



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Mika Jia Ping Asche

## **Verifikation eines neuen Messgerätes zur Vermessung von Detonationsgeschwindigkeiten**

**Mika Jia Ping Asche**

**Verifikation eines neuen Messgerätes zur  
Vermessung von  
Detonationsgeschwindigkeiten**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Rheinmetall Waffe und Munition GmbH  
Abteilung C3EGKGK  
Heinrich-Ehrhardt-Straße 2  
29345 Unterlüß

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Stefan Wiesemann  
Zweitprüfer/in : Stephan Weise (M.Sc.)

Abgabedatum: 27.03.2025

## **Zusammenfassung**

### **Name des Studierenden**

Mika Jia Ping Asche

### **Thema der Bachelorthesis**

Verifikation eines neuen Messgerätes zur Vermessung von Detonationsgeschwindigkeiten

### **Stichworte**

Explosivstoffe, Sprengstoff, Detonationsgeschwindigkeit, optische Fasern, Messtechnik

### **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit beschreibt den Vergleich von zwei Messverfahren unter der Anwendung der diskreten „Punkt-zu-Punkt-Methode“ zur Bestimmung von Detonationsgeschwindigkeiten. Die Verifikation des Messverfahrens umfasst die Präparation der optischen Fasern und Durchführung von Sprengversuchen mit Glas-, Kunststoff- und perforierten Kunststofffasern, sowie die Auswertung der Messergebnisse durch das Messgerät.

Die Faserpräparation der Glasfaser bedarf weiterer Optimierung, die erzielten Ergebnisse sind ausreichend aber nicht belastbar. Für die Durchführung der Versuche mit Kunststofffasern kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Messverfahrens bestätigt werden. Mit der perforierten Kunststofffaser konnten keine verwertbaren Ergebnisse erzielt werden. Die Messgerät gestützte Auswertung ist nutzenorientiert.

### **Name of Student**

Mika Jia Ping Asche

### **Title of the paper**

Verification of a new measurement device to gauge detonation velocity

### **Keywords**

Explosives, high explosives, velocity of detonation, optical fibre, measurement instrumentation

### **Abstract**

This report contains the comparison of two measurement setups using the same discrete “point-to-point-method” to measure detonation velocities. The verification of the measurement procedure includes the preparation of the optical fibers and the experimental procedure of blast tests with glass, plastic and perforated plastic fibers, as well as the evaluation of the measurement results by the measuring device.

Regarding the fiber preparation of the glass fiber requires further optimisation; the results obtained are satisfactory but not reliable. The tests with plastic fibers can confirm the accuracy and reliability of the measurement procedure. No usable results could be obtained with the perforated plastic fiber. The evaluation by the measuring device is purpose-driven.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Grundbegriffe</b>	<b>10</b>
2.1	Explosivstoffe	10
2.1.1	Sprengstoffe	10
2.1.2	Treibstoffe	13
2.1.3	Pyrotechnische Sätze	13
2.2	Umsetzungsarten	14
2.2.1	Verbrennung	14
2.2.2	Deflagration	15
2.2.3	Detonation	15
2.3	Die hydrodynamische Detonationstheorie	16
<b>3</b>	<b>Messmethoden</b>	<b>20</b>
3.1	Messverfahren mittels passiv optischer Fasern	20
3.1.1	Glasfaser (GoF)	26
3.1.2	Kunststofffaser (PoF)	28
3.1.3	Perforierte Faser (PFP)	29
3.2	Diskretes elektrisches Messverfahren	30
<b>4</b>	<b>Versuche</b>	<b>34</b>
4.1	Versuchsaufbau	34
4.2	Versuchsdurchführung	36
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>41</b>
5.1	Aufbereitung der CSV-Daten	41
5.2	Bewertung der Signale	41
5.3	Ergebnis der Versuche	43
5.3.1	Auswertung der Glasfaser (GoF)	44
5.3.2	Auswertung der Kunststofffaser (PoF)	47
5.3.3	Auswertung der perforierten Faser (PFP)	48
5.4	Vergleich	51
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>Quellen</b>	<b>78</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Übersicht über die Explosivstoffe [9] .....	10
Abb. 2 Reaktionsmechanismen von Explosivstoffen [3] .....	11
Abb. 3 Energieniveaus exothermer Reaktionen von Sprengstoffen nach [3] .....	11
Abb. 4 Sprengstoffkomponenten von SEMTEX [8] mit Formeln [6] .....	12
Abb. 5 Struktur- und Reaktionsformel von Schwarzpulver [19].....	13
Abb. 6 Kerze wird ausgepustet [21] .....	14
Abb. 7 Verlauf hinter einer Detonationsfront [7].....	16
Abb. 8 Schema der Ausbreitung einer Stoßwelle (Detonation in Luft) [6] .....	16
Abb. 9 Schematische Darstellung des Detonationsprozesses und der Detonationswellenstruktur [8] .....	17
Abb. 10 p-v-Diagramm: Stoß-Adiabaten und Rayleigh-Gerade nach [8][9] .....	19
Abb. 11 Messgerät OPTIMEX 64 der Firma OZM Research .....	20
Abb. 12 Lichtimpulsübertragung in der Faser nach [10] .....	21
Abb. 13 Totale Reflexion am Phasenübergang nach [11] .....	21
Abb. 14 Dispersionsverluste der optischen Fasern [10] .....	22
Abb. 15 High Speed Aufnahme - Eindringen der Stoßwelle in den Sprengstoff [10].....	23
Abb. 16 Block-Schema des 8-Kanal Messsystem des OPTIMEXs [13] .....	24
Abb. 17 Aufbau Messstrecke GoF .....	26
Abb. 18 Schneidgerät für GoF .....	26
Abb. 19 GoF in Kupferhülse gefasst [10].....	26
Abb. 20 Aufbau Messstrecke PoF .....	28
Abb. 21 Vorgehen mit der Bohrschablone für Faserpräparation PFP [12] .....	29
Abb. 22 Schematische Darstellung des Messstreifens .....	30
Abb. 23 Messstreifen Lagenaufbau [15].....	31
Abb. 24 Schaltkreis Messsystem LeCroy nach [18].....	31
Abb. 25 Graph – Oszilloskop LeCroy Messung 01 SEMTEX .....	32
Abb. 26 Versuchsaufbau: SEMTEX 8 mm PFP eingebettet – Versuche (04-11) .....	34
Abb. 27 Ansicht NX – 3D gedruckte PSA-Schiene für PoF und GoF.....	35
Abb. 28 Versuchsaufbau 01 .....	36
Abb. 29 Probenvorbereitung Versuch 04 SEMTEX.....	37
Abb. 30 Einbettung der PFP in zwei SEMTEX-Folien Versuche 04-11 .....	38
Abb. 31 Signalbeispiele zur Bewertung der Signale .....	42
Abb. 32 Übersicht der Ergebnisse nach Messverfahren.....	43
Abb. 33 GoF-Messung 01 SEMTEX .....	44
Abb. 34 GoF-Messung 02 SEMTEX .....	44

---

Abb. 35 GoF-Messung 07 SEMTEX .....	45
Abb. 36 GoF-Messung 09 SEMTEX .....	46
Abb. 37 GoF-Messung 11 SEMTEX .....	46
Abb. 38 PoF-Messung 04 SEMTEX.....	47
Abb. 39 PoF-Messung 08 SEMTEX.....	47
Abb. 40 PFP-Messung 01 SEMTEX .....	48
Abb. 41 PFP-Messung 09 SEMTEX .....	48
Abb. 41 PFP-Messung 06 SEMTEX .....	49
Abb. 42 PFP-Messung 11 SEMTEX .....	49
Abb. 43 PFP-Messung 06 mit beiden Bohrtiefen.....	50
Abb. 44 Vergleich der Ergebnisse nach Auswertungsverfahren GoF und PoF.....	52
Abb. 45 PoF Messung SEMTEX 09 Auswertung OPTIMEX.....	53
Abb. 46 PFP Messung 10 Auswertung OPTIMEX.....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auswertung 01 SEMTEX LeCroy [Anlage 1].....	32
Tabelle 2 Messpositionen des Messstreifens (LeCroy) [Anlage 1] .....	33
Tabelle 3 Gesamtübersicht zur Versuchsdurchführung aller Versuche .....	39
Tabelle 4 Vergleich der Ergebnisse aus der Messungen GoF und PoF zu leCroy .....	51

---

## Verzeichnis für Kurzworte

ADC	Analog-Digital-Converter	Analog-Digital-Konverter
CLK	clock	Taktgeber
FPGA	Field Programmable Gate Array	programmierbaren Feld in Form einer Gatteranordnung
GoF	Glas optical fiber	Optische Glasfaser
LeCroy	interne Benennung des diskret elektrischen Messverfahrens	Marke des Oszilloskops
LFG	Leiterplatten, Feinmechanik & Geräte Eckhard Oertel e.K.	Hersteller der Messstreifen (Messverfahren - LCroy)
NEM	Netto Explosivstoffmasse	
OPTIMEX	Messgerät des passiv optischen Messverfahrens	Gerätename
OZM	OPTIMEX Hersteller	OZM Research; Firmenname
PETN	Pentaerythritoltetranitrat	Sekundärsprengstoff; Nitropenta (alt)
PFP	perforated fiber probe	Perforierte Faser
PoF	plastic optical fiber	optische Kunststofffaser
PSA	Polystyrol-Acrylnitril	Filament; 3D Druck Schiene
RDX	Research Department Explosive Cyclotrimethylentrinitramin.	Sekundärsprengstoff; Hexogen (aufgrund seiner Struktur)
SEMTEX	Versuchsträger	Sekundärsprengstoff
μP	Mikroprozessor	
VOD	velocity of detonation	Auswertungsmodus am OPTIMEX

---

## Verzeichnis für Formelzeichen

Symbol	Erklärung
$\alpha$	halber Öffnungswinkel
$D$	Detonationsgeschwindigkeit; Detonationstheorie
$E_A$	Aktivierungsenergie
$E_G$	Energiegewinn
$e$	Innere Energie
$NA$	numerische Apertur
$n$	Brechungsindex
$p$	Detonationsdruck
$\rho$	Dichte der Schwaden in der Stoßwellenfront
$t$	Zeit
$\theta_c$	Grenzwinkel
$U$	Spannung
$v$	Spezifisches Volumen
$v_{det}$	Detonationsgeschwindigkeit; Auswertung
$W$	Schwadengeschwindigkeit



# 1 Einleitung

Die Firma Rheinmetall Waffe und Munition GmbH ist eine Tochtergesellschaft des Rüstungskonzern Rheinmetall AG. Am Standort Unterlüß werden großkaliberige Waffensysteme, Munition sowie militärische Ausrüstung entwickelt und produziert. Hierbei kommt es zum Einsatz von Explosivstoffen. Im Umgang mit Sprengstoffen ist die Detonationsgeschwindigkeit eine wichtige Kenngröße für Leistungs- und Sicherheitseigenschaften.

Zur Ermittlung der Detonationsgeschwindigkeit wird derzeit ein diskret elektrisches Messverfahren angewendet. Durch den starren Messaufbau ist die Probengeometrie stark begrenzt. Für mehr Flexibilität in der Probengeometrie wurde das Messgerät OPTIMEX 64 von der Firma OZM Research angeschafft. Das OPTIMEX nutzt dazu ein optisches Verfahren mit Glas- und Kunststofffasern. Das Messverfahren bietet zudem die Möglichkeit weitergehende Messungen an Sprengladungen durchzuführen. So kann beispielsweise in einem angepassten Messaufbau die Krümmung der Detonationsfront erfasst werden. Bevor das Messgerät im Tagesgeschäft eingesetzt werden kann, muss das Verfahren und die Handhabung erprobt und die Ergebnisse verifiziert werden. Dazu werden Versuche durchgeführt, in denen mit beiden Verfahren an der identischen Sprengladung die Detonationsgeschwindigkeit bestimmt wird. Die Messungen am OPTIMEX werden im gleichen Aufbau mit Glas- und Kunststofffasern sowie einem weiteren Verfahren mit nur einer perforierten Kunststofffaser durchgeführt.

Die mit dem OPTIMEX bestimmten Detonationsgeschwindigkeiten müssen mit einer zulässigen Abweichung von einem Prozent dem Ergebnis der Vergleichsmessungen des etablierten Verfahrens übereinstimmen. Zudem soll der Einsatz des OPTIMEX die Auswertung erleichtern. Für die Auswertung ist ein standardisiertes Vorgehen festzulegen.

## 2 Grundbegriffe

### 2.1 Explosivstoffe

Als Explosivstoffe gelten Stoffe, die ohne weitere Reaktionspartner befähigt sind zu reagieren. Darunter fallen feste, flüssige und gelatineartige Stoffe, sowie metastabile Stoffgemische, in denen bereits Oxidations- und Reduktionsmittel gemeinsam vorliegen [6]. Das bedeutet, dass grundsätzlich keine weiteren Reaktionspartner, wie der atmosphärische Sauerstoff, für die Umsetzung benötigt werden. Die Explosivstoffe (Abb. 1) lassen sich in die Gruppen der Sprengstoffe, Treibstoffe und pyrotechnischen Sprengsätze aufteilen, auf die im Weiteren näher eingegangen wird [9]. (Klassifizierungen in der Literatur können abweichen)

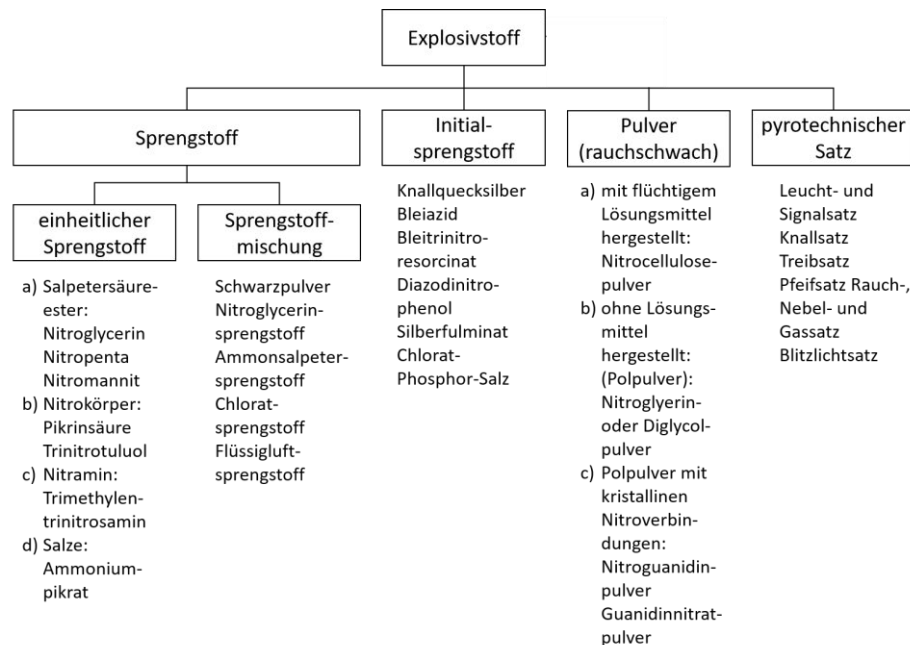


Abb. 1 Übersicht über die Explosivstoffe [9]

#### 2.1.1 Sprengstoffe

Die Besonderheit von Sprengstoffen liegt darin, dass es sich nicht um Stoffgemische aus Oxidations- und Reduktionsmittel handelt, sondern die Oxidations- und Reduktionsmittel (Abb. 2) in räumlicher Nähe zueinander in einem Molekül vereint vorliegen. Die Reaktionen können spontan ablaufen. Das ermöglicht zusätzlich intramolekulare Reaktionen, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit enorm steigt. Bei Stoffgemischen aus Oxidations- und Reduktionsmittel kann eine Reaktion nur zwischen den in Kontakt stehenden Oberflächen (Abb. 2) der Reaktionspartner stattfinden.

Bei Mischungen aus zwei Substanzen finden die Reaktionen jedoch eher makroskopisch als auf molekularer Ebene statt, wodurch die sie deutlich langsamer ablaufen [3].

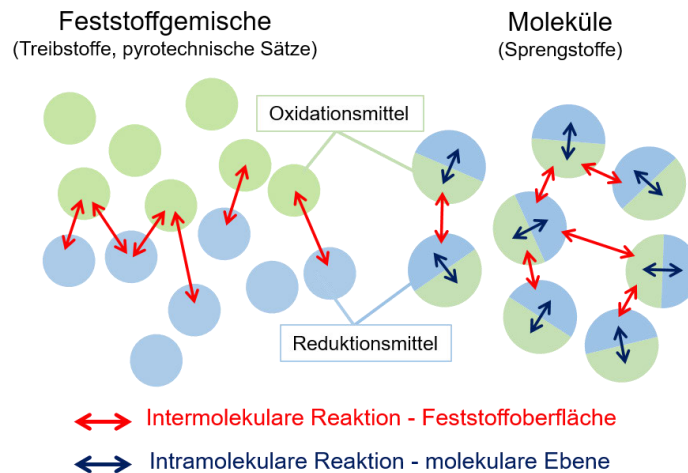


Abb. 2 Reaktionsmechanismen von Explosivstoffen [3]

Sprengstoffe werden weiter in Primär- und Sekundärsprengstoffe (Abb. 3) unterschieden. Hierbei zeichnen sich Primärsprengstoffe dadurch aus, dass sie durch geringe Energiezufuhr umsetzen. Sie reagieren empfindlich gegenüber Wärme, Schlag oder Reibung und erreichen sogleich einen Zustand der Detonation. Sekundärsprengstoffe erreichen in Teilen höhere Detonationsgeschwindigkeiten und unterscheiden sich dadurch, dass sie nur durch eine vorausseilende Stoßwelle zu einer detonativen Umsetzung initiieren können, weshalb Primärsprengstoffe auch als Initialsprengstoffe (Abb. 1) bezeichnet werden.

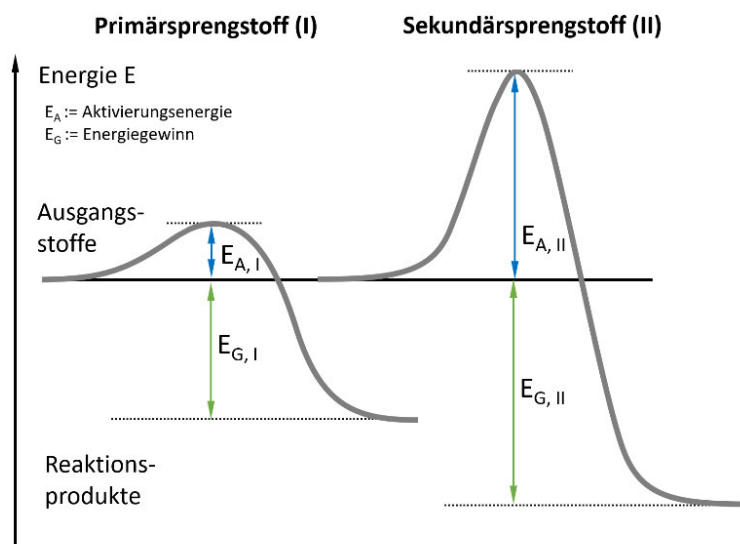


Abb. 3 Energieniveaus exothermer Reaktionen von Sprengstoffen nach [3]

Anhand der notwendigen Energiemenge, die benötigt wird, um die Reaktion des Sprengstoffes zu initiieren, werden die Sprengstoffe in Primär- und Sekundärsprengstoff unterteilt (Abb. 3). Für Primärsprengstoffe ist eine geringere Aktivierungsenergie als für Sekundärsprengstoffe notwendig [3]. Die Hauptleistung in der Anwendung resultiert aus der Umsetzung des Sekundärsprengstoffes [9]. Diese Trennung der Funktionen geht auf Sicherheitsaspekte zurück, welche die Handhabung mit Sprengstoffen erleichtert.

Als Beispiel eines Sekundärsprengstoffes sei hier SEMTEX angeführt. Dieser gehört zu den plastischen Sprengstoffen. Dabei handelt es sich um ein Sprengstoffgemisch, anteilig aus Pentaerythritoltetranitrat (PETN) (Abb. 4 b) und Hexogen (RDX) (Abb. 4 a) bestehend, welche in eine Polymer-Matrix eingebettet sind. RDX und PETN sind homogene, kristalline Sekundärsprengstoffe. Die Moleküle weisen jeweils Nitrogruppen ( $-\text{NO}_2$ ) und Methylengruppen ( $-\text{CH}_2$ ) auf, die als Oxidations- und Reduktionsmittel innerhalb des Moleküls reagieren [3].

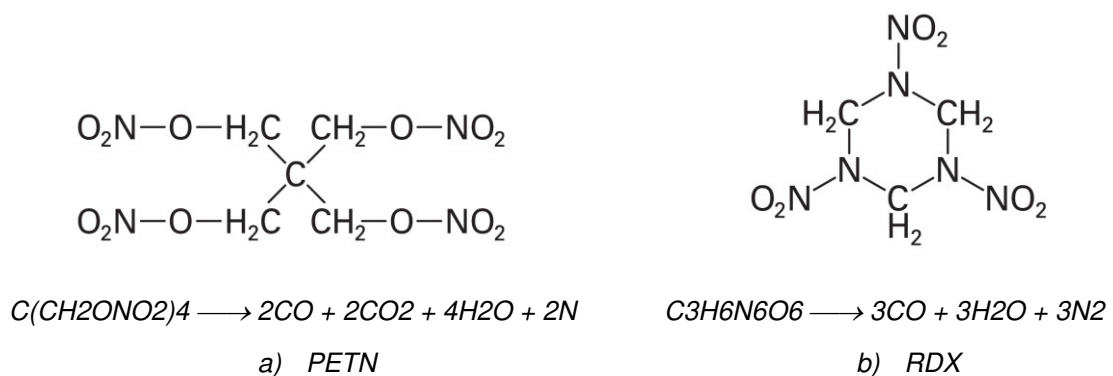


Abb. 4 Sprengstoffkomponenten von SEMTEX [8] mit Formeln [6]

Die entstehenden Reaktionsprodukte der Redoxreaktion sind gasförmig, auch das Wasser liegt bei den hohen Umsetzungstemperaturen gasförmig vor. Bei der Umsetzung entstehen sehr große Mengen an Gas, welche zu Beginn das Volumen des Feststoffes einnehmen und sich schlagartig ausdehnen. Hierdurch entsteht ein sehr hoher Expansionsdruck. Das Einbringen nichtenergetischer polymerer Binder, Plastifizierungsmittel oder Inerte mindert jedoch die Leistung des zu Grunde liegenden Sprengstoffes. So erzielt reines RDX eine Detonationsgeschwindigkeit von 8750 m/s und reines PETN 8400 m/s [8], vom Hersteller hingegen wird SEMTEX mit einer Detonationsgeschwindigkeit von nur 7000 m/s angegeben [4].

### 2.1.2 Treibstoffe

Die Treibstoffe unterscheiden sich von Sprengstoff durch ihre Umsetzungsart. Sie brennen lediglich kontrolliert ab und detonieren selbst bei hohem Druck nicht. Bei der Reaktion entstehen vor allem Gase, die zu einem hohen Gasdruck führen. Die Oxidations- und Reduktionsmittel liegen hier als Stoffgemische vor. Die Reaktionen finden an den Feststoffoberflächen (Abb. 2) des Pulvers statt. Liegen Reaktionspartner im optimalen Verhältnis im Kontakt, so reagieren sie und der Treibstoff setzt sich Schicht für Schicht um. Die verminderte Abbrandgeschwindigkeit lässt sich darauf zurückführen, dass dieser Vorgang mehr Zeit benötigt [6]. Hierunter fallen Treibladungspulver und Raketentreibstoffe. Neben dem durch Gasentwicklung generierten Druck, ist für Treibstoffe der spezifische Impuls die maßgebende Kenngröße. Der spezifische Impuls gibt die Änderung des Impulses pro Masseneinheit des Treibstoffs an [8].

### 2.1.3 Pyrotechnische Sätze

Pyrotechnische Sätze umfassen zum Beispiel Signalfackeln, Leuchtsätze, Rauch- und Nebelerzeuger, Täuschkörper, Brandwaffen, Verzögerungssätze sowie aus Airbags bekannte Gasgeneratoren und Feuerwerkskörper. Allen liegt eine starke exotherme Reaktion zugrunde. Pyrotechnische Sätze detonieren nicht [6]. Die Reaktion charakterisiert sich dadurch, dass die freigesetzte Energie unter der Bildung von Flammen und primär festen Rückständen entsteht. Des Weiteren können pyrotechnische Sätze wärme-, rauch- oder lichterzeugend sein, sowie zusätzlich Gase entwickeln [8].

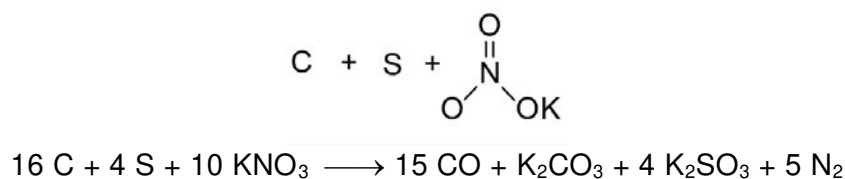


Abb. 5 Struktur- und Reaktionsformel von Schwarzpulver [19]

Als bekanntes Beispiel sei hier das gasentwickelnde Schwarzpulver (Abb. 5) genannt, bestehend aus 75% Kalisalpeter, 10% Schwefel und 15% Holzkohle. Der im Kalisalpeter gebundene Sauerstoff dient als Oxidationsmittel. Reduziert wird das Gemisch von dem Kohlenstoff der Holzkohle und dem Schwefel [9].

Für Stoffgemische gilt, dass eine größtmögliche Homogenität realisiert werden muss. Dazu wird eine kleinstmögliche Partikelgröße angestrebt.

Nur so kann sichergestellt werden, dass Oxidations- und Reduktionsmittel im richtigen Verhältnis aufeinandertreffen und gleichmäßig umsetzen. Die Abbrandgeschwindigkeit von Schwarzpulver liegt bei 600 - 800 m/s [8].

## 2.2 Umsetzungsarten

Explosivstoffe können auf verschiedenen Arten umsetzen. Darauf können die Zusammensetzung des Explosivstoffs und die äußeren Bedingungen Einfluss nehmen. Im Allgemeinen liegt eine Explosion vor, wenn sich stark komprimierte Gase plötzlich ausdehnen. Chemische Explosionen sind auf schnelle exotherme chemische Reaktionen zurückzuführen, bei denen überwiegend gasförmige Reaktionsprodukte entstehen. Explosionen werden weiter in Deflagration und Detonation unterschieden. Zudem können Explosivstoffe auch verbrennen [6].

### 2.2.1 Verbrennung

Die Verbrennung, wie auch im Alltag bekannt, findet drucklos statt. Der für die Oxidation benötigte Sauerstoff kann sowohl aus der Atmosphäre und/oder aus den Explosivstoffkomponenten entnommen werden. Die entstehenden Reaktionsprodukte – sogenannte Schwaden – strömen von der Reaktionszone weg entgegen der Abbrandrichtung. Durch Wärmeübertragung pflanzt sich die Reaktionszone fort. Die Reaktion ist instabil, da sie stark von äußeren Faktoren abhängt. Eine solche Flamme (Abb. 6) kann schnell erlöschen [8].



*Abb. 6 Kerze wird ausgepustet [21]*

### 2.2.2 Deflagration

Als Deflagration wird eine druckbehaftete, akustisch vernehmbare, schnelle Verbrennung bezeichnet. Die Voraussetzung ist, dass sowohl das Oxidations- als auch Reduktionsmittel gemeinsam in einem Gemisch oder einem Material vorliegen (Kap. 2.1). Die exothermen Reaktionen laufen schneller ab. Die Reaktionsprodukte haben nicht genügend Zeit, um zu entweichen. Der Druck steigt und die Abbrandgeschwindigkeit nimmt zu. Die Reaktionsfront pflanzt sich, wie bei der Verbrennung (Kap. 2.2.1), durch rein thermische Prozesse fort und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionszone liegt unterhalb der Schallgeschwindigkeit des unreaktierten Materials. Die Schwaden strömen ebenfalls entgegengesetzt der Abbrandrichtung weg vom Material (Kap. 2.2.1) [8].

Eine Deflagration kann in eine Detonation übergehen, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit des unreaktierten Materials überschreitet, was als „Deflagration to Detonation Transition“ (DDT) bezeichnet wird [8].

### 2.2.3 Detonation

Unter der Detonation wird die Umsetzung eines Sprengstoffes verstanden, deren Reaktionsfront sich mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit über der Schallgeschwindigkeit des unreaktierten Materials bewegt [8].

*Detonation – aus dem lateinischen detonare für herabdonnern [14].*

Der grundlegende Unterschied zu den bereits genannten Umsetzungsarten besteht darin, dass sich die Reaktionszone der Detonation nicht thermisch fortpflanzt, sondern ausgehend von der Wirkung einer Stoßwelle. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßwelle wird als Detonationsgeschwindigkeit bezeichnet. Die hierbei entstehenden Schwaden breiten sich ebenfalls in Detonationsrichtung aus. Die erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei detonativen Umsetzungen ausschließlich um Sprengstoffe (Kap. 2.1.1) handelt. [3][6].

Die Detonationsgeschwindigkeit eines Sprengstoffes kann oberhalb seines kritischen Durchmessers in Abhängigkeit von der Dichte als konstant angesehen werden und dient daher als Charakteristika für Sprengstoffe [8].

## 2.3 Die hydrodynamische Detonationstheorie

Die Detonation wird als eine energiefreisetzende chemische Reaktion beschrieben, die an eine Stoßwelle gekoppelt ist (Abb. 7) [8].

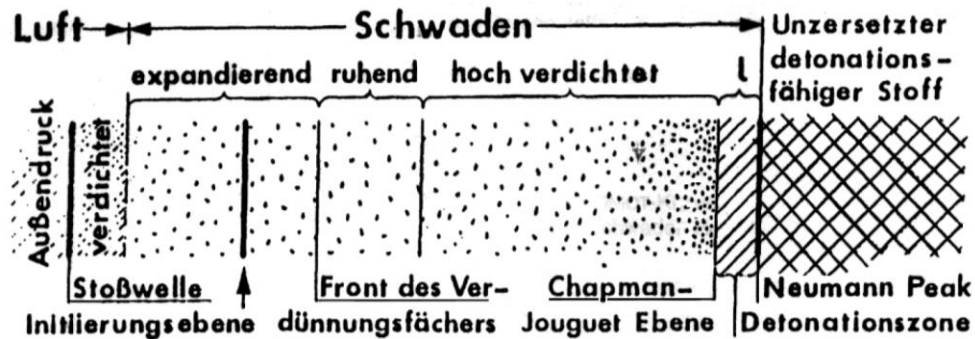


Abb. 7 Verlauf hinter einer Detonationsfront [7]

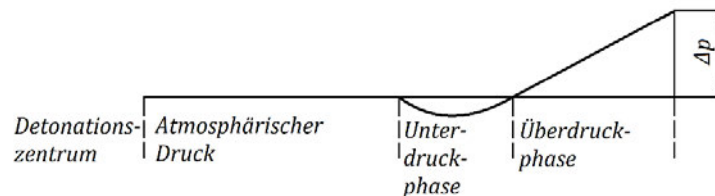


Abb. 8 Schema der Ausbreitung einer Stoßwelle (Detonation in Luft) [6]

Eine ebene Stoßwelle ist eine Druckwelle, die durch plötzliche Druckeinwirkung entsteht. Aufgrund dessen, dass das ruhende Medium, beispielsweise Luft (Abb. 8), schlagartig beschleunigt wird, verdichtet sich das stehende Medium. Es bildet sich eine Druckfront – eine Art Grenzschicht – aus. Die Druckfront hebt sich von der Ebene ab, in der das Medium beschleunigt wird, und eilt ihr voraus (Abb. 7). Eine Unterdruckphase bildet sich aufgrund des Druckgefälles, durch diese strömt das Medium nach [6].



Läuft eine Stoßwelle durch Sprengstoff, wird dieser komprimiert. Der starke Druckanstieg wird als „Von-Neumann-Peak“ (Abb. 7) bezeichnet (Zustand 1). In der sich anschließenden Reaktionszone kommt es durch den druckabhängigen Temperaturanstieg zur Umsetzung des Sprengstoffes (Abb. 9) [8].

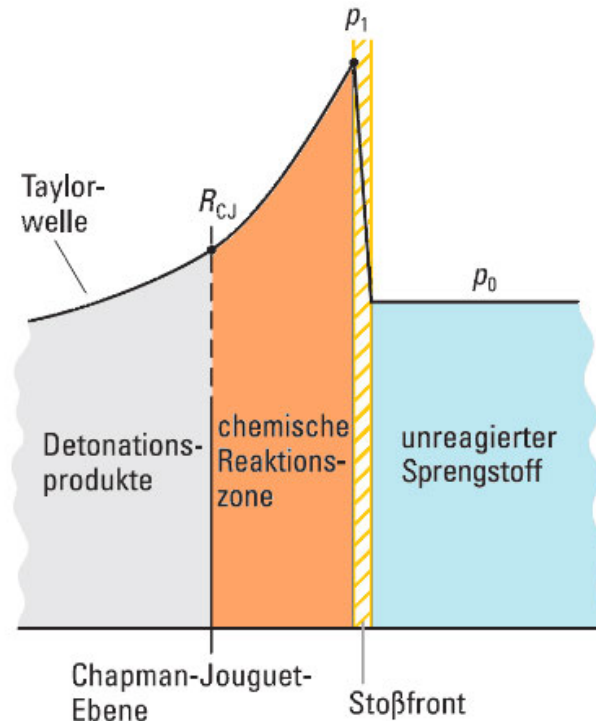


Abb. 9 Schematische Darstellung des Detonationsprozesses und der Detonationswellenstruktur [8]

Die Umsetzungsenergie wird der Stoßwelle zugeführt und wird dadurch aufrechterhalten. Die Detonation kann daher als stationär beschrieben werden. Die Chapman-Jouguet-Bedingung fordert, dass die chemische Reaktion bereits abgeschlossen ist und sich ein chemisches Gleichgewicht eingestellt hat [8].

Vom Zustand 0 – dem unreaktierten Sprengstoff – zum Zustand 1 lassen sich die Erhaltungsgleichungen aufstellen [9].

$p$	Detonationsdruck
$\rho$	Dichte der Schwaden in der Stoßwellenfront
$v$	Spezifisches Volumen ( $v = \frac{1}{\rho}$ )
$e$	Innere Energie
$W$	Schwadengeschwindigkeit
$D$	Detonationsgeschwindigkeit

$$\text{Massenerhaltung} \quad \rho_0 D = \rho_1 (D - W) \quad (1)$$

$$\text{Impulserhaltung} \quad p_1 - p_0 = \rho_0 D W \quad (2)$$

$$\text{Energieerhaltung} \quad p_1 W = \rho_0 D \left( e_1 - e_0 + \frac{W^2}{2} \right) \quad (3)$$

Die Schwadengeschwindigkeit  $W$  und die Detonationsgeschwindigkeit  $D$  ergeben sich aus den Gleichungen (1) und (2) [9]:

$$\text{Schwadengeschwindigkeit} \quad W = \sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} \quad (4)$$

$$\text{Detonationsgeschwindigkeit} \quad D = v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \quad (5)$$

Aus den Erhaltungsgleichungen ergeben sich die Hugoniotgleichung und Rayleigh-Gerade. Die allgemeine Hugoniotgleichung (6) beschreibt die Schockadiabate der Detonationsprodukte, welche sich im  $p$ - $v$ -Diagramm (Abb. 10) wieder findet [9].

$$e_1 - e_0 = \frac{1}{2} (p_1 + p_0)(v_0 - v_1) \quad (6)$$

Die Rayleigh-Gerade (7) mit der Steigung von  $-\rho_0^2 D^2$  verläuft proportional zur Stoßwellengeschwindigkeit [9].

$$p_1 - p_0 = (v_0 - v_1) \rho_0^2 D^2 \quad (7)$$

Der Punkt an dem sich Rayleigh-Gerade und Hugoniotgleichung tangieren gilt als CJ-Punkt (Abb. 10). Er beschreibt den Zustand der vollständig abgelaufenen chemischen Reaktion, in dem das chemische Gleichgewicht erfüllt ist [9].

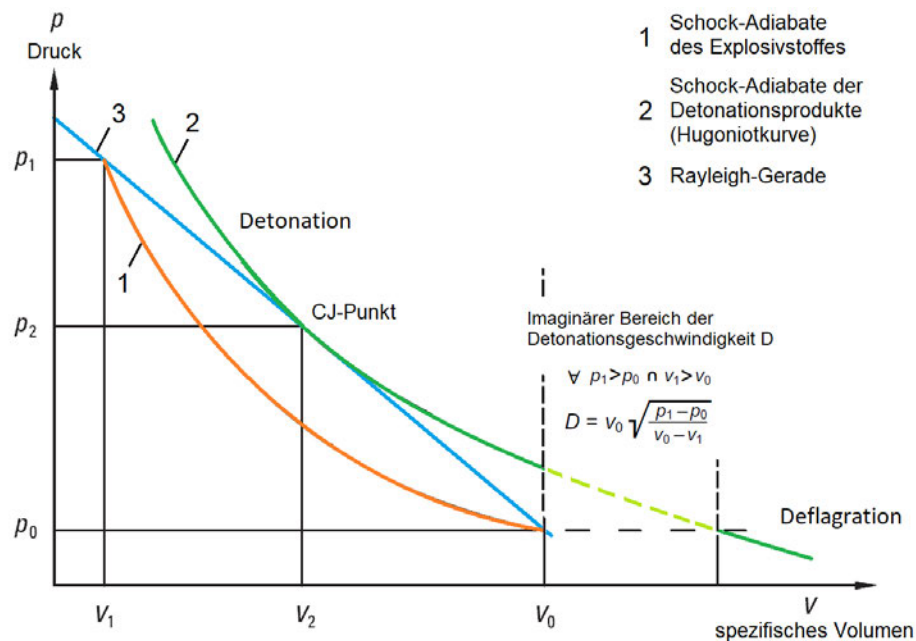


Abb. 10  $p$ - $v$ -Diagramm: Stoß-Adiabaten und Rayleigh-Gerade nach [8][9]

Eilt die Stoßwelle durch den Sprengstoff, so komprimiert sie eine dünne Schicht des unreaktierten Materials. Der Druck  $p_0$  des unreaktierten Materials ( $v_0 = \frac{1}{\rho_0}$ ) steigt durch die Verdichtung auf den Druck  $p_1$ , wodurch das spezifische Volumen abnimmt ( $v_1$ ). Das unreaktierte Material erwärmt sich. Durch die erhöhte Temperatur setzt der Sprengstoff in einer dünnen Schicht des unreaktierten Materials um. Die freigesetzte Energie der chemischen Reaktion komprimiert die nächste anliegende Schicht im Sprengstoff. Sind die Reaktionen abgeschlossen, ist das Ende der Reaktionszone erreicht und es liegt der nach Chapman und Jouguet geforderte Gleichgewichtszustand vor ( $v_2, p_2$ ). Durch den selbsterhaltenden Zustand der Stoßwellen breitet sich die Reaktionszone mit einer konstanten Geschwindigkeit aus [8].

Real breitet sich die Detonationsfront von ihrem Initiierungspunkt räumlich aus. Die Detonationsfront ist also gekrümmt. Der Einfluss nimmt mit Abstand zum Zündpunkt ab. Vergleichbar ist dieser Vorgang mit einem Tropfen, der beim Auftreffen auf Wasser konzentrisch auslaufende Kreise bildet. Die Radien werden dabei immer größer. Der Bereich, der von der Krümmung der Detonationsfront beeinflusst ist, wird als Anlaufstrecke bezeichnet. Die hydrodynamische Theorie lässt sich nicht auf diesen Bereich anwenden, da sie sich dem Modell einer ebenen Stoßwelle bedient. Zudem ist das Verhalten der Detonation innerhalb der Anlaufstrecke nicht stationär zu betrachten [17].

### 3 Messmethoden

In dieser Arbeit werden zwei Messverfahren angewendet, die beide auf derselben Methode basieren. Dazu werden diskrete Punkte mit einer Zeit-Registriervorrichtung gekoppelt, auch „Punkt-zu-Punkt-Methode“ genannt. In konstantem Abstand werden Punkte in Ausbreitungsrichtung der Detonationsfront auf der Sprengladung festgelegt. Diese Punkte werden nacheinander von der Detonationsfront durchschritten. Die Detonationsgeschwindigkeit errechnet sich aus der Zeit zwischen zwei Punkten, geteilt durch deren Längenabstand. Die Zeiterfassung variiert entsprechend der Messverfahren [13].

Darüber hinaus gibt es weitere Methoden, mit der sich die Detonationsgeschwindigkeit von Sprengstoffen bestimmen lassen. Vollständigkeitshalber sind hier einige erwähnt. Die Methode nach Dautriche bedient sich eines Vergleiches zu einer bereits bekannten Detonationsgeschwindigkeit. Beim foto-optischen Aufzeichnen wird durch die Auswertung von Bildmaterial die Detonationsgeschwindigkeit ermittelt. Die kontinuierliche Messmethode, misst stetig über den gesamten Verlauf der Detonation [2][13].

#### 3.1 Messverfahren mittels passiv optischer Fasern

Das Messverfahren des Messgeräts OPTIMEX 64 (Abb. 11) der Firma OZM Research wendet die Punkt-zu-Punkt-Methode an. Gemessen wird hier mit passiven optischen Fasern. Diese detektieren wann, die Reaktionsfront an den oben genannten diskreten Punkten vorüberzieht. Hierbei wird das Licht der Detonation detektiert. Die optischen Fasern aus Glas oder Kunststoff sind aus der Telekommunikation bekannt und übertragen Licht mittels des Prinzips der Totalreflexion (Abb. 13) über weite Entfernungen nahezu verlustfrei [10].



Abb. 11 Messgerät OPTIMEX 64 der Firma OZM Research

Das OPTIMEX verfügt über 4 Messkarten mit jeweils 8 Kanälen. Mit dem Gerät ist es möglich, sowohl mit Glas- als auch Kunststofffaser zu messen. Die Faser (Abb. 12) ist in koaxialen Schichten aufgebaut [10].

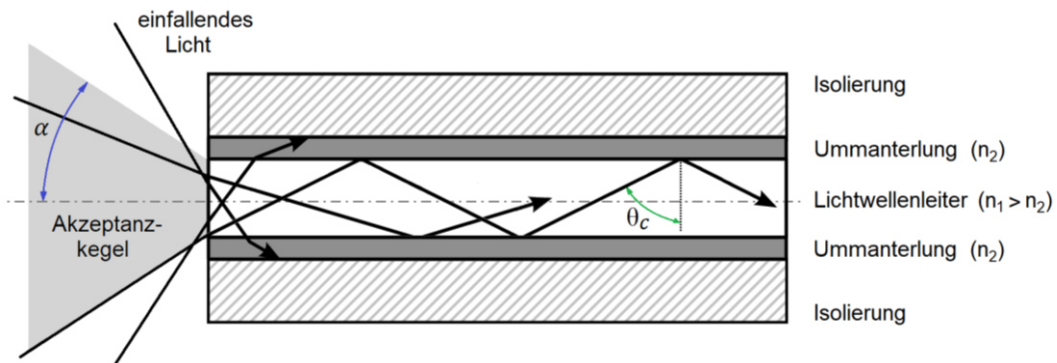


Abb. 12 Lichtimpulsübertragung in der Faser nach [10]

Im Inneren befindet sich der Lichtwellenleiter (Durchmesser: Glasfaser 50  $\mu\text{m}$ , Kunststofffaser 980  $\mu\text{m}$ ) mit dem Brechungsindex  $n_1$ . Auf diesen folgt eine dünne Ummantelung, die eine geringere Dichte aufweist, mit dem Brechungsindex  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ). Zum Schutz ist das Ganze in eine dicke Isolierung aus Polyethylen gebettet. Die Glasfaser hat dadurch einen Außendurchmesser von 1 mm und die Kunststofffaser 2,2 mm [13].

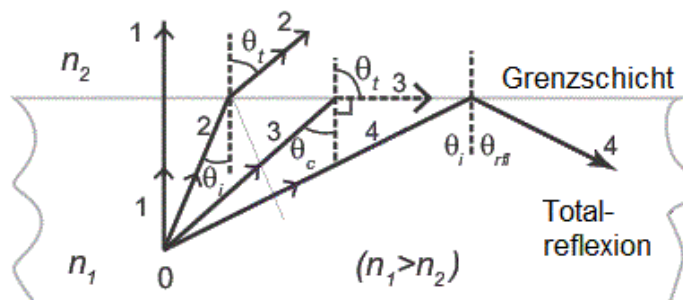


Abb. 13 Totale Reflexion am Phasenübergang nach [11]

Am Übergang der zwei Medien unterschiedlicher Dichte wird das auftreffende Licht in Abhängigkeit des Einfallswinkels nach dem snelliusschen Brechungsgesetz und dem Reflexionsgesetz in Teilen gebrochen und reflektiert (Abb. 13). Fällt der einfallende Lichtstrahl senkrecht auf die Grenzfläche so wird der ausfallende Lichtstrahl nicht gebrochen. Trifft das Licht unter einem Winkel auf die Grenzfläche wird der ausfallende Lichtstrahl gebrochen. Ein Teil des Lichts reflektiert an der Grenzfläche [1].

Für alle Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel  $\theta_c$  der Totalreflexion wird das Licht vollständig in das optisch dichtere Medium ( $n_1$ ) zurückreflektiert [1].

$$\text{Grenzwinkel} \quad \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (8)$$

Die numerische Apertur NA gibt den Zahlenwert der Öffnungsweite an, aus dem sich der halbe Öffnungswinkel  $\alpha$  berechnen lässt. Dazu wird der Brechungsindex  $n$  des umgebenden Mediums herangezogen (Glg. (9)). Für Luft ist der Brechungsindex  $n_{\text{Luft}}$  näherungsweise 1. Daraus ergibt sich für die Glasfaser der halbe Öffnungswinkel  $\alpha$  zu  $11,5^\circ$  ( $NA_{\text{GoF}} = 0,2$ ) und für die Kunststofffaser  $30^\circ$  ( $NA_{\text{PoF}} = 0,5$ ) (Glg. (9)). Unter diesem Winkel bildet sich der Akzeptanzkegel (Abb. 13) aus [1][11].

$$\text{Numerische Apertur} \quad NA = n \cdot \sin(\alpha) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (9)$$

Wie viel Licht von der Faser aufgenommen wird, ist abhängig von dem Öffnungswinkel und dem Durchmesser des Lichtwellenleiters. Die Totalreflexion ermöglicht es, Licht auf lange Entfernungen zu transportieren.

Hierbei stellen sich Verluste ein, sodass nicht nur weniger Licht ankommt, sondern die Signale zudem verzerrt werden. Die Beschaffenheit der Faser führt bereits zu intrinsischen Verlusten. Wenn Lichtphotonen mit dem Material der Faser interagieren, kann es zur Absorption kommen und die Energie aufgrund von Molekularresonanz in Form von Wärme abgegeben werden. Es kommt zu Dispersionsverlusten (Abb. 14), da abhängig von der Wellenlänge des Lichts Brechungsindex und Ausbreitungsgeschwindigkeit variieren, wodurch die Peaks im Signal breiter werden [11].

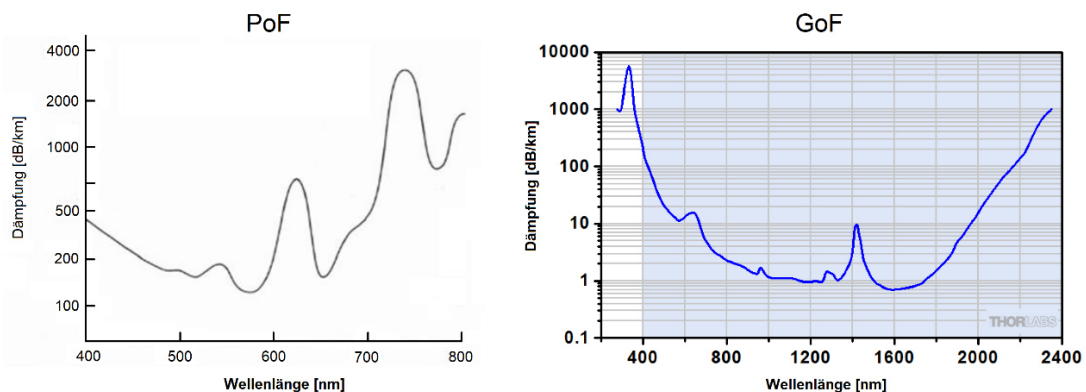


Abb. 14 Dispersionsverluste der optischen Fasern [10]

Diese Dämpfung ist abhängig von der Wellenlänge und ist bei der Kunststofffaser im Vergleich zur Glasfaser stärker ausgeprägt. Aus der Abbildung 14 lassen sich die genauen Verluste für das betrachtete Lichtspektrum der jeweiligen Faser ablesen [11]. Durch Inhomogenitäten im Material, wie unter anderem Verunreinigungen kommt es zu Streuverlusten [5].

Das Biegen der Faser führt dazu, dass das Licht in einem zu kleinen Winkel zum Lot in die Ummantelung eintrifft, wodurch das Licht - wie oben beschrieben - nur anteilig reflektiert wird oder gar komplett absorbiert wird. Steckerverluste entstehen beim Verbinden von Faserenden. Hier treten die Verluste an der Grenzfläche auf. Diese extrinsischen Verluste gelten für das Messverfahren als besonders ausschlaggebend. Da die Übertragungsstrecke sich meist nur auf wenige hundert Meter beläuft, sind die genannten intrinsischen Verluste zu vernachlässigen [10].

Bei der Detonation entsteht Licht (Abb. 15), das sich nach der zeitlichen Abfolge in primäres, sekundäres und tertiäres Licht unterteilen lässt und hierbei in seiner Intensität abnimmt [10].

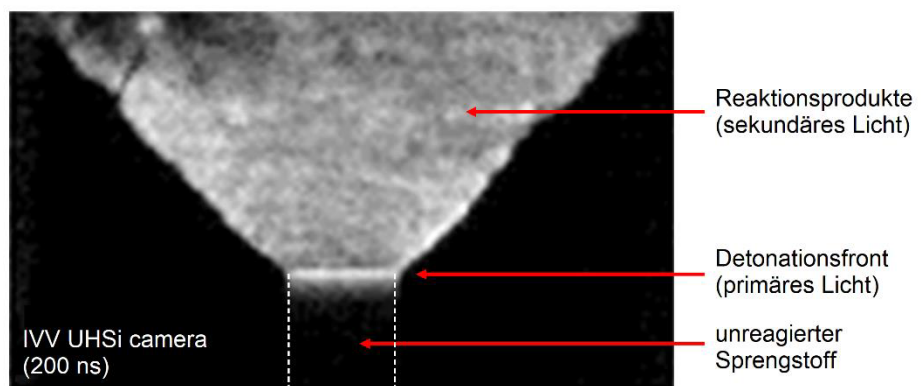


Abb. 15 High Speed Aufnahme - Eindringen der Stoßwelle in den Sprengstoff [10]

Das primäre Licht entsteht in der Stoßfront und wird als heller Detonationsblitz sichtbar: Die im Sprengstoff eingeschlossene Luft wird stark verdichtet, sobald sich der Sprengstoff in der Reaktionszone ausdehnt. Durch die adiabate Komprimierung der Luft steigt die Temperatur. Nimmt die Temperatur zu, werden die Teilchen im Molekül durch die Energiezufuhr zur Bewegung angeregt. Die Bewegung der Teilchen erzeugt elektromagnetische Wellen und es kommt zur Emission von Licht. Diese Lichtemission wird als thermische Strahlung bezeichnet. Wie in der Abbildung 15 zu sehen, scheint das Licht bereits in den unreaktierten Sprengstoff hinein. Abhängig von der



Sprengstoffzusammensetzung kann dieser lichtdurchlässig sein [10]. In der Reaktionszone herrschen hohe Temperaturen, sodass die thermische Strahlung als sekundäres Licht sichtbar wird. Die Reaktionsprodukte reagieren nach der Reaktionszone in Verbindung mit Sauerstoff, was ebenfalls Energie freisetzt und zur Lichtemission beiträgt. Dies wird als tertiäres Licht bezeichnet, es trägt jedoch nur geringfügig zur Lichtintensität bei. In Verbindung mit den optischen Fasern kann es zusätzlich zu Licht emittierenden Phänomenen kommen, die zur Verfälschung von Signalen führen können und als mögliche Fehlerquellen in der Faservorbereitung gelten. Liegt zwischen der optischen Faser und der Sprengladung ein Spalt vor, so kann es hier durch adiabate Kompression der Luft zur Emission von Licht kommen. Brechen Materialien wie Glas oder bestimmte Kunststoffe in der optischen Faser, kann es zur Selbst-Lumineszenz führen. Dieser Vorgang wird als Fracto-Lumineszenz bezeichnet. Darüber hinaus lassen sich die optischen Fasern durch die Wirkung der Stoßwelle ionisieren, was ebenfalls zu Lichterscheinungen führt [10].

Das Licht wird im analogen Front-End-Subsystem mittels einer Fotodiode detektiert (Abb. 16). Diese Fotodiode dient als optisch/elektrischer Wandler und konvertiert den eingehenden Lichtimpuls in ein analoges Signal. Anschließend läuft das Signal durch einen Verstärker und Tiefpassfilter [13].

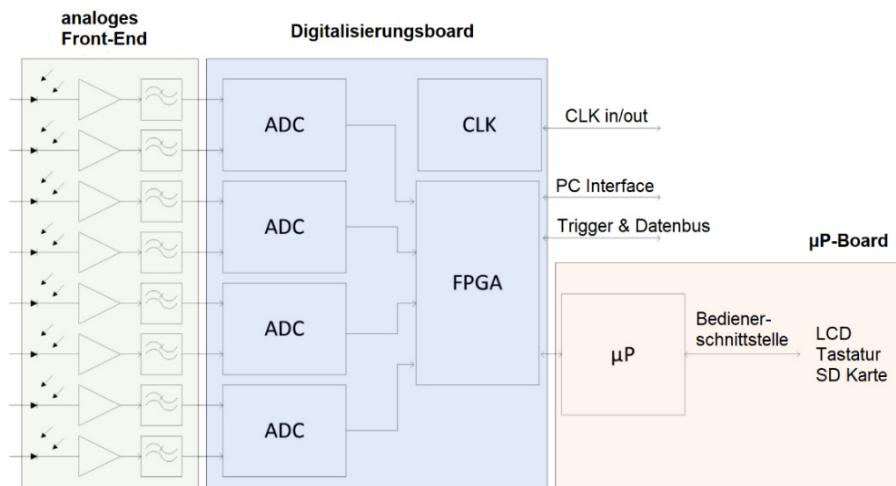


Abb. 16 Block-Schema des 8-Kanal Messsystem des OPTIMEXs [13]

Weiter wird das analoge Signal im Digitalisierungs-Subsystem durch einen Analog-Digital-Konverter (ADC) in ein digitales Signal gewandelt. Der ADC verfügt über eine Auflösung von 12 Bit ( $2^{12} = 4096$  Schritte). Die maximale Abtastrate beträgt 250 MHz, dies entspricht einem Zeitintervall von 4 ns.



Das digitale Signal wird im Subsystem auf einem programmierbaren Feld in Form einer Gatteranordnung (FPGA) gespeichert. Alle Messkarten können über die Taktgeber (CLK) sowohl unabhängig voneinander als auch gemeinsam auslösen. Eine mögliche zeitliche Differenz liegt bei unter 12 ns. Der Bediener kann über das Mikroprozessor-Subsystem mit dem Speicher interagieren [13].

Die Verwendung von optischen Fasern lässt eine Vielzahl an Freiheiten in der Probengeometrie zu, da die Abstände und Anordnung der Messpunkte frei wählbar sind. Die Fasern lassen sich auch flexibel auf nicht zwangsläufig planen Sprengladungen fixieren. Des Weiteren kann mit dem Verfahren nicht nur Detonationsgeschwindigkeiten aufnehmen. Der Messaufbau bietet hier vielseitige Möglichkeiten, wie beispielsweise die Messung der Krümmung einer Detonationsfront, was in dieser Arbeit allerdings nicht weiter betrachtet wird. Zudem bietet der Aufbau der Faser einen hervorragenden Witterungsschutz. Außerdem lässt sich sicher an den Faserenden Arbeiten, da dort keine Spannung anliegt und ist gegen elektromagnetische Störungen resistent. Anders als beim diskret elektrischen Messverfahren (Kap. 3.2) [10].

Im Umgang mit den Fasern ist im Allgemeinen darauf zu achten, nicht auf die Fasern zu treten, sie nicht stark zu biegen und kleine Biegeradien sind zu vermeiden. Die Glasfaser ist hier empfindlicher als die Kunststofffaser. Die Faservorbereitung unterscheidet sich von der Art der Faser. Die Kunststofffaser lässt sich zusätzlich so präparieren, dass eine vollwertige Messung der Detonationsgeschwindigkeit mit nur einer Faser abgebildet werden kann [10].

### 3.1.1 Glasfaser (GoF)

Die Glasfasern – „Glas optical Fibre“ (GoF) – sind zu je 8 Strängen in einem Kabel zusammengefasst. Das Glasfaserkabel wird vom Messgerät bis zur Sprengladung gezogen (Abb. 17). Die Fasern werden direkt auf die Sprengladung gesetzt.

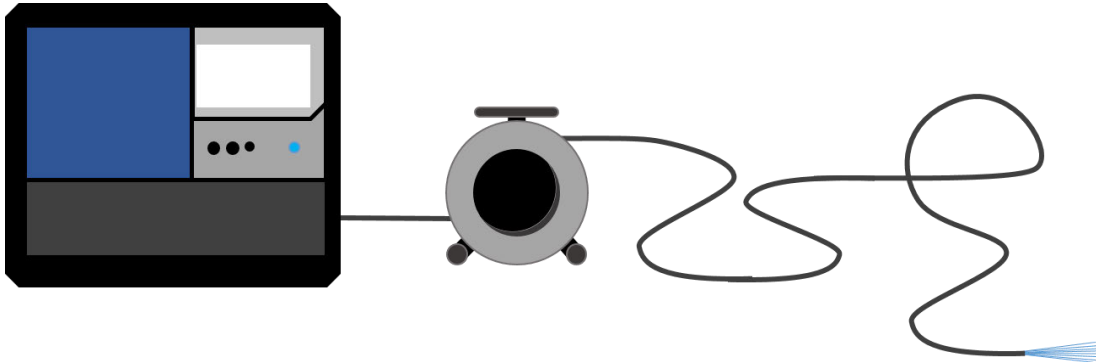


Abb. 17 Aufbau Messstrecke GoF

Zum Trennen der Glasfaser kann eine Keramik Klinge, ein Schneidgerät (Abb. 18) oder eine dafür vorgesehene Schere benutzt werden. Der Lichtwellenleiter soll möglichst bündig mit der Isolierung der Faser abschließen.

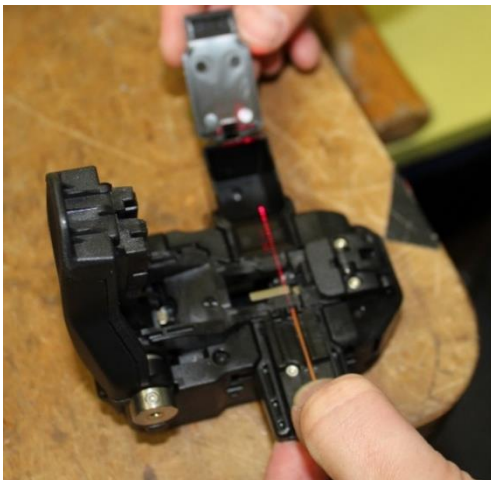


Abb. 18 Schneidgerät für GoF

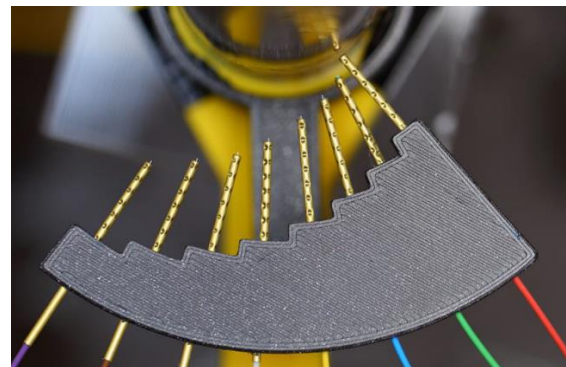


Abb. 19 GoF in Kupferhülse gefasst [10]

Für das Schneidgerät muss die Faser ca. 40 mm abisoliert werden, damit sie in der Vorrichtung plan aufliegen kann. Der ausgeführte Schnitt ist reproduzierbar. Für sehr präzise Anwendungen wird dieses Verfahren gewählt. Dabei wird im zweiten Schritt ein weiteres Stück der Isolierung abisoliert. Das Stück der Isolierung wird bis zum Ende des Lichtwellenleiters geschoben, sodass beide bündig abschließen. Der freigelegte Lichtwellenleiter (Abb. 19) wird im Anschluss mit einer Hülse abgedeckt [10]. Wird die Keramik genutzt, so reißt sie den kurz abisolierten Lichtwellenleiter an und lässt sich unter geringem Druck abbrechen.

Das Führen der Keramik ist hier entscheidend und benötigt Erfahrung, es ist jedoch möglich den Lichtwellenleiter nah an der Isolierung enden zu lassen. Wird die Faser mit der Schere getrennt, ohne diese vorher abzuisolieren, so schließen Isolierung und Lichtwellenleiter bündig ab. Das Quetschen der Schere birgt jedoch die Gefahr den Lichtwellenleiter zu beschädigen.

Um die Qualität des Schnitts beurteilen zu können, wird die Glasfaser mit dem Laser angeleuchtet und der austretenden Lichtkegel angeschaut. Der Lichtkegel sollte einen Punkt werfen, der rund, klein und klar zu erkennen ist. In keinem Fall aber sollte er streuen oder durch die Isolierung leuchten.

Die Glasfaser ist zu gleich Übertragungsstrecke als auch Verbrauchsfaser. Die einzige Steckerverbindung führt zum Messgerät (Abb. 17). Nach jedem Versuch wird das Kabel mit den beschädigten Fasern gekürzt und die Fasern neu präpariert. Für Folgeversuche kann im Vorfeld keine Faservorbereitung getroffen werden, dass lässt der Aufbau der Messstrecke nicht zu. Die Fasern können nur für den anstehenden Versuch präpariert werden.

### 3.1.2 Kunststofffaser (PoF)

Bei der Anwendung von Kunststofffaser – „Plastic optical Fibre“ (PoF) –, ist die Übertragungsstrecke (Abb. 20) in eine Verbrauchsfaser und ein gebündeltes Verlängerungskabel unterteilt. In beiden Teilen handelt es sich weiterhin um den gleichen Lichtwellenleiter. Die Länge der Verbrauchsfaser kann dem Versuch nach Bedarf angepasst werden. Die Verbrauchsfaser liegt meist im Kabel zu je 4 oder 8 Faser gebündelt vor. Die Länge der Verbrauchsfaser sollte im Hinblick auf die Übertragungsverluste und Handhabung der Fasern so kurz wie möglich gewählt werden.

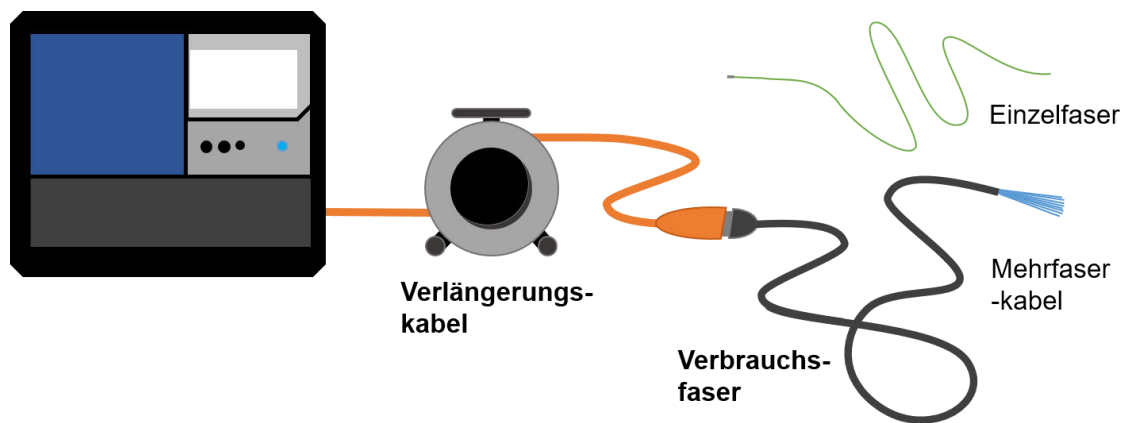
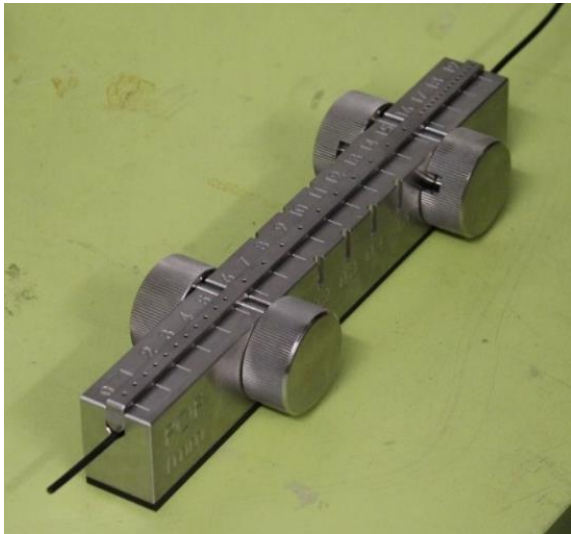


Abb. 20 Aufbau Messstrecke PoF

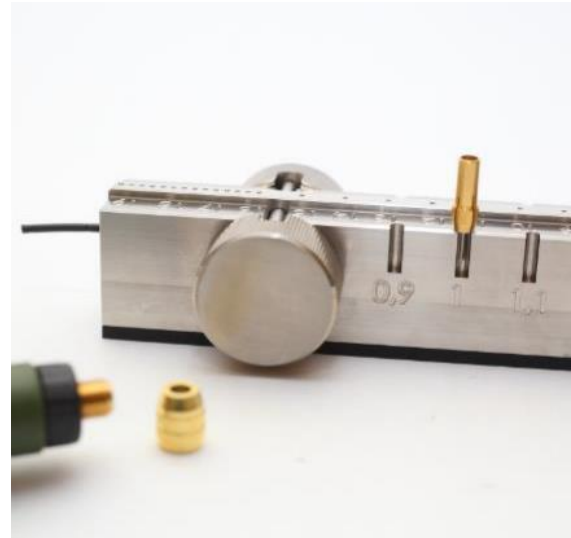
Verbrauchsfaser und Verlängerungskabel lassen sich mit einer Steckverbindung zusammenfügen. Es ist wichtig, alle Verbindungsstellen sorgfältig zu bearbeiten, da hier sowohl die größten, aber auch vermeidbarsten Verluste (Kap. 3.1) auftreten. Das Signal kann nur so gut übertragen werden, wie es die schlechteste Faserpräparation der Messstrecke zulässt. Die Faser wird ein Stück abisoliert und die Verbindungshülse aufgesteckt. Die Faser sollte dabei idealerweise kurz nach der Hülse enden. Dazu wird der Lichtwellenleiter entsprechend gekürzt und anschließend mit Schleifpapier bearbeitet. Beim Schneiden des Lichtwellenleiters mit der scharfen Klinge ist darauf zu achten, dass der Lichtwellenleiter nicht splittet. Dieser Vorgang ist mit jeder Verbrauchsfaser am Verbindungsende vorzunehmen. Anschließend wird die Faser mit einer Verbindungshülse versehen in den Stecker des Verlängerungskabels gesteckt. Der Vorteil dieser Übertragungsstrecke besteht darin, dass die wesentlich kürzeren Verbrauchsfasern für Versuchsreihen im Voraus vorbereitet werden können; dies ist bei der Glasfaser (Kap. 1.1.1) nicht möglich. Eine Verbindungsstelle bedeutet aber auch mehr Verluste.

### 3.1.3 Perforierte Faser (PFP)

Für die perforierten Fasern – „Perforated Fibre Probe“ (PFP) – werden die in Kapitel 3.1.2 genannten Kunststofffasern verwendet. Das Perforieren der Faser erfolgt mittels einer Bohrschablone (Abb. 21 I). Diese Schablone besteht aus zwei Teilen, zwischen denen die Faser geklemmt wird. Der Deckel verfügt über Bohrungen in verschiedenen Abständen, in denen der Bohrer (Durchmesser 0,4 mm) geführt wird. Nachträgliches setzen von Bohrungen im definierten Abstand ist nicht möglich [10].



I



II



III



IV

Abb. 21 Vorgehen mit der Bohrschablone für Faserpräparation PFP [12]

Auf dem Schablonenbett (Abb. 21 II) sind Nuten eingelassen, um den Bohrer entsprechend der gewünschten Bohrtiefe einzustellen. Für zwei verschiedene Faserdurchmesser werden auf dem Schablonenbett Bohrtiefen in Abstufung bis zur Lichtwellenleitermitte vorgeschlagen. Nach der Wahl der Bohrtiefe für den richtigen Faserdurchmesser wird die Faser bis in den Lichtwellenleiter angebohrt (Abb. 21 III). So kann das später einfallende Licht in den Lichtwellenleiter eindringen und übertragen werden. Zur Überprüfung lässt sich der Lichtwellenleiter frontal mit einem Laser anleuchten. Wenn das Licht sichtbar aus der Bohrung austritt, ist die Bohrung korrekt erfolgt. Der Bohrer lässt sich reinigen (Abb. 21 IV), indem leicht in ein Stück Holz gebohrt wird. So lassen sich Kunststoffreste von den Schneiden entfernen. In der Anwendung ist darauf zu achten, dass die Löcher der perforierten Faser zum Sprengstoff zeigen [12].

### 3.2 Diskretes elektrisches Messverfahren

Das bei der Rheinmetall Waffe und Munition etablierte Messverfahren zur Messung von Detonationsgeschwindigkeiten ist das diskrete elektrische Messverfahren. Das Verfahren wird intern – nach der Marke des Oszilloskops – „LeCroy“ benannt. Der Aufbau ist eine Abwandlung der Detonationsgeschwindigkeit mittels Sonden [2]. Der Nachteil an der Messung mittels Sonden ist, dass es bei der Installation ein hohes Maß an Geschicklichkeit bedarf [18].

Bei diesem Verfahren wird ein Messstreifen der Firma LFG – Leiterplatten, Feinmechanik & Geräte Eckhard Oertel e.K. – eingesetzt. Der vorgefertigte Messstreifen (Abb. 22) ist 500 mm lang und 50 mm breit.



*Abb. 22 Schematische Darstellung des Messstreifens*

Die Messpunkte befinden sich an den jeweiligen Enden der gelben Leiterbahnen. Auf dem Messstreifen sind fünf ca. 10 mm breite Messpunkte im Abstand von 60 mm angebracht. Daraus ergibt sich eine feste Messlänge von 240 mm [15]. Am linken Ende des dargestellten Messstreifens (Abb. 22) gehen angelötete Leitungen zum Messsystem ab. Die Auflagefläche der Sprengladung muss plan sein, um bündig mit dem flachen Messstreifen abzuschließen zu können. Daraus ergeben sich einige Einschränkungen in der Probengeometrie.

Hier eignen sich besonders flache Proben. Zylindrische Proben müssen hierfür angefräst werden, um eine plane Anschlussebene zu schaffen. Zudem sind die Abstände der Messpunkte im Messstreifen fest vorgegeben, daraus resultiert eine Mindestlänge der Probe.

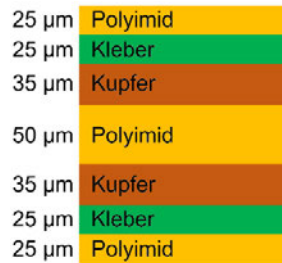


Abb. 23 Messstreifen Lagenaufbau [15]

Der Messstreifen besteht aus zwei übereinanderliegenden, isolierten Kupferschichten (Abb. 23). Die Detonationsfront legt die voneinander getrennten Kupferschichten frei, die ionisierte Luft lässt elektrischen Strom fließen und es kommt zu einem Kurzschluss. Der Kurzschluss wird über die gesamte Messung hinweg aufrechterhalten. Demnach kann es zu keinen weiteren Störungen des Messsignals kommen [18].

Das System basiert auf den in Abbildung 24 gezeigten Stromkreis. Zunächst laden sich die Kondensatoren auf, sodass kein Strom mehr fließt [18].

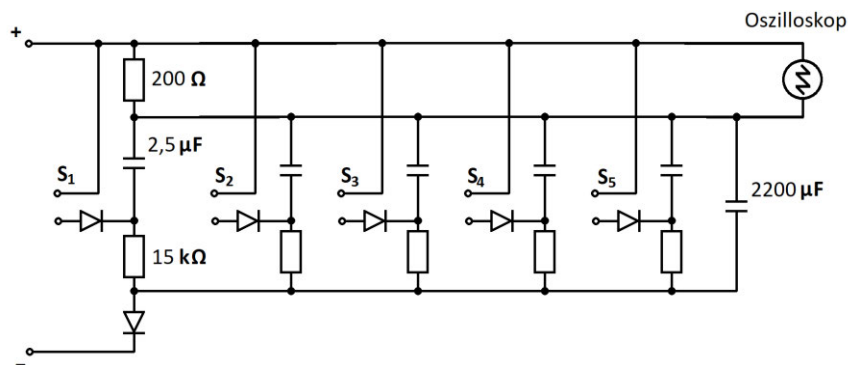


Abb. 24 Schaltkreis Messsystem LeCroy nach [18]

Die Schalter S in der Abbildung 24 entsprechen der Wirkungsweise der Messpunkte auf dem Messstreifen. Werden diese geschlossen, entsteht ein Kurzschluss. Kurz fließt Strom über die Diode ab, es kommt zum Spannungsabfall und der angrenzende Kondensator entlädt sich. Eine kurze Spannungsänderung ist daraufhin am Oszilloskop festzustellen. Der Kondensator wird zügig wieder aufgeladen. Dieser Vorgang wiederholt sich an allen Messpunkten [18].



Die Auswertung der aufgenommenen Zeitintervalle findet direkt am Oszilloskop statt (Abb. 25). Im Anschluss werden die Zeiten mit der Position des Messpunkts auf dem Messstreifen verrechnet [18].

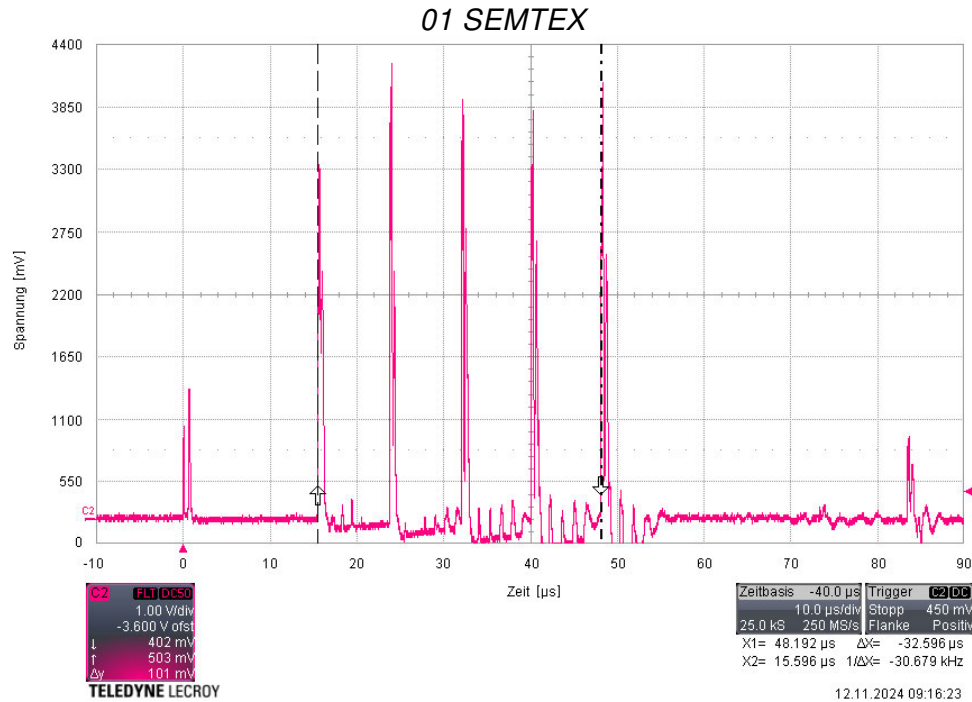


Abb. 25 Graph – Oszilloskop LeCroy Messung 01 SEMTEX

Auf dem Oszilloskop sind 7 Peaks zu sehen. Auszuwerten gilt es die 5 Peaks, die erkennbar im zeitlich gleichen Abstand aufgenommen wurden. Diese Werte lassen sich klar den Messpunkten auf dem Messstreifen zuordnen. Der erste und der letzte Peak dieser Aufzeichnung sind schwächer und stehen nicht im Zusammenhang mit den Messpunkten (systemischer Fehler). Die Zeiten werden anhand des Graphen abgelesen. Der Anfangspunkt jeder Messung ist der Flankenanstieg des ersten Peaks, um den Fehler des Längeneinflusses zu minimieren. Es wird die Zeit vom Flankenanstieg des jeweiligen Peaks zu diesem Referenzpunkt (Position 1 in Tabelle 2) gemessen [18].

Tabelle 1 Auswertung 01 SEMTEX LeCroy [Anlage 1]

Nr.	$t_0$ [µs]	$t_1$ [µs]	$t_2$ [µs]	$t_3$ [µs]	$t_4$ [µs]	$V_{Det1}$ [m/s]	$V_{Det2}$ [m/s]	$V_{Det3}$ [m/s]	$V_{Det4}$ [m/s]	Mittelwert [m/s]
01	0	8,224	16,480	24,548	32,596	7314,0	7290,7	7338,7	7366,9	7328

Zudem dient der erste Wert bei der Auswertung als Referenzwert der Spannung, bei dem der nächste Messpunkt ausgewertet wird. Dieser Spannungswert lässt sich meist nicht exakt auf dem Flankenanstieg des nächsten Messpunkts wiederfinden.



Der daraus resultierende Messfehler beläuft sich auf  $\pm 0,002 \mu\text{s}$ . Aus den vier ermittelten Zeiten in Tabelle 1 lassen sich mit der Messposition aus Tabelle 2 vier Detonationsgeschwindigkeiten (Tabelle 1) berechnen, über die gemittelt wird. Durch den genannten Messfehler kommt es zu einer Abweichung von ca.  $\pm 1 \text{ m/s}$ , was vernachlässigt werden kann. Besonders hervorzuheben ist, dass die Messpositionen mit einer Genauigkeit von  $10 \mu\text{m}$  gefertigt sind [15].

*Tabelle 2 Messpositionen des Messstreifens (LeCroy) [Anlage 1]*

Messposition	Nr.	1	2	3	4	5
	[mm]	0	60,15	120,15	180,15	240,13

Die Messpunkte weisen zudem eine gewisse Breite auf (s.o.). Über diese Messbreite wird die Inhomogenität des Sprengstoffs gemittelt, welche gegebenenfalls zu unregelmäßigen Detonationsgeschwindigkeiten führt [18].

## 4 Versuche

Die im Folgenden beschriebenen Versuche dienen dazu, die genannten Verfahren miteinander zu vergleichen. Das Ermitteln der Detonationsgeschwindigkeit mittels des LeCroy-Verfahrens (Kap. 3.2) hat sich in der Firma bereits etabliert. Die Ergebnisse gelten als gesichert und dienen als Vergleichsmessung. Das Messgerät OPTIMEX mit dem optischen Verfahren wird neu eingeführt. Es wird mit der Glasfaser (GoF) (Kap. 1.1.1), Kunststofffaser (PoF) (Kap. 3.1.2) sowie dem Verfahren der perforierten Faser (PFP) (Kap. 3.1.3) gemessen.

### 4.1 Versuchsaufbau

In sämtlichen durchgeführten Versuchen wird SEMTEX SE 10 als 4 mm dicker Folie als Versuchsträger genutzt. Die SEMTEX-Folie liegt gemäß der Arbeitsanweisung [16] mit dem Messstreifen auf einem stabilisierenden Blech (50 mm x 400 mm). Auf der SEMTEX-Folie ist eine 3D aus Polystyrol-Acrylnitril (PSA) gedruckte Schiene aufgebracht (Abb. 26). In die Schiene werden je acht Kunststoff- und Glasfasern gesteckt. Die Fasern in der Schiene zeigen orthogonal zur Abbrandrichtung. Die PFP ist mittig zwischen zwei Streifen der 4 mm dicken SEMTEX-Folien eingebettet.

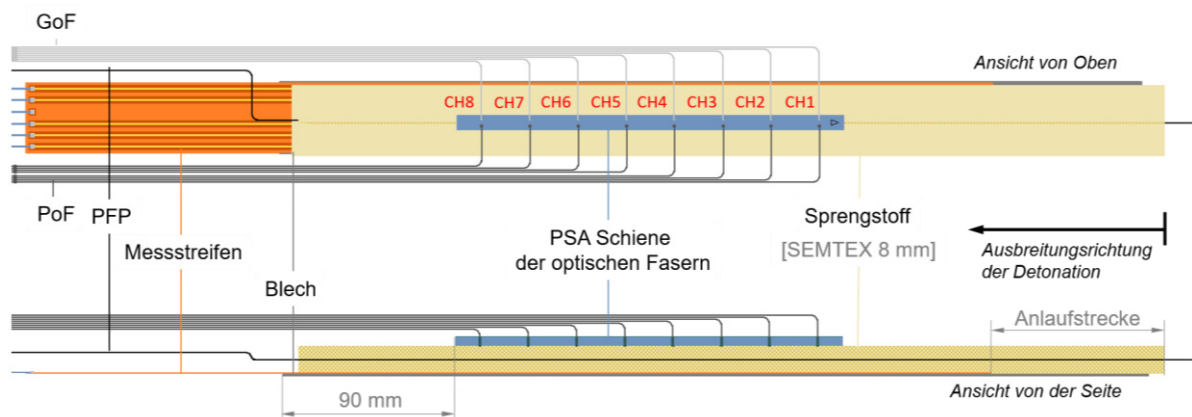


Abb. 26 Versuchsaufbau: SEMTEX 8 mm PFP eingebettet – Versuche (04-11)

Die Positionen der Fasern sind im gleichen Abstand gewählt, wie die Bohrungen in der perforierten Faser, um die Ergebnisse vergleichbarer zu machen. Dabei sollte der Messbereich der PSA-Schiene dem Messbereich des Messstreifens ähneln. Die limitierenden Faktoren des Messbereichs sind hierbei die Länge und die Bohrabstände der Bohrschablone (Abb. 21 I) für die Probenvorbereitung der perforierten Fasern.

Für acht Bohrungen im konstanten Abstand lässt sich eine maximale Weite von 20 mm einstellen. So kann nur eine Messlänge von 140 mm abgedeckt werden (Abb. 27). Zum Vergleich: Der Messbereich von LeCroy beträgt 240 mm mit fünf Messsonden à 60 mm im Abstand (Kap. 3.2).



Abb. 27 Ansicht NX – 3D gedruckte PSA-Schiene für PoF und GoF

Die in Abbildung 27 abgebildete PSA-Schiene ist für die Glas- und Kunststofffaser mit jeweils acht Bohrungen im Abstand von 20 mm versehen. Die Schiene ragt an beiden Enden 10 mm über die letzte Bohrung hinaus. Die 8 mm hohe Schiene sorgt für einen festen Sitz der Fasern, sodass diese ihre Ausrichtung zum Sprengstoff behalten. Die PSA-Schiene ist so zum Messstreifen (LeCroy) ausgerichtet, dass sich die Messlängen beider Messverfahren überdecken und die optischen Fasern zentrisch zur Messlänge von LeCroy liegen. Um eine Verfälschung der Messdaten durch das Vorlicht (Kap. 3.1) zu verhindern, wird vom Messgerätehersteller OZM empfohlen, die Fasern mit Aluminiumfolie abzukleben. Deshalb wird die PSA-Schiene mit einem dünnen Aluminiumband von der Unterseite zugeklebt [13].

Für die PFP wird die Kunststofffaser mit dem Außendurchmesser von 2,2 mm, verwendet. Diese wird mit der geringsten einstellbaren Bohrtiefe von 0,9 mm angebohrt. Daraus ergibt sich, dass um 290 µm in den Lichtwellenleiter hineingebohrt wird. Zusätzlich wird im sechsten Versuch eine PFP mit der Bohrtiefe von 1,1 mm in die Sprengladung gelegt.

In Summe wird mit vier Verfahren (inklusive LeCroy) die Detonationsgeschwindigkeit an jeder Sprengladung ermittelt. Am OPTIMEX wird jedes Verfahren auf einer gesonderten Karte im Modus „VOD“ gemessen: Karte 1 – GoF (8 Kanäle); Karte 3 – PoF (8 Kanäle); Karte 5 – PFP (1 Kanal). Für die Messungen der GoF und PoF werden nach Auswahl des Modus „VOD“ die Positionen der einzelnen Messpunkte für jeden Kanal eingegeben – von Kanal 1 beginnend mit 0 mm bis Kanal 8 mit 140 mm in 20 mm Schritten. Die Messung der PFP erfolgt, indem der Kanal-Typ von „Normal“ auf „PFP“ geändert wird. Die Anzahl der Bohrungen, sowie ihr Abstand zueinander werden angegeben. Alle vorgenommenen Einstellungen sind mit „Save“ zu bestätigen.

Das Gerät löst aus, wenn eine der aktiven Karten 1% der maximalen Auflösung überschreitet. Es werden immer 131.072 Messwerte gespeichert. Mit dem „Pretrigger“ wird festgelegt, wie viele Daten vor dem Auslösen der Karte in den Speicher geschrieben werden. Bei einem „Pretrigger“ von 10% sind das 13.107 Messwerte, die vor dem Auslösen der Karte gespeichert werden. Für die Abtastrate von 250MHz ( $\Delta t = 4 \text{ ns} = 0,004 \mu\text{s}$ ) (Kap. 3.1) ergibt sich daraus eine Vorlaufzeit von 52,43  $\mu\text{s}$ .

## 4.2 Versuchsdurchführung

Die SEMTEX-Folien werden auf die Größe des Blechs zugeschnitten. Auf dem Blech wird zunächst der Messstreifen für LeCroy platziert. Anschließend wird die SEMTEX-Folie darübergelegt. Es ist darauf zu achten, die Anlaufstrecke (Abb. 26) von 90 mm einzuhalten. Die SEMTEX-Folie darf frühestens 30 mm nach dem letzten Messpunkt des Messstreifens enden. Die Folie überlappt das Blech leicht am Kopfende. Hier wird das rosafarbene, formbare PETN angebracht, in dem die Sprengkapsel sitzt. Darüber wird der Sprengstoff gezündet [16].

Die ersten drei Versuche werden mit nur einer Lage SEMTEX-Folie durchgeführt. Auf der Folie wird die PSA-Schiene – wie in Kapitel 4.1 beschrieben – aufgesetzt, woraus sich für die folgenden Versuche das Maß von 90 mm zur unteren Blechkante ergibt (Abb. 26). Die PFP findet seitlich, längs der Schiene Platz und ist damit außermittig (Abb. 28). In den folgenden zwei Versuchen wird die PFP unter der SEMTEX-Folie platziert.

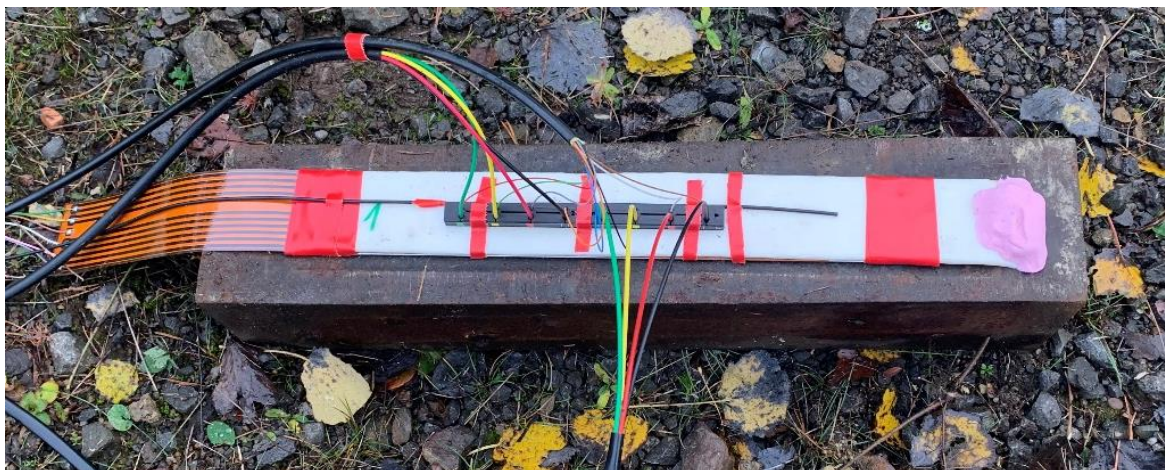


Abb. 28 Versuchsaufbau 01

Hervorzuheben ist, dass die PFP (Schwarze Faser - Abb. 28) der Versuche 01-03 auf derselben Kunststofffaser gebohrt sind. Zwischen den gebohrten Messlängen von 140 mm liegt jeweils ein Abstand von 1,5 m. Die vorgebohrten Bohrungen werden mit Klebeband abgeklebt. Unmittelbar vor dem Versuch werden die Bohrungen freigelegt und die Faser auf, beziehungsweise unter den Sprengstoff gelegt.

Durch die verschiedenen Versuchstage fließt bereits Wissen aus den ersten drei Versuchen bei der Durchführung der weiteren Versuche ein. Die Messungen mit der PFP der Versuche 04-11 werden daher mit jeweils einer Faser pro Versuch durchgeführt, auf denen nur Bohrungen für den jeweiligen Versuch sind. Um sicherzugehen, dass die Bohrungen zum Sprengstoff zeigen, wird die PFP in den Versuchen 04-11 zwischen zwei SEMTEX-Folien gelegt.

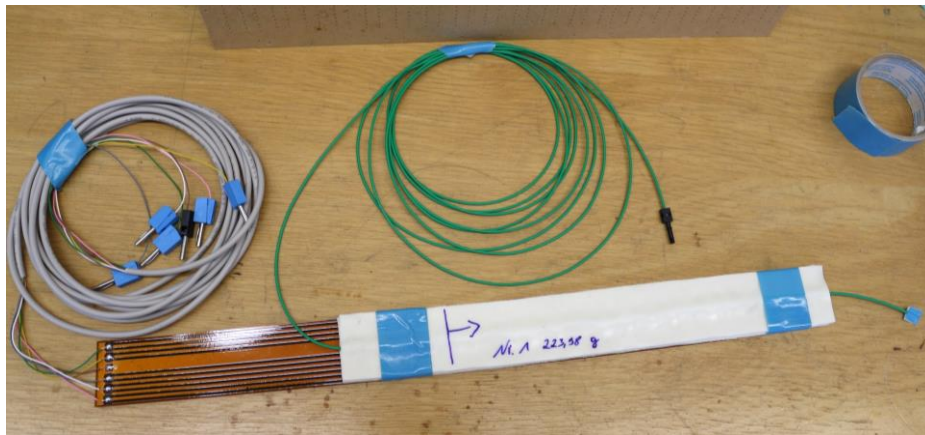


Abb. 29 Probenvorbereitung Versuch 04 SEMTEX

Für die Versuche 04-11 wird die PFP (Grüne Faser - Abb. 29) mittig auf die erste Folie Sprengstoff gelegt. Der Abstand zum unteren Blechende ist so gewählt, dass die Bohrungen der PSA-Schiene auf die gleiche Stelle im Sprengstoff gerichtet sind, wie die Bohrungen der PFP. Durch den Versatz im Blech zur SEMTEX-Folie und dem ersten Messpunkt der Schiene ergeben sich hier 90 mm von der unteren Folienkante. Das Ende der PFP ragt bis über die SEMTEX-Folie hinaus, so lässt sich die Faser genauer ausrichten (Abb. 29). Um das Verdrehen der Faser zu verhindern, wird diese leicht angedrückt. Die zweite SEMTEX-Folie wird auf die untere Folie aufgelegt und ebenfalls angedrückt, so dass beide Folien übereinanderliegen. Mit einem Stift wird auf der Folie markiert, an welche Stelle die PSA-Schiene platziert wird (Abb. 30).



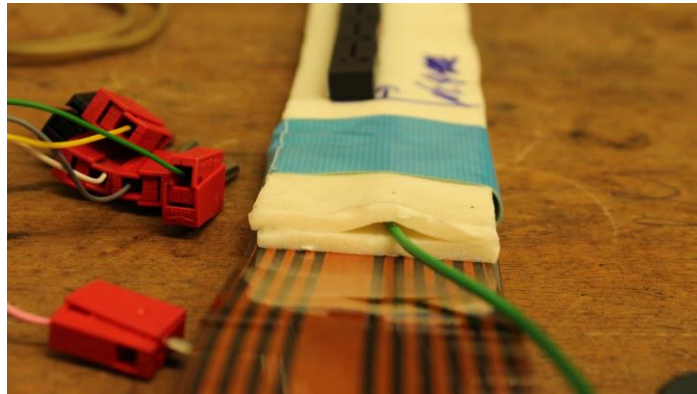


Abb. 30 Einbettung der PFP in zwei SEMTEX-Folien Versuche 04-11

Die Schiene wird auf die SEMTEX-Folie gesetzt. Anders als gefordert, kann die PSA-Schiene nur außermittig plan aufliegen, da die PFP eine Erhebung im Sprengstoff verursacht (Abb. 30). Der SEMTEX und die PSA-Schiene sind auf dem Blech mit Klebeband fixiert, um beim Transport nicht zu verrutschen.

Die PSA-Schiene ist dem Durchmesser der Faser angepasst und stellt sicher, dass sie sich an ihrer Messposition befinden. Das genutzte Filament der Schienen unterscheidet sich geringfügig zwischen den Versuchen, es handelt sich weiterhin um PSA. Der Bohrungsdurchmesser für die GoF wird nach Kenntnissen der ersten Versuche angepasst von 1,5 mm auf 1,38 mm (Tabelle 3). Die Toleranz des 3D-Druckers führt bei diesem geringen Durchmesser dazu, dass die Druckerzeugnisse nicht reproduzierbar sind. Es werden daher nur zwei Schienen mit dem Durchmesser von 1,38 mm für die Glasfasern verwendet. Allgemein kann es schnell passieren, dass die Glasfaser bricht. Gerade, wenn die Faser mit der Schiene verbunden wird, kann es bei einer zu kleinen Bohrung zum Knicken der Faser und Bruch des Lichtwellenleiters kommen.

Die Schienen sind von unten mit selbstklebenden Aluminiumband beklebt. Die Fasern werden soweit durch die Bohrungen mit der Schiene verbunden, bis sie an dem Aluminiumband aufliegen. Diese darf nicht durchstoßen werden. Zu prüfen, ob das Aluminiumband von den Fasern durchstoßen wird, gestaltet sich in der Umsetzung als schwierig. Die Fasern verrutschen beim Drehen der Schiene. Die gesamte Unterseite der Schiene mit angeschlossenen Fasern kann schlussendlich nicht begutachtet werden.

Tabelle 3 Gesamtübersicht zur Versuchsdurchführung aller Versuche

Aufbau →				2 x SEMTEX 4 mm							
	SEMTEX 4 mm										
Versuche →	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Verfahren ↓	----- Messpunkte Schiene und PFP Bohrungen 8 x 20 mm -----										
	Schiene – Material 1			Schiene – Material 2							
GoF	Bohrungen in Schiene Ø 1,5 mm			B. i.S. Ø 1,38 mm		Bohrungen in Schiene Ø 1,5 mm					
	Lichtkegel geprüft			Lichtkegel geprüft							
	Keramik	Schneidwerkzeug		Keramik					Schere		
PoF	----- Bohrungen in Schiene Ø 2,5 mm -----										
	2 x Kabel à 4 Fasern			1 x Kabel à 8 Fasern							
	geschliffen	geschnitten		geschliffen							
PFP	Mehrere Versuche auf einer Faser vorgebohrt			Eine Faser pro Versuch							
	Oben	Unten		Mitte - Eingebettet							
	----- Bohrungen Ø 0,4 mm / Bohrtiefe 0,9 mm -----										
						+ 1,1 mm					
LeCroy	----- Vergleichsmessung: Messpunkte 5 x 60 mm -----										

Alle Fasern werden im freien auf dem Versuchsgelände vorbereitet, ausgenommen der Faser des jeweils ersten Versuchs der Versuchstage (Versuch 01 und Versuch 04), sowie die Vorbereitung der PFPs.

Die GoF wird, wie aus der Tabelle 3 zu entnehmen ist, in den Versuchen 02 und 03 mit dem Schneidgerät getrennt, jedoch nicht wie in Abbildung 18 gezeigt. Es wird versucht, den Lichtwellenleiter möglichst nah an der Isolierung zu trennen. Die Faser liegt dadurch nicht wie vorgesehen plan im Schneidwerkzeug auf (Kap. 1.1.1). Der Lichtkegel der Glasfaser wurde in beiden Versuchen nicht geprüft. Das Schneiden der GoF mit der Keramik ist aufwendig, da keine Routine vorhanden ist. Es ist eine feste Unterlage notwendig, auf der die Faser aufgelegt werden kann. In den Versuchen 08-11 werden die Fasern wie zuvor beschrieben mit der Schere geschnitten. Es hat sich herausgestellt, dass nach dem Anschnitt Licht leicht durch die Isolierung tritt. Wird die Faser nun ein minimales Stück abisoliert, sodass der Lichtwellenleiter zum Vorschein kommt, projiziert der Lichtkegel einen runden und klar zu erkennenden Punkt (Kap. 1.1.1). Ist die Faser geschnitten, wird der sich ausbreitende Lichtkegel geprüft. Wenn der projiziert Punkt für gut befunden wird (Kap. 1.1.1), kann mit der nächsten Faser fortgefahren werden. Um zu vermeiden, dass die Fasern beim Hantieren beschädigt werden, wird jede Faser nach der Bearbeitung direkt in die Schiene gesteckt. Fehlerhafte Schnitte können dazu führen, dass die Fasern letztendlich unterschiedlich lang aus dem Kabel hervorstehen. Das Gewicht des Kabels zieht an den Fasern.

An kurzen Fasern kann es passieren, dass diese stärker belastet werden und unter der erhöhten Kraft herausgezogen werden. Um die Fasern zu entlasten, wird das Kabel der GoF an dem dickeren Kabel der PoF festgemacht, nachdem die Fasern in der Schiene stecken.

Bei der PoF gilt es, einen einfachen Schnitt mit einer scharfen Klinge durchzuführen. Dazu wird eine Unterlage benötigt. Geschnitten wird mit einem normalen Cuttermesser. Um die Klinge zu schonen, wird in den Versuchen 04-11 statt auf einer Metallunterlage auf Holz geschnitten; dennoch wird die Klinge nach einigen Schnitten merklich stumpfer. Es ist demnach wichtig darauf zu achten, die Klinge nach einigen Schnitten zu ersetzen. Die Schnittfläche sollte gerade sein und kein Absplintern der Faser erkennen lassen. Anschließend werden die Fasern mit Schleifpapier geschliffen. Der Tabelle 3 ist zu entnehmen, auf welche Versuche das zutrifft. Der Lichtwellenleiter endet zusammen mit der Isolierung, deshalb wird beim Schleifen auch die Isolierung mitgenommen und schmiert auf dem Schleifpapier, daher ist das Schleifpapier häufiger zu wechseln.

In den Versuchen 01-03 handelt es sich bei den Verbrauchskabeln um zwei Kabel mit jeweils vier Fasern, wohingegen bei den Versuchen 04-11 ein Kabel mit acht Fasern verwendet wird. Die Steckverbindungen der Übertragungsstrecke zwischen dem Verlängerungs- und Verbrauchskabel werden neu präpariert und unterscheiden sich von den vorigen Versuchen (Kap. 3.1.2). Beim Aufbauen auf dem Versuchsgelände hat sich die Variante mit nur einem Kabel (je 8 Fasern) als besser herausgestellt, da in der Anzahl weniger Kabel verlegt werden müssen und alle Fasern farblich zu unterscheiden sind.

Sobald alle Fasern in der PSA-Schiene stecken, ist der Aufbau abgeschlossen. Die Sprengkapsel kann an der Sprengladung angebracht werden und wird zum Zünden vorbereitet. Die Messbereitschaft wird am Messgerät mit dem Drücken des „Arm“-Feld hergestellt. Die Messbereitschaft ist hergestellt, sobald alle aktiven Messkarten den Status „Armed“ anzeigen.



## 5 Auswertung

Die Auswertung der Messwerte soll möglichst bedienerfreundlich sein. Ziel ist es, ein standardisiertes Verfahren zur Auswertung zu definieren. Die Auswertung kann direkt am Messgerät selbst erfolgen und in einem Auswertungsbericht ausgegeben werden. Zusätzlich lassen sich die Rohdaten für eine eigenständige Auswertung exportieren. Für die Auswertung wird das Programm Excel gewählt, da diese Software auf den Firmenrechnern zur Verfügung steht und die Anwendung für Außenstehende keiner langwierigen Einarbeitung bedarf. Der Zugang ist dementsprechend niederschwellig und bietet hierdurch einem breiteren Personenkreis die Möglichkeit, selbstständig Messungen auswerten zu lassen.

### 5.1 Aufbereitung der CSV-Daten

Das Messgerät – OPTIMEX – gibt die Rohdaten im CSV-Format aus. Für die eigene Auswertung können diese mit Excel ausgelesen werden. Die aufgenommenen Messzeiten beginnen wider Erwarten bei null, die Vorlaufzeit muss selbst über die Angaben zum „Pretrigger“ ermittelt werden. Der Punkt, an dem die Messkarte auslöst, beträgt 52,43  $\mu\text{s}$  (Kap. 4.1). Der Nullpunkt der Zeitskala wird daher an diese Stelle verschoben. Diese Darstellung entspricht der Ausgabe am OPTIMEX selbst und zeigt den Beginn des, für die Auswertung relevanten, Bereichs an. Die Daten der einzelnen Kanäle nehmen einheitenlose, ganzzahlige Werte von 0 bis 4095 an, dass entspricht der Auflösung von 12 Bit (Kap. 3.1). Weiter werden die Messwerte auf den maximalen Wert von 4095 normiert, daraus lässt sich eine relative Intensität des Signals ableiten. Im Weiteren wird nur noch von der Intensität gesprochen. Diese Skalierung der Messwerte gilt wird als absolut bezeichnet.

### 5.2 Bewertung der Signale

Dem Messverfahren aus Kapitel 3.1 zufolge, löst in der Anordnung der GoF und PoF jede Faser einen Ausschlag im Messsignal aus, wenn das Licht der Detonationsfront auf die Faser trifft. Dasselbe gilt für die Bohrungen der PFP. Der Unterschied besteht darin, dass nur mit einem Messkanal gemessen wird. Das primäre Licht in der Detonationsfront hat die höchste Intensität (Abb. 15). Zu dem Zeitpunkt, an dem die Detonationsfront vorbeizieht, ist demnach der größte Ausschlag im Messsignal zu erwarten.

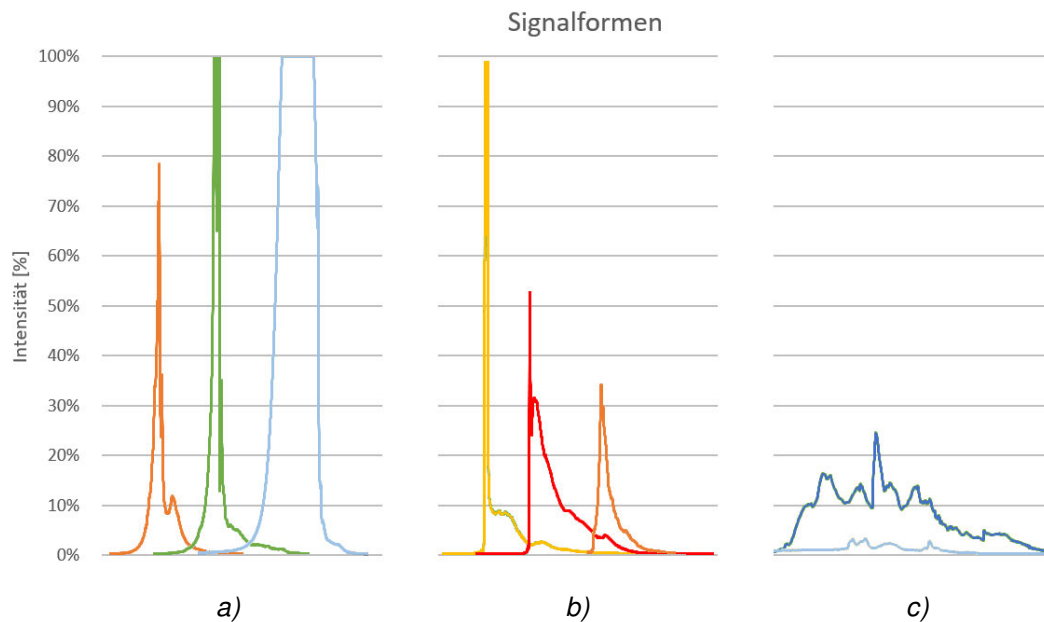


Abb. 31 Signalbeispiele zur Bewertung der Signale

Grundsätzlich gilt, dass Signale gleicher Form vergleichbar sind (Abb. 31). Diese Signale zeichnen sich durch wiederkehrende, markante Verläufe im Signal aus (Abb. 31 b). Diese Signale lassen sich für eine Auswertung heranziehen. Die Signale der GoF und PoF sind folgendermaßen auszuwerten: Jeder Messkanal wird einzeln betrachtet und ungefiltert an seinem Maximum ausgewertet. Es ist zu prüfen, ob die daraus abgeleiteten Zeiten plausibel sind. Die Zeiten müssen positiv sein und sich in der Betrachtung der gesamten Messung im erwarteten Zeitintervall befinden und in logischer Reihenfolge vorkommen. Im zweiten Schritt ist zu prüfen, ob sich alle Signale zur weiteren Berechnung heranziehen lassen. Daraus ergibt sich die gefilterte Auswertung.

Überschreitet das Signal den Messbereich, entsteht ein Zeitintervall, in dem der Verlauf des Signals unbekannt ist; In dem Graphen erkenntlich durch ein Plateau bei der maximalen Intensität (Abb. 31 a). Es lässt sich daher kein Maximum für die Auswertung mit Gewissheit ausmachen. Im Einzelnen muss eine Unterscheidung getroffen werden. So kann ein Signal mit einem schmalen Plateau, wie der grüne Graph (Abb. 31 a), zur Auswertung herangezogen werden. Bei Gruppierungen von Ausschlägen ähnlicher Intensität in einem geringen Zeitraum ist nicht ersichtlich, bei welchem der Peaks das Signal auszuwerten ist (Abb. 31 c). Die Auswertung ist im Kontext aller Signale der Messung zu betrachten. Zeigen die anderen Signale eine steile Flanke, so kann die Auswertung ebenfalls an der ersten Flanke der

Gruppierung stattfinden. Die Signale lassen sich dazu an einem festgelegten Intensitätswert der ersten steigenden Signalfanke auswerten. Andernfalls ist an der Auswertung am Maximum festzuhalten. Das Signal ist in jedem Falle auszuschließen, wenn die Auswertung des Signals in der Gesamtheit der Messung stark abweicht. Es ist zu beachten, dass alle Signale einer Messung auf die gleiche Art ausgewertet werden müssen.

Für die Auswertung der PFP nutzt das OPTIMEX ebenfalls einen absoluten Intensitätswert, nachdem die steigende Signalfanke aller Ausschläge abgesucht wird.

### 5.3 Ergebnis der Versuche

In den Ergebnissen der LeCroy Messung (Abb. 32) lassen sich zwei Gruppierungen erkennen. Die Detonationsgeschwindigkeiten der Versuche 04-11 sind deutlich höher als in den Versuchen 01-03. In den Ergebnissen der GoF und PoF zeichnet sich dieses Phänomen ebenfalls ab. Die Beobachtung, dass der geäderte Versuchsaufbau (Kap. 4.1) zur Steigerung der Detonationsgeschwindigkeit führt, wird in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Dadurch lassen sich nur Versuche mit gleichem Versuchsaufbau untereinander vergleichen. Die Ergebnisse der PFP stammen aus den Versuchen 04-11, da die ersten drei Versuche keine Ergebnisse erzielt haben (Kap. 5.3.3). Die Ergebnisse streuen stark und es ist kein Muster zu erkennen.

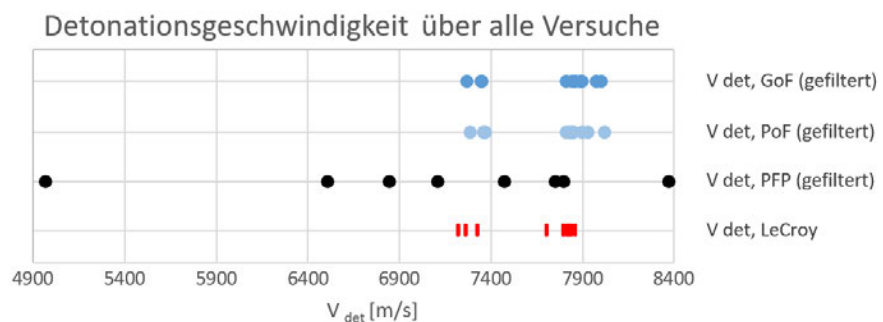


Abb. 32 Übersicht der Ergebnisse nach Messverfahren

## 5.3.1 Auswertung der Glasfaser (GoF)

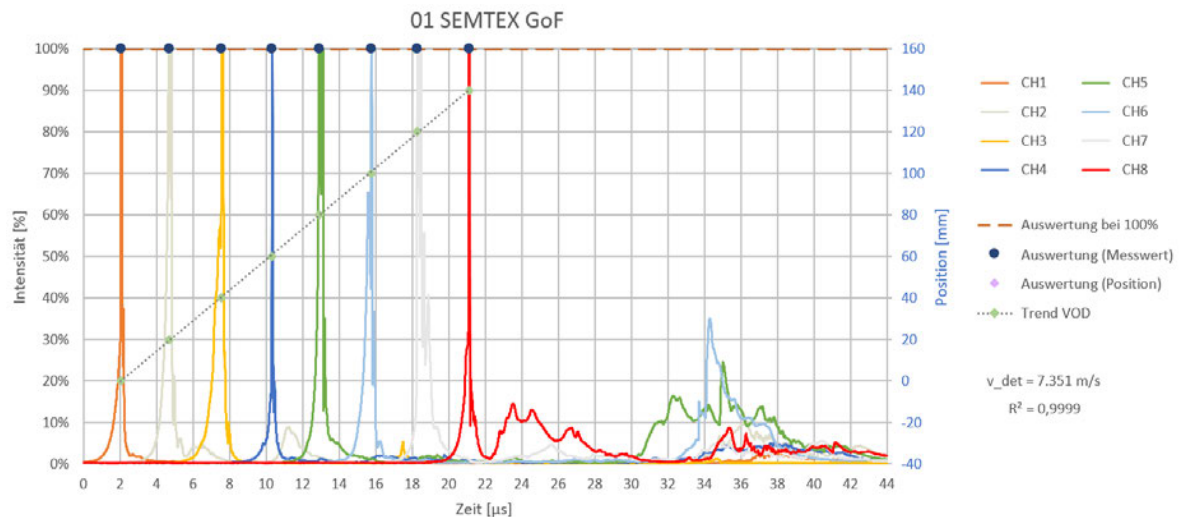


Abb. 33 GoF-Messung 01 SEMTEX

Das Messsignal der GoF (Abb. 33) zeigt im ersten Versuch schmale Ausschläge, die in Teilen den Auflösungsbereich kurzzeitig überschreiten. Die Plateau-Bildung ist geringfügig, sodass die Signale zur Auswertung herangezogen werden können. Anders als in den folgenden zwei Versuchen (Abb. 34), in denen die GoF mit dem Schneidwerkzeug geschnitten wurde, sind die Signale deutlich breiter. Es bildet sich ein Plateau an der Auflösungsgrenze, sodass die Signale nicht ausgewertet werden können. Gerade im Fußbereich der Signale ist ein langsamer Anstieg zu erkennen, was auf die Erfassung von Vorlicht (Kap. 3.1) hindeutet. Die Vermutung ist, dass die GoF die Aluminium-Folie bei der Installation der Faser durchstoßen hat. Aus genannten Gründen (Kap 4.2) lässt sich das in der Durchführung nicht prüfen und kann somit nicht ausgeschlossen werden.

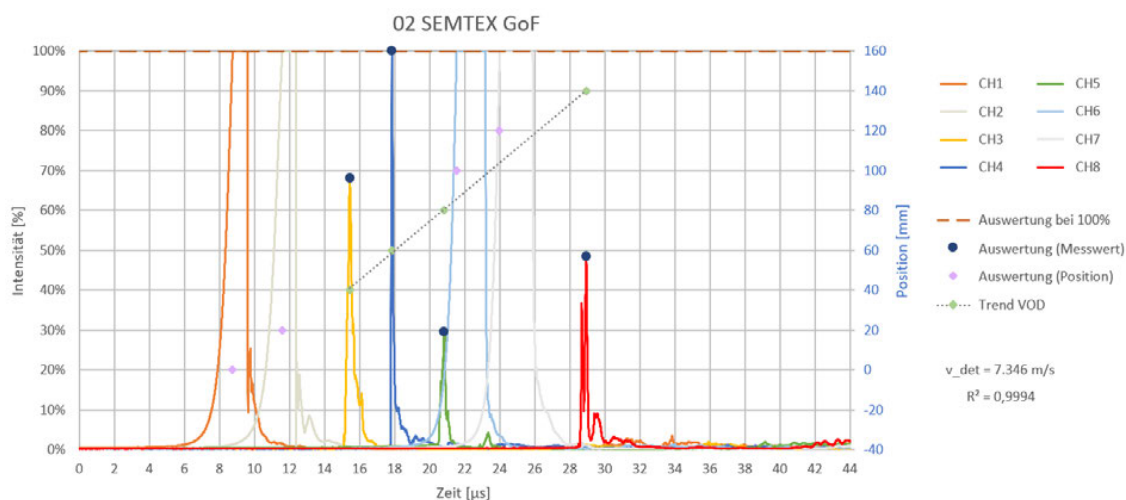


Abb. 34 GoF-Messung 02 SEMTEX

Die Qualität der Signale nimmt von Versuch 02 (Abb. 34) zu Versuch 03 weiter ab. Zusätzlich weisen einige Signale eine geringere Intensität auf. Die Reproduzierbarkeit der Schnittgüte ist unter der vereinfachten Anwendung des Schneidwerkzeugs somit nicht gegeben. Es ist jedoch anzumerken, dass der Lichtkegel der Fasern in den Versuchen 02 und 03 nach dem Schneiden nicht geprüft wurden. Das Prüfen der Faser wird für alle weiteren Versuche übernommen, um eine schlechte Schnittgüte als Einflussfaktor auszuschließen und ist Pflichtbestandteil der Faservorbereitung.

Das Schneiden der Faser mit der Keramik in den Versuchen 04-07 (Abb. 35) erzielt schmale Signale – mit einigen Ausnahmen – die eine steile Flanke ausbilden. Die Peaks der Signale haben eine geringere Intensität.

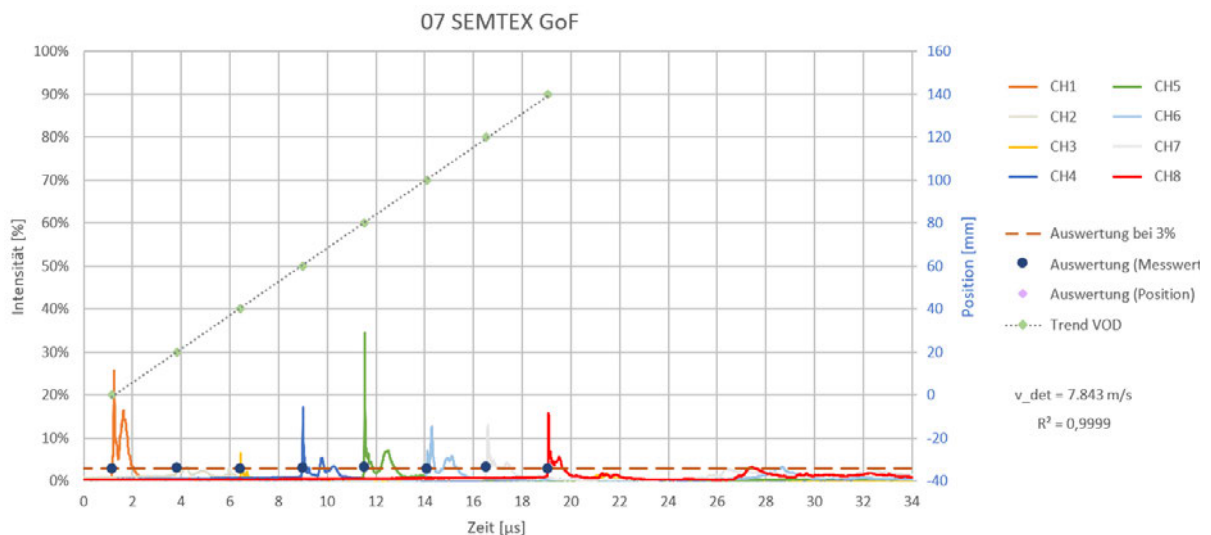


Abb. 35 GoF-Messung 07 SEMTEX

Als extremes Beispiel wird auf den Versuch 07 (Abb. 35) verwiesen. Aufgrund der geringen Intensität hebt sich der Maximalwert des Messkanals 2 (Kap. 5.2 c) absolut betrachtet nur geringfügig ab. Daher wird die Auswertung über ein festen Intensitätswert von 5% vorgenommen. Trotz der zeitintensiven Faservorbereitung konnte keine vollumfassende Verbesserung der Messsignale erlangt werden. Wie es zu derart geringen Ausschlägen kommt, ist unklar.

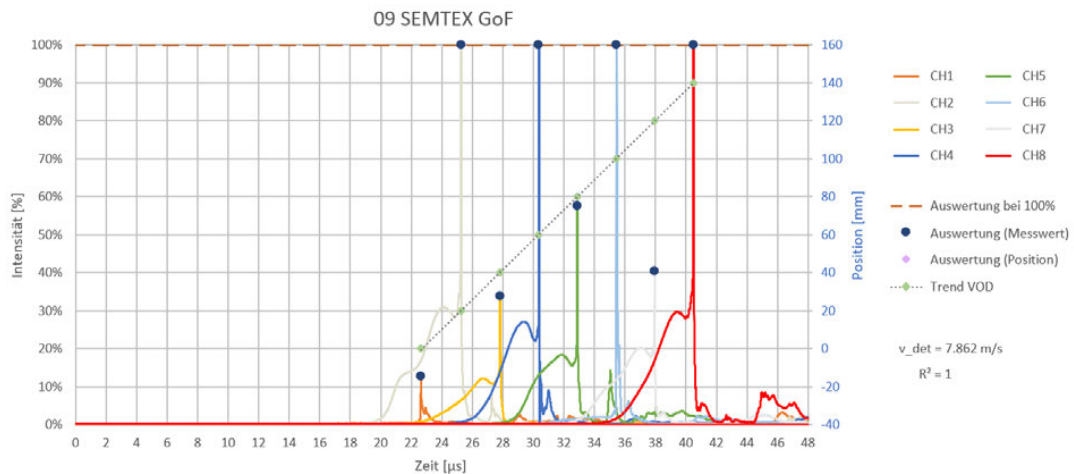


Abb. 36 GoF-Messung 09 SEMTEX

In den letzten Versuchen 08-11 werden die Fasern mit der Schere geschnitten. Die Signale aus den Versuchen 09 (Abb. 36) und 10 sind in ihrer Form ähnlich. Sie zeichnen sich durch klare Peaks bei hohen Intensitäten aus. Der Verlauf ist jedoch nicht ideal, es wird bereits weit vor dem Peak ein Lichtsignal detektiert. Das Signal wächst langsam nahezu linear an, bis es vor dem Peak leicht einfällt. Bei den Signalen der Versuchen 08 und 11 (Abb. 37) zeigen sich sehr breite Ausschläge. Die Messsignale der einzelnen Kanäle überlagern sich stark in ihren Ausläufen.

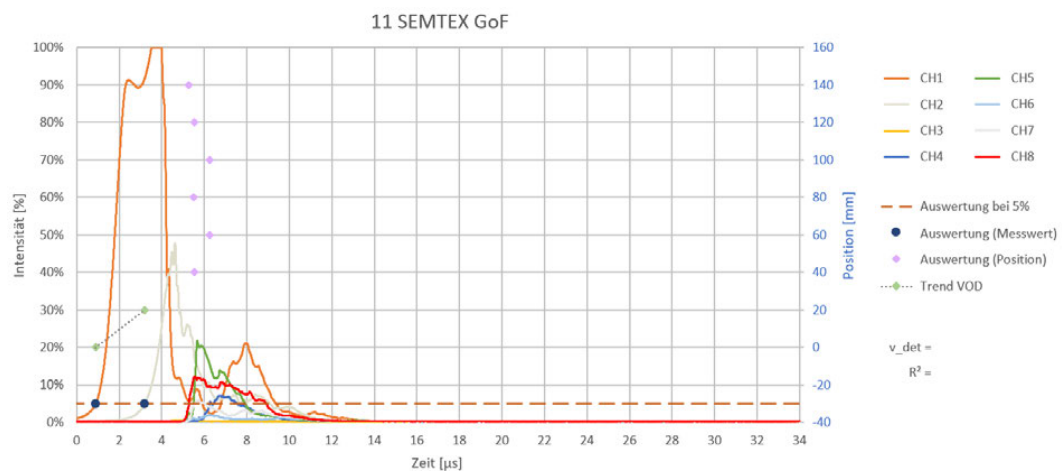


Abb. 37 GoF-Messung 11 SEMTEX

Für den Versuch 11 (Abb. 37) ist keine Auswertung möglich. Die am Flankenanstieg ermittelten Zeiten lassen sich keiner Chronologie zuordnen, die im Zusammenhang mit den Messpositionen plausibel wären. Zwei Messsignalen eignen sich für eine Auswertung, diese lassen sich durch genau eine Gerade verbinden. Es ist keine Mustererkennung möglich, da zu wenige Daten vorliegen. Das Ergebnis ist dadurch nicht belastbar. Das Schneiden der Faser mit der Schere kann nicht empfohlen werden.

## 5.3.2 Auswertung der Kunststofffaser (PoF)

Die Signale der PoF (Abb. 38) zeichnen sich durch schmale und eindeutig erkennbare Peaks mit hohen Intensitäten aus.

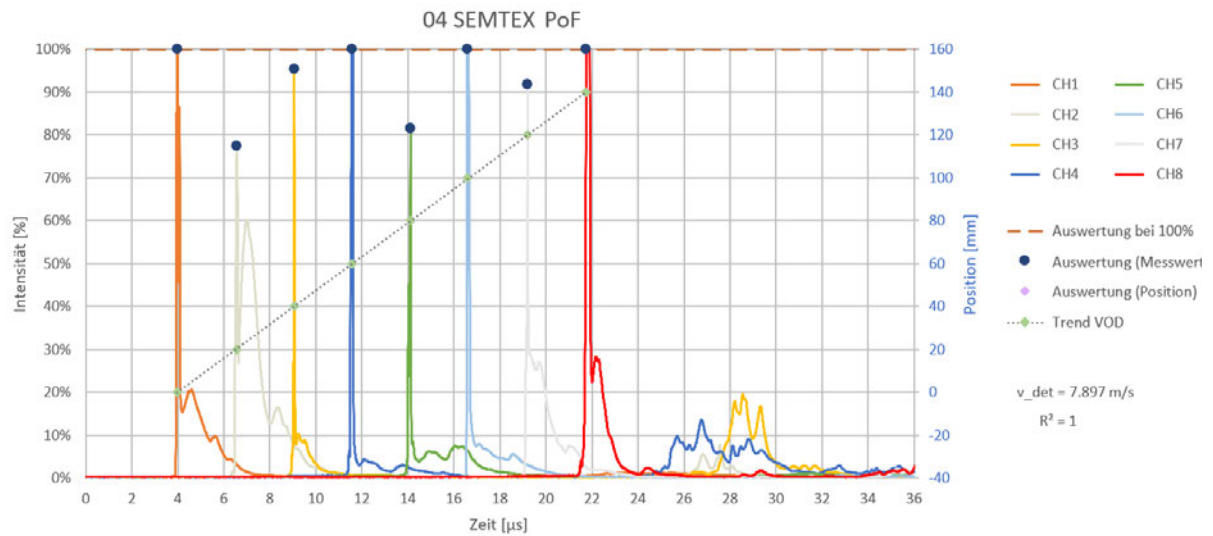


Abb. 38 PoF-Messung 04 SEMTEX

Die Form der Signale ist über alle Versuche ähnlich. Sollte der Messbereich überschritten werden, bildet sich aufgrund seiner Form nur ein kurzes Plateau aus.

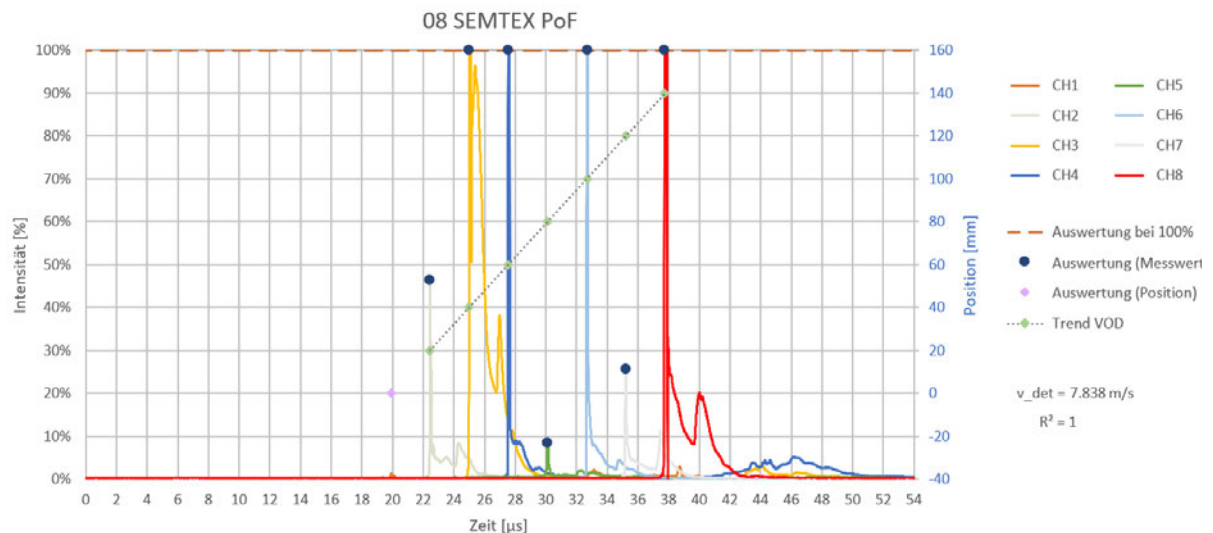


Abb. 39 PoF-Messung 08 SEMTEX

Die Messsignale lassen sich in allen Versuchen, auch bei verminderter Intensität, als gleichwertig für die Auswertung betrachten (Abb. 39). Die Dämpfung der Messsignale tritt irregulär auf und lässt sich deshalb nicht auf konkrete Schritte der Faservorbereitung zurückführen. In Sonderfällen werden Messkanäle von der Auswertung ausgeschlossen. Im Versuch 08 (Abb. 39) ist der Ausschlag des Messkanal 1 so gering, dass dieser nicht für die Auswertung herangezogen wird.



## 5.3.3 Auswertung der perforierten Faser (PFP)

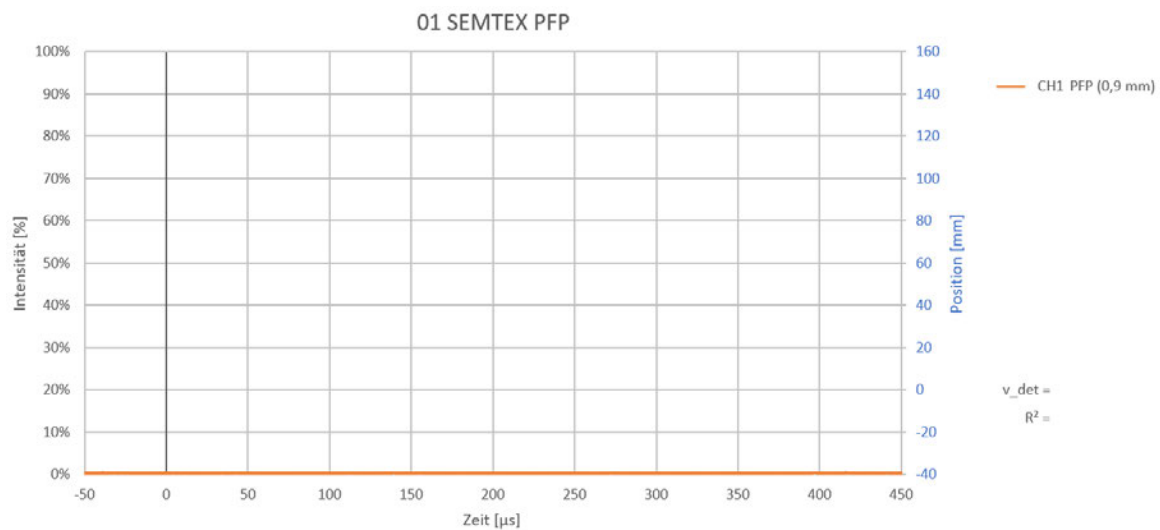


Abb. 40 PFP-Messung 01 SEMTEX

Die PFPs haben in den Versuchen 01-03 keine Ergebnisse erzielt (Abb. 40). Das ist möglicherweise auf die Art der Faserpräparation (Kap. 4.2) zurückzuführen. In den Folgeversuchen sind Ausschläge in den Messsignalen (Abb. 41) festzustellen. Das Messsignal der Abbildung 41 zeigte nach dem ersten Peak acht weitere abgesetzte Ausschläge, die erkennbar den Bohrungen der PFP zuzuordnen sind. Der erste, relativ schwache Lichtimpuls, der die Messkarten auslöst, lässt sich dem Licht zuordnen, das frontal durch den Lichtwellenleiter kommt.

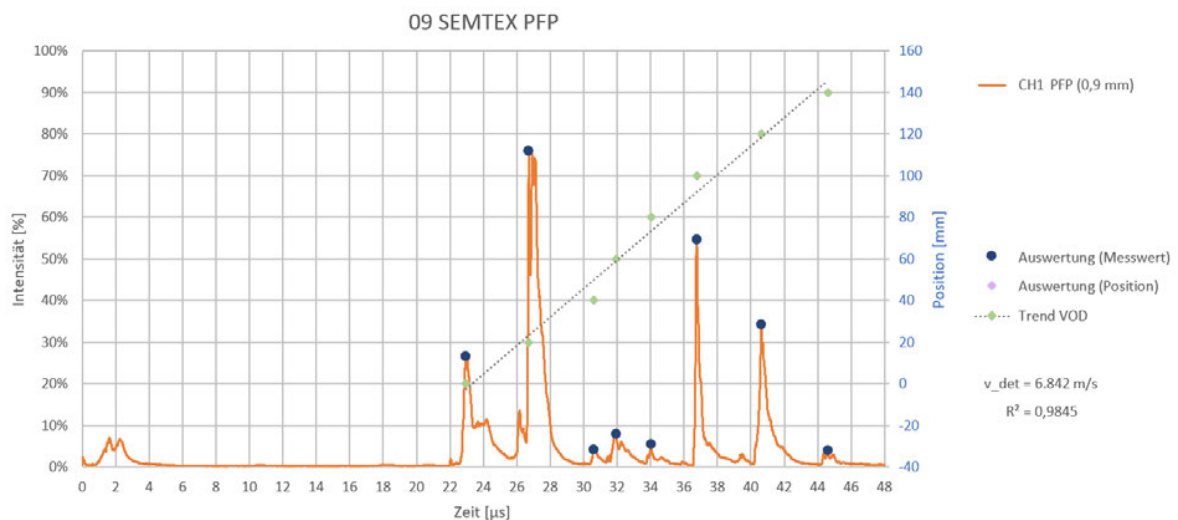


Abb. 41 PFP-Messung 09 SEMTEX

In den Versuchen 04-11 endet die PFP-Faser im PETN von wo aus die Sprengladung initiiert wird. Bei einer Detonationsgeschwindigkeit von ca 7.800 m/s nach LeCroy legt die Detonationsfront in 23  $\mu$ s (Abb. 41) – die Zeit, die zwischen



der ersten zwei Ausschlägen liegt – eine Strecke von ca. 18 cm zurück. Das entspricht der Länge vom Initiierungspunkt zur ersten Bohrung der PFP.

Bei anderen Messungen schwankt die Anzahl der Ausschläge. Die Messsignale lassen sich deshalb nicht mit Bestimmtheit einer Messposition zuordnen (Abb. 42). Der Grundsatz der Vergleichbarkeit ist zusätzlich durch starke Unterschiede in der Intensität der Ausschläge nicht einzuhalten.

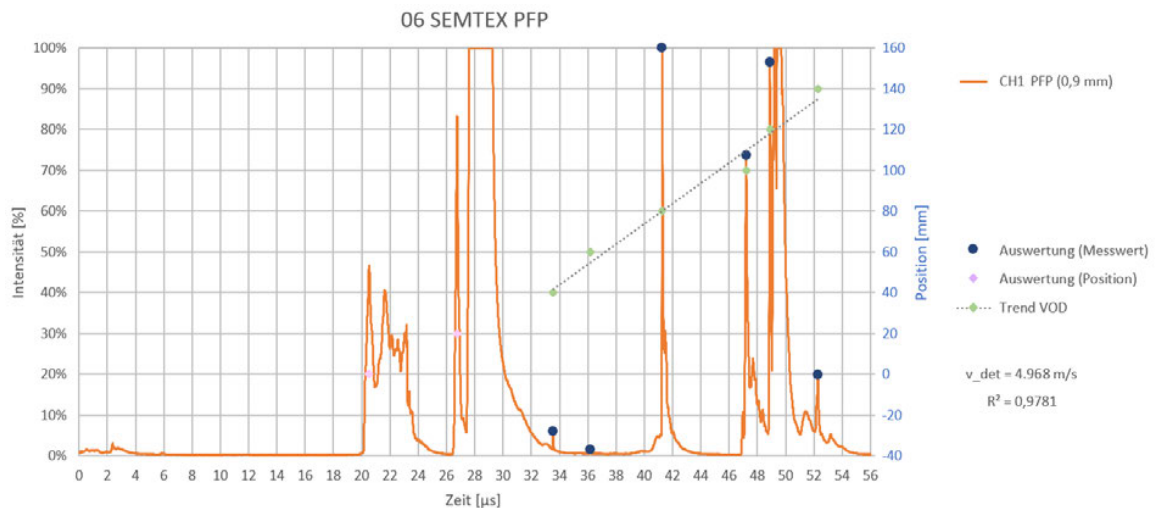


Abb. 42 PFP-Messung 06 SEMTEX

Im Versuch 11 (Abb. 43) wird versucht anhand der Referenzmessungen der PoF abzuleiten, welche Peaks zur Auswertung herangezogen werden sollen.

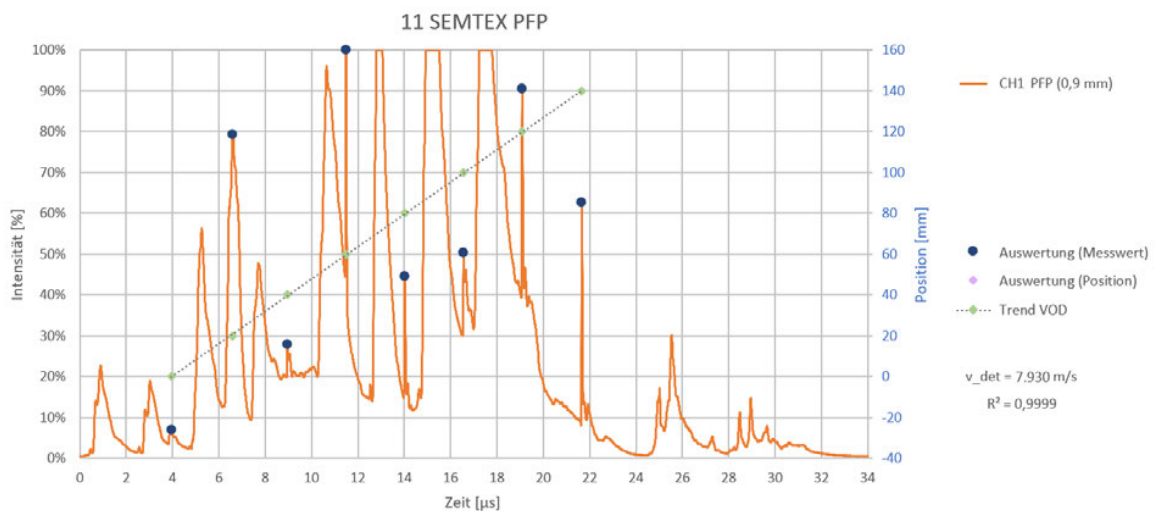


Abb. 43 PFP-Messung 11 SEMTEX

Die ermittelte Detonationsgeschwindigkeit stimmt in der Größenordnung mit den anderen Messungen überein. Es lässt sich jedoch keine Regel ableiten, wie die auszuwertenden Ausschläge sein müssen.

Die Handhabung der PFP ist weiter zu erproben. Dazu ist es interessant, den Einfluss der Bohrtiefe zu untersuchen. Für einen ersten Eindruck wird auf die PFP (Abb. 44) mit der Bohrtiefe von 1,1 mm des sechsten Versuchs verwiesen. Hier ist zu erkennen, dass die PFP mit den tieferen Bohrungen schmalere Ausschläge mit klaren Peaks hervorbringt, die sich über einen sinnvollen Zeitraum erstrecken.

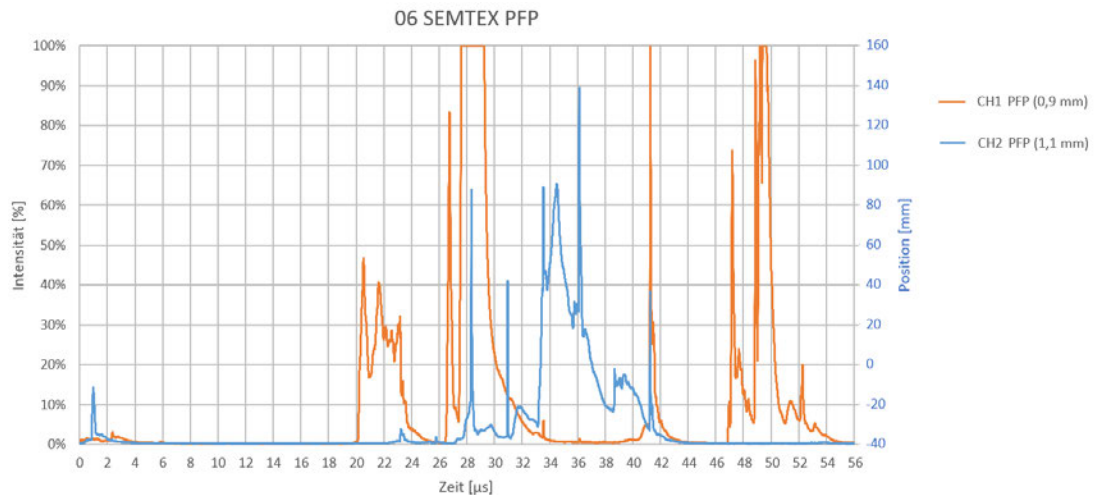


Abb. 44 PFP-Messung 06 mit beiden Bohrtiefen

## 5.4 Vergleich

Da alle beschriebenen Verfahren immer an der identischen Sprengladung durchgeführt werden, können die Ergebnisse (Tabelle 4) innerhalb eines Versuchs verglichen werden. Die Ergebnisse aus dem LeCroy-Verfahren dienen dazu als Referenz.

*Tabelle 4 Vergleich der Ergebnisse aus der Messungen GoF und PoF zu leCroy*

Nr.	Vdet,(gefiltert)			Vdet (Referenz) LeCroy [m/s]	Relative Abweichung		
	GoF [m/s]	PoF [m/s]	PFP [m/s]		GoF [%]	PoF [%]	PFP [%]
01	7.351	7.358	-	7.328	0,32	0,42	-
02	7.346	7.285	-	7.221	1,74	0,89	-
03	7.270	7.368	-	7.260	0,14	1,49	-
04	7.972	7.897	7.474	7.837	1,72	0,77	-4,63
05	7.888	7.852	7.796	7.827	0,78	0,32	-0,40
06	8.003	7.812	4.968	7.705	3,87	1,39	-35,32
PFP (1,1 mm)			7.752	7.705			0,61
07	7.843	7.844	6.508	7.796	0,60	0,62%	-16,52
08	7.812	7.838	8.372	7.811	0,01	0,35	7,18
09	7.862	7.831	6.842	7.834	0,36	-0,04	-12,66
10	7.897	7.929	7.111	7.859	0,48	0,89	-9,52
11	-	8.018	7.930	7.836	-	2,32	1,20

Die Ergebnisse der PFP lassen sich nicht weiter einordnen, wie in Kapitel 5.3 bereits erwähnt. Es wird festgestellt, dass die Ergebnisse dieser Versuchsdurchführung (Kap. 4.2) keine Aussagekraft haben.

Aus den Ergebnissen der GoF und PoF lässt sich eine Tendenz erkennen, dass die ermittelten Detonationsgeschwindigkeiten etwas höher sind als die Referenzwerte. Die Betrachtung der relativen Abweichung der Detonationsgeschwindigkeiten zeigt, dass die PoF mit einer maximalen Abweichung von 2,32% die stabilsten Ergebnisse aufweist. Im Durchschnitt liegen die Abweichungen für die Verfahren der GoF und PoF bei etwa 1%. Um festzustellen, wie zuverlässig die Ergebnisse sind werden für das jeweilige Messverfahren die ungefilterten und gefilterten Ergebnisse gegenübergestellt (Abb. 45) (Kap. 5.2).

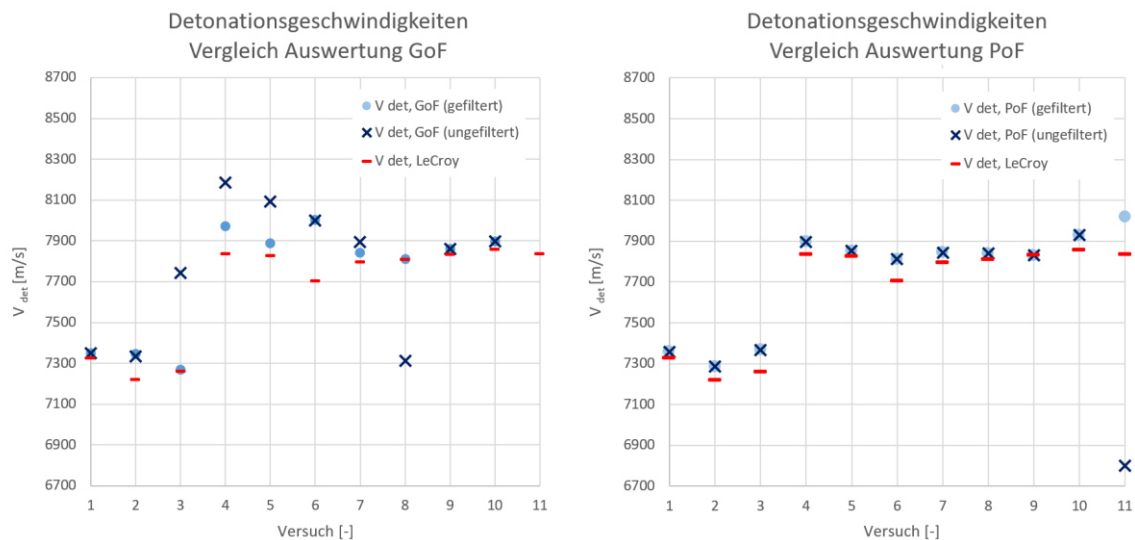


Abb. 45 Vergleich der Ergebnisse nach Auswertungsverfahren GoF und PoF

Die ungefilterte Auswertung (Abb. 45) basiert auf den Maxima aller Messkanäle, die sich im fraglichen Zeitintervall befinden. Bei den gefilterten Ergebnissen (Abb. 45) werden nur die Messkanäle berücksichtigt, die sich nach der Bewertung der Signale (Kap. 5.3) für eine Auswertung eignen. Der geringe Unterschied in den Ergebnissen der PoF zwischen den beiden Methoden zeigt, dass die Ergebnisse belastbar sind. Die geringe Abweichung lässt sich mit der hohen Qualität der Messsignale begründen. Da für die Auswertung nahezu alle Messsignale berücksichtigt werden können, was die geringe Schwankung erklärt.

Im Vergleich zur PoF weisen die Ergebnisse der GoF eine etwas größere Abweichung zwischen den gewählten Methoden auf. Was darauf hindeutet, dass die Qualität der Messsignale schlechter ist als bei der PoF. Für die Methode der gefilterten Auswertung lassen sich nur wenige Messsignale berücksichtigt, wodurch es zu der Differenz in den Ergebnissen kommt.

Weiter wird geprüft, wie sich die Auswertung am OPTIMEX zu der hier angeführten Auswertung mit Excel verhält. Die Auswertung lässt sich direkt am Gerät vornehmen. Es ist zu empfehlen, sich über einen Rechner mit dem Messgerät zu verbinden, da sich die Bedienung über das Bedienfeld mühsam gestalten kann. Für die Auswertung wird festgelegt, bei welchem absoluten oder relativen Intensitätswert das Signal ausgewertet wird. Das Messsignal wird in dem Auswertungstyp „nomalized“ relativ zu seinem Maximum skaliert. Der am OPTIMEX wählbare Bereich für die Intensität geht von 0 - 99%. Um die Maxima auszuwerten, wird daher 99% gewählt. Das Signal wird bei dieser Einstellung nicht bei einer

absoluten Intensität von 99% ausgewertet, sondern bei 99% bezogen auf den maximalen Wert des Messkanals. Die Auswertung mit Excel erfolgt nach demselben Prinzip bei 100%. Daraus ergebene sich vernachlässigbare Unterschiede im Ergebnis.

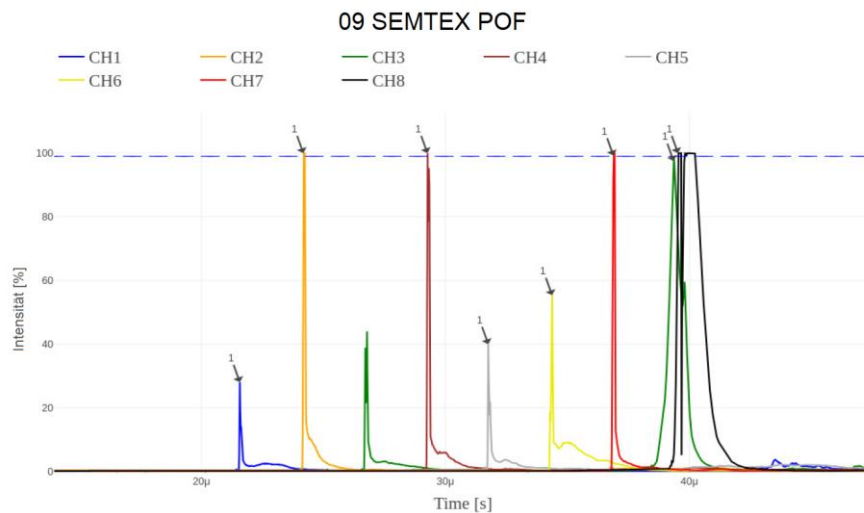


Abb. 46 PoF Messung SEMTEX 09 Auswertung OPTIMEX

In Abbildung 46 sind auf dem Kanal 3 zwei Ausschläge zu sehen. Nach dem genannten Verfahren wertet das OPTIMEX den zweiten höheren Peak aus, der im Kontext der Messung nicht plausibel ist. Das Signal muss an der Stelle der ersten Peaks ausgewertet werden. Alternativ können die Werte auch händisch ausgewählt werden. Die Herangehensweise des OPTIMEX ist nahezu identisch zu der Auswertung in Excel. Für die Auswertung der PFP (Abb. 38) kann jedoch nur über einen festen Intensitätswerten ausgewertet werden.

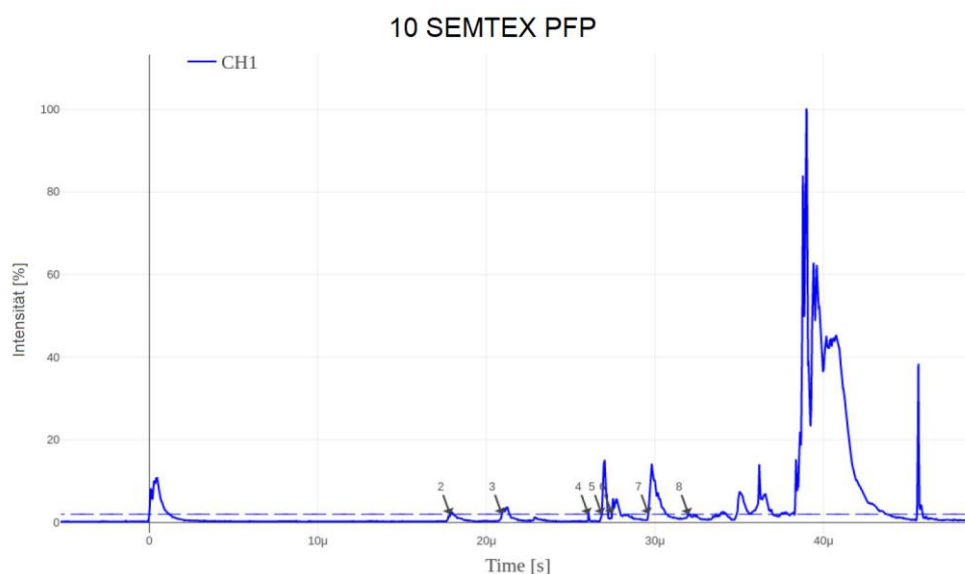


Abb. 47 PFP Messung 10 Auswertung OPTIMEX

Für ideale Messsignale (Abb. 41) ist eine Auswertung mit dieser Vorgehensweise möglich. Bei anderen Messsignalen (Abb. 38) ist eine Auswertung nicht möglich. Auf einen Vergleich der PFP Ergebnisse zu der Auswertung des OPTIMEX wird daher an dieser Stelle verzichtet. In Excel wird für jeden Peak ein Zeitraum definiert, in dem das lokale Maximum gesucht wird. Die Auswahl, welche der Peaks im Anschluss ausgewertet werden, findet zumeist nach intuitiven Einschätzungen statt, wenn sich die Peaks nicht einordnen lassen. Diese Vorgehensweise ist zeitintensiv und führt zu keinem belastbaren Ergebnis.

Mit dem Messverfahren der GoF konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Die ermittelten Detonationsgeschwindigkeiten sind plausibel und liegen in der Nähe der Referenzwerten von LeCroy. Trotz der durchschnittlichen Abweichung von 1% gilt das GoF-Verfahren nicht als verifiziert. Die Qualität der Signale ist stark abhängig von der Vorbereitung der Faser. Hier konnte noch kein geeignetes Verfahren gefunden werden, was reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Für die PoF haben sich die Ergebnisse verifizieren lassen. Die PoF erzielt im Mittel Abweichung von unter 1% zum LeCroy. Die Messsignale zeichnen sich durch eine gute, reproduzierbare Qualität aus. Zusätzlich ist positiv hervorzuheben, dass die Präparation der Faser mit weniger Aufwand verbunden ist als bei der GoF. Auch eine direkte Auswertung am OPTIMEX ist in den meisten Fällen möglich.

Die Auswertung der PFP hat gezeigt, dass sich die Messsignale nur sehr schwer auswerten lassen und in den Signalen keine wiederkehrenden Formen erkennbar sind. Für die PFP lässt sich so keine Handlungsanweisung festlegen. Das Verhalten der PFP muss in weiteren Versuchen untersucht werden. Der Einfluss der Bohrtiefe (Abb. 44) sollte weiterverfolgt werden. Im Unterschied zu den anderen Verfahren wurde auf die PFP kein Aluminiumband aufgebracht. Möglicherweise kann das Abdunkeln der Faser die Qualität der Signale verbessern.

Kommende Versuche sind weiterhin, wenn möglich mit dem LeCroy-Verfahren zu begleitet, bis Routine in die Abläufe einkehrt. Die Verifikation der Messverfahren mit der GoF und PFP sind noch nicht abgeschlossen und sollte weiterverfolgt werden.

## 6 Anhang

A	Auswertung der Versuche von LeCroy .....	56
B	Auswertung der OPTIMEX Versuche und OZM Bericht .....	57
C	Graphen der gefilterten, eigenen Auswertung aller OPTIMEX Versuche.....	60
D	Graphen des Oszilloskops vom LeCroy .....	72

## A Auswertung der Versuche von LeCroy

## Anlage 1 Auswertung LeCroy Versuche 01-11

Nr.	Sprengladung	t <sub>0</sub> [μs]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>3</sub> μs	t <sub>4</sub> [μs]	V <sub>Det1</sub> [m/s]	V <sub>Det2</sub> [m/s]	V <sub>Det3</sub> [m/s]	V <sub>Det4</sub> [m/s]	Mittelwert	NEM [g]	Maße [mm]
1	SEMTEX 10 SE	0	8,224	16,480	24,548	32,596	7.314,0	7.290,7	7.338,7	7.366,9	7.328	111,3	400 x 50 x 4
2	SEMTEX 10 SE	0	8,472	16,660	24,788	32,880	7.099,9	7.211,9	7.267,6	7.303,2	7.221	110,5	400 x 50 x 4
3	SEMTEX 10 SE	0	8,436	16,568	24,572	32,772	7.130,2	7.251,9	7.331,5	7.327,3	7.260	112,1	400 x 50 x 4
4	SEMTEX 10 SE	0	7,708	15,332	22,936	30,580	7.803,6	7.836,6	7.854,5	7.852,5	7.837	234,0	400 x 50 x 8
5	SEMTEX 10 SE	0	7,700	15,352	23,013	30,629	7.811,7	7.826,3	7.828,2	7.840,0	7.827	223,0	400 x 50 x 8
6	SEMTEX 10 SE	0	7,844	15,596	23,328	31,084	7.668,3	7.703,9	7.722,5	7.725,2	7.705	216,8	400 x 50 x 8
7	SEMTEX 10 SE	0	7,712	15,468	23,024	30,820	7.799,5	7.767,6	7.824,4	7.791,4	7.796	219,4	400 x 50 x 8
8	SEMTEX 10 SE	0	7,700	15,384	23,096	30,704	7.811,7	7.810,1	7.800,1	7.820,8	7.811	219,7	400 x 50 x 8
9	SEMTEX 10 SE	0	7,696	15,328	22,964	30,648	7.815,7	7.838,6	7.844,9	7.835,1	7.834	225,1	400 x 50 x 8
10	SEMTEX 10 SE	0	7,660	15,284	22,872	30,604	7.852,5	7.861,2	7.876,4	7.846,4	7.859	223,6	400 x 50 x 8
11	SEMTEX 10 SE	0	7,716	15,344	22,936	30,544	7.795,5	7.830,4	7.854,5	7.861,8	7.836	218,1	400 x 50 x 8
Messposition [mm]		0	60,15	120,15	180,15	240,13							



## B Auswertung der OPTIMEX Versuche und OZM Bericht

Anlage 2 GoF Zeiten und Detonationsgeschwindigkeiten - eigene Berechnungen und OZM Bericht

Nr.	Auswertung (normalisiert) <sup>a</sup> = absolute Intensität	V <sub>det,GoF</sub> [m/s]	CH1 [μs]	CH2 [μs]	CH3 [μs]	CH4 [μs]	CH5 [μs]	CH6 [μs]	CH7 [μs]	CH8 [μs]
01	ungefiltert 100%	7.351	2,056	4,684	7,560	10,33	12,90	15,76	18,28	21,10
	gefiltert 100%	7.351	2,056	4,684	7,560	10,33	12,90	15,76	18,28	21,10
	Bericht 99%	7.351	2,06	4,68	7,56	10,33	12,89	15,76	18,28	21,1
02	ungefiltert 100%	7.3.35	8,756	11,58	15,44	17,84	20,82	21,54	23,99	28,94
	gefiltert 100%	7.346	<del>8,756</del>	<del>11,58</del>	15,44	17,84	20,82	<del>21,54</del>	<del>23,99</del>	28,94
	Bericht 99%	7.347	<del>8,75</del>	<del>11,58</del>	15,44	17,84	20,82	<del>21,54</del>	<del>23,99</del>	28,94
03	ungefiltert 100%	7.743	3,904	6,616	8,248	10,45	13,13	15,74	20,40	20,97
	gefiltert 100%	7.270	3,904	6,616	<del>8,248</del>	<del>10,45</del>	<del>13,13</del>	<del>15,74</del>	20,40	<del>20,97</del>
	Bericht 99%	7.270	3,9	6,6	<del>8,24</del>	<del>10,44</del>	<del>13,12</del>	<del>15,74</del>	20,39	<del>20,96</del>
04	ungefiltert 100%	8.187	5,064	7,740	10,12	12,81	15,21	17,60	19,05	22,64
	gefiltert 100%	7.972	5,064	7,740	10,12	12,81	15,21	17,60	<del>19,05</del>	<del>22,64</del>
	Bericht 99%	7.973	5,06	7,74	10,12	12,81	15,21	17,6	<del>19</del>	<del>22,64</del>
05	ungefiltert 100%	8.093	20,66	23,80	26,24	28,44	31,62	32,08	35,81	38,49
	gefiltert 100%	7.888	20,66	23,80	26,24	28,44	31,62	<del>32,08</del>	<del>35,81</del>	38,49
	Bericht 99%	7.889	20,66	23,8	26,24	28,44	31,62	<del>32,04</del>	<del>35,8</del>	38,49
06	ungefiltert 100%	7.999	28,89	26,65	24,23	31,21	33,49	36,53	39,09	41,69
	gefiltert 100%	8.003	28,89	26,65	24,23	<del>31,21</del>	<del>33,49</del>	36,53	39,09	41,69
	Bericht 99%	8.002	28,88	26,65	24,23	<del>31,21</del>	<del>33,48</del>	36,53	39,09	41,69
07	ungefiltert 100%	7.896	1,244	4,244	6,440	9,000	11,53	14,29	16,59	19,08
	gefiltert 3% <sup>a</sup>	7.843	1,156	3,828	6,428	8,980	11,51	14,08	16,52	19,05
	Bericht 3% <sup>a</sup>	7.843	1,16	3,83	6,43	8,98	11,51	14,08	16,52	19,06
08	ungefiltert 100%	7.313	19,11	22,70	25,26	28,43	28,19	32,22	36,18	38,67
	gefiltert 3% <sup>a</sup>	7.812	<del>15,45</del>	<del>17,75</del>	21,68	<del>24,86</del>	26,48	29,99	<del>33,09</del>	34,48
	Bericht 3% <sup>a</sup>	7.813	<del>15,45</del>	<del>17,75</del>	21,68	<del>24,86</del>	26,48	28,99	<del>33,09</del>	34,47
09	ungefiltert 100%	7.862	22,64	25,26	27,82	30,35	32,87	35,45	37,95	40,47
	gefiltert 100%	7.862	22,64	25,26	27,82	30,35	32,87	35,45	37,95	40,47
	Bericht 99%	7.862	22,64	25,26	27,83	30,35	32,88	35,45	37,95	40,48
10	ungefiltert 100%	7.897	22,96	25,56	27,95	30,56	33,08	35,62	38,19	40,68
	gefiltert 100%	7.897	22,96	25,56	27,95	30,56	33,08	35,62	38,19	40,68
	Bericht 99%	7.897	22,96	25,56	27,94	30,56	33,08	35,62	38,18	40,68
11	ungefiltert 100%	30.857	3,512	4,620	5,548	6,684	5,646	6,260	5,696	5,560
	gefiltert 5% <sup>a</sup>	x	0,892	3,200	<del>5,548</del>	<del>6,258</del>	<del>5,496</del>	<del>6,260</del>	<del>5,540</del>	<del>5,280</del>
	Bericht 5% <sup>a</sup>	x	0,896	3,2	<del>x</del>	<del>6,25</del>	<del>5,5</del>	<del>x</del>	<del>5,54</del>	<del>5,28</del>
Messposition [mm]			0	20	40	60	80	100	120	140

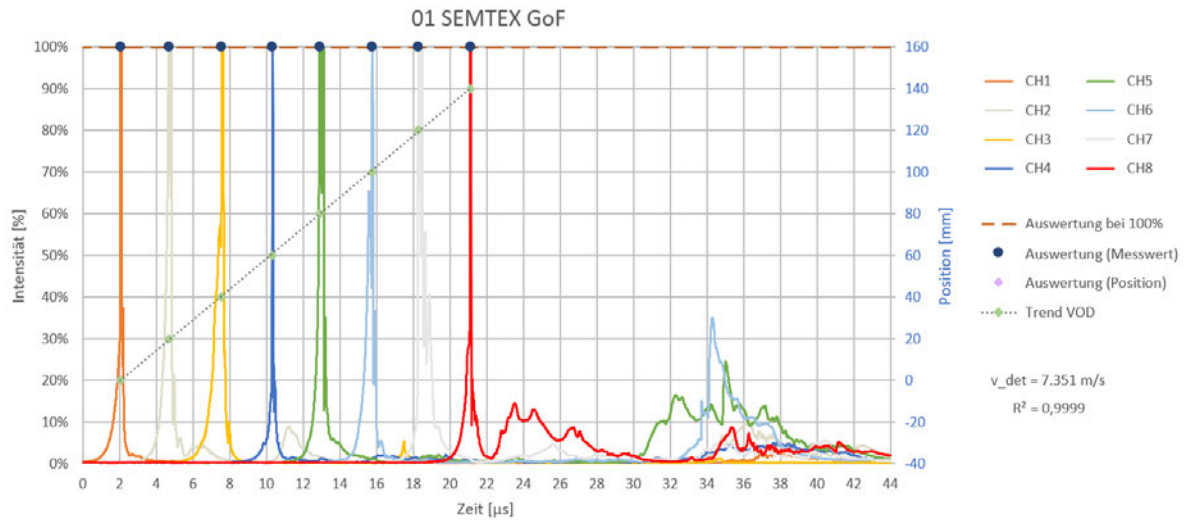
*Anlage 3 PoF Zeiten und Detonationsgeschwindigkeiten - eigene Berechnungen und OZM Bericht*

Nr.	Auswertung (normalisiert)	V <sub>det,PoF</sub> [m/s]	CH1 [μs]	CH2 [μs]	CH3 [μs]	CH4 [μs]	CH5 [μs]	CH6 [μs]	CH7 [μs]	CH8 [μs]
01	ungefiltert 100%	7.358	1,080	3,748	6,592	9,372	12,14	14,76	17,35	20,08
	gefiltert 100%	7.358	1,080	3,748	6,592	9,372	12,14	14,76	17,35	20,08
	Bericht 99%	7.358	1,08	3,75	6,59	9,37	12,14	14,76	17,35	20,08
02	ungefiltert 100%	7.285	8,640	11,37	14,10	16,83	19,58	22,37	25,07	27,86
	gefiltert 100%	7.285	8,640	11,37	14,10	16,83	19,58	22,37	25,07	27,86
	Bericht 99%	7.286	8,64	11,37	14,1	16,83	19,58	22,37	25,07	27,86
03	ungefiltert 100%	7.368	2,996	5,728	8,440	11,20	14,02	16,62	19,28	21,98
	gefiltert 100%	7.368	2,996	5,728	8,440	11,20	14,02	16,62	19,28	21,98
	Bericht 99%	7.369	3	5,73	8,44	11,2	14,02	16,62	19,28	21,98
04	ungefiltert 100%	7.897	3,976	6,572	9,060	11,56	14,12	16,58	19,21	21,75
	gefiltert 100%	7.897	3,976	6,572	9,060	11,56	14,12	16,58	19,21	21,75
	Bericht 99%	7.897	3,98	6,56	9,06	11,56	14,12	16,58	19,21	21,75
05	ungefiltert 100%	7.852	19,63	22,16	24,74	27,29	29,87	32,33	34,84	37,50
	gefiltert 100%	7.852	19,63	22,16	24,74	27,29	29,87	32,33	34,84	37,50
	Bericht 99%	7.852	19,63	22,16	24,74	27,29	29,87	32,33	34,84	37,5
06	ungefiltert 100%	7.812	22,68	25,24	27,78	30,33	32,90	35,48	38,01	40,61
	gefiltert 100%	7.812	22,68	25,24	27,78	30,33	32,90	35,48	38,01	40,61
	Bericht 99%	7.813	22,68	25,24	27,78	30,33	32,9	35,48	38,01	40,6
07	ungefiltert 100%	7.844	0,152	2,744	5,308	7,880	10,38	12,93	15,42	18,07
	gefiltert 100%	7.844	0,152	2,744	5,308	7,880	10,38	12,93	15,42	18,07
	Bericht 99%	7.844	0,152	2,74	5,31	7,88	10,37	12,93	15,42	18,07
08	ungefiltert 100%	7.841	19,91	22,44	25,00	27,54	30,10	32,70	35,21	37,74
	gefiltert 100%	7.838	<del>19,91</del>	22,44	25,00	27,54	30,10	32,70	35,21	37,74
	Bericht 99%	7.838	<del>38,72</del>	22,44	25	27,54	30,09	32,7	35,21	37,74
09	ungefiltert 100%	7.831	21,57	24,17	26,78	29,26	31,75	34,37	36,88	39,53
	gefiltert 100%	7.831	21,57	24,17	26,78	29,26	31,75	34,37	36,88	39,53
	Bericht 99%	5.566	21,57	24,18	39,35	29,26	31,76	34,37	36,88	39,53
10	ungefiltert 100%	7.929	21,90	24,44	26,99	29,47	32,04	34,49	37,04	39,58
	gefiltert 100%	7.929	21,90	24,44	26,99	29,47	32,04	34,49	37,04	39,58
	Bericht 99%	-60,18	21,9	68,51	26,99	29,47	32,04	34,49	37,04	39,58
11	ungefiltert 100%	6.799	3,032	7,488	9,944	12,52	14,96	<del>46,60</del>	<del>23,94</del>	<del>50,59</del>
	gefiltert 100%	8.018	<del>3,032</del>	7,488	<del>9,944</del>	12,52	14,96	<del>46,60</del>	<del>23,94</del>	<del>50,59</del>
	Bericht 99%	8.013	<del>3,04</del>	7,49	<del>9,95</del>	12,52	14,96	<del>128,39</del>	<del>23,94</del>	<del>50,58</del>
Messposition [mm]			0	20	40	60	80	100	120	140

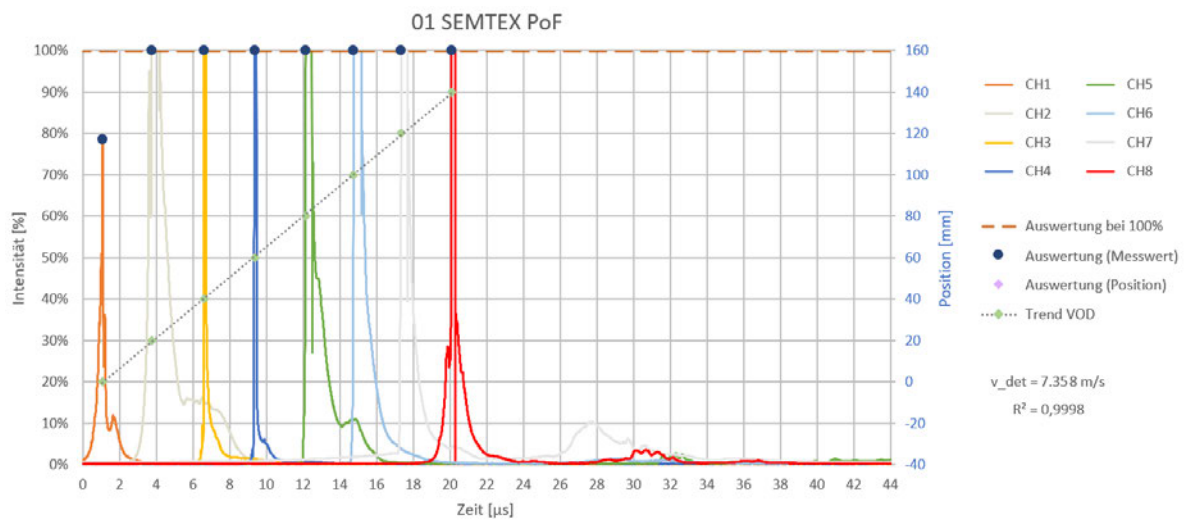
*Anlage 4 PFP Zeiten und Detonationsgeschwindigkeiten - eigene Berechnungen*

Nr.	Auswertung	V <sub>det,PFP</sub> [m/s]	t <sub>1</sub> [μs]	t <sub>2</sub> [μs]	t <sub>3</sub> [μs]	t <sub>4</sub> [μs]	t <sub>5</sub> [μs]	t <sub>6</sub> [μs]	t <sub>7</sub> [μs]	t <sub>8</sub> [μs]
01	gefiltert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02	gefiltert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03	gefiltert	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04	gefiltert	7.474	<del>5,004</del>	<del>7,068</del>	<del>9,392</del>	10,96	13,78	16,08	18,58	21,89
05	gefiltert	7.796	20,24	22,49	24,424	27,65	29,76	32,72	35,37	37,90
06	gefiltert	4.968	<del>20,53</del>	<del>26,75</del>	33,54	36,15	41,26	47,20	48,88	52,28
06	gefiltert (1,1 mm)	7.752	23,23	25,78	28,32	30,96	33,54	36,13	38,70	41,26
07	gefiltert	6.508	<del>1,060</del>	10,77	<del>12,62</del>	<del>14,46</del>	15,07	20,81	24,99	29,21
08	gefiltert	8.372	<del>21,45</del>	28,00	29,93	32,50	35,07	<del>39,92</del>	<del>43,88</del>	<del>46,276</del>
09	gefiltert	6.842	22,95	26,72	30,60	31,94	34,02	36,76	40,63	44,62
10	gefiltert	7.111	17,92	21,22	27,01	29,81	32,04	33,95	35,01	36,19
11	gefiltert	7.930	3,948	6,588	8,96	11,48	14,02	16,56	19,09	21,66

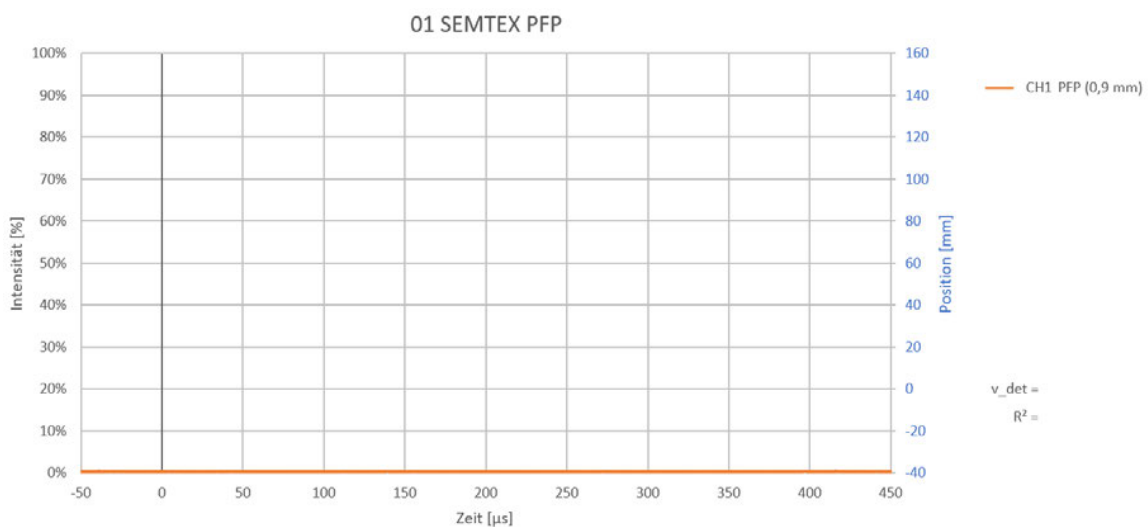
## C Graphen der gefilterten, eigenen Auswertung aller OPTIMEX Versuche



Anlage 5 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 01 SEMTEX

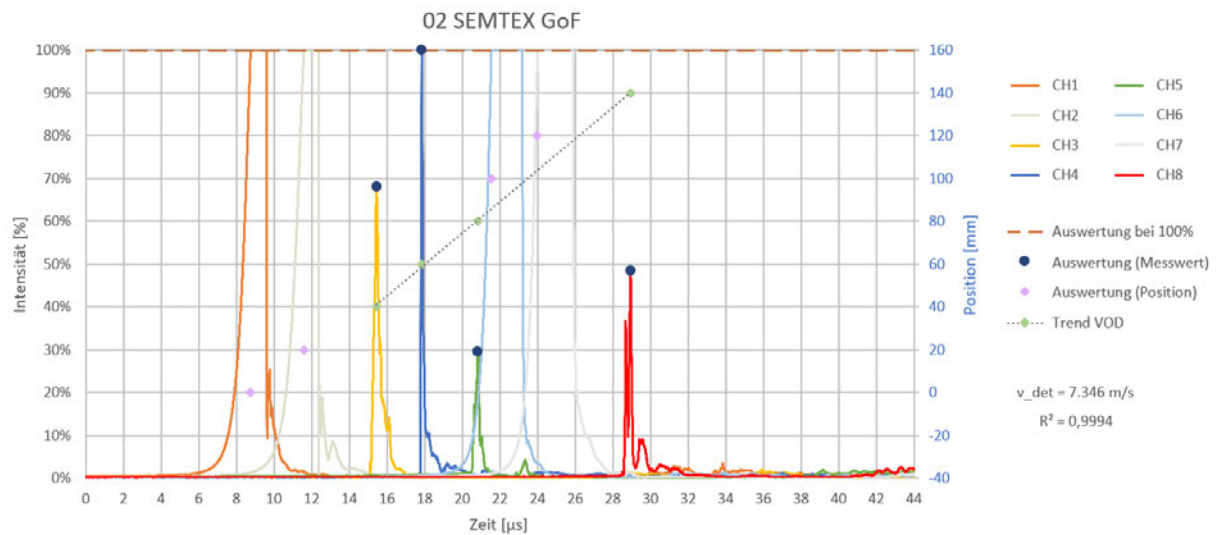


Anlage 6 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 01 SEMTEX

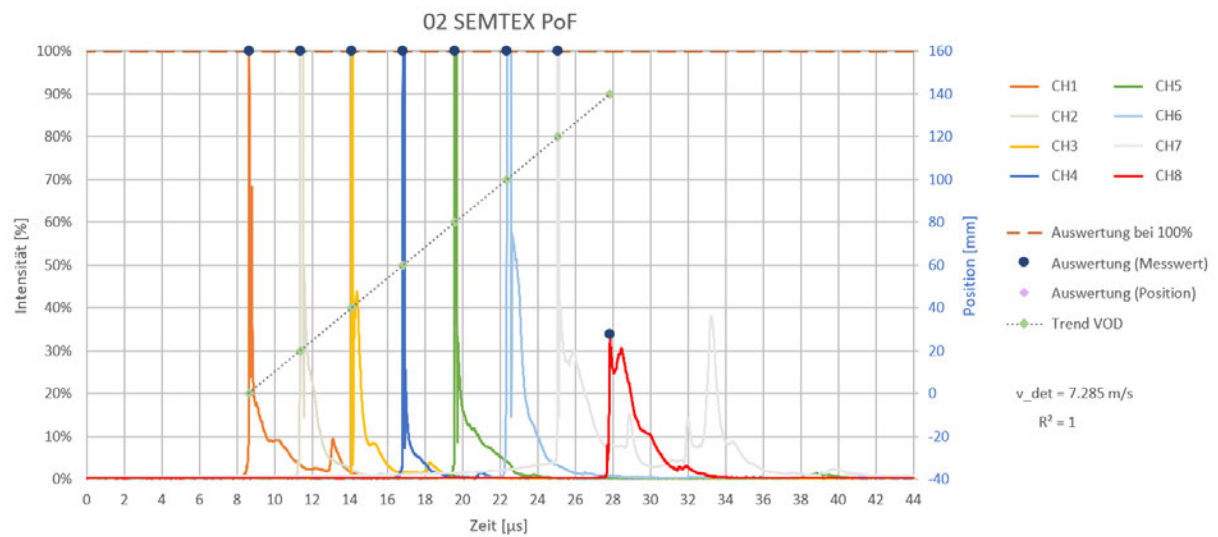


Anlage 7 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 01 SEMTEX

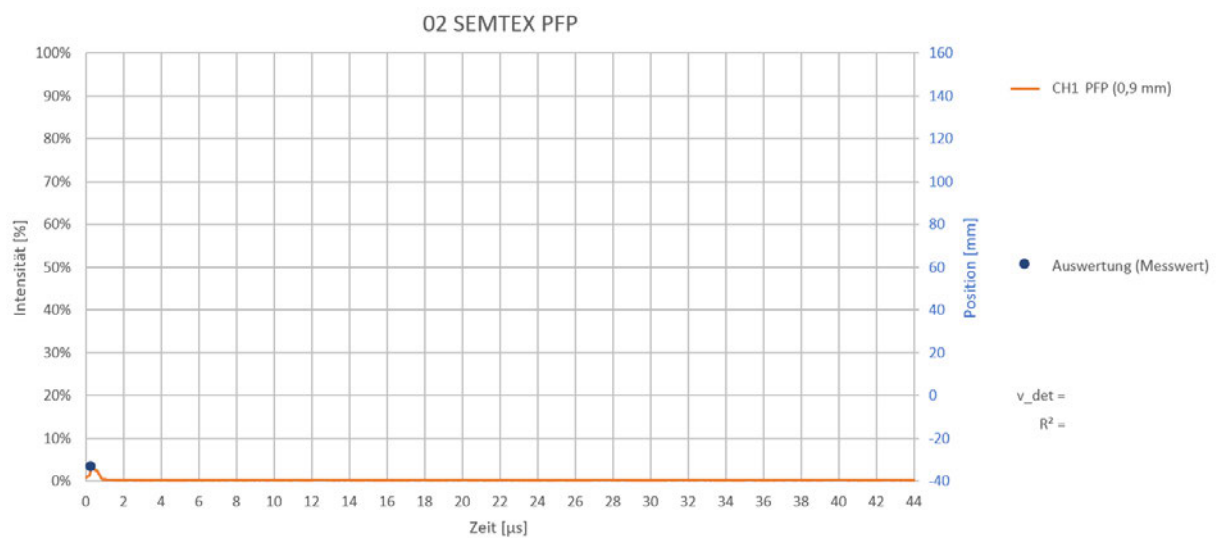




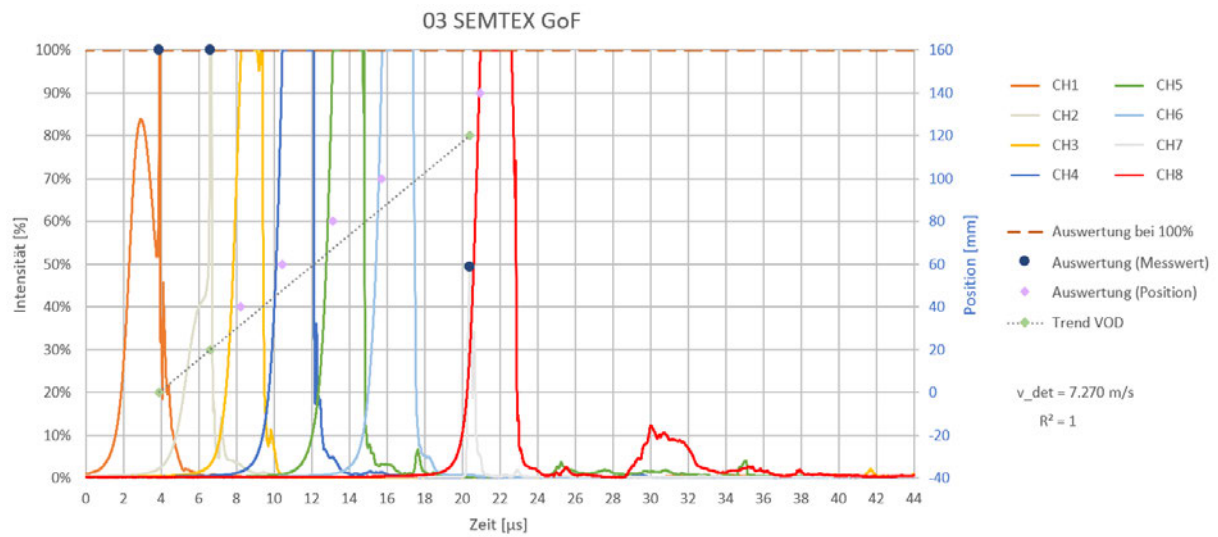
Anlage 8 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 02 SEMTEX



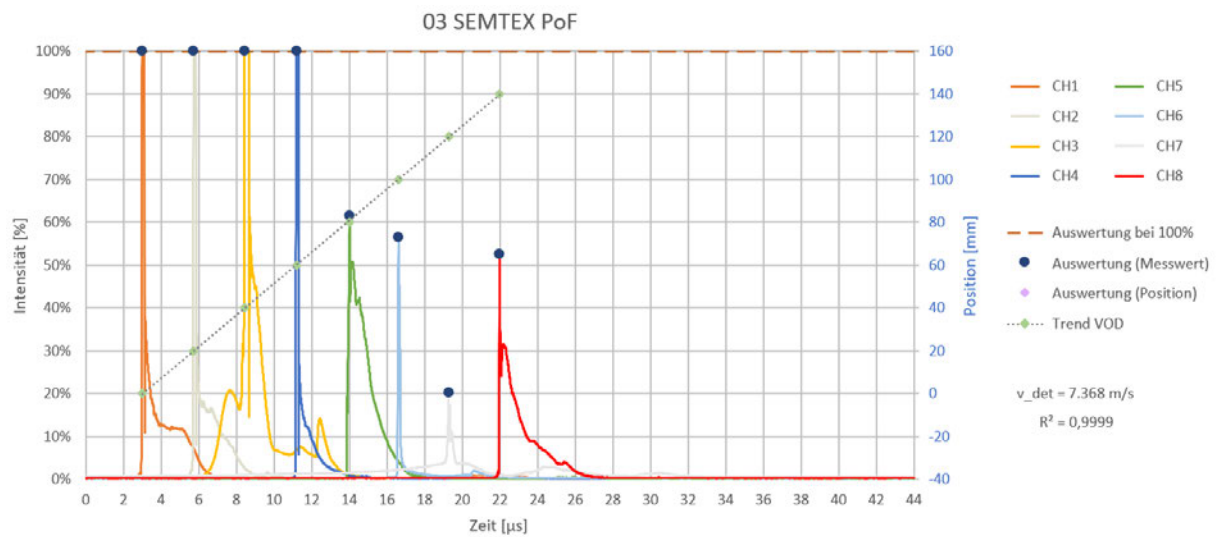
Anlage 9 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 02 SEMTEX



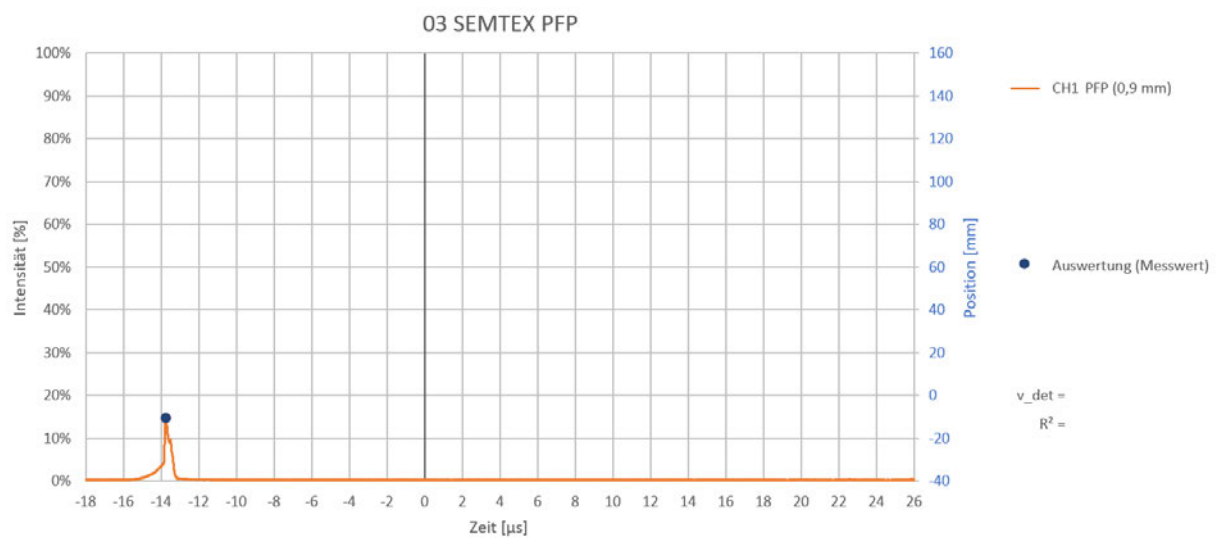
Anlage 10 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 02 SEMTEX



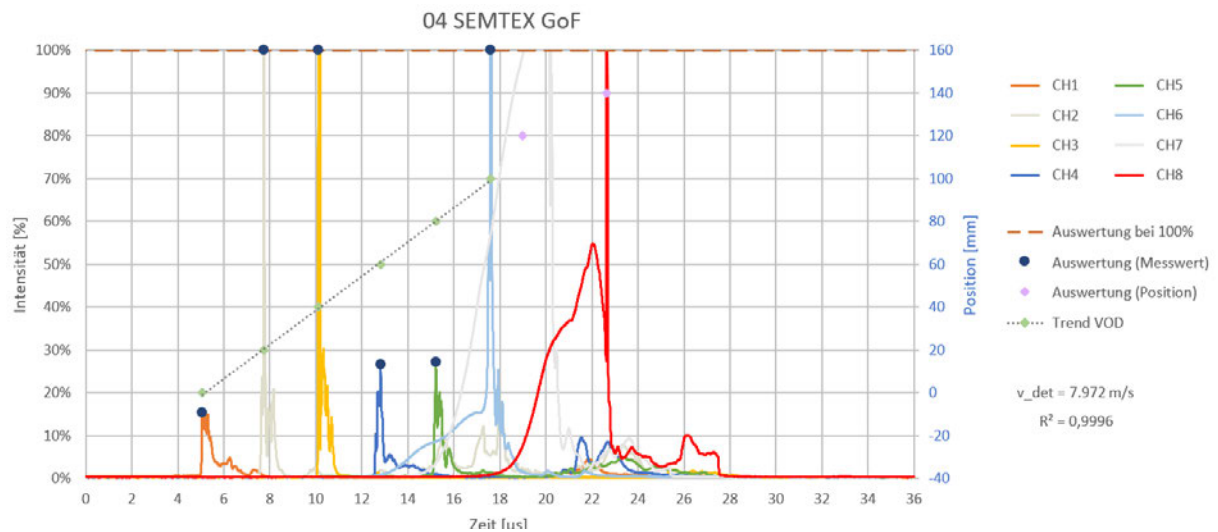
Anlage 11 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 03 SEMTEX



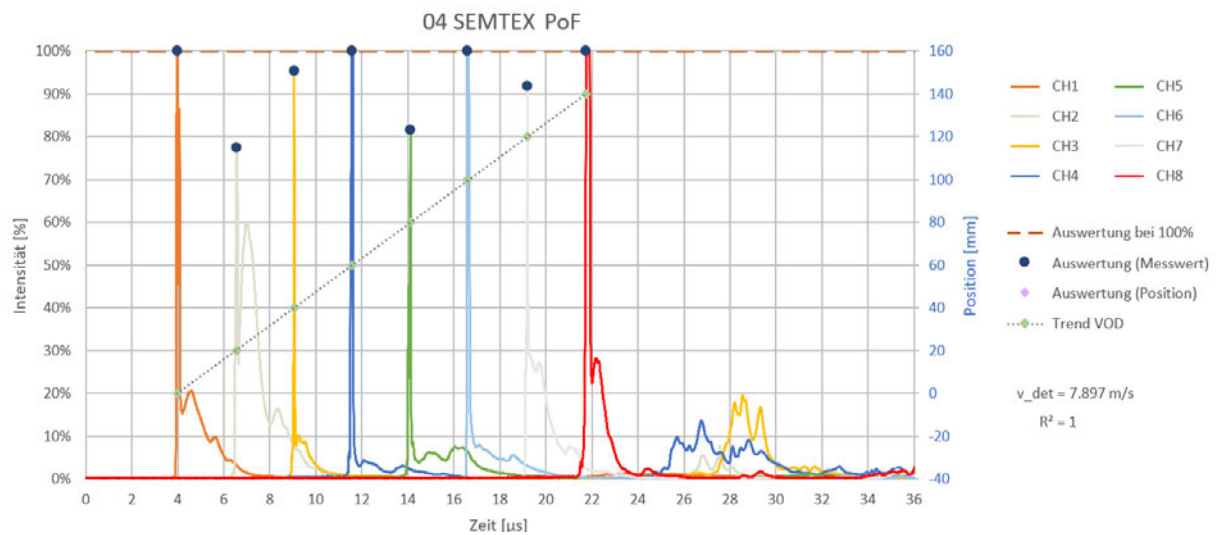
Anlage 12 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 03 SEMTEX



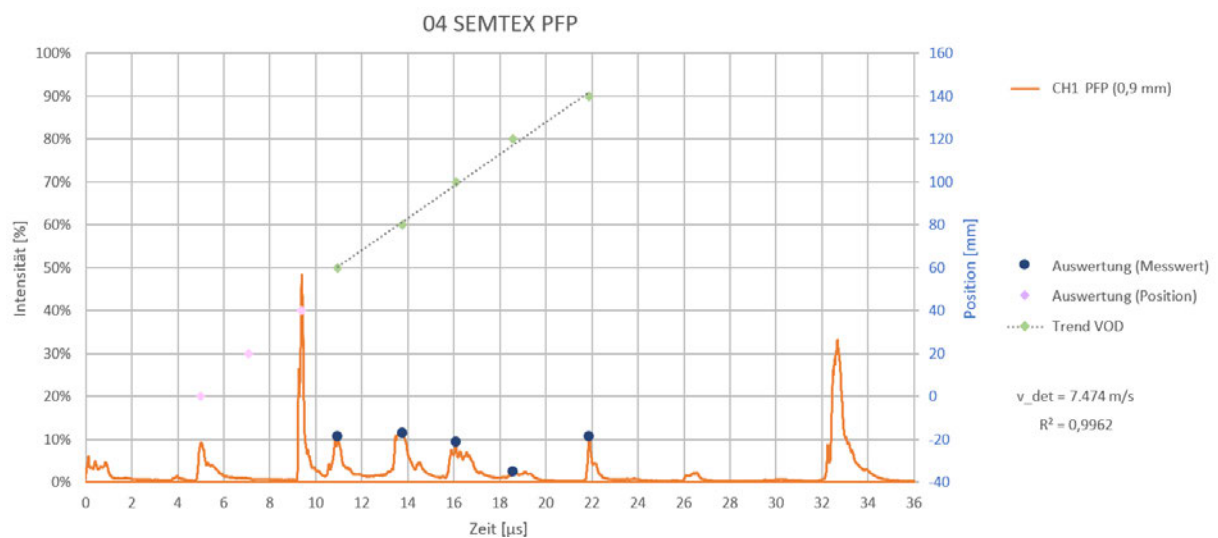
Anlage 13 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 03 SEMTEX



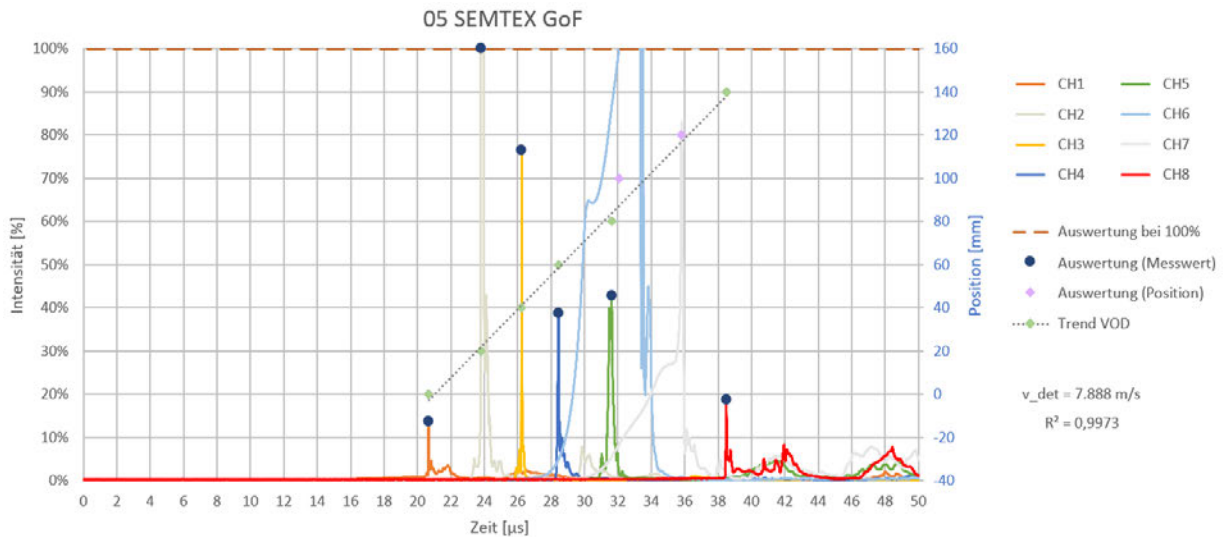
Anlage 14 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 04 SEMTEX



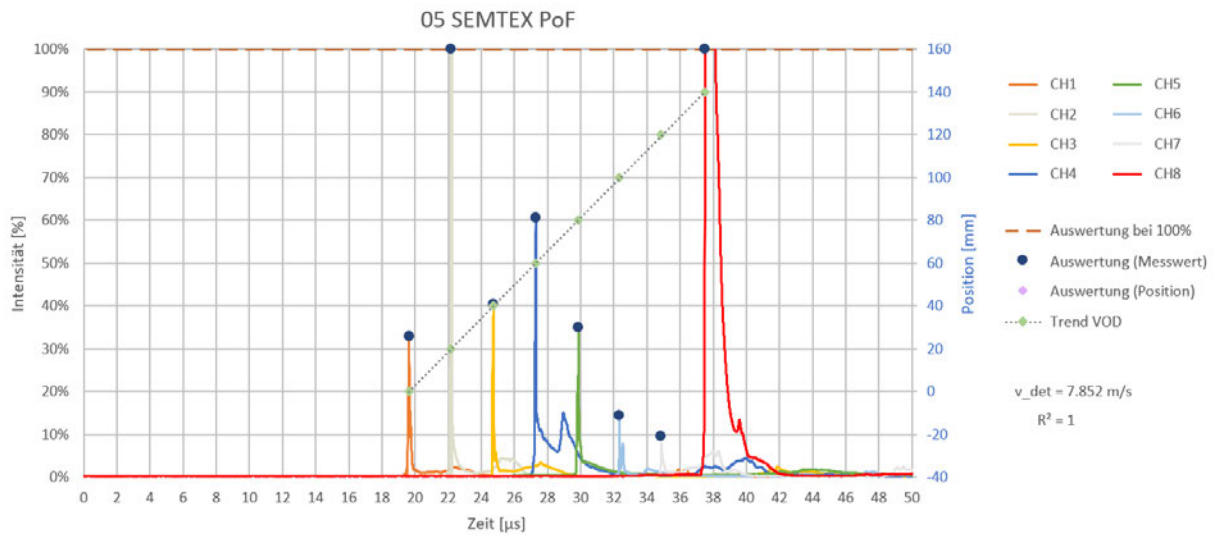
Anlage 15 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 04 SEMTEX



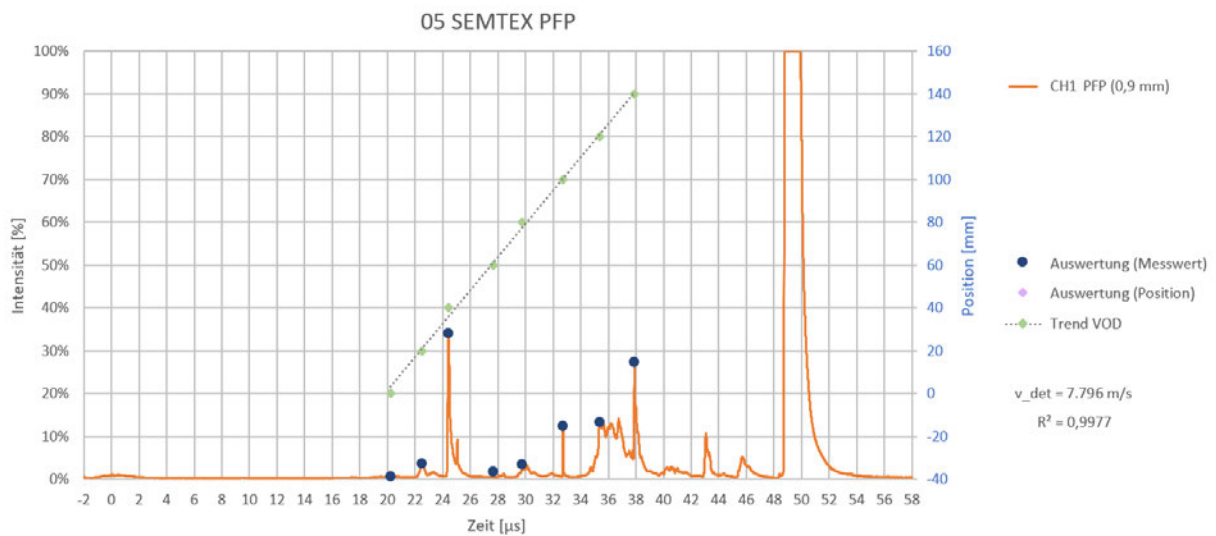
Anlage 16 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 04 SEMTEX



Anlage 17 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 05 SEMTEX

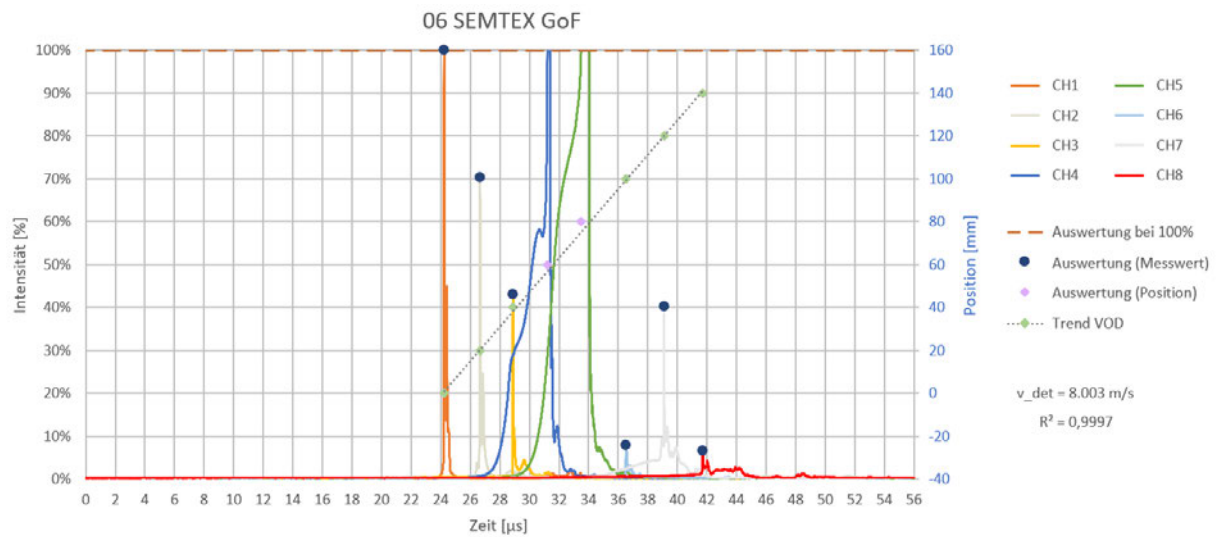


Anlage 18 Graph PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 05 SEMTEX

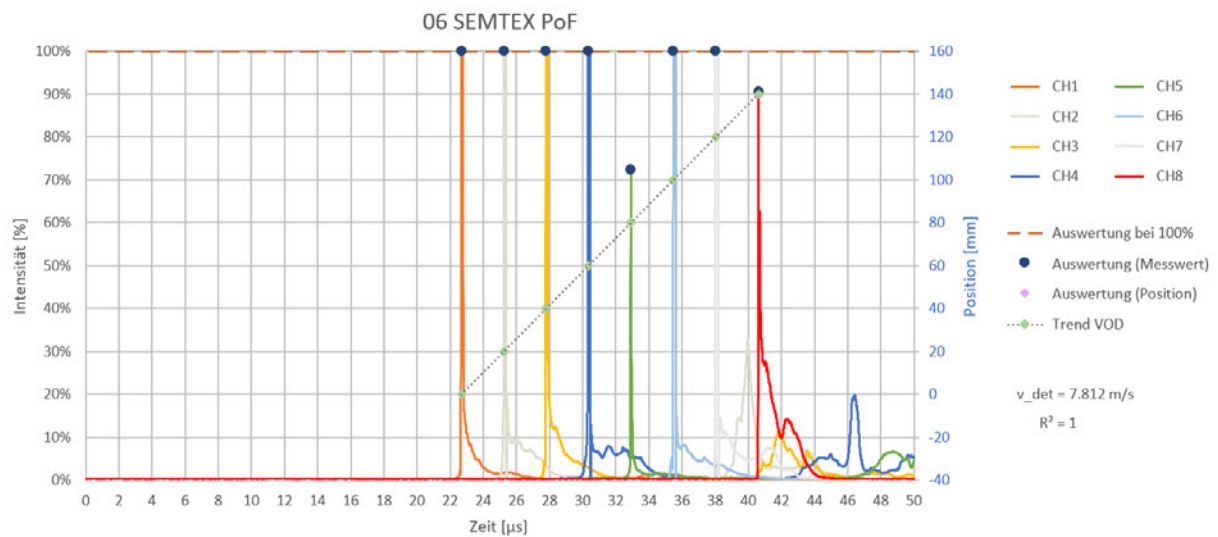


Anlage 19 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 05 SEMTEX

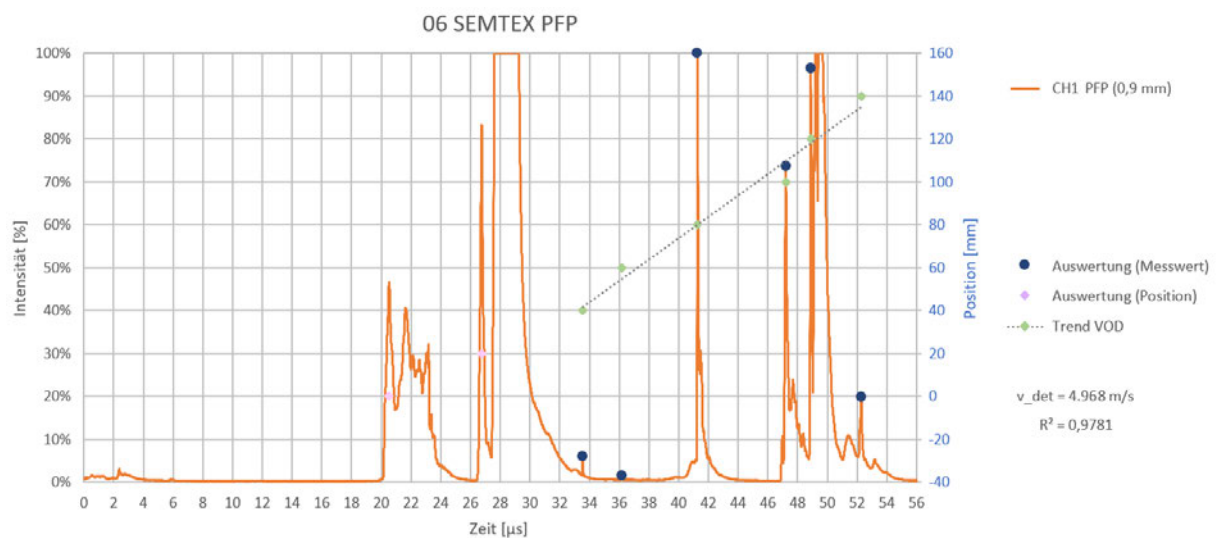




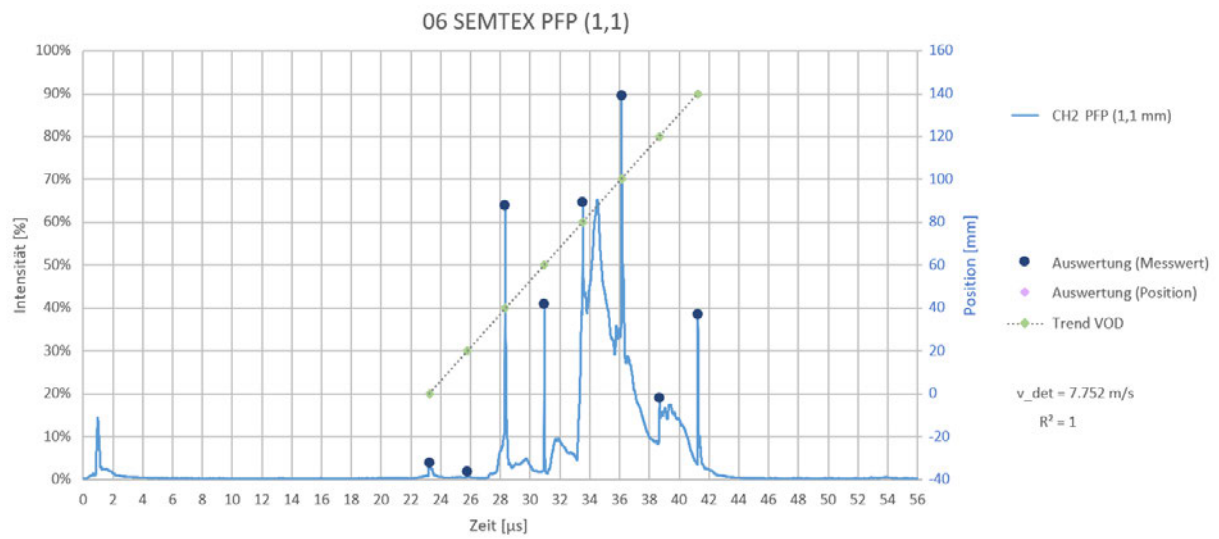
Anlage 20 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 06 SEMTEX



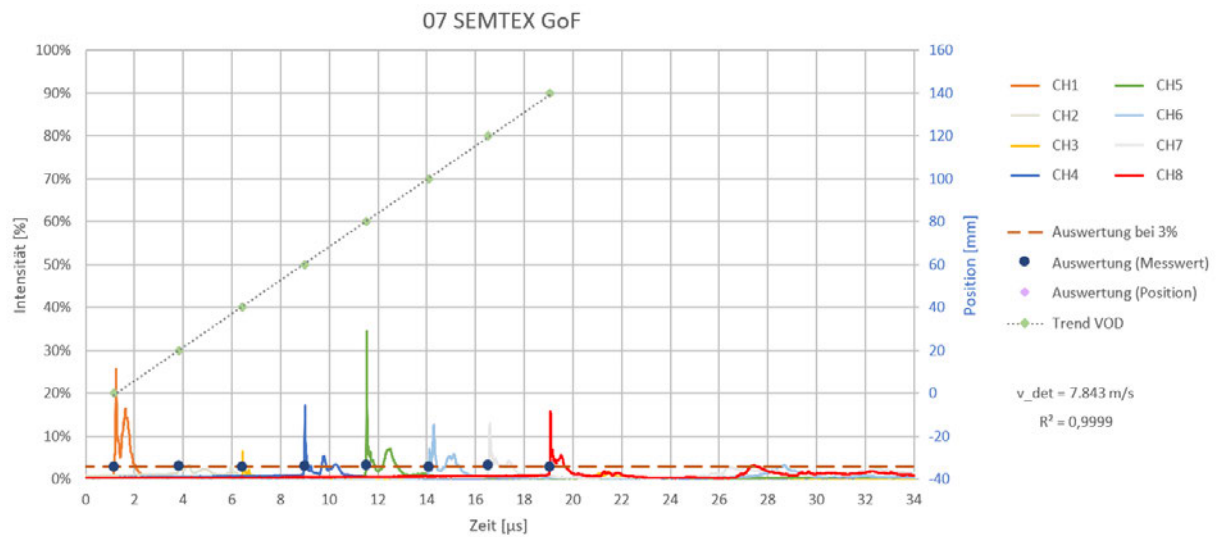
Anlage 21 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 06 SEMTEX



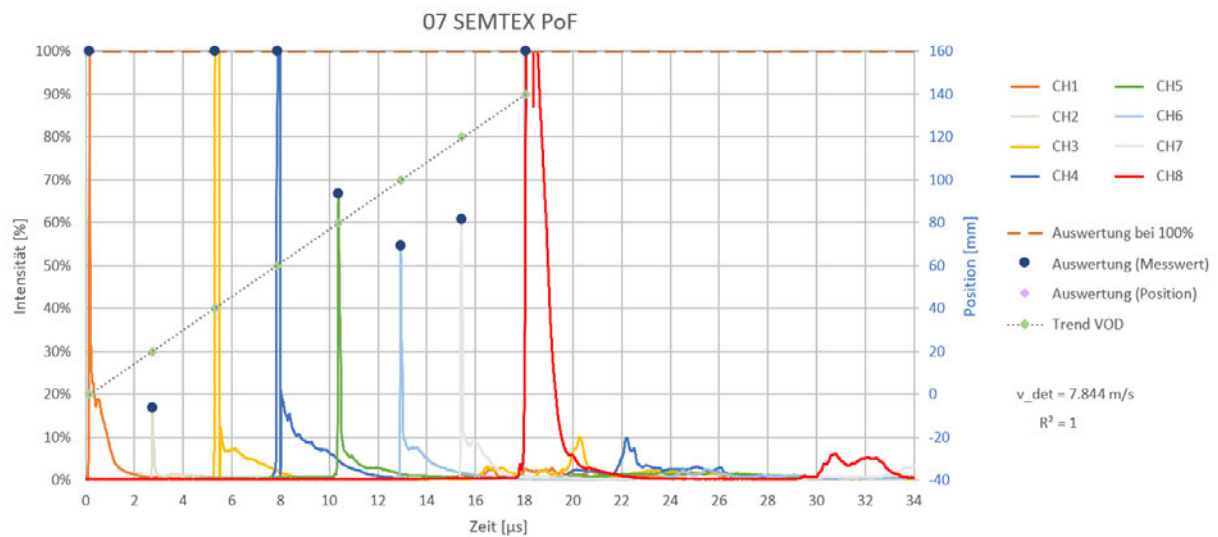
Anlage 22 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 06 SEMTEX



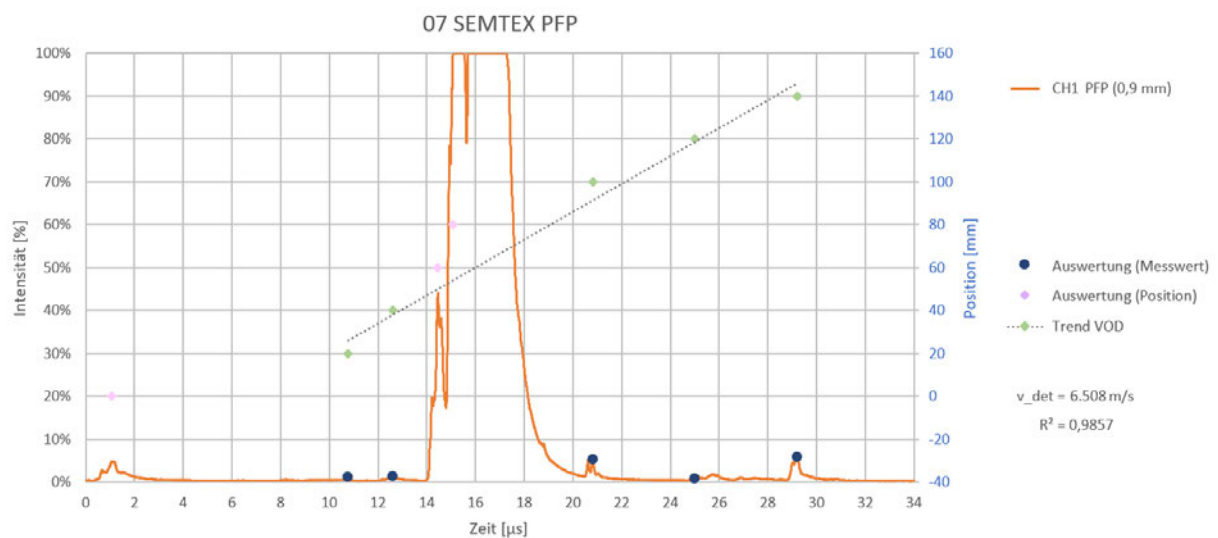
Anlage 23 PFP (1,1 mm) Zusatz – gefilterte, eigene Auswertung Messung 06 SEMTEX



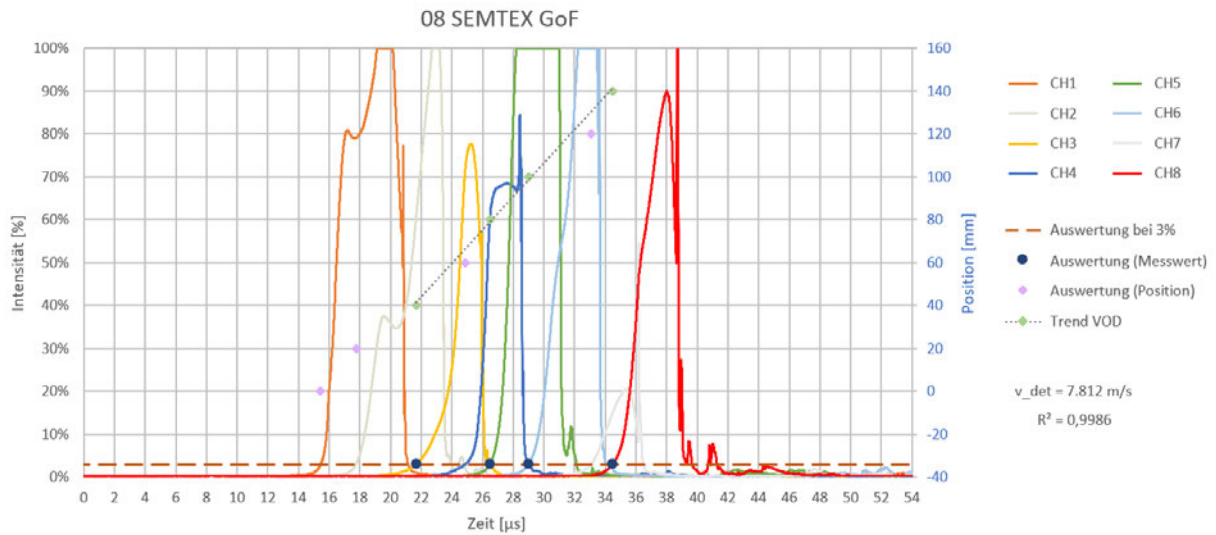
Anlage 24 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 07 SEMTEX



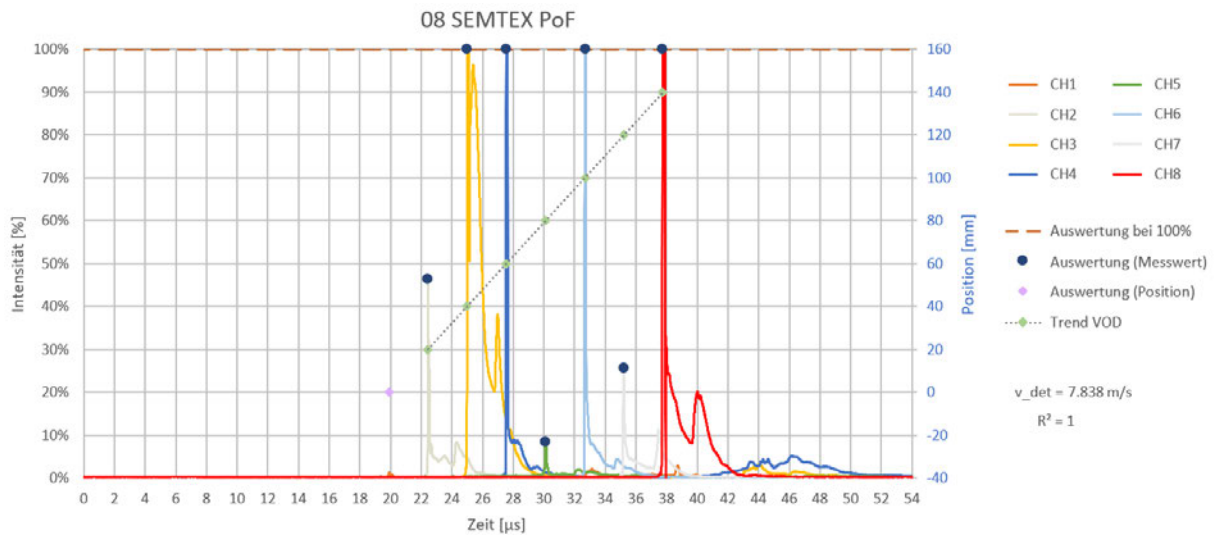
Anlage 25 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 07 SEMTEX



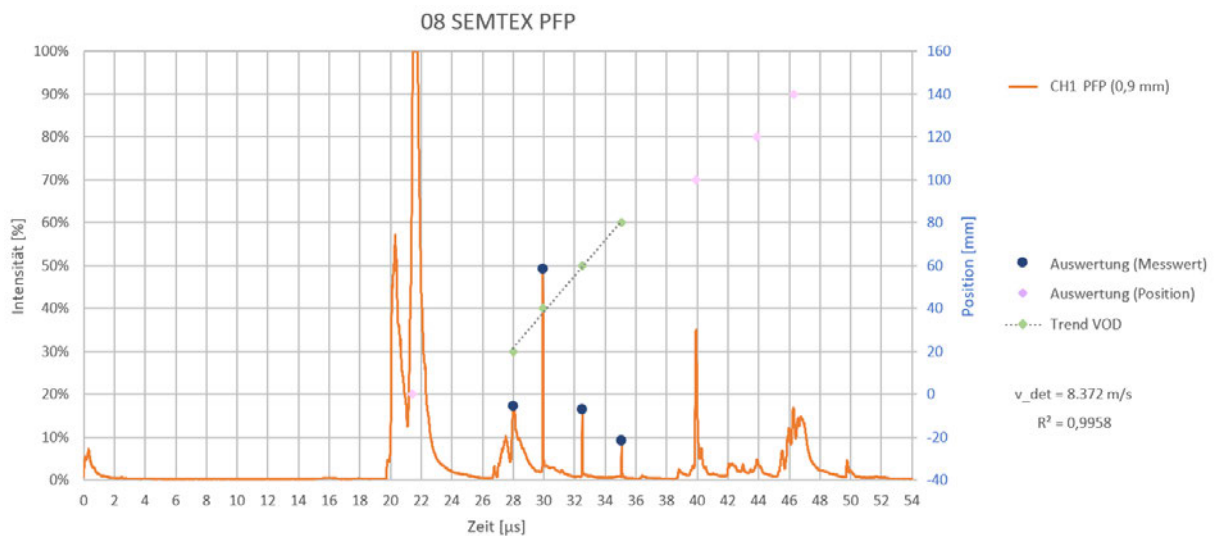
Anlage 26 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 07 SEMTEX



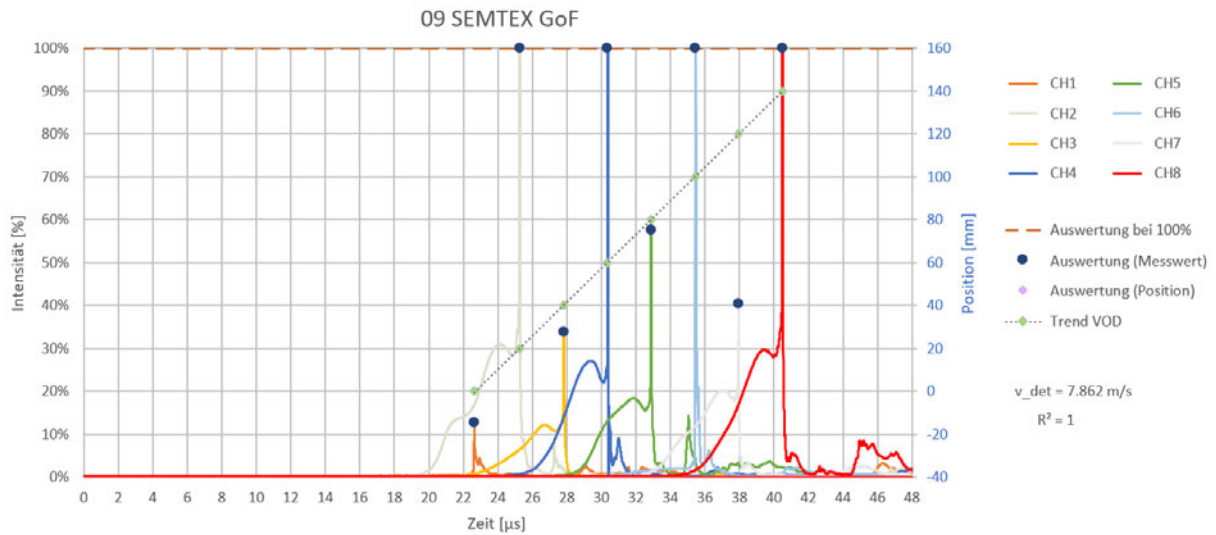
Anlage 27 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 08 SEMTEX



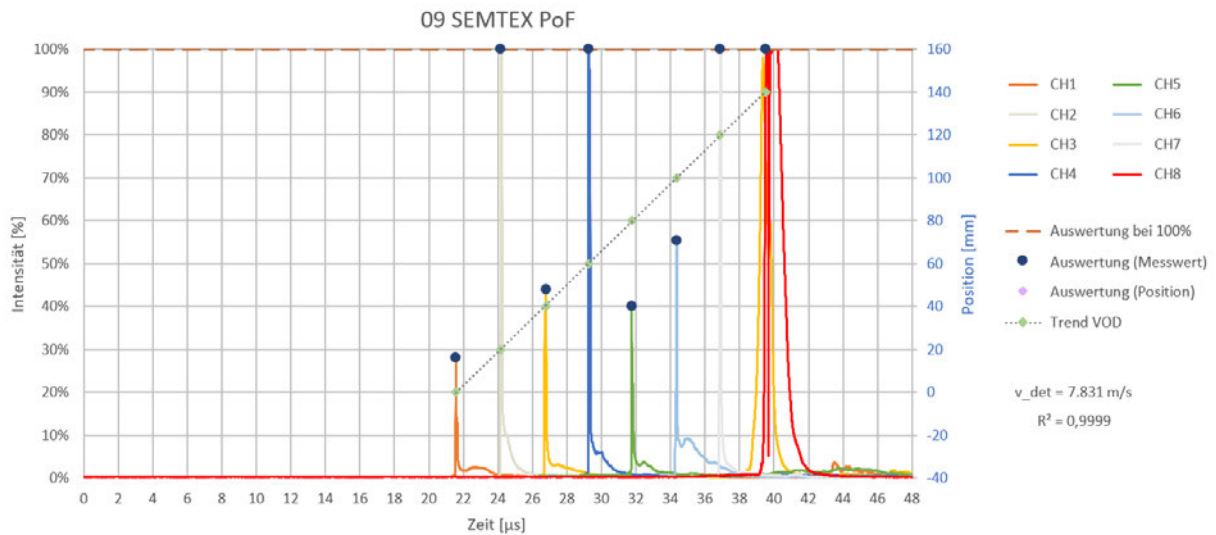
Anlage 28 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 08 SEMTEX



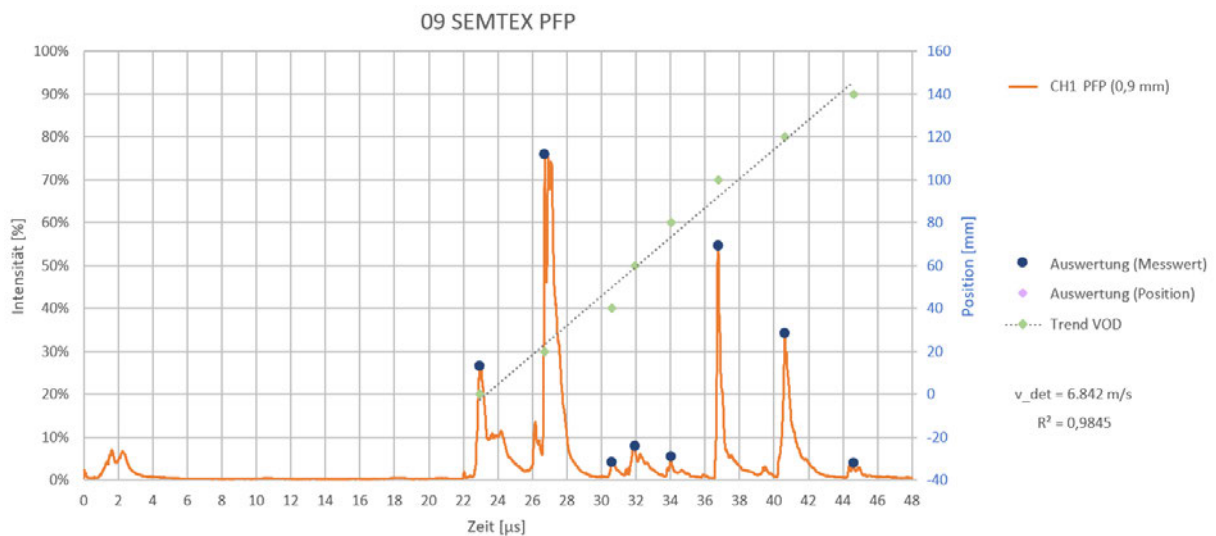
Anlage 29 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 08 SEMTEX



Anlage 30 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 09 SEMTEX

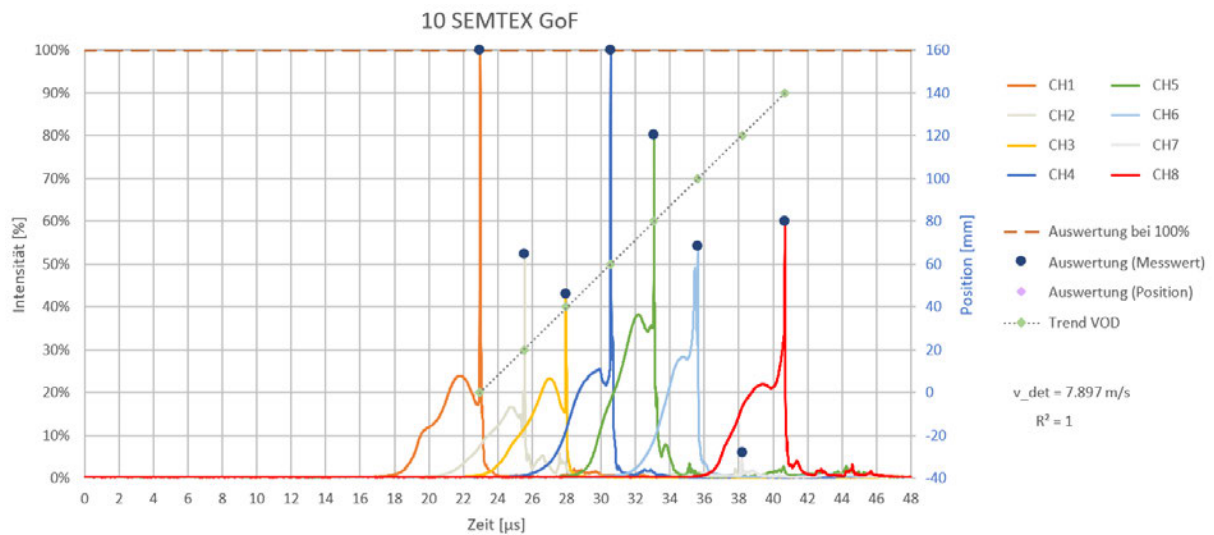


Anlage 31 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 09 SEMTEX

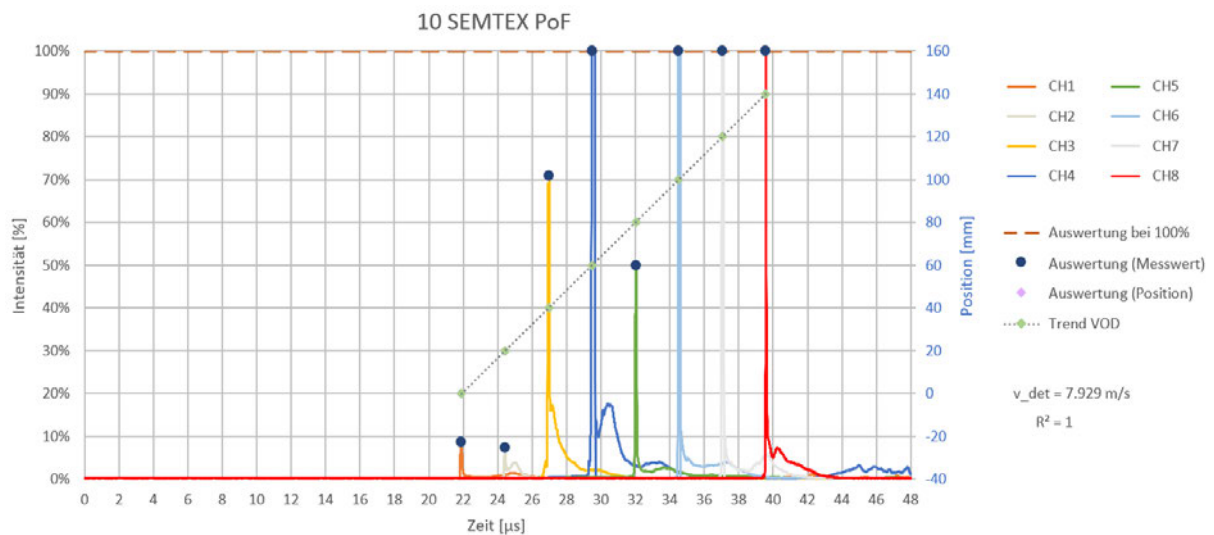


Anlage 32 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 09 SEMTEX

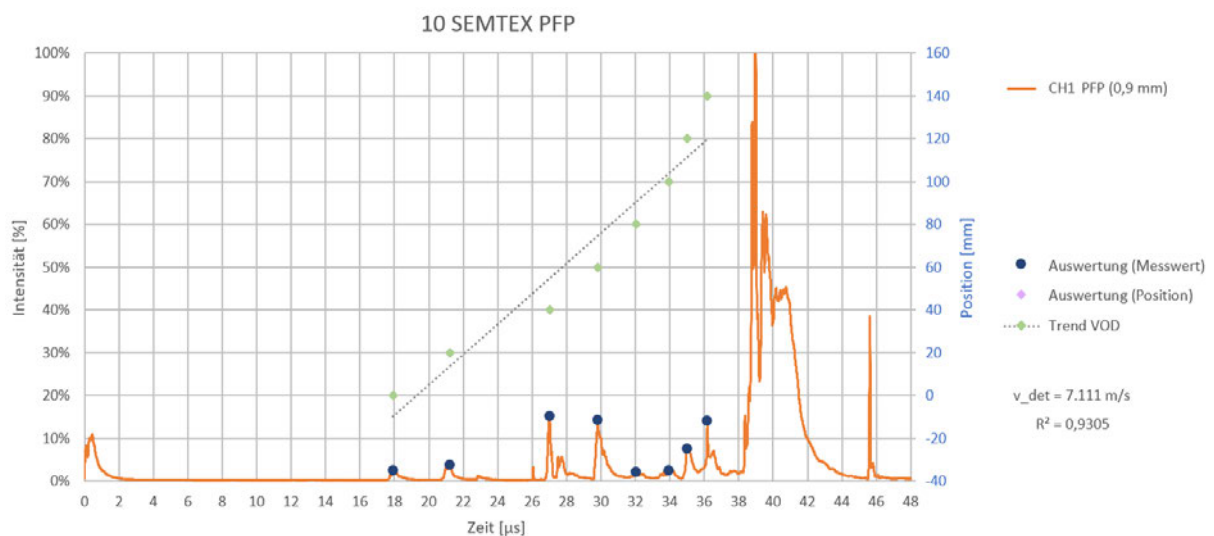




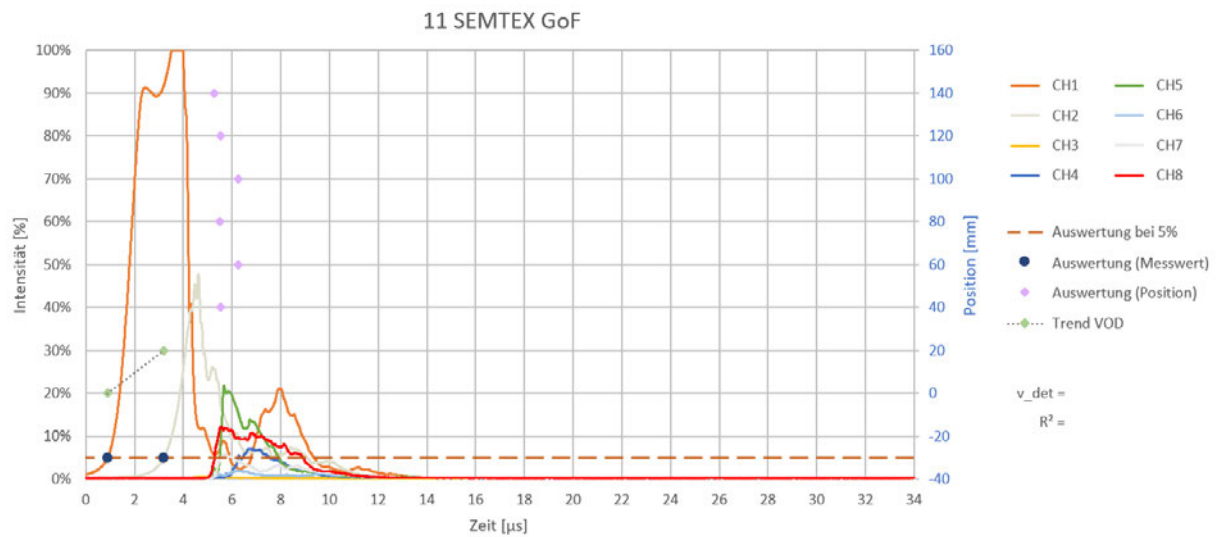
Anlage 33 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 10 SEMTEX



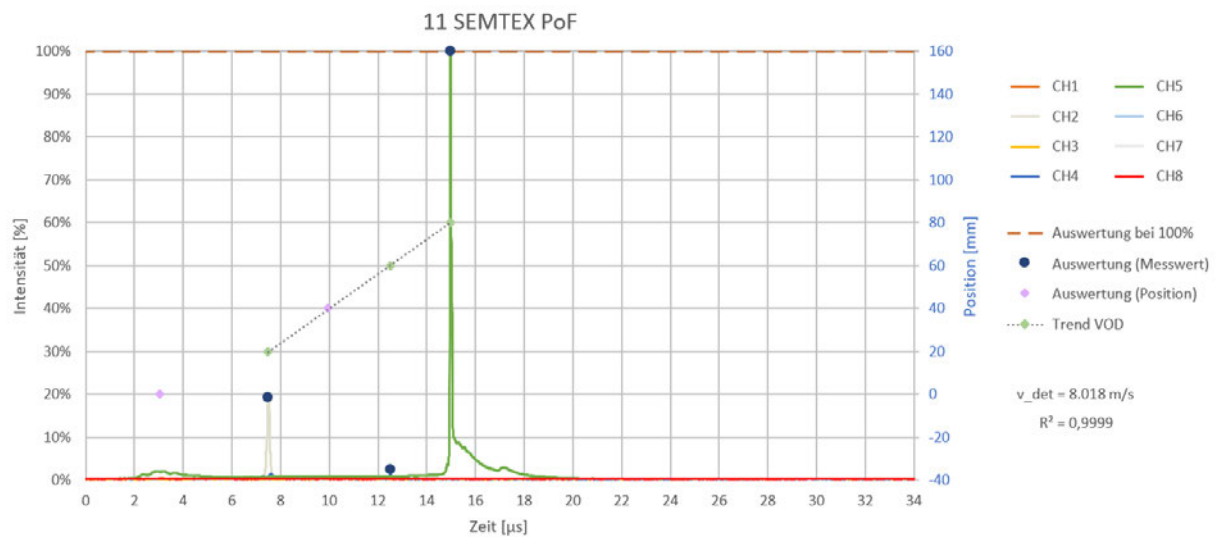
Anlage 34 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 10 SEMTEX



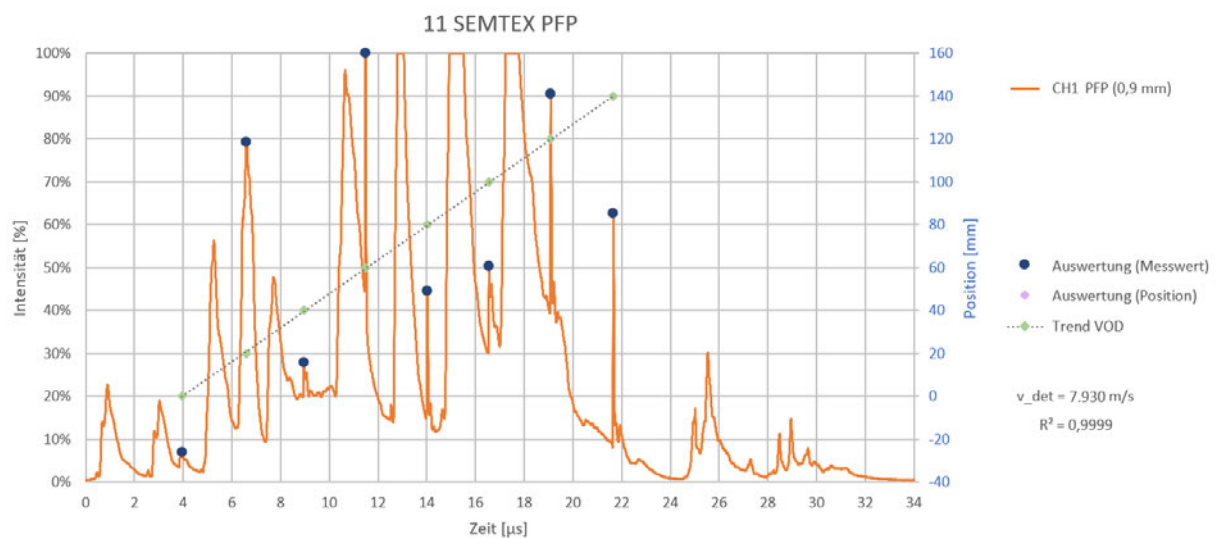
Anlage 35 PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 10 SEMTEX



Anlage 36 GoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 11 SEMTEX

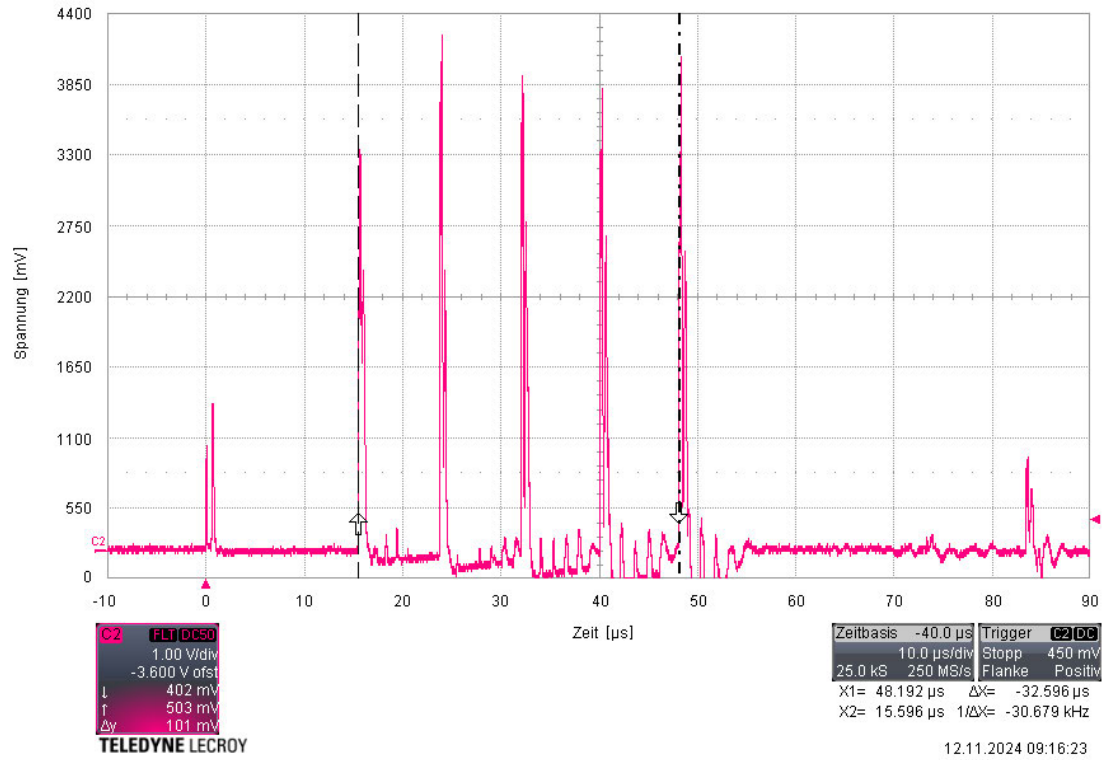


Anlage 37 PoF – gefilterte, eigene Auswertung Messung 11 SEMTEX

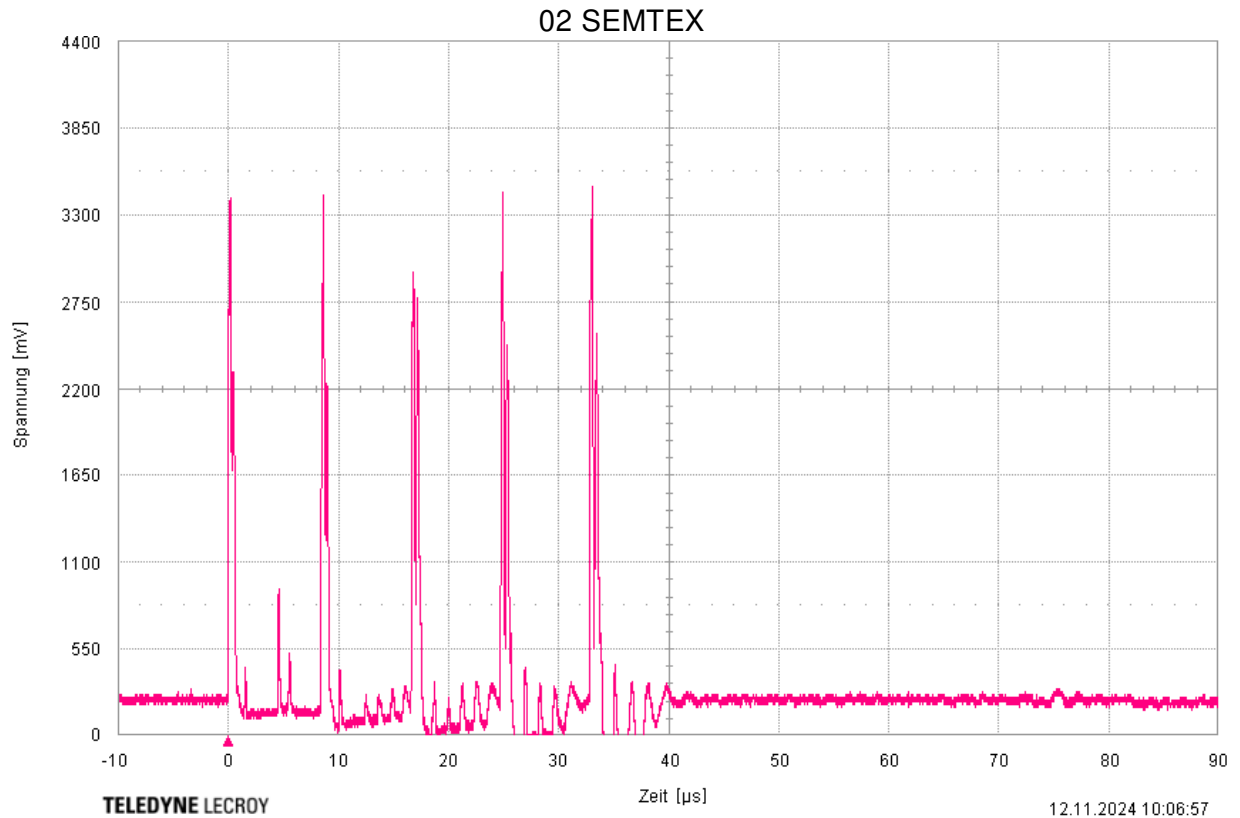


Anlage 38 Graph PFP – gefilterte, eigene Auswertung Messung 11 SEMTEX

## D Graphen des Oszilloskops vom LeCroy

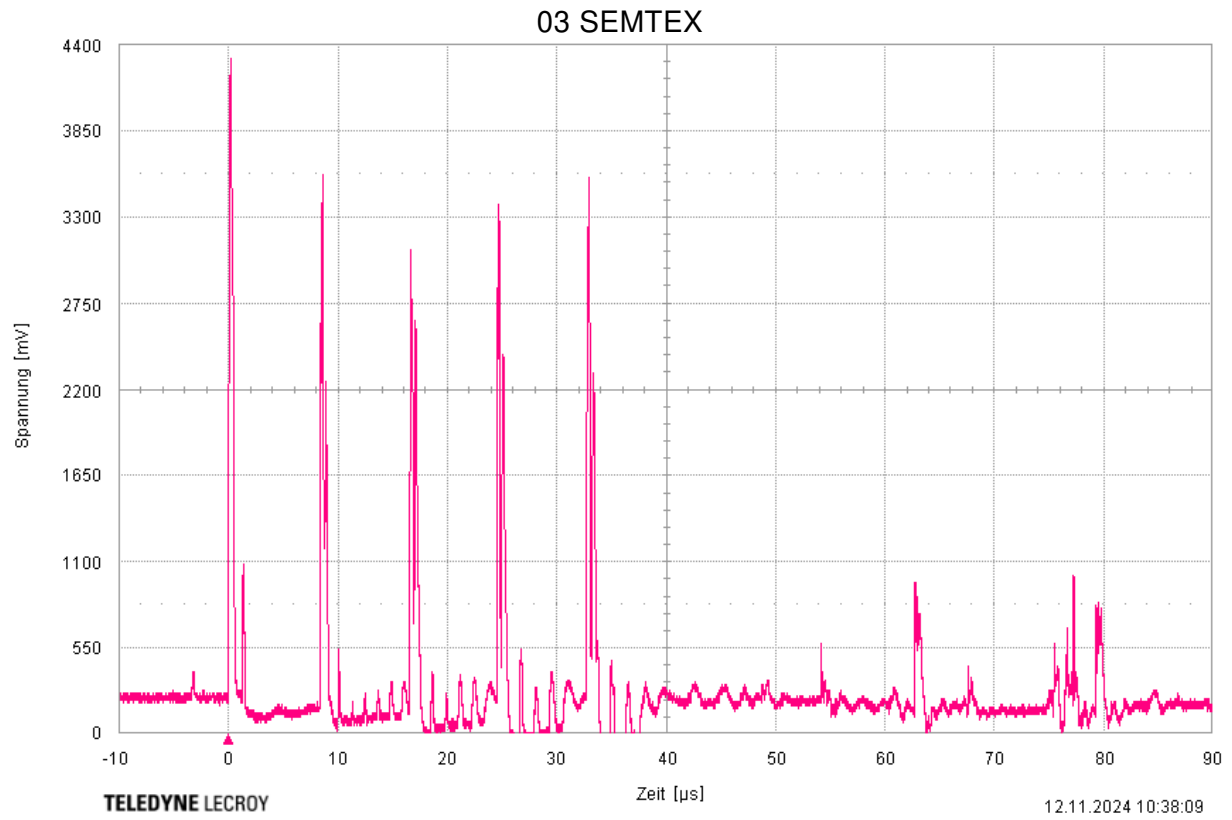


Anlage 39 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 01 SEMTEX

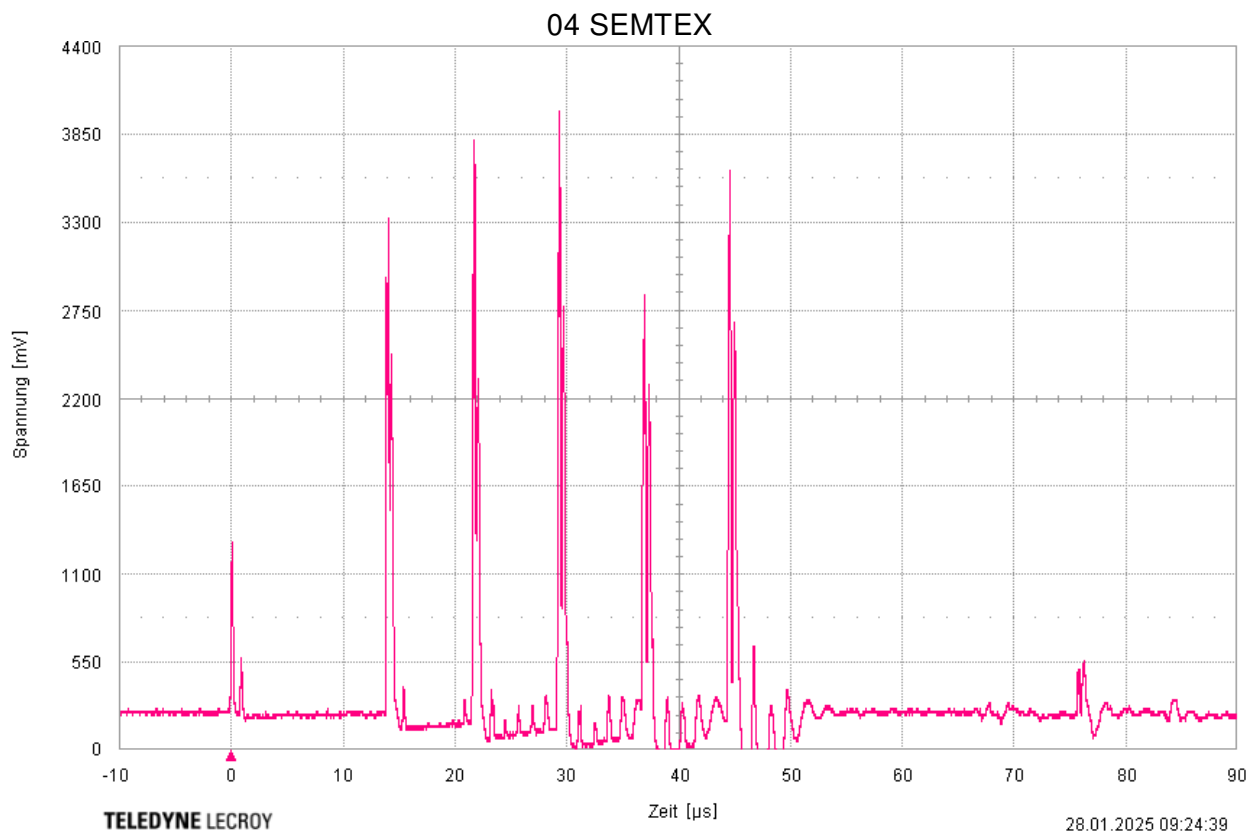


Anlage 40 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 02 SEMTEX

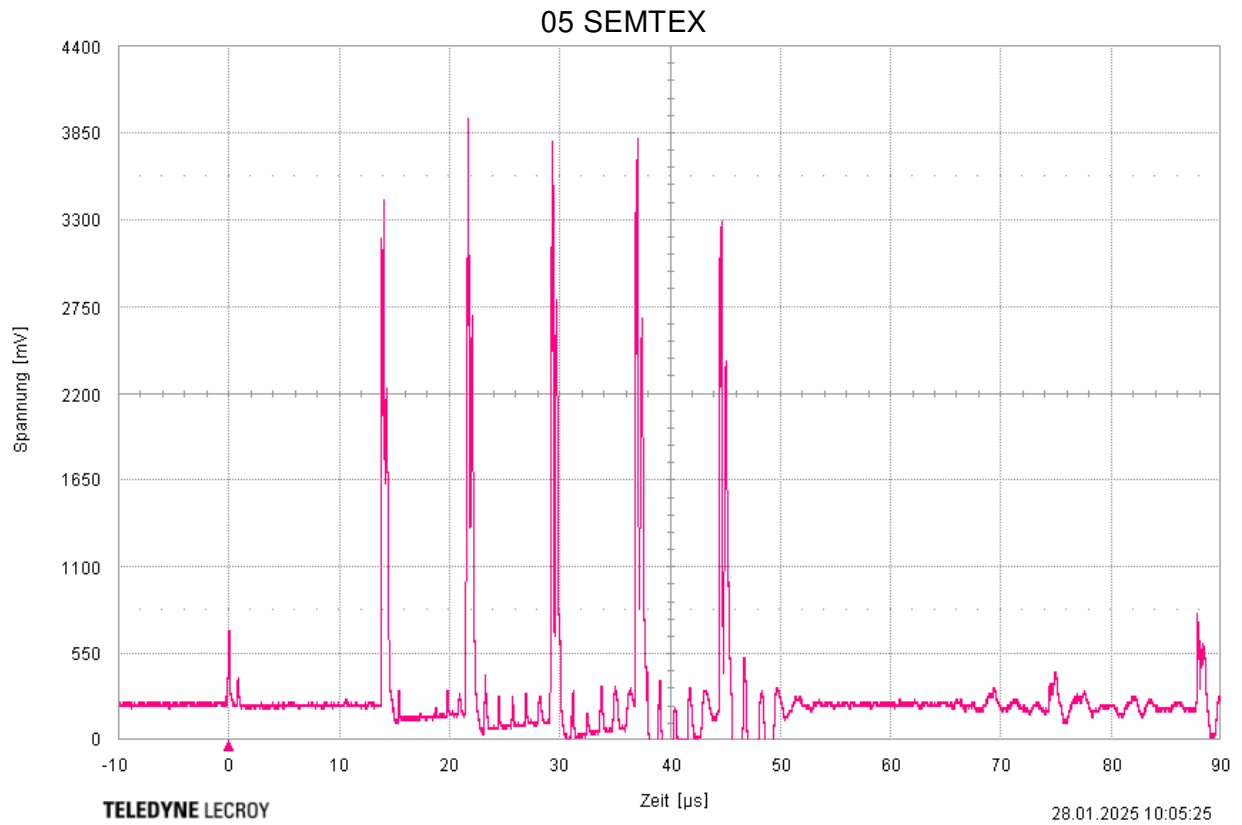




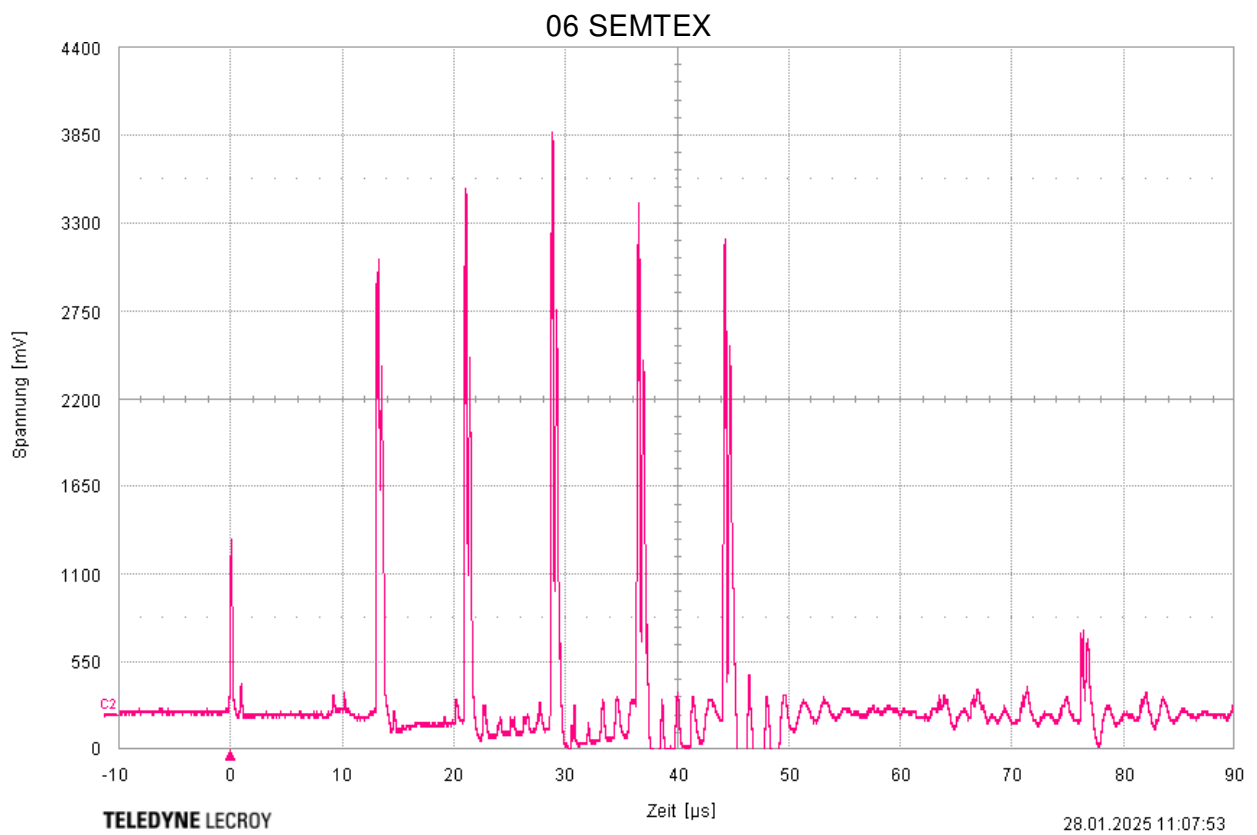
Anlage 41 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 03 SEMTEX



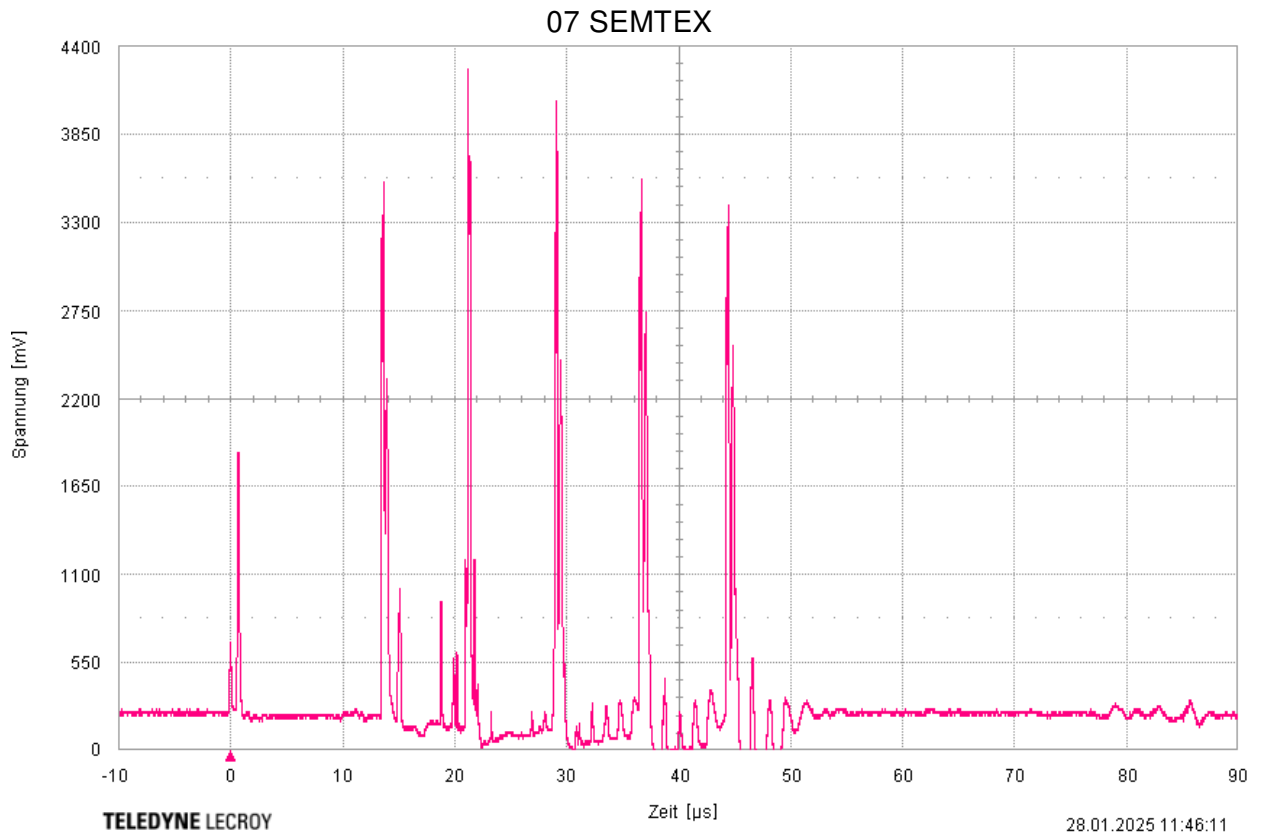
Anlage 42 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 04 SEMTEX



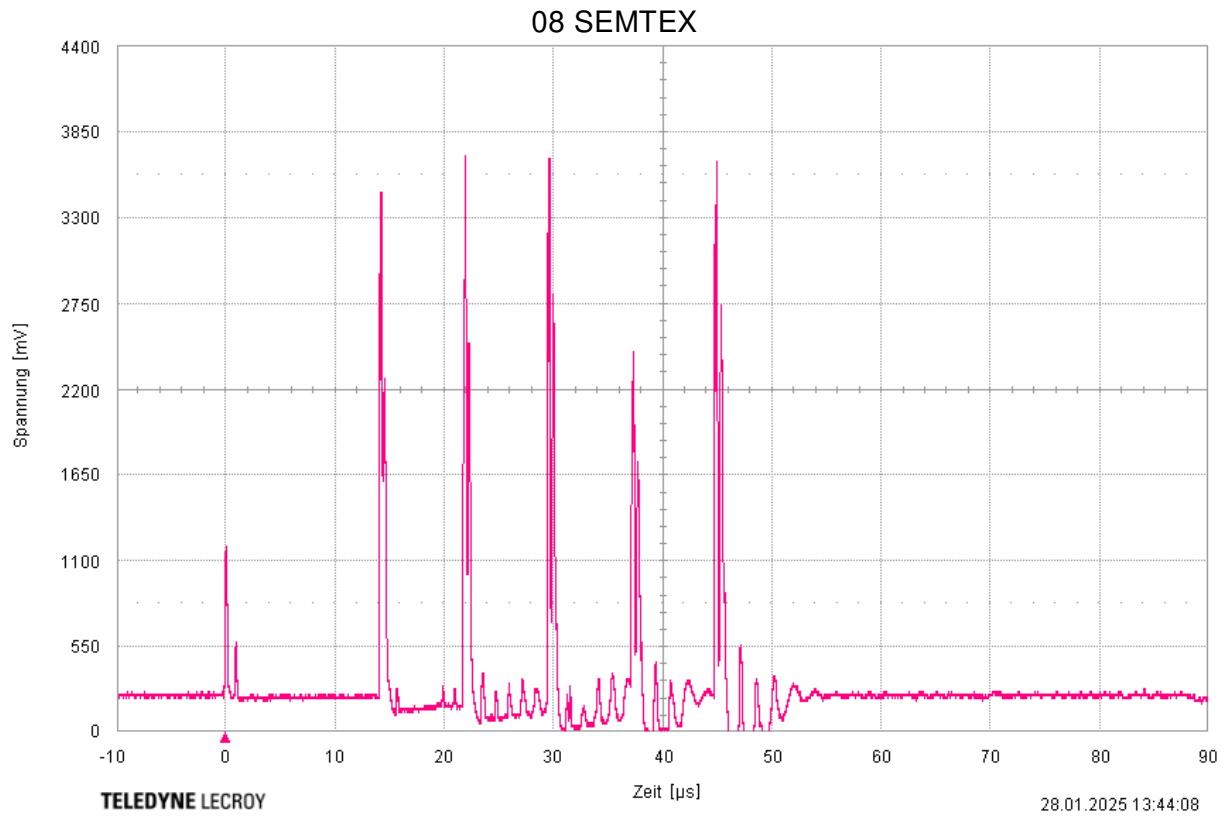
Anlage 43 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 05 SEMTEX



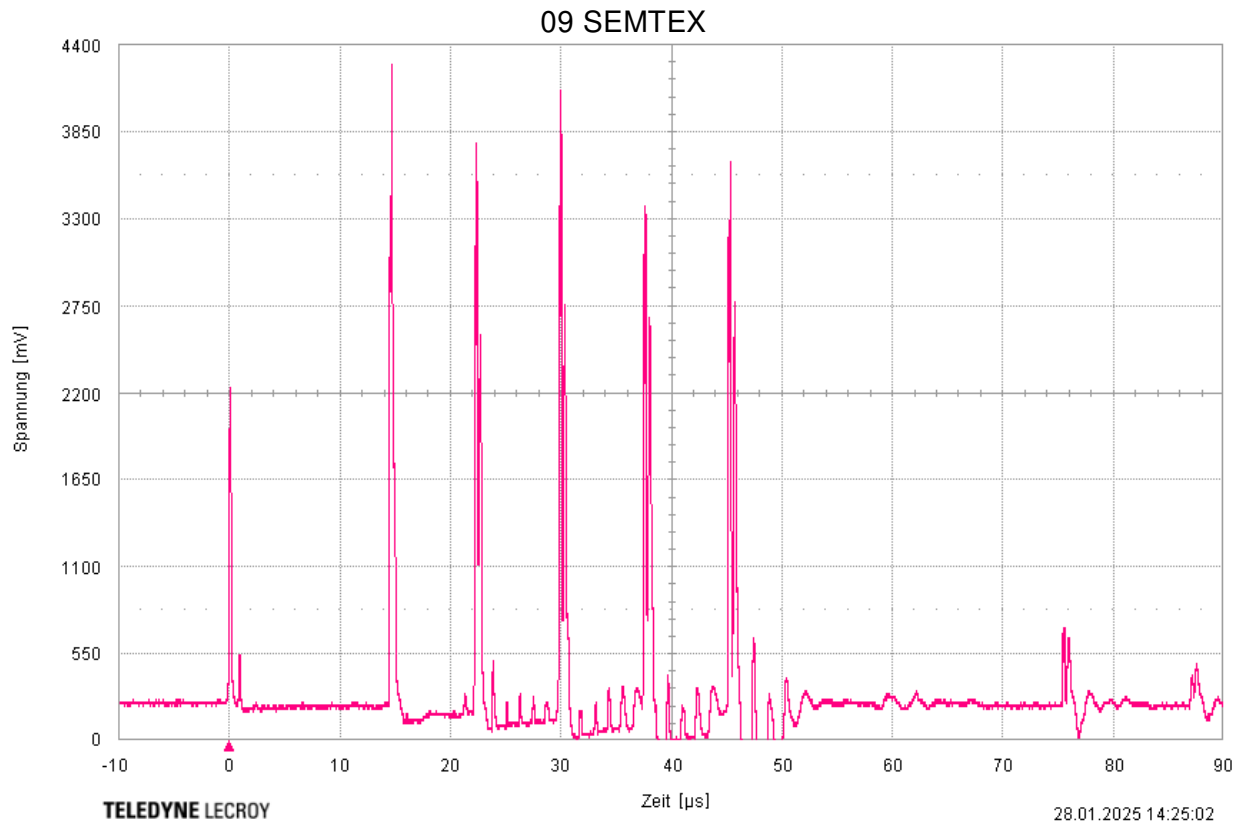
Anlage 44 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 06 SEMTEX



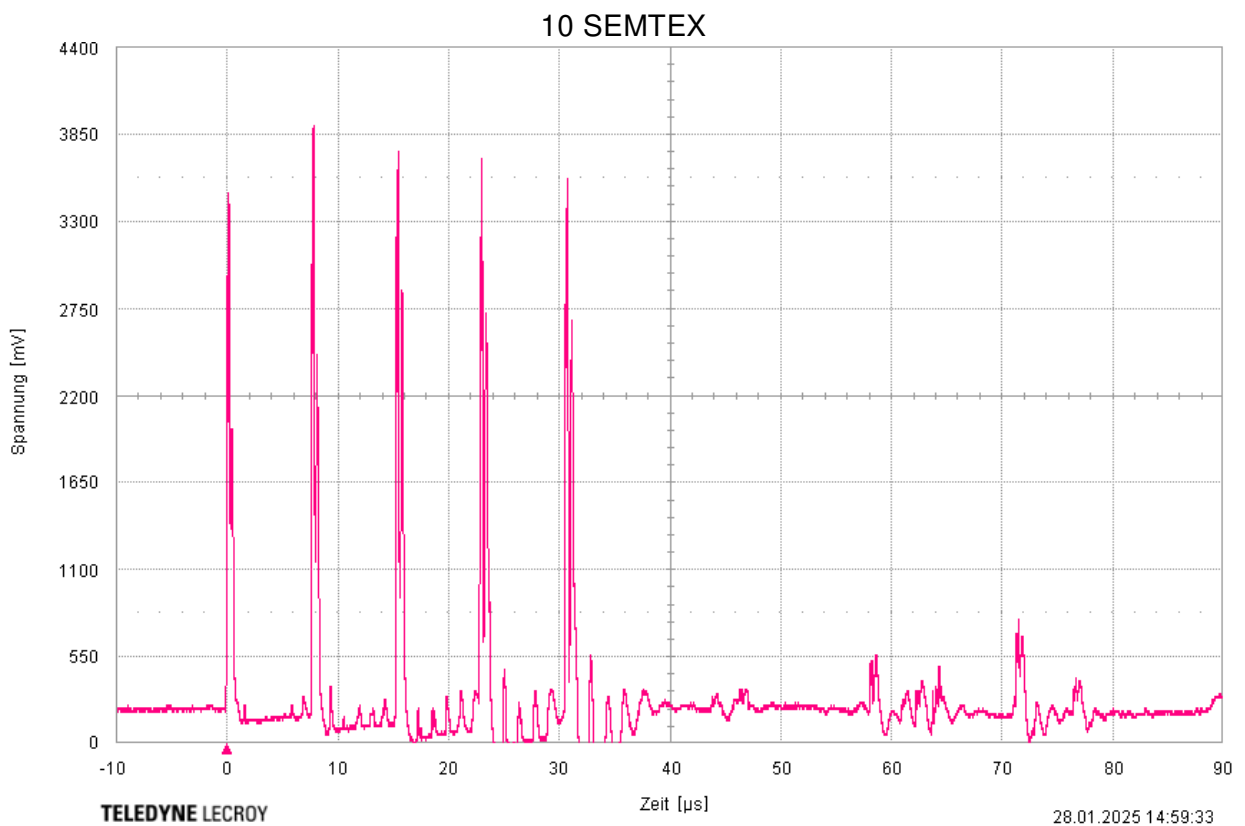
Anlage 45 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 07 SEMTEX



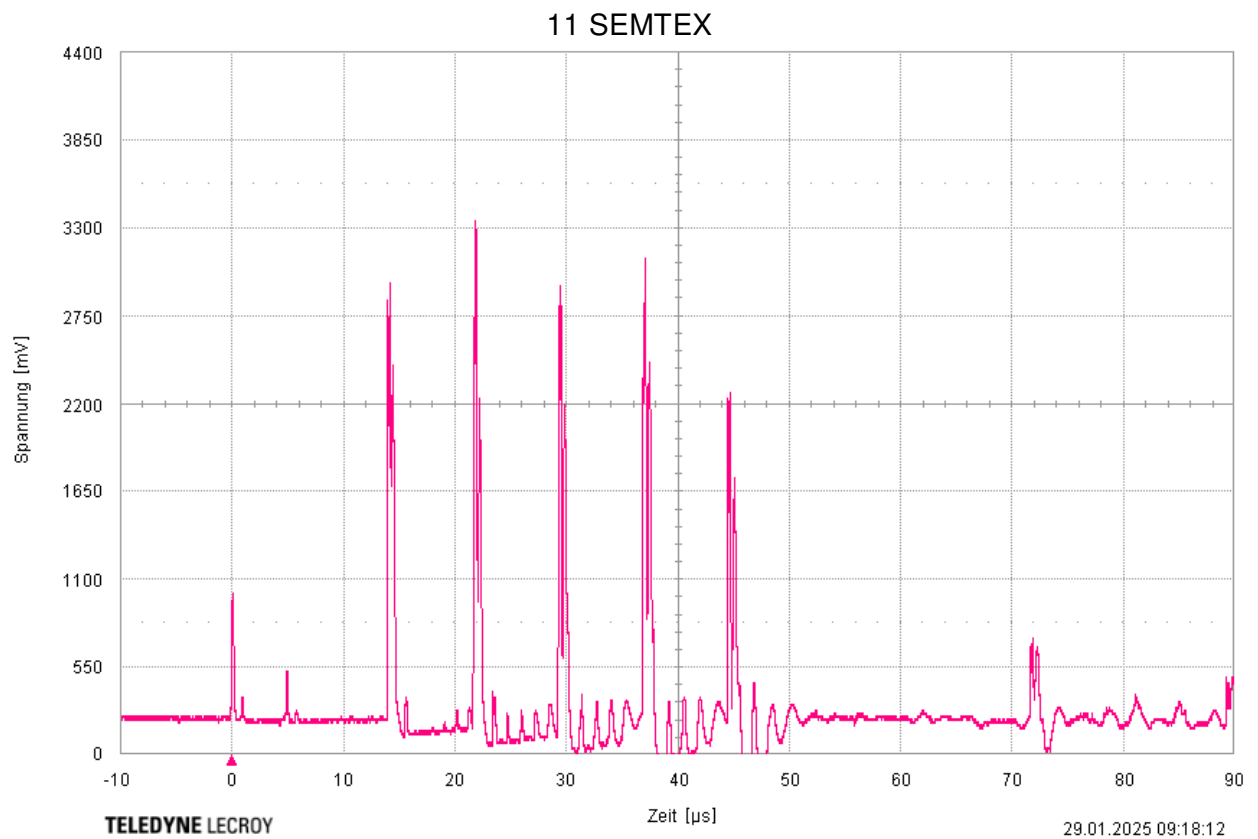
Anlage 46 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 08 SEMTEX



Anlage 47 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 09 SEMTEX



Anlage 48 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 10 SEMTEX



Anlage 49 Graph - Oszilloskop LeCroy Messung 11 SEMTEX

## 7 Quellen

### Quellenverzeichnis

- [1] Baumann, Bernd: Physik für Ingenieure – Bachelor Basics, Haan-Gruiten (Verlag Europa-Lehrmittel), 2016
- [2] Baumann, Karlheinz: Messungen der Detonationsgeschwindigkeit mit Folgerungen für die bergmännische Schießarbeit, Freiburger Forschungshefte (1958) A 79, S. 12-16
- [3] Dr. Keßler, Almuth; Dr. Radies, Hendrik: Aufbau, Eigenschaften und Wirkweise von Explosivstoffen – Explosivstoffseminar I. BG RCI, Unterlüß (Rheinmetall Waffe und Munition), 2021, Vortrag
- [4] Explosia: SEMTEX 10-SE, Produktkatalog (2016) S.21
- [5] FS.com, Alexander: Wie lassen sich verschiedene Arten von Verlustfaktoren bei Glasfasern reduzieren?, 2025, <https://www.fs.com/de/blog/wie-lassen-sich-verschiedene-arten-von-verlustfaktoren-bei-glasfasern-reduzieren-16053.html>, Stand [27.03.2025]
- [6] Gorst, A.G.: Pulver und Sprengstoffe, Berlin (Militärverlag der DDR), 1985
- [7] Höcherl, J.: Skriptum zur Vorlesung Munitionstechnik, Universität der Bundeswehr München, 2001, S. 81
- [8] Klapötke, Thomas M.: Chemie der hochenergetischen Materialien, Berlin (De Gruyter), 2009
- [9] Köhler, Josef et al.: Explosivstoffe, Weinheim (WILEY-VCH Verlag), 2008
- [10] Künzel, Martin: OPTIMEX: Optical analyzer of explosive processes, Czech Republic (OZM Research), 2024, Vortrag
- [11] Newport: Fiber Optic Physics, <https://www.newport.com/n/fiber-optic-physics>, Stand [27.03.2025]
- [12] OZM Research: User's Manual, OPTIMEX-64 Advanced Optical Analyzer of Explosive Processes (2024)

- [13] Pachmáň, Jiri et al.: OPTIMEX: Measurement of Detonation Velocity with a Passive Optical Fibre System, Cent. Eur. J. Energ. Mater. (2017) 14(1), S.233-250
- [14] Pfeifer, Wolfgang et al.: Etymologisches Wörterbuch des Deutschen, 1993, <https://www.dwds.de/d/wb-etymwb>, Stand [27.03.2025]
- [15] Piehler, Thomas; Fa.: LFG – Leiterplatten, Feinmechanik & Geräte Eckhard Oertel e.K., Gera
- [16] Rheinmetall Waffe und Munition: Bestimmung der Detonationsgeschwindigkeit, 2017, Arbeitsanweisung
- [17] Schmidt, Erik: Untersuchung von Einflussparametern bei der Initiierung von Sprengladungen, Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr München, 2004
- [18] Schötzig, Frank; Fa.: Rheinmetall Waffe und Munition GmbH, Unterlüß
- [19] Taubmann, Gerhard; Gossenberger, Florian: Chemie für Chemieingenieure und Physiker - Übungsblatt 10, 2016, [https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/nawi.inst.250/Lehre/WS\\_1617/Chemie\\_PhysChemieIng/Ueb\\_10.pdf](https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.250/Lehre/WS_1617/Chemie_PhysChemieIng/Ueb_10.pdf), Stand [27.03.2025]
- [20] Tete, A. D. et al.: Velocity of Detonation (VOD) Measurement Techniques – Practical Approach, Int. J. Eng. Technol. (2013) 2(3), S.259-265
- [21] Vieweg, Martin: Warum lassen sich Kerzen auspusten?, 2014, <https://www.wissenschaft.de/astronomie-physik/warum-lassen-sich-kerzen-auspusten/>, Stand [27.03.2025]



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Asche

Vorname: Mika Jia Ping

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Verifikation eines neuen Messgerätes zur  
Vermessung von Detonationsgeschwindigkeiten

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

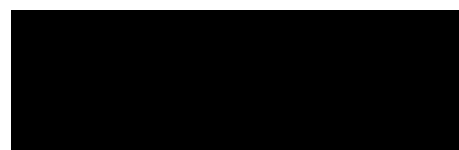
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

27.03.2025

Datum



Unterschrift im Original