



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK
UND THERMODYNAMIK
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Ausgleichszeiten von pneumatischen Strömungssonden mit Druckmessleitungen

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger

E302 – Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

der Technischen Universität Wien

zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

Johann Puintner, BSc



Wien, Oktober 2024



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem_r Beurteiler_in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachter_innen beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, Oktober 2024

.....
Johann Puintner, BSc

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Zunächst bedanke ich mich bei Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhard Willinger, der mir jederzeit zur Verfügung stand und mich durch seine umfassende Betreuung, wertvollen Ratschläge und Unterstützung bei der Literaturrecherche maßgeblich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt hat. Besonders hervorheben möchte ich seine Lehrveranstaltungen, die mein Interesse für thermische Turbomaschinen geweckt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, Mara und Franz, die mir während meiner gesamten Ausbildung in jeder Hinsicht unterstützt und mir dieses Studium ermöglicht haben. Meine Mutter Mara half mir stets auch die wichtigen Aspekte des Lebens abseits der Technik im Blick zu behalten während mein Vater Franz in mir das Interesse und die Freude am Erforschen und Verstehen von Natur und Technik geweckt hat.

Ebenso möchte ich meinen Brüdern Josef, Matthias und Florian danken. Ihr Humor und ihre Fähigkeit, mich in schwierigen Momenten abzulenken, haben mir geholfen, den nötigen Ausgleich und die notwendige Energie für mein Studium zu finden.

Meiner Freundin Claudia danke ich von Herzen für ihre Geduld und Motivation, die mir vor allem in der Schlussphase des Studiums sehr viel bedeutet haben. Ihre Unterstützung und ihr Beistand waren für mich von unschätzbarem Wert.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt das Ausgleichsverhalten der am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien vorhandenen pneumatischen Drei- und Fünflochsonden.

Pneumatische Strömungssonden sind im Bereich der Turbomaschinen ein weit verbreitetes Messinstrument zur Bestimmung der Strömungseigenschaften. Mit der Bestimmung des Totaldrucks, des statischen Drucks und der Strömungsrichtung im Gitternachlauf ist es möglich, Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad eines Schaufelgitters zu ziehen. Hierfür wird ein möglichst umfassendes Bild der Strömung benötigt, weshalb die Sonden über die gesamte Schaufelteilung traversiert werden, was zu einer großen Anzahl an Messpunkten führt. Bisher wurden für die Ausgleichszeiten Erfahrungswerte herangezogen, was bei einer großen Anzahl an Messpunkten zu einer unnötig langen Messdauer führt. Daher ist die präzise Bestimmung der Ausgleichszeiten der verwendeten Drei- und Fünflochsonden von entscheidender Bedeutung um die Messdauer auf ein Minimum zu reduzieren.

In dieser Arbeit wird ein analytisches Modell 1. Ordnung vorgestellt, das die Vorausberechnung der Ausgleichszeit und das Ausgleichsverhalten eines einfachen Systems aus Leitungen und Volumen ermöglicht. Dieses analytische Modell stellt eine Erweiterung des generischen Modells dar, welches eine klare Trennung zwischen Leitung und Volumen für die Bestimmung der Ausgleichszeit aufweist.

Für die Beantwortung der Fragestellungen wurden experimentelle Untersuchungen an drei Drei- und zwei Fünflochsonden im Freistrahwindkanal der TU Wien durchgeführt. Die Zeitkonstanten der Sonden wurden bei verschiedenen Längen der Druckmessleitungen (520 mm, 970 mm, 2090 mm) und für jede Bohrung gemessen. Basierend auf den ermittelten Zeitkonstanten wurden die unbekanntes Sondenlängen bestimmt und mit dem erweiterten Modell wurde eine Zeitkonstante für jede Sonde ermittelt, welche es erlaubt die Ausgleichszeit als Funktion der Druckmessleitung zu berechnen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das erweiterte Modell das Ausgleichsverhalten und die Ausgleichszeiten der Sonden mit hoher Genauigkeit für die meisten Bohrungen beschreibt. Allerdings sind Abweichungen zwischen den Messungen und dem erweiterten Modell festzustellen, da es gewisse Unsicherheiten bei den Annahmen für das vorhandene Modell gibt. Dennoch konnte gezeigt werden, dass mit dem erweiterten Modell die Ausgleichszeit ohne Kenntnis des an den Bohrungen anliegenden Drucks in Abhängigkeit der Druckmessleitungen berechnet werden kann.

Abstract

This diploma thesis investigates the relaxation behaviour of the pneumatic three- and five-hole probes available at the Institute of Energy Technology and Thermodynamics at the Vienna University of Technology.

Pneumatic probes are widely used measuring instruments in the field of turbomachinery to determine flow characteristics. By measuring the total pressure, static pressure and flow direction in the wake, it is possible to draw conclusions about the efficiency of a cascade. To obtain a comprehensive overview of the flow, the probes are traversed across the entire blade pitch, resulting in a large number of measurement points. Until now, empirical values have been used for the response times, leading to unnecessarily long measurement durations with a large number of measurement points. Therefore, the precise determination of the response times of the three- and five-hole probes is crucial to reducing the measurement time to a minimum.

This thesis presents a first-order analytical model that enables the prediction of the response time and the equalization behaviour of a simple system of tubes and volumes. This analytical model extends the generic models that have a clear separation between tube and volume for determining the response time.

To address the research questions, experimental investigations were conducted on three three-hole and two five-hole probes in the free jet wind tunnel at the Vienna University of Technology. The time constants of the probes were measured at different lengths of the pressure measurement tubes (520 mm, 970 mm, 2090 mm) and for each hole. Based on the determined time constants, the unknown probe lengths were calculated, and the extended model was used to determine a time constant for each probe, allowing the response time to be calculated as a function of the pressure measurement tube.

The results show that the extended model describes the relaxation behaviour and response times of the probes with high accuracy for most holes. However, there are deviations between the measurements and the extended model due to uncertainties in the assumptions underlying the existing model. Nevertheless, it was demonstrated that the extended model can be used to calculate the response time without knowing the pressure applied to the holes as a function of the pressure measurement tubes.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Ausgleichszeit	2
2.2	Das generische Modell	4
2.2.1	Herleitung des generischen Modells	5
2.3	Das erweiterte generische Modell	7
2.3.1	Herleitung des erweiterten generischen Modells	8
2.3.2	Bestimmung des Ausmischdrucks pc	10
2.4	Bestimmung l_1 und l_2 der Sonde	11
3	Pneumatische Strömungssonden	12
3.1	Verwendete Sonden	13
3.2	Dreilochsonden	13
3.2.1	SVUSS 3 Kobrasonde (SVUSS 3)	14
3.2.2	AVA Trapezsonde Nr.110 (AVA 110)	16
3.2.3	AVA Zylindersonde Nr. 43 (AVA 43)	18
3.3	Fünflochsonden	20
3.3.1	SVUSS 5 Kegelsonde (SVUSS 5)	21
3.3.2	US-DA-125-24-F-22-C Zylindersonde (US-DA-125)	23
3.4	Geometriedaten Sonden	24
4	Testanlage	25
4.1	Versuchsaufbau	26
4.2	Datenerfassung	29
4.3	Komponenten	30
4.3.1	Windkanal	30
4.3.2	FCO 91-MK II	31
4.3.3	Honeywell 143PC01D	32
5	Ergebnisse und Diskussion	34
5.1	Bestimmung der Ausgleichszeiten t_{99}	36
5.1.1	SVUSS 3	37
5.1.2	AVA 110	45

Inhaltsverzeichnis

5.1.3	AVA 43.....	53
5.1.4	SVUSS 5.....	62
5.1.5	US-DA-125.....	72
5.2	Ausmischdruck <i>pc</i>	82
5.2.1	SVUSS 3.....	82
5.2.2	AVA 110.....	85
5.2.3	AVA 43.....	88
5.2.4	SVUSS 5.....	91
5.2.5	US-DA-125.....	94
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	97
6	Schlussfolgerung und Ausblick	102
	Literaturverzeichnis	104

Nomenklatur

Abkürzung	Beschreibung
GM	Generisches Modell
EGM	Erweitertes generisches Modell
B1-B5	Sonden Bohrung 1-5

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m^2
a	Schallgeschwindigkeit	m/s
a_s	Abstand Bohrungen	m
C_p	Druckkoeffizient	-
D	Durchmesser der Druckmessleitungen	m
d	Durchmesser	m
d_1	Durchmesser Sonde Eintritt	m
d_2	Durchmesser Sonde Austritt	m
d_{Kopf}	Kopfdurchmesser Sonde/Charakteristische Länge	m
d_{Schaft}	Schaftdurchmesser Sonde	m
f_s	Frequenz der Abtastrate	$1/s$
l	Länge	m
l_1	Länge Sonde Eintritt	m
l_2	Länge Sonde Austritt	m
l_3 bis l_5	Länge Druckmessleitung	m
l_e	Äquivalente Länge	m
l_{ges}	Gesamtlänge der Sonde	m
m	Masse	kg
N	Anzahl Messpunkte	-
p	Druck	Pa
p_A	Druck an der Bohrung (Eintritt)	Pa
p_B	Druck im Volumen	Pa

Nomenklatur

p_c	Ausmischdruck/Druck im Volumen	Pa
p_U	Umgebungsdruck	Pa
Δp	Druckdifferenz	Pa
R	Gaskonstante	J/kg K
Re	Reynoldszahl	-
T_u	Temperatur	°C
t	Zeit	s
t_{99}	99 % Ausgleichszeit	s
t_A	Ausgleichszeit	s
t_s	Zeitschritt	s
V	Volumen	m ³
V_p	Volumen Plenum	m ³
w	Geschwindigkeit	m/s
x	Prozentsatz für Ausgleichszeit/Abstand zu Düse	- / m
$\Delta\beta$	Gierwinkel	°
$\Delta\gamma$	Nickwinkel	°
δ	Flankenwinkel	°
κ	Isentropenexponent	-
λ	Druckverlustbeiwert	-
ν	Kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
τ	Zeitkonstante	s
$\bar{\tau}$	Mittlere Zeitkonstante	s
$\tau_{l_{5i}Bi}$	Gemessene Zeitkonstante	s
$\tau_{l_{5i}}$	Berechnete Zeitkonstante	s

Indizes	Beschreibung
Bi : 1-5	Nummerierung der Bohrungen
l_{5i} : 520, 970, 2070	Länge der verwendeten Druckmessleitung l_5

1 Einleitung

Die genaue und schnelle Messung von Strömungsparametern wie der Geschwindigkeit in Betrag und Richtung sowie dem Druck des Strömungsfeldes ist für zahlreiche technische und wissenschaftliche Anwendungen von großer Bedeutung. Pneumatische Strömungssonden sind besonders im Bereich der thermischen Turbomaschinen von Bedeutung, da die Kenntnis des Strömungsfeldes Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad des Schaufelgitters ermöglicht.

Pneumatische Strömungssonden zeichnen sich durch ihre Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit aus. Ein kritischer Aspekt dieser Messtechnik ist die Ausgleichszeit der Sonden, die bestimmt, wie schnell und präzise Messwerte nach einer Änderung der Strömungsbedingungen erfasst werden können.

Ziel dieser Forschung ist es, das Ausgleichsverhalten von pneumatischen Strömungssonden zu untersuchen und den Einfluss der Druckmessleitung, der Bauart der Sonde und des piezoresistiven Drucksensors zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Vorausberechnung der Ausgleichszeiten ohne Kenntnis des am Sondenkopf anliegenden Drucks in Abhängigkeit der Druckmessleitung ermöglichen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein analytisches Verfahren 1. Ordnung unter der Annahme eines einfachen Systems aus Leitung und Volumina angewendet, wie es Lilley und Morton [1] sowie Xie und Geldart [2] gezeigt wurde. Zur Überprüfung der Güte des analytischen Verfahrens werden fünf Sonden mit jeweils drei verschiedenen Druckmessleitungen experimentell im Windkanal auf ihr Ausgleichsverhalten untersucht. Da die Geometrie der Sonden nicht vollständig bekannt ist, werden die Längen der Sonden aus den Messdaten ermittelt und anschließend die Zeitkonstante und die Ausgleichszeit bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen es, die Effizienz und Genauigkeit der Messungen mit pneumatischen Strömungssonden zu steigern und somit einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung der Strömungsmesstechnik zu leisten. Der Einsatz von Sonden kann zeitlich optimiert werden, was eine schnelle Durchführung von Experimenten mit Strömungssonden ermöglicht. Dies ist besonders relevant, da sich je nach Einbausituation und Ziel der Messung sowohl die Länge der Messleitung als auch der Druck, der am Sondenkopf anliegt, ändern können.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel sind die wichtigsten Grundlagen beschrieben: die Ausgleichszeit, das generische Modell und die Erweiterung des generischen Modelles für die Anwendung für das vorhandene Messsystem. Außerdem wird auf den Ausmischdruck eingegangen, der sich beim Öffnen der Magnetventile einstellt. Des Weiteren wird auf die Bestimmungsgleichung für die Länge l_1 und l_2 der Sonde eingegangen.

2.1 Ausgleichszeit

Die Ausgleichszeit t_A eines Druckmesssystems hängt gemäß Wuest [3] von verschiedenen Faktoren wie dem Volumen des Drucksensors, der Länge und den Durchmesser der Druckmessleitung sowie den Bohrungen der Sonde ab.

Insbesondere bei rasch wechselnden Druckverhältnissen ist eine kurze Ausgleichszeit von entscheidender Bedeutung, da andernfalls die Druckänderungen nicht schnell genug erfasst werden können. Für stationäre Strömungsvorgänge ist die Ausgleichszeit für das Messergebnis im Grunde bedeutungslos, da keine schnellen Veränderungen im Druck auftreten. Dennoch kann die Kenntnis der Ausgleichszeit viele Vorteile bieten, wie zum Beispiel die Reduzierung der Gesamtmesszeit.

Um die Ausgleichszeit auf ein Minimum zu reduzieren, ist es notwendig, das Volumen des Drucksensors möglichst klein zu wählen. Außerdem sollte die Länge der Druckmessleitung so kurz wie möglich sein. Den Zusammenhang zwischen der Länge der Druckmessleitung und der Ausgleichszeit zeigen Brüggemann et al. in [4]. Die Bohrungen der Sonde hingegen sollten für ein schnelles Messergebnis groß sein. Zu große Bohrungen können jedoch zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Eine pneumatische Sonde kann als ein Druckmesssystem betrachtet werden, das aus einer Leitung (Widerstand) mit kleinem Durchmesser und einem konstanten Volumen (Plenum) am Ende besteht. Die Bohrungen bzw. die Kapillarröhrchen stellen den Widerstand dar und der Drucksensor das Plenum. Zu Beginn herrscht im System der Druck p_c . Wenn am offenen Ende der Leitung ein Druck p_A angelegt wird, führt dies zu einer plötzlichen Druckänderung. Der Druck p nähert sich über die Zeit asymptotisch dem Druck p_A an und erreicht diesen theoretisch bei $t \rightarrow \infty$. Der Verlauf ist in Abbildung 1 dargestellt.

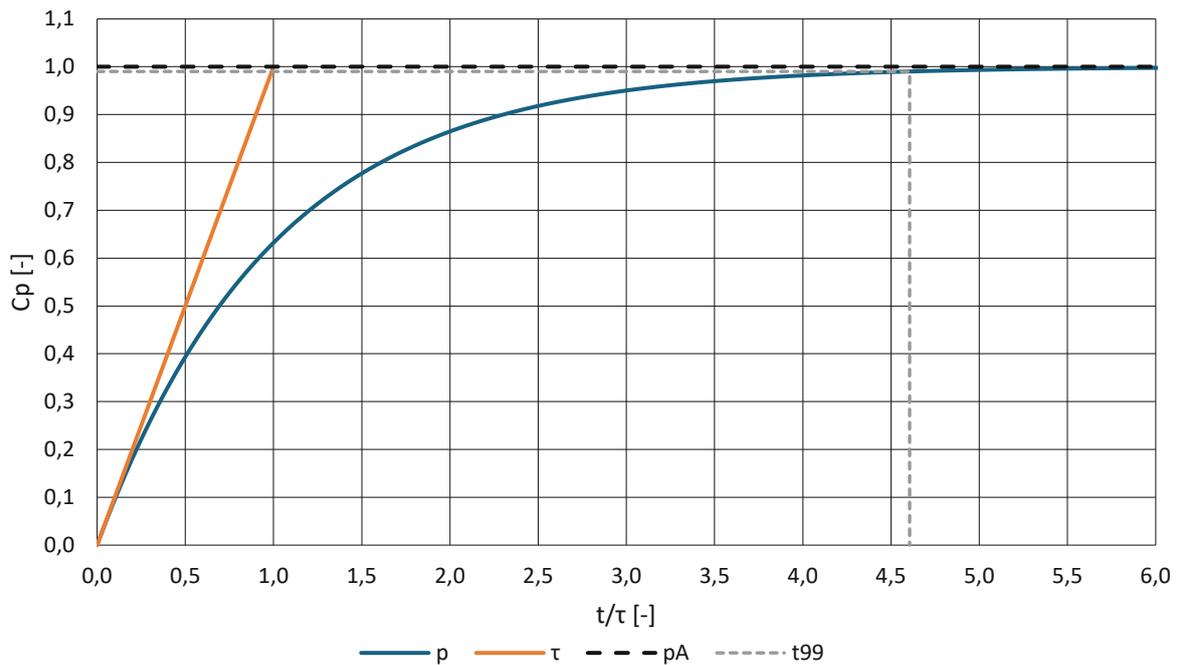


Abbildung 1: Ausgleichszeit und Zeitkonstante, nach [3]

Die Ausgleichszeit t_A bezeichnet die Zeit, die benötigt wird um einen bestimmten Prozentsatz x der ursprünglichen Druckdifferenz im Volumen zu erreichen. Üblicherweise wird dabei ein Prozentsatz von 95 % oder 99 % der Druckdifferenz betrachtet. Die Druckdifferenz lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Delta p = p_c + x(p_A - p_c) \quad (1)$$

Die 99 % Ausgleichszeit t_{99} ist somit die Zeit, die benötigt wird um 99 % der ursprünglichen Druckdifferenz zu erreichen.

Die Zeitkonstante τ ist der Schlüsselparameter, der bestimmt wie schnell das System auf die Änderung des Drucks (Eingangswert) p_A reagiert. Für eine geringe Ausgleichszeit sollte der Wert von τ möglichst klein sein. Weiters kann die Zeitkonstante als die Zeit interpretiert werden, die erforderlich wäre, wenn der Druck mit der anfänglichen Steigung anwächst.

Der Druckkoeffizient C_p wird wie folgt gebildet:

$$C_p = \frac{p - p_c}{p_A - p_c} \quad (2)$$

Somit ist dieser bei $p = p_c$ Null und bei $p = p_A$ Eins. Für t_{99} ergibt sich ein C_p von 0,99. Es wird auch eine dimensionslose Zeit t / τ eingeführt um verschiedene Zeitkonstanten miteinander zu vergleichen.

2.2 Das generische Modell

In diesem Abschnitt sollen die Annahmen und Vereinfachungen sowie die Herleitung des generischen Modells (GM), das ein analytisches Verfahren 1. Ordnung darstellt, gezeigt werden. Mit dem Modell lässt sich die Ausgleichszeit für ein einfaches System, bestehend aus Leitung und Volumen, bestimmen.

Im oberen Teil von Abbildung 2 ist das vereinfachte Druckmesssystem zu sehen: es besteht aus einer Leitung mit der Länge l und dem Durchmesser d sowie einer Geschwindigkeit w in Richtung des Plenums. Die Leitung kann als Widerstand betrachtet werden. Das Plenum repräsentiert den Drucksensor und besitzt ein Volumen $V = V_p$. Für die Berechnung wird ein Modell mit konzentrierten Parametern verwendet. Dabei werden folgende Annahmen für die Leitung und das Plenum getroffen:

Leitung:

- inkompressibel (Dichte ρ konstant; wenn w klein; Temperatur T konstant)
- laminare Strömung (Reynoldszahl $Re < Re_{krit}$)

Plenum:

- konstantes Volumen V
- kompressibel
- isotherme Zustandsänderung

Im unteren Teil von Abbildung 2 ist die Druckverteilung entlang der Länge des Druckmesssystems dargestellt. Die Druckverteilung wird für drei Zeitpunkte $t = 0$, t und $t = \infty$ gezeigt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird am Eintritt der Leitung plötzlich der Druck p_A angelegt, während im Plenum zu diesem Zeitpunkt noch der Druck p_C herrscht. Bei $t = \infty$ stellt sich sowohl in der Leitung als auch im Plenum der Druck p_A ein. Zu einem beliebigen Zeitpunkt $0 < t < \infty$ liegt der Druck im Plenum zwischen p_A und p_C und wird als momentaner Druck p bezeichnet. Die Zeit, die erforderlich ist, damit p die geforderte Druckdifferenz erreicht, stellt die Ausgleichszeit dar. Die Druckverteilung in der Leitung verhält sich linear, während sie im Volumen konstant bleibt.

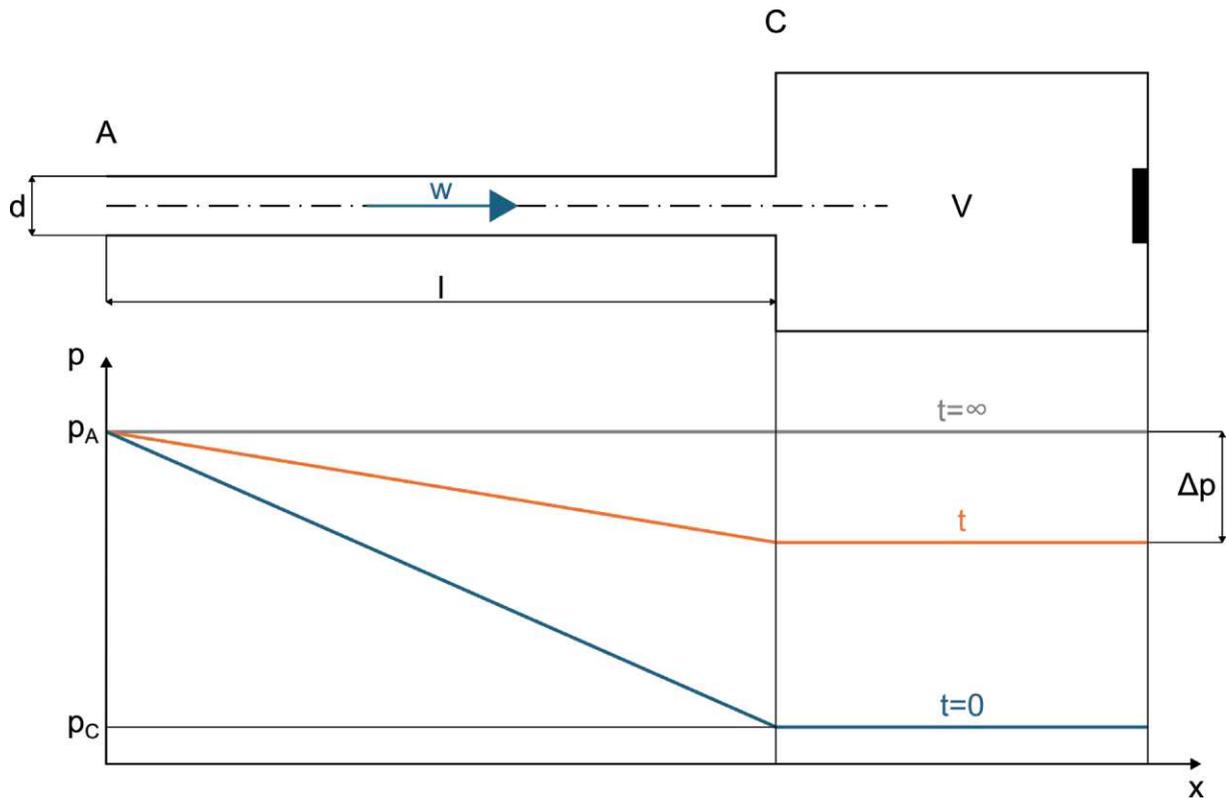


Abbildung 2: Aufbau GM oben, Druckverlauf GM unten

2.2.1 Herleitung des generischen Modells

In der Leitung kommt es entlang der Länge l zu einem Druckverlust Δp , der sich durch die Darcy-Weisbach-Gleichung wie folgt berechnen lässt:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{w^2}{2} \quad (3)$$

Hier ist ρ die Dichte des Fluids. Der Druckverlustbeiwert λ für laminare Strömung kann mit Hilfe der Reynoldszahl Re berechnet werden:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64\nu}{wd} \quad (4)$$

Hierbei steht ν für die kinematische Viskosität des Fluids. Durch Einsetzen der Gl. (4) in (3) und anschließendes Umformen nach der Geschwindigkeit w , ergibt sich die folgende Gleichung für den Massenstrom in der Leitung:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A w = \frac{\pi}{128} \frac{d^4 \Delta p}{l \nu} \quad (5)$$

Die Änderung der Masse im Plenum lässt sich unter der Annahme eines konstanten Volumens und einer isothermen Zustandsänderung gemäß Gl. (6) und unter Verwendung der Schallgeschwindigkeit a für ideale Gase gemäß Gl. (7)

$$\frac{p}{\rho} = \text{const} \quad (6)$$

$$a = \sqrt{\kappa RT} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \quad (7)$$

wie folgt angeben:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} = \frac{\kappa V}{a^2} \frac{dp}{dt} \quad (8)$$

Hierbei steht κ für den Isentropenexponent, R für die Gaskonstante und T für die Temperatur.

Der Massenstrom der Leitung gemäß Gl. (5) muss gleich der Änderung der Masse im Volumen gemäß Gl. (8) sein. Somit ergibt sich:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\pi}{128} \frac{d^4}{l} \frac{\Delta p}{v} = \frac{\kappa V}{a^2} \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

Wenn der Druckverlust $\Delta p = p_A - p$ in die Gleichung eingesetzt wird, ergibt sich folgende Differenzialgleichung erster Ordnung:

$$\frac{dp}{p_A - p} = \frac{\pi}{128} \frac{a^2 d^4}{\kappa v V l} dt \quad (10)$$

Auch kann nun die Zeitkonstante τ definiert werden als:

$$\tau = \frac{128 \nu \kappa V l}{\pi a^2 d^4} \quad (11)$$

Die Lösung der Differenzialgleichung mit der Anfangsbedingung $p(t = 0) = p_C$ lautet:

$$\frac{p - p_C}{p_A - p_C} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

Somit kann aus Gl. (12) und mit dem in Gl. (2) definierten Druckkoeffizienten C_p die Ausgleichszeit t_A bestimmt werden:

$$t_A = -\tau \ln(1 - C_p) \quad (13)$$

Für die 99 % Ausgleichszeit t_{99} ergibt sich:

$$t_{99} \approx 4,6\tau \quad (14)$$

Darüber hinaus zeigt sich, dass die Ausgleichszeit indirekt proportional zu d^4 ist, wie bereits Lilley und Morton in [1] gezeigt hat.

$$t_A \propto \frac{1}{d^4} \quad (15)$$

Die Zusammenhänge für die Differenzialgleichung, die Ausgleichszeit und die Zeitkonstante können auch ausgehend von der Hagen-Poiseuille-Gleichung gezeigt werden, wie von Xie und Geldart in [2] beschrieben.

2.3 Das erweiterte generische Modell

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie das generische Modell an das verwendete Druckmesssystem angepasst werden muss um das erweiterte generische Modell (EGM) zu erhalten. Zunächst werden die Unterschiede zwischen dem verwendeten Druckmesssystem und dem im generischen Modell beschriebenen System identifiziert. Anschließend werden die notwendigen Anpassungen und Modifikationen am generischen Modell beschrieben um es für das verwendete Druckmesssystem nutzbar zu machen, was zum erweiterten generischen Modell führt.

In Abbildung 3 in Analogie zu Abbildung 2 ist das verwendete Druckmesssystem und die Druckverteilung entlang der Länge x abgebildet. Das Druckmesssystem besteht aus der Sonde, zwei Festo Druckmessleitungen, dem Druckmessstellenumschaltgerät FCO 91 und den piezoresistiven Drucksensoren Honeywell 143PC01D. Die Sonde besitzt die beiden Längen l_1 und l_2 mit den Durchmessern d_1 und d_2 , welche klein sind. Die Festo Druckluftschläuche und das FCO 91 haben die Längen l_3 , l_4 und l_5 mit dem Durchmesser D . Das Volumen des Drucksensors kann vernachlässigt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Druckmesssystems findet sich in Kapitel 4.

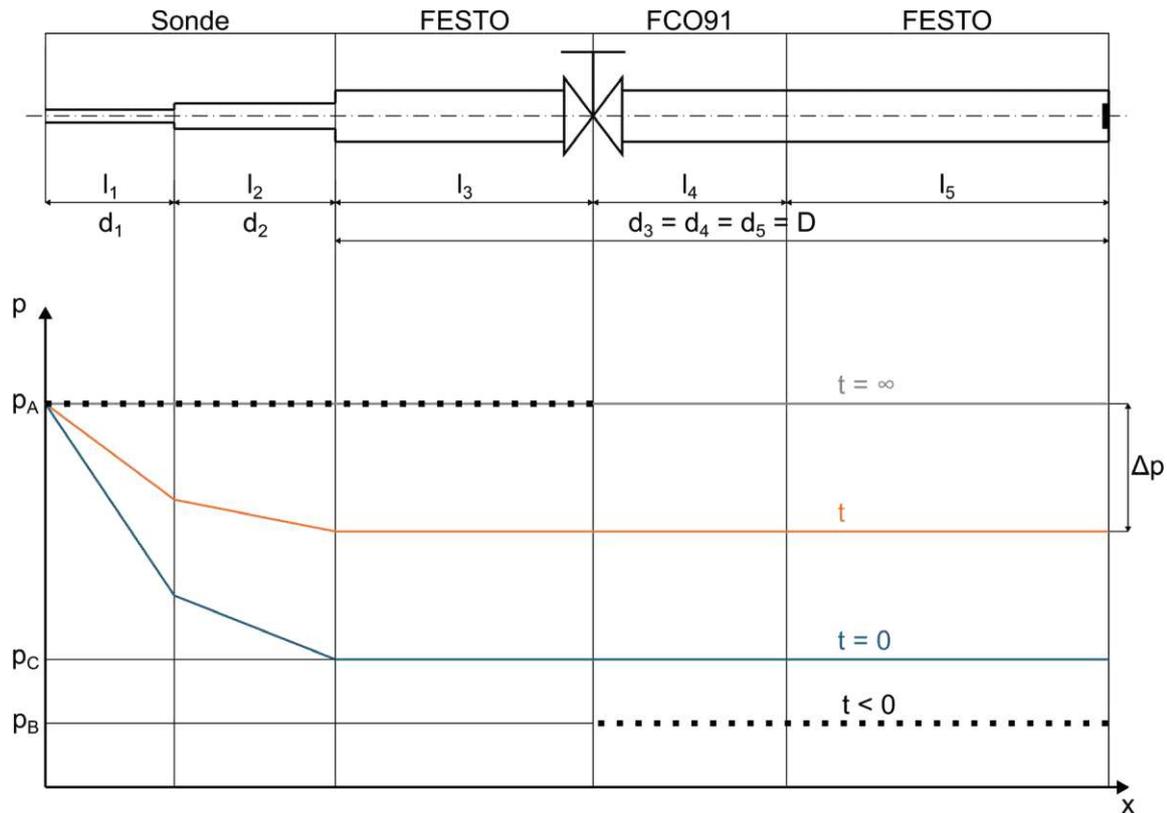


Abbildung 3: Aufbau EGM oben, Druckverlauf EGM unten

Es ist zu sehen, dass sich das System von dem generischen Modell unterscheidet, da es nur aus Leitungen besteht und kein Plenum besitzt. Durch die folgenden Annahmen kann das Druckmesssystem erweitert werden damit sich der in Abbildung 3 unten gezeigte Druckverlauf einstellt.

2.3.1 Herleitung des erweiterten generischen Modells

Da es sich bei dem verwendeten Druckmesssystem um ein System mit verschiedenen Längen und Durchmessern handelt, empfehlen Lilley und Morton in [1] die Verwendung einer äquivalenten Länge l_e , die sich wie folgt berechnen lässt:

$$l_e = l_1 + \sum l_i \left(\frac{d_1}{d_i}\right)^4 \quad (16)$$

Hierbei steht der Index i für den jeweiligen Abschnitt des Systems. Der Druckverlust gemäß Gl. (3) kann somit mit dem Durchmesser d_1 und der äquivalenten Länge l_e berechnet werden. Die Längen l_3 bis l_5 können für die Berechnung der äquivalenten Länge vernachlässigt werden, da $(d_1 / D)^4$ sehr klein ist und im ungünstigsten Fall würde es zu einer Erhöhung von ca. 2,5 mm kommen. Somit lässt sich die äquivalente Länge wie folgt formulieren:

$$l_e = l_1 + l_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \quad (17)$$

Dieser vereinfachte Ausdruck berücksichtigt nur die relevanten Abschnitte (Sonde) des Systems da die Vernachlässigung der anderen Längen aufgrund ihrer geringen Auswirkung gerechtfertigt ist.

In [2] wird empfohlen, zusätzlich zum Volumen des Plenums V_p auch das Volumen der Leitungen in die Berechnung mit einzubeziehen. Das Volumen, das durch die Sonde entsteht, ist im Vergleich zum Volumen der Druckmessleitung und des FCO 91 vernachlässigbar klein. Somit ergibt sich für das Gesamtvolumen:

$$V = V_p + \frac{\pi D^2}{4} (l_3 + l_4 + l_5) \quad (18)$$

Mit $V_p = 0$, ergibt sich für Gl. (11) mit Gl. (17) und (18) für das erweiterte Modell folgende Zeitkonstante:

$$\tau = 32 \frac{\nu \kappa}{a^2} \left(\frac{l_1}{d_1^4} + \frac{l_2}{d_2^4} \right) D^2 (l_3 + l_4 + l_5) \quad (19)$$

Im erweiterten Modell können die Gl. (12) bis (14) aus dem generischen Modell mit der neuen Zeitkonstante übernommen werden.

$$\frac{p - p_C}{p_A - p_C} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20)$$

$$t_A = -\tau \ln(1 - C_p) \quad (21)$$

Somit kann die Annahme getroffen werden, dass es sich bei der Sonde um den Widerstand und bei der Druckmessleitung plus FCO 91 um das Plenum handelt. Unter diesen Annahmen ergibt sich die Druckverteilung wie in Abbildung 3 dargestellt.

Die Zeit $t < 0$ ist jener Zeitpunkt vor dem Öffnen des Magnetventils des FCO 91 und wird durch die punktierte Linie dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt herrscht im Bereich von l_1 bis l_3 der Druck p_A . Im Bereich von l_4 bis l_5 herrscht der Druck p_B . Der Druck p_B entspricht dem Druck p_A der vorhergehenden Bohrung bzw. dem Umgebungsdruck p_U für die erste Bohrung.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ öffnet sich das Magnetventil und es kommt zur augenblicklichen Ausmischung der Volumina V_A und V_B , wodurch sich der Druck p_C einstellt. Werden die Annahmen des erweiterten Modells berücksichtigt, verhält sich das System nach der Ausmischung analog zu dem generischen Modell.

2.3.2 Bestimmung des Ausmischdrucks p_C

Zum Zeitpunkt $t < 0$ gelten für den Bereich A von l_1 bis l_3 und den Bereich B von l_4 bis l_5 die Gleichungen:

$$p_A V_A = RT m_A \quad (22)$$

$$p_B V_B = RT m_B \quad (23)$$

Zum Zeitpunkt $t = 0$ gilt für das gesamte Druckmesssystem:

$$p_C (V_A + V_B) = RT (m_A + m_B) \quad (24)$$

Durch einsetzen von Gl. (22) und (23) in (24) ergibt sich:

$$p_C = \frac{p_A V_A + p_B V_B}{V_A + V_B} \quad (25)$$

Unter Vernachlässigung des Volumens der Sonde ergibt sich für den Ausmischdruck folgende Gleichung:

$$p_C = \frac{p_A l_3 + p_B (l_4 + l_5)}{l_3 + l_4 + l_5} \quad (26)$$

In den weiteren Abschnitten wird der berechnete Ausmischdruck mit p_{C-b} angegeben, und jener aus den Messwerten mit p_C . Außerdem kann Gl. (26) in dimensionsloser Form wie folgt angeschrieben werden:

$$\frac{p_C - p_A}{p_B - p_A} = \frac{l_4 + l_5}{l_3 + l_4 + l_5} \quad (27)$$

Somit stellt die linke Seite der Gleichung den gemessenen und die rechte Seite den berechneten Ausmischdruck in dimensionsloser Form dar.

2.4 Bestimmung l_1 und l_2 der Sonde

Da die genaue Geometrie der Sonden nicht bekannt ist, müssen Annahmen für die Längen l_1 und l_2 getroffen werden. Durch das Umformen von Gl. (21) ergibt sich für die Zeitkonstante τ :

$$\tau = - \frac{t}{\ln \left(1 - \frac{p - p_C}{p_A - p_C} \right)} \quad (28)$$

Da die Gesamtlänge der Sonden bekannt ist und $l_{ges} = l_1 + l_2$ gilt, kann Gl. (19) folgendermaßen angeschrieben werden:

$$l_1 = \left(\frac{\pi a^2 \tau}{128 \nu \kappa V} - \frac{l_{ges}}{d_2^4} \right) \frac{d_2^4 d_1^4}{d_2^4 - d_1^4} \quad (29)$$

Mit Hilfe von Gl. (28) kann die gemessene Zeitkonstante bestimmt werden. Hierfür werden aus den Messdaten die ursprüngliche Druckdifferenz nach Gl. (1) im Bereich von $0,8 \leq x \leq 0,999$ und die dazugehörigen Zeiten entnommen. Anschließend wird der Mittelwert der gemessenen Zeitkonstanten für jede Bohrung und Schlauchlänge l_5 gebildet. Mit der gemessenen und gemittelten Zeitkonstante kann mit Hilfe von Gl. (29) die Länge l_1 der Sonde bestimmt werden.

3 Pneumatische Strömungssonden

Mit pneumatischen Sonden können die Strömungsgrößen Geschwindigkeit und Druck aus komplexen Strömungsgebieten, welche für die Beschreibung der Strömung maßgeblich sind, bestimmt werden. Da diese Art von Sonden zuverlässig und flexibel im Einsatz sind, haben sie große Bedeutung im Bereich der Strömungsmesstechnik.

Die Einteilung von pneumatischen Sonden erfolgt nach der Anzahl der Sondenkopfbohrungen. Es wird zwischen Dreilochsonden für die Messung von ebener Strömung oder Vier-, Fünf-, bzw. Siebenlochsonden für die Messung von räumlicher Strömung unterschieden. Außerdem lassen sich die Sonden anhand der Kopfgeometrie zum Beispiel als kegelförmig, kugelförmig, zylinderförmig, usw. einteilen.

Bei der Durchführung der Messung können nur die Drücke der Bohrungen direkt gemessen werden. Die Geschwindigkeit und deren Richtung werden indirekt aus dem gemessenen Druck bestimmt. Es handelt sich folglich um ein indirektes Messverfahren, weshalb es notwendig ist vor der Messung eine Geschwindigkeits- und Richtungskalibrierung in einer kontrollierten Umgebung durchzuführen. Für die vorliegende Arbeit ist dies jedoch nicht notwendig, da nur die Druckdifferenzen für die Untersuchung der Ausgleichszeiten relevant sind.

Um möglichst akkurate Messungen des Strömungsfeldes zu erhalten, empfehlen Grimshaw und Taylor in [5] die Verwendung von Sonden mit kleinem Kopfdurchmesser und geringem Abstand zwischen den Bohrungen. Durch diese Art von Sonden kann der Messfehler durch Nachlaufzellen und Gradienten in der Strömung reduziert werden. Der Abstand zwischen den Bohrungen spielt dabei eine entscheidende Rolle. Ist dieser Abstand zu groß wird ein anderer Teil der Nachlaufzelle bzw. des Gradienten gemessen und damit die Genauigkeit der Sonde beeinträchtigt. Ein kleiner Sondenkopf hat außerdem den Vorteil, dass der Einfluss der Sonde auf die Strömung selbst verringert wird. Allerdings erfordern kleine Sondenköpfe mit geringem Abstand zwischen den Bohrungen sehr kleine Bohrungsdurchmesser im Sondenkopf. Dies führt zu einem Trade-off: während die Messgenauigkeit durch kleinere Sondenköpfe verbessert wird, erhöht sich gleichzeitig die Ausgleichszeit der Sonde.

3.1 Verwendete Sonden

In diesem Abschnitt werden die für die Messungen verwendeten Sonden detailliert beschrieben. Es werden die wesentlichen Abmessungen und der Aufbau der Sonden erläutert. Darüber hinaus wird die verwendete Nomenklatur für die Bohrungen eingeführt und die Gier- und Nickwinkel definiert. Die Daten der Dreilochsonde wurden aus Lerena Diaz [6] für die Dreilochsonde und aus Chondrokostas [7] für die Fünflochsonde entnommen. Für die Berechnung der Ausgleichszeit sind die Durchmesser der Bohrungen am Eintritt d_1 und am Austritt d_2 sowie die entsprechenden Längen l_1 und l_2 erforderlich. Die Längen sind jedoch nicht bekannt.

In dieser Arbeit werden die folgenden drei Dreilochsonden:

- SVUSS 3 Kobrasonde, (SVUSS 3)
- AVA Trapezsonde Nr. 110, (AVA 110)
- AVA Zylindersonde Nr. 43, (AVA 43)

und die zwei folgenden Fünflochsonden:

- SVUSS 5 Kegelsonde, (SVUSS 5)
- US-DA-125-F-22-C (US-DA-125)

verwendet. Im folgenden Abschnitt wird genauer auf die verwendeten Sonden eingegangen.

3.2 Dreilochsonden

Die Dreilochsonden ermöglichen die Messung von Druck und der Geschwindigkeit nach Richtung und Betrag für die ebene Strömung. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Dreilochsonden und deren Hauptabmessungen. Die charakteristische Länge des Kopfes bzw. der Kopfdurchmesser d_{Kopf} , der Abstand zwischen den äußeren Bohrungen a_s und der Flankenwinkel δ sind angegeben.

Tabelle 1: Hauptabmessungen der Dreilochsonden

Bezeichnung	d_{Kopf} [mm]	δ [°]	a_s [mm]	d_{Schaft} [mm]	l_{ges} [mm]
SVUSS 3	2,4	30	1,6	6	650
AVA 110	3,3	30	2	6	360
AVA 43	3	≈ 50	$\approx 2,3$	6	300

In Abbildung 4 sind die Hauptabmessungen und die Lage der Bohrungen der Sonden zu sehen. Die Bohrungen sind mit 1, 2 und 3 nummeriert.

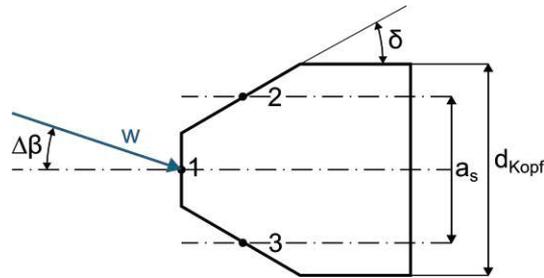


Abbildung 4: Bohrungen und Hauptabmessungen der Dreilochsonde, aus [6]

$\Delta\beta$ bezeichnet hier den Gierwinkel (Anströmwinkel), der den Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor \vec{w} und der Sondenachse beschreibt. Die Sondenachse ist vertikal auf die zentrale Bohrung ausgerichtet. Somit ist es möglich die Geschwindigkeit in die Komponenten w_x und w_y aufzuteilen. Im Gegensatz zu Fünflochsonden werden Dreilochsonden zur Messung in zweidimensionalen Strömungen verwendet, was bedeutet, dass der Nickwinkel $\Delta\gamma=0$ ist.

3.2.1 SVUSS 3 Kobrasonde (SVUSS 3)

Die SVUSS 3 Kobrasonde ist in Abbildung 5 dargestellt. Sie wurde im Jahre 1994 von der Firma SVUSS in Prag hergestellt.

Die Sonde hat eine Gesamtlänge l_{ges} von 650 mm und einen Schaftdurchmesser d_{Schaft} von 6 mm. Der Sondenkopf ist kobraförmig und zeigt nach vorne, was bedeutet, dass er in Richtung der Strömung ausgerichtet ist.

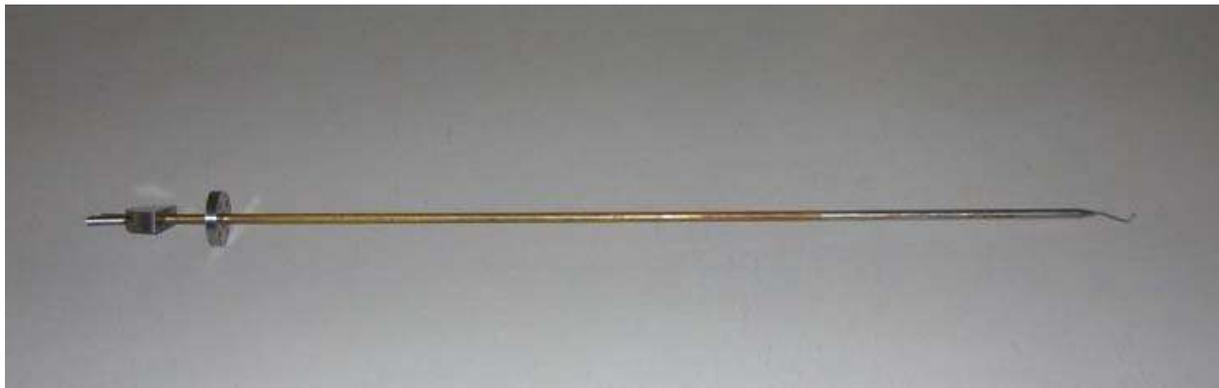


Abbildung 5: SVUSS 3, Gesamtansicht der Sonde, aus [6]

Die Sondenkopfbohrungen bestehen aus drei Kapillarröhrchen mit einem Eintrittsdurchmesser d_1 von 0,5 mm und einem Austrittsdurchmesser d_2 von 1 mm.

Die charakteristische Länge des Kopfes d_{Kopf} beträgt 2,4 mm, die Höhe 0,8 mm und der Flankenwinkel δ 30 °. Der Abstand a_s zwischen Bohrung 2 und 3 ist 1,6 mm. Abbildung 6 zeigt den Kopf der SVUSS 3 Sonde im Detail.



Abbildung 6: SVUSS 3, Detailansicht Kopf Vorderseite, aus [6]

In Abbildung 7 ist die technische Zeichnung der SVUSS 3 Kobrasonde mit allen wichtigen Maßen zu sehen.

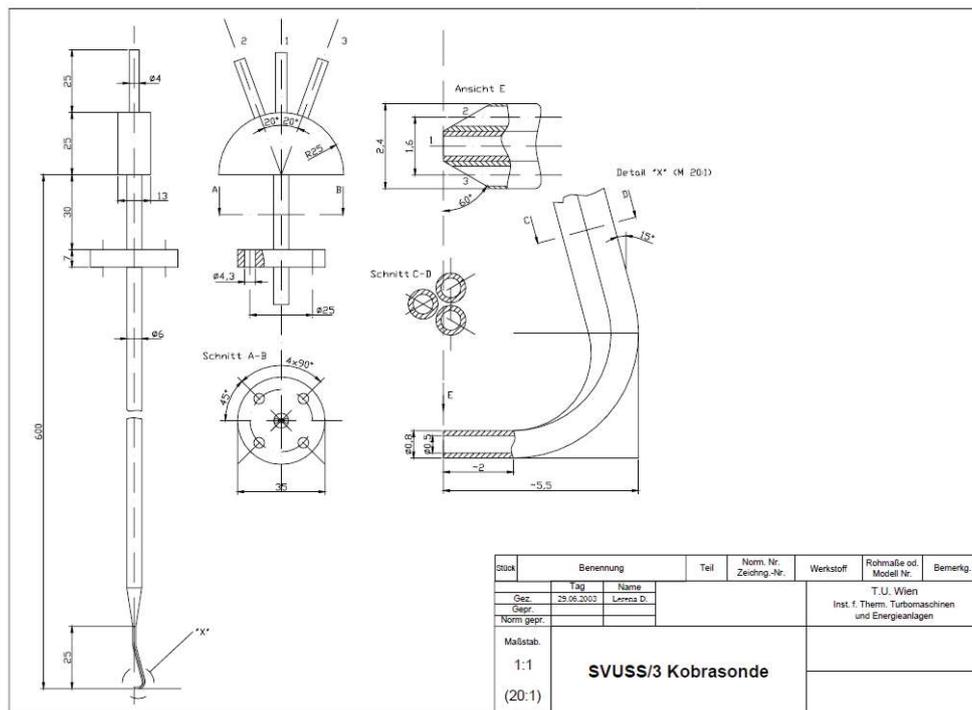


Abbildung 7: SVUSS 3, technische Zeichnung, aus [6]

3.2.2 AVA Trapezsonde Nr.110 (AVA 110)

Die AVA Trapezsonde Nr. 110 wurde vom Unternehmen Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen E.V. heute Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (D.L.R.) im Jahre 1968 entwickelt.

In Abbildung 8 ist die Sonde mit der Gesamtlänge l_{ges} von 360 mm und dem Schaftdurchmesser d_{Schaft} von 6 mm zu sehen. Der Sondenkopf ist aus drei Kapillarröhrchen, welche am Eintritt einen Durchmesser d_1 von 0,6 mm und am Austritt einen Durchmesser d_2 von 2 mm aufweisen, gefertigt.



Abbildung 8: AVA 110, Gesamtansicht der Sonde, aus [6]

Der Sondenkopf hat eine charakteristische Länge d_{Kopf} von 3,3 mm und eine Höhe von 1,3 mm. Der Flankenwinkel δ beträgt 30 °. Der Abstand a_s der Bohrung 2 und 3 ist 2 mm.

Abbildung 9 zeigt die Detailaufnahme des Sondenkopfes der AVA Trapezsonde Nr. 110.

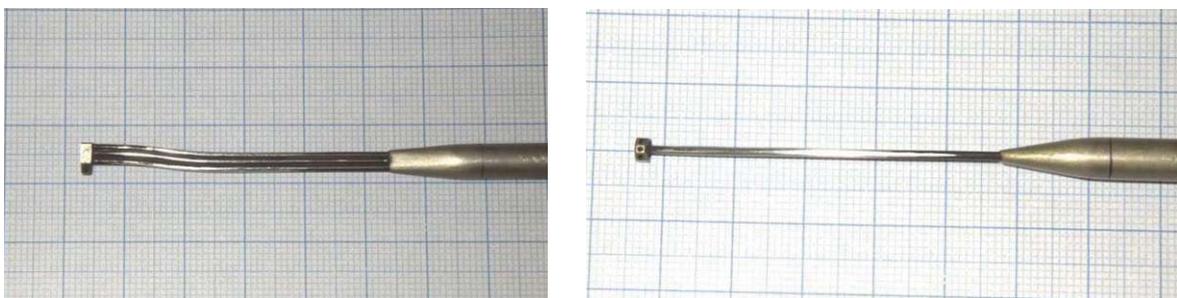


Abbildung 9: AVA 110, Detailansicht Kopf, aus [6]

In Abbildung 10 ist die technische Zeichnung der AVA Trapezsonde Nr. 110 mit allen wichtigen Maßen zu sehen.

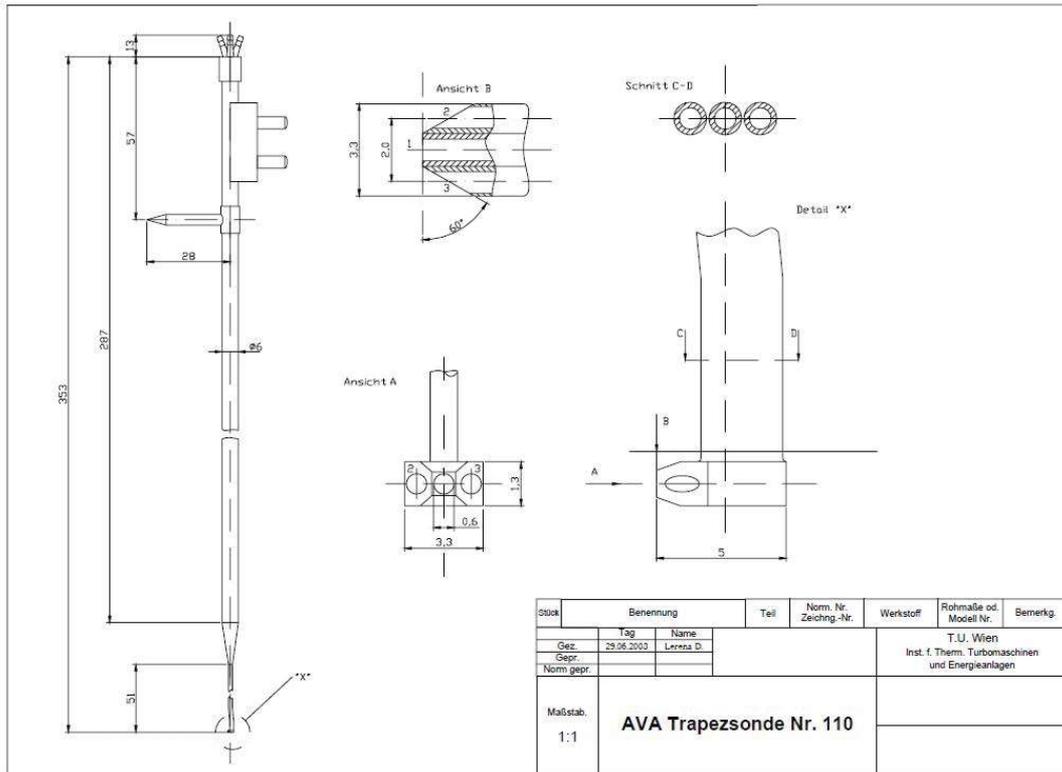


Abbildung 10: AVA 110, technische Zeichnung, aus [6]

3.2.3 AVA Zylindersonde Nr. 43 (AVA 43)

Die AVA Zylindersonde Nr. 43 ist in Abbildung 11 zu sehen und wurde wie die AVA Nr. 110 von dem Unternehmen Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen E.V. gefertigt. Das Herstellungsjahr ist nicht bekannt.

Die Sonde hat eine Gesamtlänge l_{ges} von 330 mm und einen Schaftdurchmesser d_{schaft} von 6 mm. Der Durchmesser am Eintritt d_1 beträgt für die Bohrung 1, 0,3 mm und für die Bohrungen 2 und 3, 0,6 mm. Am Austritt beträgt der Durchmesser d_2 für die Bohrung 1, 2 mm und für die Bohrungen 2 und 3, 1 mm.



Abbildung 11: AVA 43, Gesamtansicht der Sonde, aus [6]

Die charakteristische Länge des Kopfes d_{Kopf} beträgt 3 mm. Der Flankenwinkel δ beträgt 50 °. Der Abstand a_s der Bohrungen 2 und 3 beläuft sich auf 2,3 mm.

Abbildung 12 zeigt den Kopf der Zylindersonde im Detail.

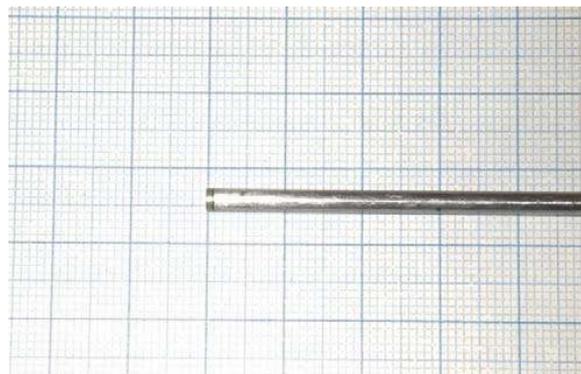


Abbildung 12: AVA 43, Detailansicht Kopf Vorderseite, aus [6]

In Abbildung 13 ist die technische Zeichnung der AVA Zylindersonde Nr. 43 mit allen wichtigen Maßen zu sehen.

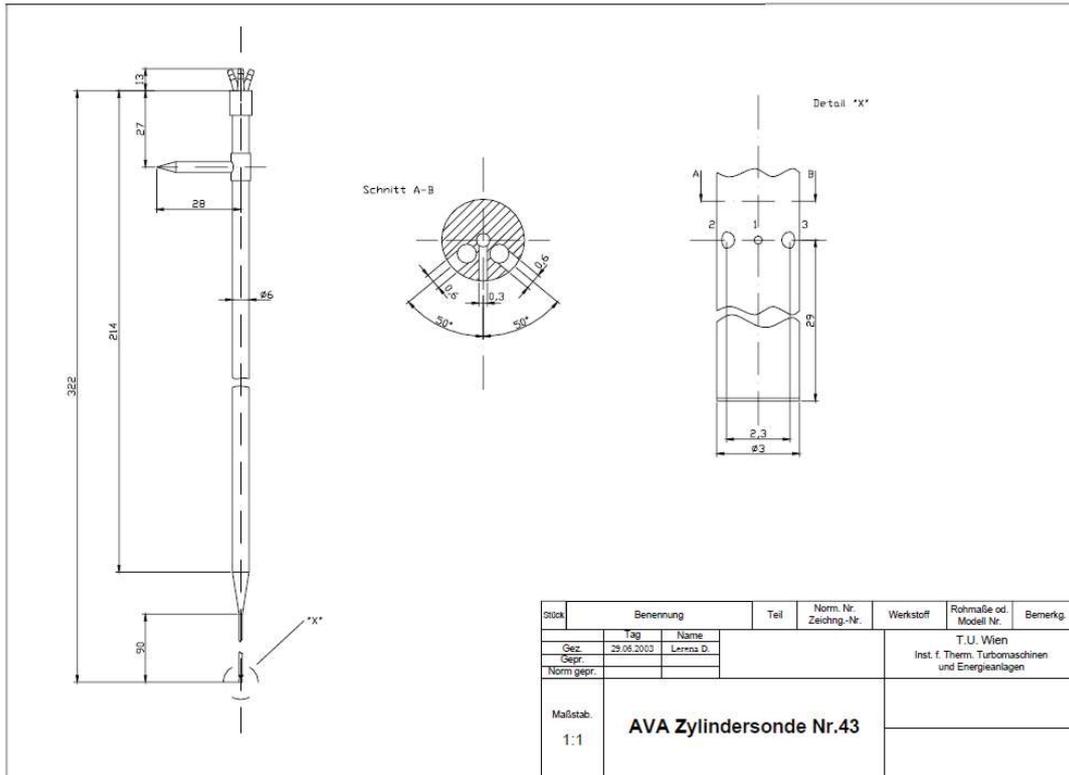


Abbildung 13: AVA 43, technische Zeichnung, aus [6]

3.3 Fünflochsonden

Die Fünflochsonden ermöglichen die Messung von Druck und der Geschwindigkeit nach Richtung und Betrag für die räumliche Strömung. Tabelle 2 zeigt die verwendeten Fünflochsonden mit deren Hauptabmessungen.

Tabelle 2: Hauptabmessungen Fünflochsonden

Bezeichnung	d_{Kopf} [mm]	δ [°]	a_s [mm]	d_{Schaft} [mm]	l_{ges} [mm]
SVUSS 5	3	30	1,6	6	650
US DA-125	3,175	40	≈ 2,4	6,35	660

Abbildung 14 zeigt die Nummerierung der Bohrungen und die Hauptabmessungen der Fünflochsonden. Die charakteristische Länge des Sondenkopfes wird mit d_{Kopf} angegeben, der Abstand zwischen den äußeren Bohrungen mit a_s und der Flankenwinkel mit δ .

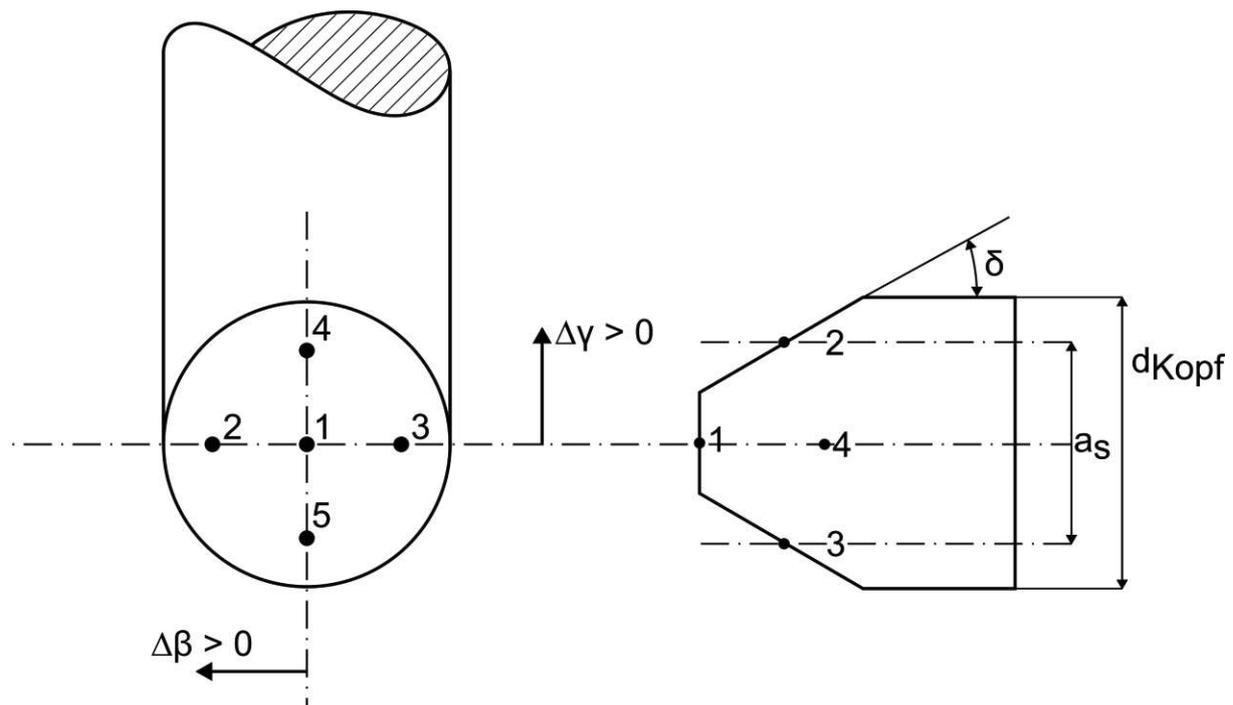


Abbildung 14: Bohrungen und Hauptabmessungen Fünflochsonde, aus [7]

Bei einer Fünflochsonde bezeichnen $\Delta\beta$ den Gierwinkel und $\Delta\gamma$ den Nickwinkel. Die beiden Winkel geben die Orientierung der Sonde relativ zum Strömungsfeld an. Der Gierwinkel beschreibt die Abweichung der Sonde in der horizontalen Ebene relativ zur Hauptströmungsrichtung. Er ist der Winkel zwischen der Hauptrichtung der Strömung und der Ebene, die durch die Bohrungen 1, 2 und 3 aufgespannt wird. Der Nickwinkel hingegen beschreibt die Neigung der Sonde in der vertikalen Ebene. Diese vertikale Ebene steht senkrecht zur durch die Bohrungen 1, 2 und 3 definierten Ebene. Bei der

Fünflochsonde werden beide Winkel benötigt um den Geschwindigkeitsvektor \vec{w} in die drei Komponenten w_x , w_y und w_z aufzuteilen.

3.3.1 SVUSS 5 Kegelsonde (SVUSS 5)

Die SVUSS 5 Kegelsonde wurde im Jahre 1994 von der Firma SVUSS in Prag (Tschechische Republik) hergestellt. Die Sonde ist in Abbildung 15 zu sehen.

Die Sonde hat eine Gesamtlänge l_{ges} von 650 mm und besteht wie die SVUSS 3 aus Kapillarröhrchen. Der Schaftdurchmesser d_{Schaft} beträgt 6 mm. Der Kopf ist nach vorne gerichtet und kegelförmig. Die Anordnung der Bohrungen 1 bis 5 erfolgt wie in Abbildung 14. Der Durchmesser am Eintritt der Bohrungen d_1 beträgt 0,5 mm. Am Austritt beträgt der Bohrungsdurchmesser d_2 1 mm.



Abbildung 15: SVUSS 5, Gesamtansicht der Sonde, aus [7]

Die Bohrungen 2 und 3 bzw. 4 und 5 haben einen Abstand a_s von 1,85 mm zueinander. Die charakteristische Länge des Kopfes d_{Kopf} beträgt 3 mm. Der Flankenwinkel δ ist 30° .

Abbildung 16 zeigt den Kopf der SVUSS 5 Sonde im Detail.



Abbildung 16: SVUSS 5, Detailansicht Kopf, aus [7]

Abbildung 17 zeigt die technische Zeichnung der SVUSS 5 Sonde.

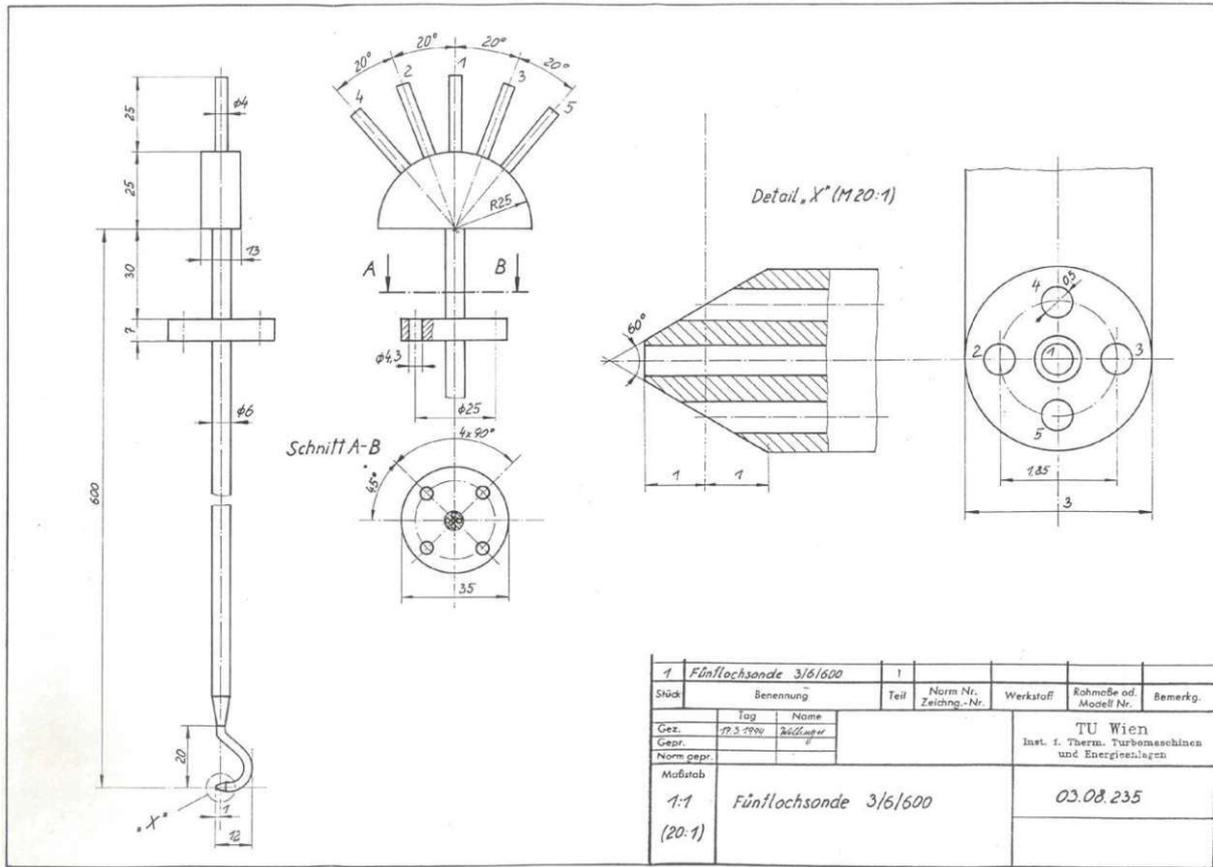


Abbildung 17: SVUSS 5, technische Zeichnung, aus [7]

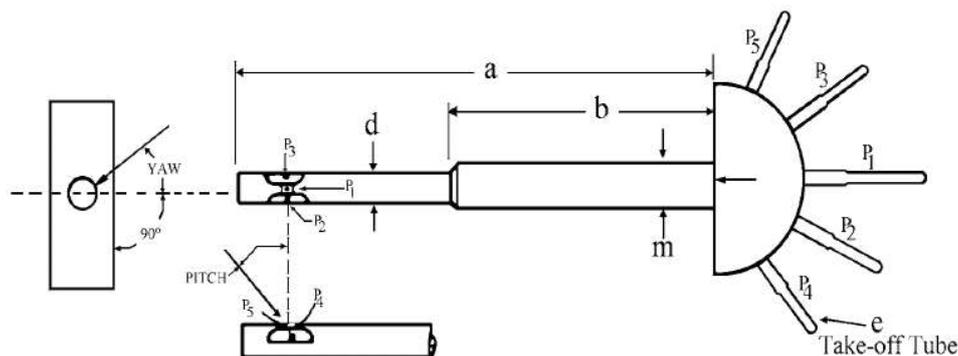
3.3.2 US-DA-125-24-F-22-C Zylindersonde (US-DA-125)

Die US-DA-125 Zylindersonde wurde im Jahr 1977 von der Firma United Sensor hergestellt. Die Hauptmerkmale dieser kommerziellen Sonde sind gemäß Abbildung 18, die dem Bestellformular [8] entnommen wurde, klassifiziert.

Die Sonde hat eine charakteristische Länge d_{Kopf} 3,175 mm (0,125 "). Die Gesamtlänge l_{ges} beträgt 660 mm, wobei der Schaft eine Länge von 609,6 mm (24 ") hat. Der Bohrungsdurchmesser am Sondenkopf d_1 beträgt 0,4572 mm und der Durchmesser am Austritt $d_2 = 1,2$ mm.

Die Bohrungen der Zylindersonde sind laut Hersteller United Sensor wie in Abbildung 18 angeordnet. Diese Anordnung entspricht jedoch nicht der in der Arbeit verwendeten Nomenklatur der Bohrungen. Der Einfachheit halber werden deshalb Bohrung 2 und 3 vertauscht, sodass die Anordnung analog zu jener in Abbildung 14 ist.

Ordering Information



Typical Example: DAT-187-24-F-22-CD-K-Plug

DAT: Sensing Head Type *
 187: $d = .187$ " - Sensing Head Diameter (inches) **
 24: $a = 24$ " - Overall Length (inches)
 F: $m = 1/4$ " Reinforcement Tubing Diameter ***

D	E	F	H	J	L
1/16"	3/16"	1/4"	5/16"	3/8"	1/2"

22: $b = 22$ " - Reinforcement Tubing Length (inches) ***
 CD: $e = 5/32$ " Swaged down to 1/8" - Take-off Tube Diameter

A	C	D	E	F
1/16"	1/8"	5/32"	3/16"	1/4"

Thermocouple Type (DAT probe only)

K: Chromel - Alumel

J: Iron - Constantan

T: Copper - Constantan

E: Chromel - Constantan

Plug: Plug termination is standard. Jacks or Lead-wire are available. - DAT probes only.

Abbildung 18:US-DA-125, United Sensor Bestellformular, aus [8]

3.4 Geometriedaten Sonden

Um die Ausgleichszeiten für die Sonden zu bestimmen, sind die Durchmesser d_1 und d_2 sowie die Längen l_1 und l_2 am Ein- und Austritt der Sonde entscheidend. Jedoch sind nur die Gesamtlängen der Sonden bekannt. Weder die technischen Zeichnungen der Sonden noch andere Dokumente liefern Informationen zu den Längen l_1 und l_2 . Es ist jedoch anzumerken, dass aufgrund der unterschiedlichen Ein- und Austrittsdurchmesser der Sonden eine Querschnittsänderung innerhalb der Sonden erfolgen muss. In der Tabelle 3 sind die für die Berechnung relevanten geometrischen Daten der Sonden gemäß Abbildung 19 zusammengefasst.

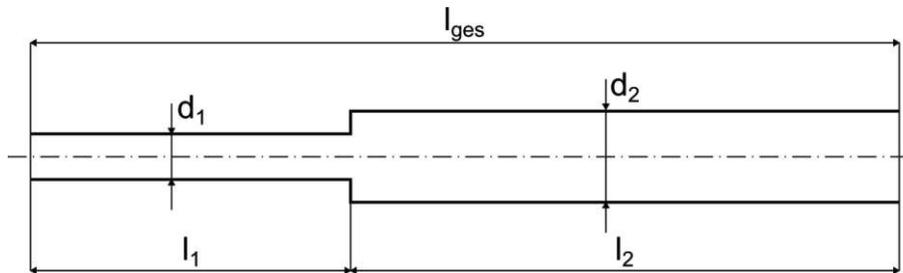


Abbildung 19: Vereinfachte Darstellung der Sonde, mit Abmessungen

Tabelle 3: Auflistung der Durchmesser d_1 , d_2 und Gesamtlängen l_{ges} der Sonden

SVUSS 3	d_1 [mm]	d_2 [mm]	l_{ges} [mm]
Bohrung 1 bis 3	0,5	1	650
AVA Nr. 110	d_1 [mm]	d_2 [mm]	l_{ges} [mm]
Bohrung 1 bis 3	0,6	2	360
AVA Nr. 43	d_1 [mm]	d_2 [mm]	l_{ges} [mm]
Bohrung 1	0,3	2	300
Bohrung 2 bis 3	0,6	1	300
SVUSS 5	d_1 [mm]	d_2 [mm]	l_{ges} [mm]
Bohrung 1 bis 5	0,5	1	650
US-DA-125	d_1 [mm]	d_2 [mm]	l_{ges} [mm]
Bohrung 1 bis 5	0,4572	1,2	660

4 Testanlage

In diesem Kapitel wird die Testanlage und der Versuchsaufbau beschrieben. Dabei werden der Windkanal, das Datenerfassungssystem und weitere Komponenten im folgenden Teil noch genauer erläutert. Der experimentelle Versuch fand im Labor des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik an der TU Wien statt.

Das Ziel des Experiments ist es die Ausgleichszeiten und das Ausgleichsverhalten der Sonden zu bestimmen und den Einfluss der Länge der Druckmessleitungen und der Sondenbohrungen auf die Ausgleichszeit der Sonden zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden drei verschieden lange Druckmessleitungen für die Länge l_5 verwendet. Anschließend sollen die experimentellen Daten mit jenen des analytischen Modells verglichen werden. Die Messungen werden mit den drei Dreilochsonden und den zwei Fünflochsonden, die im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, durchgeführt. Die Messung wird für jede Druckmessleitung und Sonde einmal durchgeführt und somit ergeben sich in Summe fünfzehn Messreihen.

Da für die Bestimmung der Ausgleichszeit nur der Verlauf des Drucks über die Zeit von Bedeutung ist, wird kein Kalibrierungsverfahren für die Sonden benötigt. Im Gegensatz zur Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung kann die Druckdifferenz direkt gemessen werden. Die Abtastrate für die Messungen beträgt ca. 6 Hz. Für jede Bohrung wurden 80 bis 160 Messpunkte aufgezeichnet.

Vor der Durchführung der Messungen wurde für jede Messreihe die Umgebungstemperatur T_u , der Umgebungsdruck p_u und die relative Luftfeuchtigkeit φ bestimmt. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden mit dem Psychrometer Nr. 720 der Firma Wilh. Lambrecht KG ermittelt. Der Druck wurde mit dem Präzisionsbarometer/Altimeter GTD 110 der Firma Greisinger ermittelt.

4.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 20 ist das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus mit den Hauptkomponenten für die Dreilochsonden dargestellt. Die Durchführung der Messung für die Fünflochsonden verläuft analog, mit dem Unterschied dass, für jede Bohrung eine Länge l_3 , also fünf Druckmessleitungen verwendet werden müssen.

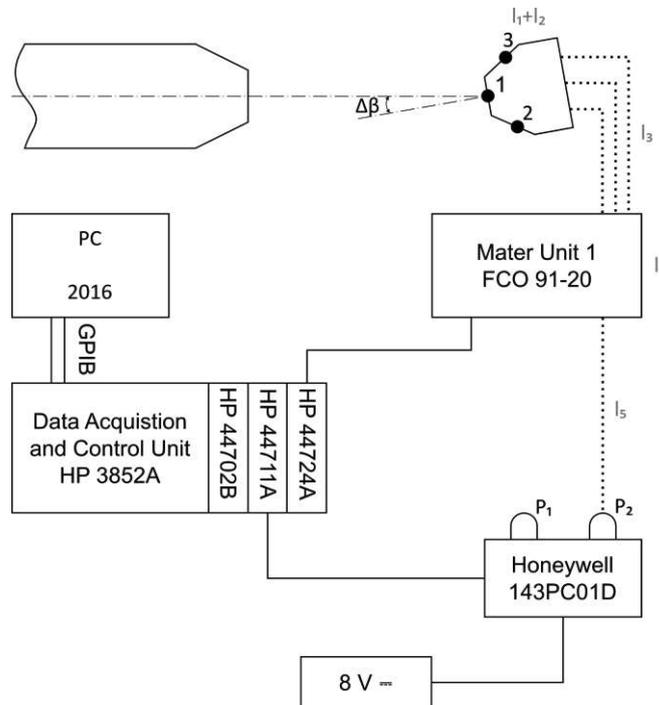


Abbildung 20: Versuchsaufbau Blockschaltbild

Die durchströmten Längen l_1 bis l_5 sind in grau dargestellt und die Druckluftschlauchverbindungen sind durch punktierte Linien gekennzeichnet.

Die Sonde wird in einer Vorrichtung mit dem Abstand x stromabwärts der Düse angeordnet. Um ein homogenes Strömungsfeld zu gewährleisten, soll die Sonde im Bereich:

$$0 \leq x \leq 2,5 d_a \quad (30)$$

platziert werden. d_a ist der Austrittsdurchmesser des Windkanals (120 mm). Die genannte Vorrichtung erlaubt die Drehung der Sonde um den Gierwinkel (Längsachse) und um den Nickwinkel (Horizontalachse) mit einer Genauigkeit von etwa $0,1^\circ$. Die Gier- und Nickwinkel sind so gewählt, dass möglichst große Druckunterschiede beim Umschalten auf die nächste Bohrung entstehen. Die Abstände und Winkel für jede Sonde sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Gierwinkel, Nickwinkel und Abstand der Sonden für die Messung

Sonde	Gierwinkel $\Delta\beta$ [°]	Nickwinkel $\Delta\gamma$ [°]	Abstand x [mm]
SVUSS 3	-30	0	130
AVA Nr. 110	-30	0	130
AVA Nr. 43	-30	0	130
SVUSS 5	-30	-30	130
US-DA-125	-30	+25	130

Die Längen l_1 und l_2 sind die Längen der Sonde, welche nicht bekannt sind. Die Durchmesser und die Gesamtlängen der Sonden finden sich in Tabelle 3. Die Länge l_3 ist die Verbindung zwischen der Sonde und dem Druckmessstellenumschaltgerät (FCO 91). Die Druckmessleitungen l_3 haben eine Länge von 2100 mm mit einem Innendurchmesser von 4 mm und werden von der Firma Festo hergestellt. Die Länge l_4 entspricht dem unter Druck stehenden Volumen des FCO 91 bezogen auf den Querschnitt der Festo Druckluftschläuche. Die Länge l_5 ist die Verbindung zwischen dem Ausgang des FCO 91 und dem Eingang P_2 des piezoresistiven Druckaufnehmer Honeywell 143PC01D. Für die Länge l_5 werden folgende Längen für jede Sonde verwendet:

- 520 mm
- 970 mm
- 2090 mm

Durch die Variation der Druckmessleitung l_5 soll untersucht werden, welchen Einfluss die Länge der Druckmessleitung auf die Ausgleichszeit und das Ausgleichsverhalten der Sonden hat.

Der Druckaufnehmer verfügt über die zwei Eingänge P_1 und P_2 : der Eingang P_1 bleibt offen und ist dem Umgebungsdruck p_U ausgesetzt. Der Eingang P_2 wird über die Druckmessleitung mit der Länge l_5 mit dem FCO 91 verbunden, wodurch eine gemessene Druckdifferenz Δp entsteht.

Da die Sonde über die gesamte Messung der Strömung des Windkanals ausgesetzt ist, herrscht vor dem Beginn der Messung in den jeweiligen Längen l_1 bis l_3 der jeweilige Druck p_A . Erst mit dem Öffnen des Magnetventils stellt sich der Ausmischdruck p_C ein.

Die Abbildung 21 zeigt den tatsächlichen Versuchsaufbau mit dem die Ausgleichszeiten der Sonden gemessen wurden. In der Abbildung wurden die Längen der Sonde und der Druckmessleitungen eingezeichnet. Weiters wurde die Düse des Windkanals, der Drucksensor und das Druckmessstellenumschaltgerät eingezeichnet. In Abbildung 22 ist der Versuchsaufbau in schematischer Form dargestellt.

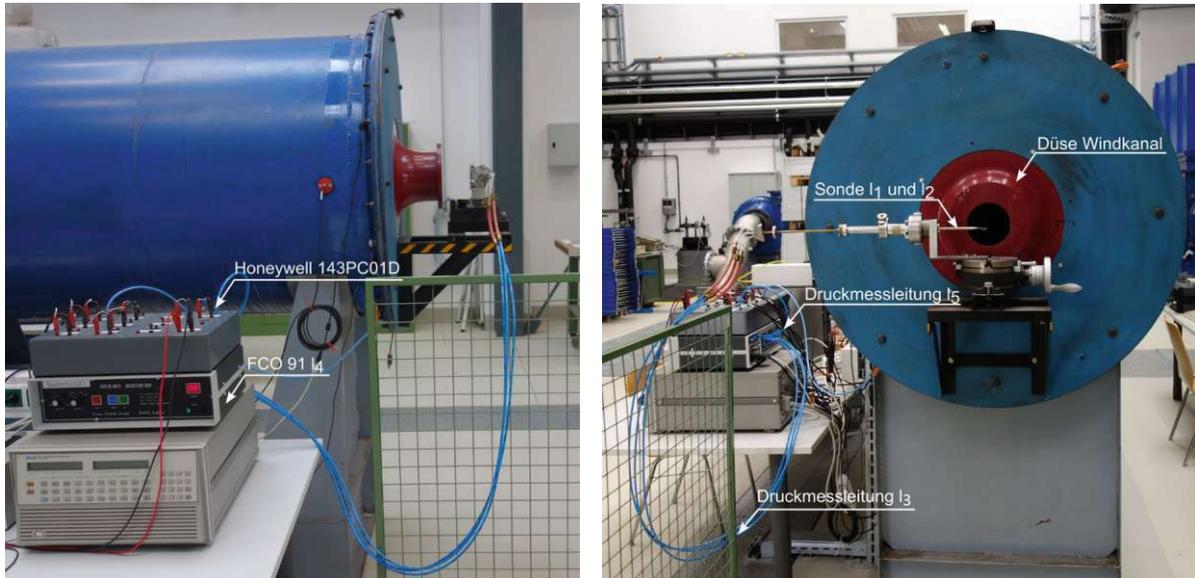


Abbildung 21: Tatsächlicher Versuchsaufbau

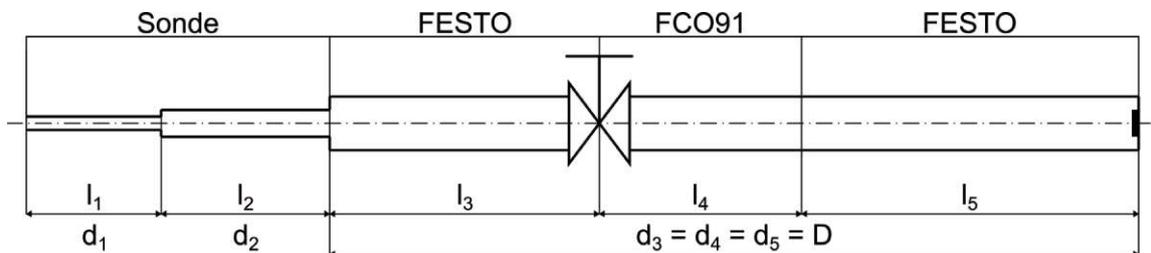


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

4.2 Datenerfassung

Während in Abbildung 20 das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus dargestellt ist, wird in Abbildung 23 der tatsächliche Aufbau für die Datenerfassung gezeigt. Zur Datenverarbeitung und -speicherung wird ein PC mit der Software LabVIEW 2016 verwendet. Das Datenerfassungs- und Steuerungssystem HP 3852A ist über einen GPIB-Bus mit dem PC verbunden und mit mehreren Einschüben ausgestattet. Das FCO 91 wird über das HP 44724A 16-Channel Isolated Digital Output gesteuert. Die Erfassung der Spannung, die vom piezoresistiven Drucksensor ausgegeben wird, erfolgt mithilfe des HP 44711A High-Speed FET Multiplexers und des HP 44702B 13-Bit High-Speed Voltmeters. Zusätzlich erfordert der Drucksensor von Honeywell eine Versorgungsspannung von 8 V Gleichspannung.

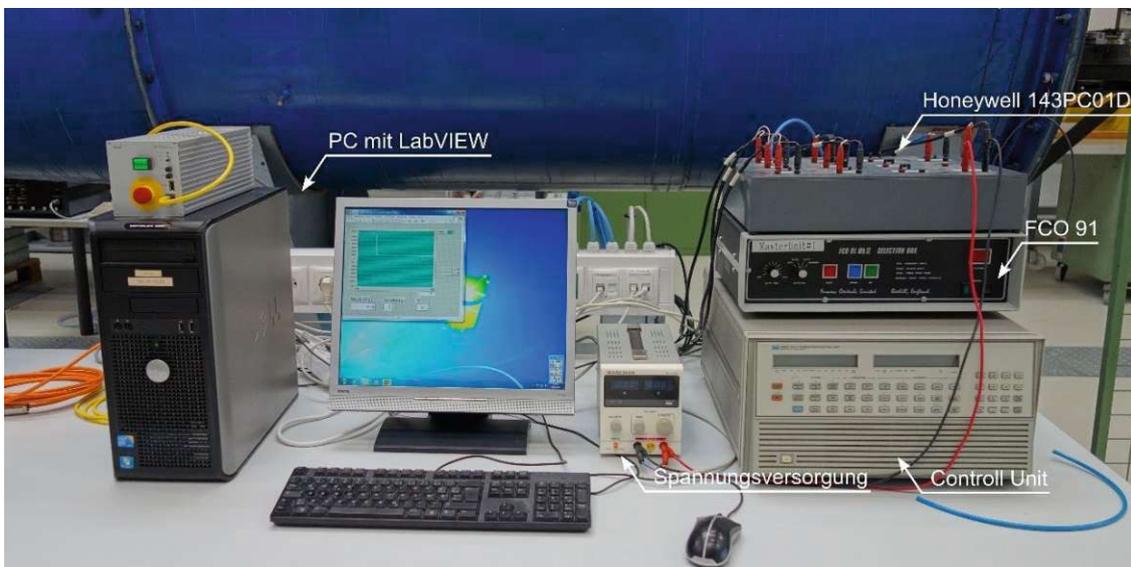


Abbildung 23: Tatsächliches Datenerfassungssystem

Für jede Sonde wird eine Messung bei jeder der drei verschiedenen Schlauchlängen l_5 durchgeführt. Dabei werden für jede Bohrung 80 bzw. 160 Messpunkte aufgenommen. Zusätzlich werden für jede Messreihe zu Beginn und am Ende der Messung 80 bzw. 160 Messpunkte aufgezeichnet bei denen keine Druckdifferenz am Druckaufnehmer anliegt. Die Abtastrate f_s für den Druck beträgt ca. 6 Hz. In Tabelle 5 ist die Anzahl der Messpunkte N und die Abtastrate f_s je Schlauchlänge für die Sonden angegeben.

Tabelle 5: Messpunkte und Abtastrate je Sonde

Sonde	Messpunkte N	$f_{s,520}$ [Hz]	$f_{s,970}$ [Hz]	$f_{s,2090}$ [Hz]
SVUSS 3	400	5,70	5,62	5,62
AVA Nr. 110	400	5,87	6,14	5,96
AVA Nr. 43	800	6,19	6,10	6,10
SVUSS 5	1120	6,05	6,08	6,11
US-DA-125	1120	5,68	5,77	5,86

Die Unterschiede in der Abtastrate der Messungen entstehen dadurch, dass die Zeitstempel bei der Datenerfassung in standardisierten Zeiteinheiten angegeben werden, wobei die kleinste Einheit die Sekunde ist. Da innerhalb einer Sekunde mehrere Abtastungen erfolgen, treten Abweichungen auf, weil die Zeitstempel nicht die Genauigkeit besitzen, um jede einzelne Abtastung präzise zu repräsentieren. Somit kommt es zu der Streuung der Abtastrate für die verschiedenen Sonden und Längen.

4.3 Komponenten

4.3.1 Windkanal

Im Freistrahwindkanal, der in Abbildung 24 dargestellt ist, wird die Strömung, die für die Messung der Ausgleichszeiten verwendet wird, erzeugt. Die folgenden Daten wurden der Dokumentation des Windkanals [9] entnommen.

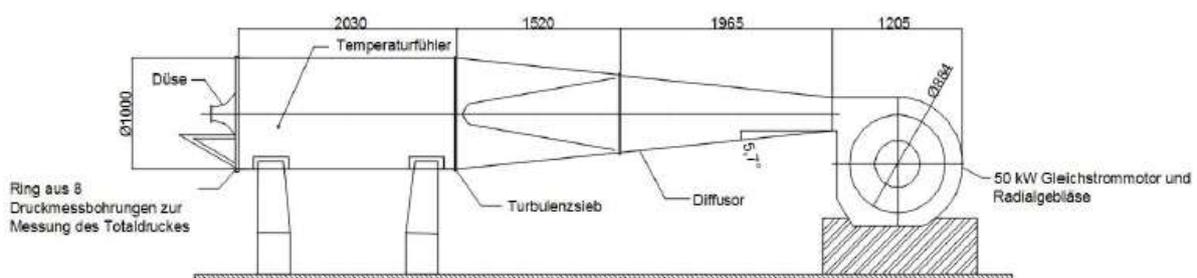


Abbildung 24: Windkanal der TU Wien, aus [9]

Die Strömung im Windkanal wird durch den Radialventilator SIROCCO Z 10 HD 86, welcher einen Laufraddurchmesser von 884 mm aufweist, erzeugt. Der Gleichstrommotor der Firma ELIN hat eine Leistung von 50 kW. Der Motor ist zusammen mit dem Gebläse auf einem Fundamentrahmen fixiert und die Strömungsgeschwindigkeit wird durch Drehzahlregelung gesteuert.

Nach dem Radialgebläse wird die Strömung im Diffusor, welcher einen Öffnungswinkel von $5,7^\circ$ hat, verzögert. Nach ca. 3,5 m endet der Diffusor mit einem rechteckigen Querschnitt bevor der Windkanal in ein kreisförmiges Profil übergeht. Um die Turbulenz niedrig zu halten und ein homogenes Strömungsfeld mit einer niedrigen Turbulenzintensität ($T_u = 0,8\%$) sicherzustellen, ist der Anfang des kreisförmigen Querschnitts des Windkanals mit einem Turbulenzsieb versehen.

Der letzte Teil des Windkanals besteht aus einem 2 m langen Beruhigungsteil, welcher mit einer konvergenten Düse endet. Der Eintrittsdurchmesser beträgt 1000 mm und der Austrittsdurchmesser beträgt $d_a = 120$ mm. Dies entspricht einem Kontraktionsverhältnis von 1:69,4.

Am Düseneintritt kann der Totaldruck im Windkanal an acht Stellen (symmetrisch verteilt) gemessen werden. Außerdem verfügt der Prüfstand über ein Pt-100 Widerstand um die Temperatur zu messen.

Der Windkanal wurde für die Messung mit einer Drehzahl n von $1.000 \frac{U}{min}$ betrieben. Mit Hilfe der Dokumentation des Freistrahwindkanals kann die Geschwindigkeit w von $48 \frac{m}{s}$ abgelesen werden. Der dynamische Druck beläuft sich nach Gl. (31) auf 1382,4 Pa bzw. 13,8 mbar. Dies stellt die maximale erreichbare Druckdifferenz bei dieser Drehzahl dar.

$$p_{dyn} = \rho \frac{w^2}{2} \quad (31)$$

4.3.2 FCO 91-MK II

Das Druckmessstellenumschaltgerät FCO 91-MK II 20 way single wurde von der Firma Furness Controls im Jahre 1995 hergestellt. Es ermöglicht den Anschluss von mehreren Druck-Eingängen an einen einzigen Druckaufnehmer. Abbildung 25 links zeigt den Innenaufbau des FCO 91 nach Entfernen der Abdeckung. Rechts in der Abbildung ist die technische Zeichnung aus dem Handbuch [10] mit den relevanten Abmaßen der Druckmessleitungen im Inneren des FCO 91 dargestellt.

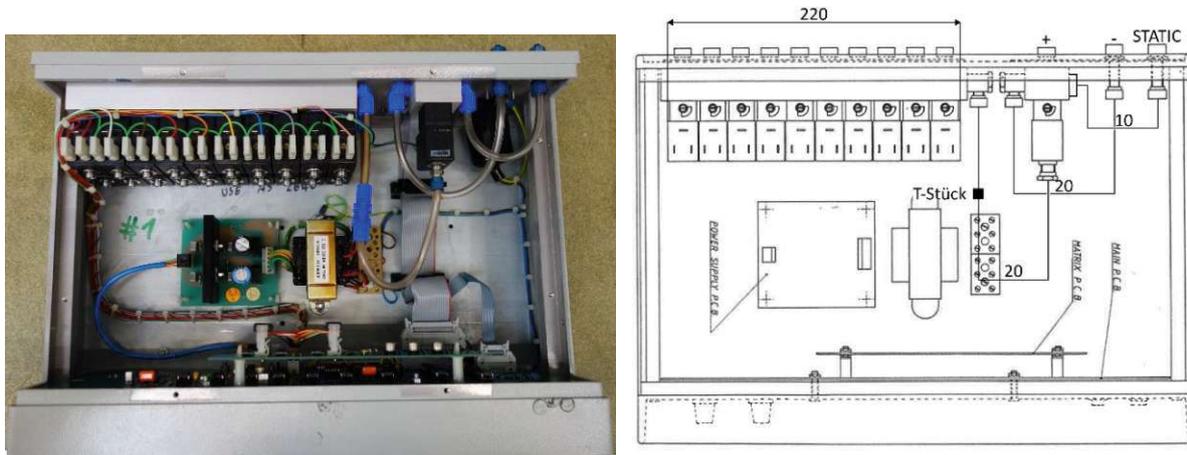


Abbildung 25: FCO 91, links geöffnet, rechts technische Zeichnung, aus [10]

Das Gerät verfügt über 20 Eingänge, welche von 1 bis 20 nummeriert sind und 3 Ausgänge +, - und Static. Für die Messung wird nur der Ausgang + verwendet. Die Magnetventile der Eingänge können über die Frontseite gesteuert werden. Die Eingänge werden als Channel bezeichnet. Die Messungen beginnen immer mit dem Channel 0, welcher dem Umgebungsdruck ausgesetzt ist. Für die Messung wird die Einstellung PULS verwendet. Dies erlaubt die Steuerung mit dem PC, sodass nach einer bestimmten Anzahl an Messpunkten automatisch auf den nächsten Channel geschaltet wird.

Die Eingänge sind in zwei Reihen (Eingang 1-10 und 11-20) angeordnet und werden über Magnetventile gesteuert. Die Magnetventile sind jeweils mit Ventilblöcken aus Aluminium mit einer Länge von 220 mm verbunden. Die beide Ventilblöcke sind über ein T-Stück miteinander verbunden, welche wiederum mit dem Ausgang + verbunden sind. Die Verschlauchung des FCO 91-MK II besteht aus Druckluftschläuchen mit einem Innendurchmesser von 4 mm, ähnlich den verwendeten Festo Schläuchen. Der Durchmesser der Aluminiumblöcke ist nicht bekannt, jedoch erscheinen hier 4 mm Innendurchmesser als plausible Annahme. Somit lässt sich die Länge bzw. das Volumen bezogen auf den Querschnitt der Festo Schläuche mit $l_4 = 800$ mm angeben.

4.3.3 Honeywell 143PC01D

Zur Messung der Drücke wird der Honeywell 143PC01D verwendet, dargestellt in Abbildung 26. Die Daten des Senors wurden aus dem Herstellerkatalog [11] entnommen. Hierbei handelt es sich um einen piezoresistiven Drucksensor. Dieser hat einen Einsatzbereich von $\Delta p = \pm 69$ mbar; diese Grenze liegt weit oberhalb bzw. unterhalb der maximalen Druckdifferenz von 13,8 mbar, die durch den Windkanal erzeugt wird.

Der Drucksensor beruht auf dem piezoresistiven Effekt, der die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Materials aufgrund der Zug- oder Druckbeanspruchung beschreibt. Die Membran, welche durch die Biegung den Widerstand ändert, besteht zu 100 % aus Silicium.

Durch das Öffnen des Drucksensors und die Konsultation der technischen Zeichnung aus dem Herstellerkatalog zeigt sich, dass das Volumen im Inneren, das für die Druckmessung benötigt wird, sehr klein ist und daher für die Berechnung vernachlässigt werden kann.

Absolut-, Differenz-, Über-, Unterdrucksensoren/mit Verstärker Serie 140PC

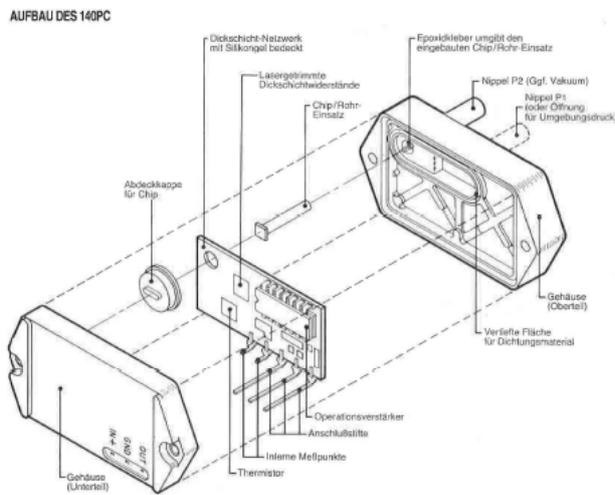
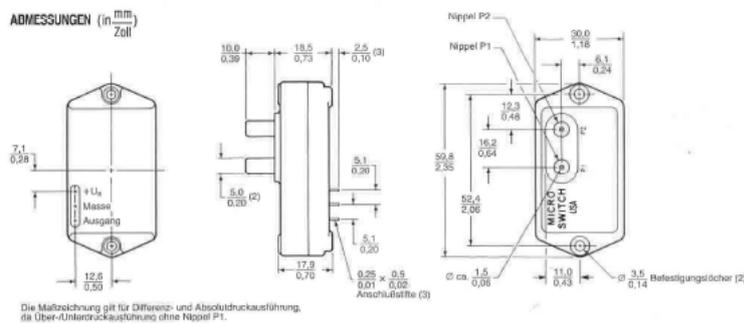


Abbildung 26: Honeywell 140PC Serie, technische Zeichnung, aus [11]

5 Ergebnisse und Diskussion

Durch die im Labor durchgeführte Messung wurden für die drei Dreiloch- und die beiden Fünflochsonden für jede Schlauchlänge l_5 folgende Messdaten ermittelt:

- Druckdifferenz der Bohrungen Δp
- Zeitpunkt der jeweiligen Druckdifferenz Δp in [hh:mm:ss]

Außerdem wurden auch die Umgebungstemperatur T_u , der Umgebungsdruck p_U und die relative Luftfeuchtigkeit φ gemessen.

Die Auswertung der Daten erfolgt in Microsoft-Excel. Die erfassten Daten wurden dem Programm hinzugefügt und die folgenden Größen wurden durch die entsprechenden mathematischen Beziehungen ermittelt:

- Ausgleichszeit t_{99}
- Zeitkonstanten τ_{520} , τ_{970} und τ_{2090}
- Sondenlängen l_1 und l_2
- Ausmischdruck p_{c_b}
- Druck p_A für jede Bohrung

Für die Messung lag die Umgebungstemperatur T_u bei 21 °C, der Umgebungsdruck für die US-DA-125 Sonde bei 1002 mbar und für die übrigen Sonden bei 976 mbar. Für die folgenden Berechnungen wurde 1 bar für den Umgebungsdruck angenommen. Die relative Luftfeuchtigkeit lag zwischen 45% und 50% und somit konnten die Vereinfachungen für trockene Luft angewendet werden. Die Stoffdaten ergeben sich zu:

- $v = 1,541 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
- $a = 343,9 \frac{m}{s}$
- $\kappa = 1,4$

Für jede Messung wurden am Beginn und am Ende der Messung jeweils N Messpunkte aufgezeichnet. Dabei ist sowohl der Eingang P_2 als auch der Eingang P_1 des Drucksensors dem Umgebungsdruck p_U ausgesetzt, was theoretisch zu einer Druckdifferenz von Null führen sollte. In den tatsächlichen Messungen wurde jedoch eine kleine Druckdifferenz Δp_s von etwa 100 Pa festgestellt. Daher wurde für jede Sonde und für alle drei dazugehörigen Druckmessleitungen l_5 der Mittelwert dieser Druckdifferenzen berechnet und anschließend wurden alle gemessenen Druckdifferenzen der jeweiligen Sonde um diesen Mittelwert korrigiert.

Der Zeitschritt t_s für die Messungen wird wie folgt berechnet:

$$t_s = \frac{t_N - t_0}{N - 1} \quad (32)$$

Dabei steht t_N für das Ende der Messung, t_0 für den Anfang der Messung und N für die Anzahl der Messpunkte. Diese Berechnungsmethode stellt sicher, dass die Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Messpunkten gleichmäßig verteilt ist. Der Zeitschritt t_s erlaubt eine konsistente und genaue Darstellung der Messdaten. Aus dem Kehrwert des Zeitschritts t_s lässt sich die Abtastrate f_s wie folgt bestimmen:

$$f_s = \frac{1}{t_s} \quad (33)$$

Diese gibt an, wie viele Messpunkte pro Sekunde erfasst werden.

Für jede Sonde wurden die drei Messreihen nach den jeweiligen Bohrungen unterteilt. Dadurch können die Daten der Bohrungen miteinander verglichen werden, insbesondere in Bezug auf die verschiedenen verwendeten Druckmessleitungen l_5 . Dieser Vergleich ermöglicht es, Rückschlüsse auf die Ausgleichszeit t_A , die Zeitkonstante τ und die Geometrie der Sonde zu ziehen. Durch diesen Vergleich wird ersichtlich wie sich die Schlauchlänge auf diese Parameter auswirkt.

Zusätzlich kann aus dem Mittelwert der drei Messreihen nach einer Zeit t , der Druck p_A für die jeweilige Bohrung bestimmt werden. Dies ermöglicht die Bestimmung des Ausmischdrucks $p_{c,b}$ für jede Bohrung zu jeder Schlauchlänge. Für die weiteren Berechnungen wurde stets der gemessene Druck p_c anstelle des berechneten Ausmischdruckes $p_{c,b}$ verwendet.

5.1 Bestimmung der Ausgleichszeiten t_{99}

Für die Bestimmung der Ausgleichszeiten müssen im ersten Schritt die gemessenen Zeitkonstanten $\tau_{520_{Bi}}$, $\tau_{970_{Bi}}$ und $\tau_{2090_{Bi}}$ bestimmt werden. Der erste Index steht für die Druckmessleitung l_5 , und der Index Bi für die Bohrung. Die gemessenen Zeitkonstanten werden mit Hilfe von Gl. (28) bestimmt. Hierbei werden die Werte t und Δp im Bereich von 0,8 bis 0,999 der ursprünglichen Druckdifferenz und der Wert von p_c aus den Messdaten entnommen. Somit ergeben sich die gemessenen Zeitkonstanten für jede Bohrung und Schlauchlänge aus dem Mittelwert aller Zeitkonstanten aus dem genannten Bereich. Um zu überprüfen, ob die Messpunkte der Exponentialfunktion aus dem erweiterten Modell folgen, wird Gl. (20) nach p umgeformt und die gemessenen Zeitkonstanten eingesetzt.

Im nächsten Schritt werden die Längen l_1 und l_2 der Sonde mit Hilfe Gl. (29) berechnet, hierfür werden die gemessenen Zeitkonstanten verwendet. Durch die Wahl einer Länge l_1 kann für jede Druckmessleitung l_5 mit Gl. (19) eine Zeitkonstante τ berechnet werden. Um die gemessenen und die berechneten Zeitkonstanten leicht vergleichen zu können, werden diese grafisch dargestellt. Hierfür wird Gl. (19) als Funktion der Länge l_1 dargestellt und die gemessenen Zeitkonstanten in das Diagramm eingezeichnet. Für die Berechnung einer beliebigen Ausgleichszeit kann Gl. (13) verwendet werden. Die 99 % Ausgleichszeit ergibt sich gemäß Gl. (14) zu $t_{99} \approx 4,6\tau$. Auch werden die mit l_1 berechneten Zeitkonstanten τ_{520} , τ_{970} und τ_{2090} in die Exponentialfunktion Gl. (20) eingesetzt und mit den Messdaten verglichen.

Um die Ergebnisse zwischen den Bohrungen vergleichen zu können, müssen die Messwerte in dimensionsloser Form dargestellt werden. Hierfür wird der Druckkoeffizient C_p nach Gl. (2) und die dimensionslose Zeit t / τ verwendet. Diese Darstellung ermöglicht den Vergleich von Bohrungen mit unterschiedlichen Druckdifferenzen bei derselben Schlauchlänge l_5 . So kann schnell auf die Güte der berechneten Zeitkonstante in Abhängigkeit von der gewählten Sondenlänge l_1 geschlossen werden. Die Messwerte der Bohrungen, die unterhalb der Kurve der Exponentialfunktion aus Gl. (12) liegen, zeigen eine höhere Ausgleichszeit, während jene oberhalb der Kurve eine geringere Ausgleichszeit aufweisen als das erweiterte Modell vorhersagt. Auch kann die 99% Ausgleichszeit in dimensionsloser Form bei $t / \tau = 4,6$ ins Diagramm eingezeichnet werden.

5.1.1 SVUSS 3

In den Abbildungen 27 bis 29 sind die Messdaten aus den Messreihen 04012401, 04012402 und 04012403 für die SVUSS 3 Sonde dargestellt. Der Druck p_A entspricht dem Mittelwert aller Bohrungen nach $t = 5,5$ s. Die Punkte 520, 970 und 2090 entsprechen den gemessenen Druckdifferenzen für die drei Schlauchlängen l_5 zu den jeweiligen Zeitpunkten. Die Linien repräsentieren die Exponentialfunktion mit der dazugehörigen gemessenen Zeitkonstante. Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte sehr gut der Exponentialfunktion folgen. An den gemessenen Zeitkonstanten ist zu erkennen, dass mit zunehmender Länge l_5 die Zeitkonstante größer wird, wie es das Modell vorhersagt. In Tabelle 6 sind die gemessenen Zeitkonstanten und die daraus berechneten Sondenlängen l_1 angegeben.

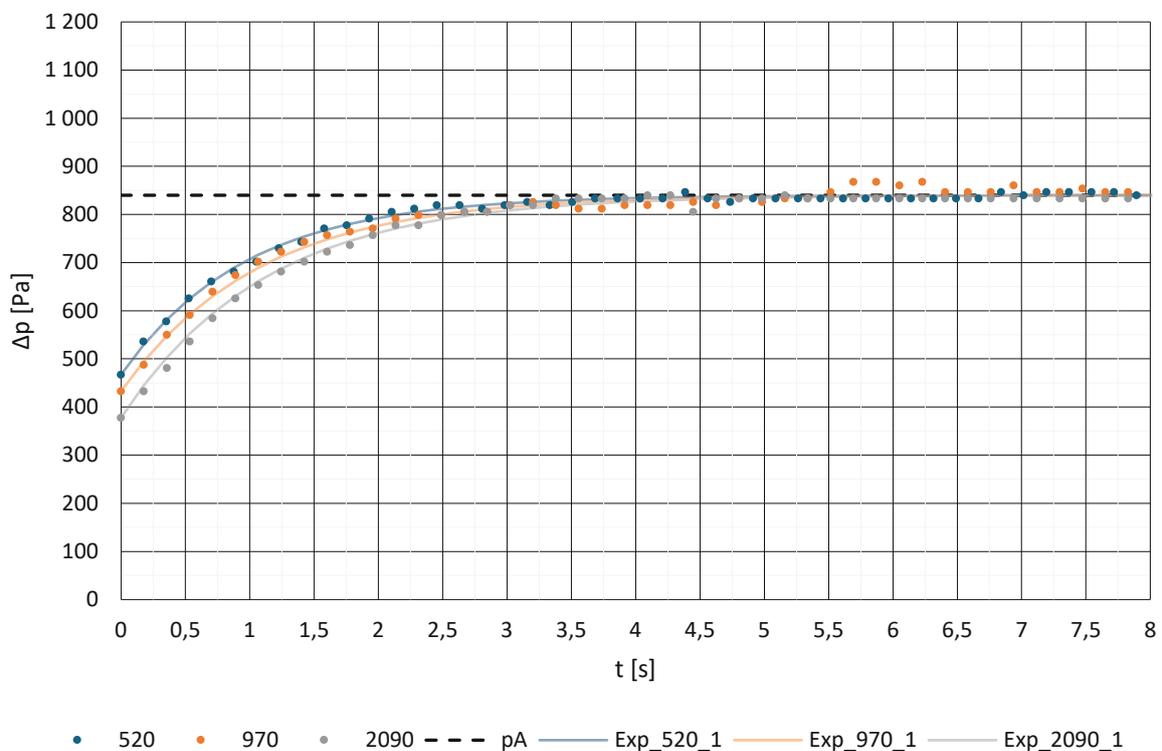


Abbildung 27: SVUSS 3, Bohrung 1 mit gemessenen Zeitkonstanten

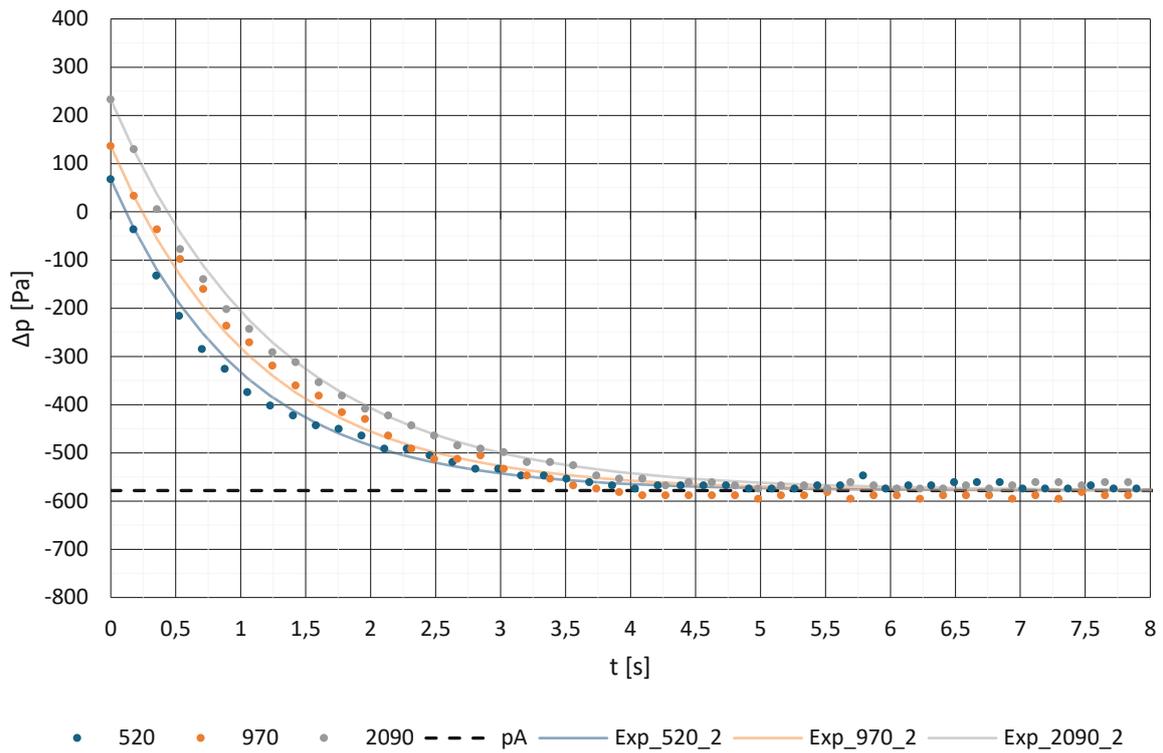


Abbildung 28: SVUSS 3, Bohrung 2 mit gemessenen Zeitkonstanten

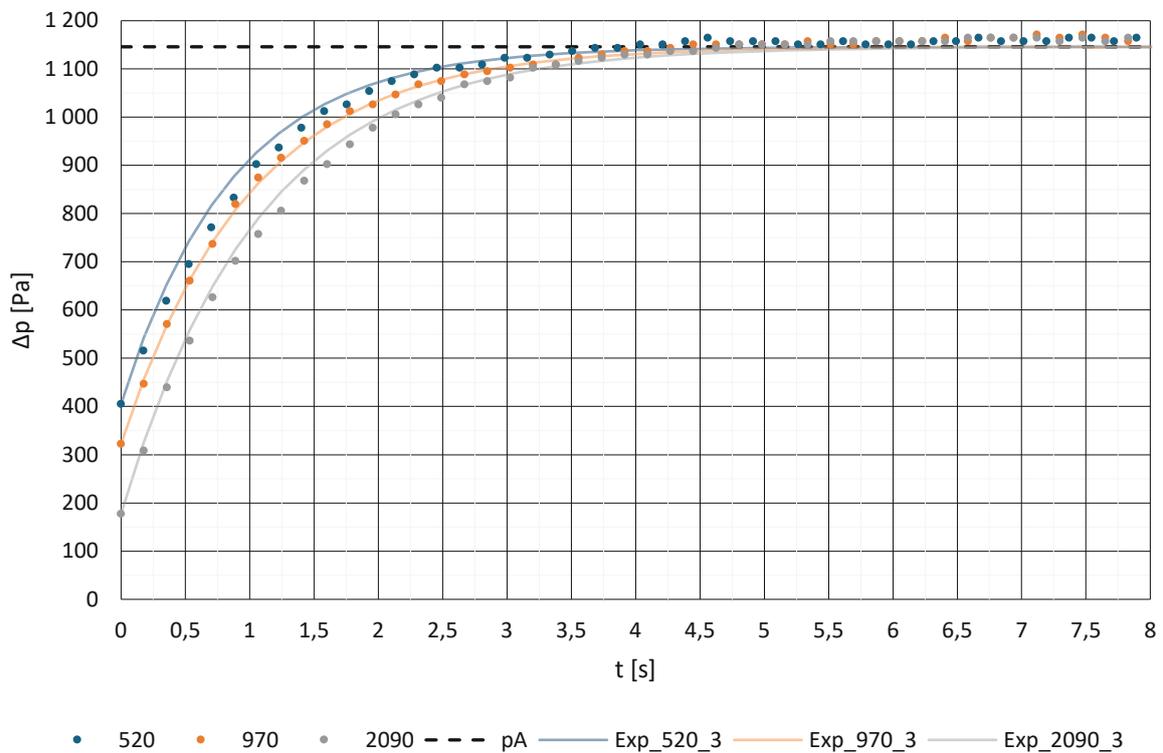


Abbildung 29: SVUSS 3, Bohrung 3 mit gemessenen Zeitkonstanten

Es wurde zu jeder Zeitkonstante die dazugehörige Länge l_1 bestimmt und für jede Bohrung eine mittlere Länge \bar{l}_1 berechnet. Somit ergibt sich eine gesamte mittlere Länge \bar{l}_1 für alle drei Bohrungen von 144 mm. Mit dieser mittleren Länge wurde die Zeitkonstante τ für jede Länge der Druckmessleitungen berechnet. Des Weiteren wurde auch die mittlere Zeitkonstante $\bar{\tau}$ für jede Schlauchlänge aus den gemessenen Zeitkonstanten berechnet.

Tabelle 6: SVUSS 3, Vergleich der berechneten und gemessenen Zeitkonstanten und dazugehörige Länge l_1 ; τ in s und Längen in mm

l_5	520		970		2090		\bar{l}_1
	τ_{520_Bi}	l_1	τ_{970_Bi}	l_1	τ_{2090_Bi}	l_1	
Bohrung 1	0,97	158,7	1,07	154,2	1,12	117,3	143,4
Bohrung 2	1,03	172,4	1,13	165,6	1,28	140,2	159,4
Bohrung 3	0,87	137,2	1,00	140,9	1,07	109,0	129,0
$\bar{\tau}$	0,96	156,1	1,07	153,6	1,16	122,2	144,0
τ	0,90	144,0	1,02	144,0	1,31	144,0	144,0

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse der obigen Tabelle grafisch dargestellt. Hierfür wurden die drei Zeitkonstanten τ_{520} , τ_{970} und τ_{2090} nach dem erweiterten Modell als Funktion der Länge l_1 eingezeichnet. Weiters wurden hier die gemessene, die mittlere und die berechnete Zeitkonstante an der jeweiligen mittleren Länge eingezeichnet. Es zeigt sich, dass die berechneten Zeitkonstanten für die Länge 2090 an der jeweiligen mittleren Länge \bar{l}_1 größer als die gemessenen Zeitkonstanten sind. Dies hat zur Folge, dass die gemessenen Zeitkonstanten für die Längen 520 und 970 über der berechneten Zeitkonstante liegen.

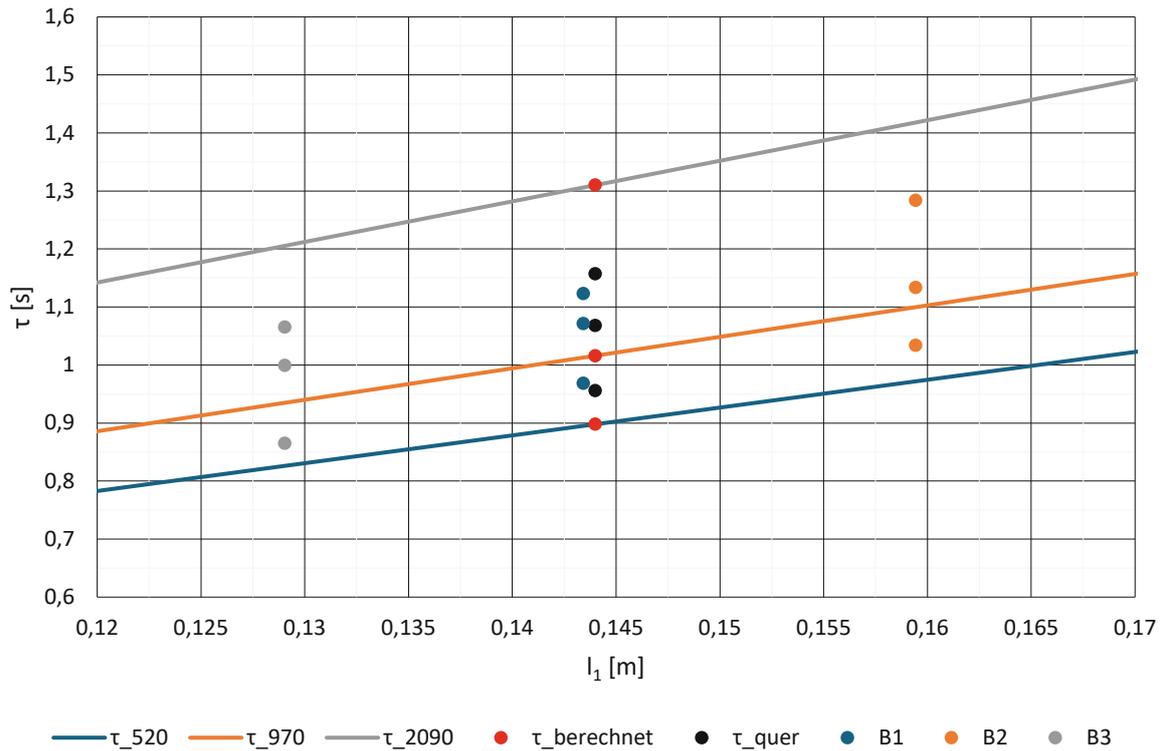


Abbildung 30: SVUSS 3, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten

In Abbildung 31 bis 33 sind die drei Bohrungen der SVUSS 3 Sonde für die berechneten Zeitkonstanten abgebildet. Bei allen drei Bohrungen ist zu erkennen, dass die berechnete Zeitkonstante τ_{2090} etwas zu groß angenommen wurde. Dies wird besonders bei Bohrung 1 und 3 ersichtlich und somit wird auch die Ausgleichszeit für die Länge 2090 überschätzt. Die beiden Exponentialfunktionen mit den Zeitkonstanten τ_{520} und τ_{970} folgen den gemessenen Werten gut. Die 99 % Ausgleichzeiten für die SVUSS 3 Sonde ergeben sich für die drei Schlauchlängen zu:

- $t_{99,520} = 4,13$ s
- $t_{99,970} = 4,68$ s
- $t_{99,2090} = 6,03$ s

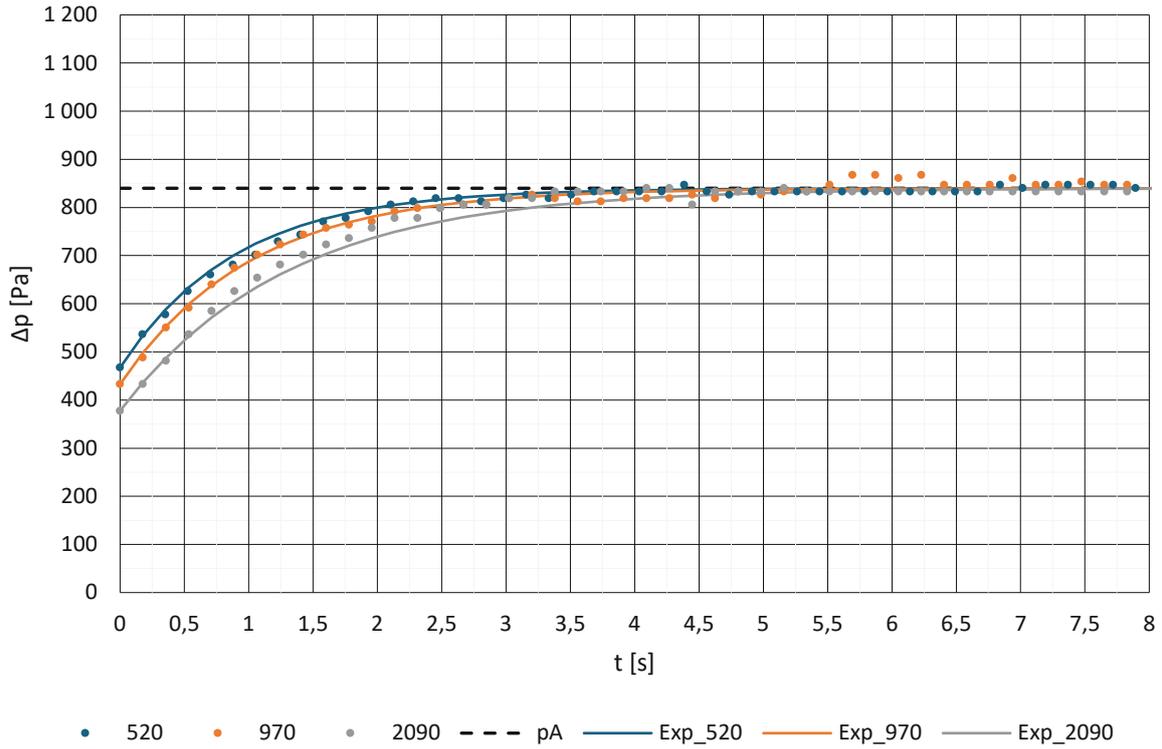


Abbildung 31: SVUSS 3, Bohrung 1 mit τ berechnet bei $l_1 = 144$ mm

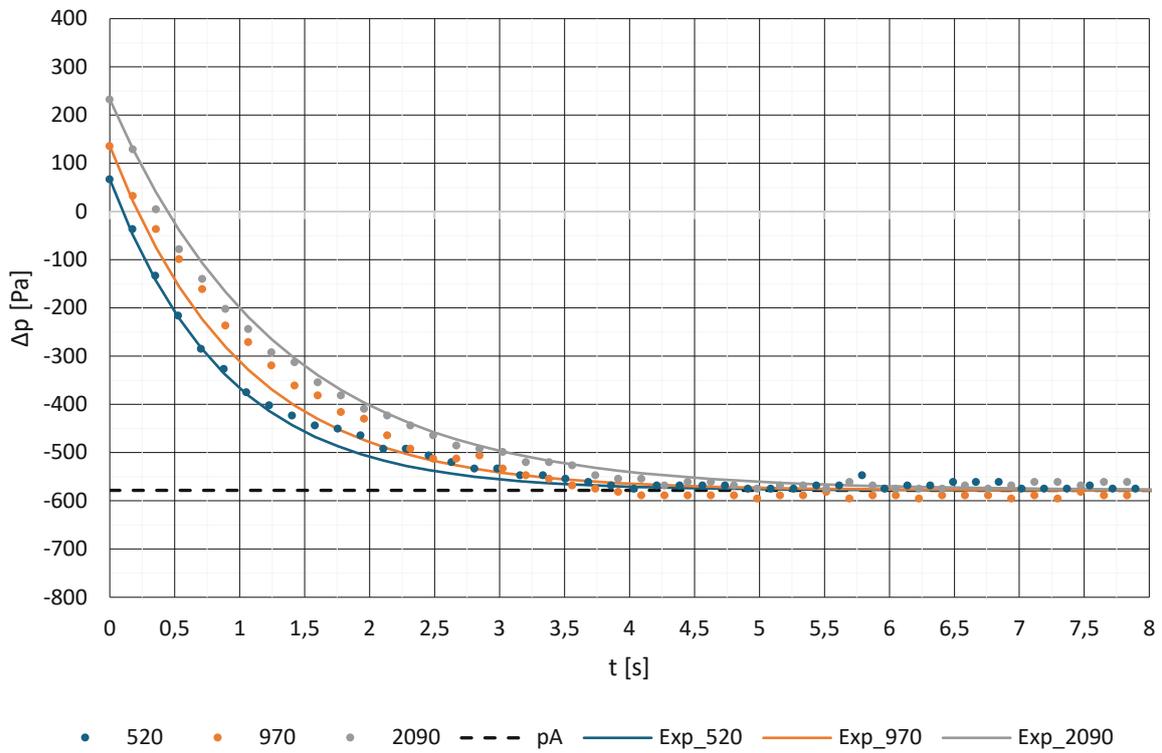


Abbildung 32: SVUSS 3, Bohrung 2 mit τ berechnet bei $l_1 = 144$ mm

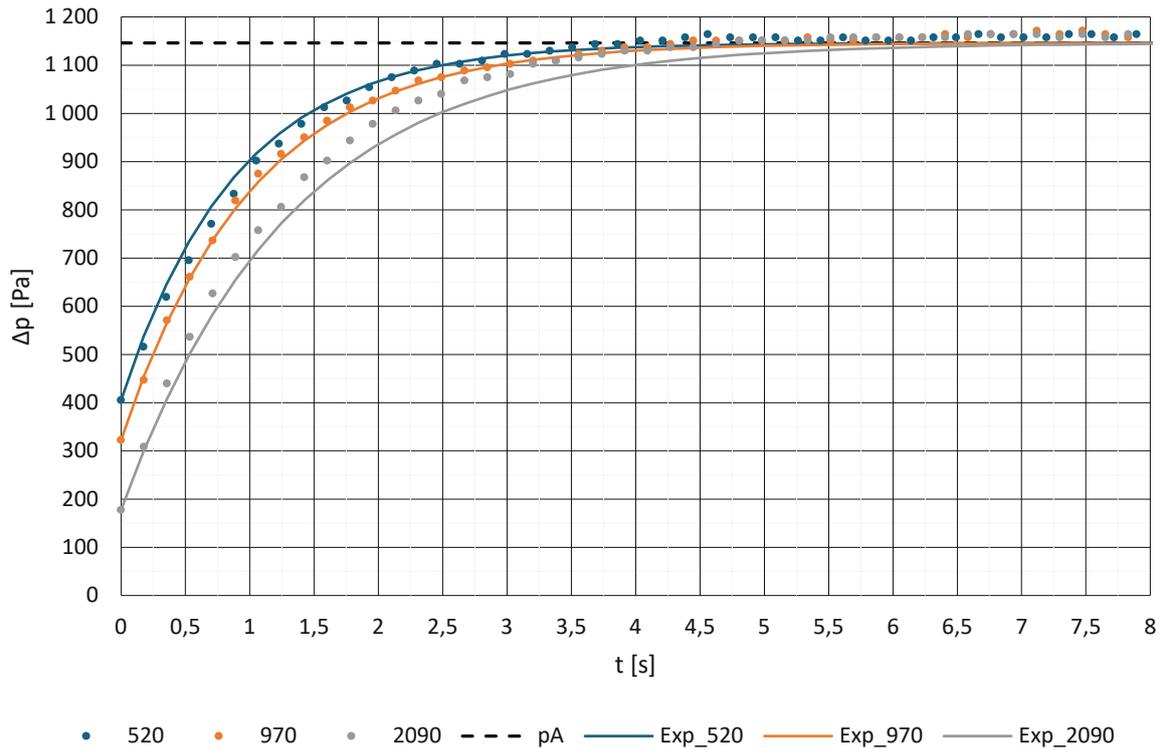


Abbildung 33: SVUSS 3, Bohrung 3 mit τ berechnet bei $l_1 = 144$ mm

Um die Ergebnisse zwischen den Bohrungen vergleichen zu können, werden die Messdaten dimensionslos dargestellt. In den Abbildungen 34 bis 36 wurden die Bohrungen nach den Druckmessleitungen l_5 unterteilt um den Vergleich von Bohrungen mit derselben Zeitkonstante zu ermöglichen. Auch die Exponentialfunktion des erweiterten Modells wurde in dimensionsloser Form, inklusive der dimensionslosen 99 % Ausgleichszeit, in den Diagrammen eingezeichnet. Wie zu erwarten, kommt es auch in der dimensionslosen Darstellung für die Länge 2090 zu einer Überschätzung des Ausgleichsverhaltens. Für die Längen 520 und 970 zeigen die gemessenen Werte eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten.

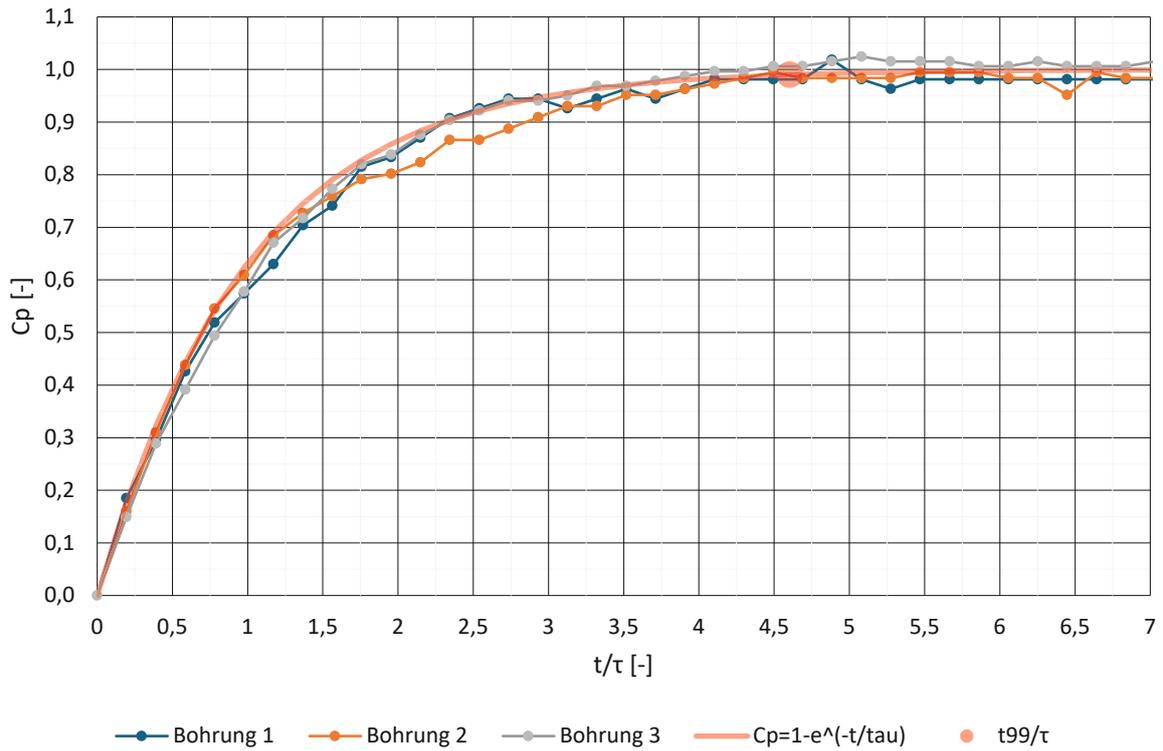


Abbildung 34: SVUSS 3, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 520$ mm und $\tau_{520} = 0,90$ s

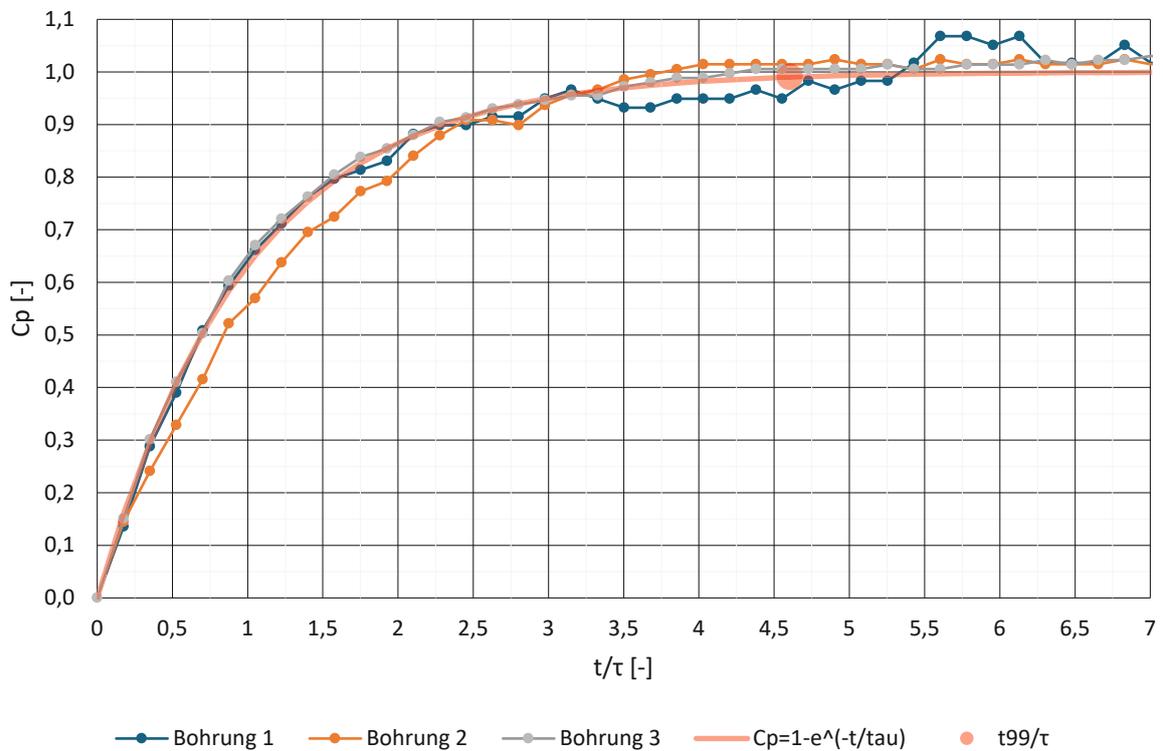


Abbildung 35: SVUSS 3, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 970$ mm und $\tau_{970} = 1,02$ s

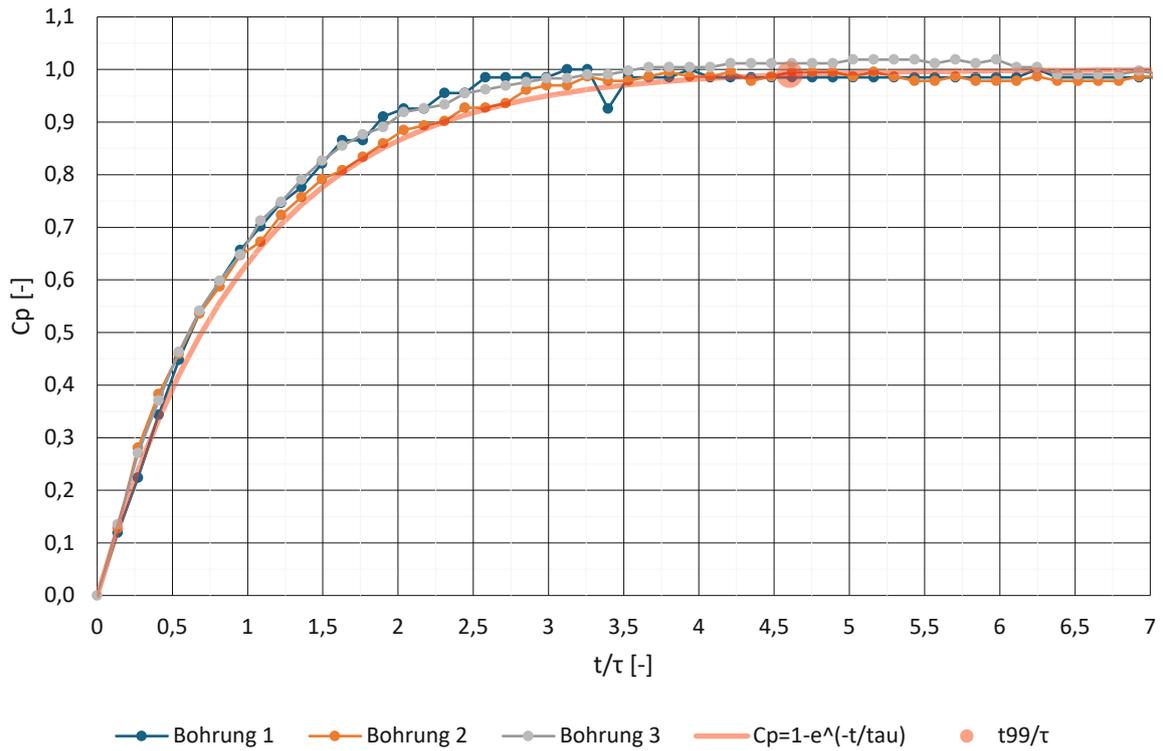


Abbildung 36: SVUSS 3, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 2090$ mm und $\tau_{2090} = 1,31$ s

5.1.2 AVA 110

In Abbildung 37 bis 39 sind die Messdaten aus den Messreihen 04012404, 04012405 und 04012406 für die AVA 110 Sonde dargestellt. Der Druck p_A wurde für die Bohrung 1 nach $t = 4,3$ s und für die Bohrung 2 und 3 nach $t = 1,8$ s über alle drei Schlauchlängen gebildet. Die gemessenen Druckdifferenzen werden mit den Punkten 520, 970 und 2090 dargestellt. Die Exponentialfunktion mit den dazugehörigen gemessenen Zeitkonstanten wird in Linien dargestellt. Es zeigt sich, dass die gemessenen Werte gut der Exponentialfunktion folgen und ein größeres Volumen zu einer höheren Ausgleichszeit führt. Jedoch ist die gemessene Zeitkonstante für die Bohrung 1 wesentlich größer als jene von Bohrung 2 und 3. In Tabelle 7 finden sich die gemessenen und berechneten Zeitkonstanten für die AVA 110 Sonde.

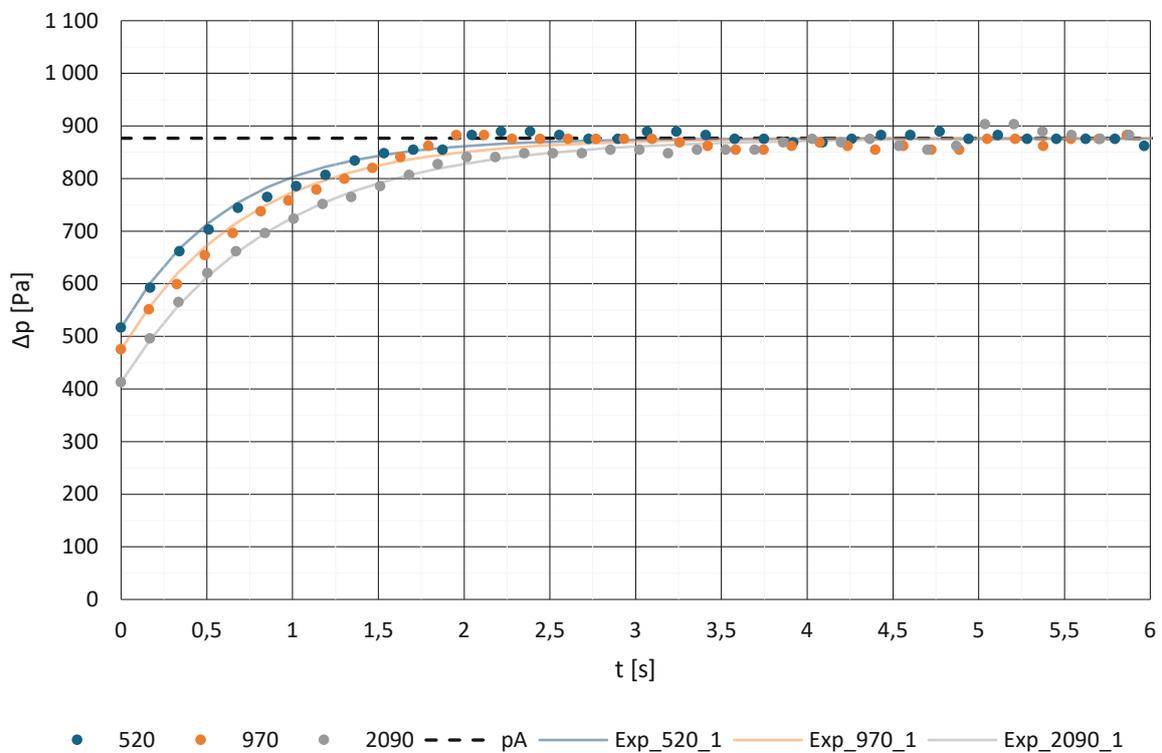


Abbildung 37: AVA 110, Bohrung 1 mit gemessenen Zeitkonstanten

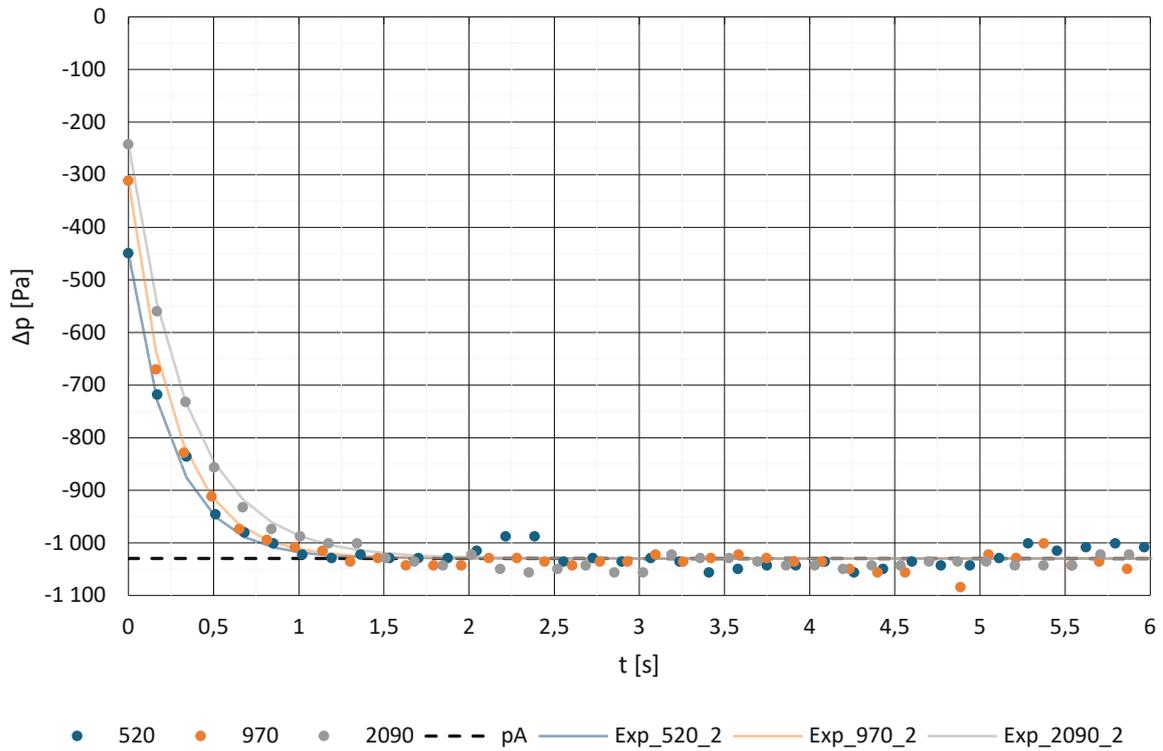


Abbildung 38: AVA 110, Bohrung 2 mit gemessenen Zeitkonstanten

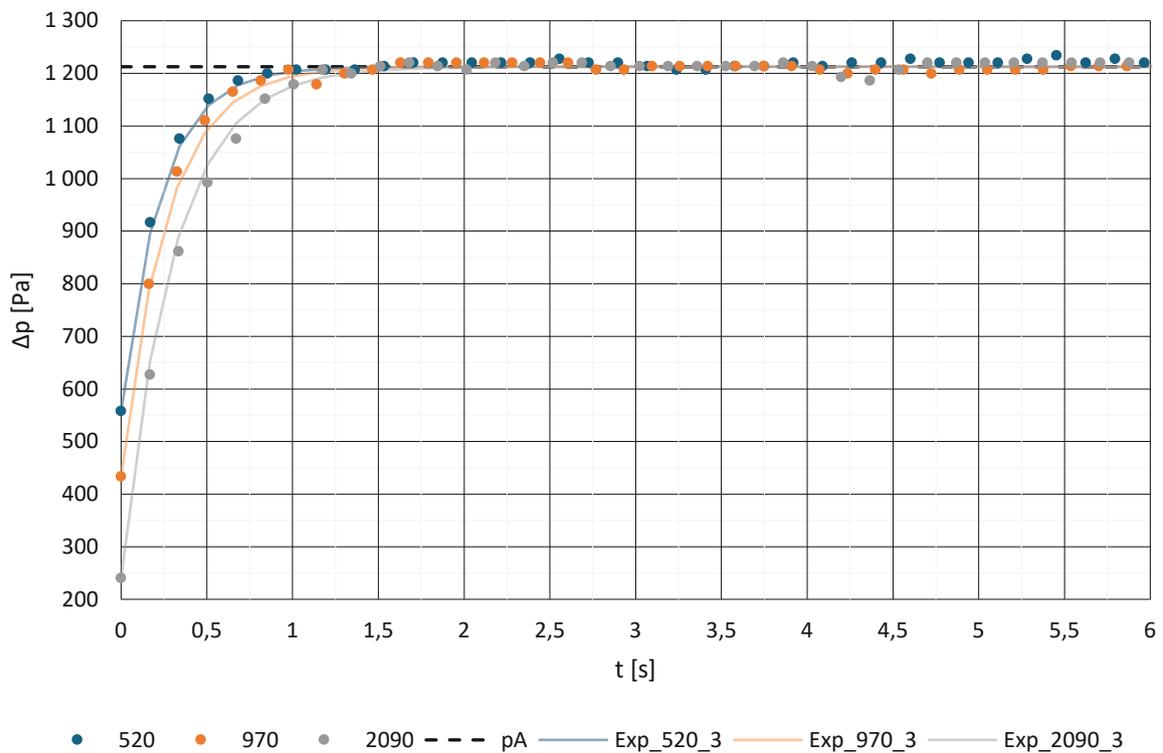


Abbildung 39: AVA 110, Bohrung 3 mit gemessenen Zeitkonstanten

Sowohl die berechneten Längen l_1 als auch die gemessenen Zeitkonstanten zeigen, dass für die Bohrung 1 die Sondenlänge wesentlich größer sein muss als jene von Bohrung 2 und 3. Somit ist anzunehmen, dass sich die Geometrie der Bohrungen unterscheidet. Deshalb wurde Bohrung 1 separat betrachtet und nicht für die Bestimmung der mittleren Zeitkonstante $\bar{\tau}$ berücksichtigt. Für die berechnete Zeitkonstante τ wurde für die Bohrung 1 eine Länge l_1 von 255 mm angenommen und für die Bohrungen 2 und 3 eine Länge von 93 mm.

Tabelle 7: AVA 110, Vergleich der berechneten und gemessenen Zeitkonstanten und dazugehörige Länge l_1 ; τ in s und Längen in mm

l_5	520		970		2090		\bar{l}_1
	τ_{520_Bi}	l_1	τ_{970_Bi}	l_1	τ_{2090_Bi}	l_1	
Bohrung 1	0,63	255,2	0,73	262,3	0,89	246,5	254,6
Bohrung 2	0,26	101,8	0,27	94,6	0,34	93,7	96,7
Bohrung 3	0,23	92,2	0,27	93,7	0,30	82,4	89,4
$\bar{\tau}$ (B2 und B3)	0,24	97,0	0,27	94,1	0,32	88,1	93,1
τ_{B1}	0,63	255,0	0,71	255,0	0,92	255,0	255,0
τ_{B2uB3}	0,23	93,0	0,27	93,0	0,34	93,0	93,0

In Abbildung 40 sind die nach dem Modell berechneten und die gemessenen Zeitkonstanten dargestellt. Somit dient diese Abbildung als Zusammenfassung für die obige Tabelle. Auch hier ist gut zu sehen, dass die gemessenen Zeitkonstanten für die Bohrung 1 um ein Vielfaches größer ist als jene von Bohrung 2 und 3. Die Messergebnisse zeigen mit den angenommenen Sondenlängen eine gute Übereinstimmung mit jenen aus dem Modell.

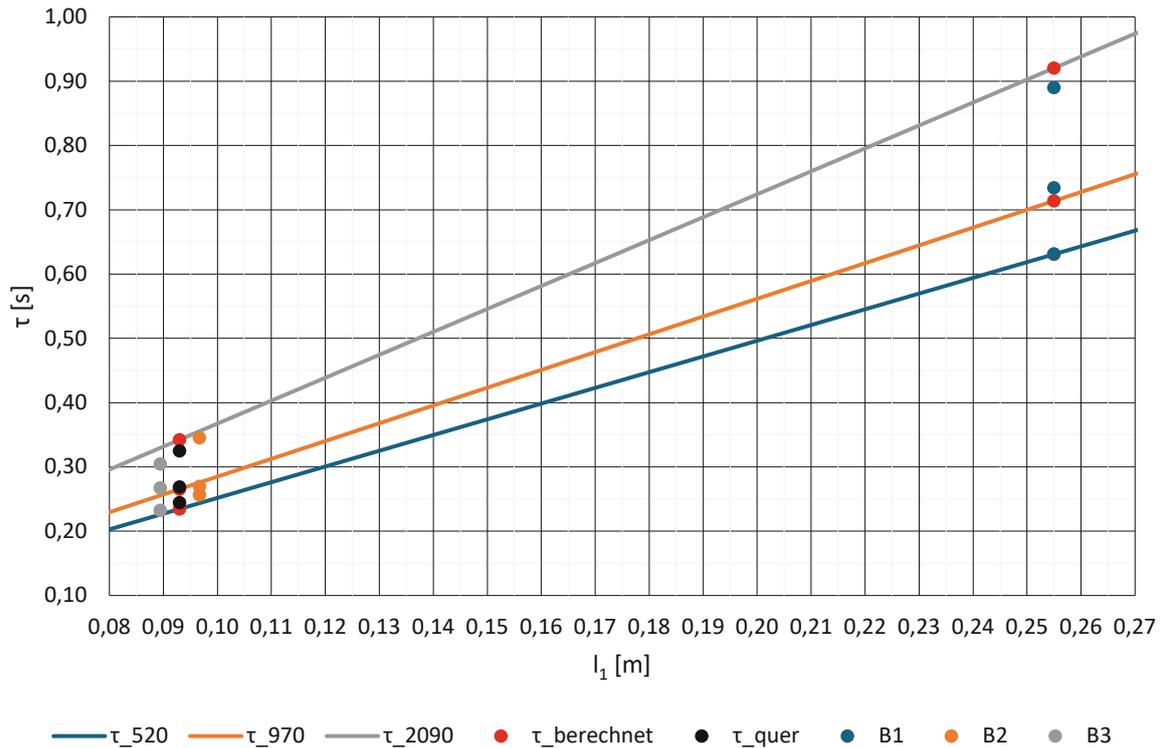


Abbildung 40: AVA 110, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten

In Abbildung 41 bis 43 sind die drei Bohrungen der AVA 110 Sonde für die verschiedenen Schlauchlängen mit den berechneten Zeitkonstanten dargestellt. Die Exponentialfunktionen mit den berechneten Zeitkonstanten τ_{520} , τ_{970} und τ_{2090} folgen den gemessenen Werten gut. Die berechneten Ausgleichszeiten ergeben sich für die Bohrung 1 für die drei Schlauchlängen zu:

- $t_{99_{520_{B1}}} = 2,90 \text{ s}$
- $t_{99_{970_{B1}}} = 3,29 \text{ s}$
- $t_{99_{2090_{B1}}} = 4,24 \text{ s}$

und für Bohrung 2 und 3 zu:

- $t_{99_{520_{B2uB3}}} = 1,08 \text{ s}$
- $t_{99_{970_{B2uB3}}} = 1,22 \text{ s}$
- $t_{99_{2090_{B2uB3}}} = 1,58 \text{ s}$

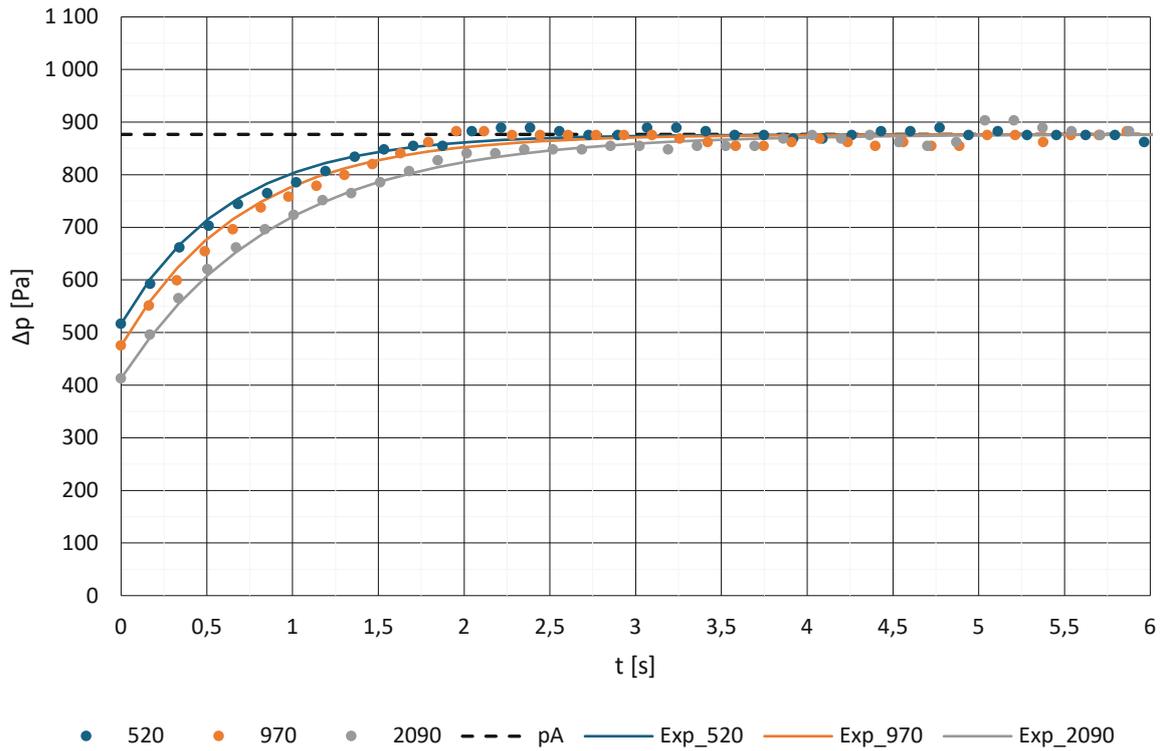


Abbildung 41: AVA 110, Bohrung 1 mit τ berechnet bei $l_1 = 255$ mm

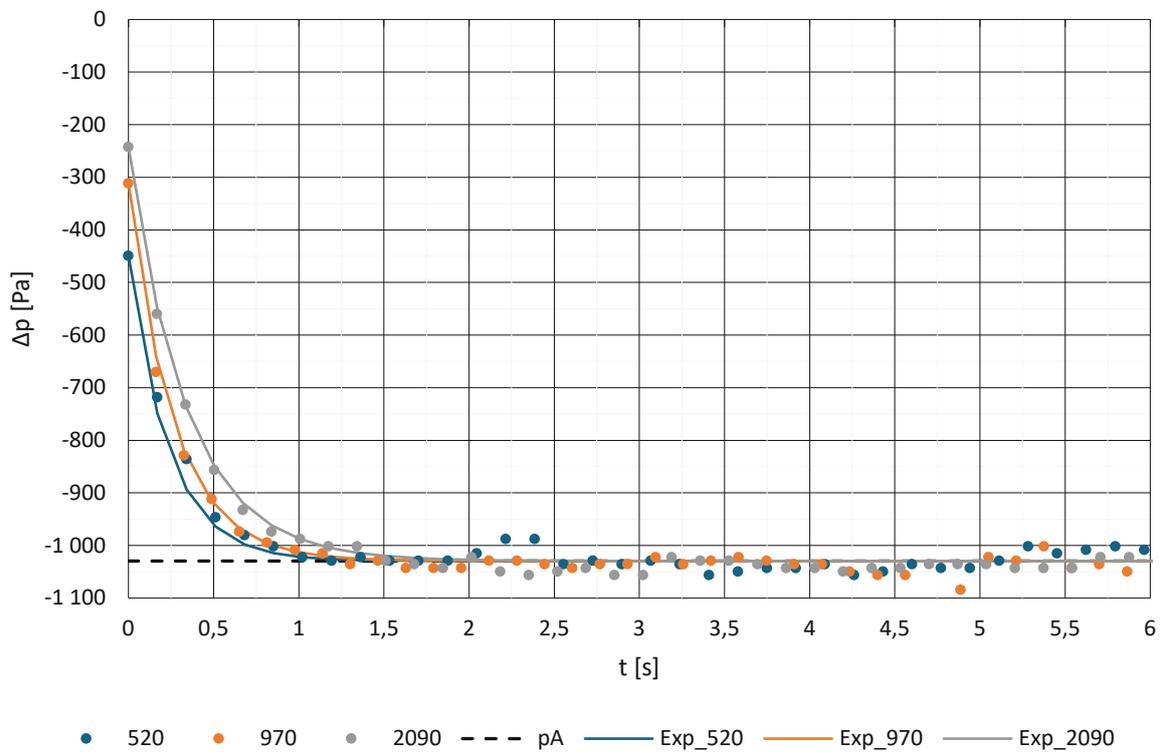


Abbildung 42: AVA 110, Bohrung 2 mit τ berechnet bei $l_1 = 93$ mm

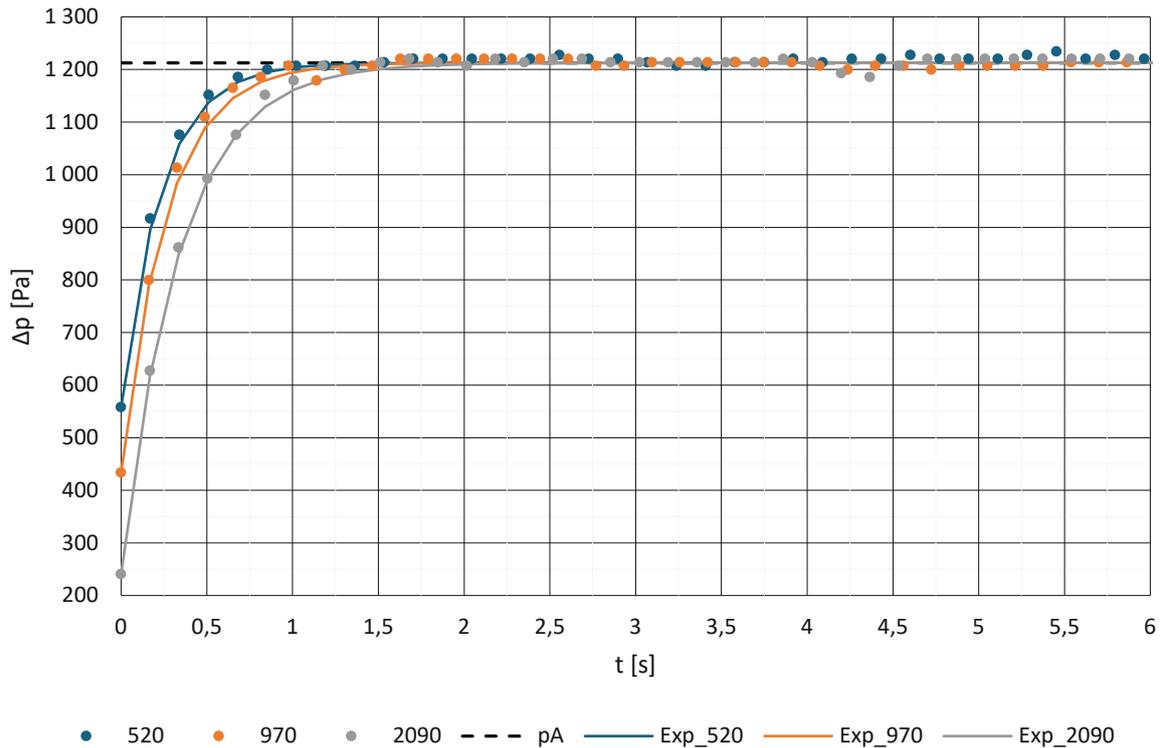


Abbildung 43: AVA 110, Bohrung 3 mit τ berechnet bei $l_1 = 93$ mm

In Abbildung 44 bis 46 werden die Bohrungen der AVA 110 Sonde mit derselben Schlauchlänge l_5 in dimensionsloser Form verglichen. Da die Zeitkonstante für die Bohrung 1 größer als jene von Bohrung 2 und 3 ist, sind mehr Messpunkte für die Bohrung 1 dargestellt. Die Bohrungen 2 und 3 folgen dem Modell in allen 3 Abbildungen gut und weisen im Vergleich zu Bohrung 1 eine viel geringere Schwankung (periodisch) auf. Außerdem ist ersichtlich, dass für die Bohrung 1 bei den Längen 520 und 970 der Wert von $C_p = 0,99$ bereits früher als vom Modell vorhergesagt erreicht wird. Somit wurde hier die Ausgleichszeit durch das Modell überschätzt.

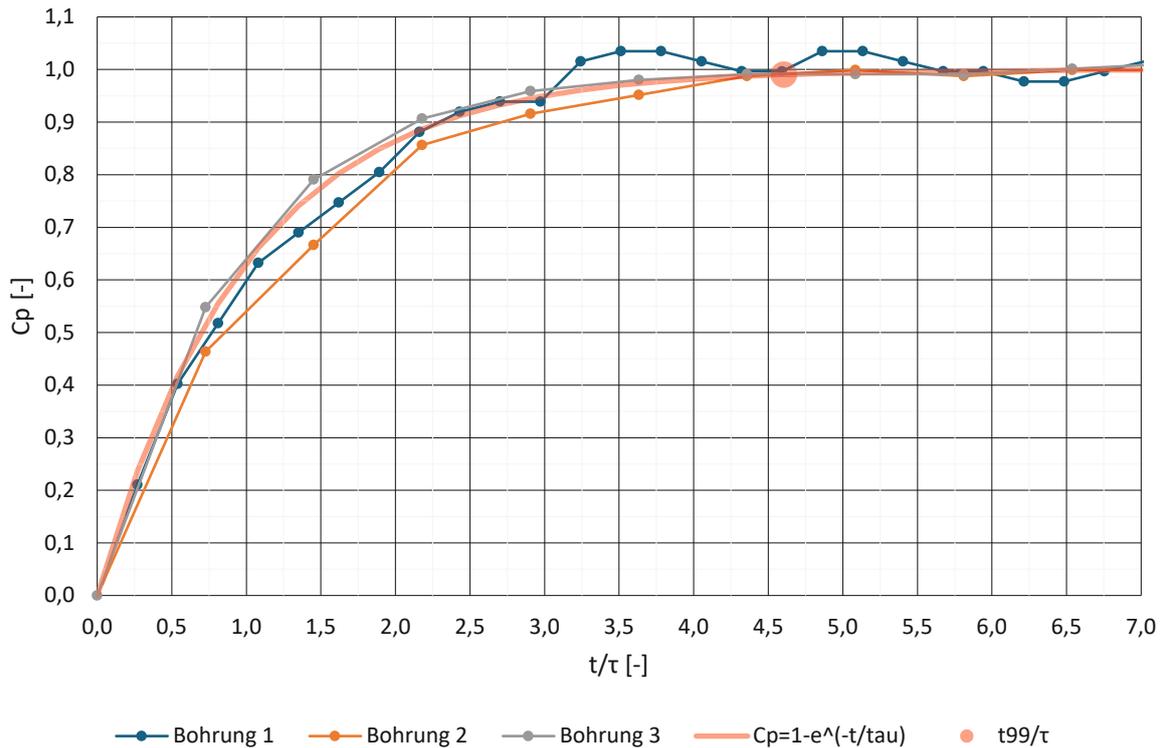


Abbildung 44: AVA 110, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 520 \text{ mm}$, $\tau_{520B1} = 0,64 \text{ s}$ und $\tau_{520B2uB3} = 0,23 \text{ s}$

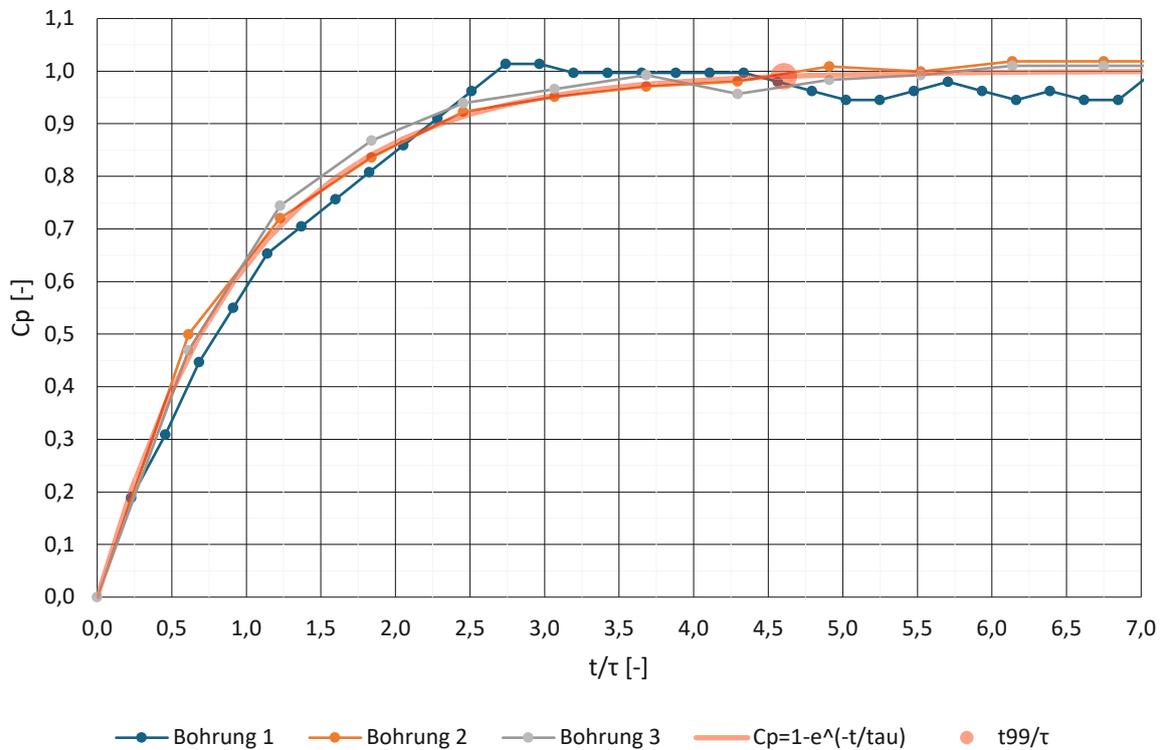


Abbildung 45: AVA 110, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 970 \text{ mm}$, $\tau_{B1} = 0,72 \text{ s}$ und $\tau_{B2uB3} = 0,27 \text{ s}$

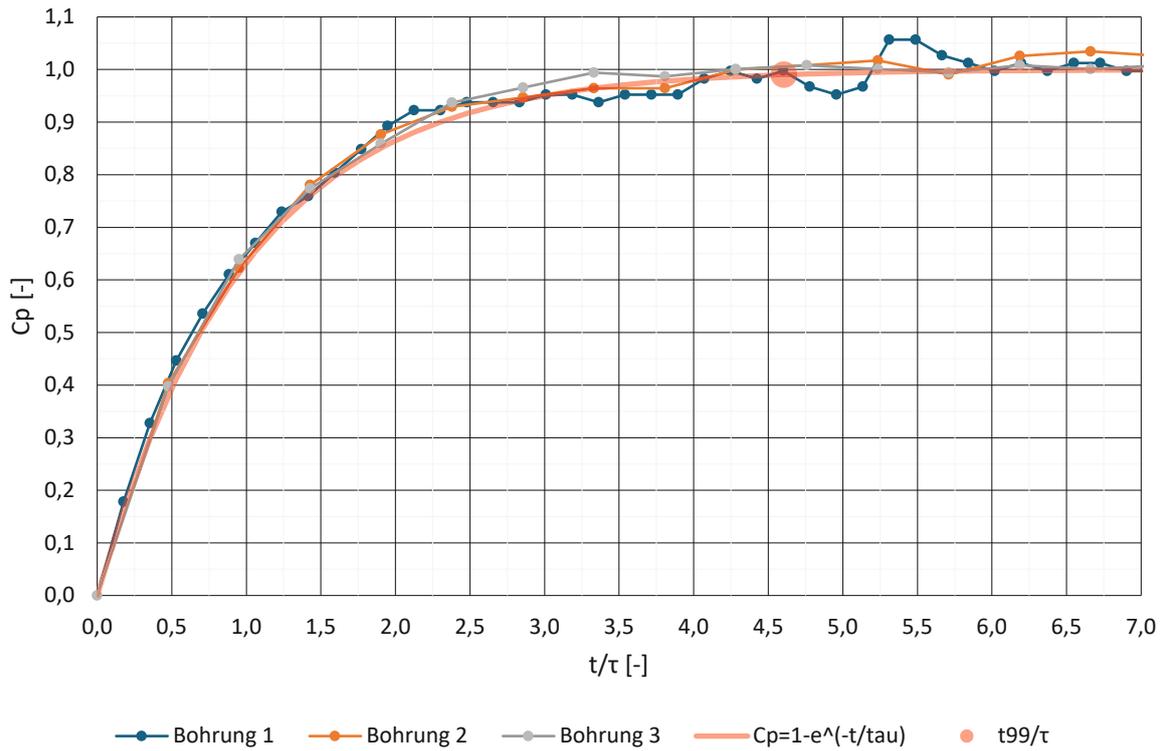


Abbildung 46: AVA 110, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 2090$ mm, $\tau_{B1} = 0,93$ s und $\tau_{B2uB3} = 0,34$ s

5.1.3 AVA 43

Aus den Messreihen 040124107, 04012408 und 04012409 wurden die Messdaten für die AVA 43 Sonde entnommen. In Abbildung 47 bis 49 sind die Druckverläufe der drei Bohrungen über die Zeit für die Sonde dargestellt. Der Druck p_A wurde für Bohrung 1 nach $t = 9$ s, für Bohrung 2 nach $t = 16$ s und für Bohrung 3 nach $t = 14$ s über alle drei Schlauchlängen gebildet. Die Exponentialfunktionen mit den gemessenen Zeitkonstanten sind als Linien dargestellt. Die Punkte 520, 970 und 2090 sind die Druckverläufe aus den Messwerten der jeweiligen Schlauchlänge l_5 . Die Messwerte verhalten sich wie vom Modell vorhergesagt. Eine Erhöhung der Länge der Druckmessleitung führt zu einer Erhöhung der Zeitkonstante bzw. der Ausgleichszeit. Bei der AVA 43 Sonde fällt auf, dass sich die Zeitkonstanten zwischen den Bohrungen stark unterscheiden. Für die Bohrung 1 ist die Zeitkonstante wesentlich kleiner als für die Bohrungen 2 und 3. Außerdem weist Bohrung 3 signifikant kleinere Zeitkonstanten als Bohrung 2 auf.

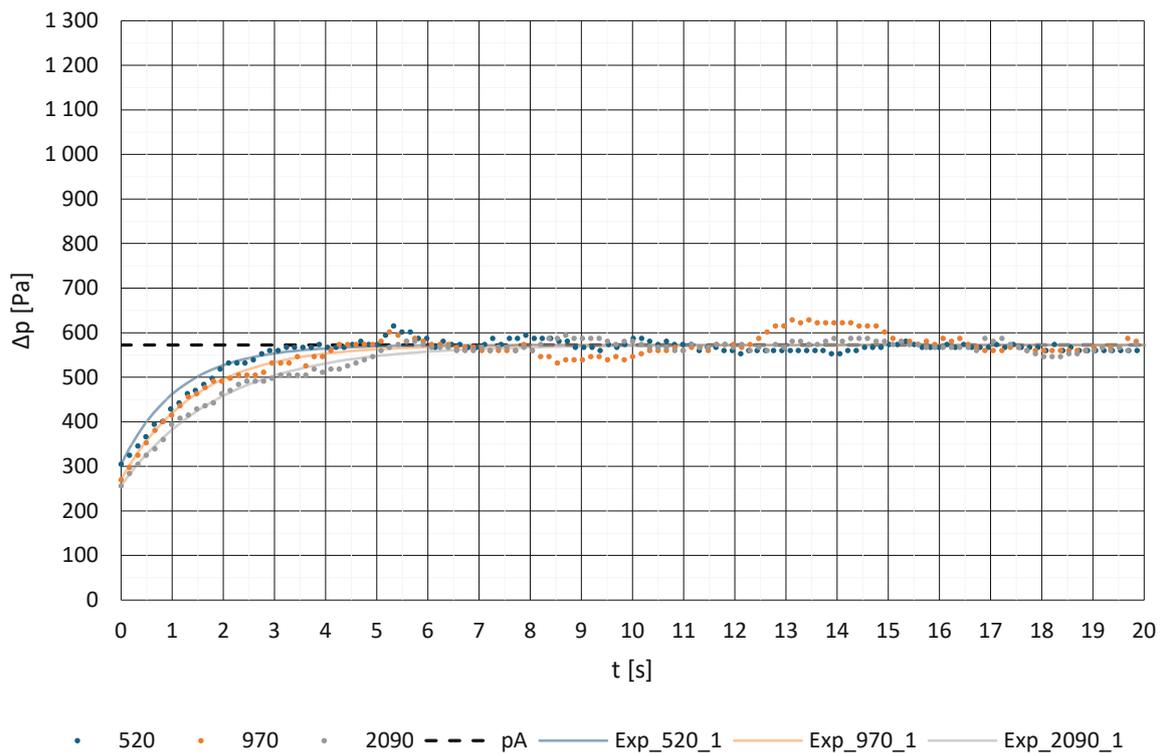


Abbildung 47: AVA 43, Bohrung 1 mit gemessenen Zeitkonstanten

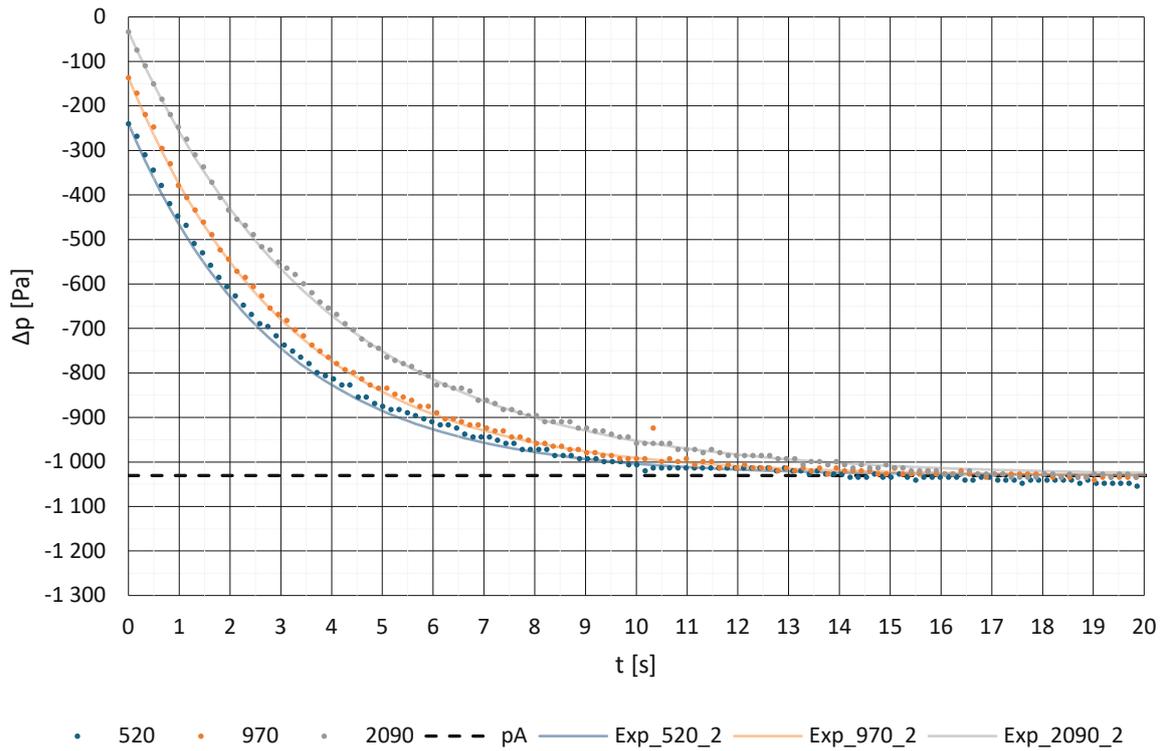


Abbildung 48: AVA 43, Bohrung 2 mit gemessenen Zeitkonstanten

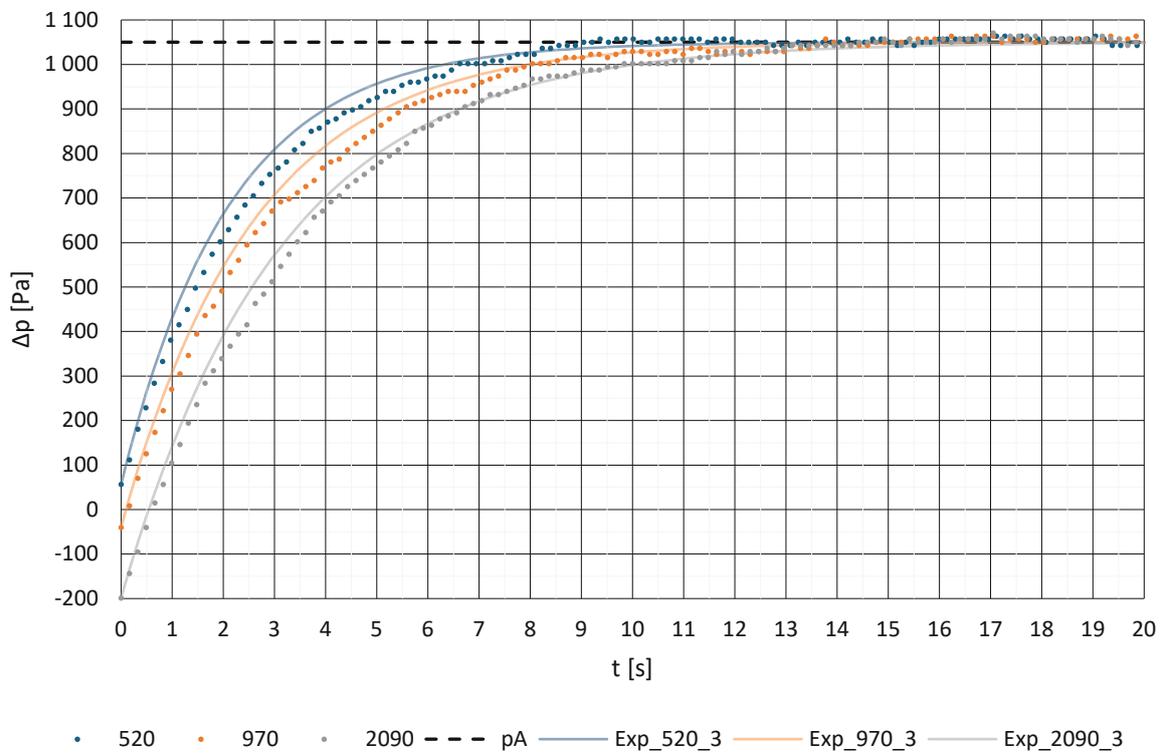


Abbildung 49: AVA 43, Bohrung 3 mit gemessenen Zeitkonstanten

In Tabelle 8 sind die gemessenen Zeitkonstanten und die dazugehörigen berechneten Sondenlängen l_1 für jede Bohrung und Schlauchlänge angegeben. Auf die Angabe einer mittleren Zeitkonstante $\bar{\tau}$ wurde hier verzichtet da die gemessenen Zeitkonstanten eine zu große Streuung zwischen den einzelnen Bohrungen aufweisen. Für die drei Bohrungen ergeben sich nach dem erweiterten Modell folgende mittlere Längen \bar{l}_1 : 32 mm, 1272 mm und 972 mm. Die mittlere Länge beträgt für die Bohrung 2 ca. das Vierfache und für Bohrung 3 ca. das Dreifache der Gesamtlänge der Sonde. Für die Bohrung 1 kann die Zeitkonstante τ wie für die übrigen Sonden berechnet werden. Für die Bohrungen 2 und 3 führt diese zu negativen Sondenlängen l_2 . Um dennoch Aussagen über das Ausgleichsverhalten der Sonden für die Bohrungen 2 und 3 treffen zu können, wurden für die Berechnung der Zeitkonstanten der Durchmesser d_2 und die Länge l_2 vernachlässigt. Dies führt zu den mittleren Längen und Zeitkonstanten welche in Tabelle 8 unter τ_{B2} , τ_{B3} angegeben sind.

Tabelle 8: AVA 43, Vergleich der berechneten und gemessenen Zeitkonstanten und dazugehörige Länge l_1 ; τ in s und Längen in mm

l_5	520		970		2090		\bar{l}_1
	τ_{520_Bi}	l_1	τ_{970_Bi}	l_1	τ_{2090_Bi}	l_1	
Bohrung 1	1,13	28,5	1,46	32,5	1,97	34,0	31,7
Bohrung 2	2,95	1331,2	3,21	1277,4	3,93	1209,2	1272,6
Bohrung 3	2,11	940,8	2,59	1022,2	3,13	953,4	972,1
τ_{B1}	1,27	32,0	1,43	32,0	1,85	32,0	32,0
τ_{B2}	2,83	1147,0	3,20	1147,0	4,13	1147,0	1147,0
τ_{B3}	2,18	885,0	2,47	885,0	3,18	885,0	885,0

In Abbildung 50 sind die Zeitkonstanten des erweiterten Modells als Funktion der Sondenlänge l_1 dargestellt. Da die Bohrung 1 einen kleineren Eintrittsdurchmesser d_1 (0,3 mm) als Bohrung 2 und 3 (0,6 mm) besitzt, unterscheiden sich die berechneten Zeitkonstanten für die Bohrung 1 mit denen von Bohrung 2 und 3. Die so berechneten Zeitkonstanten für die Bohrung 1 sind um ein Vielfaches höher als jene von Bohrung 2 und 3, da die Zeitkonstante τ indirekt proportional zu d_1^4 ist. Die Ergebnisse aus den Messungen zeigen jedoch gegenteiliges.

Für die Bohrung 1 zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten. Für Bohrung 2 und 3 wird deutlich, dass selbst bei $l_1 = l_{ges}$ die gemessene Zeitkonstante um ein Vielfaches höher ist, als jene die durch das Modell bestimmt wird. Die maximale 99 % Ausgleichszeit für die Bohrungen 2 und 3,

abhängig von der Länge l_5 liegt zwischen 3,5 und 5 Sekunden, was deutlich geringer ist als die Werte aus den Messdaten.

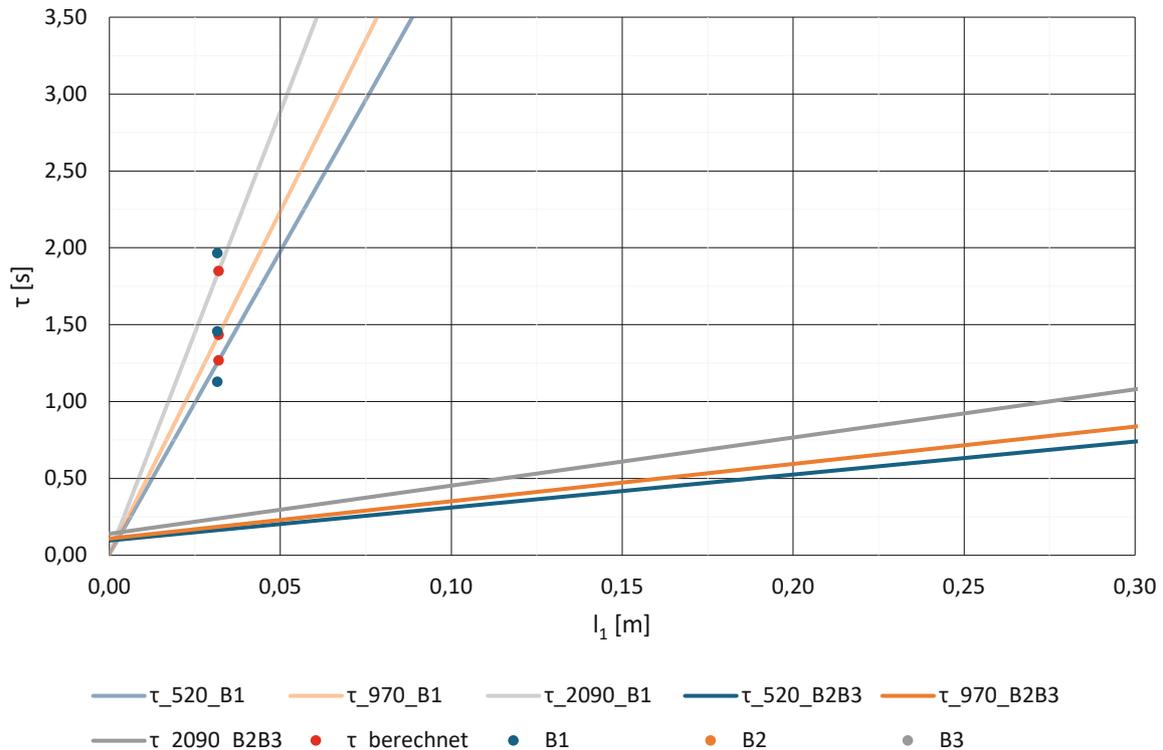


Abbildung 50: AVA 43, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten

In Abbildung 51 sind die Zeitkonstanten für die Bohrungen 2 und 3 als Funktion von l_1 unter Vernachlässigung von l_2 und d_2 dargestellt, auch wurden hier die gemessenen Zeitkonstanten eingezeichnet. Diese Betrachtung führt immer noch dazu, dass die berechnete Länge l_1 die Gesamtlänge der Sonde überschreitet, jedoch können negative Längen vermieden werden. Für die Bohrung 3 zeigt sich hier eine passable Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten. Für die Bohrung 2 ist die Abweichung für die Länge 2090 recht groß und führt zu einer Überschätzung der Ausgleichszeit. Die Längen für die Bohrungen 2 und 3 sollten daher eher als Erfahrungswerte und Richtgrößen betrachtet werden, die in der Praxis entsprechend berücksichtigt werden müssen.

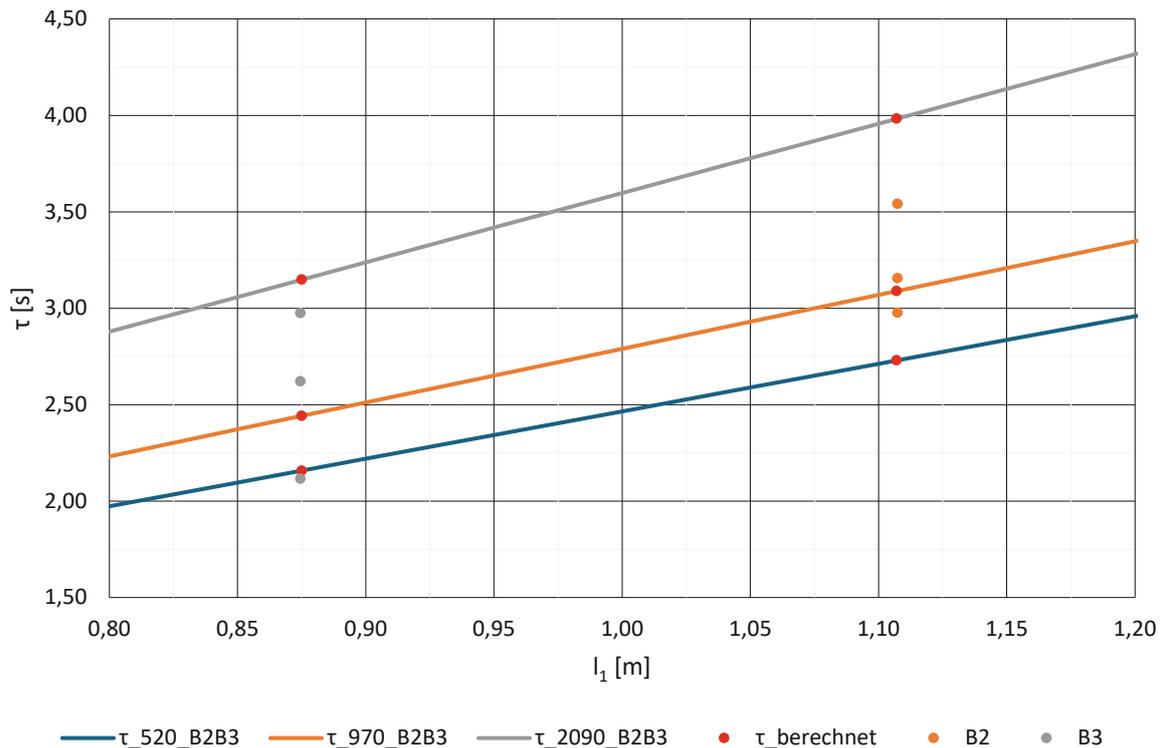


Abbildung 51: AVA 43, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten für Bohrung 2 und 3, unter Vernachlässigung von d_2 und l_2

Die 99 % Ausgleichszeiten für die Sonde mit den angenommenen Längen l_1 von 32 mm, 1147 mm und 885 mm ergeben sich für die 3 Bohrungen zu:

Tabelle 9: AVA 43, 99 % Ausgleichszeiten für jede Bohrung

	$t_{99_520_Bi}$	$t_{99_970_Bi}$	$t_{99_2090_Bi}$
Bohrung 1	5,84	6,61	8,52
Bohrung 2	13,02	14,74	19,00
Bohrung 3	10,05	11,37	14,66

In Abbildung 52 bis 54 sind die Messdaten und die Exponentialfunktionen für jede Bohrung mit der berechneten Zeitkonstante dargestellt. Es ist für alle drei Bohrungen zu sehen, dass die gemessenen Daten recht gut der Exponentialfunktion folgen. Für die Bohrung 1 zeigt sich bei den Messergebnissen eine gewisse Schwankung um den Mittelwert auch nach Erreichen der Ausgleichszeit. Für Bohrung 2 bei der Länge 2090 ist zu sehen, dass die Zeitkonstante durch die Berechnung etwas überschätzt wurde und dies führt zu einer höheren Ausgleichszeit. Bohrung 3 folgt den Messdaten welche nahe bei p_A liegen gut.

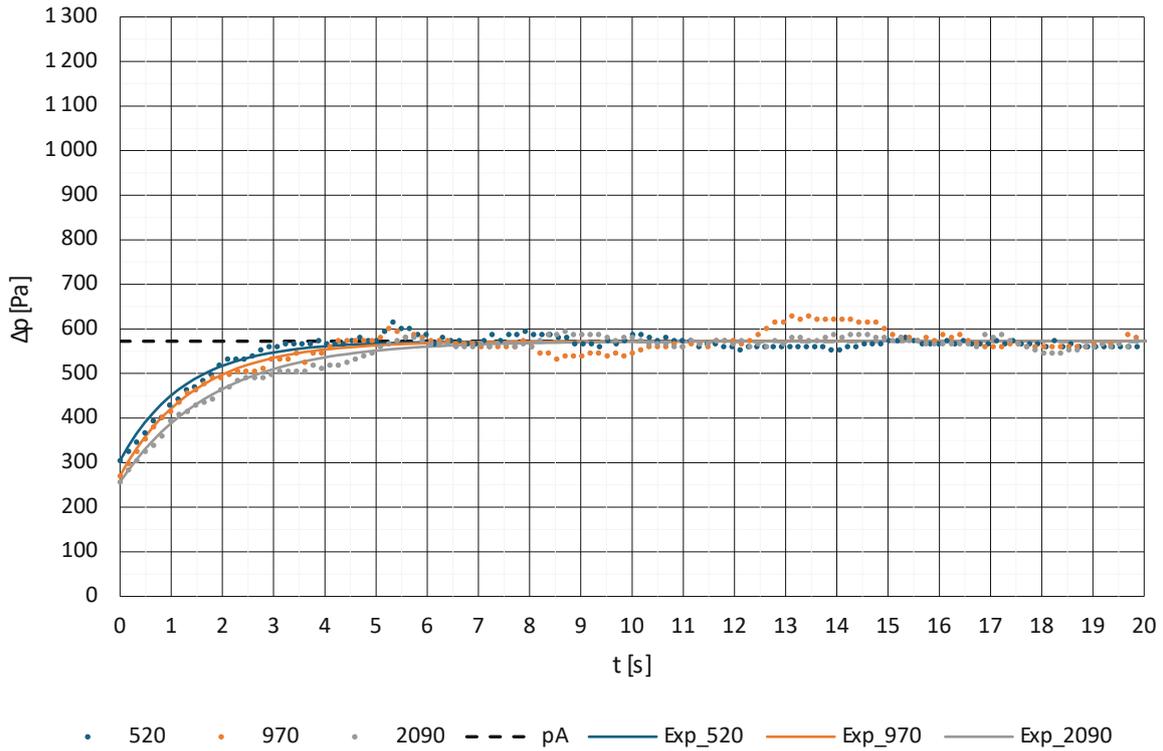


Abbildung 52: AVA 43, Bohrung 1 mit τ berechnet bei $l_1 = 32$ mm

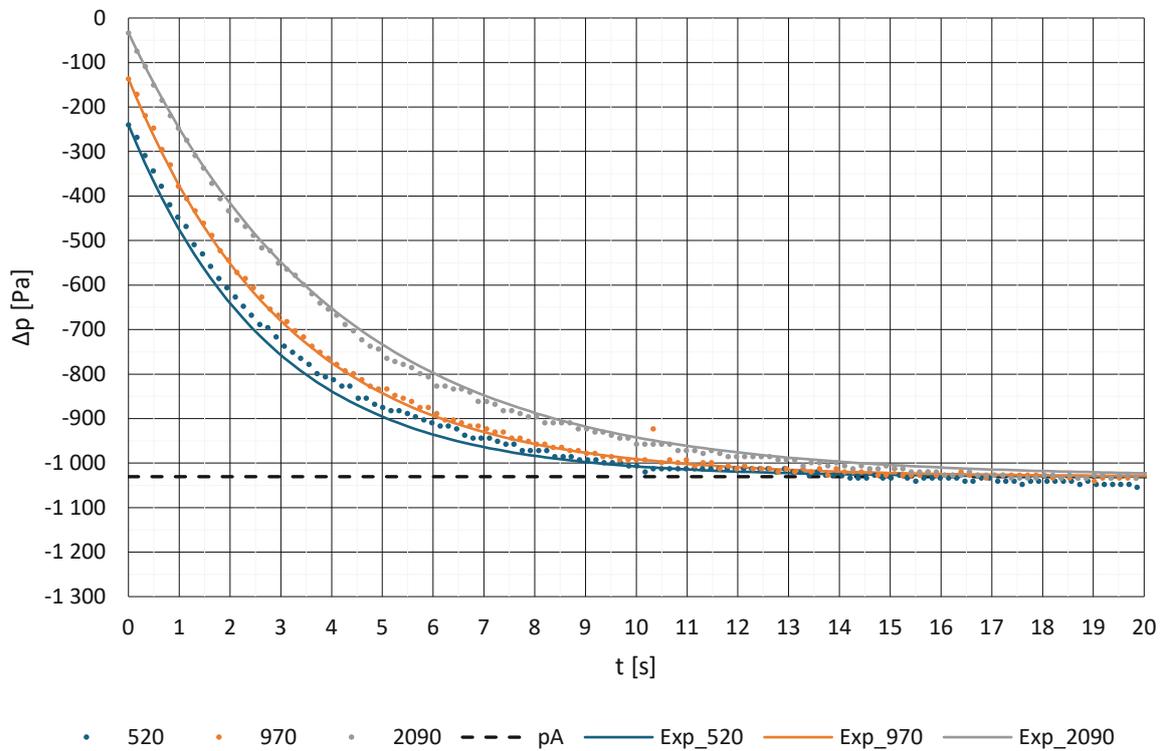


Abbildung 53: AVA 43, Bohrung 2 mit τ berechnet bei $l_1 = 1147$ mm

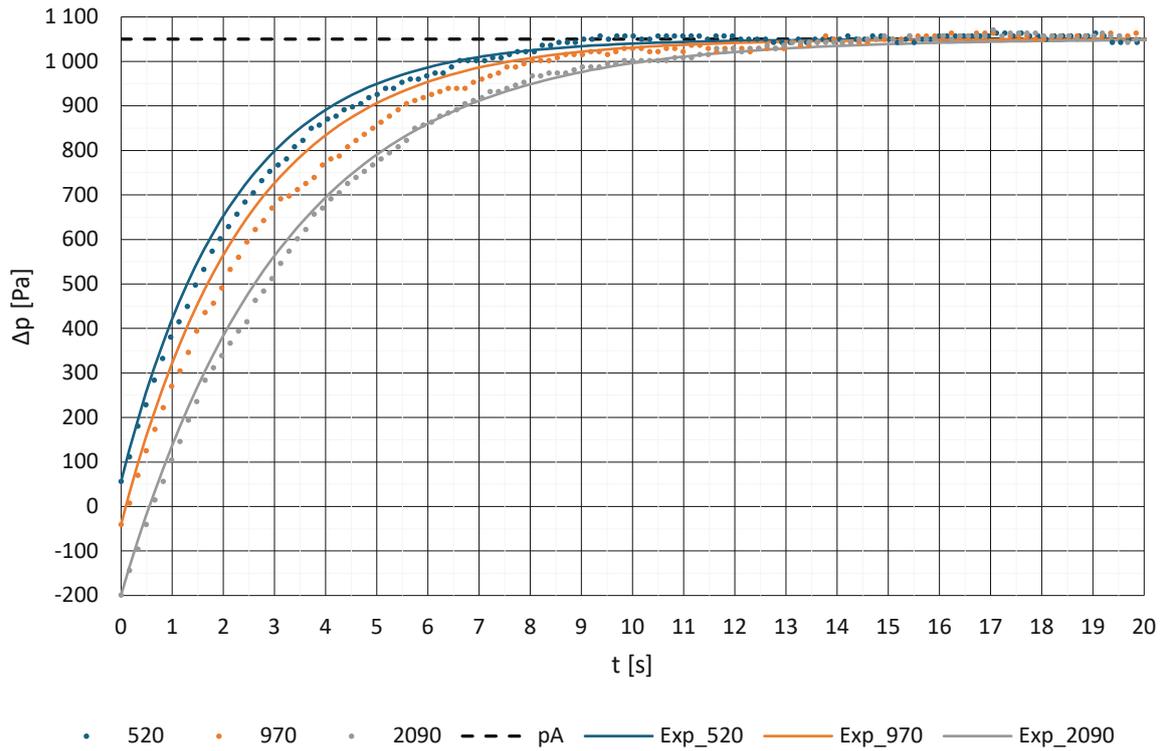


Abbildung 54: AVA 43, Bohrung 3 mit τ berechnet bei $l_1 = 885$ mm

In Abbildung 55 bis 57 sind die Messergebnisse der AVA 43 Sonde in dimensionsloser Form dargestellt. Auffallend ist die Schwankung des Druckkoeffizienten C_p der Bohrung 1. Es ist für alle drei Schlauchlängen zu sehen, dass die gemessenen Daten mit denen aus dem Modell in guter Näherung übereinstimmen, mit Ausnahme der oben erwähnten Abweichungen.

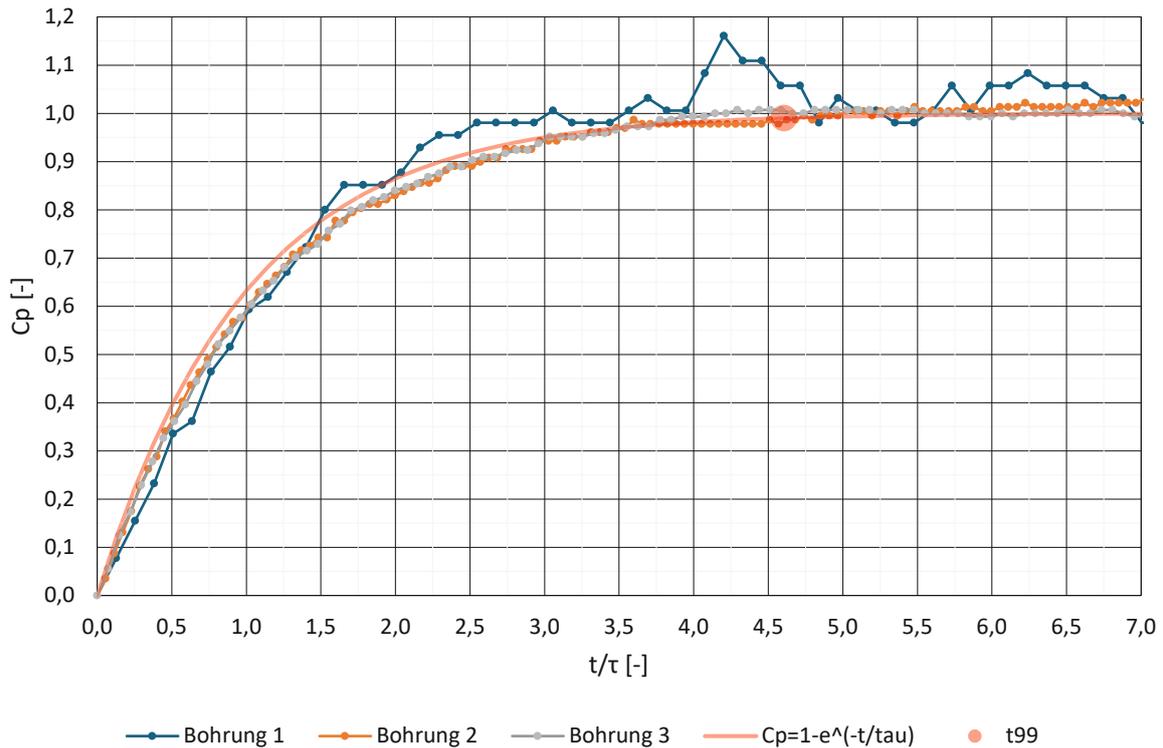


Abbildung 55: AVA 43, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 520 \text{ mm}$, $\tau_{B1} = 1,27 \text{ s}$, $\tau_{B2} = 2,83 \text{ s}$ und $\tau_{B3} = 2,18 \text{ s}$

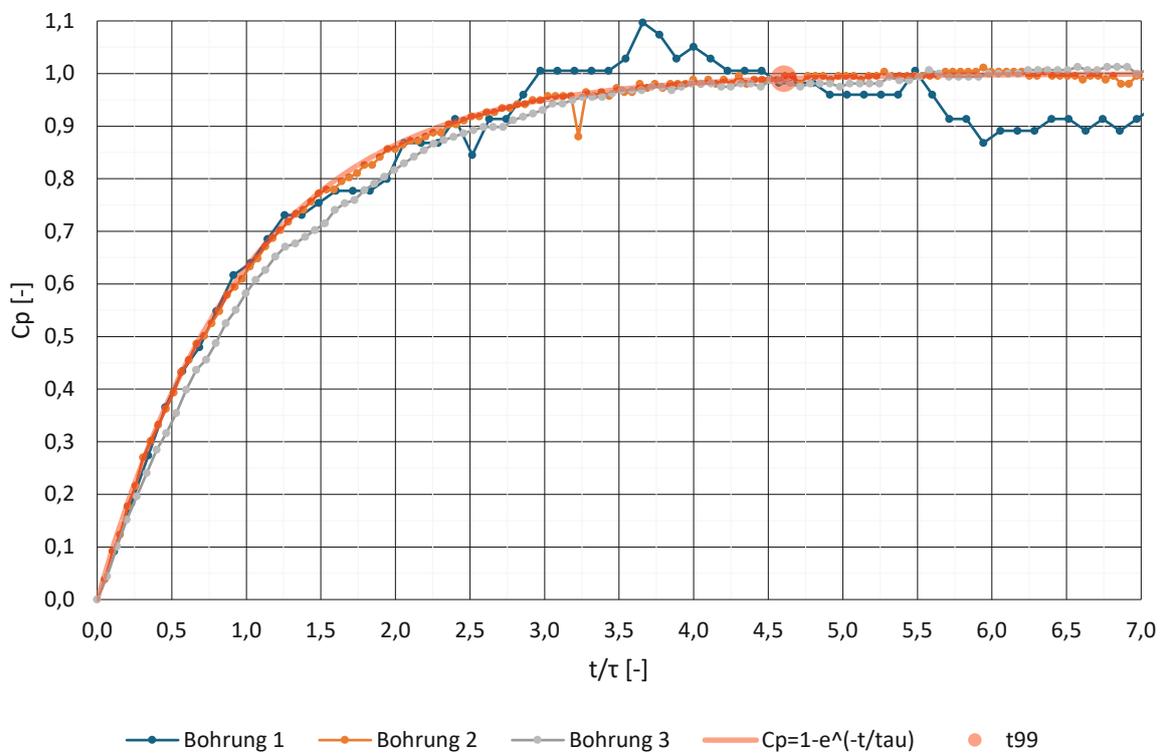


Abbildung 56: AVA 43, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 970 \text{ mm}$, $\tau_{B1} = 1,43 \text{ s}$, $\tau_{B2} = 3,20 \text{ s}$ und $\tau_{B3} = 2,47 \text{ s}$

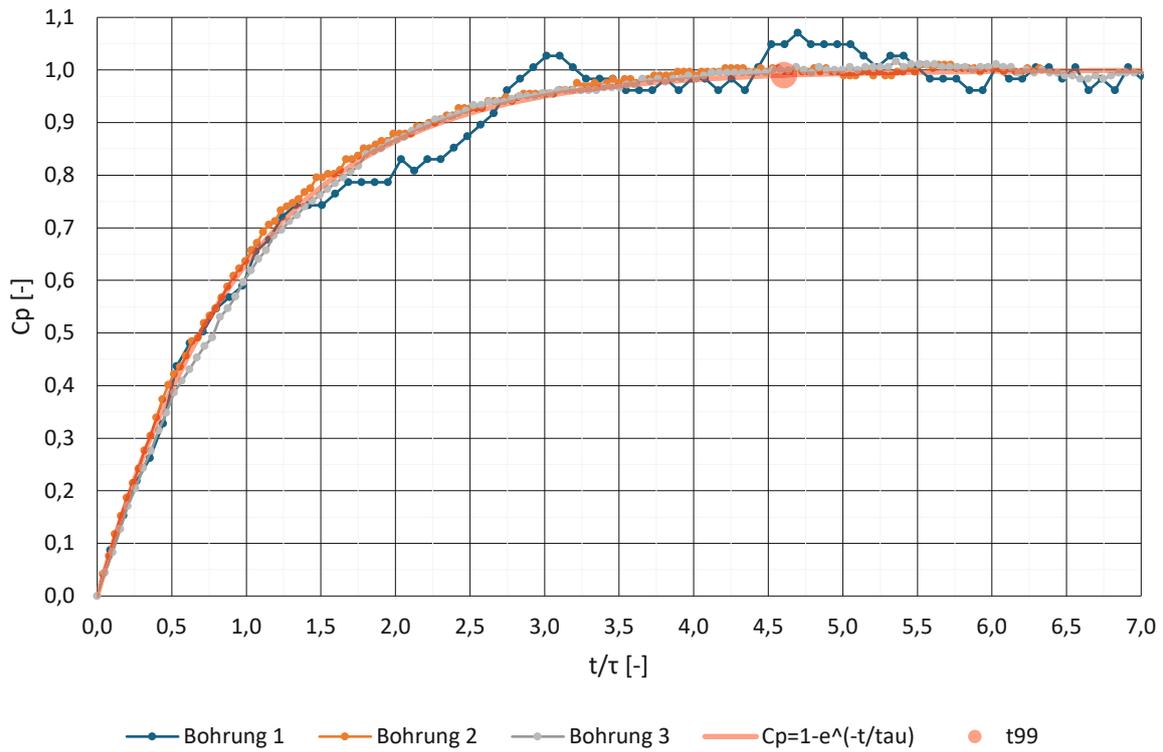


Abbildung 57: AVA 43, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 2090$ mm, $\tau_{B1} = 1,85$ s, $\tau_{B2} = 4,13$ s und $\tau_{B3} = 3,18$ s

5.1.4 SVUSS 5

Aus den Messreihen 04012410, 04012411 und 04012412 wurden die Messdaten für die SVUSS 5 Sonde entnommen. In Abbildung 58 bis 62 sind die Druckverläufe der fünf Bohrungen über die Zeit für die Sonde dargestellt. Der Druck p_A wurde für jede Bohrung nach $t = 9$ s über den Mittelwert aller drei Schlauchlängen ermittelt. Die Exponentialfunktionen mit den gemessenen Zeitkonstanten werden als Linien dargestellt. Die Punkte 520, 970 und 2090 sind die gemessenen Verläufe der jeweiligen Schlauchlänge l_s . Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit dem Modell und dass die Erhöhung der Schlauchlänge zu einer Erhöhung der Zeitkonstante bzw. der Ausgleichszeit führt. Hier sei angemerkt, dass die Druckschwankungen bei der Bohrung 3 für die Schlauchlänge 520 und 970 zwischen 3,5 s bis 5 s und für die Bohrung 4 für die Schlauchlänge 520 zwischen 3 s bis 4,5 s nicht für die Berechnung der gemessenen Zeitkonstanten berücksichtigt wurden.

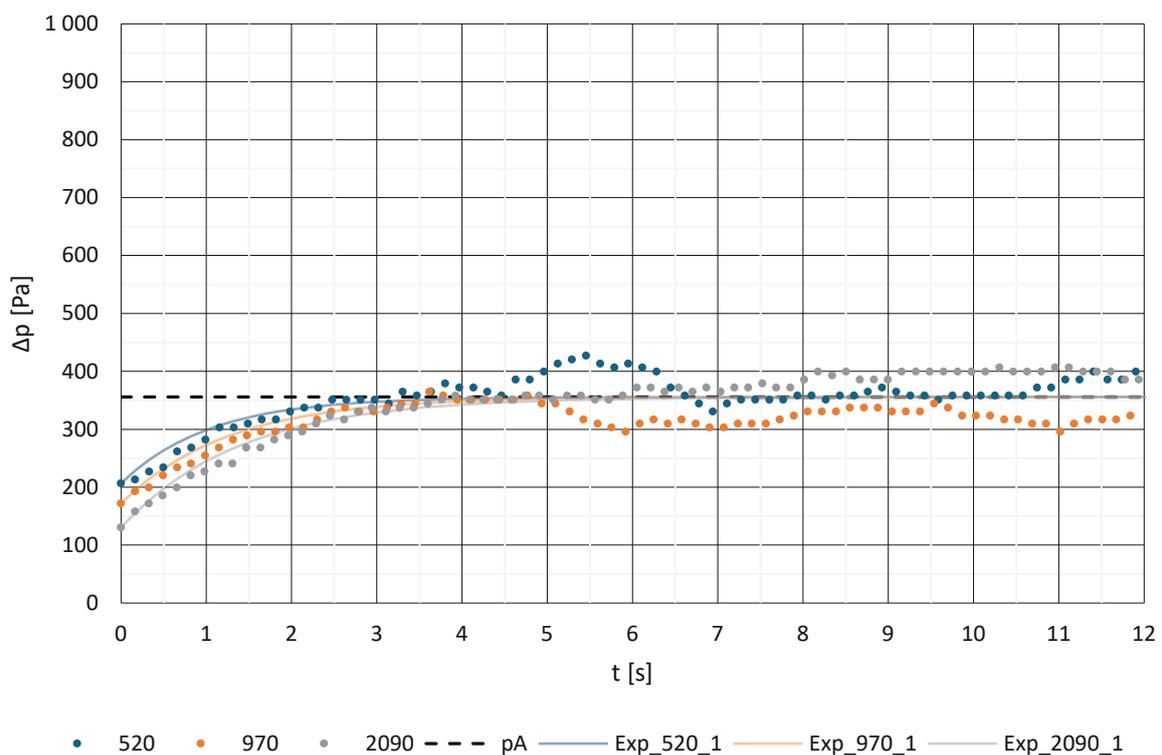


Abbildung 58: SVUSS 5, Bohrung 1 mit gemessenen Zeitkonstanten

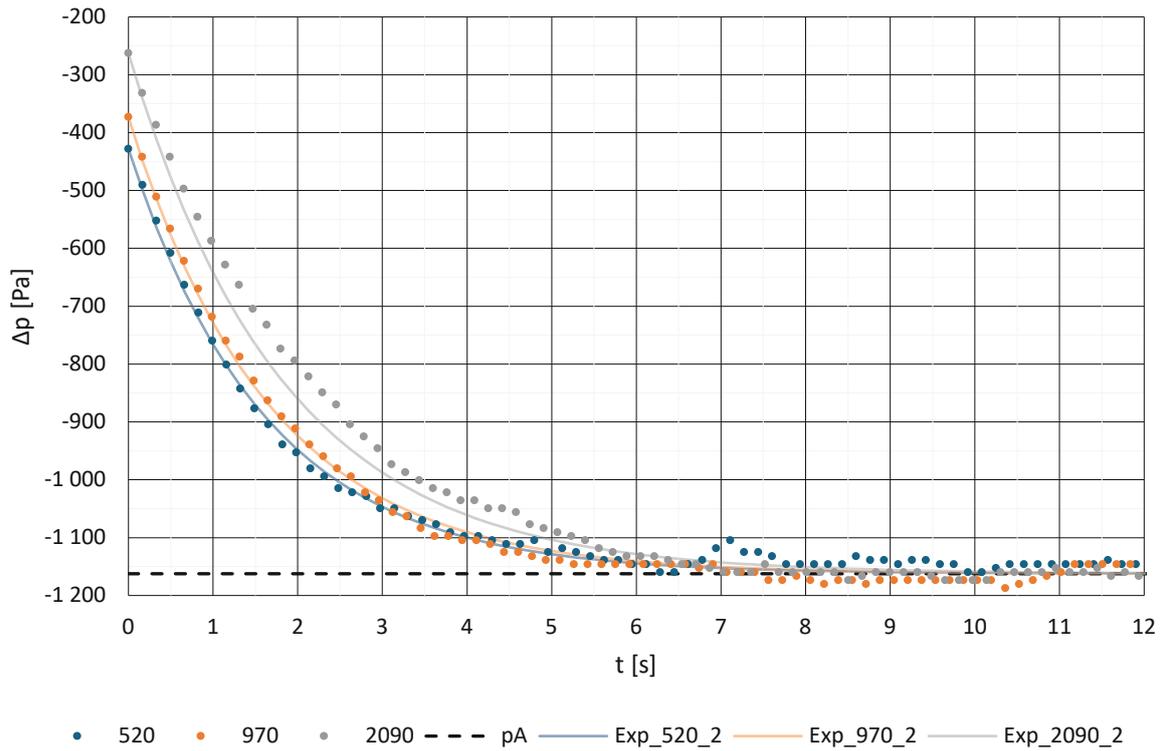


Abbildung 59: SVUSS 5, Bohrung 2 mit gemessenen Zeitkonstanten

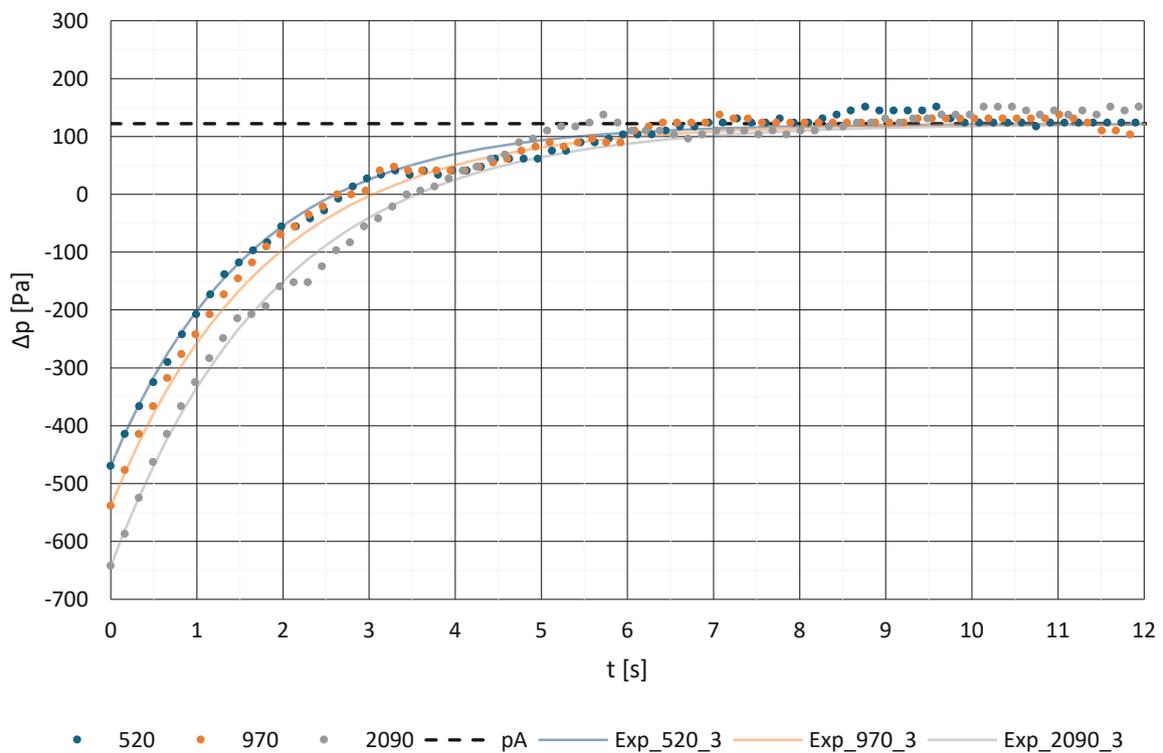


Abbildung 60: SVUSS 5, Bohrung 3 mit gemessenen Zeitkonstanten

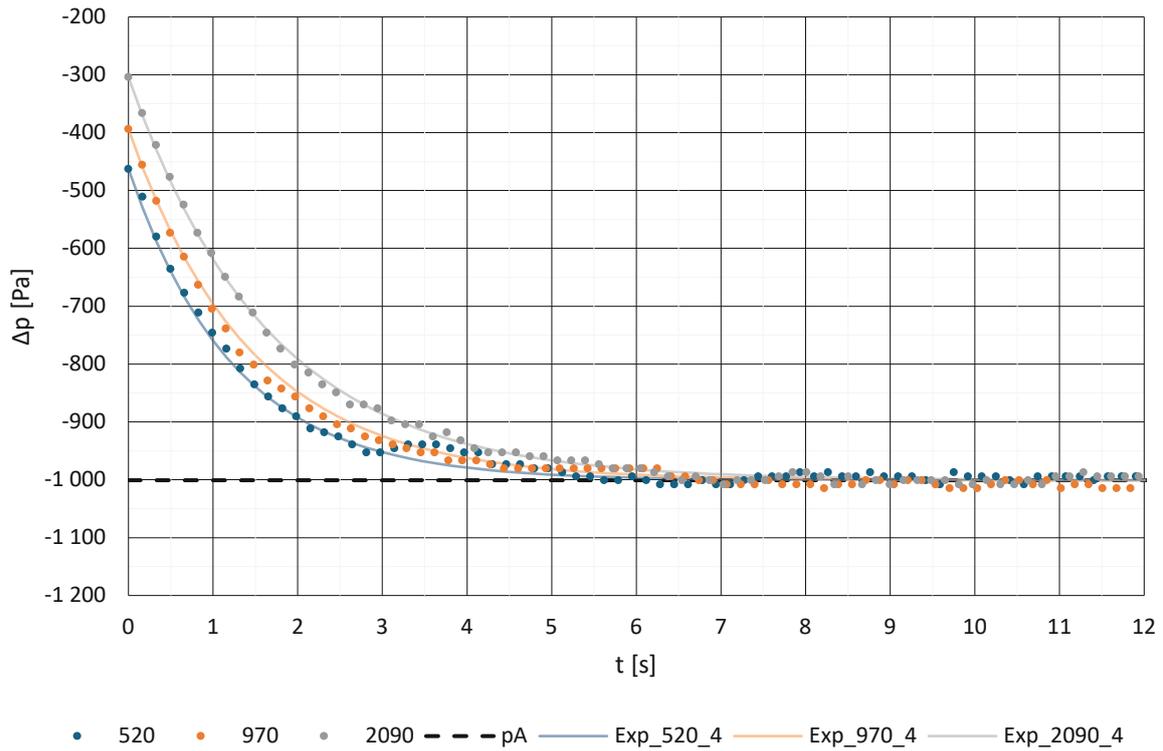


Abbildung 61: SVUSS 5, Bohrung 4 mit gemessenen Zeitkonstanten

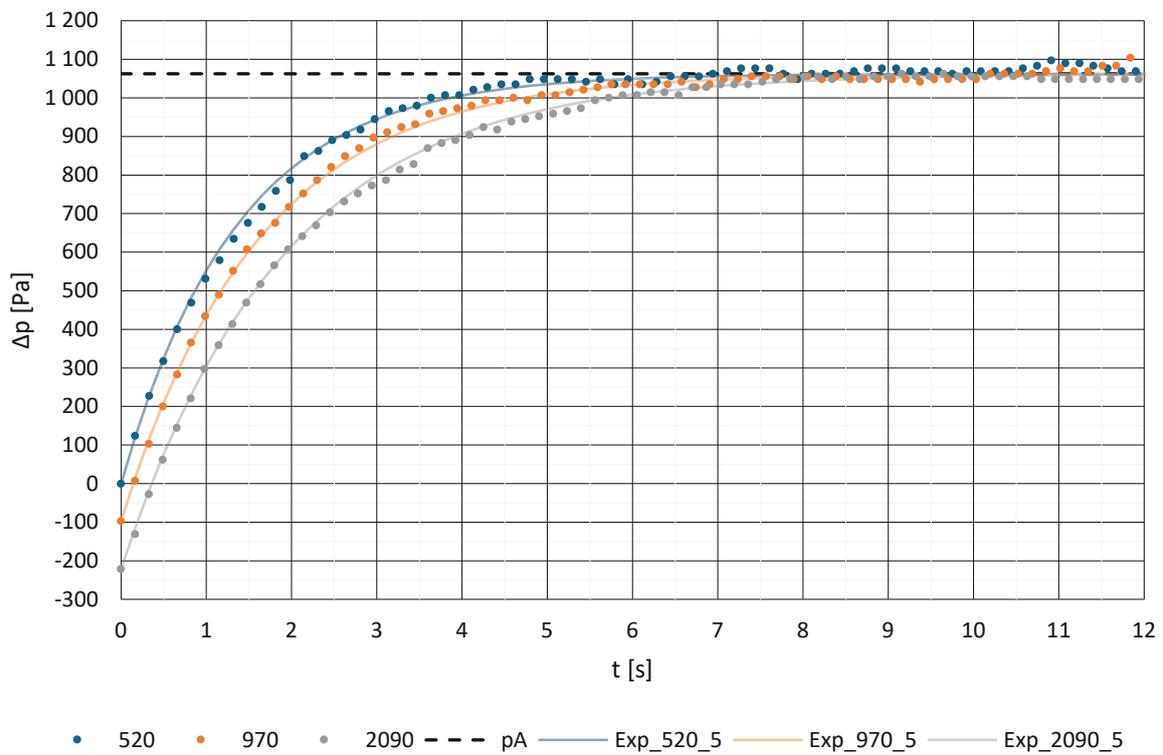


Abbildung 62: SVUSS 5, Bohrung 5 mit gemessenen Zeitkonstanten

In Tabelle 10 sind die gemessenen Zeitkonstanten und die dazugehörigen berechneten Sondenlänge l_1 für jede Bohrung und Druckmessleitungen angegeben. Somit ergibt sich für alle fünf Bohrungen eine mittlere Länge \bar{l}_1 von 232 mm, mit welcher die Zeitkonstante τ berechnet wurde. Des Weiteren wurde auch die mittlere Zeitkonstante $\bar{\tau}$ für jede Schlauchlänge aus den gemessenen Zeitkonstanten berechnet.

Tabelle 10: SVUSS 5, Vergleich der berechneten und gemessenen Zeitkonstanten und dazugehörige Länge l_1 ; τ in s und Längen in mm

l_5	520		970		2090		\bar{l}_1
	τ_{520_Bi}	l_1	τ_{970_Bi}	l_1	τ_{2090_Bi}	l_1	
Bohrung 1	1,04	173,1	1,26	188,1	1,41	158,6	173,3
Bohrung 2	1,62	295,3	1,67	264,3	1,83	218,5	259,4
Bohrung 3	1,65	301,6	1,80	288,8	1,94	233,6	274,6
Bohrung 4	1,25	216,7	1,45	223,7	1,66	194,3	211,6
Bohrung 5	1,36	240,8	1,62	255,2	1,89	227,6	241,2
$\bar{\tau}$	1,38	245,5	1,56	244,0	1,75	206,5	232,0
τ	1,32	232,0	1,49	232,0	1,93	232,0	232,0

In Abbildung 63 werden die Ergebnisse der Tabelle grafisch dargestellt. Hierfür wurden die berechneten Zeitkonstanten als Funktion der Länge dargestellt und die gemessenen, die berechneten und die mittleren Zeitkonstanten an der jeweiligen mittleren Länge eingezeichnet. Für die Bohrung 1 ergibt sich für alle drei Schlauchlängen eine geringere gemessene Zeitkonstante als für die übrigen Bohrungen. Für die Bohrung 2 ergibt sich ein geringer Unterschied der gemessenen Zeitkonstanten für die Länge 520 und 970. Des Weiteren sind die gemessenen Zeitkonstanten für Bohrung 2 und 3 im Vergleich zu den anderen Bohrungen größer, was zu höheren Ausgleichszeiten führt. Werden die Bohrungen einzeln an der jeweiligen mittleren Länge \bar{l}_1 betrachtet so ist ähnlich wie bei der SVUSS 3 Sonde zu sehen, dass die Zeitkonstante für die Länge 2090 durch das Modell überschätzt wird.

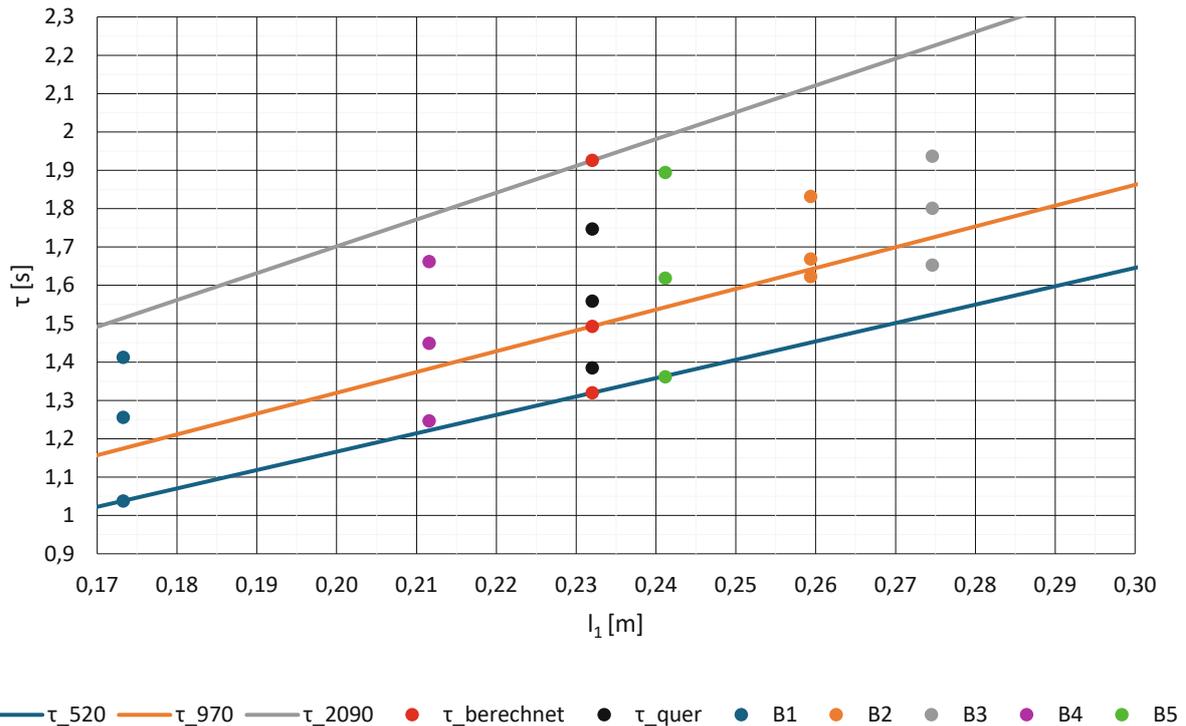


Abbildung 63: SVUSS 5, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten

Die Ausgleichszeiten für die SVUSS 5 Sonde mit der angenommenen Länge l_1 von 232 mm ergeben sich zu:

- $t_{99_{520}} = 6,08 \text{ s}$
- $t_{99_{970}} = 6,88 \text{ s}$
- $t_{99_{2090}} = 8,87 \text{ s}$

In Abbildung 64 bis 68 sind die Messdaten und die Exponentialfunktion für jede Bohrung mit der berechneten Zeitkonstante dargestellt. Für die Bohrung 1 ist zu sehen, dass die Ausgleichszeit für alle drei Schlauchlängen zu hoch ist. Für die Bohrungen 2 und 3 zeigt das erweiterte Modell ein erhöhtes Ausgleichsverhalten für die Längen 520 und 920. Das Ausgleichsverhalten wird für die Länge 2090 durch das Modell gut beschrieben. Für die Bohrung 4 ist die berechnete Zeitkonstante für die Länge 2090 zu groß angenommen worden und deshalb liegen die Messwerte deutlich über der Linie der Exponentialfunktion. Bohrung 5 weist eine gute Übereinstimmung mit dem Modell auf.

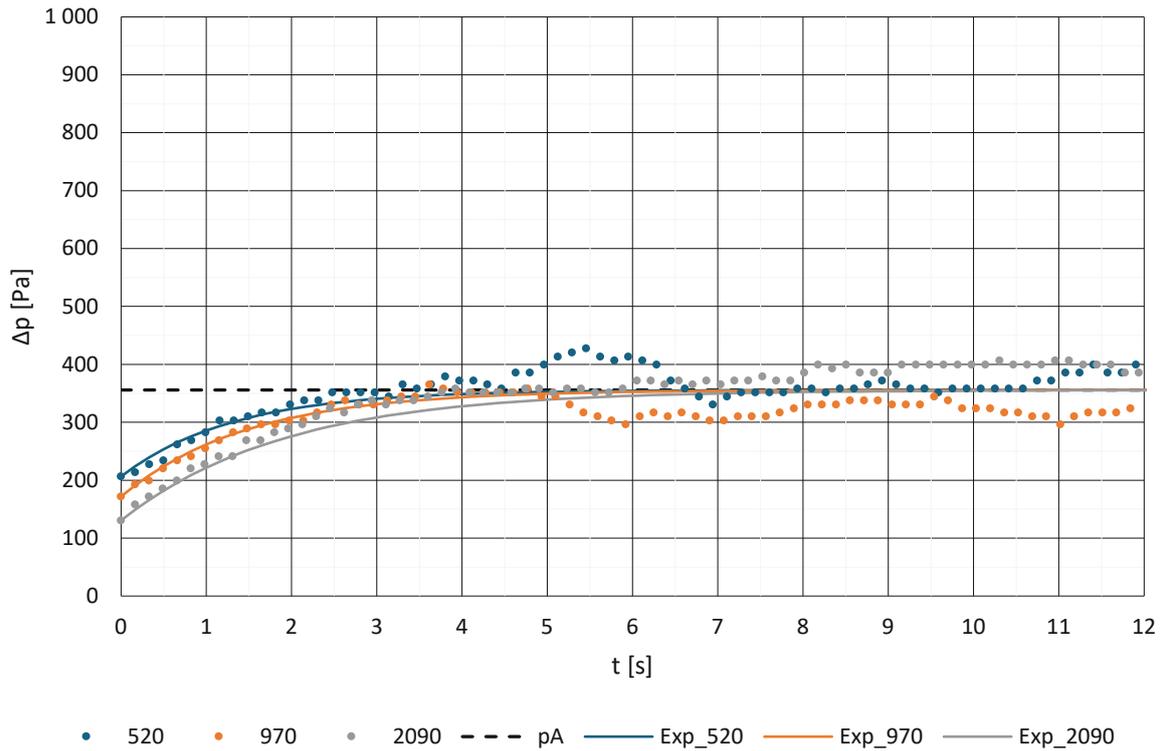


Abbildung 64: SVUSS 5, Bohrung 1 mit τ berechnet bei $l_1 = 232$ mm

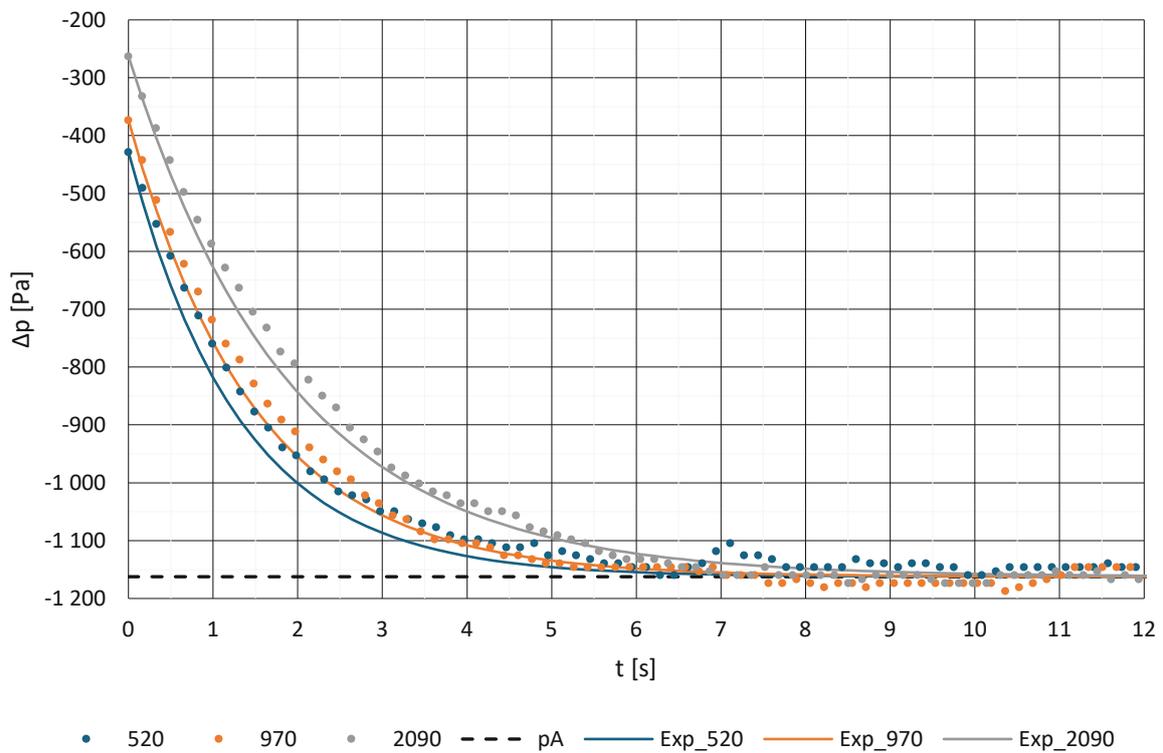


Abbildung 65: SVUSS 5, Bohrung 2 mit τ berechnet bei $l_1 = 232$ mm

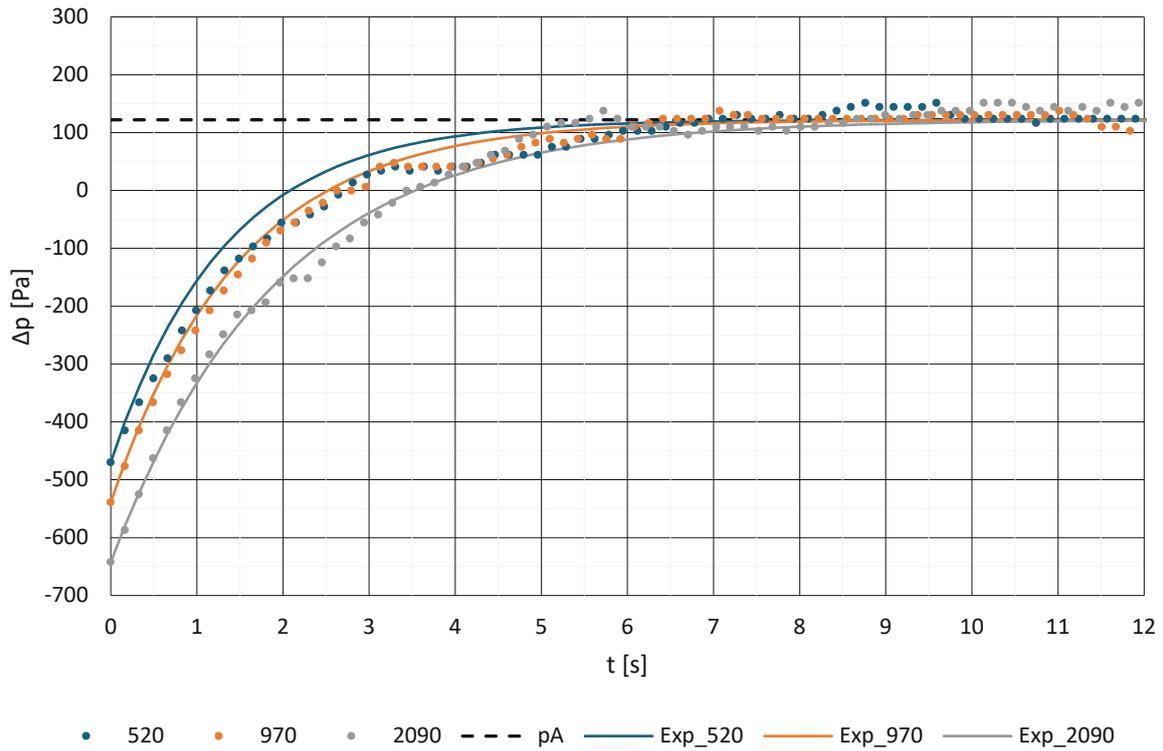


Abbildung 66: SVUSS 5, Bohrung 3 mit τ berechnet bei $l_1 = 232$ mm

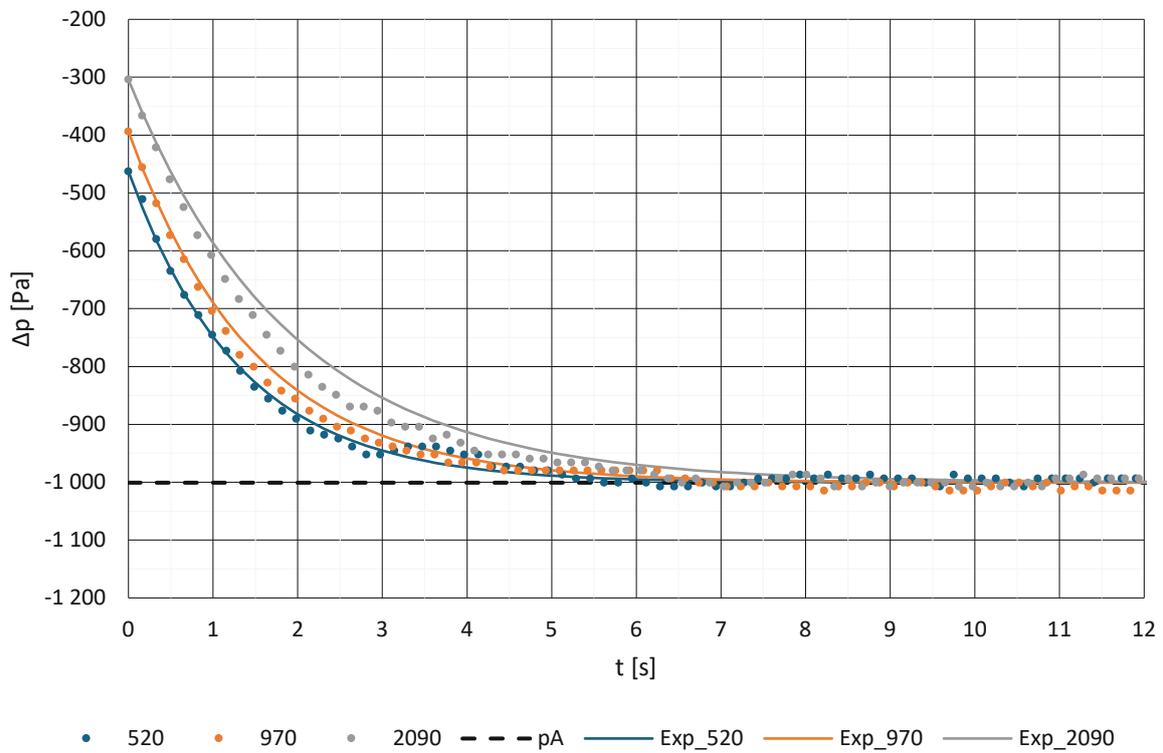


Abbildung 67: SVUSS 5, Bohrung 4 mit τ berechnet bei $l_1 = 232$ mm

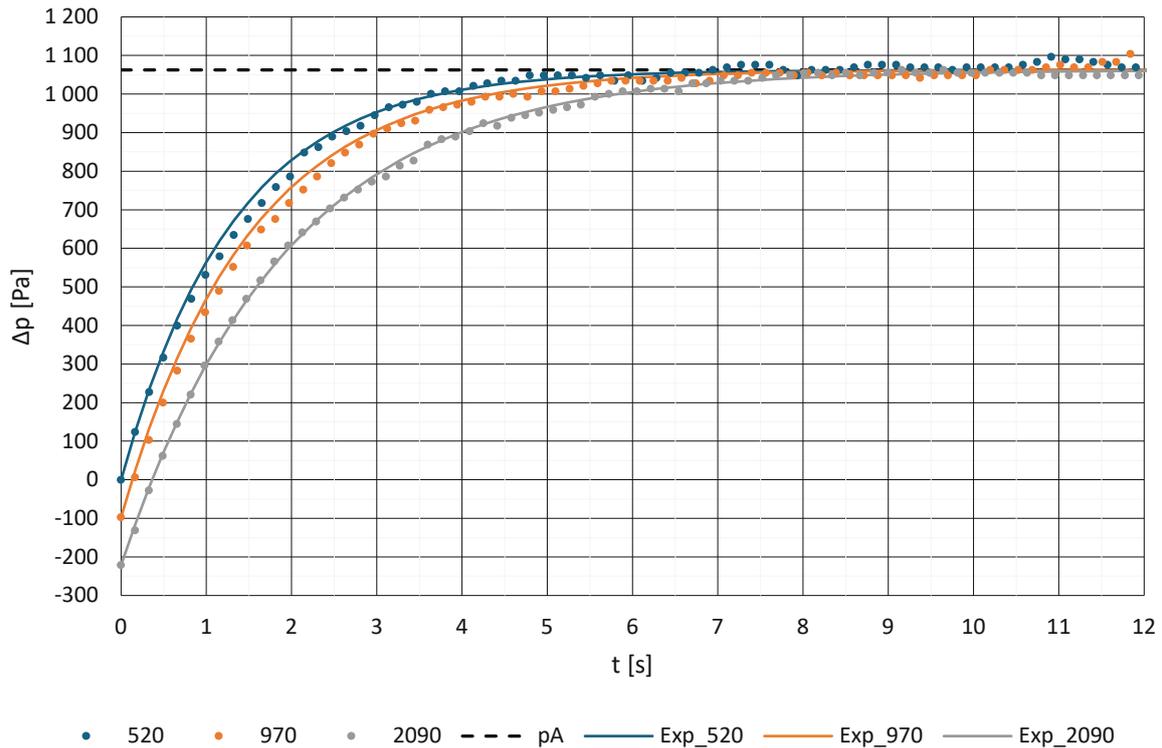


Abbildung 68: SVUSS 5, Bohrung 5 mit τ berechnet bei $l_1 = 232$ mm

In Abbildung 69 bis 71 sind die Messergebnisse der SVUSS 5 Sonde in dimensionsloser Form dargestellt. Auffallend ist die starke Schwankung (periodisch) des Druckkoeffizienten C_p der Bohrung 1, welcher auch nicht gegen 1 konvergiert. Auch verstärkt die geringe Druckdifferenz der Bohrung 1 die Schwankung des Druckkoeffizienten. Es ist aber zu sehen, dass alle Messwerte der Exponentialfunktion den oben erwähnten Abweichungen folgen. Hier sei nochmals erwähnt, dass Messwerte, die unterhalb der Kurve der Exponentialfunktion liegen eine höhere Ausgleichszeit und jene die über der Kurve liegen eine geringere Ausgleichszeit als von dem erweiterten Modell vorhergesagt aufweisen. Bei Erreichen von $t / \tau = 4,6$ zeigt sich für alle Bohrungen, dass C_p bei ca. 0,99 liegt, sprich die 99 % Ausgleichszeit ist erreicht, mit Ausnahme von Bohrung 1.

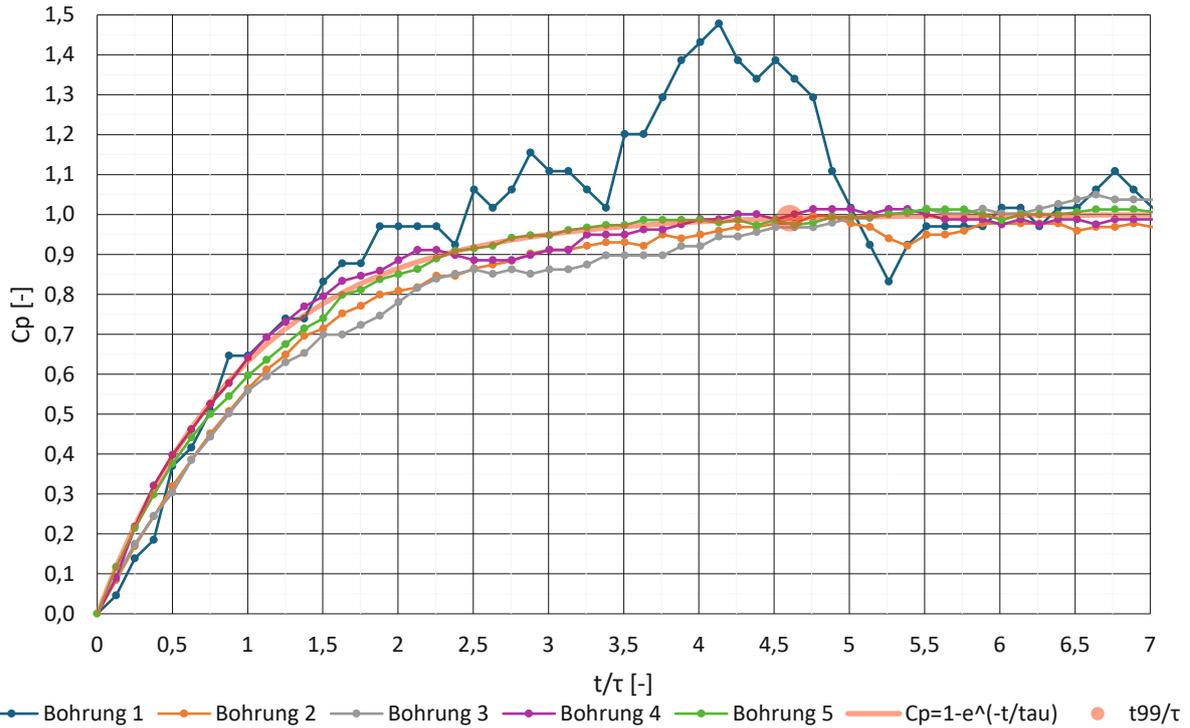


Abbildung 69: SVUSS 5, vergleich Bohrungen für $l_5 = 520 \text{ mm}$, $\tau_{520} = 1,32 \text{ s}$

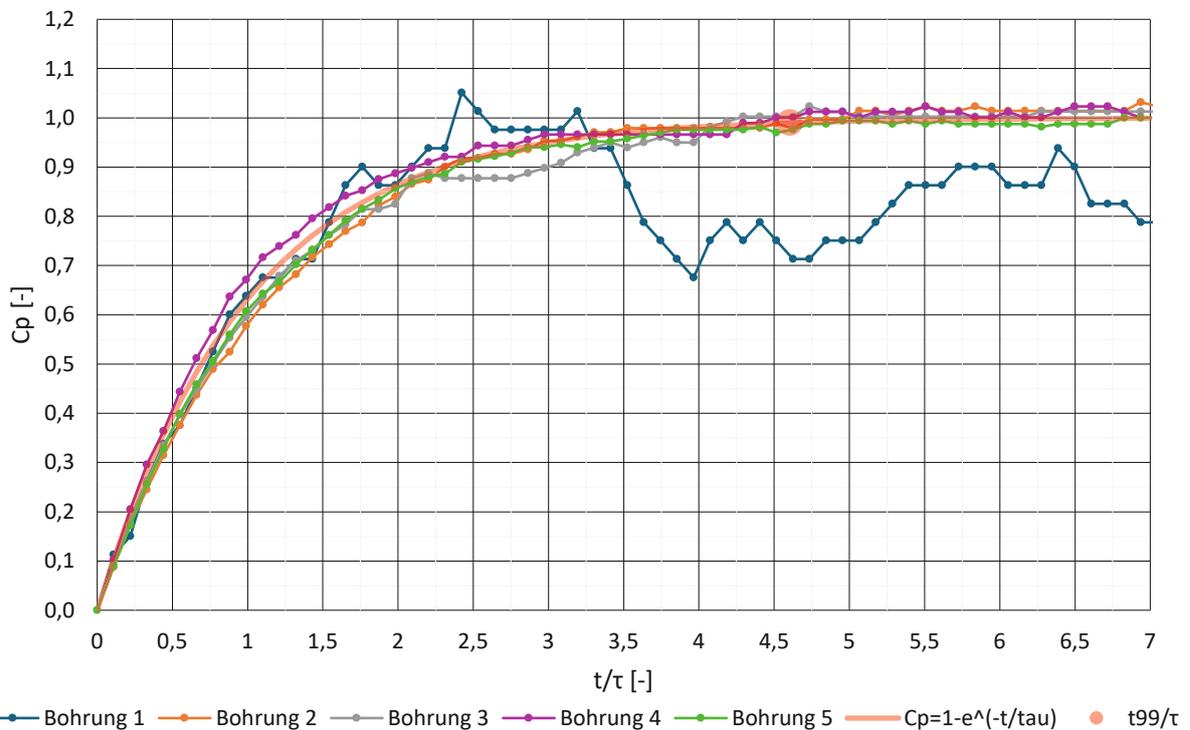


Abbildung 70: SVUSS 5, vergleich Bohrungen für $l_5 = 970 \text{ mm}$, $\tau_{970} = 1,49 \text{ s}$

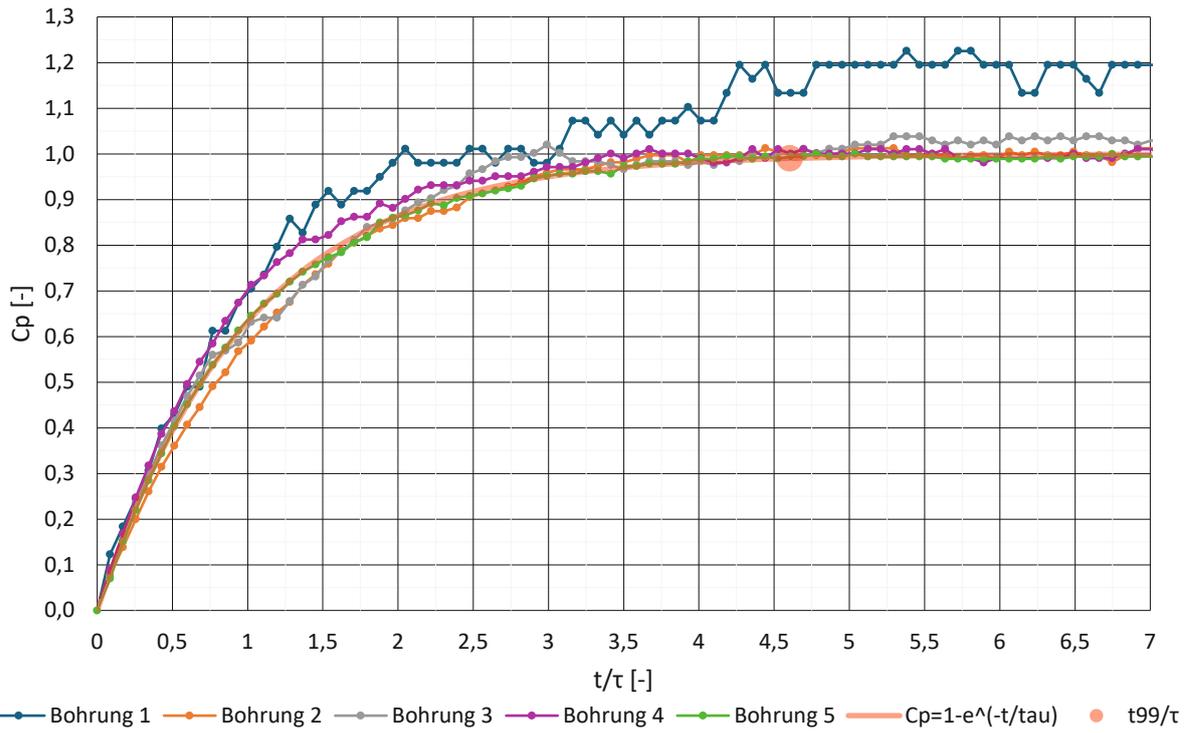


Abbildung 71: SVUSS 5, vergleich Bohrungen für $l_5 = 2090$ mm, $\tau_{2090} = 1,93$ s

5.1.5 US-DA-125

Aus den Messreihen 22012401, 22012402 und 22012403 wurden die Messdaten für die US-DA-125 Sonde entnommen. In Abbildung 72 bis 76 sind die Druckverläufe der Sonde für die fünf Bohrungen über die Zeit dargestellt. Der Druck p_A wurde für jede Bohrung nach $t = 11$ s aus dem Mittelwert über alle drei Schlauchlängen ermittelt. Die Exponentialfunktionen mit den gemessenen Zeitkonstanten sind als Linien dargestellt. Die Punkte 520, 970 und 2090 sind die gemessenen Druckverläufe der jeweiligen Schlauchlänge l_5 . Hier sei angemerkt, dass die gemessenen Zeitkonstanten der Bohrung 4 um ein Vielfaches kleiner sind als die der anderen Bohrungen, weshalb Bohrung 4 für die Bestimmung der Sondenlänge l_1 nicht berücksichtigt wird. Außerdem ist die Messung der Zeitkonstanten für die Bohrung 4 schwierig, da nur wenige Messpunkte zwischen p_c und p_A liegen, dies führt zu einer Abweichung vom Modell. Für die übrigen Bohrungen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit dem Modell und dass eine Erhöhung der Schlauchlänge zu einer Erhöhung der Zeitkonstante bzw. der Ausgleichszeit führt.

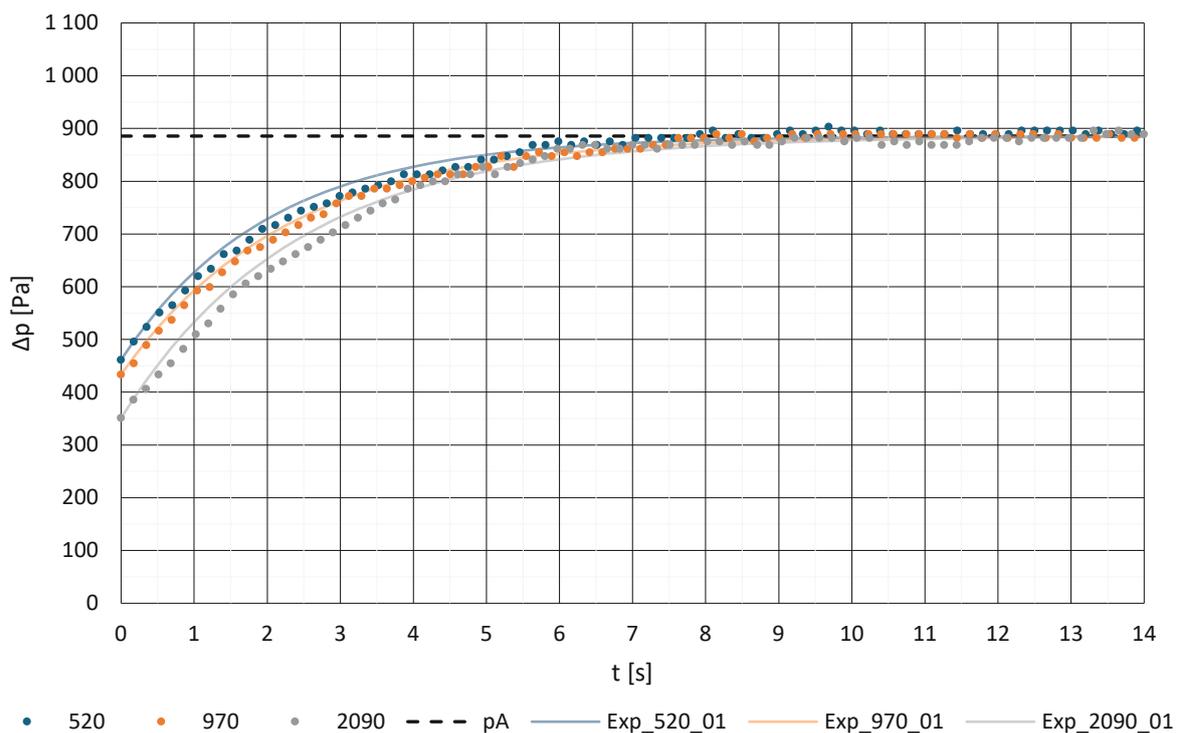


Abbildung 72: US-DA-125, Bohrung 1 mit gemessenen Zeitkonstanten

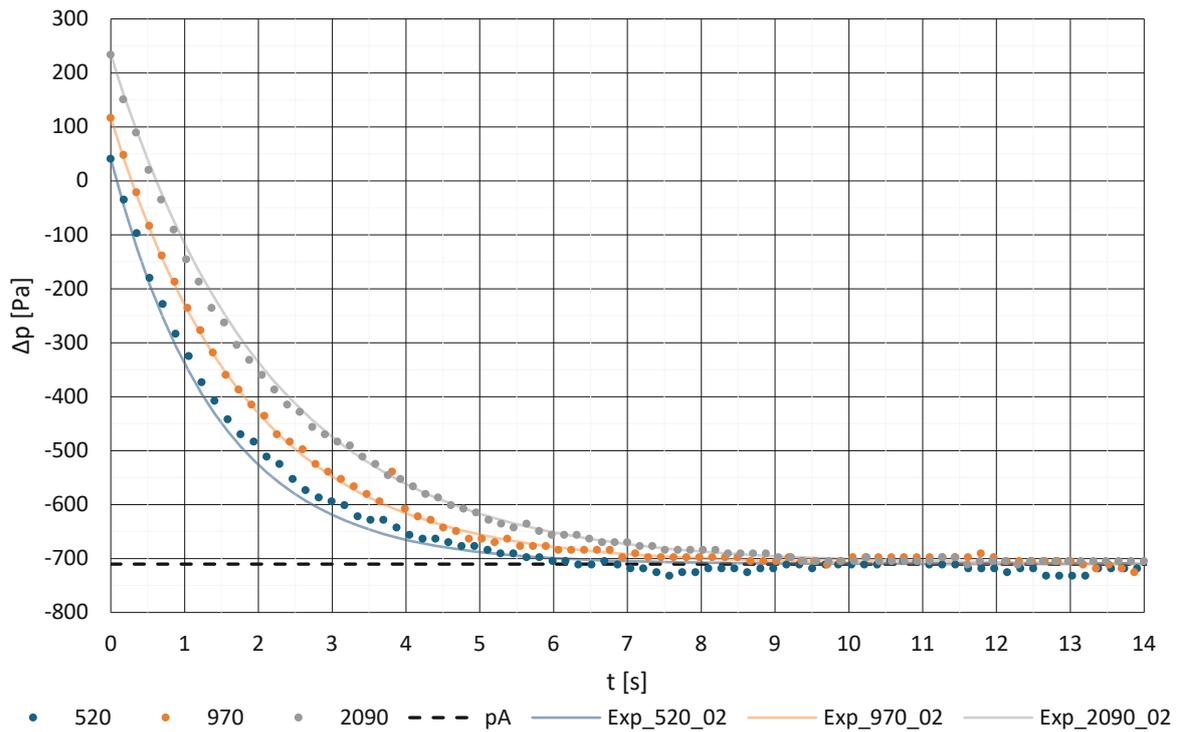


Abbildung 73: US-DA-125, Bohrung 2 mit gemessenen Zeitkonstanten

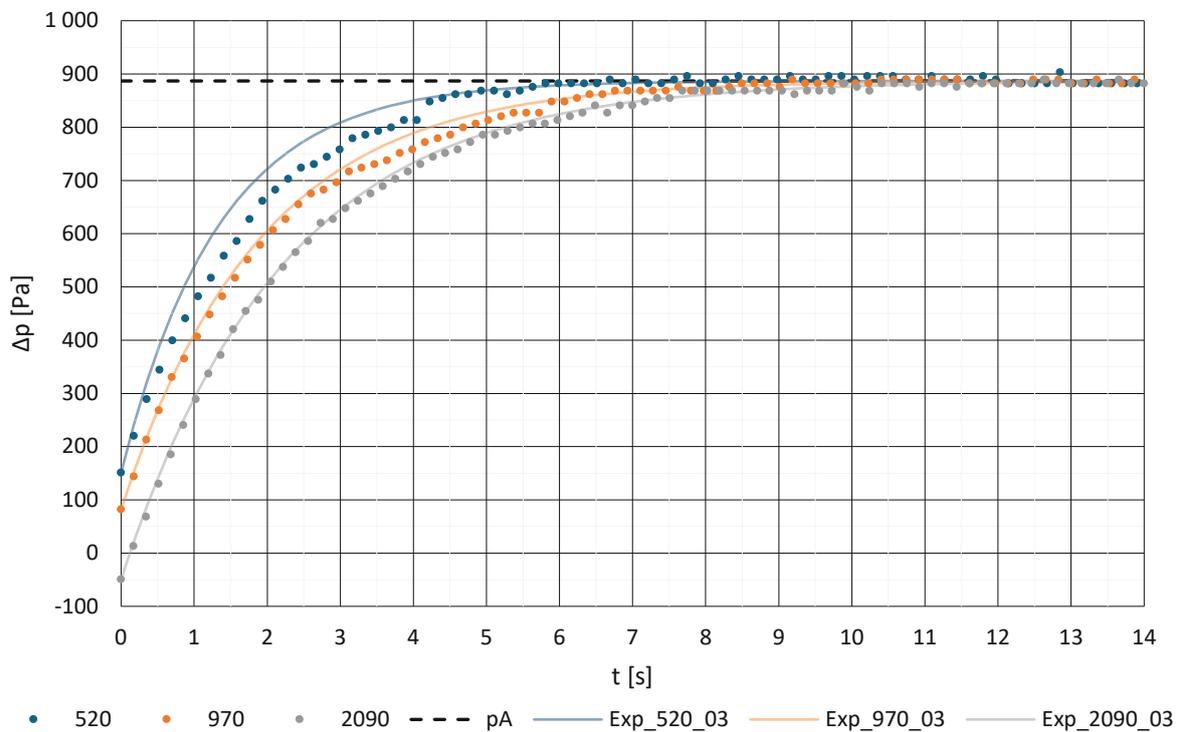


Abbildung 74: US-DA-125, Bohrung 3 mit gemessenen Zeitkonstanten

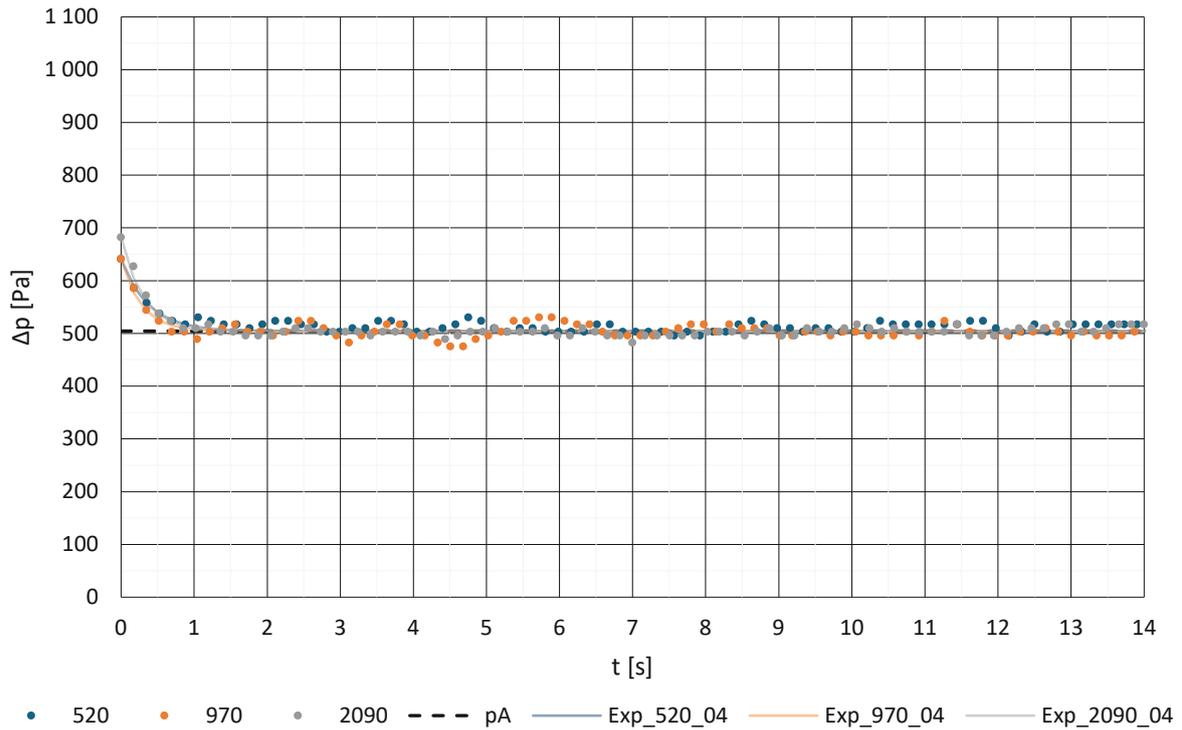


Abbildung 75: US-DA-125, Bohrung 4 mit gemessenen Zeitkonstanten

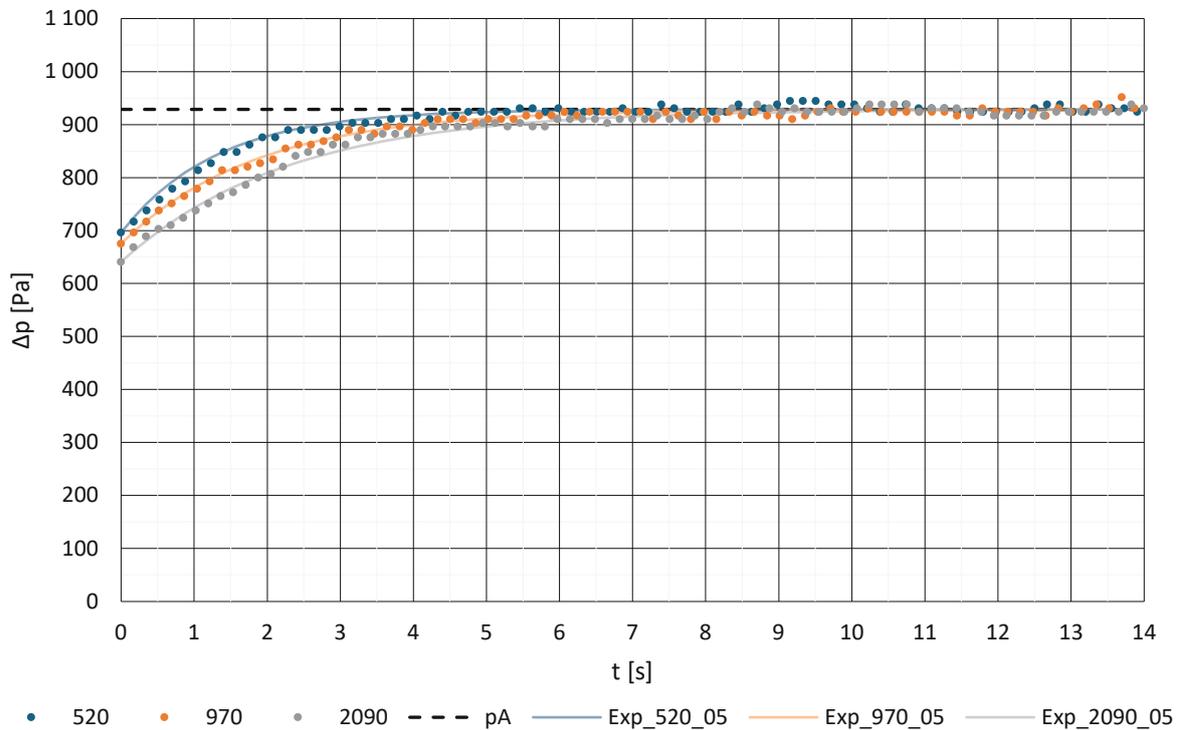


Abbildung 76: US-DA-125, Bohrung 5 mit gemessenen Zeitkonstanten

In Tabelle 11 sind die gemessenen Zeitkonstanten und die dazugehörigen berechneten Sondenlänge l_1 für jede Bohrung und Schlauchlänge angegeben. Somit ergibt für Bohrung 1, 2, 3 und 5 eine mittlere Länge \bar{l}_1 von 210 mm, mit welcher die Zeitkonstante τ berechnet wird. Des Weiteren wurde auch die mittlere Zeitkonstante $\bar{\tau}$ für die vier genannten Bohrungen für jede Schlauchlänge aus den gemessenen Zeitkonstanten berechnet. Für die Bohrung 4 ergibt sich eine mittlere Länge \bar{l}_1 von 24 mm. Für die weitere Betrachtung wird auf Bohrung 4 nicht mehr eingegangen, da bei der US-DA-125 Sonde davon auszugehen ist, dass alle fünf Bohrungen dieselbe Geometrie besitzen.

Tabelle 11: US-DA-125, Vergleich der berechneten und gemessenen Zeitkonstanten und dazugehörige Länge l_1 ; τ in s und Längen in mm

l_5	520		970		2090		\bar{l}_1
	τ_{520_Bi}	l_1	τ_{970_Bi}	l_1	τ_{2090_Bi}	l_1	
Bohrung 1	2,01	267,2	2,30	269,8	2,40	215,9	250,9
Bohrung 2	1,42	184,4	1,84	213,1	2,16	192,7	196,8
Bohrung 3	1,34	172,7	1,90	220,3	2,21	197,8	196,9
Bohrung 4	0,37	37,1	0,27	19,5	0,30	14,6	23,7
Bohrung 5	1,31	169,0	1,86	215,5	2,29	205,0	196,5
$\bar{\tau}$ (ohne B4)	1,52	198,3	1,98	229,7	2,27	202,9	210,3
τ (ohne B4)	1,61	210,0	1,82	210,0	2,34	210,0	210,0
τ_{B4}	0,27	24,0	0,31	24,0	0,40	24,0	24,0

Abbildung 77 ist eine grafische Darstellung der Ergebnisse aus der obigen Tabelle. Hier wurden die Zeitkonstanten des Modells als Funktion der Länge abgebildet und sowohl die berechneten als auch die gemessenen Zeitkonstanten bei der jeweiligen mittleren Länge ins Diagramm eingetragen. Für die Bohrungen 2, 3 und 5 ergeben sich sehr ähnliche Werte für die gemessenen Zeitkonstanten. Für Bohrung 1 zeigen die Längen 520 und 970 eine größere Zeitkonstante als die Übrigen.

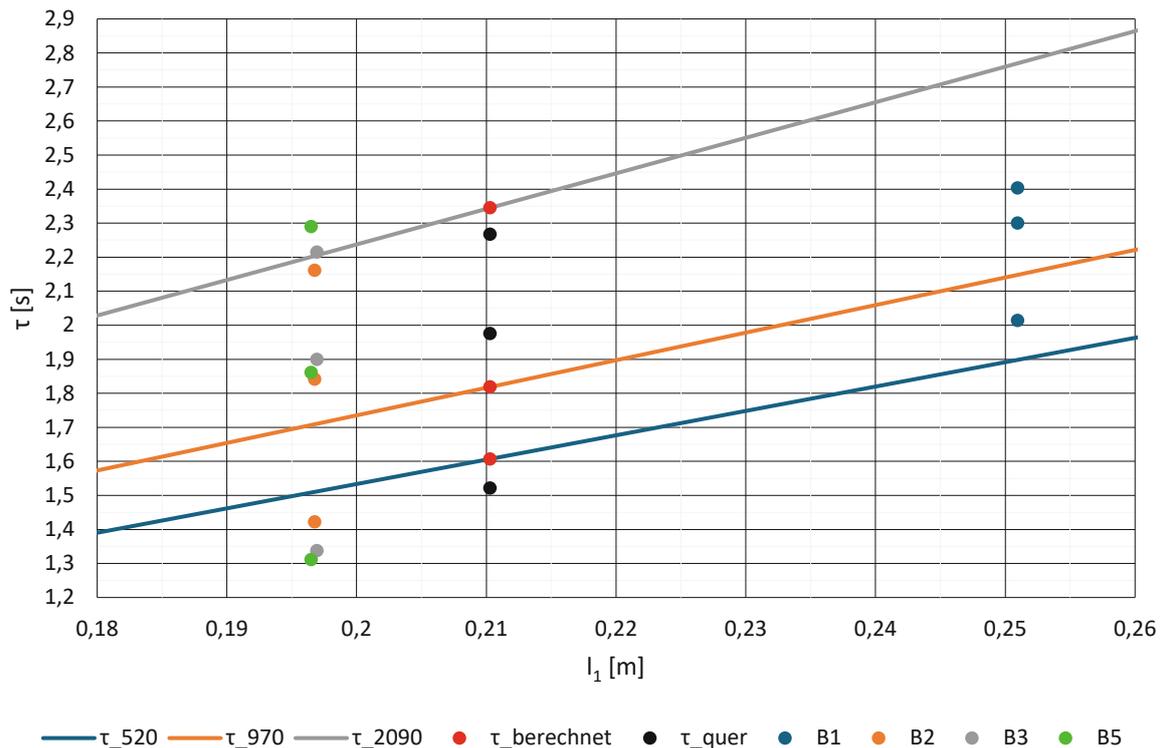


Abbildung 77: US-DA-125, Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitkonstanten

Die Ausgleichszeiten für die US-DA-125 Sonde mit der angenommenen Länge l_1 von 210 mm ergeben sich zu:

- $t_{99_{520}} = 7,40 \text{ s}$
- $t_{99_{970}} = 8,37 \text{ s}$
- $t_{99_{2090}} = 10,80 \text{ s}$

In Abbildung 78 bis 82 sind die Messdaten und die Exponentialfunktion mit der berechneten Zeitkonstante für jede Bohrung dargestellt. Wie zu erwarten sind die nach dem Modell berechneten Zeitkonstanten der Bohrung 1 für die Längen 520 und 970 kleiner als jene der gemessenen Werte, was zu einer Unterschätzung der Ausgleichszeit des Modells führt. Bohrung 2, 3 und 5 folgen dem Modell sehr gut. Bohrung 4 ist der Vollständigkeit halber angegeben. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Ausgleichszeit, welche mit dem Modell berechnet wird, um einiges größer als die tatsächliche Ausgleichszeit ist.

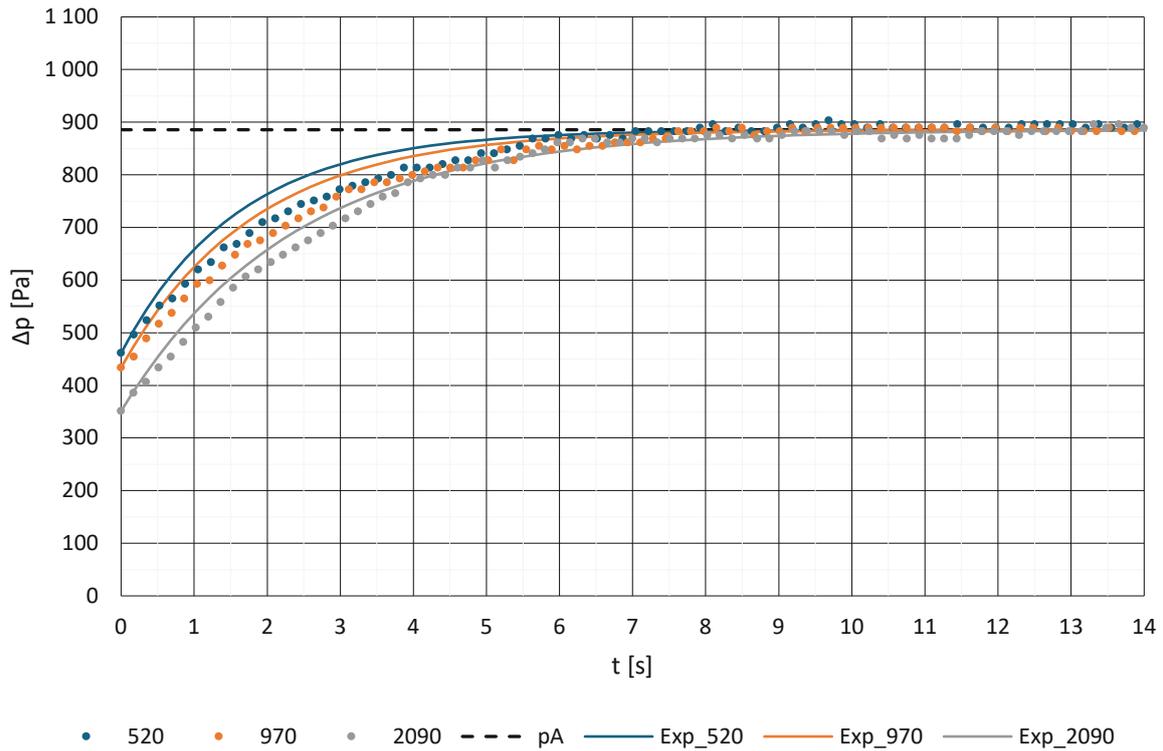


Abbildung 78: US-DA-125, Bohrung 1 mit τ berechnet bei $l_1 = 210$ mm

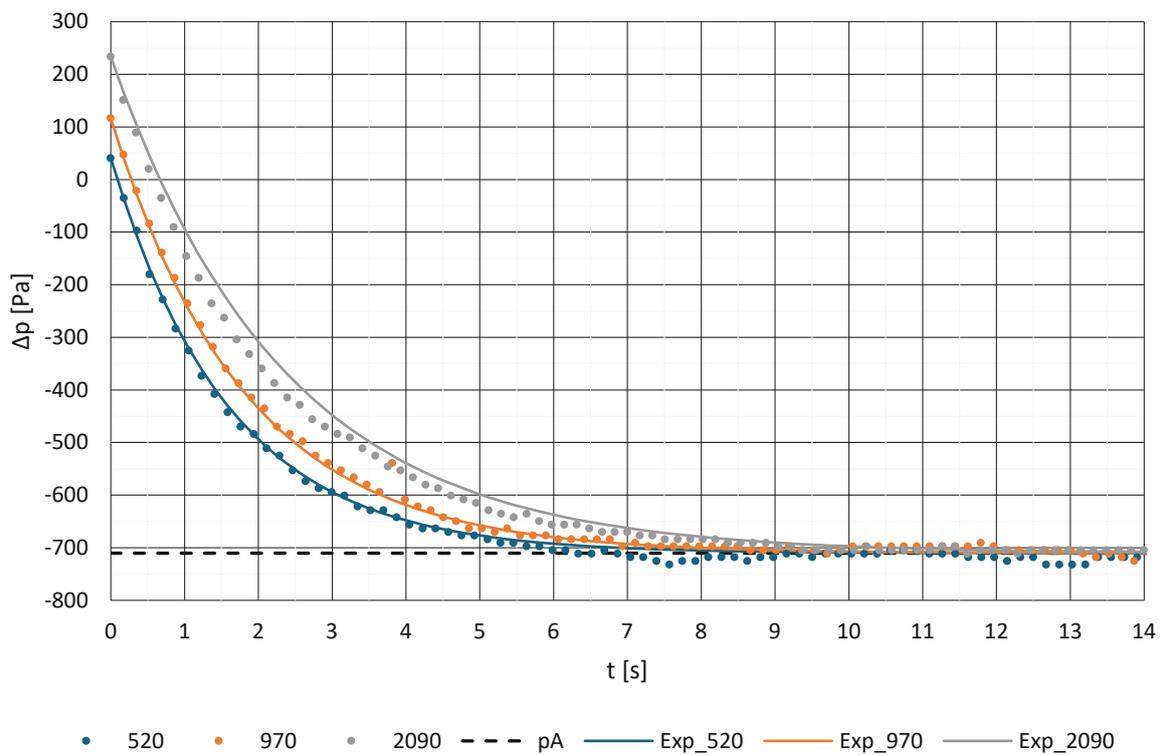


Abbildung 79: US-DA-125, Bohrung 2 mit τ berechnet bei $l_1 = 210$ mm

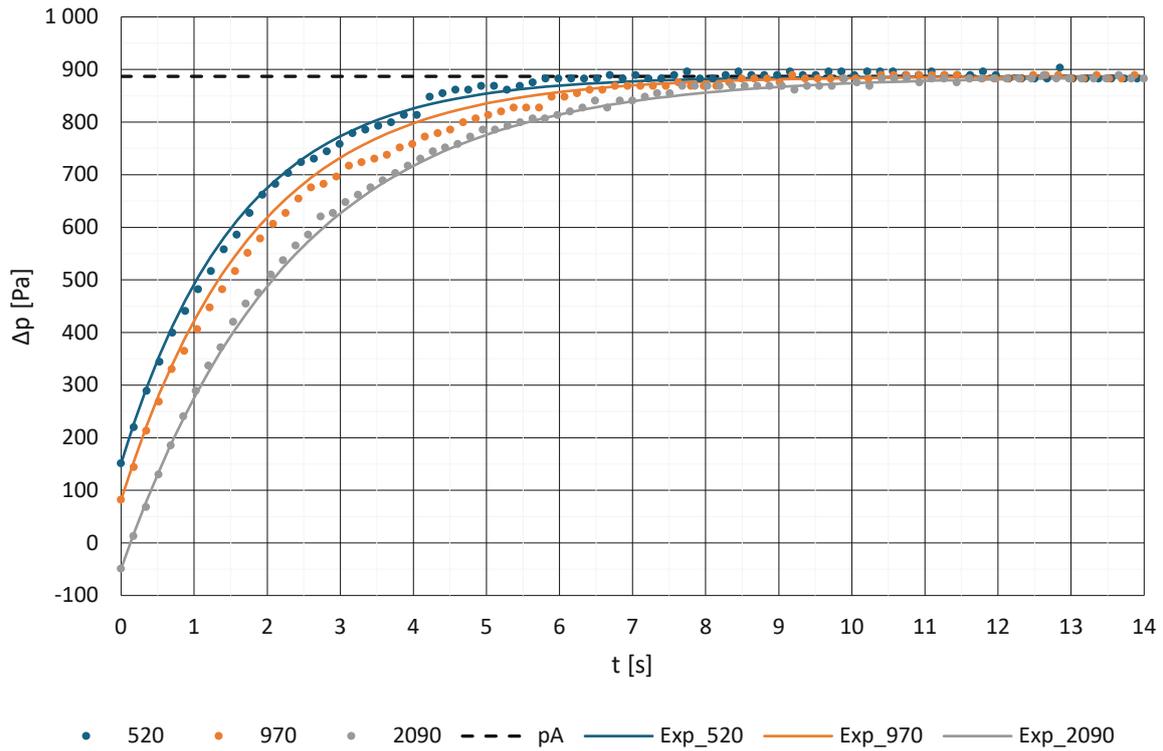


Abbildung 80: US-DA-125, Bohrung 3 mit τ berechnet bei $l_1 = 210$ mm

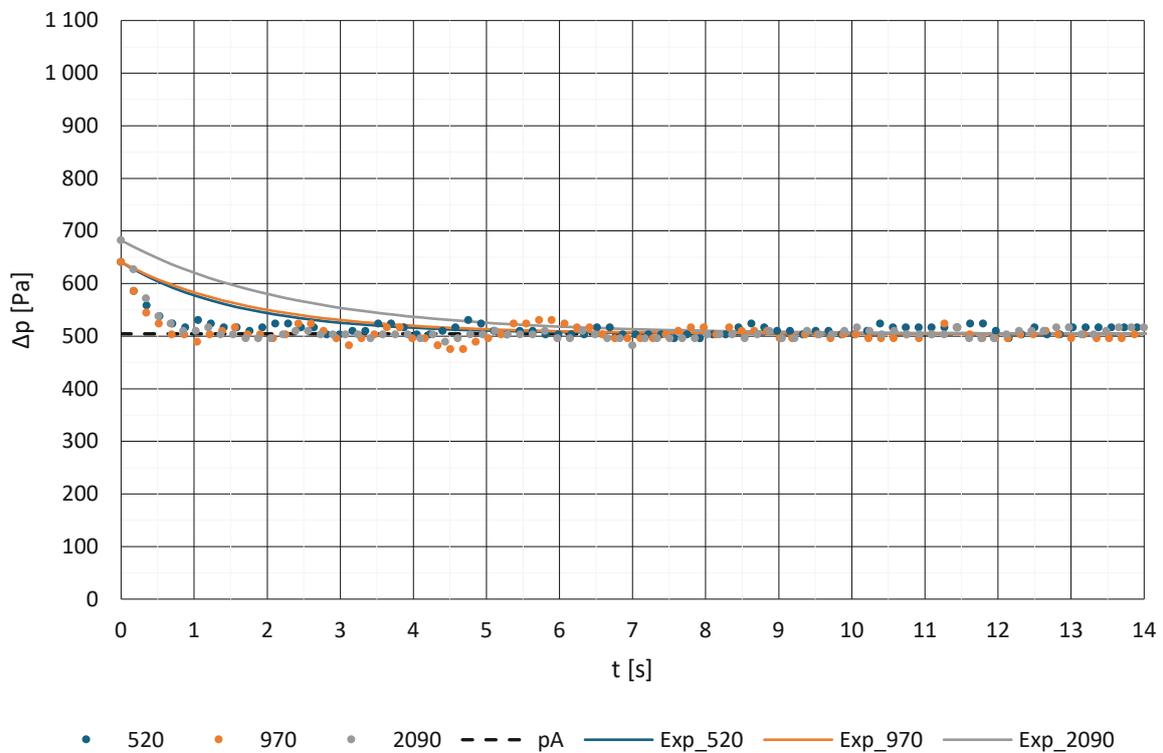


Abbildung 81: US-DA-125, Bohrung 4 mit τ berechnet bei $l_1 = 210$ mm

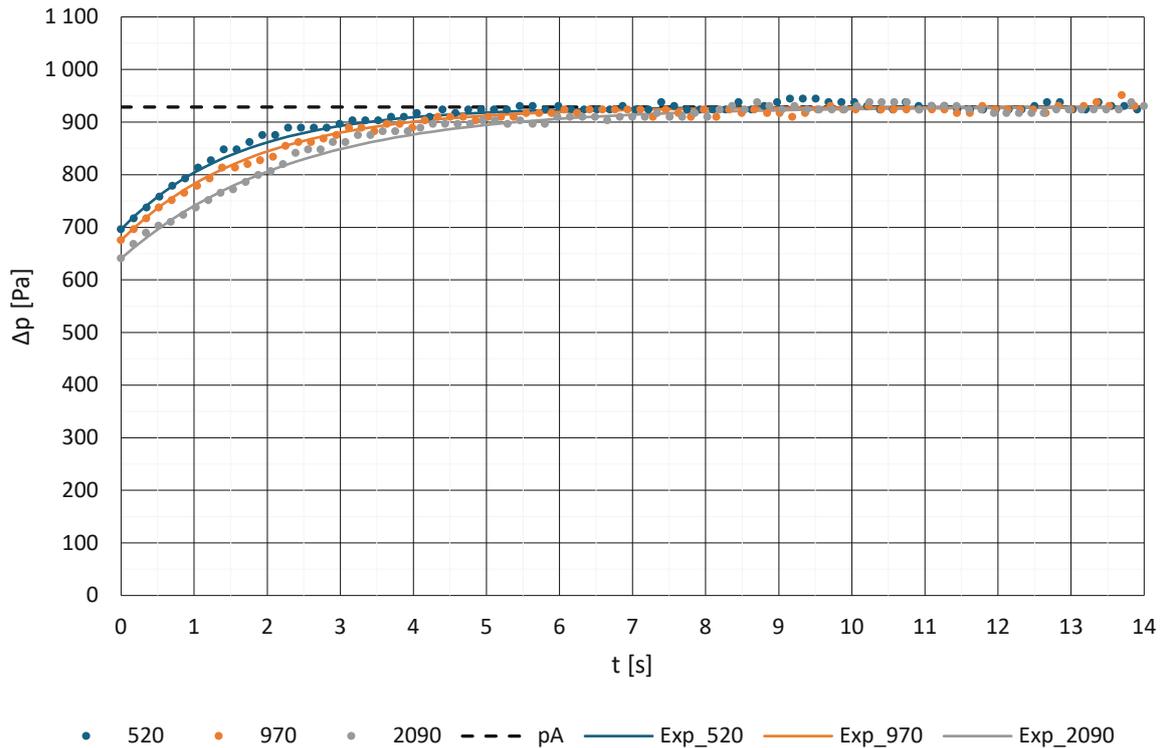


Abbildung 82: US-DA-125, Bohrung 5 mit τ berechnet bei $l_1 = 210$ mm

In Abbildung 83 bis 85 sind die Messergebnisse der US-DA-125 Sonde in dimensionsloser Form aufgeteilt nach den Längen der Druckmessleitungen l_5 dargestellt. Auffallend ist die starke Schwankung des Druckkoeffizienten C_p der Bohrung 4 und das viel schnellere Ausgleichsverhalten dieser Bohrung. Die Messwerte der Bohrungen 2, 3 und 5 folgen der Exponentialfunktion für alle drei Längen der Druckmessleitungen l_5 gut. Für die Länge 520 zeigt sich, dass Bohrung 1 eine höhere Ausgleichszeit aufweist und Bohrung 2, 3 und 5 eine etwas geringere Ausgleichszeit haben als vom Modell vorhergesagt. Für die Länge 970 folgen 2, 3 und 5 gut dem Modell. Bohrung 1 weist auch für die Länge 970 eine höhere Ausgleichszeit auf. Zu Beginn der Messwerte von Bohrung 1 für die Längen 520 und 970 ist eine Abweichung von der Exponentialfunktion zu sehen, jedoch kommt es in der Nähe von t_{99} zu einer Annäherung an die Kurve. Für die Länge 2090 zeigen die Bohrungen 1, 2, 3 und 5 eine gute Übereinstimmung mit dem Modell.

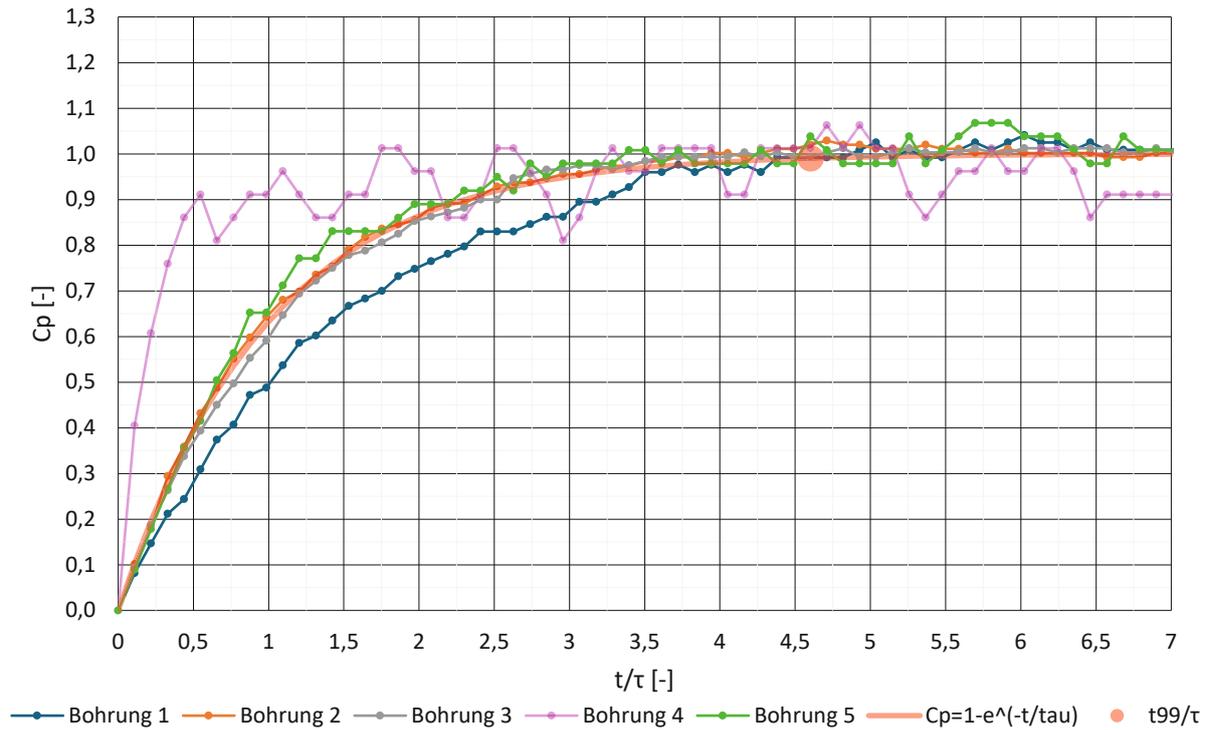


Abbildung 83: US-DA-125, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 520 \text{ mm}$, $\tau_{520} = 1,61 \text{ s}$

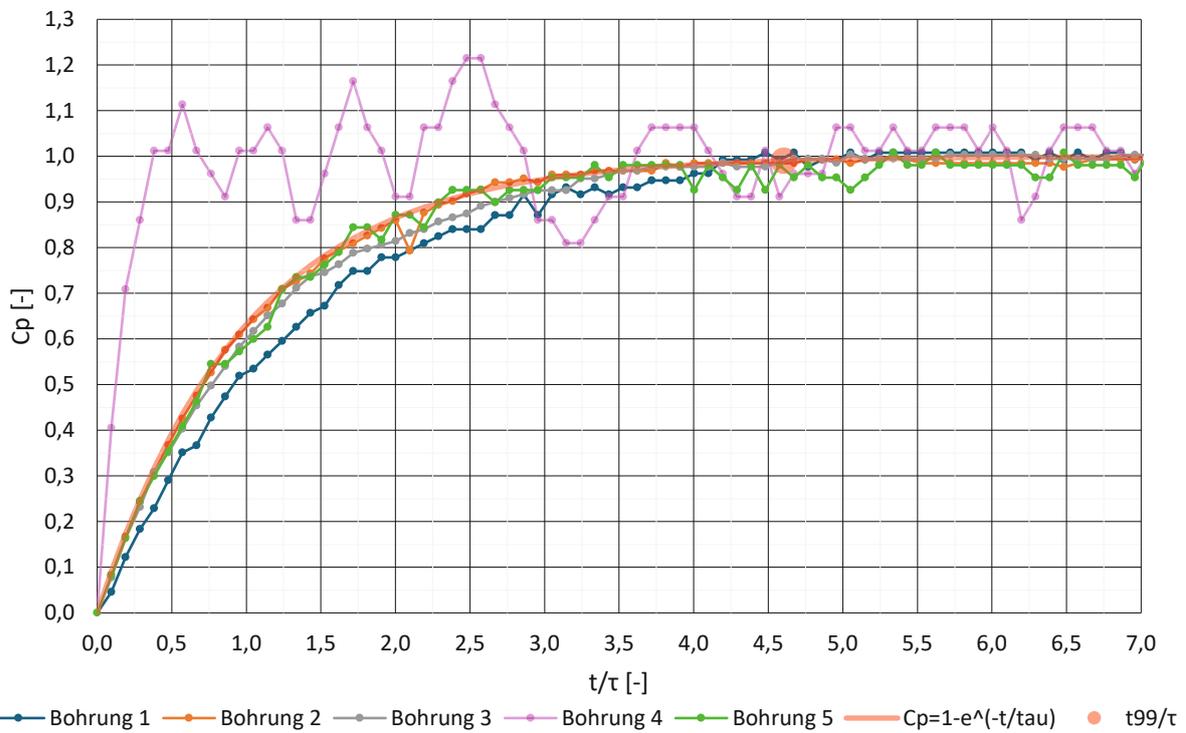


Abbildung 84: US-DA-125, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 970 \text{ mm}$, $\tau_{970} = 1,82 \text{ s}$

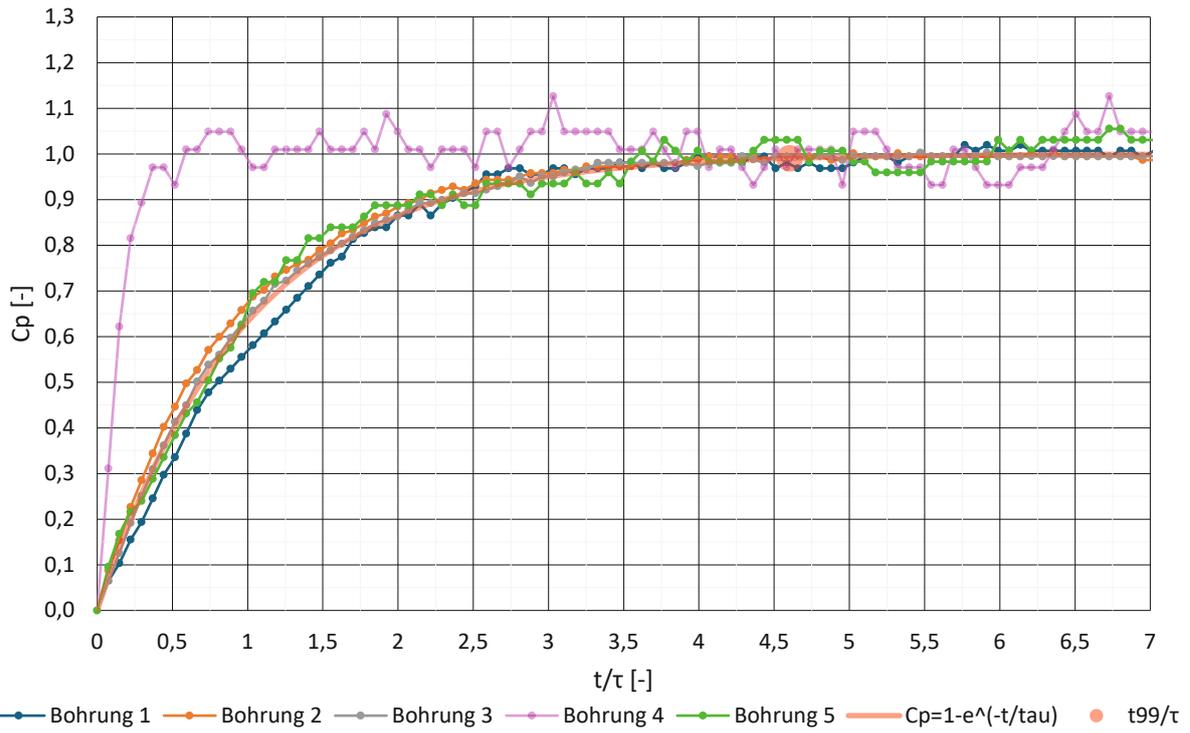


Abbildung 85: US-DA-125, Vergleich Bohrungen für $l_5 = 2070$ mm, $\tau_{2090} = 2,34$ s

5.2 Ausmischdruck p_c

In diesem Abschnitt werden die berechneten Ausmischdrücke p_{c_b} nach Gl. (26) mit den gemessenen Ausmischdrücken p_c verglichen. Hierfür werden die gesamten Messpunkte einer Messreihe in einem Diagramm dargestellt. Weiters werden im Diagramm der Start, das Ende, der berechnete Ausmischdruck und die 99 % Ausgleichszeit für jede Bohrung eingezeichnet. Der Start der Bohrung entspricht dem gemessenen Ausmischdruck der jeweiligen Bohrung. Auch werden die genauen Werte der Drücke p_A für jede Bohrung angegeben und eingezeichnet. Weiters wird die Druckdifferenz Δp_s , um welcher der Druckverlauf reduziert wird, angegeben.

5.2.1 SVUSS 3

In den Abbildungen 86 bis 88 sind die Druckverläufe der SVUSS 3 Sonde für die drei Schlauchlängen 520, 970 und 2090 zu sehen. Die 400 Messpunkte pro Druckmessleitung wurden aus den Messreihen 04012401, 04012402 und 04012403 entnommen. Die Druckdifferenz ist bereits um $\Delta p_s = 77,8$ Pa reduziert. Für die SVUSS 3 Sonde ergeben sich für die Drücke p_A für die drei Bohrungen folgende Werte:

- $p_{A_1} = 839,9$ Pa
- $p_{A_2} = -578,2$ Pa
- $p_{A_3} = 1146,0$ Pa

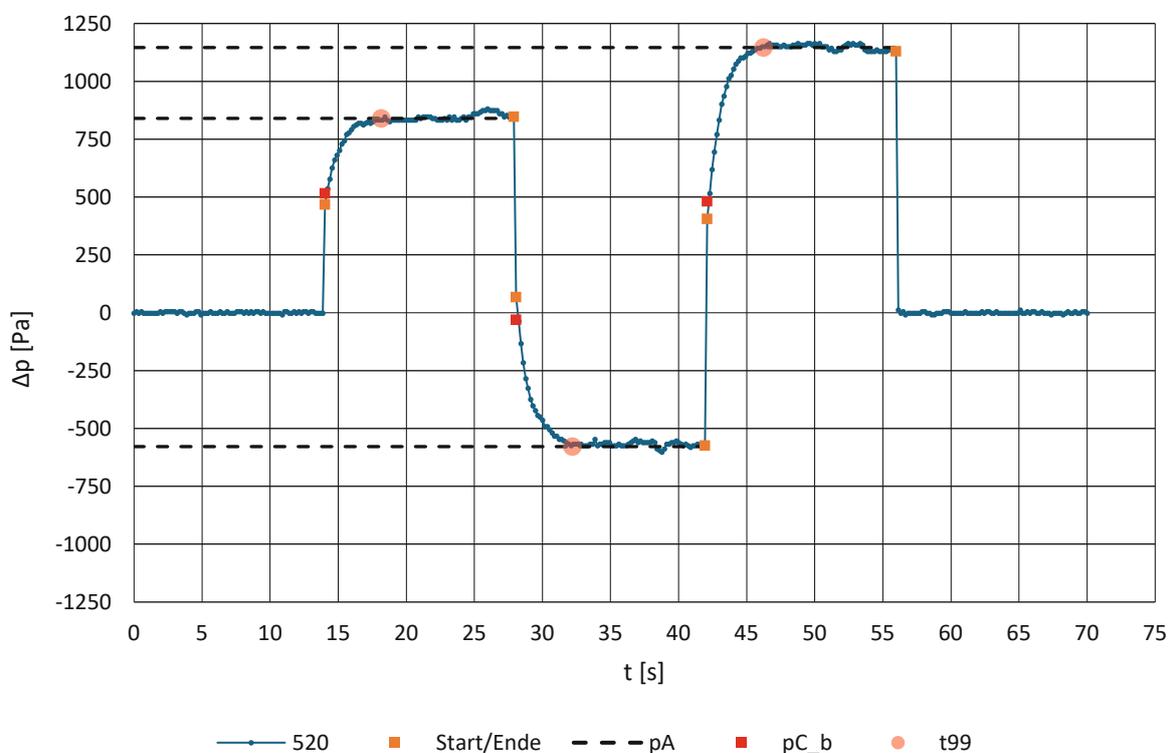


Abbildung 86: SVUSS 3, Gesamtverlauf bei $l_s = 520$ mm

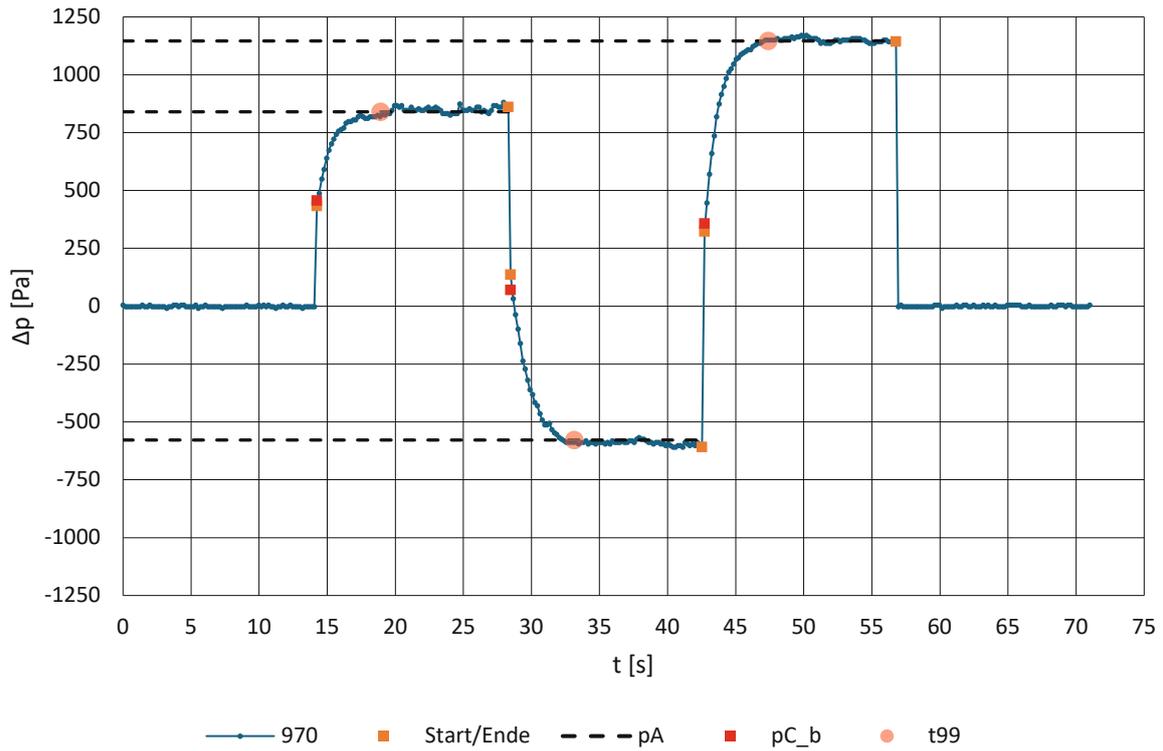


Abbildung 87: SVUSS 3, Gesamtverlauf bei $l_5 = 970$ mm

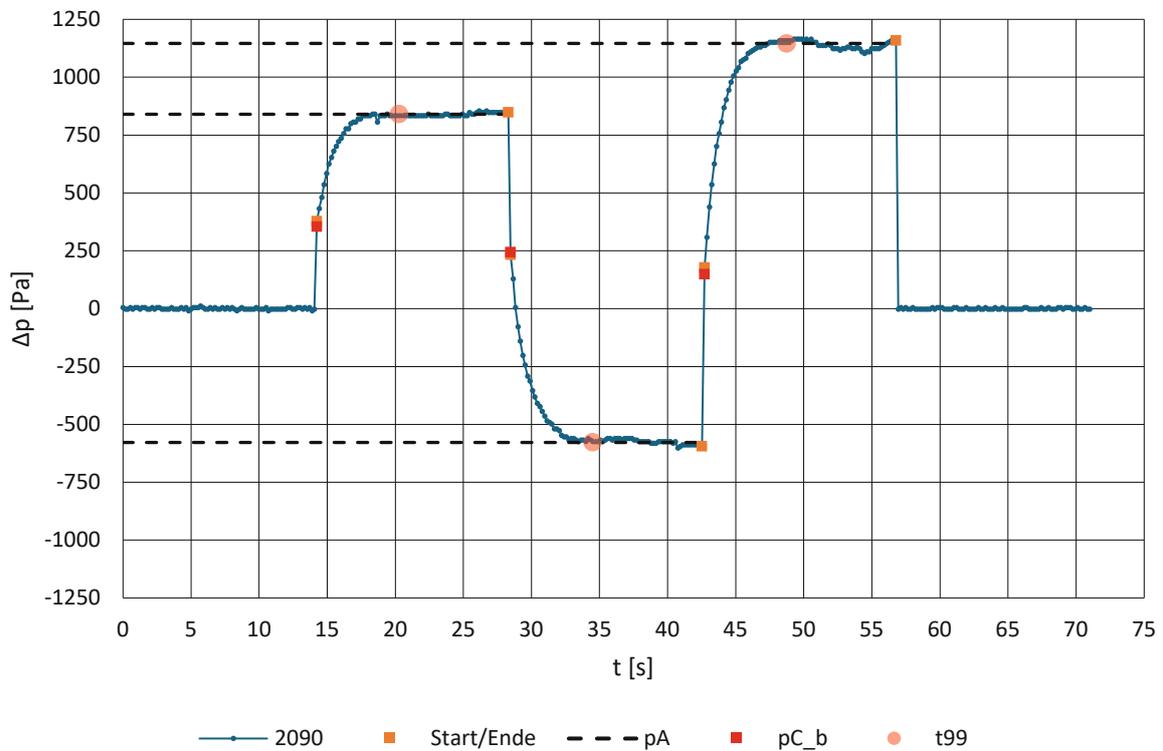


Abbildung 88: SVUSS 3, Gesamtverlauf bei $l_5 = 2090$ mm

Tabelle 12 zeigt die berechneten und gemessenen Ausmischdrücke $p_{c,b}$ und p_c für die SVUSS 3 Sonde. Die minimale absolute Abweichung zwischen $p_{c,b}$ und p_c beträgt 10 Pa, die maximale Abweichung erreicht 98 Pa und der Mittelwert der absoluten Abweichungen beträgt 23 Pa.

Tabelle 12: SVUSS 3, Vergleich der berechneten und gemessenen Ausmischdrücke in Pa

l_5	520		970		2090	
	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c
Bohrung 1	515,7	467,3	455,8	432,8	353,5	377,6
Bohrung 2	-30,9	67,1	70,4	136,1	243,1	232,7
Bohrung 3	480,5	405,2	357,4	322,4	147,4	177,5

5.2.2 AVA 110

Die Messdaten der AVA 110 Sonde sind in Abbildung 89 bis 91 für die drei Schlauchlängen 520, 970 und 2090 dargestellt. Die 400 Messpunkte je Schlauchlänge wurden aus den Messreihen 04012404, 04012405 und 04012406 entnommen. Die Druckdifferenz ist bereits um $\Delta p_s = 104,5$ Pa reduziert. Für die AVA 110 Sonde ergeben sich für die Drücke p_A für die drei Bohrungen folgende Werte:

- $p_{A,1} = 876,7$ Pa
- $p_{A,2} = -1029,6$ Pa
- $p_{A,3} = 1212,6$ Pa

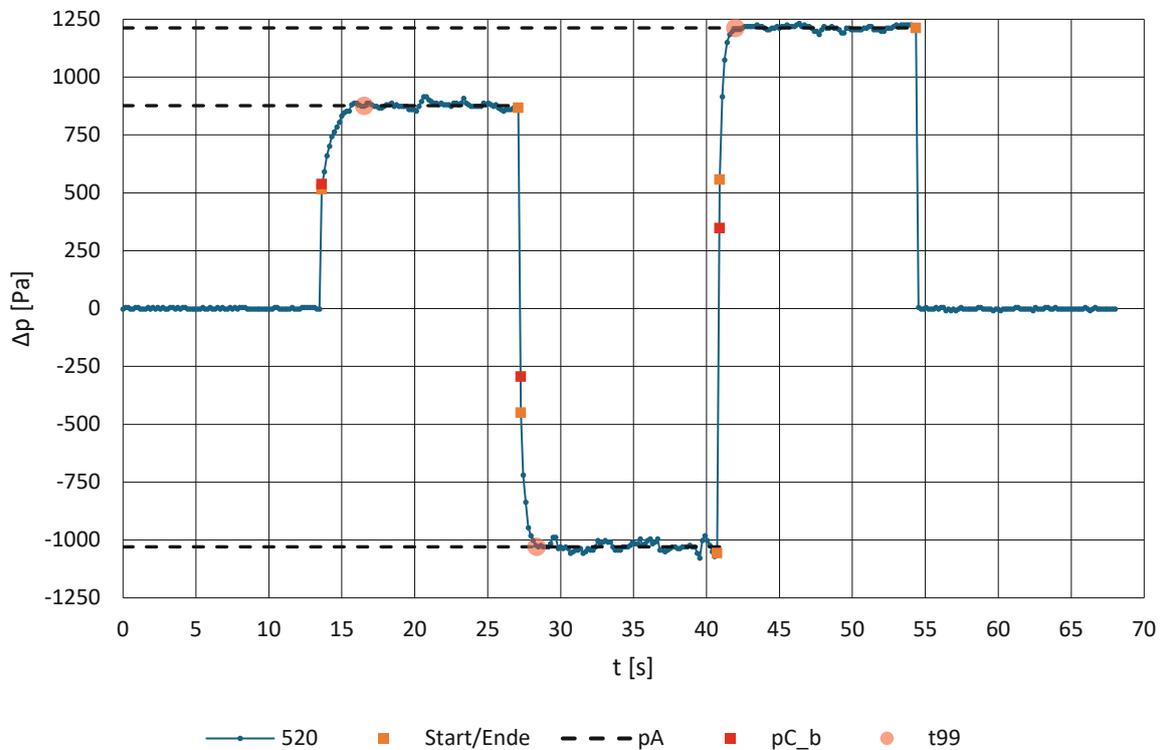


Abbildung 89: AVA 110, Gesamtverlauf bei $l_5 = 520$ mm

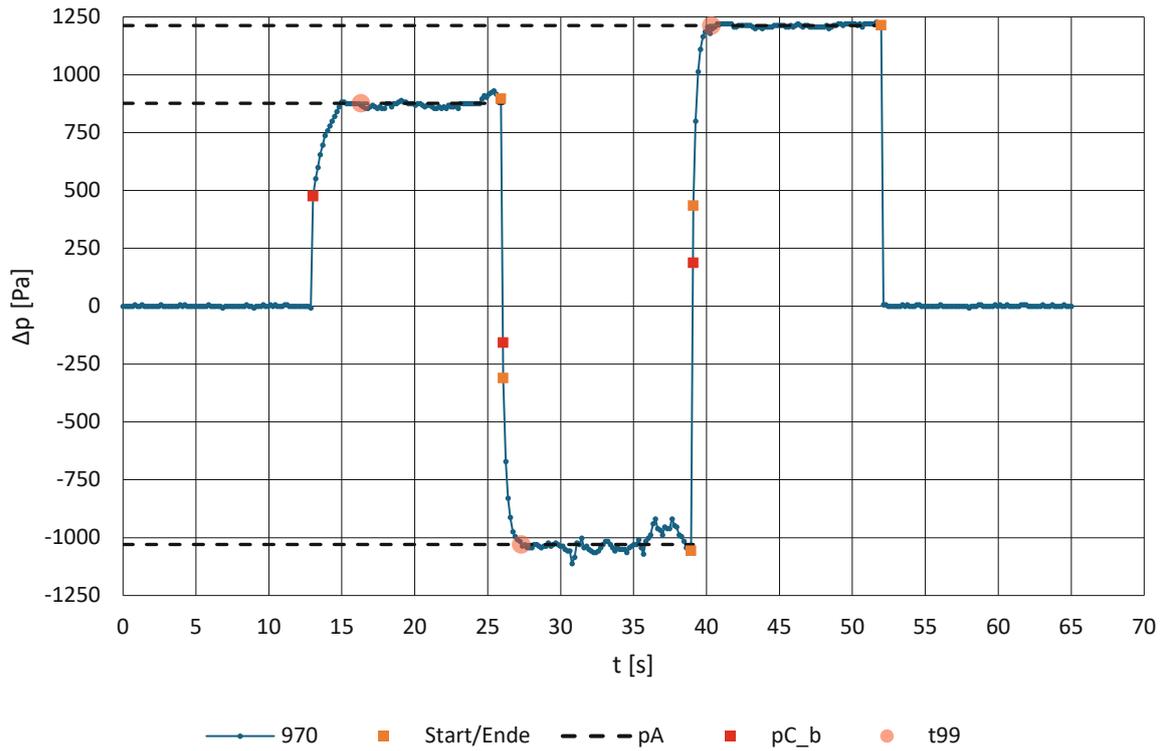


Abbildung 90: AVA 110, Gesamtverlauf bei $l_5 = 970$ mm

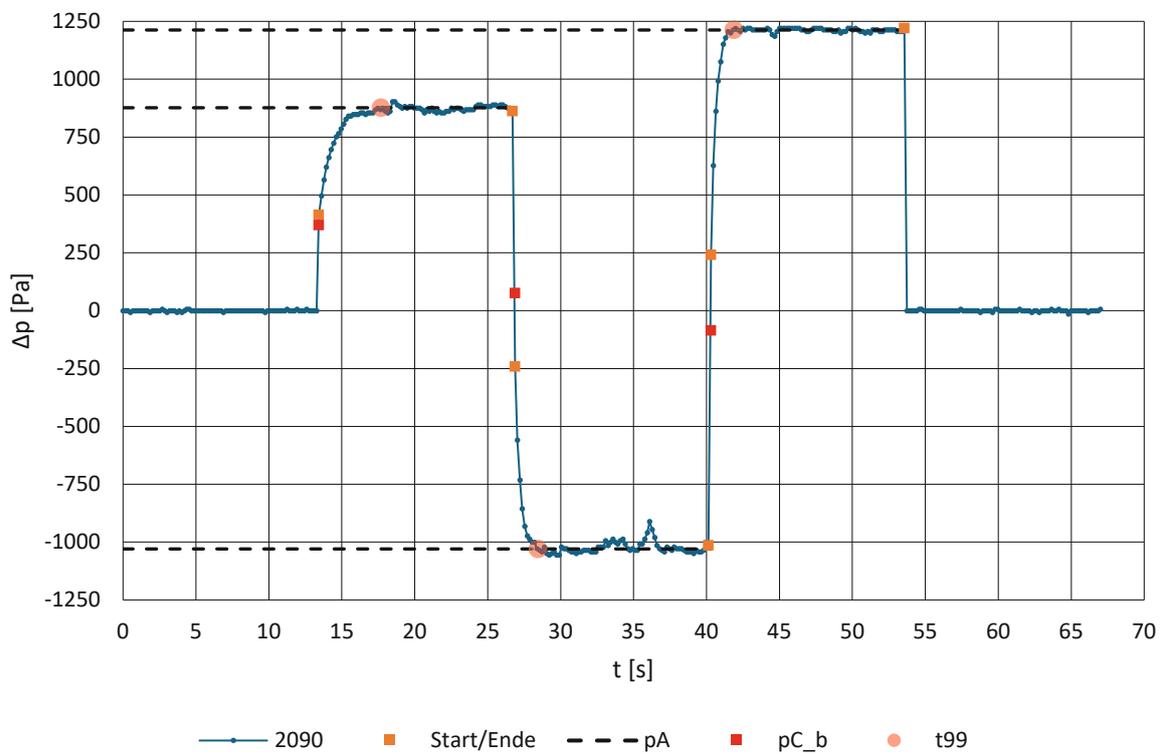


Abbildung 91: AVA 110, Gesamtverlauf bei $l_5 = 2090$ mm

In Tabelle 13 sind die berechneten und gemessenen Ausmischdrücke $p_{C,b}$ und p_C für die AVA 110 Sonde aufgeführt. Die minimale absolute Abweichung zwischen $p_{C,b}$ und p_C beträgt 1 Pa, die maximale Abweichung liegt bei 327 Pa und der Durchschnitt der absoluten Abweichungen beträgt 100 Pa.

Tabelle 13: AVA 110, Vergleich der berechneten und gemessenen Ausmischdrücke in Pa

l_5	520		970		2090	
	$p_{C,b}$	p_C	$p_{C,b}$	p_C	$p_{C,b}$	p_C
Bohrung 1	538,3	516,5	475,7	475,1	368,9	413,0
Bohrung 2	-293,8	-449,5	-157,7	-311,5	74,4	-242,5
Bohrung 3	347,2	557,9	187,1	240,5	-86,0	240,5

5.2.3 AVA 43

Der Verlauf der Druckdifferenzen der drei Druckmessleitungen 520, 970 und 2090 für die AVA 43 Sonde sind in Abbildung 92 bis 94 dargestellt. Die Daten wurden aus den Messreihen 04012407, 04012408 und 04012409 entnommen. Für jede Schlauchlänge sind 800 Datenpunkte dargestellt. Die Druckdifferenz ist um $\Delta p_s = 102,2$ Pa reduziert. Für die AVA 43 Sonde ergeben sich für die Drücke p_A für die drei Bohrungen folgende Werte:

- $p_{A,1} = 572,4$ Pa
- $p_{A,2} = -1030,5$ Pa
- $p_{A,3} = 1050,1$ Pa

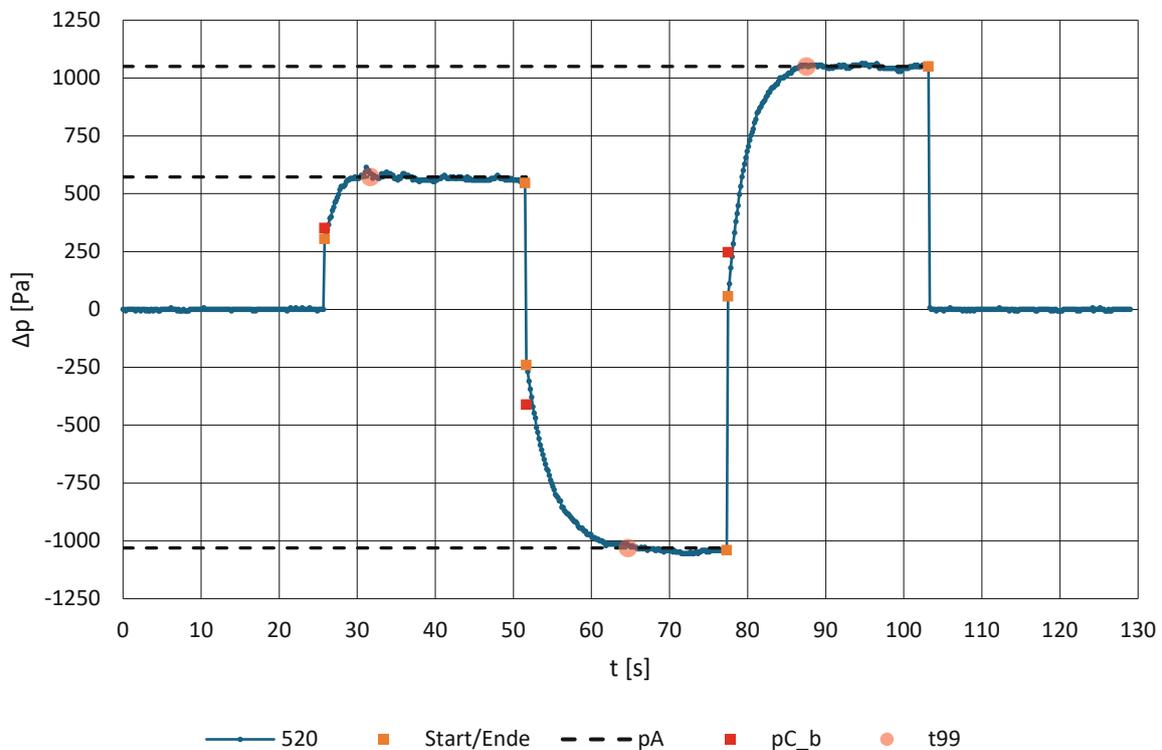


Abbildung 92: AVA 43, Gesamtverlauf bei $l_5 = 520$ mm

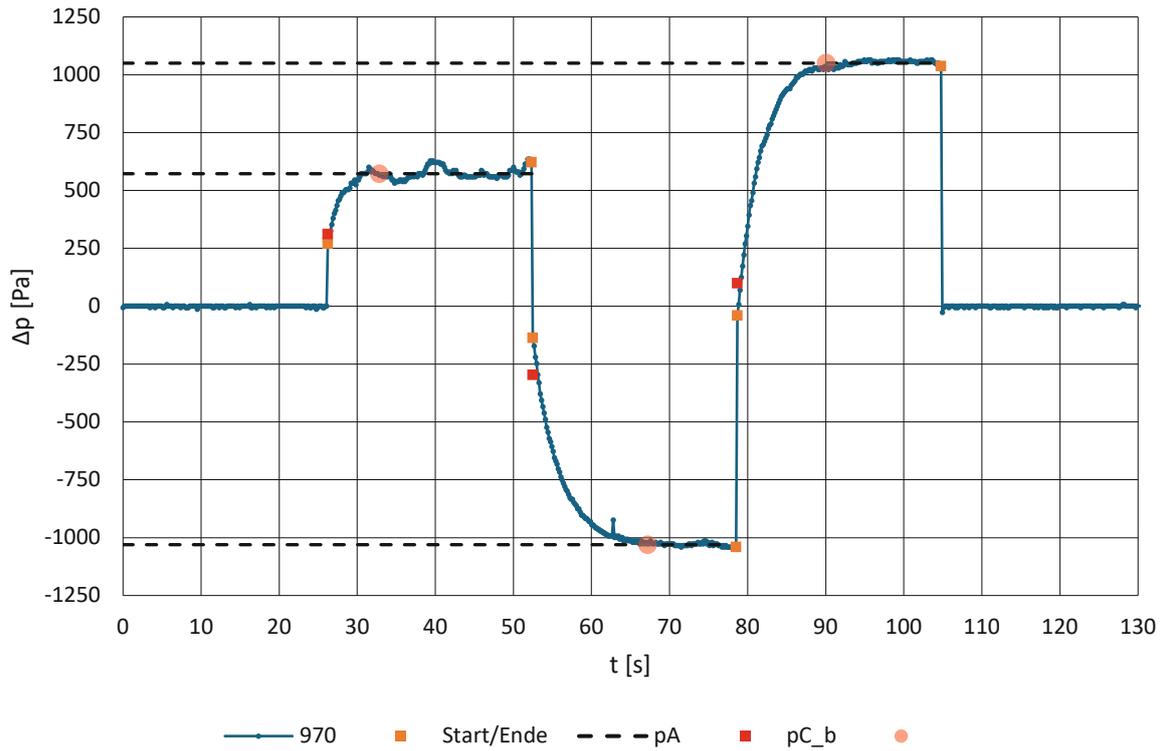


Abbildung 93: AVA 43, Gesamtverlauf bei $l_5 = 970$ mm

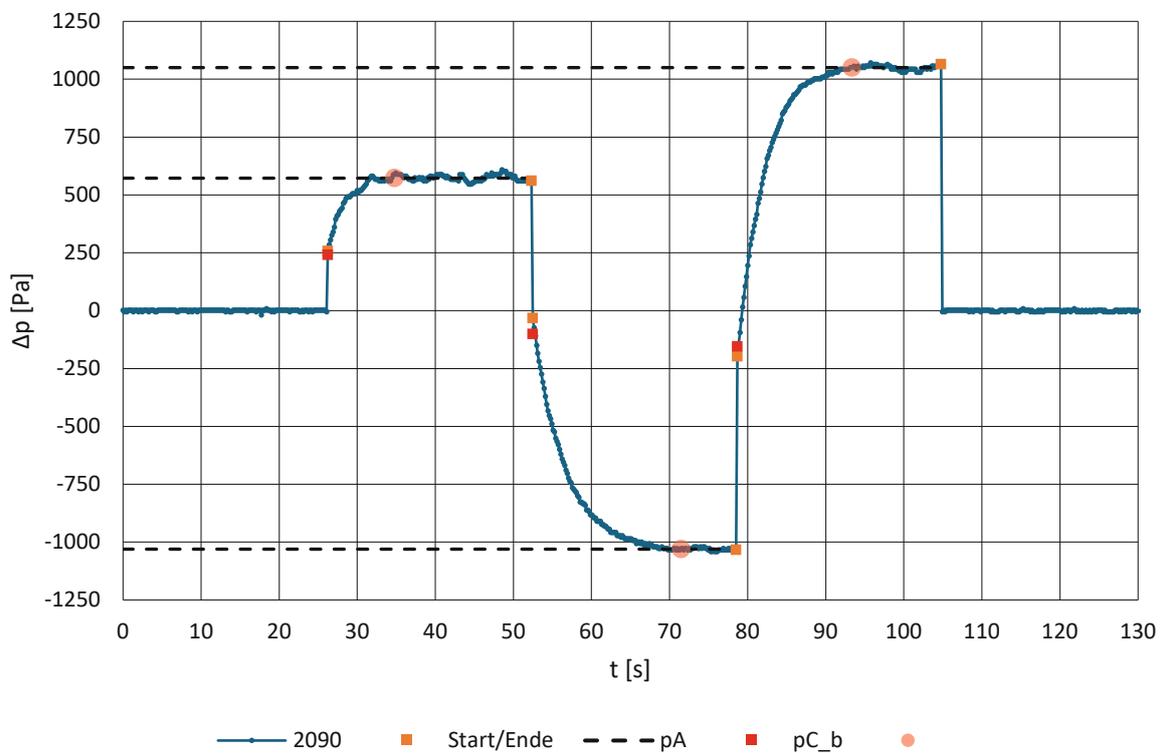


Abbildung 94: AVA 43, Gesamtverlauf bei $l_5 = 2090$ mm

In Tabelle 14 sind die berechneten und gemessenen Ausmischdrücke $p_{c,b}$ und p_c für die AVA 43 Sonde dargestellt. Die minimale absolute Abweichung zwischen $p_{c,b}$ und p_c beträgt 16 Pa, die maximale Abweichung beläuft sich auf 297 Pa und der Durchschnitt der absoluten Abweichungen beträgt 80 Pa.

Tabelle 14: AVA 43, Vergleich der berechneten und gemessenen Ausmischdrücke in Pa

l_5	520		970		2090	
	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c
Bohrung 1	351,5	304,9	310,6	270,4	240,9	256,6
Bohrung 2	-411,8	-240,2	-297,4	-136,7	-102,2	-33,2
Bohrung 3	247,1	56,5	98,5	-198,8	-154,9	-198,8

5.2.4 SVUSS 5

In Abbildung 95 bis 97 sind die Druckverläufe der SVUSS 5 Sonde für die drei Schlauchlängen 520, 970 und 2090 zu sehen. Die 1120 Messpunkte pro Schlauchlänge wurden aus den Messreihen 04012410, 04012411 und 04012412 entnommen. Die Druckdifferenz ist bereits um $\Delta p_s = 97,2$ Pa reduziert. Für die SVUSS 5 Sonde ergeben sich für die Drücke p_A für die fünf Bohrungen folgende Werte:

- $p_{A,1} = 355,8$ Pa
- $p_{A,2} = -1162,4$ Pa
- $p_{A,3} = 122,1$ Pa
- $p_{A,4} = -1000,8$ Pa
- $p_{A,5} = 1062,5$ Pa

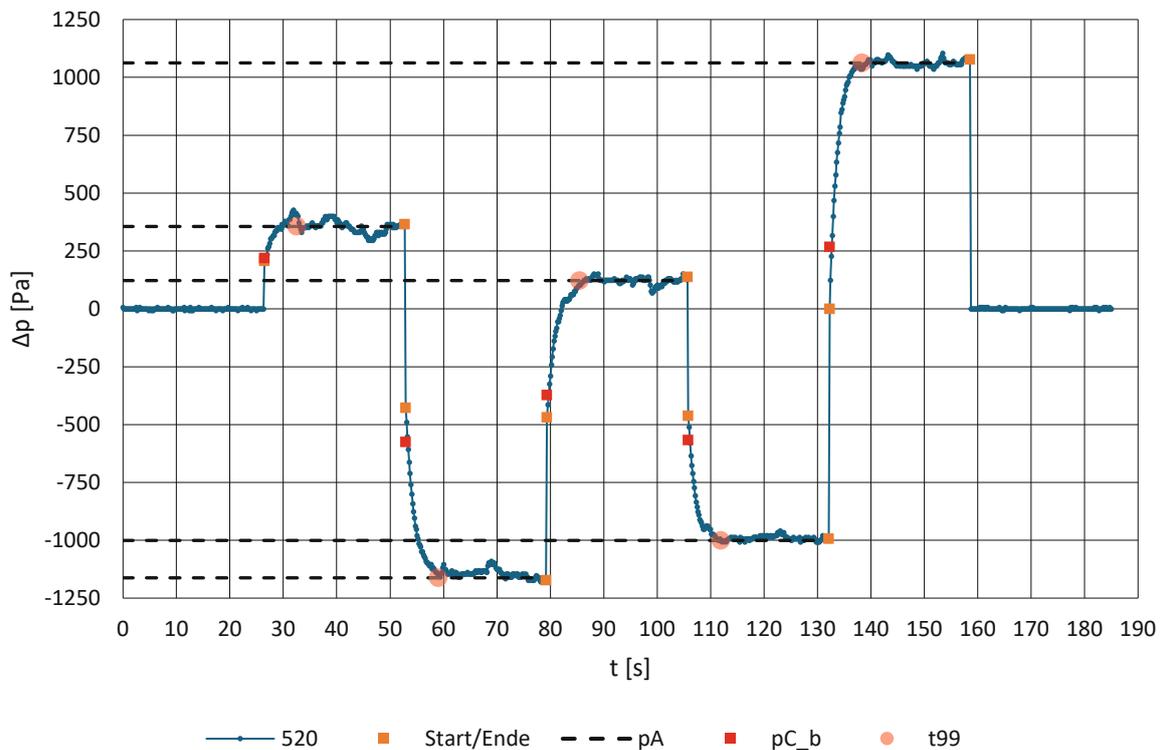


Abbildung 95: SVUSS 5, Gesamtverlauf bei $l_5 = 520$ mm

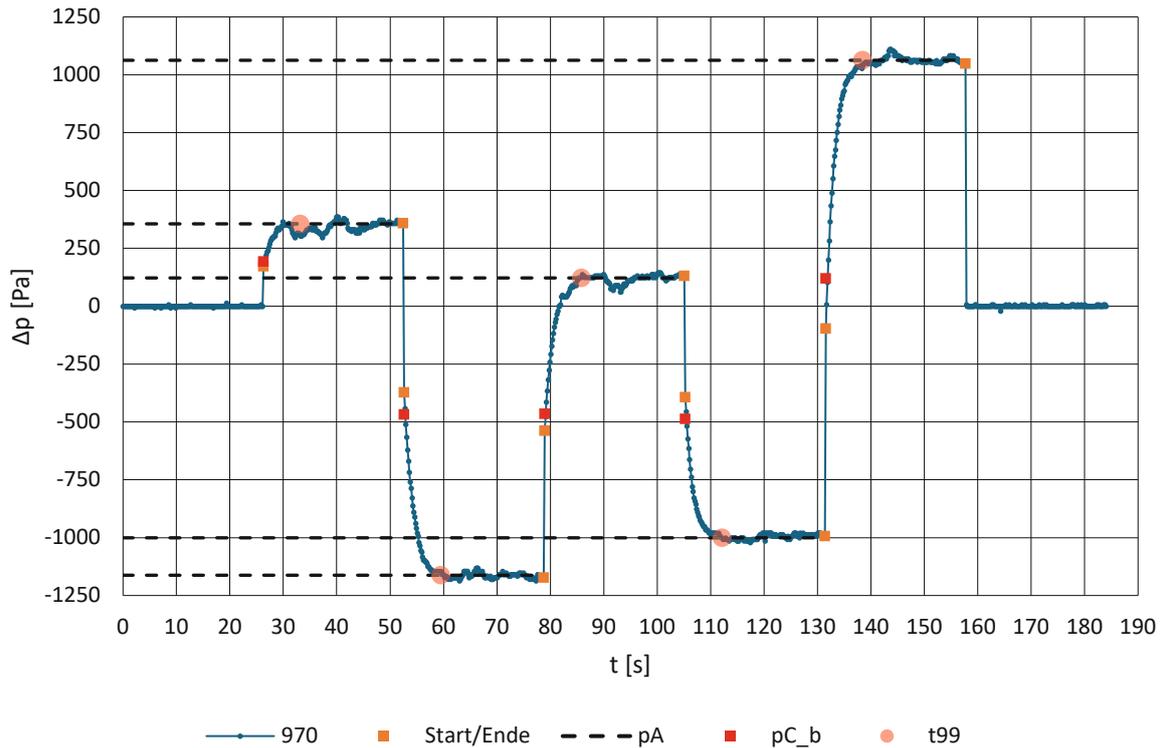


Abbildung 96: SVUSS 5, Gesamtverlauf bei $l_5 = 970$ mm

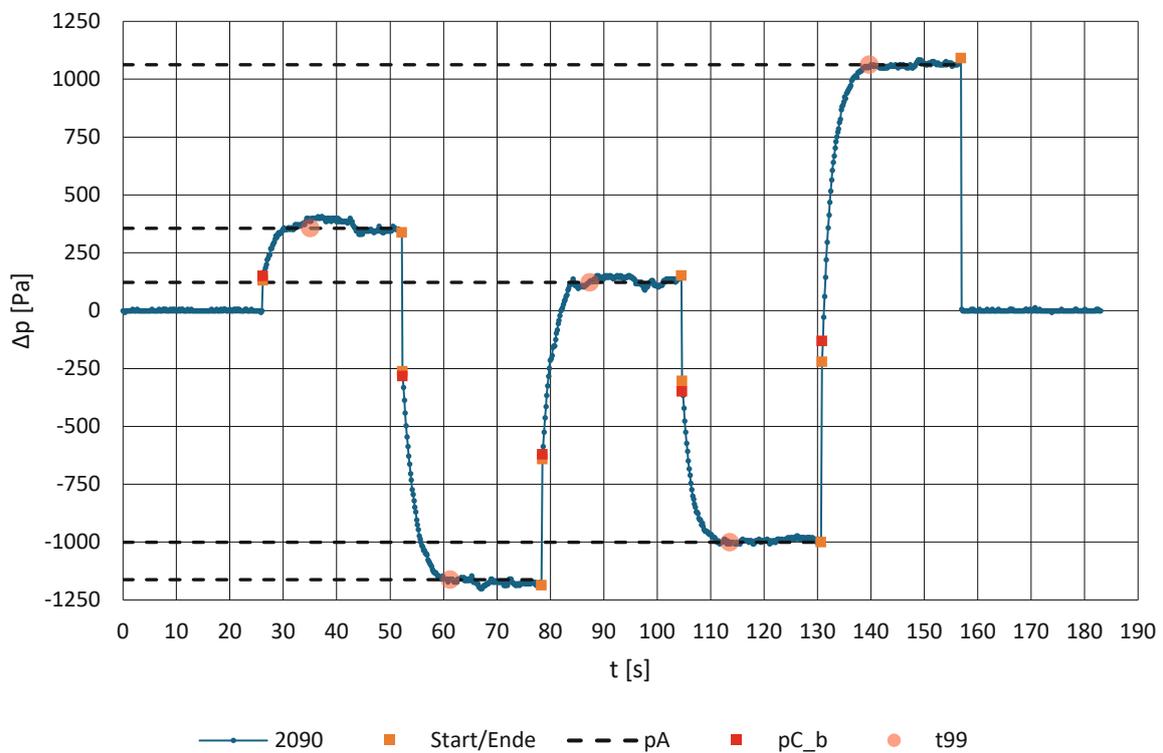


Abbildung 97: SVUSS 5, Gesamtverlauf bei $l_5 = 2090$ mm

Die berechneten und gemessenen Ausmischdrücke $p_{c,b}$ bzw. p_c , für die SVUSS 5 Sonde sind in Tabelle 15 dargestellt. Die minimale absolute Abweichung zwischen $p_{c,b}$ und p_c beträgt 12 Pa, die maximale Abweichung liegt bei 267 Pa und der Mittelwert der absoluten Abweichung beträgt 58 Pa.

Tabelle 15: SVUSS 5, Vergleich der berechneten und gemessenen Ausmischdrücke in Pa

l_5	520		970		2090	
	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c
Bohrung 1	218,5	206,4	193,1	171,9	149,7	130,5
Bohrung 2	-576,4	-428,4	-468,0	-373,2	-283,1	-262,8
Bohrung 3	-373,7	-469,8	-465,4	-642,3	-621,8	-642,3
Bohrung 4	-567,4	-462,9	-487,2	-393,9	-350,5	-304,2
Bohrung 5	266,1	-0,6	118,8	-97,2	-132,5	-221,4

5.2.5 US-DA-125

Die Messdaten der US-DA-125 Sonde sind in Abbildung 98 bis 100 für die drei Schlauchlängen 520, 970 und 2090 dargestellt. Die 1120 Messpunkte je Schlauchlänge stammen aus den Messreihen 22012401, 2201202 und 2201203. Die Druckdifferenz wurde bereits um $\Delta p_s = 97,5$ Pa reduziert. Für die US-DA-125 Sonde ergeben sich für die Drücke p_A an den fünf Bohrungen folgende Werte:

- $p_{A,1} = 885,6$ Pa
- $p_{A,2} = -710,4$ Pa
- $p_{A,3} = 886,9$ Pa
- $p_{A,4} = 504,5$ Pa
- $p_{A,5} = 928,6$ Pa

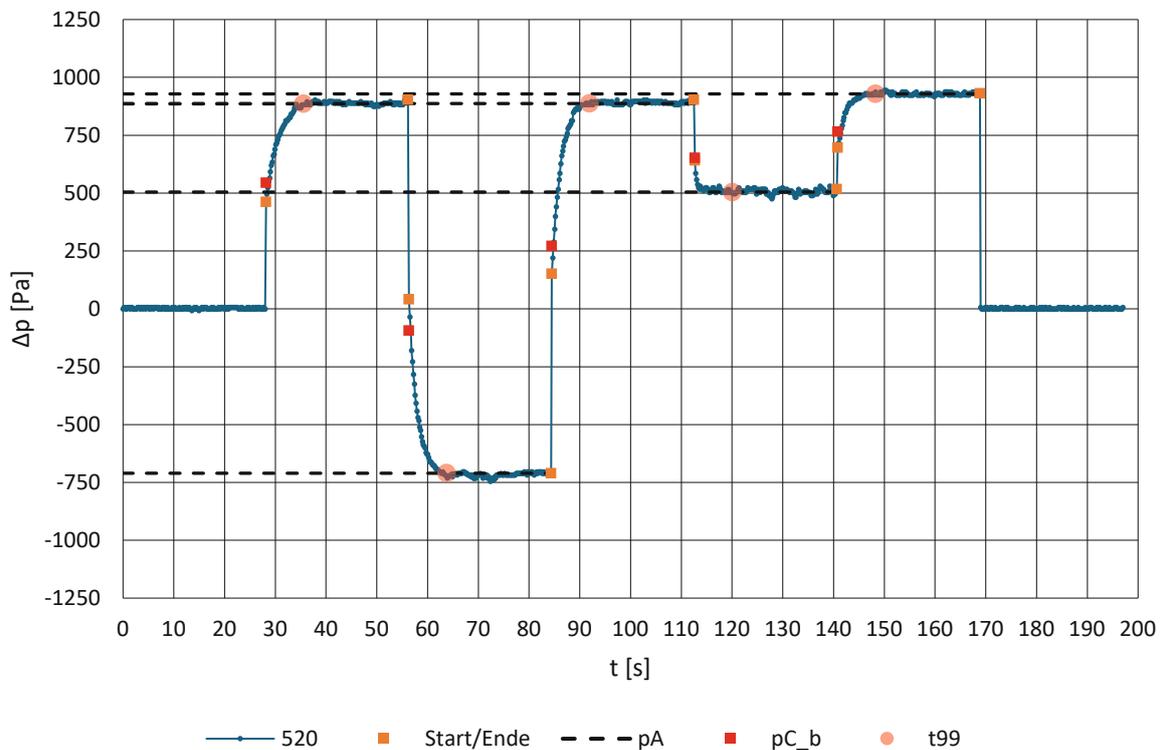


Abbildung 98: US-DA-125, Gesamtverlauf bei $l_s = 520$ mm

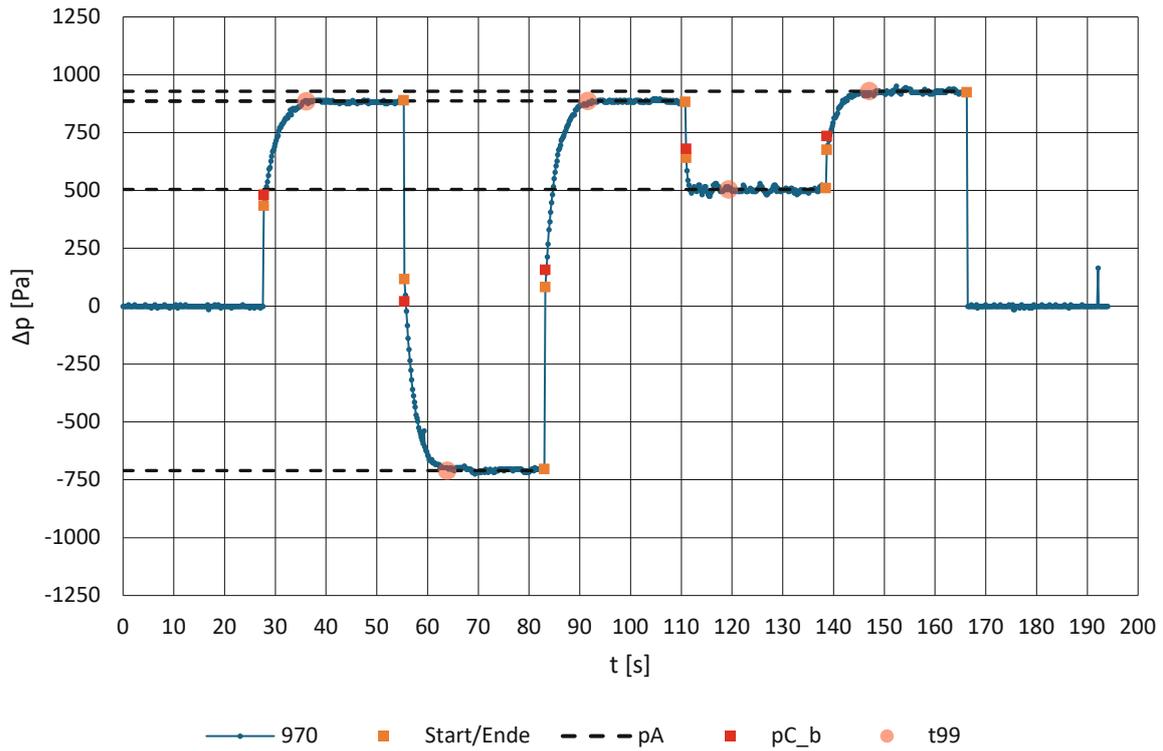


Abbildung 99: US-DA-125, Gesamtverlauf bei $l_5 = 970$ mm

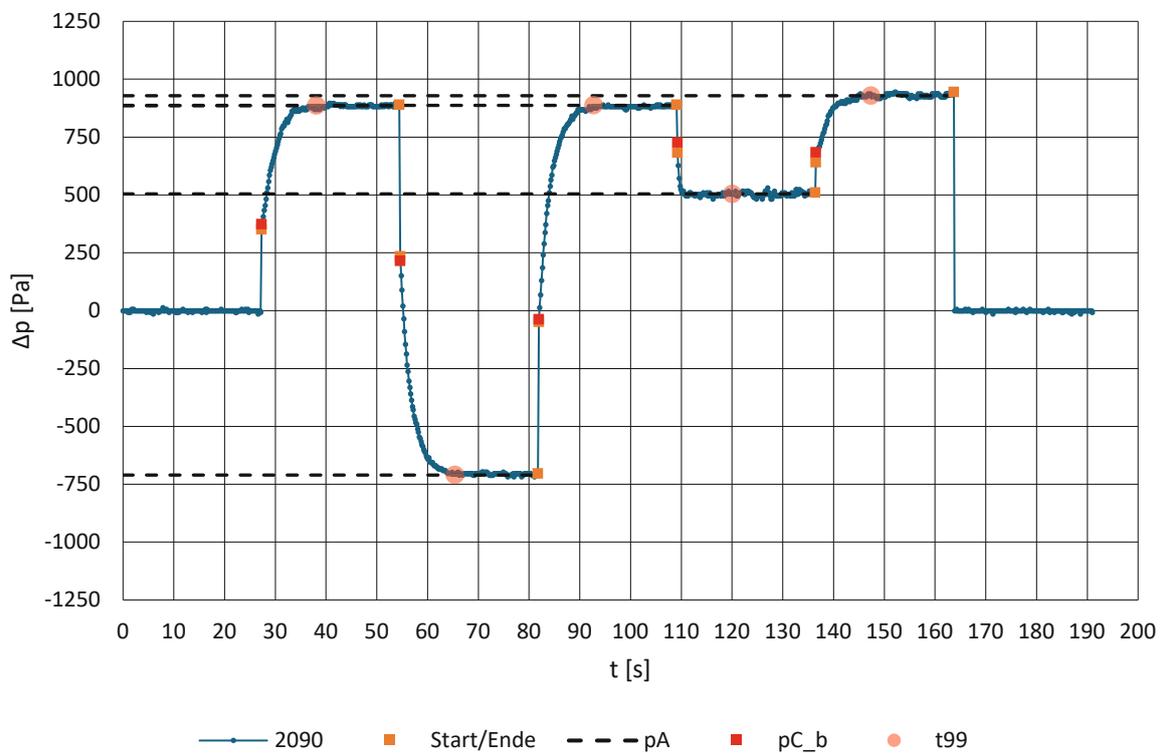


Abbildung 100: US-DA-125, Gesamtverlauf bei $l_5 = 2090$ mm

In Tabelle 16 sind die berechneten und gemessenen Ausmischdrücke $p_{c,b}$ bzw. p_c für die US-DA-125 Sonde aufgeführt. Die minimale absolute Abweichung zwischen $p_{c,b}$ und p_c beträgt 11 Pa während die maximale Abweichung 206 Pa erreicht. Der Mittelwert der absoluten Abweichungen beträgt 41 Pa.

Tabelle 16: US-DA-125, Vergleich der berechneten und gemessenen Ausmischdrücke in Pa

l_5	520		970		2090	
	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c	$p_{c,b}$	p_c
Bohrung 1	543,8	461,4	480,6	433,8	372,7	351,0
Bohrung 2	-94,4	40,5	19,6	116,4	214,0	233,7
Bohrung 3	270,4	150,9	156,4	-49,2	-38,2	-49,2
Bohrung 4	652,1	640,8	679,4	640,8	726,0	682,2
Bohrung 5	764,9	696,0	734,6	675,3	683,0	640,8

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Messung der Zeitkonstanten und der daraus folgenden Bestimmung der Sondenlängen l_1 und l_2 samt Validierung können nun die Geometriedaten aller verwendeten Sonden in den Tabellen 17 bis 21 angegeben werden. Die Aufteilung der Längen erfolgt nach Abbildung 101. Mit den nun bekannten Sondenlängen und dem erweiterten Modell ist es möglich, die 99 % Ausgleichszeit als Funktion der Länge der Druckmessleitung l_5 für die Sonde anzugeben, wobei die Längen l_3 und l_4 als konstant angenommen werden.

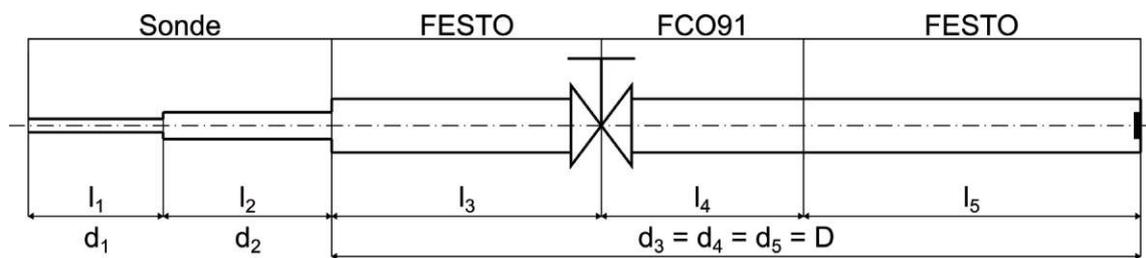


Abbildung 101: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, $D = 4 \text{ mm}$, $l_3 = 2100 \text{ mm}$, $l_4 = 800 \text{ mm}$ und $l_5 = 520, 970, 2090 \text{ mm}$

Tabelle 17: SVUSS 3, Angabe der Sondenlängen und Durchmesser

SVUSS 3					
Bohrung	d_1 [mm]	l_1 [mm]	d_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{ges} [mm]
1	0,5	144	1,0	506	650
2	0,5	144	1,0	506	650
3	0,5	144	1,0	506	650

Tabelle 18: AVA 110, Angabe der Sondenlängen und Durchmesser

AVA 110					
Bohrung	d_1 [mm]	l_1 [mm]	d_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{ges} [mm]
1	0,6	255	2,0	105	360
2	0,6	93	2,0	267	360
3	0,6	93	2,0	267	360

Tabelle 19: AVA 43, Angabe der Sondenlängen und Durchmesser

AVA 43					
Bohrung	d_1 [mm]	l_1 [mm]	d_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{ges} [mm]
1	0,3	32	2,0	268	300
2	0,6	1147	1,0		300
3	0,6	885	1,0		300

Tabelle 20: SVUSS 5, Angabe der Sondenlängen und Durchmesser

SVUSS 5					
Bohrung	d_1 [mm]	l_1 [mm]	d_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{ges} [mm]
1	0,5	232	1,0	418	650
2	0,5	232	1,0	418	650
3	0,5	232	1,0	418	650
4	0,5	232	1,0	418	650
5	0,5	232	1,0	418	650

Tabelle 21: US DA-125, Angabe der Sondenlängen und Durchmesser

US DA-125-24-F-22-C					
Bohrung	d_1 [mm]	l_1 [mm]	d_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{ges} [mm]
1	0,4572	210	1,2	450	660
2	0,4572	210	1,2	450	660
3	0,4572	210	1,2	450	660
4	0,4572	210	1,2	450	660
5	0,4572	210	1,2	450	660

In den Berechnungen und Messungen zeigt sich für die berechnete Länge l_1 eine gewisse Streuung der Werte. Jedoch ist für alle Bohrungen zu sehen, dass mit zunehmender Schlauchlänge l_5 die Zeitkonstante bzw. die Ausgleichszeit größer wird wie von dem Modell vorhergesagt. Weiters besteht eine gewisse Unsicherheit bei der Berechnung der Sondenlängen. So zeigen Brüggemann et al. in [4], dass die Verwendung eines Systems 1. Ordnung zu einer Überschätzung der Ausgleichszeit

führt. Das von Brüggemann et al. verwendete System ist ähnlich dem erweiterten Modell dieser Arbeit. Somit könnte es zu einer Überschätzung der Längen l_1 kommen.

Gründe für die Streuung der Längen bzw. der gemessenen Zeitkonstanten zwischen den Bohrungen könnten auf Fertigungstoleranzen und Verschmutzungen der Kapillarröhrchen zurückzuführen sein. So geben Grimshaw und Taylor in [5] an, dass die Toleranzen für den Innendurchmesser der Kapillarröhrchen laut Hersteller bei $\pm 15\%$ liegen. Die Ausgleichszeit der Sonde ist sehr sensitiv auf den Innendurchmesser der Kapillarröhrchen, da dieser mit der vierten Potenz in die Berechnung eingeht. Auch sind die Sonden schon zwischen 30 und 50 Jahre im Einsatz, was zu Ablagerungen in den Kapillarröhrchen führen kann. Diese Ablagerungen können teilweise sogar zu Blockaden führen, wodurch der Strömungswiderstand in der Leitung signifikant erhöht wird. Insgesamt wirken sich die Ablagerungen ähnlich wie die Fertigungstoleranzen auf die Messgenauigkeit aus.

Auch ist die Annahme einer isothermen Zustandsänderung im Plenum mit einer gewissen Unsicherheit verbunden, da reale Prozesse oft von idealisierten Annahmen abweichen und Temperaturgradienten innerhalb des Plenums nicht vollständig ausgeschlossen werden können. So nehmen Lilley und Morton [1] sowie Bynum et al. [12] für das generische Modell eine isotherme Zustandsänderung an, wobei die Trennung zwischen Plenum und Widerstand dort eindeutig definiert ist. Bei dem erweiterten Modell dieser Arbeit ist die Trennung zwischen dem Widerstand und dem Plenum nicht so eindeutig bzw. nicht vorhanden.

Eine weitere Unsicherheit für die Berechnung der Ausgleichszeit und der Messung der Zeitkonstante der Sonden stellt die Schwankung des an der Bohrung anliegenden Druck p_A dar. Wenn es hier zu starken Schwankungen wie bei der Bohrung 4 der US-DA-125 Sonde, der Bohrung 1 der AVA 43 oder bei der Bohrung 1 der SVUSS 5 Sonde kommt, kann die Zeitkonstante nur schwer bestimmt werden.

Ein weiteres Problem bei der Messung der Zeitkonstante ist die Abweichung des Druckes p_A nach Erreichen der 99 % Ausgleichszeit zwischen den verschiedenen Längen l_5 . Da am Versuchsaufbau sowie bei der Orientierung der Sonde zwischen den verschiedenen Messreihen, abgesehen von der Länge l_5 keine Änderungen vorgenommen wurden, sollte sich für die jeweiligen Bohrungen derselbe Druck p_A einstellen. So ist beispielsweise bei der SVUSS 3 Sonde für die Länge 970 bei Bohrung 1 und bei der SVUSS 5 Sonde für die Länge 520 bei Bohrung 2 zu erkennen, dass der gemessene Druck unter dem Mittelwert liegt. Dies führt zu einer Überschätzung der gemessenen Zeitkonstante.

Trotz dieser Unsicherheiten kann durch den Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen des erweiterten Modells eine gute Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen und den berechneten Ausgleichszeiten gezeigt werden. Auch lässt sich

das Ausgleichsverhalten der Sonden mit dem erweiterten Modell sehr gut beschreiben. Weiters zeigt sich für alle Sonden mit Ausnahmen der Bohrung 2 und 3 der AVA 43 Sonde ein sinnvolles Ergebnis für die Sondenlängen l_1 und l_2 .

Für die AVA 43 Sonde ergeben sich für die Bohrungen 2 und 3 für die Länge l_1 größere Werte als die der Gesamtlänge l_{ges} der Sonde. Für die Berechnung der Ausgleichszeit wurden deshalb die Länge l_2 und der Durchmesser d_2 vernachlässigt um dennoch eine Aussage über das Ausgleichsverhalten treffen zu können. Bei der AVA 43 Sonde zeigt sich, dass die größeren Durchmesser der Bohrung 2 und 3 nicht zu einer Verringerung der Ausgleichszeit im Vergleich zu Bohrung 1 führen. Gründe könnten hier eine weitere Änderung des Durchmessers in der Sonde, eine starke Verschmutzung der Bohrungen oder große Fertigungstoleranzen der Kapillarröhrchen sein.

Es konnte auch gezeigt werden, dass mit dem erweiterten Modell die Ausgleichszeit unabhängig vom Druck p_A , der an der jeweiligen Bohrung der Sonde wirkt, berechnet werden kann. Da dieser Druck in der Regel unbekannt ist und sich je nach Position und Orientierung (Gier- und Nickwinkel) der Sonde ändert, kann das als ein bedeutender Vorteil des Modells angesehen werden.

Durch den Vergleich der berechneten Ausmischdrücke $p_{c,b}$ mit den gemessenen Ausmischdrücken p_c kann gezeigt werden, dass die Annahme einer Länge l_4 von 800 mm, die das Volumen des FCO 91 in Bezug auf den Querschnitt der Fest-Druckluftschläuche darstellt, gerechtfertigt ist. Nach dem Modell sollten die berechneten Ausmischdrücke identisch mit den gemessenen Ausmischdrücken sein. Es zeigt sich jedoch eine gewisse Abweichung in den Werten, wobei ein klarer Trend erkennbar ist: kleine Längen l_5 führen zu einem Ausmischdruck, der näher an p_A liegt als große Längen l_5 . Außerdem ist zu sehen, dass die Ausmischung sehr schnell abläuft. Um hier genauere Aussagen treffen zu können, müsste die Abtastrate des Versuchsaufbaus erhöht werden.

In Abbildung 102 ist die 99 % Ausgleichszeit t_{99} für alle fünf Sonden als Funktion der Länge l_5 dargestellt. Für die Sonden AVA 110 und AVA 43 wurden die Bohrungen 1 und 2 gewählt, da diese die höchste Ausgleichszeit aufweisen. Diese Darstellung ermöglicht es, schnell auf die benötigte Zeit für die Messung zu schließen, wenn die Druckmessleitung l_5 bekannt ist. Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 103 alle Bohrungen der AVA 110 und der AVA 43 Sonde dargestellt. Für die Stoffdaten wurden eine Umgebungstemperatur T_u von 20 °C und ein Umgebungsdruck p_U von 1 bar angenommen, da dies typische Werte für den Einsatz der Sonden sind.

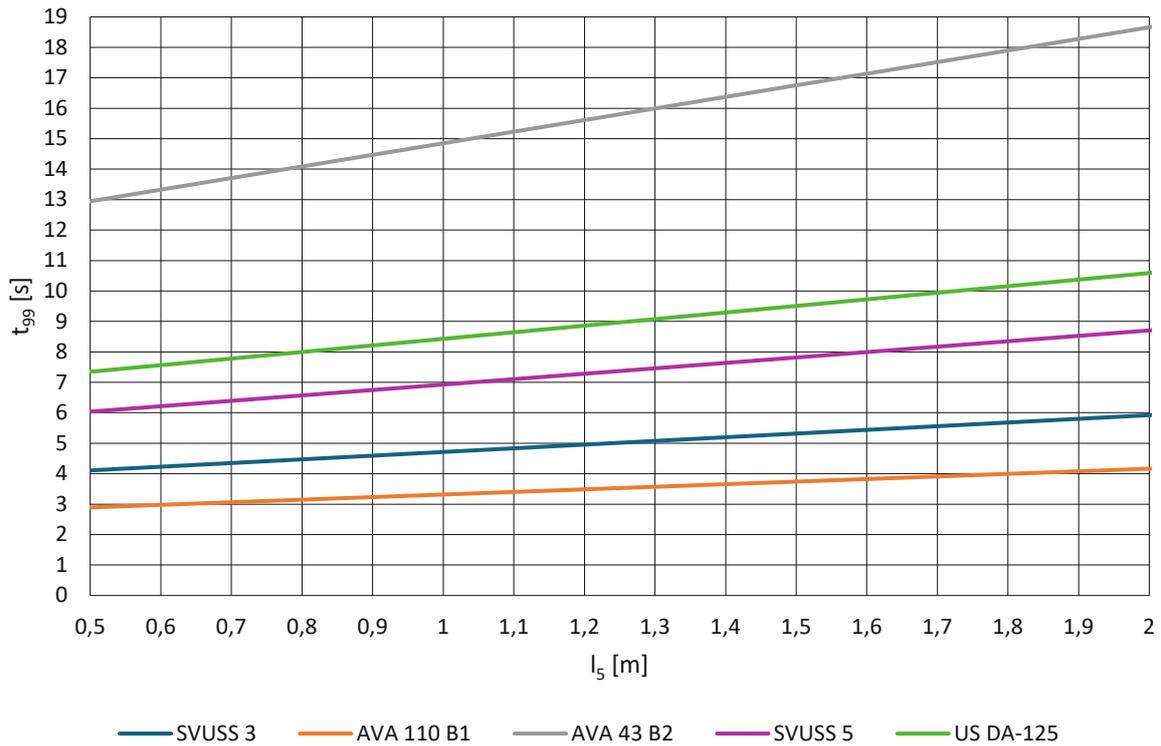


Abbildung 102: t_{99} als Funktion der Druckmessleitung l_5 , mit $l_3 = 2,1$ m, $l_4 = 0,8$ m, $v = 153,2 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ und $\alpha = 343,4 \frac{m}{s}$

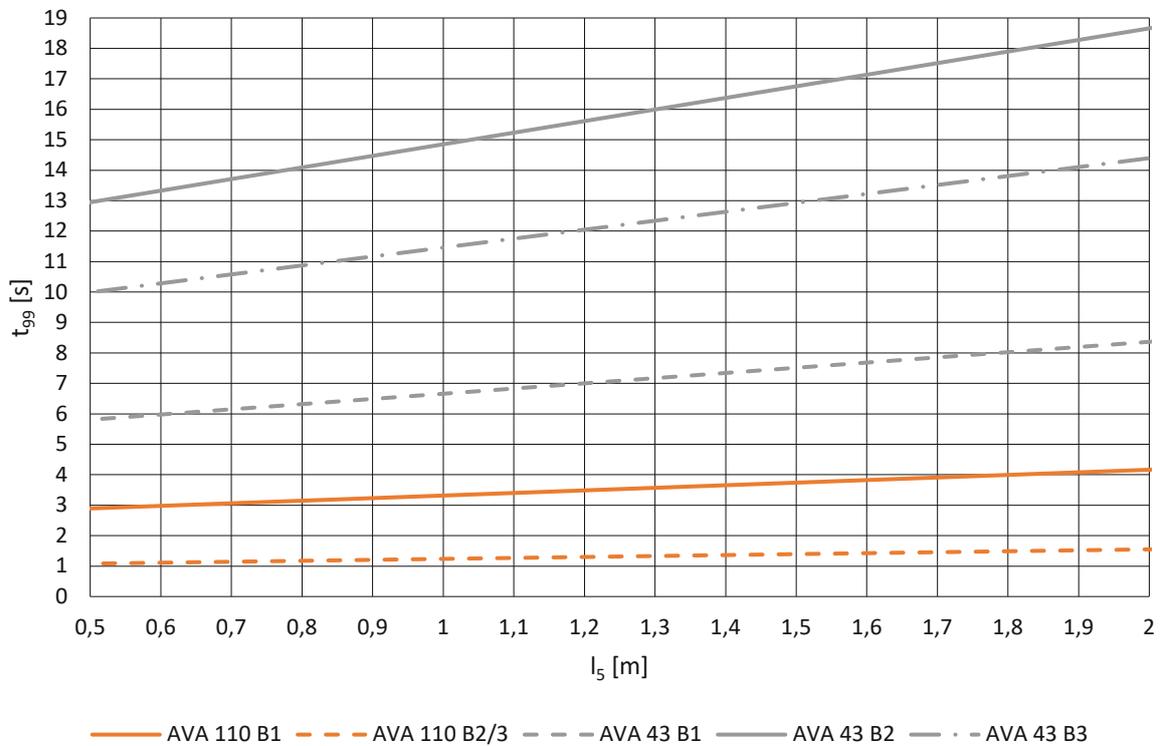


Abbildung 103: t_{99} als Funktion der Druckmessleitung l_5 für die AVA Sonden, mit $l_3 = 2,1$ m, $l_4 = 0,8$ m, $v = 153,2 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ und $\alpha = 343,4 \frac{m}{s}$

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte eindeutig gezeigt werden, dass das Ausgleichsverhalten von pneumatischen Drei- und Fünflochsonden mithilfe eines analytischen Modells 1. Ordnung erfolgreich beschrieben werden kann. Dabei wurden die Einflüsse des Drucksensors, der Druckmessleitung und die Bauart der Sonde, in Hinblick auf die Ausgleichszeit systematisch untersucht.

Zu Beginn der Arbeit wurde aufgezeigt, wie das generische Modell zur Berechnung von Ausgleichszeiten erweitert werden kann um es für das vorliegende Druckmesssystem anzuwenden. Da die Längen l_1 und l_2 der Sonden unbekannt sind, wurden diese aus den Messdaten über die Messung der Zeitkonstante ermittelt. Mit den so bestimmten mittleren Sondenlängen kann eine weitere Zeitkonstante berechnet werden, die es ermöglicht, die Ausgleichszeit als Funktion der Länge der Druckmessleitung l_5 und ohne Kenntnis des an der Bohrung anliegenden Druckes p_A zu berechnen.

Der Ausmischdruck p_c , welcher sich sehr rasch nach dem Öffnen des Ventiles des FCO 91 einstellt, wurde ebenfalls untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der resultierende Druck abhängig von den Volumina der Druckmessleitungen (l_3, l_4, l_5) sowie von den beiden Drücken p_A und p_B ist, wobei das Volumen der Sonde vernachlässigbar ist. Der Druck p_B entspricht dem Druck p_A der vorhergehenden Bohrung.

Die Untersuchung wurde an drei Dreilochsonden und an zwei Fünflochsonden durchgeführt und bei jeder Sonde wurden alle drei bzw. fünf Bohrungen auf ihr Ausgleichsverhalten untersucht. Der Druckverlauf über die Zeit wurde mit einer Abtastrate von ca. 6 Hz aufgezeichnet. Die Sonden unterscheiden sich sowohl am Eintrittsdurchmesser d_1 , am Austrittsdurchmesser d_2 , an ihrer Gesamtlänge l_{ges} und an der Form des Sondenkopfes.

Die Messung wurde am Freistrahwindkanal des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik der TU Wien durchgeführt. Für jede Sonde wurden drei Messreihen aufgezeichnet bei denen die Schlauchlänge l_5 in folgenden Schritten variiert wurde: 520 mm, 970 mm und 2090 mm.

Durch eine ausführliche grafische Darstellung und den Vergleich experimenteller Daten mit berechneten Werten wurde gezeigt, dass die Druckverläufe der Messung gut mit dem verwendeten erweiterten Modell übereinstimmen. Ausnahmen sind die Bohrungen 2 und 3 der AVA Nr. 110 Sonde. Die durch das erweiterte Modell bestimmte Ausgleichszeit, die auf der berechneten Sondenlänge und der daraus resultierenden Zeitkonstante basiert, kann als Anhaltspunkt für die Messdauer zukünftiger Messungen herangezogen werden, ohne die Kenntnis des am Sondenkopf

anliegenden Drucks p_A . Die genaue Kenntnis der Ausgleichszeiten der Sonden ermöglicht es die benötigte Zeit für weitere Messungen auf ein Minimum zu reduzieren.

Einige Ideen für mögliche weiterführende Arbeiten sind:

Anwendung auf Sonden mit bekannter Geometrie: Durch die Anwendung des erweiterten Modells auf Sonden mit bekannter Geometrie könnte die Güte der berechneten Ausgleichszeiten bewertet werden. Dies würde es ermöglichen, die Abweichungen der berechneten Sondenlänge von der gemessenen Zeitkonstante zu quantifizieren und damit die Genauigkeit des Modells weiter zu verbessern.

Erhöhung der Abtastrate: Eine Untersuchung der Ausmischdrücke p_c durch eine höhere Abtastrate und Variation der Schlauchlänge l_3 könnte interessante Erkenntnisse liefern. Laut dem erweiterten Modell führt eine Erhöhung der Länge l_3 zu einer Erhöhung des Ausmischdrucks p_c , jedoch sollte sich durch das zusätzliche Volumen auch die Ausgleichszeit erhöhen.

Einfluss von Drucksprüngen: Der Einfluss von negativen bzw. positiven Drucksprüngen auf das Ausgleichsverhalten könnte untersucht werden. Hierfür könnten die Messungen mit anderen Gier- und Nickwinkeln wiederholt werden. So könnte gezeigt werden, ob und wie stark sich die Richtung, in welcher die Sonde durchströmt wird, auf das Ausgleichsverhalten auswirkt.

Berücksichtigung von Druckverlusten: es könnte interessant sein, Druckverluste in die Berechnung miteinzubeziehen, da in der Sonde plötzliche Querschnittserweiterungen und -reduzierungen (abhängig von der Strömungsrichtung) auftreten. Zudem könnten auch Druckverluste am Eintritt und durch die starke Umlenkung im FCO 91 berücksichtigt werden.

Modellierung mit einem schwingungsfähigen Modell 2. Ordnung: Da bei einigen Messdaten periodische Schwingungen sowohl im Anstieg als auch nach Erreichen der 99 % Ausgleichszeit beobachtet wurden, könnte ein schwingungsfähiges gedämpftes Modell 2. Ordnung angewendet werden, um diese Phänomene besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- [1] Lilley G. M., Morton D.: *The response time of wind tunnel pressure measuring systems*, Aero. Res. Counc., Report NO. 141, 1960.
- [2] Xie H. D., Geldart D.: *The response time of pressure probes*, Powder Technol., Bd. 90, Nr. 2, S. 149–151, 1997.
- [3] Wuest W.: *Strömungsmesstechnik*, Vieweg & Teubner-Verlag, 1969.
- [4] Brüggemann C., Hobel S., Schatz M., Vogt D. M.: *On the impact of tube dimensions of pneumatic probes on the response time*, XXIII Biannual Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery, Stuttgart, Germany, 2016.
- [5] Grimshaw S. D., Taylor J. V.: *Fast settling millimetre-scale five-hole probes*, ASME paper GT2016-56628, 2016.
- [6] Lerena Diaz D.: *Experimental Calibration of Three-Hole Pressure Probes with Different Head Geometries*, Diplomarbeit, TU Wien, September 2003.
- [7] Chondrokostas C.: *Calibration of Pneumatic Five-Hole Probes in the Free-Jet Wind Tunnel*, Diplomarbeit, TU Wien, Dezember 2005.
- [8] Industriesteuerungen GmbH: *TECHMARK US Katalog: Probes for Measuring Temperature, Pressure, and Flow Direction of Fluids*, München.
- [9] Institut für Energietechnik und Thermodynamik: *Freistrahwindkanal Dokumentation*, TU Wien, 2023.
- [10] Furness Controls Limited: *Instruction Manual FC091 selection Box*, England, 1995.
- [11] Honeywell: *Drucksensoren - Luftstrom-, Temperatur und Füllstandsensoren*, Katalog E15, Ausgabe 2, Brüssel, 1994/95.
- [12] Bynum D. S., Ledford R. L., Smotherman W. E.: *Wind tunnel pressure measuring techniques*, AGARDograph rept., Paris, 1970.