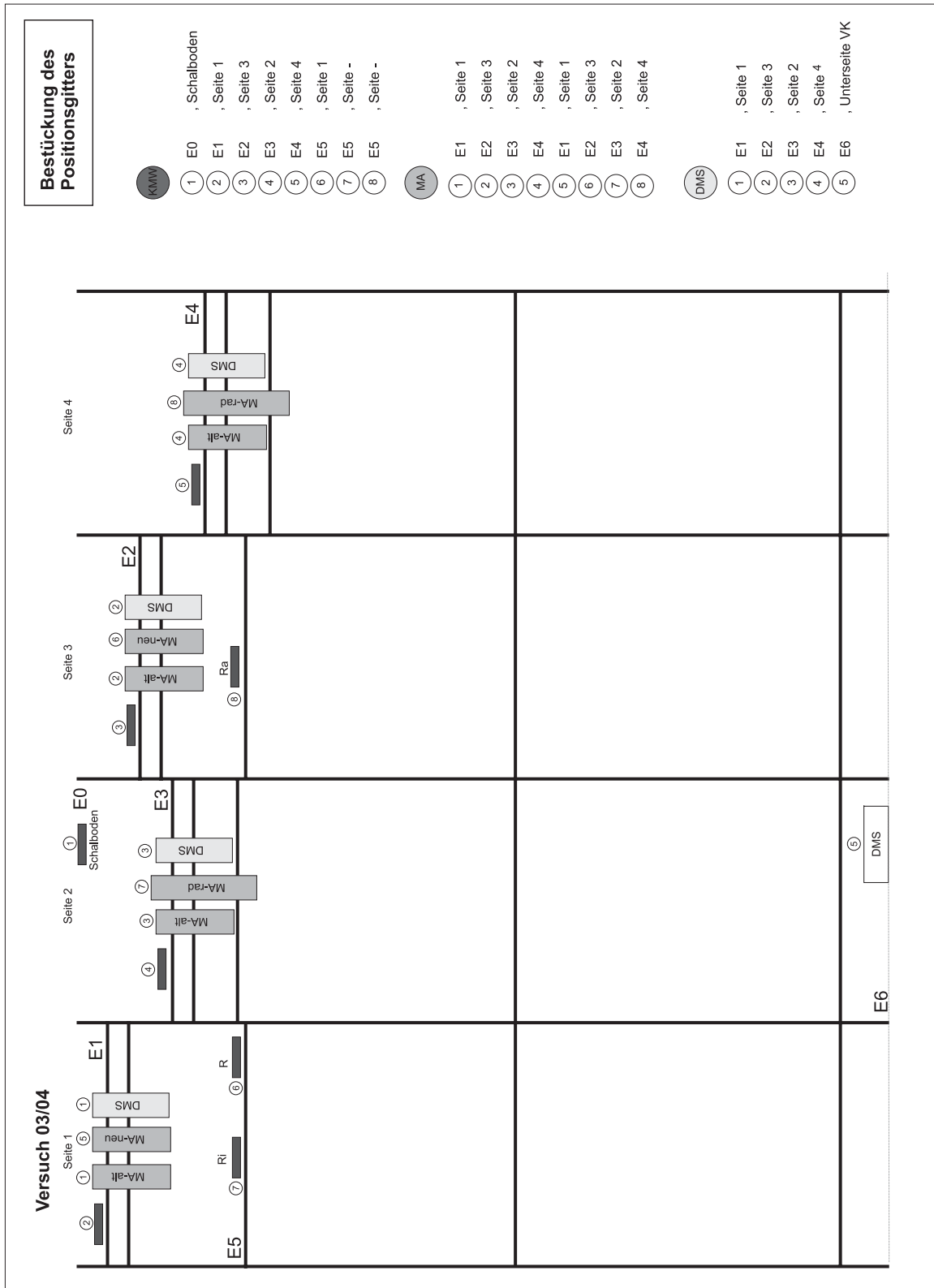


Bild D.7: Anordnung der Messelemente-Prinzip

**Schriftenreihe des
Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie**

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller und Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
ISSN 0933-0461

- Heft 1** Manfred Curbach: *Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten*. 1987
- Heft 2** Franz-Hermann Schlüter: *Dicke Stahlbetonplatten unter stoßartiger Belastung - Flugzeugabsturz*. 1987
- Heft 3** Marlies Schieferstein: *Der Zugflansch von Stahlbetonplattenbalken unter Längsschub und Querbiegung bei kritischer Druckbeanspruchung von Beton*. 1988
- Heft 4** Thomas Bier: *Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton*. 1988
- Heft 5** Wolfgang Brameshuber: *Bruchmechanische Eigenschaften von jungem Beton*. 1988
- Heft 6** Bericht DFG-Forschungsschwerpunkt: *Durability of Non-Metallic Inorganic Building Materials*. 1988
- Heft 7** Manfred Feyerabend: *Der harte Querstoß auf Stützen aus Stahl und Stahlbeton*. 1988
- Heft 8** Klaus F. Schönlin: *Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton*. 1989
- Heft 9** Lothar Stempniewski: *Flüssigkeitsgefüllte Stahlbetonbehälter unter Erdbebeneinwirkung*. 1990
- Heft 10** Jörg Weidner: *Vergleich von Stoffgesetzen granularer Schüttgüter zur Silodruckermittlung*. 1990
- Heft 11** Pingli Yi: *Explosionseinwirkungen auf Stahlbetonplatten*. 1991
- Heft 12** Rainer Kunterding: *Beanspruchung der Oberfläche von Stahlbetonsilos durch Schüttgüter*. 1991
- Heft 13** Peter Haardt: *Zementgebundene und kunststoffvergütete Beschichtungen auf Beton*. 1991
- Heft 14** Günter Rombach: *Schüttguteinwirkungen auf Silozellen - Exzentrische Entleerung*. 1991
- Heft 15** Harald Garrecht: *Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk*. 1992

- Heft 16** Violandi Vratsanou: *Das nichtlineare Verhalten unbewehrter Mauerwerksscheiben unter Erdbebenbeanspruchung - Hilfsmittel zur Bestimmung der q-Faktoren.* 1992
- Heft 17** Carlos Rebelo: *Stochastische Modellierung menschengenerierter Schwingungen.* 1992
- Heft 18** Seminar 29./30. März 1993: *Erdbebenauslegung von Massivbauten unter Berücksichtigung des Eurocode 8.* 1993
- Heft 19** Hubert Bachmann: *Die Massenträgheit in einem Pseudo-Stoffgesetz für Beton bei schneller Zugbeanspruchung.* 1993
- Heft 20** DBV/AiF-Forschungsbericht: H. Emrich: *Zum Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen unter Querkraft- und Längszugbeanspruchung.* 1993
- Heft 21** Robert Stolze: *Zum Tragverhalten von Stahlbetonplatten mit von den Bruchlinien abweichender Bewehrungsrichtung - Bruchlinien-Rotationskapazität.* 1993
- Heft 22** Jie Huang: *Extern vorgespannte Segmentbrücken unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion.* 1994
- Heft 23** Rolf Wörner: *Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton.* 1994
- Heft 24** Ioannis Retzepis: *Schiefe Betonplatten im gerissenen Zustand.* 1995
- Heft 25** Frank Dahlhaus: *Stochastische Untersuchungen von Silobeanspruchungen.* 1995
- Heft 26** Cornelius Ruckenbrod: *Statische und dynamische Phänomene bei der Entleerung von Silozellen.* 1995
- Heft 27** Shishan Zheng: *Beton bei variierender Dehngeschwindigkeit, untersucht mit einer neuen modifizierten Split-Hopkinson-Bar-Technik.* 1996
- Heft 28** Yong-zhi Lin: *Tragverhalten von Stahlfaserbeton.* 1996
- Heft 29** DFG: *Korrosion nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe im Bauwesen.* 1996
- Heft 30** Jürgen Ockert: *Ein Stoffgesetz für die Schockwellenausbreitung in Beton.* 1997
- Heft 31** Andreas Braun: *Schüttgutbeanspruchungen von Silozellen unter Erdbebeneinwirkung.* 1997
- Heft 32** Martin Günter: *Beanspruchung und Beanspruchbarkeit des Verbundes zwischen Polymerbeschichtungen und Beton.* 1997

- Heft 33** Gerhard Lohrmann: *Faserbeton unter hoher Dehngeschwindigkeit*. 1998
- Heft 34** Klaus Idda: *Verbundverhalten von Betonrippenstäben bei Querkzug*. 1999
- Heft 35** Stephan Kranz: *Lokale Schwind- und Temperaturgradienten in bewehrten, oberflächennahen Zonen von Betonstrukturen*. 1999
- Heft 36** Gunther Herold: *Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineral-sauren Wässern*. 1999
- Heft 37** Mostafa Mehrafza: *Entleerungsdrücke in Massefluss-Silos - Einflüsse der Geometrie und Randbedingungen*. 2000
- Heft 38** Tarek Nasr: *Druckentlastung bei Staubexplosionen in Siloanlagen*. 2000
- Heft 39** Jan Akkermann: *Rotationsverhalten von Stahlbeton-Rahmenecken*. 2000
- Heft 40** Viktor Mechtcherine: *Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rißausbreitung in Beton*. 2001
- Heft 41** Ulrich Häußler-Combe: *Elementfreie Galerkin-Verfahren – Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten zur Berechnung von Stahlbetontragwerken*. 2001
- Heft 42** Björn Schmidt-Hurtienne: *Ein dreiaxiales Schädigungsmodell für Beton unter Einschluß des Dehnrateneffekts bei Hochgeschwindigkeitsbelastung*. 2001
- Heft 43** Nazir Abdou: *Ein stochastisches nichtlineares Berechnungsverfahren für Stahlbeton mit finiten Elementen*. 2002
- Heft 44** Andreas Plotzitz: *Ein Verfahren zur numerischen Simulation von Betonstrukturen beim Abbruch durch Sprengen*. 2002
- Heft 45** Timon Rabczuk: *Numerische Untersuchungen zum Fragmentierungsverhalten von Beton mit Hilfe der SPH-Methode*. 2002
- Heft 46** Norbert J. Krutzik: *Zu Anwendungsgrenzen von FE-Modellen bei der Simulation von Erschütterungen in Kernkraftbauwerken bei Stoßbelastungen*. 2002
- Heft 47** Thorsten Timm: *Beschuß von flüssigkeitsgefüllten Stahlbehältern*. 2002
- Heft 48** Slobodan Kasic: *Tragverhalten von Segmentbauteilen mit interner und externer Vorspannung ohne Verbund*. 2002
- Heft 49** Christoph Kessler-Kramer: *Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung*. 2002

- Heft 50** Nico Herrmann: *Experimentelle Verifizierung von Prognosen zur Sprengtechnik*. 2002
- Heft 51** Michael Baur: *Elastomerlager und nichtlineare Standorteffekte bei Erdbebeneinwirkung*. 2003
- Heft 52** Seminar 02. Juli 2004: *DIN 1045-1 Aus der Praxis für die Praxis*. 2004
- Heft 53** Abdelkhalek Saber Omar Mohamed: *Behaviour of Retrofitted Masonry Shear Walls Subjected to Cyclic Loading*. 2004
- Heft 54** Werner Hörenbaum: *Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk*. 2005
- Heft 55** Seminar Februar 2006: *DIN 4149 - Aus der Praxis für die Praxis*. 2006
- Heft 56** Sam Foos: *Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen*. 2006
- Heft 57** Ramzi Maliha: *Untersuchungen zur Rissbildung in Fahrbahndecken aus Beton*. 2006
- Heft 58** Andreas Fäcke: *Numerische Simulation des Schädigungsverhaltens von Brückenpfeilern aus Stahlbeton unter Erdbebenlasten*. 2006
- Heft 59** Juliane Möller: *Rotationsverhalten von verbundlos vorgespannten Segmenttragwerken*. 2006
- Heft 60** Martin Larcher: *Numerische Simulation des Betonverhaltens unter Stoßwellen mit Hilfe des Elementfreien Galerkin-Verfahrens*. 2007
- Heft 61** Christoph Niklasch: *Numerische Untersuchungen zum Leckageverhalten von gerissenen Stahlbetonwänden*. 2007
- Heft 62** Halim Khbeis: *Experimentelle und numerische Untersuchungen von Topflagern*. 2007
- Heft 63** Sascha Schnepf: *Vereinfachte numerische Simulation des Tragverhaltens ebener mauerwerksausgefachter Stahlbetonrahmen unter zyklischer Belastung*. 2007
- Heft 64** Christian Wallner: *Erdbebengerechtes Verstärken von Mauerwerk durch Faserverbundwerkstoffe – experimentelle und numerische Untersuchungen*. 2008
- Heft 65** Niklas Puttendörfer: *Ein Beitrag zum Gleitverhalten und zur Sattelausbildung externer Spannglieder*. 2008
- Heft 66** Michael Haist: *Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen*. 2009

Heft 67

Stephan Steiner: *Beton unter Kontaktdetonation – neue experimentelle Methoden.* 2009

Frühere Berichte des
Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie

Ulrich Häußler: *Geschwindigkeits- und Spannungsfelder beim Entleeren von Silozellen.* 1984

Wilfried Gladen: *Numerische Untersuchungen der Lasten in Silozellen beim exzentrischen Entleeren.* 1985

Bezug der Hefte: Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Universität Karlsruhe
Postfach 6980
D - 76128 Karlsruhe
Tel. 0721/608-2263
Fax 0721/608-2265

Druckkostenzuschuss incl. Porto: je Heft 18,-- Euro

Außerdem noch erhältlich:

Festschrift
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. techn. h.c. Josef Eibl

Aus dem Massivbau und seinem Umfeld

788 Seiten, Preis incl. Versand: 25,-- Euro