

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

Anwendung der Schallemissionsanalyse bei Tunnelbrandprüfungen an Beton

Ronald Richter

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Große
2. Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt
3. Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Die Dissertation wurde am 20.05.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 28.10.2019 angenommen.

FÜR

HERRN BERTHOLD EHEHALT SENIOR

FREIER ARCHITEKT

MEINEM OPA

ERKLÄRUNG:

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbst verfasst und mich dabei keiner anderen als der von mir angegebenen Quellen bedient habe. Weiterhin erkläre ich, dass ich an keiner anderen Stelle ein Prüfungsverfahren beantragt habe bzw. die Dissertation in dieser oder anderen Form bereits anderweitig als Prüfungsarbeit verwendet oder einer anderen Fakultät als Dissertation vorgelegt habe.

Datum, Ronald Richter

INHALTSVERZEICHNIS

1	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	8
2	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	10
3	GRUNDLAGEN.....	14
3.1	GRUNDLAGEN DER SCHALLEMISSIONSANALYSE (SEA).....	14
3.1.1	<i>Prinzip der SEA.....</i>	14
3.1.2	<i>SEA an Beton.....</i>	15
3.1.3	<i>Messkette und eingesetzte Schallemissionsmesstechnik.....</i>	16
3.1.4	<i>Möglichkeiten der Messgeräteeinstellung.....</i>	25
3.1.5	<i>Parameterbasierte und signalbasierte Auswertung.....</i>	27
3.1.6	<i>Lokalisierung.....</i>	28
3.2	BRANDVERHALTEN VON BETON.....	33
3.2.1	<i>Änderung der mechanischen Eigenschaften.....</i>	33
3.2.2	<i>Abplatzverhalten von Beton.....</i>	33
3.2.3	<i>Schutzwirkung von Polypropylen-Fasern.....</i>	35
3.2.4	<i>Brandprüfung von Tunnelbeton.....</i>	37
3.2.5	<i>Brandkurven.....</i>	38
3.3	EINSATZ ZERSTÖRUNGSFREIER PRÜFVERFAHREN FÜR DIE BRANDPRÜFUNG.....	40
4	VERSUCHSPROGRAMM.....	46
4.1	HERANGEHENSWEISE UND ENTWICKLUNG DES VERSUCHSPROGRAMMES.....	46
4.2	BETONREZEPTUREN.....	48
4.3	DATENSÄTZE UND MESSGERÄTEEINSTELLUNGEN.....	49
5	BRANDPRÜFÖFEN UND VERSUCHSAUFBAU.....	51
5.1	EXPERIMENTE Q-ETK-130-0PP UND Q-ETK-120-1PP.....	51
5.2	EXPERIMENTE Q-ZTV-90-0PP UND Q-ZTV-80-1PP.....	52
5.3	EXPERIMENTE QK-RWS-70-2PP UND QK-RWS-70-1,5PP.....	54
5.4	EXPERIMENTE Q-ZTV-75-2PP-US.....	55
5.5	EXPERIMENTE AN PLATTEN (P).....	56
5.6	EXPERIMENT AM BRÜCKENBRANDPRÜFSTAND (B-REAL).....	58
6	ADAPTION DER SCHALLEMISSIONSANALYSE.....	60
6.1	TESTKÖRPERHERSTELLUNG UND DETAILS DER MESSTECHNIKADAPTION.....	60
6.2	SENSORANORDNUNG.....	64
6.3	SENSORANKOPPLUNG.....	67
7	DATENERFASSUNG MIT KONVENTIONELLEN VERFAHREN.....	69
7.1	TEMPERATURMESSUNGEN.....	69
7.2	VISUELLE INSPEKTION.....	75

8	PARAMETERBASIERTE AUSWERTUNG VON SCHALLEMISSIONSSIGNALEN	83
8.1	GRÖÖE DER DATENSÄTZE UND ANZAHL AUFGEZEICHNETER EREIGNISSE.....	83
8.2	SIGNALBETRACHTUNG, MUSTERERKENNUNG UND SIGNALQUALITÄT.....	85
8.3	SCHALLEMISSIONSAKTIVITÄT	89
8.4	SIGNALENERGIE	94
8.4.1	<i>Zeitlicher Verlauf der Signalenergie.....</i>	<i>94</i>
8.4.2	<i>Unterscheidung von Abplatzungen und Rissbildung.....</i>	<i>96</i>
8.4.3	<i>Temperaturabhängigkeit der Signalenergie.....</i>	<i>100</i>
9	LOKALISIERUNG UNTER ANNAHME EINER HOMOGENEN SCHALLGESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG	102
9.1	LOKALISIERUNG EINZELNER ABPLATZUNGEN	102
9.2	LOKALISIERUNG VON SCHALLEMISSIONSEREIGNISSEN AUS BRANDVERSUCHEN	106
9.3	LOKALISIERUNG MIT EINER AUSWAHL NACH DER LOKALISIERUNGSGENAUIGKEIT	108
9.4	LOKALISIERUNG AM BRÜCKENBRANDPRÜFSTAND MIT EINER ERFASSUNG DES ZEITLICHEN VERLAUFS DER ABPLATZUNGEN	111
10	LOKALISIERUNG MIT GESCHWINDIGKEITSMODELLEN	115
10.1	ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG	115
10.2	LOKALISIERUNG AN KONSTRUKTIONSVOLLHOLZ MIT DER GRID-SEARCH-METHODE ..	116
10.3	LOKALISIERUNG MIT EINEM EINFACHEN GESCHWINDIGKEITSMODELL FÜR BRANDBEANSPRUCHTEN BETON	119
11	GRENZEN DER LOKALISIERUNG BEI BRANDVERSUCHEN	121
11.1	GEOMETRIE DER TESTKÖRPER UND SENSORANORDNUNG	121
11.2	ZEITLICHE VERSCHLECHTERUNG DER LOKALISIERUNGSGENAUIGKEIT	123
11.3	INHOMOGENE UND VERÄNDERLICHE SCHALLGESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG	124
11.3.1	<i>Ultraschallgeschwindigkeit der Testkörper nach den Experimenten</i>	<i>124</i>
11.3.2	<i>Zeitlicher Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit während der Experimente</i>	<i>126</i>
11.3.3	<i>Temperaturabhängige Ultraschallgeschwindigkeitsentwicklung</i>	<i>128</i>
11.4	UNTERSUCHUNGEN MIT EINBETONIERTEN ULTRASCHALLQUELLEN	130
11.4.1	<i>Versuchsaufbau</i>	<i>130</i>
11.4.2	<i>Parameterbasierte Auswertung</i>	<i>132</i>
11.4.3	<i>Lokalisierung</i>	<i>134</i>
12	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	136
13	LITERATURVERZEICHNIS	139
14	ANHANG	152

1 Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog/ Digital
AIC	Akaike Information Criterion
BNC	Bayonet Neil Concelman (Steckverbindung für geschirmte Messkabel)
B-Real	Realbrandversuch am Brückenbrandprüfstand
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102
FFT	Fast-Fourier-Transformation
HC+K	Hydrocarbonkurve mit Abkühlphase
HP-Filter	Highpassfilter
IE	Impakt-Echo
LP-Filter	Lowpassfilter
MSt.	Messstelle
NDT	Nondestructive Testing (Deutsch siehe ZfP)
MW	Mittelwert
P	Plattenförmiger Testkörper
PP	Polypropylen
P-Welle	Kompressionswelle
Q	Quaderförmiger Testkörper
Qk	Kleinerer quaderförmiger Testkörper mit geringerer Dicke
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RWS	Rijkswaterstaat-Kurve
S-Welle	Scherwelle
SEA	Schallemissionsanalyse
SE	Schallemission

S/N	Signal zu Rausch (Noise)-Verhältnis
TUM	Technische Universität München
US	Ultraschall
w/z-Wert	Wasser-zu-Zement-Wert
ZTV-ING	Brandkurve nach den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5: Tunnelbau.
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

2 Einleitung und Problemstellung

Im Bereich des Bauingenieur- und Maschinenbauwesens versteht sich die Zerstörungsfreie Prüfung als interdisziplinäres Fachgebiet zwischen der Messtechnik und den jeweiligen Anwendungsbereichen. Sie soll als Werkzeug an den Stellen unterstützen, an denen eine zerstörende Prüfung des Werkstoffes oder des Bauteiles vermieden werden sollte. In der Medizin ist eine solche Notwendigkeit für jeden schnell nachvollziehbar und wird beispielsweise durch Röntgen, MRT, CT und Ultraschall standardmäßig angewandt. Aber auch im Bauingenieur- und Maschinenbauwesen gibt es viele Anwendungen. Dies ist beispielsweise wichtig, wenn man Bauteile während ihres Betriebes prüft oder sie zu wertvoll für eine zerstörende Prüfung sind. Darüber hinaus kann ein Bauteil zu verschiedenen Zeitpunkten in Belastungszyklen zerstörungsfrei geprüft werden, um eine zeitliche Information über die Schädigungen zu erhalten.

In der Zerstörungsfreien Prüfung werden verschiedene Messtechniken und deren Möglichkeiten entwickelt und erforscht. Durch die Anwendung einzelner Prüftechniken auf viele verschiedene Fragestellungen aus unterschiedlichen Fachgebieten werden die Prüftechniken stetig weiterentwickelt und verfeinert. Es entsteht ein großer Erfahrungsschatz im Umgang mit den einzelnen Messgeräten. Darüber hinaus bietet die Zerstörungsfreie Prüfung die Möglichkeit, durch eine Kombination verschiedener Prüfmethoden eine Messaufgabe von unterschiedlichen Blickwinkeln anzugehen. Dies ist auch notwendig, da eine einzelne Messmethode nur in den seltensten Fällen eine direkt auf die Fragestellung passende Antwort liefert und Fehl- oder Überinterpretationen schnell möglich sind.

Die grundsätzliche Vorgehensweise in der Zerstörungsfreien Prüfung besteht darin, spezielle Anwendungen und neue Fragestellungen zunächst auf die generelle Prüfbarkeit mit Zerstörungsfreien Prüfmethoden zu untersuchen. Ergänzend können Methoden der ZfP-Simulation angewendet werden. Hiernach ist eine auf die Fragestellung passende Messmethode festzulegen und diese dann an die Messaufgabe anzupassen. Nach erfolgreicher Messung sind die Daten dann gezielt auszuwerten. Erst dann kann die Frage endgültig geklärt werden, ob und in welchen Grenzen die ausgewählte Messtechnik für die jeweilige Fragestellung geeignet ist. Hilfreich ist grundsätzlich der Vergleich mehrerer Messmethoden und eine Gegenüberstellung mit anderen Ergebnissen. Hierzu zählen Beobachtungen während des Versuchsverlauf, klassische Messmethoden, der Zustand der Testkörper oder Bauteile zu Versuchsende, begleitende zerstörungsfreie Prüfungen und der Vergleich mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen.

Eine solche Vorgehensweise wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Tunnelbrandprüfung von hochfesten Betonen angewandt. Die Signifikanz der Fragestellung lässt sich zunächst auf die in den letzten Jahren gestiegene Bedeutung des vorbeugenden Brandschutzes für Tunnel und Brücken zurückführen. Tunnelbrände kommen in Folge von Unfällen regelmäßig vor. Deren Auswirkungen werden aber durch die bestehende bauliche Infrastruktur und das schnelle Eingreifen von Rettungsmannschaften in den meisten Fällen im Rahmen gehalten. Dennoch gab es in den letzten Jahrzehnten mehrere große Brandkatastrophen, die in Tab. 2-1 aufgeführt sind.

Tab. 2-1: Tunnelbrände größeren Ausmaßes in Europa [Walter 1999, SZ2010 und Kusterle 2004]:

Jahr	Tunnel	Länge	Schadensereignis	Personenschäden
1995	Pfändertunnel (A)	6.719 m	Massenkollision mit folgendem Brand	3 Tote 4 Verletzte
1996	Isola delle Femine (I)	148 m	Explosion eines Tanklastzuges	5 Tote 26 Verletzte
1996	Eurotunnel (F/GB)	50,45 km	Brand von 15 LKW auf einem Zug	30 Verletzte
1996	Göttingen (D)	1,7 km	Brand eines Eisenbahnwaggons mit Papier	keine
1999	Montblanc-Tunnel (F/I)	11.600 m	Brand von 23 LKW und 10 PKW	42 Tote
1999	Tauern-Tunnel (A)	6.401 m	Brand von 16 LKW und 24 PKW	6 Tote 49 Verletzte
2001	Gotthardtunnel (CH)	16.918 m	Brand von 13 LKW 4 Lieferwagen und 6 PKW	11 Tote
2006	Via Mala (CH)	760 m	Frontalkollision und Brand von 1 Reisebus und 1 PKW	9 Tote 9 Verletzte

Auch durch die zunehmende Verkehrsdichte steigt die Notwendigkeit sicherer Infrastrukturbauwerke. Dies bezieht sich einerseits auf den Personenschutz, aber auch in zunehmendem Maße auf die volkswirtschaftliche Bedeutung und somit auf den Objektschutz. Nach einem Schadensereignis muss ein Bauwerk in kürzester Zeit instandgesetzt werden, um es möglichst schnell wieder für den Verkehr freigegeben zu können. Dies bedeutet aber, dass die Schädigung nur in einem solchen Grad zuzulassen ist, in dem eine Instandsetzung mit einem möglichst geringen technischen, finanziellen und zeitlichen Aufwand möglich ist [Dehn 2008 und Dehn 2013].

Hinzu kommen die erhöhten Anforderungen an den Werkstoff Beton. Durch moderne Hochleistungsbetone ist es möglich, die Dauerbeständigkeit sowie die Festigkeit entscheidend zu erhöhen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten im Entwurf von Ingenieurbauwerken. Beispiele für aktuelle Tunnelgroßprojekte, in denen hochfeste Betone verwendet werden, sind Tab. 2-2 zu entnehmen.

Durch die komplexen Betonrezepturen und das Ausreizen von deren Eigenschaften, ist grundsätzlich eine erhöhte Qualitätssicherung notwendig. Darüber hinaus neigen hochfeste Betone unter Brandbeanspruchung zu explosiven Abplatzungen und damit zu schnellen Verlusten der statischen Höhe. Diesem Verhalten kann zwar durch Zusatzstoffe entgegengewirkt werden, es sind aber umfangreiche Untersuchungen und Prüfungen jeder speziellen Betonrezeptur notwendig, um die Brandsicherheit zu gewährleisten.

Tab. 2-2: Auswahl aktueller Tunnelgroßprojekte bei denen hochfeste Betone zum Einsatz kommen:

Projekt	Tunnellänge	Bauzeit	Informationen
Crossrail London	42 km	2012 - 2019	www.crossrail.co.uk
Stuttgart 21	117 km	2010 - 2022	www.bahnprojekt-stuttgart-uhl.de
Metro Cityringen Kopenhagen	15,5 km	2009 - 2019	intl.m.dk
Doha Metro	111 km	2014 - 2020	www.qr.com.qa

Die derzeit einzige Möglichkeit, die Brandbeständigkeit von Tunnelbetonen zu bestimmen, besteht in der Durchführung von Brandprüfungen. Hierfür werden Tunnelbauteile mit den zu testenden Betonrezepturen hergestellt und auf großen Prüföfen einer direkten Brandbelastung ausgesetzt. Die Brandbelastung folgt hierbei mit normativ geregelten Temperaturkurven, welche die hohe Temperaturbelastung nachvollziehen, die bei Bränden in Tunneln auftreten. Da solche Untersuchungen aber sehr aufwendig und kostenintensiv sind, ist es wichtig, möglichst viele belastbare und vergleichbare Daten aus einem einzelnen Versuch zu generieren.

Bei der Brandprüfung von Beton gibt es jedoch nur wenige aussagekräftige Kriterien. Darüber hinaus sind diese nur bedingt normativ geregelt. Die Bewertungskriterien sind dabei die Abplatzmenge, der Masseverlust, das Durchwärmungsverhalten, sowie die Standsicherheit des Bauteiles über die gesamte Versuchsdauer. Eine weitere Schwierigkeit der Datenerfassung bei Branduntersuchungen an Beton besteht darin eine zeitgenaue Information der Abplatzvorgänge zu bekommen. Mit Hilfe von Videokameras durch Beobachtungsfenster ist es zwar grundsätzlich möglich, die Abplatzungen visuell zu dokumentieren, in der Praxis ergeben sich hier aber Schwierigkeiten. Die Öfen sind für eine optimale Temperaturverteilung auf der Testkörperoberfläche ausgelegt. Bedingt durch diese Bauart ist es oftmals schwierig, die Beobachtungsfenster parallel zu den Testkörperoberflächen anzuordnen, was für optimale Kameraaufnahmen aber notwendig wäre. Darüber hinaus treten die meisten Abplatzungen in den ersten Minuten auf. In diesem Zeitraum ist die Sicht für die Kameras jedoch durch Flammen verdeckt, da die Brenner mit großer Leistung fahren [Dehn 2009].

Der grundlegende Ansatz der vorliegenden Arbeit besteht darin, die klassischen Bewertungskriterien für Tunnelbrandprüfungen an Beton durch Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung zu ergänzen. Dies entspricht auch dem Arbeitspaket des Lehrstuhls ZfP bei den gemeinsamen Drittmittelprojekten mit dem IWB Universität Stuttgart [Bošnjak 2014] und der MFPA Leipzig. Untersucht wird die Anwendung der Schallemissionsanalyse [Kap. 3.1], die mit der seismologischen Erfassung von Erdbeben vergleichbar ist. Die aufgezeichneten Schwingungen entstehen nicht durch Erdbeben, sondern durch Schädigungsprozesse im Betontestkörper.

Bei der Schallemissionsanalyse handelt es sich um ein volumenorientiertes Messverfahren. Dies bedeutet, dass eine einzelne Messung nicht nur an einer Stelle des Testkörpers durchgeführt wird, sondern Schädigungen aus dem gesamten Volumen des Testkörpers erfasst werden. Darüber hinaus kann über den kompletten Versuchsverlauf aufgezeichnet werden. Somit

ermöglicht dieses Messverfahren, die Schädigung sowohl zeitlich als auch dreidimensional verfolgen zu können.

Um die grundsätzliche Machbarkeit von Schallemissionsmessungen bei Tunnelbrandversuchen zu klären, wurden umfangreiche Laboruntersuchungen und verschiedene Experimente im Rahmen von Brandprüfungen durchgeführt.

In dieser Arbeit werden zunächst die messtechnischen und betontechnologischen Grundlagen erarbeitet [Kap. 3]. Hierbei wird die Schallemissionsanalyse intensiv betrachtet und im Besonderen auf die Auswahl der verwendeten Messgeräte eingegangen. Zusätzlich werden weitere Zerstörungsfreie Prüfverfahren und deren Anwendungsmöglichkeiten bei Brandversuchen an Beton vorgestellt.

Die Beschreibung des Versuchsaufbaus gliedert sich in mehrere Teile. In Kapitel 4 wird das Versuchsprogramm vorgestellt und auch auf die Messgeräteeinstellungen, sowie auf die verwendeten Betonrezepturen eingegangen. Es folgt eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Brandprüföfen sowie der Testkörper [Kap. 5]. Ein besonderes Augenmerk gilt der Entwicklung von Möglichkeiten, die Schallemissionsanalyse an die bestehenden Tunnelprüföfen anzupassen [Kap. 6]. Hier sind einerseits die besonderen Anforderungen an die Prüföfen zu beachten. Diese müssen so ausgelegt sein, dass die hohen Temperaturen der genormten Brandkurven überhaupt erreicht und dann möglichst genau nachgefahren werden. Darüber hinaus ist ein sicherer Betrieb der Öfen zu gewährleisten. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die empfindliche und sensible Messtechnik der Schallemissionsanalyse bestmöglich an die Testkörper anzubringen. Dies ist entscheidend für ein optimales Messergebnis.

Für die Ergebnisauswertung der Experimente werden als Erstes klassische Bewertungskriterien von Brandprüfungen, wie Temperaturdaten, Schädigungsbilder der Testkörper nach Versuchsende sowie Beobachtungen zusammengestellt [Kap. 7]. Diese werden teilweise mit den Messdaten der Schallemissionsanalyse verknüpft, oder dienen für Plausibilitätsbetrachtungen der Messergebnisse.

Die Auswertung der Schallemissionsanalyse beginnt mit einer Analyse aller Einzelparameter, die aus den aufgezeichneten Signalen abgeleitet werden [Kap. 8]. Diese werden im Folgenden miteinander verknüpft und mit den klassischen Messdaten in Verbindung gebracht. In Kapitel 9 und Kapitel 10 geht es dann um die Umsetzung von verschiedenen Ansätzen zur Lokalisierungsberechnungen. Lokalisierungen bedürfen komplexer Auswertungsalgorithmen und sind die Grundlage für eine dreidimensionale Darstellung von Schädigungsprozessen. Die Grenzen dieser Verfahren werden in Kapitel 11 thematisiert und die Ergebnisse schließlich zusammengefasst [Kap. 12].

3 Grundlagen

3.1 Grundlagen der Schallemissionsanalyse (SEA)

3.1.1 Prinzip der SEA

Die Schallemissionsanalyse (SEA) ist ein Messverfahren der Zerstörungsfreien Prüfung für verschiedene Anwendungen und basiert auf seismologischen Methoden. Das Verfahren basiert darauf, dass Gefügeveränderungen und somit auch Schädigungen in einem Material, zu einer Emission von elastischen Wellen führt. Diese Wellen breiten sich in einem homogenen und isotropen Medium kugelförmig aus. Auf der Oberfläche der jeweiligen Bauteile oder Testkörper können diese Wellen bei ihrer Ankunft detektiert und daraufhin aufgezeichnet werden [Abb. 3-1]. Analog zur Detektion von Erdbeben können aus diesen Wellenformen Rückschlüsse auf den Ursprung der Signale gezogen werden. So ist es beispielsweise möglich, Informationen über den Zeitpunkt, die freigesetzte Energie und den Ursprungsort zu ermitteln [Große 2008].

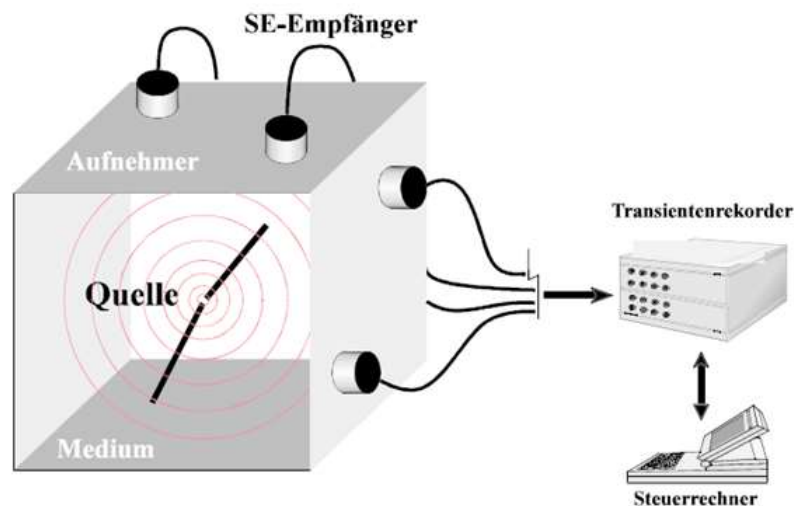


Abb. 3-1: Prinzipieller Messaufbau der Schallemissionsanalyse [Große 1996].

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung [Abb. 3-2]. Bei aktiven Verfahren wird ein künstlich erzeugtes Signal in den Testkörper entsendet. Das Signal wird dann nach seinem Weg durch den Testkörper wieder aufgezeichnet. Anhand der Signallaufzeit oder der Änderung dieses Signales lassen sich Rückschlüsse auf das Werkstoffverhalten oder den Schädigungsgrad der Bauteile ziehen. Beispiele hierfür sind Ultraschallverfahren, Radar oder Impact-Echo. Bei der Schallemissionsanalyse handelt es sich aber um ein passives Verfahren. Hierbei wird das Signal aufgrund einer Schädigung im Bauteil selbst produziert und von der Messtechnik nur aufgenommen. Man beobachtet also den Testkörper bis etwas passiert und bewertet den Zustand dann anhand dieser Informationen. Eine künstliche Anregung erfolgt nicht.

Im Gegensatz zu anderen Messverfahren, bei denen eine einzelne Messung oftmals nur punktförmig an einer Stelle durchgeführt wird und somit nur lokal und zeitlich begrenzte Aussagen

möglich sind, handelt es sich bei der Schallemissionsanalyse um ein integrales Messverfahren. Dies bedeutet, dass man Informationen räumlich aus dem gesamten Prüfkörper erhält und somit in der Lage ist ganzheitliche Aussagen über eine Schädigung von Bauteilen zu erhalten. Darüber hinaus ist es nicht notwendig den Ort der jeweiligen Schädigung vorher zu kennen, um sie detektieren zu können oder die Schädigung über einen Scanvorgang suchen zu müssen. Als weiterer Vorteil ist die zeitliche Auflösung des Messverfahrens zu nennen. Es ist möglich, die auftretenden Gefügeveränderungen zeitlich klar zuzuordnen und damit sehr genau mit dem zeitlichen Verlauf der Belastung vergleichen zu können.

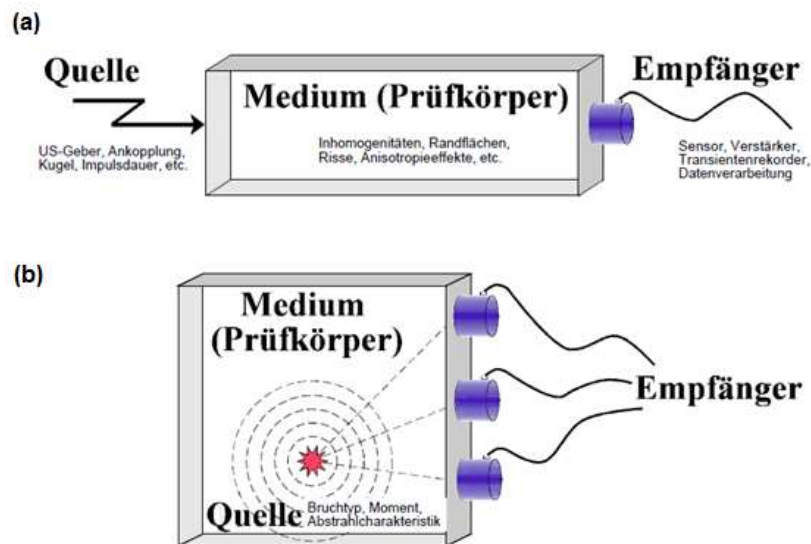


Abb. 3-2: Aktive und passive Zerstörungsfreie Prüfung [Große 1996].

3.1.2 SEA an Beton

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts werden experimentelle Untersuchungen im Zusammenhang mit der Schallemissionsanalyse durchgeführt. Als Beginn werden die Arbeiten von Kaiser [1950] angesehen. Die Entdeckung und historische Entwicklung wird in Drouillard [1996] aufgezeigt. Eine gute Übersicht über den Ablauf der Entwicklung bis zur Anwendung der SEA an Beton bietet Köppel [2002]. Über den Einsatz der Schallemissionsanalyse an Beton wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, bei welchen die Grenzen und Möglichkeiten aufgezeigt wurden. Arbeitsgruppen an der Universität Stuttgart unter H. W. Reinhardt und C. U. Große arbeiteten seit Mitte der 90er Jahre intensiv in diesem Bereich. Es entstanden zahlreiche Weiterentwicklungen und Anpassungen der SEA an den speziellen Werkstoff Beton. Darüber hinaus entstanden internationale Kontakte und intensive Kooperationen, unter anderem mit der ETH Zürich unter T. Vogel. Die vorliegende, anwendungsorientierte Arbeit steht in direkter Fortsetzung dieser Arbeiten und stützt sich auf die Grundlagen, die von Große [1996], Weiler [2000], Köppel [2002], Große [2004], Schechinger [2005], Finck [2005], Kurz [2006] und Fricker [2009] gelegt wurden.

Die Besonderheit bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse an Beton und Stahlbeton ist die werkstoffspezifische Inhomogenität. Zum einen besteht Beton aus Zuschlagsstoffen mit unterschiedlichem Korngehalt und der Zementmatrix. Andererseits gibt es keinen Beton ohne

zumindest ein Minimum an Rissbildung, was aber grundsätzlich zu veränderten Schalllaufwegen im Material führt. Einen gleichen Einfluss haben die Risse die bei den Schädigungen entstehen, die man durch die Messung beobachten will. Bei Stahlbeton kommt noch zusätzlich die unterschiedliche Schallgeschwindigkeit von Beton und Stahl hinzu. Bei Normalbeton kann man von einer Schallgeschwindigkeit im Testkörper von ca. 4000 m/s ausgehen, während sie im Stahl bei ca. 6000 m/s liegt. Im Vergleich zu Stahl ist auch die Signaldämpfung in Beton deutlich größer ausgeprägt. Somit sind Schallemissionsmessungen und aussagekräftige Auswertungen eine große Herausforderung. Gerade für Lokalisierungsrechnungen [Kap. 3.1.6] sind homogene Materialien wie Stahl deutlich besser geeignet. Dennoch konnten die Möglichkeiten eines Einsatzes der Schallemissionsanalyse an Beton mehrfach gezeigt werden. Sofern man die Grenzen der Messtechnik kennt und die Messergebnisse nicht überinterpretiert, steht auch für Beton ein leistungsfähiges Messverfahren zur Verfügung, das sowohl zeitliche als auch integrale Informationen über das Werkstoff- und Bauteilverhalten liefern kann.

3.1.3 Messkette und eingesetzte Schallemissionsmesstechnik

Bei der zerstörungsfreien Prüfung ist ein besonderes Augenmerk auf die verwendete Messtechnik zu legen. Alle noch so aufwendigen Auswertungsmethoden können aus den Rohdaten nur relevante Ergebnisse ziehen, wenn die Qualität der Daten möglichst hoch ist. Da die vom Material ausgehenden elastischen Wellen durch die Messgeräte grundsätzlich beeinflusst werden, ist eine Kenntnis des Einflusses und eine gezielte Auswahl der Messgeräte wichtig. Bei der Schallemissionsanalyse besteht die Messkette aus dem Material des Testkörpers, dem Koppelmedium, den Sensoren, den Vorverstärkern und Filtern und schließlich dem Transientenrekorder für die A/D-Wandlung und die Speicherung der Signale. Um die Übertragungsfunktion der Messkette bewerten zu können, empfiehlt es sich, die Einflüsse der einzelnen Komponenten zu betrachten. Diese können dann gezielt ausgewählt werden und ihre einzelnen Übertragungsfunktionen bei der Auswertung berücksichtigt werden. Nach Große [1996] gilt im Frequenzbereich für die Antwortfunktion $Rec(f)$ auf einen US-Impuls $S(f)$:

$$Rec(f) = S(f) \cdot TF_G(f) \cdot TF_M(f) \cdot TF_S(f) \cdot TF_R(f) \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Hierbei ist TF_G die Übertragungsfunktion des US-Gebers, TF_M des Mediums, TF_S des Sensors und TF_R die der Rekordereinheit. Da bei der Schallemissionsanalyse das Signal nicht künstlich erzeugt wird, entfällt der Einfluss des Ursprungssignales $S(f)$ in der Messkette. Das Verhalten des Materials ist Ziel der Untersuchung. Umso wichtiger ist somit der Einfluss von TF_S und TF_R . Daher kommt der Auswahl der Sensoren und Datenerfassungssysteme eine besondere Bedeutung zu, weshalb die eingesetzte Messtechnik im Folgenden beschrieben wird.

Schallemissionssensoren

Die Schallemissionssensoren sind ein entscheidender Teil der Messkette. Durch sie werden die mechanischen Schwingungen in elektrische Signale umgewandelt. Dies ist durch unterschiedliche Systeme möglich. Aus Gründen der Verfügbarkeit, Handlichkeit, Robustheit und natürlich des Preises, werden hauptsächlich Sensoren verwendet, die auf dem piezoelektrischen Effekt basieren. Piezokristalle erzeugen unter Deformation elektrische Spannungen. Abhängig von der geometrischen Form der Kristalle und der dahinter angeordneten Masse, lassen sich verschiedene Schwinger herstellen.

Je nachdem, wie die Piezokristalle verbaut sind, lassen sich dadurch unterschiedliche Sensoren herstellen. Abgesehen von der Empfindlichkeit, ist die Frequenzantwortfunktion der Sensoren entscheidend. Man unterscheidet zwischen resonanten, multiresonanten und breitbandigen Sensoren. Resonante Sensoren sind für eine ganz bestimmte Frequenz empfindlich und reagieren darauf. Wenn die Messaufgabe klar bekannt ist, kann dies Vorteile haben, um die gesuchten Signale klarer messen zu können. Mit multiresonanten Sensoren erreicht man diese Empfindlichkeit bei mehreren Frequenzen, aber nur bei breitbandigen Sensoren ist die Frequenzantwortfunktion über einen größeren Frequenzbereich gleich. Ein breiter Frequenzbereich wird benötigt, wenn man mit einer Frequenzanalyse das ursprüngliche Signal bewerten will und daher eine Beeinflussung des Signales durch den Sensor möglichst ausgeschlossen werden muss. Weitere Anforderungen, die man bei der Auswahl von Sensoren beachten sollte, sind Dauerhaftigkeit, Verschleiß, Temperaturabhängigkeit, Temperaturbeständigkeit und welche Ankopplungsmöglichkeiten der Sensor bietet.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurden mit Panametrics V103 und Glaser-type-Sensoren zwei verschiedene breitbandige Schallemissionssensoren getestet [Abb. 3-3]. Beide eignen sich aufgrund ihres Frequenzbereiches und ihrer Empfindlichkeit sehr gut für die Schallemissionsanalyse an Beton. Darüber hinaus kamen bei den ersten Untersuchungen noch multiresonante UEAE-Sensoren zum Einsatz [Abb. 3-6].



Abb. 3-3: Breitbandige Schallemissionssensoren: Panametrics V103 (Links) und Glaser-type (Rechts).

Panametrics V103-Sensor

Beim Schallemissionssensor Panametrics V103-Rb von Olympus NDT [Abb. 3-3 Links] handelt es sich um einen breitbandigen Sensor mit einer Mittenfrequenz von 1MHz. Die Frequenzantwortfunktion kann Abb. 3-4 entnommen werden. Ab ca. 100 kHz zeigt dies einen verhältnismäßig glatten und gleichmäßigen Verlauf ab. Abgesehen von diesem breitbandigen Frequenzverlauf in dem für die Schallemissionsanalyse an Beton relevanten Bereich, zeichnet sich der Sensor durch seine Robustheit im Außeneinsatz, der guten und einfachen Handhabung, besonders bei der Ankopplung mit Heißkleber aus. Der Sensor wird über BNC-Kabel angeschlossen. Mit den Vorverstärkern und Hardwarefiltern Tektronix AM 502 war er gut zu kombinieren. Die Messergebnisse waren gut und stabil reproduzierbar. Aus diesen Gründen wurde dieses Messgerätesetup als optimale Auswahl für den Messeinsatz bei Brandversuchen an Beton bewertet.

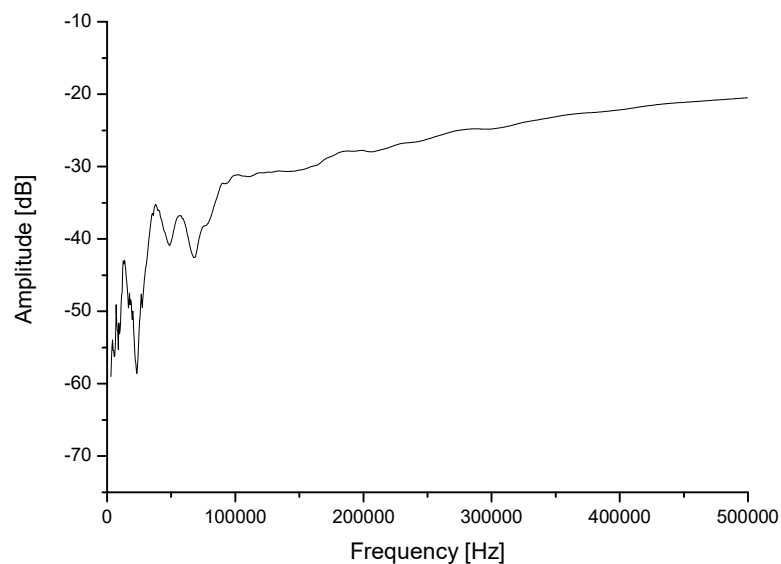


Abb. 3-4: Breitbandiges Frequenzverhalten der Panametrics V103-Sensoren [Richter 2009].

Glaser-type Sensor

Als weiterer, breitbandiger Schallemissionssensensor wurde der SteveCo` KRNBB-PC Point-Contact-Sensor (Glaser-type-Sensor) verwendet [Abb. 3-3 Rechts]. Der Sensor wurde von Professor Steven D. Glaser und seiner Arbeitsgruppe an der University Berkeley, USA, entwickelt. Als Ankopplfläche hat der Sensor eine Spitze mit einer Ankopplfläche von nur 0,5 mm Durchmesser. Dadurch ist der Einfluss von Richtungseffekten sehr gering. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen von McLaskey [2011], dass die Übertragungsfunktion des Sensors einen Bereich von 10 kHz bis 3 MHz umfasst und zwischen 20 kHz und 1 MHz ein nahezu völlig breitbandiges Verhalten aufweist. Hierdurch ist der Sensor geeignet für Messungen mit der Schallemissionsanalyse an Beton.

Die Glaser-type-Sensoren lieferten bei den Brandexperimenten auch grundsätzlich gute Ergebnisse. Aufgrund der fehlenden Verstellmöglichkeit der zugehörigen Vorverstärker [Kap.0] waren sie für die Erfassung von Abplatzereignissen an Beton aber oftmals zu empfindlich eingestellt. Das Messsetup ist für die Erfassung von Mikrorissen deutlich besser geeignet. Darüber hinaus sind die Sensoren in der Praxis für die Anwendung an Beton bei Brandversuchen nicht robust genug. Aufgrund der zu kleinen Spitze sind sie anfällig auf Schäden durch Unebenheiten der Oberfläche. Die Spitzen unterlagen einem hohen Verschleiß beim Einschrauben und es kam zusätzlich zu Ankoppelproblemen. Das Anbringen der Sensoren gestaltete sich darüber hinaus sehr aufwendig, da man sie nicht einfach auf die Oberfläche kleben konnte, sondern grundsätzlich zunächst eine Halterung montiert werden musste. Daher wurden die Sensoren bei den späteren Experimenten nicht weiterverwendet.

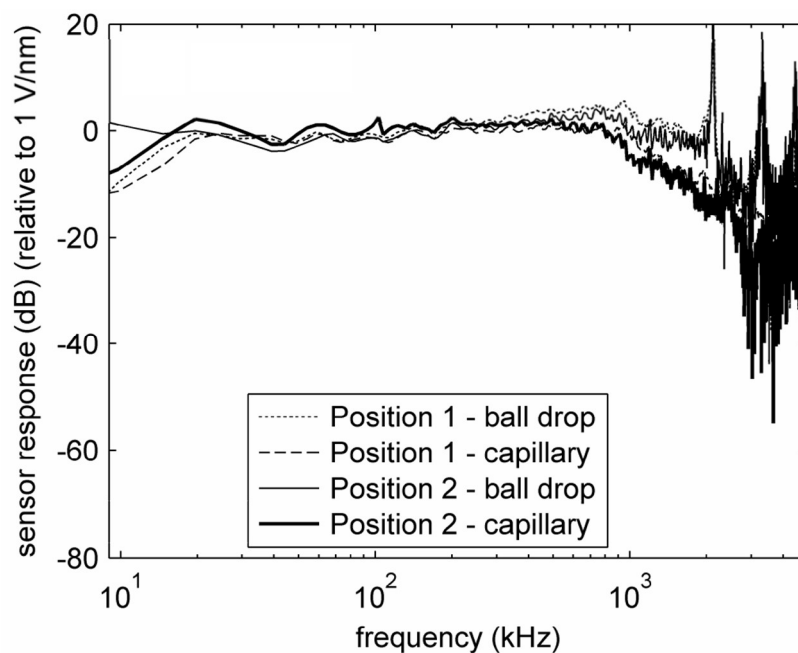


Abb. 3-5: Antwortspektrum des Glaser-type-Sensors, bei der Kalibrierung durch Fallenlassen von 0,4 mm großen Rubinkugeln und Brechen von Glaskapillaren auf der Oberfläche. Es wurden dabei zwei verschiedene Sensorpositionen betrachtet [McLaskey 2011].

UEAE-Sensoren

Der UEAE-Sensor der Firma Geotron [Abb. 3-6] wurde bereits bei vorhergehenden Untersuchungen bei Brandversuchen an Beton eingesetzt [Richter 2009]. Bereits dort zeigte sich, dass der Sensor zwar grundsätzlich für die Messaufgabe geeignet ist, die Panametrics V103-Sensoren aber einige Vorteile bieten. Der UEAE zeigt eine multiresonante Charakteristik [Abb. 3-7]. Somit reagiert er durchaus im relevanten Frequenzbereich auf Schallemissionssignale, ein breitbandiges Verhalten wäre aber deutlich vorteilhafter. Hinzu kommt, dass die Sensoren eher robust gebaut sind. Die UEAE-Sensoren wurden für die Brandexperimente verwendet, um die Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen zu verifizieren und verhältnismäßig viele davon zur Verfügung standen. Von den Panametrics V103 standen darüber hinaus zu Beginn der Untersuchungen noch nicht genügend Sensoren zur Verfügung. Die Messergebnisse mit den UEAE-Sensoren bestätigten die Voruntersuchungen.



Abb. 3-6: Schallemissionssensor UEAE der Firma Geotron.

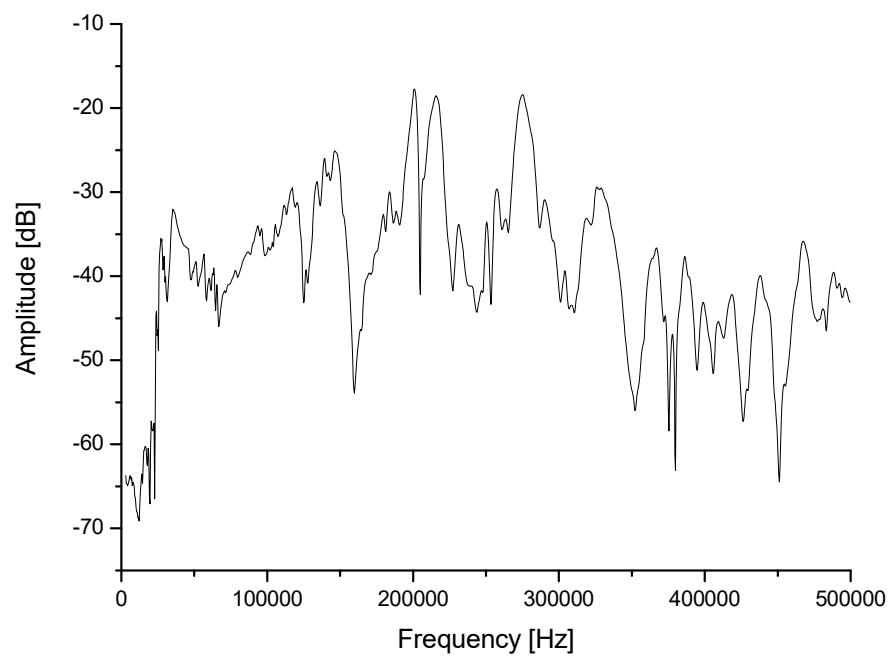


Abb. 3-7: Multiresonantes Frequenzverhalten der UEAE-Sensoren [Richter 2009].

Vorverstärker und Hardwarefilter

Da es sich bei Schallemissionen aufgrund von Gefügeveränderungen und Rissen um Signale mit sehr geringer Amplitude handelt, sind sie für die Transientenrekorder nur schwer zu identifizieren und aufzuzeichnen. Verbessern kann man das Ergebnis, indem man das analoge Signal vor der A/D-Wandlung und der Speicherung noch verstärkt. Hierfür werden Vorverstärker verwendet. Wenn man die Vorverstärker nah an den Sensoren platziert, kann das verstärkte Signal auch über etwas größere Entfernungen mit längeren Kabeln an den Transientenrekorder weitergegeben werden, ohne einen Datenverlust befürchten zu müssen. Hinzu kommt, dass verstärkte Signale weniger anfällig auf Störquellen sind.

Mit den Vorverstärkern ist gleichzeitig eine Filterung des analogen Signales möglich. Diese Funktion ist ein wichtiges Hilfsmittel um qualitativ hochwertige Datensätze bei der Schallemissionsanalyse zu generieren. Die relevanten Schallemissionen bei Messungen von Schädigungen an Beton treten in einem Frequenzbereich zwischen 10 und 300 kHz auf [Große 2008]. Bei höherfrequenten Signalen ist von Störsignalen aufgrund von elektronischen Geräten auszugehen, während das Auftreten von tieffrequenten Signalen auf Probleme mit der Geräuschkulisse, wie dem Brummen der Ölbrenner des Ofens zurückzuführen ist. Mit Filtern können diese Störsignale so weit unterdrückt werden, dass sie für die Triggerung nicht mehr relevant sind.

Bei der Auswahl der Vorverstärker und Hardwarefilter ist eine saubere Übertragung der Signale in den relevanten Frequenzbereichen und eine Einstellmöglichkeit für die Verstärkung wichtig. Dies ist notwendig, da über beide Funktionen eine Vorauswahl der Signale und vor allem ein Ausschluss von Störsignalen möglich ist. Grundsätzlich ist eine Verstärkung und Filterung auch digital möglich. Bei dieser Anwendung muss dies aber mit Hardware gelöst werden, um die PCs nicht zusätzlich zu belasten, welche durch die großen Datenmengen bereits an ihre Grenzen stoßen.

Bei den Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Vorverstärker verwendet. Zum einen war dies von der Verfügbarkeit abhängig, da verhältnismäßig viele Sensoren gleichzeitig eingesetzt wurden und nur eine begrenzte Zahl an Vorverstärkern zur Verfügung stand. Des Weiteren muss der jeweilige Vorverstärker mit dem jeweils eingesetzten Sensor kompatibel sein. Schlussendlich waren die Auswahl und natürlich der Test von geeigneter Messtechnik von großer Bedeutung und erforderten einen hohen Aufwand.



Abb. 3-8: Vorverstärker Tektronix AM 502 mit acht Messkanälen.

Verwendet wurden die Vorverstärker AM-502 von Tektronix [Abb. 3-8]. Hierbei handelt es sich um Differenzverstärker mit der Möglichkeit einer stufenweisen Vorverstärkung bis zur 1000.000-fachen Amplitude des Eingangssignales. Darüber hinaus ist eine Hoch- und Tiefpassfilterung möglich. Es standen 16 Kanäle zur Verfügung.

Als weiterer Vorverstärker kamen SmartPre^{Dig} Verstärker von Smartmote zum Einsatz. Dies sind 8-Kanal Breitbandvorverstärker mit einer Bandbreite von 100 Hz bis 4 MHz. Die Verstärkung ist in sieben Stufen zu je 6 dB bis maximal 60 dB möglich. Hoch und Tiefpassfilter sind zu je zwei Stufen über Software einstellbar. Diese Vorverstärker sind sowohl im TransOcto-System [Abb. 3-11] verbaut, als auch in der Form von eigenständigen Einheiten verfügbar [Abb. 3-9] und für den Einsatz der Schallemissionsanalyse an Beton optimiert.



Abb. 3-9: Die beiden SmartPre^{Dig}-Vorverstärker mit je acht Kanälen.

Für die Nutzung der Glaser-type-Sensoren ist es notwendig, die dazu passenden Vorverstärker einzusetzen. Hier wurden KRN AMP12BB-J Vorverstärker verwendet. Diese sind so gebaut, dass sie die Sensoren mit der benötigten Speisespannung versorgen. Darüber hinaus wird das Signal durch die Vorverstärker mit ca. 35 dB je Kanal verstärkt. Eine andere Verstärkung kann bei den KRN AMP12BB-J Vorverstärkern nicht eingestellt werden. Es ist allerdings möglich die Verstärkung auszuschalten und nur die Spannungsversorgung für die Sensoren zu nutzen. Für die Verstärkung kann dann ein anderer Vorverstärker nachgeschaltet werden.

Transientenrekorder zur Datenerfassung

Nachdem die mechanischen Schwingungen im Material von Schallemissionssensoren erfasst und in analoge Signale umgewandelt wurden, werden Transientenrekorder zur A/D-Wandlung und Speicherung der Signale benötigt. Gerade bei der signalbasierten Schallemissionsanalyse ist dies von entscheidender Bedeutung. Transientenrekorder sind daher immer das Herzstück der Messgeräte für die Schallemissionsanalyse. Sie bestehen aus Messkarten, einem PC zur Steuerung und Speicherung sowie der Messsoftware. Nach einer A/D-Wandlung der Signale und Triggerung auf den Messkarten werden die Signale auf den Festplatten der Mess-PCs gespeichert. Hierfür sind die Leistungsfähigkeit der Messkarten, sowie die Kapazität und Schreibgeschwindigkeit der Festplatten wichtig. Je nach Auslegung des Gesamtsystems kann auch die Kapazität des Datenflusses zwischen Messkarte und Festplatte, beispielsweise über den PCI-Bus, entscheidend sein. Ein sicherer Umgang mit den Datenerfassungssystemen und die Kenntnis der Grenzen ist eine unabdingbare Voraussetzung, um Datenverluste auszuschließen. Bei der Entwicklung und Auswahl der Steuerungs- und Messsoftware sind, abgesehen von den Einstellmöglichkeiten hinsichtlich Abtastrate, Messbereich, Triggermöglichkeiten und Signallängen, die Bedienerfreundlichkeit und die Möglichkeit einer Live-Darstellung der Signale zu beachten.

Für die Experimente der vorliegenden Arbeit wurden zwei Transientenrekorder eingesetzt. Primär wurde mit dem TransAS-System (TA) bzw. TranAX-System des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung der TU München gearbeitet. Darüber hinaus wurde, als Redundanz und für Vergleichsmessungen, der TransOcto^{AE}-Transientenrekorder der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart eingesetzt.

Der Transientenrekorder TranAX [Abb. 3-10] besteht aus Messkarten der Firma Elsys und dem dazugehörigen Datenerfassungsprogramm TranAX. Der Name TransAS stammt von einer älteren Softwareversion, die Messkarten und der Mess-PC wurden bei dem Update aber nicht verändert. Bei den zwei PCI-Messkarten handelt es sich um Elsys TPCX-2016-8S mit je acht Kanälen. Der Messbereich geht von 100 mV bis 100 V mit einer Auflösung von 16 bit und einer maximalen Abtastfrequenz von 5 MS/s. Die TranAX-Software bietet sowohl eine Live-Darstellung als auch die Möglichkeit die aufgezeichneten Signale nachträglich anzuschauen. Darüber hinaus bietet sie verschiedene Auswertungstools. Für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit wurden die aufgezeichneten Daten allerdings exportiert und mit eigens entwickelten MATLAB-basierten Programmen ausgewertet.

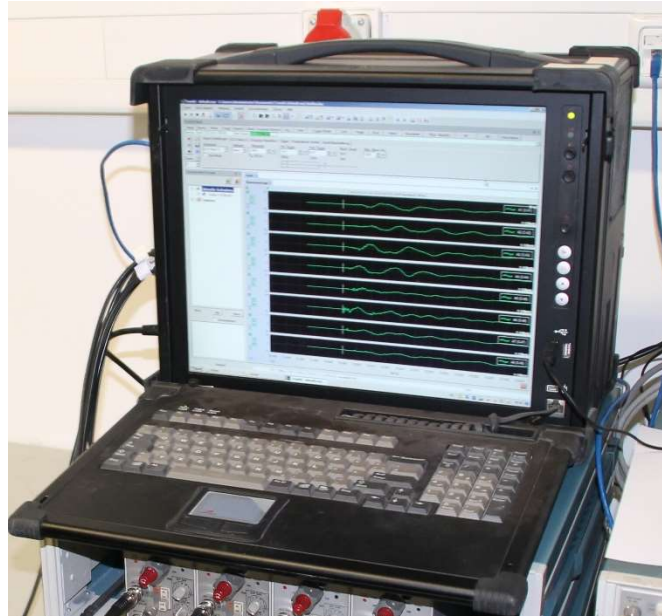


Abb. 3-10: Transientenrekorder TransAS (TA), mit den beiden eingebauten Elsys TPCX-2016-8S Messkarten.

Als weiteres Messsystem wurde der TransOcto^{AE} [Abb. 3-11] mit 8 Messkanälen verwendet. Das Gesamtsystem beinhaltet SmartPre^{DIG} Vorverstärker und hat mit dem SmartTrig^{Dig} die Möglichkeit einer externen Triggerlogik. Die Leistungsfähigkeit des TransOcto^{AE} ist nicht ganz so hoch wie die des TransAS-Systems. Die maximale Abtastrate beträgt ca. 1,8 MHz. Um Datenverlust zu vermeiden wurde aber grundsätzlich mit 1 MHz aufgezeichnet.



Abb. 3-11: Transientenrekorder TransOcto^{AE} (TO) mit eingebauten SmartPre^{Dig} -Vorverstärkern.

3.1.4 Möglichkeiten der Messgeräteeinstellung

Transientenrekorder haben verschiedene Einstellungsmöglichkeiten, um Datensätze aufzeichnen zu können. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Einstellungen sind Tab. 4-4 in Kap. 4.3 zu entnehmen.

Zunächst ist bei der Aufzeichnung mit Transientenrekordern die Abtastrate, also die zeitliche Auflösung des Messgerätes, zu beachten und einzustellen. Grundsätzlich ist eine möglichst genaue Auflösung für die Messergebnisse wünschenswert. Bei einer zu geringen Abtastrate ist die Auswertung von verschiedenen Parametern wie dem Frequenzgehalt oder dem Ersteinsatz nicht mehr möglich. Durch eine hohe Abtastrate vergrößert sich aber sehr schnell die Datenmenge, die erfasst und abgespeichert werden muss. Die damit verbundenen Schwierigkeiten müssen mit der gewünschten Messgenauigkeit verglichen werden. Für die Aufzeichnung von Schallemissionsereignissen in Beton empfiehlt sich eine Abtastrate zwischen 1 MHz und 2 MHz.

Um die Datenmenge sowohl bei der Aufzeichnung als auch bei der Auswertung zu begrenzen, wird nicht kontinuierlich aufgezeichnet. Dadurch wird eine Überbeanspruchung der Messtechnik und somit ein Abbruch während der laufenden Messung verhindert. Darüber hinaus wird die Auswertung verbessert, da die aufwendigen Analysealgorithmen auf kleinere Datensätze angewandt werden können. Im optimalen Fall spart man die Aufzeichnung in der Zeit, in der keine relevanten Schallemissionsereignisse auftreten und speichert auch keine Störsignale ab. Durch die Transientenrekorder erfolgt also eine Vorauswahl der Signale. Dies ist für das Messergebnis im Normalfall unproblematisch, da es ohnehin nicht möglich ist alle Schallemissionsereignisse aufzuzeichnen und zu bewerten. Dennoch muss sichergestellt werden, dass durch die Einstellung der Messsysteme keine relevanten Schallemissionen verloren gehen und sich durch die veränderten Datensätze Fehlinterpretationen ergeben.

Um nur dann aufzuzeichnen, wenn relevante Schallemissionsereignisse vorliegen, ist es notwendig, Bedingungen für den Start der Aufzeichnung zu definieren. Hierfür gibt es die Möglichkeit Trigger zu setzen. Als Triggerbedingungen kommen Schwellwertüberschreitungen in Frage. Der Transientenrekorder löst also nur aus, wenn die Amplitude des Signales einen gewissen Wert übersteigt oder einen vorgewählten Bereich verlässt. Eine weitere Methode ist die Verwendung von Slewratetriggern, die auf den Anstieg des Signales in einem Zeitbereich reagieren. Für die Identifikation von Schallemissionsereignissen haben sich Slewratetrigger als Mittel der Wahl erwiesen. Gute Ergebnisse wurden auch durch eine Kombination von Schwellwert- und Slewratetriggern erzielt.

Sobald ein Trigger auslöst ist es entscheidend über welchen Zeitbereich aufgezeichnet werden muss. Dieser Zeitbereich wird auch Block genannt. Die Blocklänge ist abhängig von der Materialdämpfung und dem damit verbundenen Nachschwingen der Signale. Somit ist die Blocklänge auf das Material und die Messaufgabe anzupassen. Durch den Ringspeicher der Transientenrekorder ist es möglich, beim Auslösen eines Triggers das Signal auch eine gewisse Zeit vor dem Triggerzeitpunkt abzuspeichern. Dies ist einerseits notwendig, da die Trigger

verhältnismäßig ungenau sind und die Triggerbedingung nicht sicher zum exakten Signalbeginn vorliegen muss. Andererseits ist es möglich, dass der Trigger nicht bei dem Kanal anschlägt, an dem das Signal zuerst ankommt, sondern beispielsweise erst beim Zweiten oder Dritten. Somit ist es trotzdem möglich, das komplette Signal am ersten Sensor zu erfassen. Die Blocklänge setzt sich also grundsätzlich aus einem Pretrigger (Zeitbereich vor dem Triggerzeitpunkt) und einem Posttrigger (Zeitbereich nach dem Triggerzeitpunkt) zusammen. Als Pretrigger empfiehlt sich ca. 10 % der gesamten Blocklänge zu verwenden. Für die Anwendung der Schallemissionsanalyse an Beton benötigt man eine Blocklänge von ca. 4 ms, wobei dies je nach Messaufgabe sehr unterschiedlich sein kann. Prinzipiell ist es unschädlich die Blocklänge eher länger zu wählen, um das Signal nicht zu früh abzuschneiden. Wenn die Ereignisse aber sehr schnell aufeinander folgen, kann es sein, dass der Beginn des nachfolgenden Signales in den Block des aktuellen Signales mit aufgenommen wird. Dies führt beispielsweise zu Verfälschungen bei der Energieberechnung der Signale und zu einer Fehlinterpretation bei der Schallemissionsaktivität, da weniger Signale gezählt werden. Bei Signalen mit einem hohen Energiegehalt und großer Amplitude kann es hingegen vorkommen, dass das Signaldauer über den Block hinaus dauert und im Folgenden den Trigger noch einmal auslöst. Dadurch werden für eine Schallemission mehrere Blöcke geschrieben, was bei der Auswertung ebenfalls zu Fehlinterpretationen führen kann.

Sofern die Vorverstärker stufenweise regelbar sind, gibt es hier die Möglichkeit die Verstärkung durch einen ganzzahligen Faktor oder in dB einzustellen. Die Verstärkung ist abhängig von der Messaufgabe, den Testkörpern und der Sensorempfindlichkeit. Sie sollte so gewählt werden, dass die Amplitude der relevanten Signale innerhalb des Messbereiches des Transientenrekorders bleibt. Eine zu große Amplitude kann zu einem Clippen, also einem Anschneiden des Signales bei hohen Amplituden führen. Die Einstellung kann mit einer Anregung durch künstliche Quellen überprüft werden. Für die Erfassung von Rissen in Beton bietet es sich an, HSU-Nielsen-Quellen, also Bleistiftminenbrüche nach ASTM E976 zur Einstellung der Verstärkung zu nutzen.

Auch für die Einstellung der Filter gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Oftmals wird nur zwischen Lowpassfilter, Highpassfilter und Bandpassfilter unterschieden. Bei manchen Geräten kann auch die zu Grunde liegende Filterfunktion gewählt werden. Da Schallemissionen im Beton im Bereich von 10 und 300 kHz auftreten, sollten die Filtereinstellungen diesen Bereich nicht beeinträchtigen.

3.1.5 Parameterbasierte und signalbasierte Auswertung

Man unterscheidet bei der Auswertung von Schallemissionssignalen zwischen qualitativer (parameterbasierter) und quantitativer (signalbasierter) Schallemissionsanalyse [Köppel 2002].

Bei der qualitativen Schallemissionsanalyse werden bei der Messung einzelne Parameter des Signales erfasst und auch nur diese Parameter abgespeichert. Durch die Speicherung der Einzelparameter lässt sich sowohl der benötigte Speicherplatz als auch die Datenmenge pro Zeit deutlich begrenzen. Früher war dies wichtig, da die Computertechnik noch nicht weit genug entwickelt war und hier Grenzen setzte. Zum anderen ermöglicht die qualitative SEA eine Live-Bewertung während der Messung, was für viele Anwendungen entscheidend ist.

Die Parameter und das Materialverhalten muss allerdings sehr genau bekannt sein, da die Messgeräteeinstellungen und Schwellenwerte für die Abspeicherung bereits eine Interpretation und damit Eingrenzung der Daten bedeuten. Bei unbekanntem Messaufgabe kann dies dazu führen, dass eine Schädigung des Werkstoffes nicht erkannt wird, da die Schwellenwerte zu hoch eingestellt wurden. Eine zu empfindlich eingestellte Messtechnik hingegen führt zu einer Überforderung und damit unter Umständen zu einem Absturz des Messgerätes oder einer ungewollten Beendigung der Messung. Darüber hinaus gibt es Effekte, die aufgrund von unpassenden Messgeräteeinstellungen die Ergebnisse klar verfälschen. Gerade die Ergebniskurven der Schallemissionsaktivität sind hierfür sehr empfindlich. Problematisch ist dies vor allem deshalb, weil gerade diese Grafiken leicht zu verstehen sind und daher schnell zum Vergleich mit anderen Ergebnissen und Interpretation des Schädigungsverhaltens herangezogen werden, ohne den messtechnischen Hintergrund einschätzen zu können. Die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen ist auf jeden Fall als sehr hoch einzuschätzen.

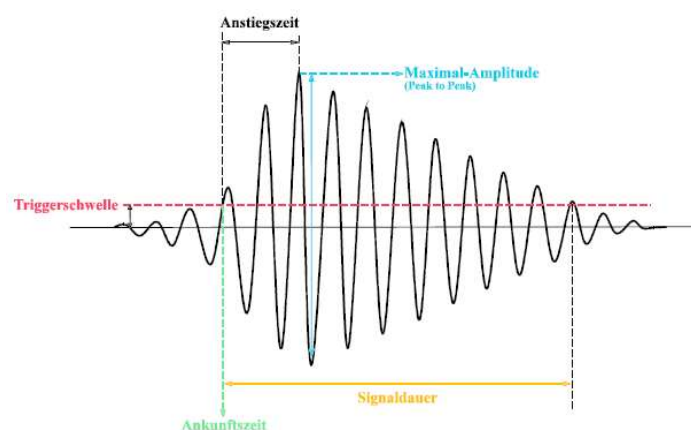


Abb. 3-12: Ermittlung von Schallemissionsparametern aus einem Signal nach der Schallemissions-Richtlinie „SE-3“ [DGZfP 1991].

Relevante Signalparameter der Qualitativen SEA sind u.a. die Überschreitung eines Schwellenwertes, wodurch der Signalbeginn gekennzeichnet wird, die Maximalamplitude, die Anstiegszeit des Signales, die Signaldauer, die Abklingdauer und die Counts oder Hits, also die Anzahl an Schwellenwertüberschreitungen pro Zeit (Schallemissionsaktivität) [Schechinger 2005].

Weitere Parameter sind der Energiegehalt der Signale oder der Frequenzgehalt, wobei hier eine direkte Analyse und Abspeicherung während der Messung problematisch ist [Große 2008].

Solche Analysen werden mit der quantitativen SEA möglich. Hier wird das gesamte Signal abgespeichert. Hierdurch wird eine nachträgliche Auswertung der einzelnen Parameter, auch mit unterschiedlichen Schwellwerteneinstellungen möglich. Die Signale können nachträglich gezielt gefiltert oder verstärkt werden. Dies ist zwar auch während der Messung möglich, allerdings gibt es dann nur eine Filtereinstellung, während bei einer nachträglichen Bearbeitung verschiedene Filter getestet werden können. Darüber hinaus sind bei der Bewertung des gesamten Signales Energiegehalt und Frequenzgehalte deutlich detaillierter zu erfassen.

Durch die signalbasierte SEA werden verschiedene andere Auswertungsmethoden überhaupt erst möglich. Hierzu zählt die Lokalisierung [Kap. 3.1.6], wofür eine detaillierte Ersteinsatzbestimmung notwendig ist. Weitere Möglichkeiten sind die Momententensorinversion [Finck 2005] oder auch das time reverse modelling [Kocur 2012]. Beide Auswertungsverfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit aber nicht verwendet.

Abgesehen davon, dass eine zeitgleiche Messung und Auswertung nicht möglich ist, liegt die hauptsächliche Schwierigkeit der quantitativen SEA in den großen Datenmengen, die erfasst und abgespeichert werden. Bei den Schallemissionsmessungen im Rahmen dieser Arbeit lagen die Größen der Datensätze pro Versuch im Bereich zwischen 30 und 90 GByte, je nach Versuchsaufbau, Messgeräteeinstellung und Versuchsdauer.

3.1.6 Lokalisierung

Im Rahmen von Datenauswertungen der Schallemissionsanalyse kommt der Lokalisierung grundsätzlich ein besonderer Stellenwert zu. Einerseits liegt dies daran, dass diese sich schnell zu einer komplexen Aufgabe entwickeln kann. Hauptsächlich aber am Nutzen, der durch eine sinnvolle Lokalisierung entsteht. Hierdurch werden Aussagen über die Genauigkeit und Brauchbarkeit der Messungen möglich. So können beispielsweise Störgeräusche oder Signale von der Testkörperoberfläche identifiziert werden. Man kann also Signale aussortieren, die mit der zu untersuchenden Schädigung nichts zu tun haben.

Darüber hinaus wird natürlich erst mit einer Lokalisierung und räumlichen Darstellung der Ergebnisse die Schallemissionsanalyse wirklich zu einem dreidimensionalen, volumenorientierten Messverfahren. Schädigungen können nun Bereichen zugeordnet werden und man erhält ein Bild aus dem Inneren der Testkörper, ohne sie aufzuschneiden.

Die Berechnung von Lokalisierungen von Schallemissionsereignissen für die Anwendung im Bauwesen war Bestandteil umfangreicher Forschungsvorhaben. Gleiches gilt für die damit verbundenen Berechnungen der Lokalisierungsgenauigkeiten. Beispielhaft seien die Arbeiten von Finck [2005], Fricker [2009], Große [1996], Große [2004], Kocur [2012], Köppel [2002], Kurz [2006], Malm [2012], Moser [2014], Radlmeier [2013], Raith [2013], Reinhardt [2008], Ringger [2003], Schechinger [2005], Schumacher [2011] und Weiler [2000] genannt.

Im Rahmen der unterschiedlichen Forschungsvorhaben wurden verschiedene Softwareprogramme entwickelt, um die Berechnung auch für größere Anzahlen an Schallemissionsereignissen zu ermöglichen [Große 1999]. Oftmals enthalten diese Programme auch eine automatische Ersteinsatzbestimmung. Beispiele sind WinPecker [Große 2000], Hypo^{AE} [Onicescu 1996] und POLAR^{AE} [Rosenbusch 2003 und Rosenbusch 2004]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Programmcode SquirrelAE auf Basis von MATLAB entwickelt.

Lokalisierung durch Betrachtung der Laufzeitdifferenzen

Bei den hier verwendeten Methoden handelt es sich um dieselben, die auch für die Berechnung von Erdbebenherden verwendet werden. Grundlagen hierfür sind beispielsweise bei Buland [1976] und Shearer [1999] dargestellt. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Algorithmen, die zur Lokalisierung von GPS eingesetzt werden. Für die Anwendung der Schallemissionsanalyse an Beton wurden verschiedene Berechnungsweisen untersucht, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

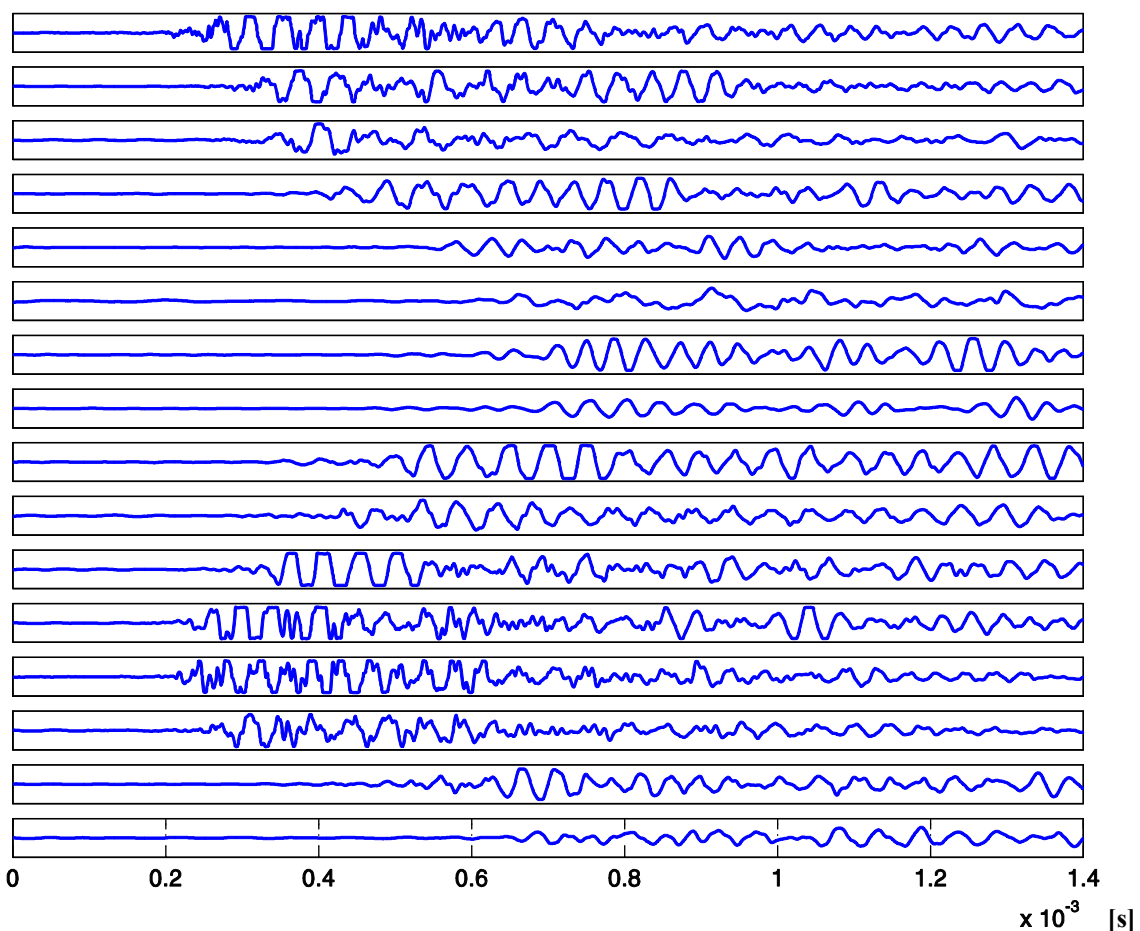


Abb. 3-13: Schallemissionsereignis, das mit 16 Kanälen aufgezeichnet wurde.

Grundsätzlich geht man bei der Lokalisierung davon aus, dass es sich bei Schallemissionsereignissen um Punktquellen handelt, von denen aus sich die Welle gleichmäßig durch den Testkörper fortbewegt. Da sich die Schallemissionssensoren an unterschiedlichen Stellen auf der Testkörperoberfläche befinden, haben sie auch unterschiedliche Abstände zum Ursprungsort.

Daher kommt die Welle zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Sensoren an. Bei einer sensiblen Messtechnik, mit einer ausreichend genauen zeitlichen Auflösung, ist es möglich, dies zu erfassen [Abb. 3-13]. Anhand dieser Laufzeitdifferenzen kann der Ursprungsort des Schallemissionsereignisses berechnet werden. Die Ankunftszeiten an den Sensoren und der Ursprungsort sind wie folgt verknüpft:

$$t_{a,i} = t + \frac{1}{c} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (\text{Gl. 3-2})$$

$t_{a,i}$	Ankunftszeit am Sensor
t	Quellzeit
x, y, z	Koordinaten des Ursprungsortes
x_i, y_i, z_i	bekannte Position der jeweiligen Sensoren
c	Schallgeschwindigkeit im Testkörper

Zur Lösung dieses nichtlinearen Gleichungssystems benötigt man die Information der Ankunftszeiten von mindestens vier Sensoren. Wenn mehr als vier Sensoren zur Verfügung stehen, ist das System überbestimmt. Hierdurch ist es möglich, eine Fehlerrechnung durchzuführen und auf die Genauigkeit der Lokalisierung zu schließen. Zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems gibt es numerische Inversionsverfahren und direkte algebraische Lösungsansätze.

Iterative Lösungsverfahren gehen auf Geiger [1910] zurück, der damit erstmals Lokalisierungsberechnungen für Erdbeben durchführte (Geiger-Methode). Die auf dieser Basis entwickelten Algorithmen [Buland 1976] starten mit einem künstlich angenommenen, geschätzten Wert, der mit jedem Berechnungsschritt verbessert wird. Die Iteration erfolgt so lange, bis ein Konvergenzkriterium erreicht ist. Eine Abwandlung hiervon, ist die Verwendung der Differenzen zwischen den Ankunftszeiten an den Sensoren, anstatt der absoluten Ankunftszeiten. Dies hat den Vorteil, dass die Quellzeit nicht berechnet werden muss.

Direkte algebraische Lösungsverfahren werden für die Positionsbestimmung per GPS verwendet. Hierfür wird u.a. der Bancroft-Algorithmus [Bancroft 1985] verwendet. Ein Startwert wie bei Geiger ist hier nicht erforderlich. Der Bancroft-Algorithmus liefert allerdings immer nur eine Lösung für vier Sensoren. Die Einbindung der anderen Sensoren, sowie eine Fehlerrechnung, wird durch einen Permutationsansatz erreicht. Hierfür wird die Lokalisierung für alle möglichen Sensorkombinationen errechnet und der wahrscheinlichste Wert aus der entstehenden Punktwolke aller Ergebnisse generiert. Die Leistungsfähigkeiten und Grenzen der beiden Verfahren wurden von Kurz [2006] intensiv untersucht und bewertet.

Ein ganz anderer Ansatz verfolgt die sogenannte grid-search-Methode. Hierbei wird zunächst ein dreidimensionales Gitterraaster über den Testkörper gelegt. Anschließend berechnet man für jeden der Gitterpunkte die einzelnen Abstände zu den Positionen der Schallemissionssensoren. Geteilt durch die Schallgeschwindigkeit des Materials, ergibt sich die theoretische Laufzeit einer Welle, wenn an diesem Gitterpunkt ein Schallemissionsereignis auftreten würde. Somit erhält man für jeden Gitterpunkt die theoretischen Laufzeiten zu den Sensoren und somit die

Laufzeitdifferenzen. Diese Laufzeitdifferenzen, sind mit den tatsächlichen, messtechnisch erfassten Laufzeitdifferenzen zu vergleichen. Bei dem Gitterpunkt mit der größtmöglichen Übereinstimmung muss es sich schließlich um den Ursprungsort des Schallemissionsereignisses handeln.

Die Genauigkeit der grid-search-Methode ist zunächst stark von der gewählten Rastergröße des Gitters abhängig. Je kleiner die Abstände der einzelnen Gitterpunkte werden, umso rechenintensiver wird die Methode. Darüber hinaus gibt es keine Möglichkeit, eine Fehlerrechnung zu implementieren und die Gefahr von Symmetrieeffekten ist verhältnismäßig hoch.

Vorteile hat die Methode jedoch, bei inhomogenen Verteilungen der Schallgeschwindigkeiten im gleichen Testkörper wie es beispielsweise bei Holz der Fall ist [Ringger 2003]. Die grid-search-Methode ermöglicht es, unterschiedliche Geschwindigkeitsmodelle in die Berechnung mit einzubeziehen.

Weitere Lokalisierungsverfahren

Es gibt weitere Möglichkeiten zur Lokalisierung, die aber in dieser Arbeit nicht verwendet wurden. Ein Beispiel ist die einfache lineare Lokalisierung, bei der man die Schallemissionssensoren in einer Reihe und im gleichen Abstand zueinander auf dem gesamten Testkörper anordnet. Daraufhin ist es sehr einfach zuzuordnen, zwischen welchen beiden Sensoren das Ereignis stattgefunden hat. Man erhält aber keine dreidimensionale Information. Andere Möglichkeiten bieten Array-Techniken, bei denen die Sensoren lokal sehr dicht nebeneinander angebracht werden und damit eine Art Antenne bilden.

Auf Basis der modernen Methoden zur numerischen Simulation gibt es aktuelle Forschungsarbeiten, die sich intensiv mit der Weiterentwicklung von Möglichkeiten zur Lokalisierung beschäftigen. Zu nennen sind hier die Arbeiten von Kocur [2012] zum time reverse modeling sowie von Schumacher [2011], die auf der Bayesschen Wahrscheinlichkeit beruhen.

Automatische Ersteinsatzbestimmung (Picken)

Um eine gute Lokalisierung zu erreichen, ist es zunächst wichtig, die Ersteinsätze möglichst genau bestimmen zu können. Gemeint ist der Zeitpunkt, zu dem die Welle erstmals am Sensor ankommt. Von Schechinger [2005] wurden umfangreiche Untersuchungen zur Genauigkeit und zum Einfluss der Ersteinsatzbestimmung auf die Lokalisierung durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass eine manuelle Ersteinsatzbestimmung deutlich genauer ist. Die Qualität der automatischen Ersteinsatzbestimmung hängt entscheidend vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis der untersuchten Signale ab. Dennoch ist es aufgrund der Menge an auftretenden Schallemissionsereignissen entscheidend, diese Ersteinsatzbestimmung automatisch durchzuführen, da ein manuelles Heraussuchen der Zeitpunkte zu aufwendig ist [Große 1999].

Für die automatische Ersteinsatzbestimmung sind einfache Kriterien wie das Überschreiten eines Grenzwertes oder die Steigung des Signales nicht ausreichend. Solche Kriterien können als Triggerbedingungen verwendet werden, um die Aufzeichnung zu starten. Für die zeitgenaue Berechnung des Ersteinsatzes, sind aufwendigere Algorithmen zu verwenden. Einen Überblick

gibt Kurz [2005]. Eine Auswertung der Genauigkeit unterschiedlicher Verfahren ist Schechinger [2005] zu entnehmen.

Grenzen der Lokalisierung

Die Berechnung von Lokalisierungen funktioniert am besten bei homogenen Materialien wie Stahl. In diesen Materialien kann von einer gleichmäßigen Schallgeschwindigkeit im Testkörper ausgegangen werden. Anders ist es beispielsweise bei Holz, das durch sein inhomogenes und anisotropes Gefüge, eine Aussage über die Schallgeschwindigkeit nur sehr schwer ermöglicht. Bei Beton stellt das Gefüge aus Zement und Zuschlag, sowie grundsätzlich vorhandene Risse die Lokalisierung vor eine Herausforderung. Hinzu kommt, dass sich die Schallgeschwindigkeit im Testkörper mit zunehmender Schädigung ändert.

Die Geometrie der Testkörper ist für die Genauigkeit der Lokalisierung ebenfalls von Bedeutung. Komplizierte Geometrien sind deutlich schwerer zu berechnen, wie z.B. Quader, oder plattenförmige Bauteile. Auch die Größe der Testkörper ist entscheidend, da die Welle auf ihrem Weg durch das Bauteil Energie infolge der Materialdämpfung verliert. Hinzu kommen mögliche Geometrieeffekte wie Reflexionen der Wellen, die das Messergebnis zusätzlich verfälschen können. Die sich u.a. aus diesen Faktoren ableitende Signalqualität ist eine Grundvoraussetzung für die Ersteinsatzbestimmung und eine qualitativ hochwertige Lokalisierungsrechnung.

Zahlreiche Untersuchungen konnten den Einfluss der Sensoranordnung auf die Lokalisierung nachweisen. Die Lokalisierung funktioniert mit der höchsten Genauigkeit, wenn die Sensoren rings um den Ursprungsort angebracht wurden. Dies ist in den meisten Fällen in der Mitte des Testkörpers der Fall. Je weiter sich das Ereignis am Rand eines solchen Testkörpers befindet, umso ungenauer ist die Lokalisierung. Daher ist es wichtig, die Sensoren möglichst auf der gesamten Testkörperoberfläche zu verteilen. Eine symmetrische Aufteilung ist dabei allerdings auch zu vermeiden. Dabei könnte es zu Doppeldeutungen bei der Lokalisierungsrechnung kommen.

Grundsätzlich ist es bei jeder Anwendung der Schallemissionsanalyse entscheidend, sich der jeweiligen Grenzen und Genauigkeiten der Lokalisierungsrechnung bewusst zu sein. Nur so lassen sich Fehlinterpretationen vermeiden und belastbare Untersuchungsergebnisse generieren.

3.2 Brandverhalten von Beton

3.2.1 *Änderung der mechanischen Eigenschaften*

Beton besteht aus verschiedenen Komponenten wie Wasser, Zuschlag verschiedener Korngrößen und Zement. Bei hochfesten Betonen werden zusätzlich noch Zusatzstoffe wie Silikastaube und Zusatzmittel wie beispielsweise Fließmittel oder Verzögerer zugegeben. Alle diese Komponenten reagieren unterschiedlich auf Temperatureinwirkung [Niry 2013, Mazzucco 2013]. Die Eigenschaften von Beton sind daher stark von seiner Temperatur abhängig. Dies zeigt sich deutlich bei der Porosität und damit bei der Permeabilität [Torrent 1999, Jooss 2002, Reinhardt 2003, Li 2008, Lun 2013]. Bei hohen Temperaturen, die im Brandfall auftreten, kommt es schließlich zu Änderungen der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Festigkeitseigenschaften. Ursache hierfür sind Umwandlungs- und Zersetzungsprozesse im Betongefüge.

In einem Temperaturbereich von 30-120°C entweicht nach Huismann [2010] zunächst das im Beton physikalisch gebundene Wasser. Ab 120°C beginnt der Abbau des Zementgels. Zunächst durch Dehydratation, dann durch den Zerfall des Portlandits (450–550°C) und schließlich durch Zersetzung der CSH-Phasen (600-700°C). Überlagert wird dies durch die Quarzumwandlung der Gesteinskörnung (ca. 573°C). Bei Temperaturen ab 1100°C kann es schließlich zum Schmelzen verschiedener Bestandteile des Betons kommen [Schneider 1982, Waubke 1973, Korsun 2013].

Abgesehen von diesen Umwandlungsprozessen, bilden sich bei Brandeinwirkung Risse im Beton. Diese sind größtenteils auf innere Spannungen aufgrund geometrisch ungleichmäßiger Erwärmung zurückzuführen. Jedoch schädigen auch sie die Betonstruktur in relevantem Maße. Eine besondere Art der Schädigung von Beton stellt das im Rahmen dieser Arbeit messtechnisch erfasste Abplatzen dar. Darauf wird im Folgenden genauer eingegangen.

3.2.2 *Abplatzverhalten von Beton*

Bei einer Beanspruchung von Beton durch einen Brand, kann es zu Abplatzungen an der Betonoberfläche kommen. Je nachdem, wie stark die Beanspruchung ist, kann dies zu einem Verlust von großen Teilen der statischen Höhe des Betonbauteiles führen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist aber zumindest ein Freilegen der Bewehrung zu befürchten. Der Stahl ist dann der Brandbeanspruchung ohne Schutz ausgesetzt.

Zahlreiche Untersuchungen und Forschungsvorhaben haben sich mit dieser Problematik auseinandergesetzt. Einen guten Überblick liefert hier Jansson [2013]. Das Auftreten von Abplatzungen ist nur sehr schwer vorherzusagen. Dies hängt einerseits an den verschiedenen Möglichkeiten, die Betonzusammensetzung anzupassen. Des Weiteren gibt es für die Auslösung von Abplatzungen bei der Brandeinwirkung verschiedene Faktoren, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen. Hierzu gehören hinsichtlich des Betonverhaltens der Feuchtegehalt, die Festigkeit, das Porenvolumen und die Porengröße, die Zusammensetzung der Zuschläge, die Zementart [Bazant 1996, Schneider 1979, Paliga 2003, Kolšek 2013, Jansson 2010, Jansson 2013, Felicetti 2013].

Hinsichtlich der Temperaturbeanspruchung zählen zu den Faktoren die Geschwindigkeit, mit der das Bauteil aufgeheizt wird [Kap. 3.2.5], die Betontemperatur, die Dauer der Brandbeanspruchung sowie der Verlauf der Abkühlphase [Kordina 1975, Kordina 1999, Meyer-Ottens 1972, Meyer-Ottens 1974, Schneider 1982, Budelmann 1987, Ehm 1986, Korsun 2013]. Darüber hinaus haben geometrische Effekte aufgrund von Bauteilabmessungen sowie die Bewehrungsanordnung einen Einfluss [Korten 2013].

Grundsätzlich werden verschiedene Arten von Abplatzungen unterschieden [Meyer-Ottens 1975 und Horvath 2004]:

- Abplatzen der Zuschlagsstoffe (Aggregate spalling)
- Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)
- Explosionsartige Abplatzungen (Explosive spalling)

Die Abplatzungen der Zuschlagsstoffe treten in Form von Zersplittern der einzelnen Zuschlagskörner auf. Sie sind daher eher kleinere Defekte, die oftmals optisch nicht einmal zu erkennen sind. Dennoch entstehen Schwächungen des Gefüges. Die Effekte werden ausgelöst durch Freisetzen und Verdampfen von chemisch gebundenem Wasser oder Volumenveränderungen aufgrund von Phasenübergängen im Material.

Das Abfallen von Betonschichten in Form von einzelnen Schollen führt ebenfalls zu einer Zerstörung der Betonoberfläche. Auch hierbei ist eine relevante Abnahme der statischen Höhe nicht auszuschließen. Die Betonschollen lösen sich ab und fallen aufgrund der Schwerkraft nach unten. Gründe für diese Effekte sind u.a. Rissbildung, temperaturbedingte Eigenspannungen, Bauteilverformungen sowie die Zermürbung des Materials aufgrund von physikalischen und chemischen Prozessen.

Die relevanteste Art des Abplatzens von Beton stellen allerdings explosionsartige Abplatzungen dar. Hier finden die Abplatzungen unter hoher Energiefreisetzung statt. Dies stellt die gefährlichste Art der Abplatzungen dar. Zum einen sind die mit hoher Geschwindigkeit fliegenden Betonteile eine Gefahr für Personen, die sich noch in dem Bereich aufhalten, wie z.B. Rettungsmannschaften. Darüber hinaus ist bei der Geschwindigkeit, mit der die Abplatzungen auftreten, eine sehr rasche Abnahme der statisch relevanten Bauteildicke und damit ein Bauteileinsturz zu befürchten.

Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Festigkeit des Betons einen sehr großen Einfluss auf das Abplatzverhalten hat. Gerade bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen, ist ein Auftreten von explosiven Abplatzungen unter Brandbeanspruchung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten [Kalifa 2000, Klingsch 2010, Horvath 2003, Horvath 2004, Dehn 2010, Huisman 2010, Pistol 2016].

Die Details der Vorgänge im Beton, die das Abplatzverhalten auslösen werden nach wie vor untersucht und sind noch nicht abschließend geklärt. Zur Betrachtung der Schädigung des

Betons wird grundsätzlich zwischen thermomechanischen und thermohydraulischen Prozessen unterschieden.

Unter den thermomechanischen Prozessen versteht man Eigenspannungen im Beton, die aufgrund ungleichmäßiger Erwärmung zustande kommen. Ein Testkörper wird grundsätzlich von der Oberfläche her beflammt und erwärmt. Dabei kommt es zu einer ungleichen Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitt. Die aus der damit verbundenen Temperaturdehnung entstehenden Spannungen können die Festigkeit des Betons übersteigen. Dadurch kommt es zu Rissbildungen und schlagartigen Entspannungen, welche die weitere Rissbildung begünstigen. Diese Prozesse sind allerdings nicht allein in der Lage, explosive Abplatzungen auszulösen.

Hinzu kommen die thermohydraulischen Prozesse. Diese hängen mit dem Feuchtetransport im Beton zusammen. Die Restfeuchte des Betons sowie das physikalisch gebundene Wasser werden frei und verdampfen aufgrund der Temperatur. Dies führt zu einer Volumenvergrößerung und somit zu einem erhöhten Poreninnendruck im Beton. Verstärkt wird dies durch das dichte Gefüge des hochfesten Betons, dessen w/z-Wert und damit der Porenanteil, äußerst gering ist. Hinzukommt, dass der Feuchtetransport sowohl auf die Bauteiloberfläche, als auch ins Bauteilinnere stattfindet. Da aufgrund des Temperaturgradienten im Bauteil der innere Bereich kälter ist, kondensiert der Wasserdampf in diesem Bereich. Es entsteht eine Porensättigung und somit eine Sperrzone für weiteren Wasserdampf in diesem Bereich. Der Wasserdampf kann nur noch in eine Richtung entweichen. Wenn die Temperatur an dieser Sperrzone einen kritischen Wert erreicht, erzeugt der entstehende Wasserdampfdruck Spannungen, welche selbst die Festigkeit des hochfesten Betons deutlich übersteigen. Es kommt zu explosiven Abplatzungen.

3.2.3 *Schutzwirkung von Polypropylen-Fasern*

Durch die Zugabe von Polypropylen (PP)-Fasern kann das Auftreten von Abplatzungen drastisch reduziert oder sogar unterbunden werden. Diese werden in einer Menge von 1 bis 2 kg/m³ dem Beton beigemischt. Der Einsatz von PP-Fasern als Brandschutzmaßnahme ist inzwischen Stand der Technik. Ihre Wirkungsweise ist aber nach wie vor nicht abschließend geklärt.

Zahlreiche Forschungsvorhaben und daraus resultierende Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Wirkungsweise und der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit der PP-Fasern. Beispielsweise seien Waubke [1973], Kalifa [2001], Glatzl, [2004], Rath [2004], Nischer [2005], Khoury [2008], Corpas [2013], Maluk [2013] und Alonso [2013], Bošnjak [2014] und Pistol [2016] genannt.

Es gibt in den genannten Arbeiten unterschiedliche Theorien zur Wirkungsweise der PP-Fasern. Eine gute Zusammenfassung ist Pistol [2016] zu entnehmen. Als gängigste Erklärung wird davon ausgegangen, dass PP-Fasern unter Brandeinwirkung schmelzen. Hierdurch werden kleine Kapillarverbindungen zwischen den Poren geschaffen, aus denen der entstehende Dampfdruck entweichen kann. In wie weit sich die Permeabilität von Beton mit und ohne PP-Fasern unter Temperatureinwirkung verändert, wurde durch Bošnjak [2014] experimentell untersucht [Abb. 3-14]. Hier wird der Einfluss der PP-Fasern deutlich. Die Permeabilität des Betons steigt bereits

bei geringeren Temperaturen an und ermöglicht somit einen frühzeitigen Abbau des Porendrucks.

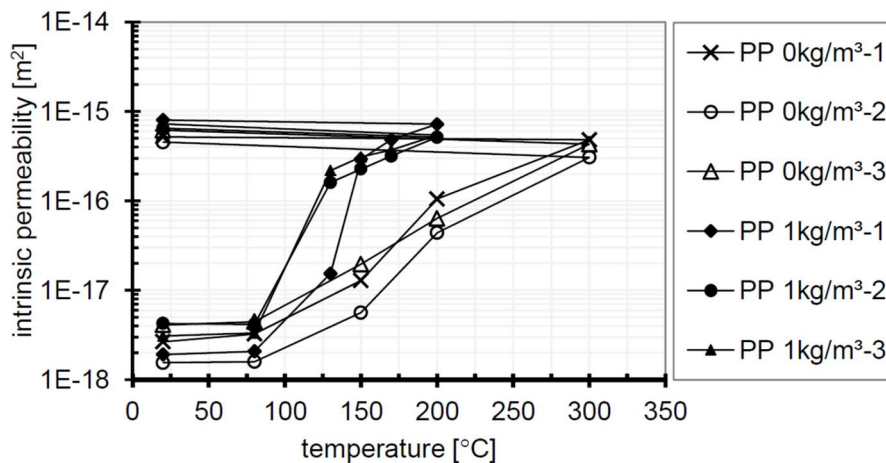


Abb. 3-14: Permeabilität von Beton unter Temperatureinwirkung [Bošnjak 2014]

Weitere Theorien beschäftigen sich mit den porösen Übergangszonen zwischen Zement und Zuschlag. Demzufolge sind diese Bereiche bei Normalbetonen entscheidend für den Feuchtigkeitstransport und damit für das Entweichen des Dampfdruckes. Aufgrund des niedrigen w/z -Wertes von hochfesten Betonen, sind diese Zonen kleiner und nicht miteinander verbunden. PP-Fasern schaffen nach ihrem Schmelzen eine Verbindung in diesen Zonen.

Andere Ansätze gehen davon aus, dass die Entlastungskanäle für den Wasserdampf nicht durch das Schmelzen der PP-Fasern erschaffen werden, sondern die Fasern eine lokale Mikrorissbildung auslösen. Zurückgeführt wird dies auf die Tatsache, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient von Polypropylen bei Raumtemperatur mehr als das Zehnfache von Beton beträgt, wodurch lokale Spannungen im Beton auftreten können, die zu einer solchen Mikrorissbildung führen. Darüber hinaus wurden Betonproben nach einer Temperaturbeanspruchung mit Rasterelektronenmikroskopen betrachtet und dabei eine solche Mikrorissbildung nachgewiesen.

Inhalt weiterer Untersuchungen ist die Reduzierung der Fasermenge, sowie der Einfluss von Faserdicke und Faserlänge [Hager 2009, Sideris 2013, Pistol 2016]. Eine besondere Herausforderung ist die Herstellung von fasermodifizierte Betonrezepturen, die ZTV-ING konform sind und gleichzeitig gute Frischbetoneigenschaften haben. Durch das Zusetzen von PP-Fasern steigt beispielsweise der Wasserbedarf und die Verarbeitbarkeit sinkt rapide. Dies ist durch passende Fließmittel auszugleichen [Dehn 2010].

Weitere Möglichkeiten das Abplatzverhalten zu verbessern, wird in der Verwendung von Polyethylen-Fasern, textilen Fasern oder Stahlfasern vermutet. Die Möglichkeiten und Grenzen, sind Teil aktueller Forschungsvorhaben [Kusterle 2004, Heo 2010, Santos 2013].

3.2.4 *Brandprüfung von Tunnelbeton*

Um beim Betrieb von Tunneln eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten, wurden die Anforderungen an Tunnelbauwerke in verschiedenen Regelwerken erfasst und zusammengestellt [Schlüter 2004]. Für die Bundesrepublik Deutschland gibt es hierzu die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für Kunstbauten [ZTV-K] sowie die Zusätzlichen Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau und den Betrieb von Straßentunneln [ZTV-Tunnel], die aber beide durch die Zusätzlichen Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten [ZTV-ING] ersetzt wurden, die von der Bundesanstalt für Straßenwesen herausgegeben werden. Dort sind die entsprechenden Inhalte im Teil 5 „Tunnelbau“ zu finden.

Darüber hinaus gibt es die Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln [RABT] und für den Bereich der Eisenbahntunnel, die Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln [EBA-Richtlinie], des Eisenbahn-Bundesamtes sowie die Richtlinien der DB Netz AG [Richtlinienreihe 853 der DB Netz AG]. Die Inhalte der Normenwerke der DIN 4102 (Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen) sowie der DIN 1045 (Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton) sind genauso zu beachten, wie die DIN EN1991-1-2 (Brandwirkungen auf Tragwerke) und DIN EN 1992-1-2 (Tragwerksbemessung für den Brandfall).

Zu den Anforderungen hinsichtlich Sicherheit und Brandschutz zählen u.a. Vorgaben für Lüftungsanlagen, Größe des Verkehrsraumes, Betriebseinrichtung, Beleuchtung, Beschilderung, Flucht und Rettungswege, Anlagentechnik und verwendbare Baustoffe und Bauteile.

Hinsichtlich des baulichen Brandschutzes sind im Besonderen die Forderungen an die Tunnelinnenschale zu nennen. Diese ist so auszuführen, dass bei einem Brandereignis die Standsicherheit des Tunnels nicht gefährdet wird. Darüber hinaus muss die Dichtigkeit des Tunnels gewährleistet werden und die Verformung der Tunnelinnenschale darf die Gebrauchsfähigkeit des Tunneln nicht einschränken. Dies soll durch Auswahl entsprechender Betonrezepturen, die Dicke der Tunnelinnenschale von mindestens 30 cm sowie durch eine ausreichende Betonüberdeckung der Bewehrung gewährleistet werden.

Um dies zu prüfen, sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen notwendig. Dies stellt nach wie vor die einzige Möglichkeit dar, die brandschutztechnische Widerstandsfähigkeit von Betonrezepturen und Tunnelbauteilen aus Beton sicher nachweisen zu können [Dehn 2009, Kaundinya 2009, Robert 2013, Mueller 2013]. Zum experimentellen Nachweis von brandresistentem Beton werden verschiedene Brandkurven verwendet. Je nach Fragestellung und Anforderung aus den Richtlinien unterscheiden sich diese Kurven hinsichtlich Anstieg, Maximaltemperatur, Verweildauer bei Maximaltemperatur und verschiedenen Abkühlphasen. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Brandkurven sind im Folgenden in Kap. 3.2.5 dargestellt.

3.2.5 Brandkurven

Für die Temperatursteuerung der Brandversuchsöfen wurden verschiedene standardisierte Brandkurven verwendet, denen Richtlinien und Normen der Brandprüfung zu Grunde liegen [Kap. 3.2.4]. Die Brandkurven unterscheiden sich hinsichtlich des Temperaturanstiegs, der Höchsttemperatur und der Belastungsdauer [Abb. 3-15]. Teilweise wurden die standardisierten Temperatur-Zeit-Kurven durch früher einsetzende Abkühlphasen modifiziert oder ergänzt. Dies war notwendig, um die Versuchsdauer und damit die Datenmenge der Schallemissionsaufzeichnungen zu begrenzen, aber trotzdem das Bauteilverhalten während der Abkühlphasen erfassen zu können.

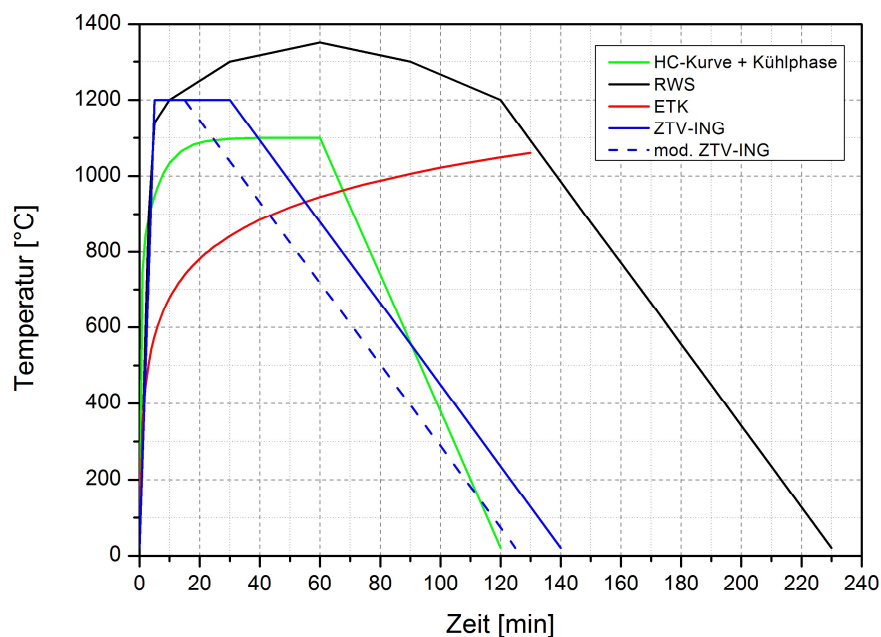


Abb. 3-15: Standardisierte Brandkurven, die in den Experimenten zur Anwendung kamen.

Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)

Die Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2 gilt für die brandschutztechnische Bauteilprüfung im Hochbau und kommt im gesamten europäischen Raum zur Anwendung [Dehn 2009]. Sie kann beschrieben werden durch:

$$\vartheta - \vartheta_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (\text{Gl. 3-3})$$

- ϑ Brandraumtemperatur in K
- ϑ_0 Temperatur der Testkörper bei Versuchsbeginn in K
- t Zeit in Minuten

In den Experimenten Q-ETK-130-0PP und Q-ETK-120-1PP wurde die ETK nach 30-minütiger Brandbeanspruchung abgebrochen und eine Abkühlphase eingeleitet.

ZTV-ING-Kurve

Die Temperatur-Zeit-Kurve nach den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ [ZTV-ING] ist für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln zugrunde zu legen. Sie hat einen deutlich schnelleren Temperaturanstieg als die Einheitstemperaturzeitkurve und eine maximale Temperatur von 1200°C.

Tab. 3-1: Temperaturverlauf der ZTV-ING-Kurve:

t [min]	0	5	30	140
Temp. [°C]	0	1200	1200	0

In den Experimenten Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP wurde die ZTV-ING-Kurve modifiziert, indem die Haltephase der Höchsttemperatur bereits nach 15 min Versuchsdauer beendet und die Abkühlphase somit schon früher eingeleitet wurde. Diese Kurve ist als mod. ZTV-ING in Abb. 5-1 dargestellt.

Hydrocarbon-Kurve (HC-Kurve)

Die Hydrocarbonkurve wurde entwickelt, um Flüssigkeitsbrände in Industrie- und Offshoreanlagen nachbilden zu können. Sie erreicht ein Temperaturmaximum von 1100°C und ist eine „offene“ Brandkurve. Das bedeutet, dass sie keine Abkühlphase aufweist [Blosfeld 2009]. Nach DIN EN 1991-1-2 wird die HC-Kurve gegeben durch:

$$\Theta_g = 1.080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 \quad (\text{Gl. 3-4})$$

Θ_g Gastemperatur im Brandabschnitt [°C]

t Zeit [min]

Im Experiment P-HC+K-70-0,9PP wurde nach einer Versuchsdauer von 60 min die HC-Kurve abgebrochen und eine Kühlphase angehängt, um eine „geschlossene Brandkurve“ zu erhalten [Abb. 3-15]. Daher die Bezeichnung HC+K.

Rijkswaterstaat-Kurve (RWS-Kurve)

Die niederländische RWS-Kurve wurde für die Prüfung von Eisenbahntunneln entwickelt. Mit einer Maximaltemperatur von 1350 °C erreicht sie die höchsten Temperaturen der derzeit verwendeten Brandprüfkurven. Damit überschreitet sie auch die Schmelz- oder Sintergrenze einiger Materialien. Ihr steiler Temperaturanstieg in den ersten 5 min ist mit der ZTV-ING vergleichbar. Abgesehen von den Niederlanden wird sie auch für die Prüfung von Eisenbahntunneln in der Schweiz, Österreich, Dänemark und Schweden verwendet. Der Verlauf der RWS-Kurve wird u.a. im TNO-Report „Fire Protection for Tunnels“ [Tan 2000] definiert.

Tab. 3-2: Temperatur-Zeit-Verlauf der Rijkswaterstaat-Kurve [Tan 2000]:

t [min]	0	3	5	10	30	60	90	120
Temp. [°C]	20	890	1140	1200	1300	1350	1300	1200

3.3 Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren für die Brandprüfung

Abgesehen von der Schallemissionsanalyse gibt es weitere Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung, die bei verschiedenen Fragestellungen der Brandprüfung zum Einsatz kommen. Abhängig von der Prüfaufgabe lieferten diese Verfahren hilfreiche zusätzliche Ergebnisse.

Eine Auswahl verschiedener Verfahren wird in diesem Kapitel vorgestellt. Detaillierte Informationen zu einigen davon können den Untersuchungen und Zusammenstellungen von Felicetti [2005] und Colombo [2007] entnommen werden. Grundsätzlich zeigt sich, dass eine Kombination von mehreren Messverfahren der Zerstörungsfreien Prüfung in der Praxis sehr hilfreich ist, um die Ergebnisse sicher interpretieren zu können.

Schallemissionsanalyse

In der vorliegenden Arbeit ist die Schallemissionsanalyse die zentrale Technik zur Beobachtung des Schädigungsverhaltens von Beton unter Brandbeanspruchung. An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin wurden ebenfalls Schallemissionsmessungen bei Brandprüfungen an Beton durchgeführt [Huisman 2010]. Hierbei wurden 3,60 m hohe Stahlbetonstützen mit einer Kantenlänge von 300 mm in einem Rohofen geprüft. Es wurden jeweils nur 4 Schallemissionssensoren eingesetzt. Aufgrund der Temperaturen im Ofen wurden die Sensoren über Wellenleiter mit dem Testkörper verbunden. Durch die geringere Anzahl an Sensoren und der Veränderungen des Signales durch die Wellenleiter war nur eine qualitative Schallemissionsanalyse [Kap. 3.1.5] möglich. Dennoch konnte eine klare Abhängigkeit der auftretenden Schallemissionen zur Schädigung der Stütze nachgewiesen werden. Es war sogar möglich Mikrorissbildung nachzuvollziehen.

Ultraschall

Ultraschallverfahren sind eine gängige Methode in der Zerstörungsfreien Prüfung. Die Prüfbarkeit von Testkörpern mit Ultraschall ist allerdings sehr stark materialabhängig. In homogenen Werkstoffen wie Metallen werden Messergebnisse mit hoher Auflösung und Genauigkeit durch Ultraschall erzielt. Die Anwendung an Beton ist messtechnisch anspruchsvoll. Durch die Zuschläge ist Beton ein Verbundwerkstoff, der den Ultraschallwellen viele Grenzflächen entgegengesetzt, an denen sie reflektiert, gestreut oder transmittiert werden. Dennoch ist es mit Ultraschall möglich, Fehlstellen in Beton zu finden, Dickenmessungen durchzuführen und Rückschlüsse auf den Schädigungszustand von Betonbauteilen zu ziehen. Entscheidend bei Messungen mit Ultraschall an Beton ist die Auswahl geeigneter Sensoren und die Ankopplung an die Testkörper. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie beispielsweise Ankleben mit Heißkleber, Aufbringen von Ultraschallgel oder Anpressen mit federgespannten Vorrichtungen [Reinhardt 2007, Große 1996, Krautkrämer 1990, DGZfP-B-4].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Untersuchungen mit Ultraschall an brandbeanspruchtem Beton durchgeführt. Hier ging es einerseits darum, das Schädigungsverhalten mit Ultraschall nachvollziehen zu können, aber auch die für die Berechnung der Lokalisierung erforderliche Schallgeschwindigkeiten in den Testkörpern zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-2 sowie in Kap.11.3 dargestellt.

Auch von anderen Arbeitsgruppen wurden Ultraschallmessungen zur Unterstützung ihrer Brandexperimente durchgeführt [Felicetti 2005, Benedetti 1998]. Huismann [2010] verwendete die bereits an die Testkörper angebrachten Schallemissionssensoren als Sender und Empfänger für Ultraschallmessungen und konnte somit, mit überschaubarem Aufwand, erfolgreiche Aussagen über das Schädigungsverhalten während seiner Brandexperimente generieren.

Thermographie

Bei der Thermographie handelt es sich um ein bildgebendes Messverfahren, bei dem die Infrarotstrahlung, die von Körpern ausgeht, aufgenommen und dann als Bild dargestellt wird. Somit wird das für das menschliche Auge unsichtbare infrarote Licht sichtbar angezeigt. Im Bauwesen wird das Verfahren unter anderem zum Auffinden von Wärmebrücken, zur Lokalisierung von Fehlstellen und Leckagen sowie zum Auffinden von verdeckten Strukturen, wie beispielsweise verputzten Fachwerkträgern verwendet. Bei Kenntnis der zu beobachtenden Oberfläche und der Umweltbedingungen ist es auch möglich, aus der Energie die Oberflächentemperatur der betrachteten Objekte zu errechnen [Fouad 2012].

Bei Brandversuchen ist der Einsatz der Thermographie für verschiedene Messaufgaben hilfreich. Zum einen lässt sich die unterschiedliche Erwärmung der Testkörperseiten erfassen und bildlich darstellen [Richter 2009]. Des Weiteren wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Schallemissionssensoren mit einer Thermographiekamera zu überwachen und eine thermische Überbelastung der Sensoren zu verhindern [Kap. 6.2].

Untersuchungen mit einer Thermographiekamera von Krapp [2011], visualisierten die Rissbildung auf der Testkörperoberfläche im Laufe der Brandexperimente [Abb. 3-16 rechts]. Darüber hinaus konnten Abplatzungen der Testkörperoberfläche mit der Wärmebildkamera aufgezeichnet werden [Abb. 3-16 links]. Bei den Experimenten am Brückenbrandprüfstand konnten die Abplatzungen auf der Wandoberfläche dokumentiert werden, da die Infrarotstrahlung durch den Brandrauch hindurch sichtbar war, während die Videokameras keine Bilder lieferten [Kap. 9.4].

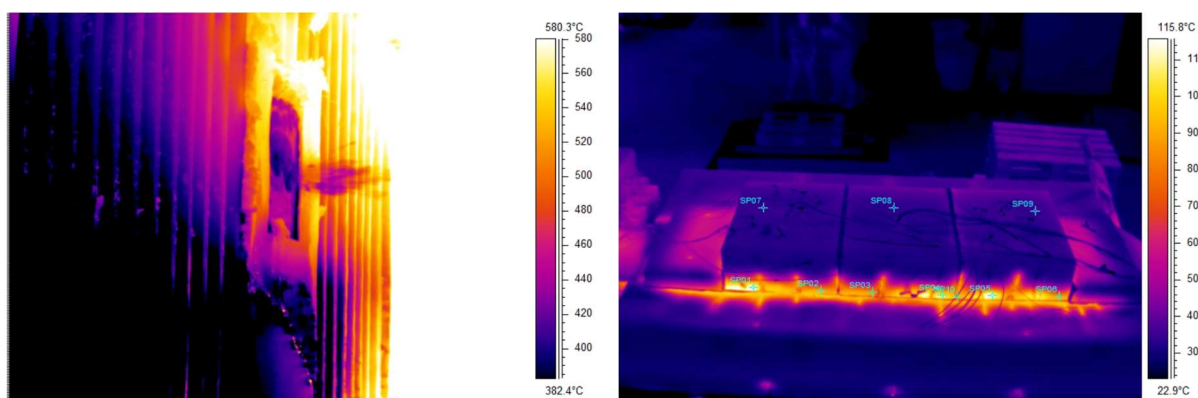


Abb. 3-16: Thermographicaufnahmen einer Abplatzung (links) und von Rissbildung während eines Brandexperimentes (rechts) [Krapp 2011].

Rückprallhammer

Mit dem Rückprallhammer oder auch Schmidhammer [DIN 1048 bzw. DIN EN 13791], ist eine zerstörungsfreie Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton möglich. Hierbei wird der Rückprallhammer auf der Betonoberfläche aufgesetzt. Durch eine gespannte Feder beschleunigt man ein Gewicht, dessen Bewegungsenergie über einen Schlagbolzen auf den Testkörper übertragen wird. Abhängig von der Festigkeit des Testkörpers prallt der Bolzen entsprechend zurück. Dieser Rückprallweg kann angezeigt und in die Energie umgerechnet werden. Die Festigkeit steht in Abhängigkeit zu dieser Energie und kann aus Tabellen abgelesen werden [DIN EN 12504-2]. Untersuchungen an hochfestem Beton wurden u.a. von Rinder [2000] durchgeführt. Anwendungen an brandbeanspruchten Betontestkörpern sind bei Colombo [2007] und Felicetti [2005] zu finden.

Bohrwiderstandsmessung

Die Messung des Bohrwiderstandes wird im Holzbau regelmäßig eingesetzt. Hierbei wird eine maschinelle Bohrung in das Prüfmateriale durchgeführt, wobei die Eindringtiefe des Bohrers und der Widerstand, der dem Bohrer entgegengesetzt wird, aufgezeichnet und gegeneinander dargestellt werden. Um den Widerstand messen zu können, wird das benötigte Drehmoment des Bohrmaschinenmotors gemessen. Bei Holz lässt sich hieraus eine tiefenabhängige Aussage über die Dichte generieren.

Bohrwiderstandsmessungen an brandbeanspruchten Betonen wurden von Felicetti [2006] durchgeführt. Hierfür wurde eine Bohrmaschine, die sich für Beton eignet, umgebaut und mit Messtechnik versehen. Als Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich eine klare Abhängigkeit vom Schädigungsgrad des brandbeanspruchten Betons zum Bohrwiderstand.

Die Vorteile des Verfahrens sind tiefenabhängige Aussagen über den Materialzustand und es ist einfach anwendbar. Allerdings handelt es sich bei der Messung nicht um ein zerstörungsfreies Verfahren. Es ist eher als minimalinvasiv zu bezeichnen. Und man erhält, bezogen auf die Testkörperoberfläche immer nur eine Punktmessung.

Impakt-Echo

Beim Impakt-Echo-Verfahren wird durch einen mechanischen Stoß auf die Oberfläche des Prüfkörpers eine Welle erzeugt. Die daraus resultierende Oberflächenbewegung wird durch einen Beschleunigungssensor auf der Oberfläche aufgezeichnet.

Ein solcher Stoß erzeugt ein breitbandiges Signal. Unter anderem werden Plattenwellen, sogenannte Lamb-Wellen erzeugt. Bei diesen gibt es einen Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, angeregter Frequenz und der Plattendicke abhängen [Gibson 2005, Groschup 2015]. Durch eine Frequenzanalyse des aufgezeichneten Signales, lässt sich somit die Bauteildicke bestimmen. Bei bekannter Bauteildicke ist es möglich durch die Signalanalyse wiederum die Schallgeschwindigkeit im Testkörper zu berechnen und daraus Schlüsse auf den Schädigungsgrad des Bauteiles ziehen [Reinhardt 2007, Große 2005, Große 1998, Lin 1996, Sansalone 1997, und Wiggenhauser 2004].

Für die Prüfung der Dicke von Tunnelinnenschalen wird das Verfahren standardmäßig angewandt [BMVBW]. Erfolgreiche Untersuchungen von brandbeanspruchtem Beton mit dem Impakt-Echo-Verfahren wurden beispielsweise von Epasto [2009] durchgeführt. Es zeigt sich, dass das Verfahren gut geeignet ist, um in-situ bei bekannten Bauteildicken Aussagen über die Schädigung machen zu können.

Bei verschiedenen Experimenten im Rahmen dieser Arbeit wurden begleitend Untersuchungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren durchgeführt. Diese Machbarkeitsstudien sollten klären, in wie weit es grundsätzlich möglich, ist die vorhandene Messtechnik für diese Anwendung einzusetzen. Geprüft wurde zum einen während eines Brandversuchs (P-HC+K-65-1,5PP_IE), um die zeitliche Veränderung bei einer Brandbeanspruchung nachvollziehen zu können [Abb. 3-17]. Darüber hinaus wurden Messungen an der Wand des Brückenprüfstandes durchgeführt, um Aussagen über den Schädigungsgrad zu erhalten [Abb. 3-18].

Die Ergebnisse ließen den Schluss zu, dass die Methode grundsätzlich in der Lage ist, Veränderungen des Materials aufgrund von Brandeinwirkung zu detektieren, da an den zu erwartenden Stellen Veränderungen in den Messkurven zu sehen waren. Um belastbare und quantitative Messergebnisse zu erhalten sind allerdings weiterführende Untersuchungen und Entwicklungsschritte notwendig. Fragestellungen für solche Untersuchungen wären die Auswahl geeigneter Sensoren, der Störeinfluss durch Ofengeräusche sowie Fehler durch Geometrieeffekte der Testkörper.



Abb. 3-17: Impakt-Echo Messungen während des Brandexperimentes P-HC+K-65-1,5PP_IE.



Abb. 3-18: Untersuchungen mit der Impakt-Echo-Methode an der durch Brand geschädigten Wand nach dem Experiment am Brückenbrandprüfstand.

Lasertachymeter

Um die Abplatztiefen der geprüften Testkörper zu erfassen, ist es möglich, die beflamten Seiten der Testkörper mit einem Lasertachymeter [Abb. 3-19] zu vermessen. Versuche und Entwicklungen zu diesem Messverfahren wurden durch die MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Aus den Tachymetermessungen vor und nach den Brandprüfungen werden Oberflächennetze generiert. Nach einer grafischen Generierung und Überlagerung dieser Netze können Tiefenprofile der Abplatzungen erstellt werden [Dehn 2010]. Zur Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Brandprüfungen werden, zusätzlich zu den Tiefenprofilen, die Maximal- und Durchschnittswerte der Abplatzungen ausgewertet [Dehn 2009].



Abb. 3-19: Abplatztiefenbestimmung mit einem Lasertachymeter [Juknat 2014]

Die Abplatztiefenbestimmung mit dem Lasertachymeter wurde an allen Testkörpern durchgeführt, die im Rahmen dieser Arbeit geprüft wurden [Juknat 2014]. Sie dienten, in Verbindung mit der Bilddokumentation, zur Einordnung der Ergebnisse der Zerstörungsfreien Prüfung. Die Ergebnisse der Abplatztiefenbestimmung sind dem Anhang zu entnehmen.

Mikrowellen-Feuchtemessung

Bei der Schädigung von Beton unter Brandbeanspruchung spielt die Betonfeuchte eine entscheidende Rolle [Kap. 3.2.2]. Um die Feuchte im Rahmen von Brandexperimenten messtechnisch zu erfassen, werden die Testkörper vor und nach den Experimenten gewogen. Aus den Differenzen lassen sich Rückschlüsse auf den Feuchtigkeitsverlust ziehen. Diese Methode kann allerdings nur eine gemittelte Aussage über den gesamten Testkörper generieren.

Ein Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung zur Feuchtebestimmung ist die Mikrowellen-Feuchtemessung [Göller 1992]. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Feuchte im Bauteil an verschiedenen Stellen und verschiedenen Tiefen zu messen. Das Verfahren analysiert die dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Wird durch Mikrowellen-Frequenzen ein elektromagnetisches Feld angelegt, rotieren die Moleküle mit der Frequenz des Feldes. Um den Testkörper dreidimensional erfassen zu können, kommen bei den Messungen mehrere Sensoren, die auf unterschiedliche Tiefen optimiert, sind zum Einsatz. Somit ist es möglich, Aussagen über die Feuchteverteilung in verschiedenen Schichten in der Tiefe zu erhalten. Bezogen auf die Fläche werden Rastermessungen an verschiedenen Stellen des Testkörpers durchgeführt. Für eine solche Messung können auch handgeführte oder robotergestützte Scanner verwendet werden [Göller 2008].



Abb. 3-20: Sensoren zur Mikrowellen-Feuchtemessung auf dem Testkörper, während des Brandexperimentes Qk-RWS-70-1,5PP und Qk-RWS-70-2PP.

Bei den Experimenten Qk-RWS-70-1,5PP und Qk-RWS-70-2PP [Kap. 5.3] wurden verschiedene Mikrowellensensoren der Firma hf sensor Leipzig auf der Oberfläche der Testkörper aufgestellt und getestet [Abb. 3-20]. Die Ergebnisse zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist, die sich ändernde Feuchte im Testkörper zu erfassen und auch einen zeitlichen Verlauf abbilden zu können. Dies war allerdings stark abhängig vom Sensor und konnte nicht auf eine genaue Feuchte kalibriert werden. Hierfür sind umfangreiche weitere Untersuchungen und Entwicklungsschritte notwendig. Ein Einsatz von Scannersystemen ist für diese Prüfaufgabe zu empfehlen. Ein solches System stand aber für den Test nicht zur Verfügung.

4 Versuchsprogramm

4.1 Herangehensweise und Entwicklung des Versuchsprogrammes

Um die Möglichkeiten des Einsatzes zerstörungsfreier Prüfverfahren für eine spezielle Anwendung zu untersuchen, sind grundsätzlich verschiedene Fragen zu klären. Viele dieser Fragen kann man zwar im Vorfeld abschätzen oder planen, Gewissheit ist jedoch nur über experimentelle Versuchsreihen zu erlangen.

Grundsätzlich muss geklärt werden, wie die Messtechnik an den betroffenen Objekten zu befestigen ist. Dabei darf der Versuchsaufbau und damit das ursprüngliche Ergebnis nicht beeinflusst werden und die Messtechnik darf weder gefährdet noch beschädigt werden. Gleichzeitig muss sie allerdings so angebracht werden, dass ein optimales Messergebnis erzielt wird. Die Abhängigkeit dieser Messergebnisse von der Testkörpergeometrie, der Sensoranordnung und den Messereinstellungen ist genauso relevant wie das Erfassen und möglicherweise Eliminieren von Störquellen [Kap. 6].

Zur Untersuchung der Möglichkeiten von zerstörungsfreien Prüfverfahren wurden in den Einrichtungen der MFPA Leipzig GmbH zwölf Brandexperimente durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden [Kap. 5]. Die einzelnen Brandexperimente unterscheiden sich hinsichtlich Testkörperabmessungen, Brandkurven und Betonrezepturen [Tab. 4-1], aber auch hinsichtlich Sensoranordnungen verwendeter Sensoren und Messereinstellungen. Da einige Parameter einen großen Einfluss auf die Anwendung der Schallemissionsanalyse haben, sind die Versuchsreihen nicht direkt miteinander vergleichbar. Sie müssen über zusätzliche Messungen [Kap. 7] und Plausibilitätsüberlegungen in Zusammenhang gebracht werden.

Um dennoch eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Experimenten zu bekommen, wurden für jeden Versuchsaufbau mindestens zwei, einander zugehörige Experimente durchgeführt, bei denen lediglich ein Versuchsparameter geändert wurde. Geändert wurden jeweils nur der Anteil an PP-Fasern in der Betonrezeptur oder die verwendeten Brandkurven.

Die folgenden Bezeichnungen wurden für die die Brandexperimente verwendet:

Testkörperform–Brandkurve–Druckfestigkeit [N/mm²]-Fasergehalt [kg/m³]PP

So steht beispielsweise *Q-ETK-120-1PP* für ein Experiment mit quaderförmigen Testkörpern [Kap. 5.1], welche mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) [Kap. 3.2.5] getestet wurden, eine Druckfestigkeit von ca. 120 N/mm² und einen Polypropylenfasergehalt von 1 kg/m³ haben. Alle Brandexperimente sind mit diesem Code versehen und in Tab. 4-1 aufgeführt.

Tab. 4-1: Liste der durchgeführten Brandexperimente:

Code	Probekörper	Brandkurve	PK-Abmessungen [cm]	Druckfestigkeit	Fasergehalt	Anzahl PK
Q-ETK-130-0PP	Quader	ETK	70 x 70 x 30	130 N/mm ²	0 kg/m ³	3
Q-ETK-120-1PP	Quader	ETK	70 x 70 x 30	120 N/mm ²	1 kg/m ³	3
Q-ZTV-90-0PP	Quader	mod. ZTV-ING	70 x 85 x 30	90 N/mm ²	0 kg/m ³	3
Q-ZTV-80-1PP	Quader	mod. ZTV-ING	70 x 85 x 30	80 N/mm ²	1 kg/m ³	3
P-HC+K-65-1,5PP_IE	Platte	HC + Kühlphase	344 x 161 x 40	65 N/mm ²	1,5 kg/m ³	1
P-ZTV-70-0,9PP	Platte	ZTV-ING	344 x 161 x 40	70 N/mm ²	0,9 kg/m ³	1
P-RWS-70-0,9PP	Platte	RWS	344 x 161 x 40	70 N/mm ²	0,9 kg/m ³	1
Qk-RWS-70-2PP	Quader	RWS	80 x 80 x 10	70 N/mm ²	2 kg/m ³	1
Qk-RWS-70-1,5PP	Quader	RWS	80 x 80 x 10	70 N/mm ²	1,5 kg/m ³	1
Q-ZTV-75-2PP-US_unten	Quader	ZTV-ING	70 x 85 x 30	75 N/mm ²	2 kg/m ³	1
Q-ZTV-75-2PP-US_oben	Quader	ZTV-ING	70 x 85 x 30	75 N/mm ²	2 kg/m ³	1
B-Real-35	Brückenprüfstand	Realbrand	1000 x 450 x 50	35 N/mm ²	0 kg/m ³	1

4.2 Betonrezepturen

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Testkörper mit unterschiedlichen Betonrezepturen verwendet. Zur Übersicht werden sie im Folgenden nach ihren charakteristischen Unterschieden in Bezug auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen (gerundete Werte), dem Polypropylenfasergehalt in kg/m^3 und der Ultraschallgeschwindigkeit der P-Welle vor der Brandbeanspruchung eingeteilt. Letztere wurde durch Ultraschall-Durchschallung ermittelt. Eine Übersicht aller Betonrezepturen ist Tab. 4-2 zu entnehmen. Die Bezeichnungen für die einzelnen Brandprüfungen bestehen wie in Kap.4.1 eingeführt, aus:

Testkörperform–Brandkurve–Druckfestigkeit [N/mm²]-Fasergehalt [kg/m³]-PP

Die Details der Betonrezepturen sind im Anhang zu finden. Wobei aus Geheimhaltungsgründen der Projektpartner nicht alle Rezepturen in vollem Umfang zugänglich waren und daher nicht aufgeführt werden konnten. Für die Interpretation der Schallemissionsergebnisse ist dies aber von untergeordneter Bedeutung, da die relevanten Werkstoffparameter der Testkörper vorliegen [Tab. 4-2].

Tab. 4-2: Informationen zu den Betonrezepturen der einzelnen Experimente:

Code	Prüfdatum	Druckfestigkeit	Fasergehalt	Verwendete PP-Faser	US-Geschw. vor Experiment
Q-ETK-130-OPP	23.11.2010	130 N/mm ²	0 kg/m ³	-	5250 [m/s]
Q-ETK-120-1PP	24.11.2010	120 N/mm ²	1 kg/m ³	PB EUROFIBER HPR	5140 [m/s]
Q-ZTV-90-OPP	26.07.2011	90 N/mm ²	0 kg/m ³	-	4854 [m/s]
Q-ZTV-80-1PP	27.07.2011	80 N/mm ²	1 kg/m ³	PB EUROFIBER HPR	4808 [m/s]
P-HC+K-65-1,5PP_IE	11.03.2013	65 N/mm ²	1,5 kg/m ³	KrampeFibrin PM 6/18	4500 [m/s]
P-ZTV-70-0,9PP	16.05.2013	70 N/mm ²	0,9 kg/m ³	KrampeFibrin PM 6/18	4610 [m/s]
P-RWS-70-0,9PP	17.05.2013	70 N/mm ²	0,9 kg/m ³	KrampeFibrin PM 6/18	4610 [m/s]
Qk-RWS-70-2PP	30.07.2013	70 N/mm ²	2 kg/m ³	BELMIX BM6	4560 [m/s]
Qk-RWS-70-1,5PP	30.07.2013	70 N/mm ²	1,5 kg/m ³	BELMIX BM6	4470 [m/s]
Q-ZTV-75-2PP-US_unten	10.12.2013	75 N/mm ²	2 kg/m ³	PB EUROFIBER REF 506	4800 [m/s]
Q-ZTV-75-2PP-US_oben	10.12.2013	75 N/mm ²	2 kg/m ³	PB EUROFIBER REF 506	4800 [m/s]
B-Real-35	21.03.2013	35 N/mm ²	0 kg/m ³	-	4300 [m/s]

4.3 Datensätze und Messgeräteeinstellungen

Die Schallemissionsanalyse wurde bei elf Brandprüfungen eingesetzt. Durch die Verfügbarkeit mehrerer Transientenrekorder [Kap. 3.1.3] war es möglich, bei einigen Versuchen parallel aufzuzeichnen. Daher liegen 18 Datensätze zur Auswertung vor, welche in Tab. 4-3 aufgeführt sind. Ergänzend zu der Bezeichnung der Brandexperimente aus Kap. 4.1 wurde eine Information über den verwendeten Transientenrekorder und die Sensoren hinzugefügt. Die Bezeichnung der Datensätze ist wie folgt aufgebaut:

Testkörperform–Brandkurve–Druckfestigkeit–Fasergehalt–Transientenrekorder-Sensor

Dabei steht bei den Transientenrekordern „TA“ für TransAs bzw. TranAX und „TO“ für TransOcto. Die Sensoren werden unterschieden in UEAE, „Glaser“ für den Glaser-Sensor und V103 für Panametrics V103. Informationen zu den Transientenrekordern und Sensoren sind Kap. 3.1.3 zu entnehmen.

Der Bezeichnungs-Code dient zur schnellen Identifikation der Datensätze. Er beinhaltet keine Aussagen über die gewählten Messgeräteeinstellungen oder den Messaufbau. Hierin unterscheiden sich die Datensätze aber deutlich. Der Versuchsaufbau wurde jedes Mal auf die Erfordernisse der unterschiedlichen Brandprüfungen mit Variation der Testkörpergeometrie oder Testkörperanzahl angepasst. Darüber hinaus wurden die Messgeräteeinstellungen mehrfach variiert und optimiert. Eine Liste der Messgeräteeinstellungen aller Datensätze ist Tab. 4-4 zu entnehmen.

Tab. 4-3: Nummerierung der Datensätze, Zuordnung zu den Testkörpern und Informationen über Testkörperabmessungen, US-Geschwindigkeit der Testkörper vor dem Experiment, Sensoranzahl, Sensorauswahl und verwendeter Transientenrekorder:

Code	PK-Abmessungen [cm]	Anzahl Kanäle	PK Nr.	US-Geschw. vor Experiment	Transientenrekorder	Sensor
Q-ETK-130-0PP-TA-V103	70 x 70 x 30	8	PK 1-1	5250 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
Q-ETK-130-0PP-TA-UEAE	70 x 70 x 30	7	PK 1-1	5250 [m/s]	TransAS	UEAE
Q-ETK-130-0PP-TO-V103	70 x 70 x 30	8	PK 1-3	5250 [m/s]	TransOcto	Panametrics V103-Rb
Q-ETK-120-1PP-TA-V103	70 x 70 x 30	8	PK 1-4	5140 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
Q-ETK-120-1PP-TO-V103	70 x 70 x 30	8	PK 1-6	5140 [m/s]	TransOcto	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-90-0PP-TA-V103	70 x 85 x 30	8	PK 2-1	4854 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser	70 x 85 x 30	8	PK 2-1	4854 [m/s]	TransAS	Glaser-Sensor
Q-ZTV-90-0PP-TO-V103	70 x 85 x 30	8	PK 2-3	4854 [m/s]	TransOcto	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-80-1PP-TA-V103	70 x 85 x 30	8	PK 2-4	4808 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser	70 x 85 x 30	8	PK 2-4	4808 [m/s]	TransAS	Glaser-Sensor
Q-ZTV-80-1PP-TO-V103	70 x 85 x 30	8	PK 2-6	4808 [m/s]	TransOcto	Panametrics V103-Rb
P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103	344 x 161 x 40	16	PK 3-1	4610 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
P-RWS-70-0,9PP-TA-V103	344 x 161 x 40	16	PK 3-2	4610 [m/s]	TransAS	Panametrics V103-Rb
Qk-RWS-70-2PP-TA-V103	80 x 80 x 10	8	PK 4-1	4560 [m/s]	TranAX	Panametrics V103-Rb
Qk-RWS-70-1,5PP-TA-V103	80 x 80 x 10	8	PK 4-2	4470 [m/s]	TranAX	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-75-2PP-US_unten-TA-V103	70 x 85 x 30	15	PK 5-1	4800 [m/s]	TranAX	Panametrics V103-Rb
Q-ZTV-75-2PP-US_oben-TA-V103	70 x 85 x 30	15	PK 5-2	4800 [m/s]	TranAX	Panametrics V103-Rb
B-Real-TA-V103	1000 x 450 x 50	16	PK B	4300 [m/s]	TranAX	Panametrics V103-Rb

Tab. 4-4: Messgeräteinstellungen aller SEA-Datensätze:

Code	Transientenrekorder	Abtastrate	pretrigger	posttrigger	Blocklänge	Trigger	Vorverstärker	Verstärkung	HP-Filter
Q-ETK-130-0PP-TA-V103	TransAS	2,5 MHz	2 kS	20 kS	8,8 ms	slewrate $\Delta x = 10 S$ $\Delta y = 1 V$	Tektronix AM 502	x 2000	10 kHz
Q-ETK-130-0PP-TA-UEAE	TransAS	2,5 MHz	2 kS	20 kS	8,8 ms	slewrate $\Delta x = 10 S$ $\Delta y = 1 V$	-	-	-
Q-ETK-130-0PP-TO-V103	TransOcto	1 MHz	410 S	9782 S	10,2 ms	slewrate $\Delta x = 10 S$ $\Delta y = 1 V$	SmartPre ^{Dig}	42 dB	1 kHz
Q-ETK-120-1PP-TA-V103	TransAS	2,5 MHz	1 kS	10 kS	4,4 ms	slewrate $\Delta x = 10 S$ $\Delta y = 1 V$	Tektronix AM 502	x 2000	10 kHz
Q-ETK-120-1PP-TO-V103	TransOcto	1 MHz	410 S	3686 S	4 ms	slewrate $\Delta x = 10 S$ $\Delta y = 1 V$	SmartPre ^{Dig}	42 dB	1 kHz
Q-ZTV-90-0PP-TA-V103	TransAS	1 MHz	1 kS	4 kS	5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	Tektronix AM 502	x 500	1 kHz
Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser	TransAS	1 MHz	1 kS	4 kS	5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	KRN AMP	35 dB	-
Q-ZTV-90-0PP-TO-V103	TransOcto	1 MHz	410 S	3686 S	4 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	SmartPre ^{Dig}	42 dB	1 kHz
Q-ZTV-80-1PP-TA-V103	TransAS	1 MHz	1 kS	4 kS	5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	Tektronix AM 502	x 500	1 kHz
Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser	TransAS	1 MHz	1 kS	4 kS	5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	KRN AMP	35 dB	-
Q-ZTV-80-1PP-TO-V103	TransOcto	1 MHz	410 S	3686 S	4 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 2 V$	SmartPre ^{Dig}	42 dB	1 kHz
P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 0,5 V$	Tektronix AM 502	x 200	10 kHz
P-RWS-70-0,9PP-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 0,5 V$	Tektronix AM 502	x 200	10 kHz
Qk-ZTV-60-2PP-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 500 S$ $\Delta y = 0,5 V$	SmartPre ^{Dig}	48 dB	10 kHz
Qk-ZTV-60-1,5PP-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 500 S$ $\Delta y = 0,5 V$	SmartPre ^{Dig}	48 dB	10 kHz
Q-ZTV-75-2PP-US_unten-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 500 S$ $\Delta y = 1 V$	SmartPre ^{Dig}	48 dB	10 kHz
Q-ZTV-75-2PP-US_oben-TA-V103	TranAX	1 MHz	500 S	3 kS	3,5 ms	slewrate $\Delta x = 500 S$ $\Delta y = 1 V$	SmartPre ^{Dig}	48 dB	10 kHz
B-Real-35-TA-V103	TranAX	1 MHz	1 kS	4 kS	5 ms	slewrate $\Delta x = 5 S$ $\Delta y = 0,5 V$	Tektronix AM 502	x 200	10 kHz

5 Brandprüföfen und Versuchsaufbau

Für einen Großteil der durchgeführten Untersuchungen wurden quaderförmige Testkörper mit einer Seitenlänge von 70 cm und einer Höhe von 30 cm verwendet (Q). Im späteren Verlauf des Projektes wurden Abweichungen dieser Geometrie gewählt, um verschiedene Versuchsaufbauten zu realisieren [Kap. 5.1 bis Kap. 5.4]. Beispielsweise wurde bei einigen Versuchen für eine Seite der Testkörper 85 cm anstatt 70 cm gewählt, um die Auflagerfläche am Rand zu erhöhen. Aufgrund der Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen [Richter 2009] wurden die Testkörper grundsätzlich als Deckenelemente auf die Prüföfen aufgelegt und von der Unterseite her beflammt. Die Ränder der Testkörper wurden gleichmäßig auf hochtemperaturbeständige Keramikwolle aufgelegt. Dadurch wurde eine akustische Entkopplung der Brandprüföfen von den Testkörpern realisiert, mit dem Ziel, Störgeräusche zu verringern.

5.1 Experimente Q-ETK-130-0PP und Q-ETK-120-1PP

Die Untersuchungen nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) [Kap. 3.2.5] wurden im sogenannten kleinen Deckenofen der MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Abb. 5-1 zeigt ein Modell des Ofens mit einem rechteckigen Beobachtungsfenster an der Seite und den beiden runden Einlassöffnungen für die zwei verwendeten Ölbrenner. Diese sind auch in Abb. 5-2, bei einem Blick ins Innere des Ofens, zu erkennen.

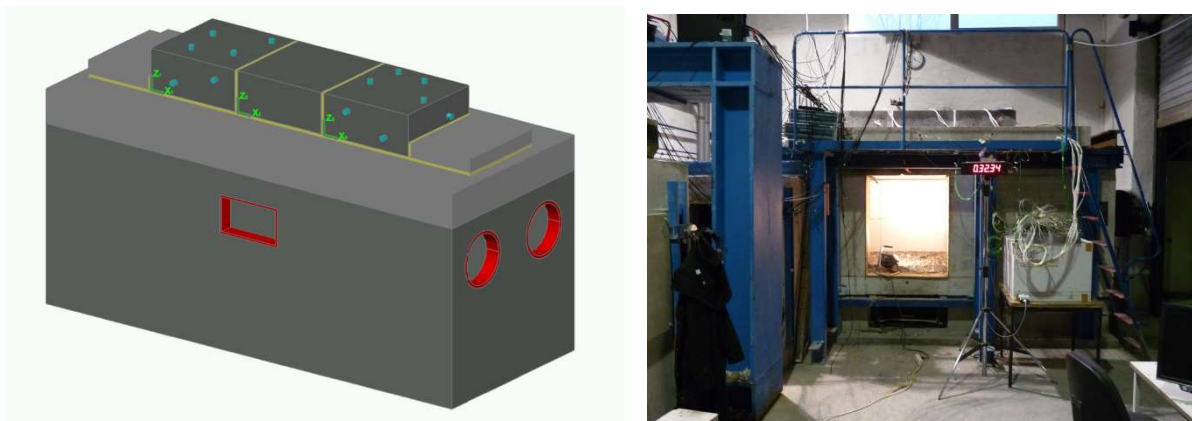


Abb. 5-1: ETK-Prüföfen mit drei, als Deckenelemente angeordneten, Testkörpern. An der kurzen Seite sind die runden Einlässe für die beiden Ölbrenner zu sehen, auf der langen Vorderseite ist das Beobachtungsfenster angeordnet. Rechts ein Foto des Prüföfens, links eine Schemazeichnung inklusive Sensoranordnung (blaue Punkte).



Abb. 5-2: Blick ins Innere des Ofens. Zu sehen ist die Unterseite der Testkörper, die während des Versuchs beflammt wurden, die beiden Öffnungen für die Ölbrenner (links) und ein Teil der Temperaturmessstellen.

Bei den Versuchen Q-ETK-130-0PP und Q-ETK-120-1PP wurden jeweils drei Testkörper mit derselben Betonrezeptur nebeneinander geprüft [Abb. 5-3]. Es wurden drei Testkörper verwendet, um Streuungen in der Schädigung abschätzen zu können. Diese können aufgrund von Temperaturunterschieden innerhalb des Ofens, minimalen Abweichungen des Materials und unterschiedlicher Lagerungsbedingungen entstehen. Darüber hinaus war es so möglich, die beiden äußeren Testkörper mit voneinander unabhängigen Schallemissionsmesssystemen überwachen zu können. Zur Abdichtung des Brandraumes, sowie zur akustischen Abkopplung der Testkörper untereinander und gegen den Ofen wurden die Testkörper auf hochtemperaturbeständiger Keramikwolle gelagert. Die Testkörper hatten Abmessungen von 70 cm x 70 cm x 30 cm. Die beflammete Betonoberfläche betrug dabei jeweils 60 cm x 70 cm.



Abb. 5-3: Nebeneinander angeordnete Testkörper. Auf der Oberseite der beiden äußeren Testkörper wurden Schallemissionssensoren angebracht.

5.2 Experimente Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP

Um die hohen Anforderungen hinsichtlich Maximaltemperatur, Temperaturverteilung über die Testkörper und dem schnellen Anstieg der Temperatur im Brandraum durch die Brandkurve nach ZTV-ING, RWS und CMF [Kap. 3.2.5] zu erreichen, wurde für die weiteren Prüfungen der sogenannte große Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH eingesetzt [Abb. 5-4]. Dieser wird von zwei Seiten mit jeweils vier Ölbrennern befeuert und verfügt über eine zusätzliche Wärmedämmung. Dadurch können höhere Temperaturen und eine gleichmäßigere Temperaturverteilung realisiert werden, als im kleinen Deckenofen mit nur zwei Ölbrennern [Kap. 5.1]. Für

den großen Tunnelbrandöfen sind unterschiedliche Aufbauten möglich. Es können größere Platten [Kap. 5.5], einzelne kleine Quader [Kap. 5.4] und sogar gebogene Tunneltübbinge [Dehn 2010] eingebaut und geprüft werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch Belastungsrahmen horizontale und vertikale Lasten auf die Testkörper aufzubringen. Für die Prüfung der quaderförmigen Testkörper wurde der Ofen für drei nebeneinander angeordnete Testkörper umgebaut und eingerichtet [Abb. 5-4]. Die Abmessungen der Testkörper betragen hier 70 cm x 85 cm x 30 cm.



Abb. 5-4: Großer Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH mit je vier Ölbrennern an zwei Seiten. Aufgelegt sind drei Testkörper, die beiden äußeren sind mit Schallemissionssensoren bestückt. Die Transientenrekorder sind auf der linken Seite so nah wie möglich am Ofen platziert.



Abb. 5-5: Blick durch das Beobachtungsfenster in den großen Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH, links vor dem Experiment, mit intakter Betonoberfläche und rechts während des Experimentes, mit eingeschalteten Ölbrennern. Gut sichtbar sind die Schädigungen durch Abplatzungen.

5.3 Experimente Qk-RWS-70-2PP und Qk-RWS-70-1,5PP

Bei der Bezeichnung „Qk-“ handelt es sich um zwei Testkörper mit einer Dicke von jeweils 10 cm in z-Richtung. Die Abmessungen in X- und Y-Richtung (70 cm x 85 cm) sind aber gleich wie bei den Q-Testkörpern. Die geringere Bauteildicke wurde im Rahmen des Tests von Mikrowellenverfahren zur Feuchtebestimmung benötigt. Die beiden Testkörper wurden auf dem großen Tunnelbrandofen der MFPA Leipzig GmbH angebracht [Abb. 5-6]. Als Abstandhalter zwischen den beiden Testkörpern diente ein Block aus hochtemperaturbeständigem Beton. Zur Abdichtung wurde hochtemperaturbeständige Keramikwolle verwendet [Abb. 5-7]. Durch diesen Aufbau war es möglich, die Testkörper Qk-RWS-70-2PP und Qk-RWS-70-1,5PP gleichzeitig zu prüfen. Beide Testkörper wurden dabei zur Schallemissionsanalyse mit jeweils acht Sensoren überwacht. Als Brandkurve wurde die RWS-Kurve verwendet. In Abb. 5-7 rechts, ist die Unterseite der Testkörper bei eingeschalteten Ölbrennern zu sehen.



Abb. 5-6: Großer Tunnelbrandofen der MFPA Leipzig GmbH, umgebaut für die Prüfung von zwei Quadern mit 10 cm Dicke (Qk).

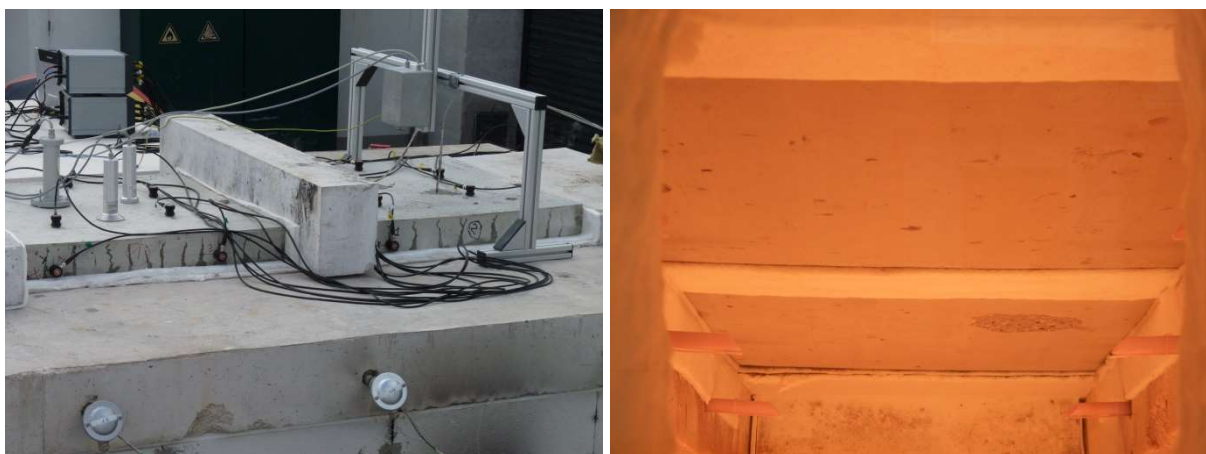


Abb. 5-7: Die beiden auf dem Ofen verbauten Qk-Testkörper, getrennt durch einen Block aus hochbrandbeständigem Beton (links) und ein Blick durch das Beobachtungsfenster auf die Unterseite der beiden Qk-Testkörper während des Versuchs (rechts).

5.4 Experimente Q-ZTV-75-2PP-US

Für zwei Prüfungen [Kap. 11.4] wurde der große Tunnelbrandofen der MFPA Leipzig GmbH zur Prüfung von einzelnen quaderförmigen Testkörpern umgebaut [Abb. 5-8]. Hierfür wurde eine Platte aus hochbrandbeständigem Beton auf den Ofen aufgelegt. In deren Mitte befand sich eine Öffnung von 70 cm x 70 cm. Auf diese Öffnung wurden die Testkörper angeordnet und mittels hochtemperaturbeständiger Keramikwolle abgedichtet.



Abb. 5-8: Prüfung von einzelnen Quadern auf dem großen Tunnelbrandofen der MFPA Leipzig GmbH.

Zusätzlich wurde zur Verbesserung der Begehrbarkeit und Arbeitssicherheit auf dem Ofen ein Belastungsrahmen aufgelegt, um die begehrbare Fläche zu vergrößern. Durch diese Anordnung war eine hervorragende Zugänglichkeit zu den Testkörpern gewährleistet. Darüber hinaus war es möglich, an fünf Seiten der Testkörper Schallemissionssensoren zu befestigen und somit die Sensoranordnung im Vergleich zu anderen Prüfungen deutlich zu verbessern.

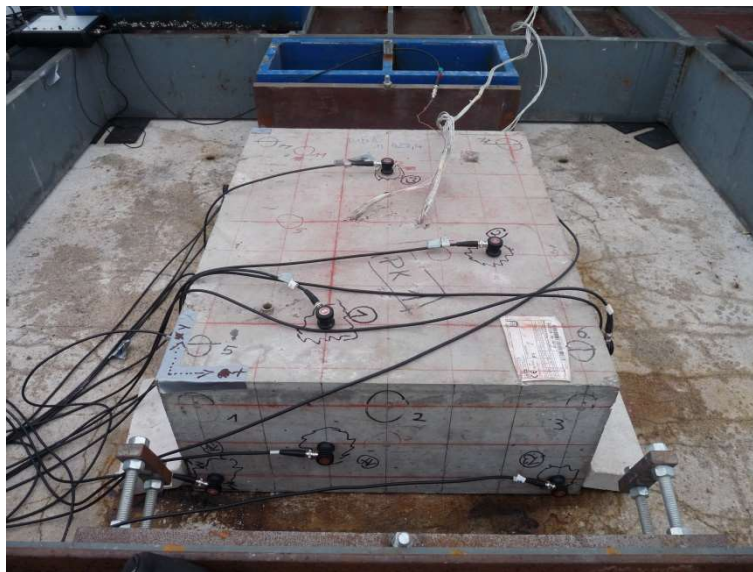


Abb. 5-9: Testkörper Q-ZTV-75-2PP-US unten auf dem großen Tunnelofen aufgelegt. Da der Testkörper einzeln geprüft wurde, war es möglich, an fünf Seiten Schallemissionssensoren zu installieren.

5.5 Experimente an Platten (P)

Um zu untersuchen, in wie weit die Schallemissionsanalyse auch für größere Testkörper einsetzbar ist, wurde eine Versuchsreihe mit Testkörpern in Form von Platten (P) durchgeführt. Die Abmessungen der geprüften Platten betragen 3,44 m x 1,61 m x 0,4 m. Für die Untersuchungen wurde ebenfalls der große Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH verwendet. Befeuert wurde auch hier von zwei Seiten mit insgesamt acht Ölbrennern. Die Testkörper wurden als Deckenelemente auf den Ofen gelegt.

Der Einfluss von mechanischer Belastung auf den Beton während der Brandversuche kann durch den Einsatz von Belastungsrahmen untersucht werden. Dies ist mit dem großen Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH sowohl horizontal als auch vertikal möglich [Dehn 2010]. Bei diesen Platten wurde über einen Belastungsrahmen mit Hydraulikstempeln eine horizontale Belastung von $2,5 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht [Abb. 5-10 und Abb. 5-11]. Dies diente dazu, die Möglichkeit einer Adaption der Schallemissionsanalyse auch bei Versuchsaufbauten mit mechanischer Belastung zu zeigen. Bei allen anderen Experimenten wurde darauf verzichtet. Daher wird die mechanische Belastung nicht als Versuchsparameter aufgeführt. Es ist darauf zu achten, dass die Zugänglichkeit zur Betonoberfläche gewährleistet ist und genügend Platz für die Sensoren bleibt. Darüber hinaus ist mit Störgeräuschen in den Lasteinleitungspunkten zu rechnen, die beispielsweise durch Teflungleitlager minimiert oder durch eine Lokalisierungsberechnung eliminiert werden können.



Abb. 5-10: Großer Tunnelbrandofen der MFPA Leipzig GmbH mit einem plattenförmigen Testkörper, der in einen Belastungsrahmen eingespannt wurde.



Abb. 5-11: Seitenansicht des Belastungsrahmens und des Prüfofens mit vier Ölbrennern auf jeder Seite (links). Hydraulikstempel des Belastungsrahmens zur Steuerung der horizontalen Belastung (rechts).



Abb. 5-12: Auf dem Belastungsrahmen installierter Transientenrekorder mit Vorverstärkern (links) und auf die Betonplatte aufgeklebte Schallemissionssensoren (rechts).

5.6 Experiment am Brückenbrandprüfstand (B-Real)

An der MFPA Leipzig GmbH wurde am 21.03.2013 ein Brückenbrandprüfstand für Brandversuche in größerem Maßstab in Betrieb genommen [Wohlgemuth 2013]. Dabei handelt es sich um eine Stahlbetonkonstruktion mit einer Seitenwand der Fläche 10 m x 4,5 m und einer Dicke von 0,5 m sowie zwei gegenüberliegenden Stützen. Diese sind mit der Wand durch zwei Einfeldträger aus Stahl verbunden, auf welchen eine 20 cm dicke Betonplatte mit 10 x 10 m² aufliegt [Abb. 5-13 links]. In der Decke wurde umfangreiche Temperaturmesstechnik zur Versuchsdokumentation verbaut [Dehn 2013]. Der Brückenprüfstand wird für verschiedene Forschungsprojekte zur Untersuchung der Auswirkungen von Brandeinwirkungen auf Verkehrsbauwerke eingesetzt.

Zur Einweihung des Brückenbrandprüfstandes wurde im Rahmen eines BAST-Forschungsprojektes ein Großbrandversuch mit einem 7,5-Tonnen-LKW durchgeführt. Der LKW wurde mit Holzpaletten beladen und mit 300 Litern Isopropanol entzündet [Abb. 5-13 rechts]. Untersucht wurden die Temperaturentwicklung und der Temperaturverlauf des Brandereignisses sowie die Durchwärmung und das Verhalten des Tragwerkes.



Abb. 5-13: Brückenbrandprüfstand vor dem Realbrandversuch (links) und während des LKW-Vollbrandes (rechts). Der Brandversuch wurde aus verschiedenen Positionen heraus mit Video- und Thermographiekameras dokumentiert.

Zur Schädigungsbeurteilung der Wand, wurden auf der brandabgewandten Seite Schall-emissionssensoren installiert [Abb. 5-14]. Die Wand wurde während des gesamten Versuchsverlaufes mit der Schallemissionsanalyse überwacht. Die genauen Sensorpositionen sind dem Anhang zu entnehmen. Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit wurde auf eine Überwachung der Deckenkonstruktion verzichtet und die gesamte ZfP-Messtechnik auf eine Erfassung der Wand konzentriert. Zusätzlich zur SEA wurde die Wand mit mehreren Thermographiekameras beobachtet. Die Zielsetzung des Einsatzes zerstörungsfreier Prüfverfahren bei diesem Versuch war primär, die Möglichkeiten und Grenzen der Messtechnik im Realbrandversuch zu untersuchen. Darüber hinaus ergab sich durch den speziellen Versuchsaufbau die Möglichkeit, Thermographieaufnahmen und Schallemissionsdaten vom selben Brandereignis zu bekommen, um diese synchronisieren und vergleichen zu können.



Abb. 5-14: Auf der Rückseite der Wand wurden Schallemissionssensoren installiert, um die Schädigung der Wand zu erfassen.

Die Wand wurde während der Brandprüfung im oberen Bereich einer direkten Beflammung ausgesetzt [Abb. 5-13 rechts]. Aufgrund des Einflusses von Windgeschwindigkeit und Windrichtung war die Brandbelastung auf der rechten Seite der Wand größer. Dies zeigt sich auch im Schädigungsbild [Abb. 5-15]. Die Schädigung der Wand aufgrund von Abplatzungen ist im rechten, oberen Bereich der Wand zu finden.



Abb. 5-15: Durch Abplatzungen geschädigter Bereich der Wand aus verschiedenen Blickwinkeln.

6 Adaption der Schallemissionsanalyse

Die Schallemissionsanalyse dient als volumenorientiertes Messverfahren zur dreidimensionalen und zeitlichen Darstellung des Schädigungsverlaufes. Um dies zu erreichen, sind abgesehen von einer Kenntnis der benötigten Messgeräteeinstellungen die Grenzen dieses Messverfahrens und verschiedene weitere Faktoren zu beachten. Besonders entscheidend ist ein durchdachter, sorgfältiger und handwerklich gut umgesetzter Messaufbau, um sinnvolle Messergebnisse zu erhalten. Über die bekannten theoretischen Grundlagen [Kap. 3.1] hinaus, wurden für die spezielle Anwendung bei Brandversuchen die Vorgehensweisen für die folgenden Sachverhalte entwickelt und festgelegt.

6.1 Testkörperherstellung und Details der Messtechnikadaption

Die in dieser Arbeit diskutierten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung dienen dem Informationsgewinn bei experimentellen Branduntersuchungen an Beton. Die Versuchsaufbauten und Vorgehensweisen der Brandprüfungen wurden über Jahre hinweg entwickelt und werden standardmäßig eingesetzt. Darüber hinaus sind sie mit geltenden Normen und Regelwerken abgestimmt [Kap. 3.2.4]. Daher ist es wünschenswert und notwendig, die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung ohne Veränderung oder Beeinflussung der bestehenden Versuchsaufbauten einsetzen zu können.

In den Versuchsaufbauten besteht aber durchaus eine gewisse Flexibilität. Diese kann genutzt werden, um die Adaption der zerstörungsfreien Prüfgeräte zu vereinfachen und zu verbessern. Es gibt verschiedene Bereiche, auf welche man beim Aufbau und Durchführung der Messungen achten sollte. Durch eine solche Verbesserung der Prüfbarkeit können qualitativ hochwertigere Messergebnisse erzielt werden, ohne die Versuchsaufbauten entscheidend verändern zu müssen und somit die Vergleichbarkeit oder den Erfolg der Prüfung zu gefährden.

Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Abb. 6-1 und Abb. 7-2 dargestellt. Die Testkörper wurden als Deckenelemente auf die Brandversuchsöfen aufgelegt. Dies hat einige Vorteile. Zunächst handelt es sich dabei um einen durchaus realistischen Versuchsaufbau, da die Brandbelastung von realen Betonbauteilen in den meisten Fällen einseitig erfolgen wird (Wandscheiben, Decken), Ausnahmen wären Betonstützen. Darüber hinaus ist unter der Decke eines Bauwerkes (z.B. eines Tunnels), mit einer frühzeitigen und auch mit der höchsten Temperaturbelastung zu rechnen. Für die Durchführung der Versuche war es ein praktischer Aufbau, da der Testkörper als letztes Bauteil eingesetzt werden konnte und, abgesehen von der Messtechnik, als erstes wieder abgenommen werden konnte. Dies war vor allem bei den Brandversuchsöfen im Freien entscheidend, weil der Testkörper erst am Tag der Prüfung eingebaut wurde und daher nur für kurze Zeit der Witterung ausgesetzt war. Der Auf- und Abbau des restlichen Versuchsaufbaus war daher zeitlich ungebunden möglich. Bezogen auf die Messtechnik bietet die einseitige Brandbeanspruchung einen Schutz für die Sensoren durch den Testkörper selbst [Kap. 6.3]. Darüber hinaus wurde die Messtechnik als letzter Teil eingebaut und der Versuchsaufbau musste danach nicht mehr verändert werden. Dies war bei der empfindlichen

Messtechnik absolut vorteilhaft. Darüber hinaus war eine Zugänglichkeit zur Messtechnik während des Versuches gegeben.

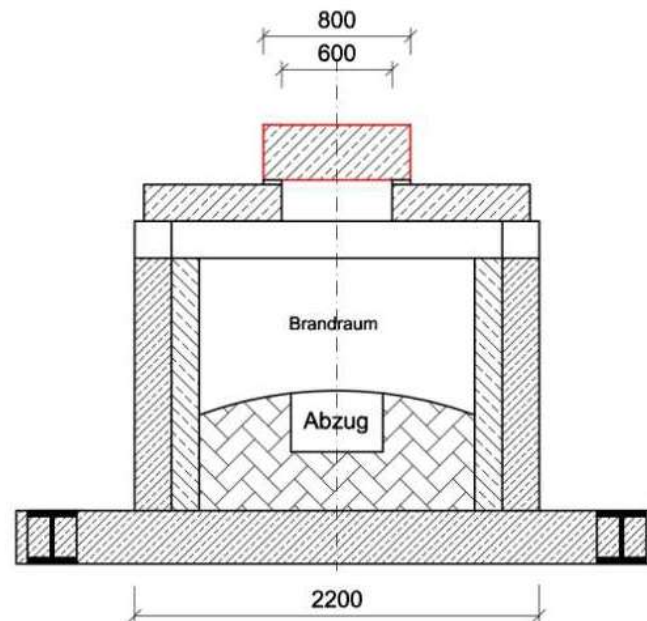


Abb. 6-1: Schnitt des Versuchsaufbaus [Juknat 2014]. Die Testkörper wurden als Deckelemente mit direkter Beflammung der Unterseite auf den Brandraum aufgelegt. Die Schallemissionssensoren wurden auf der Oberseite angebracht und waren daher durch den Beton geschützt. Alle Maße in [mm].

Die Ankopplung der Sensoren ist auf schalungsglatten Oberflächen deutlich einfacher und besser reproduzierbar. Die Sensoren befinden sich an der richtigen Position, es gibt keine Gefahr der Verkipfung und die Signalübertragung ist zuverlässiger. Es ist zwar durchaus möglich, auch auf abgezogenen Betonoberflächen Sensoren zu befestigen, dies erfordert aber einen erhöhten Aufwand, indem die Stellen abgeschliffen werden. Grundsätzlich sollte die brandbeanspruchte Seite der Testkörper aber auch schalungsglatt sein, um eine möglichst gleichmäßige Fläche zu belasten und um das Schadensbild nach den Experimenten besser einordnen zu können. Um einen möglichst großen Anteil an schalungsglatten Oberflächen auf einem Testkörper zu gewährleisten, empfiehlt es sich, die Testkörper als Wandelemente und nicht als Platten zu betonieren. Es bleibt dann immer noch eine Seite mit abgezogener Oberfläche, allerdings ist diese deutlich kleiner. Man müsste also weniger Sensorpositionen vorbereiten. Bei der Prüfung mehrerer Testkörper kann diese Seite als Stoßseite zu den anderen Testkörpern verwendet werden.

Beim Einsatz der Schallemissionsanalyse ist es wichtig, möglichst viele Störgeräusche von der Messtechnik fern zu halten. Sinn dabei ist, die Messtechnik nur bei tatsächlichen Ereignissen auszulösen und somit den Datensatz kleiner und überschaubarer zu halten. Eine Einstellung der Triggerbedingungen ist deutlich erschwert, wenn die Signale von Störgeräuschen überlagert sind. Im schlechtesten Fall führt es dazu, dass die Messtechnik annähernd dauerhaft aufzeichnet, was zu sehr großen Datensätzen führt, die schlecht zu sortieren sind. Darüber hinaus ist das Signal/Rausch-Verhältnis für die automatische Ersteinsatzbestimmung ein entscheidender

Faktor. Ein zu hoher Anteil an Störsignalen verschlechtert die Qualität der Ersteinsatzbestimmung oder macht sie sogar unmöglich. Die Geräusche der Ölbrenner und der Lüftungen treten in einem niedrigeren Frequenzbereich als die Schallemissionen auf und können daher durch die Verwendung von Hochpassfiltern unterdrückt werden. Es empfiehlt sich aber trotzdem, die Testkörper und damit die Schallemissionssensoren von den Öfen akustisch zu entkoppeln. Hierfür wurden die Testkörper auf hochtemperaturbeständiger Keramikwolle gelagert, mit der gleichzeitig auch noch die Abdichtung des Ofens realisiert wird. Das Auflegen der Testkörper als Deckenelemente auf den Ofen hat sich als sinnvoll erwiesen, da die Testkörper durch ihr Eigengewicht in Position gehalten werden und somit keine zusätzlichen Befestigungsmaßnahmen notwendig sind, welche schwer zu entkoppeln sind. Darüber hinaus wird das Gewicht gleichmäßig auf die Keramikwolle verteilt.

Nicht nur die Sensoren, sondern auch die Kabel sind empfindlich für Störgeräusche. Dies liegt zunächst einmal daran, dass sie direkt mit den Sensoren verbunden sind und sich eine mechanische Manipulation am Kabel daher als Schallimpuls zurück auf den Sensor übertragen kann. Darüber hinaus werden die analogen Signale zwischen Sensor und Vorverstärker mit sehr geringen Spannungen übertragen und sind daher anfällig für kapazitive und induktive Kopplung.

Aufgrund dessen ist es sehr wichtig, auf die Kabelführung bei der Schallemissionsanalyse zu achten. Sie sollten nicht in Schlaufen, sondern stets parallel zueinander verlegt werden. Die Kabel sollten von den begehbaren Bereichen der Öfen ferngehalten werden. Grundsätzlich sollte man die Kabel während der Messung nicht berühren. Ganz besonders ist auf eine strikte Trennung der Schallemissionskabel von den Messkabeln des Temperaturmonitorings zu achten. Die Trigger der Schallemissionsanalyse reagieren auf das Umschalten der Multiplexer der Temperaturdatenerfassung. Eine Verwendung von Mobiltelefonen im Bereich der Öfen ist während der laufenden Messung grundsätzlich zu vermeiden, weil auch hier Störgeräusche für die Schallemissionsanalyse entstehen können.

Es zeigte sich immer wieder, dass die Adaption der Schallemissionsmesstechnik an die Testkörper und die Brandöfen viel Zeit in Anspruch nimmt. Auch bei guter Vorbereitung, erfahrener Personal und optimalen Bedingungen (Wetter, Zugänglichkeit, keine Ausfälle der Messtechnik) benötigt man zwei bis drei Stunden, um ein Experiment vorzubereiten. Darüber hinaus kann mit der Vorbereitung der Messtechnik erst begonnen werden, wenn die Testkörper positioniert und fertig eingebaut wurden. Es sollte mindestens eine halbe Stunde für die Messgeräteeinstellung und Gerätetests zur Verfügung stehen. Diese Vorbereitungszeit muss bei der Planung von Brandexperimenten berücksichtigt werden. Um den zeitlichen Aufwand zu minimieren, können jedoch verschiedene Handgriffe und Maßnahmen vorbereitet werden. Eine deutliche Vereinfachung und Beschleunigung des Aufbaus kann durch eine gute Zugänglichkeit der Oberseite der Brandprüföfen und damit der Testkörper erreicht werden. Hilfreich sind Gerüste oder begehbare Belastungsrahmen mit Treppen statt Leitern als Aufstiegsmöglichkeiten und ausreichend Platz im Bereich der Testkörper, um die Messtechnik zu installieren und Werkzeug abzulegen. Die Positionierung der Messgeräte sollte nah an der Sensorik, aber in einem sicheren, temperaturgeschützten Bereich liegen. Darüber hinaus ist eine gute Zugänglichkeit an die

Messcomputer zur Versuchssteuerung wichtig. Als sinnvoll hat es sich erwiesen, die Vorverstärker am Rand des Prüfofens und die Transientenrekorder auf Tischen neben dem Ofen [Abb. 6-2] zu positionieren.

Als weitere Maßnahme zur Verkürzung der Rüstzeit, sollte ein Messraster und ein Koordinatensystem auf die Testkörper aufgezeichnet werden [Abb. 6-3 links]. Dies kann vor dem Einheben der Testkörper auf den Ofen erfolgen. Auf diesem Raster können bereits im Vorfeld die Sensorkoordinaten durch Kreise und Nummerierungen vermerkt werden. Auf den Kreuzungspunkten des Rasters können die Sensoren einfach positioniert werden. Hierbei entfällt ein umständliches Ausmessen der Sensorpositionen nach dem Anbringen.



Abb. 6-2: Testkörper mit den Vorverstärkern und zugehörigem Laptop am Rand des Belastungsrahmens (links). Die Transientenrekorder sind auf Tischen mit Abstand zum Brandprüfofen positioniert. Als Aufstiegshilfe dient eine fahrbare Treppe (rechts).



Abb. 6-3: Testkörper mit aufgezeichnetem Messraster, Testkörpernummerierung und Koordinatensystem. Die Sensorpositionen und Nummerierungen sind durch Kreise um die Kreuzungspunkte des Rasters markiert.

Ein Nebeneffekt des aufgezeichneten Messrasters ist, dass die Sensorpositionen durch Nachzählen der Rasterpunkte auf Fotos nachvollziehbar sind. Dadurch wird ein nachträgliches Überprüfen der Sensorpositionen möglich. Eine farbige Markierung der Kabelanschlüsse [Abb. 6-3

rechts] ist gut geeignet, um den Messgeräteaufbau und die Verbindung der einzelnen Geräte fotografisch dokumentieren. Und es hilft natürlich auch die Übersicht zu behalten. Grundsätzlich ist auf eine sorgfältige Dokumentation zu achten, da die Experimente nur mit sehr hohem Aufwand wiederholt werden können. Hilfreich sind hier die Ausführungen von Eden [2011].

6.2 Sensoranordnung

Für die Schallemissionsanalyse ist die Anordnung der Sensoren auf den Testkörpern von entscheidender Bedeutung. Die genauen Sensorpositionen für die einzelnen Experimente sind dem Anhang zu entnehmen. Die Sensorpositionen wurden anhand von vorherigen Untersuchungen [Richter 2009] und Hinweisen aus der Literatur [Finck 2005, Große 2008, Kurz 2006 und Schechinger 2005] gewählt. Die Sensorpositionen haben einen großen Einfluss auf die Lokalisierungsergebnisse. Notwendig wären Simulationsrechnungen sowie verschiedene Untersuchungen an den noch vorhandenen Testkörpern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Teil dieser Untersuchungen abgeschlossen, die Problematik konnte allerdings nicht umfassend und abschließend behandelt werden.

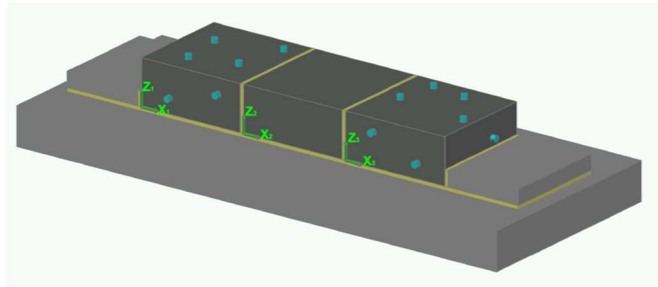


Abb. 6-4: Schema dreier Testkörper auf dem Prüfofen und der darauf angeordneten Sensorpositionen.

Die Sensoren müssen idealerweise so verteilt werden, dass Schallemissionen aus dem gesamten Testkörper detektiert werden. Darüber hinaus ist die Lokalisierungsgenauigkeit innerhalb der Sensoranordnung deutlich besser als an den Rändern oder außerhalb der Anordnung. Die Sensoren wurden daher auf der Oberseite über den gesamten Testkörper verteilt. Bei der Untersuchung mehrerer Testkörper, wurden nur die beiden außen angeordneten Testkörper mit der Schallemissionsanalyse überwacht. Der Abstand durch den mittleren Testkörper und die Entkopplung zwischen den Testkörpern sollten unabhängige Messungen der Messsysteme sicherstellen [Abb. 6-4].

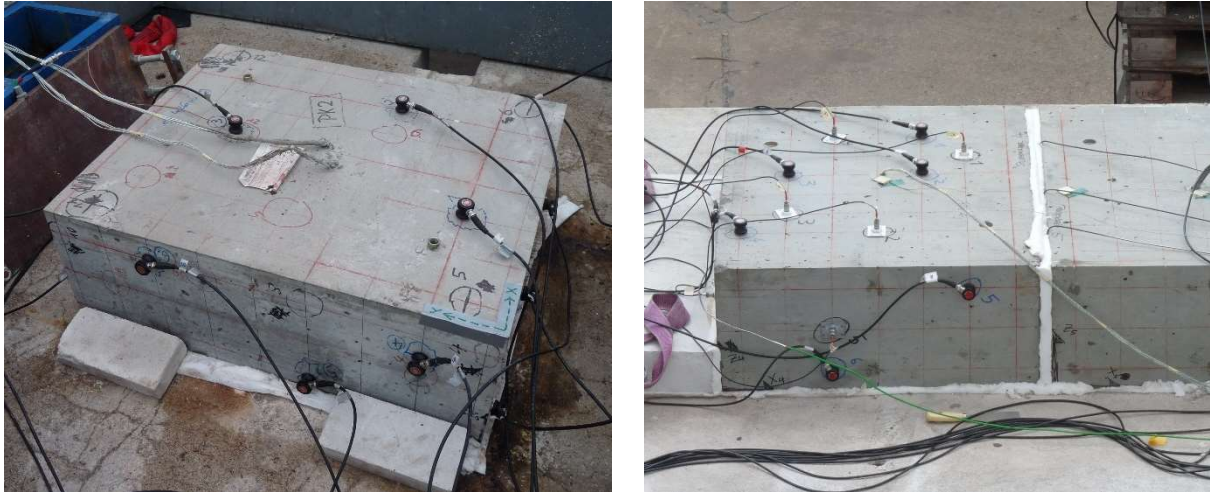


Abb. 6-5: Links: Sensoranordnung bei der Prüfung eines einzelnen Testkörpers mit nur einem Messsystem (Q-ZTV-75-2PP-US_unten) und Rechts: Sensoranordnung zweier Messsysteme auf einem Testkörper bei der Prüfung dreier Prüfkörper (Q-ZTV-90-0PP).

Bei der Anordnung der Sensoren wurde darauf geachtet, dass trotz der Verteilung über den gesamten Probekörper, die Sensoren nicht symmetrisch verteilt wurden [Abb. 6-5]. Eine asymmetrische Anordnung hat den Vorteil, dass keine Doppeldeutungen bei der Lokalisierung auftreten und Randeffekte ausgemittelt werden.

Die Sensorpositionen an den Seiten wurden so tief gewählt, wie es die Positionierung des Belastungsrahmens und die Ofenabmauerung zuließen [Abb. 6-6]. Die tiefe Sensorpositionierung ist durch die Nähe zum Ofen und der damit verbundenen Temperaturen deutlich kritischer wie auf der Oberseite der Testkörper. Durch frühere Untersuchungen konnte aber die Relevanz dieser tiefen Positionen für die Lokalisierung gezeigt werden [Richter 2009].



Abb. 6-6: An den Seiten der Testkörper angebrachte Schallemissionssensoren.

Bei Brandversuchen ist grundsätzlich die Temperaturbeständigkeit der Messtechnik zu bedenken und darauf zu achten, dass die Messtechnik nicht nur vor Beschädigung geschützt wird, sondern auch, dass es zu keinen Änderungen des Messergebnisses aufgrund einer zu hohen Temperatur an einzelnen Messtechnikkomponenten kommt. Bei den Datenerfassungssystemen

und Messcomputern ist dies nicht problematisch, da sie in entsprechendem Abstand zum Ofen aufgebaut werden konnten. Hier war nur zu beachten, dass die Qualität des Messergebnisses abhängig von der Messkabellänge ist und die Datenerfassung trotzdem möglichst nah an den Sensoren platziert sein sollte. Die verwendeten Schallemissionssensoren sind grundsätzlich nicht für hohe Temperaturen ausgelegt. Als Maximaltemperatur muss man von ca. 60°C ausgehen. Gleiches gilt für die Kabelführung. Bei den Kabeln handelt es sich um handelsübliche Koaxialkabel mit BNC-Anschluss, allerdings ohne Eignung für hohe Temperaturen. Es wäre zwar grundsätzlich möglich die Kabel mit Schutzhüllen auszurüsten und temperaturbeständigere Sensoren herzustellen, dies wäre aber mit einem hohen Aufwand verbunden. Darüber hinaus ist gerade bei diesen Sensoren mit einer deutlichen Qualitätsminderung zu rechnen. Eine Temperaturbeständigkeit für einen Einsatz bei über 1000°C direkt im Brandraum würde ohnehin nicht erreicht werden können.

Eine Möglichkeit wären Wellenleiter, also temperaturbeständige Metallteile, die an die Sensoren angebracht werden und die Schallemissionen weiterleiten [Huisman 2010]. Durch eine solche Anordnung bekommt man allerdings geführte Wellen, also durch die Metallteile veränderte Wellenformen, was für eine signalbasierte SEA nicht zielführend sein kann. Die Sensoren müssen direkt auf die Oberfläche der Testkörper aufgebracht werden.

Gelöst wurde das Problem durch die erwähnte einseitige Brandbeanspruchung [Abb. 6-1]. Die Testkörper wurden als Deckenelemente in die Öfen eingebaut und auf allen Seiten abgedichtet. Durch den Überstand am Rand war eine sichere Auflagerfläche gewährleistet und ein Abstand zwischen Sensorik und Brandraum gewährleistet. Die Sensorik konnte gefahrlos betrieben werden bis die Oberfläche sich zu stark erwärmte, dann wurden die Sensoren abmontiert. Dies reichte zeitlich in der Regel bis zum Ende der Versuche aus. Die Überwachung der Sensoren erfolgte durch die Thermographie. Auf den Seiten der Testkörper ist dennoch ein gewisser Abstand einzuhalten. In diesem Bereich muss in geringen Mengen mit heißen Gasen aus dem Brandraum gerechnet werden, die bei kleinen Undichtigkeiten austreten können. Darüber hinaus kommt es dort als zur Rissbildung und dem damit verbundenen erhöhten Feuchtetransport zu einer schnelleren Oberflächenerwärmung [Abb. 7-15]. Beide Effekte können zu einer Schädigung von Sensoren führen.



Abb. 6-7: Durch Temperatureinwirkung abgelöste und beschädigte Sensoren.

6.3 Sensorankopplung

Um die Sensoren anzubringen, wurden verschiedene Möglichkeiten getestet. Ultraschallgel trocknet durch die Temperaturbelastung relativ schnell aus. Dies kann die Signalübertragung deutlich verschlechtern. Die Befestigung dieser mit Ultraschallgel angekoppelten Sensoren kann durch eingebohrte oder angeklebte Halterungen erfolgen, da die Sensoren mit dem Ultraschallgel nicht in Position gehalten werden können. Dies ist zum einen nicht zerstörungsfrei, liefert eine Störstelle direkt im Sensorbereich (Dübel) und erwies sich zum anderen als sehr aufwendig. Als weitere Möglichkeit wurde Wasserglaskleber ausprobiert. Dieser Kleber wird für die Befestigung der Temperaturmeselemente bei Brandversuchen verwendet und ist temperaturbeständig. Darüber hinaus ist der Kleber wasserlöslich, somit ist eine Reinigung der Sensorik nach den Experimenten problemlos möglich. Die Signalübertragung war gut und ausreichend, allerdings ergaben sich im Praxiseinsatz gewisse Schwierigkeiten. Der Wasserglaskleber hat eine Trocknungszeit von ca. 24 h. Dies führt zu einer langen Vorbereitungszeit und Wartephase, es ist nicht möglich eine Sensorposition kurz vor Beginn noch zu ändern. bzw. kurzfristig neu anzukoppeln, falls ein Sensor beim Gerätefunktionstest nicht funktioniert. Darüber hinaus wird der Glaskleber im trockenen Zustand sehr hart und bricht spröde. Er hat keine allzu hohe Festigkeit. Dies führte häufig dazu, dass bei einem kurzen Verschieben des Kabels Sensoren ihren Halt verloren. Ein Nachkleben war aus Zeitgründen nicht optimal möglich.

Als ideales Koppelmittel erwies sich Heißkleber. Heißkleber wurde bereits bei vielen Untersuchungen mit SEA an Beton als optimales Koppelmittel verwendet. Die Signalübertragung ist gut und die Ankopplung reproduzierbar, die Sensorik ist schnell anzubringen und gut abzunehmen. Eine Reinigung der Sensoren ist normalerweise problemlos möglich solange man auf die empfindlichen Koppelflächen achtet. Dass sich die Konsistenz von Heißkleber bei einer Erwärmung der Testkörper ändert, kann zwar problematisch sein, allerdings geschieht dies in einem Temperaturbereich, in welchem der Sensor sowieso abgenommen werden sollte, um eine Schädigung des Sensors zu verhindern. Im optimalen Fall löst sich der Sensor sogar eigenständig, wenn der Kleber zu warm wird.



Abb. 6-8: Vorwärmen der Betonoberfläche mit einem Haarföhn und anschließende Befestigung der Sensoren mit Heißkleber.

Grundsätzlich sollte das Koppelmittel möglichst dünn aufgetragen werden, da es zu einer Dämpfung des Signales beiträgt. Auf eine glatte, saubere Oberfläche der Testkörper ist beim Anbringen der Sensoren zu achten. Unebenheiten, herausstehende Zuschlagskörner und Poren auf der Oberfläche beeinflussen die Signalübertragung und sind durch das Koppelmittel nicht immer auszugleichen. Grundsätzlich eignen sich schalungsglatte Oberflächen deutlich besser für eine Anbringung von Sensoren, als abgezogene Oberflächen. Bei der Versuchsplanung bzw. dem Schalungsbau ist das dringend zu beachten. Bei Experimenten an kalten Tagen, ergab sich teilweise die Problematik, dass der kalte Stein den Heißkleber sehr schnell abkühlte. Dabei war es kaum möglich eine kraftschlüssige Klebeverbindung zwischen Beton und Sensor zu erreichen. Auch die Verwendung von größeren Mengen Heißkleber schaffte hier keine Abhilfe. Erst durch Vorwärmen der Betonoberfläche mit einem handelsüblichen Haarföhn und anschließendem Festkleben der Sensoren, konnte eine feste Klebeverbindung erreicht werden [Abb. 6-8].

7 Datenerfassung mit konventionellen Verfahren

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, reproduzierbare Untersuchungsergebnisse zum Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Untersuchung von Beton unter Brandbelastung zu erarbeiten. Zusätzlich zu diesen Verfahren wurden alle Experimente mit konventionellen Methoden der Brandprüfung erfasst und bewertet. Die Daten dienen einerseits der Versuchsteuerung, wie z.B. die Temperaturerfassung. Andererseits können die Ergebnisse dadurch einfacher mit anderen Untersuchungen verglichen werden. Für die Zerstörungsfreien Prüfverfahren können die konventionellen Verfahren zur Plausibilitätsprüfung, aber auch als Eingabeparameter für die Auswertungsprogramme verwendet werden.

7.1 Temperaturmessungen

Bei den Brandprüfungen wurden grundsätzlich umfangreiche Temperaturmessungen durchgeführt. In erster Linie diente dieses Monitoring zur Steuerung der Brandraumtemperatur. Aufgrund der Anzeigen der Temperaturmessfühler im Brandraum wurde die Leistung der Ölbrenner durch die Menge des zugeführten Brennstoffs gesteuert. Eine Kühlung konnte über eine Steuerung der Lüftung erzielt werden.

Durch eine Verteilung auf mehrere Messstellen [Abb. 7-2 bis Abb. 7-4] können die Temperaturunterschiede im Ofen erfasst werden. Man erhält somit Informationen über örtliche Temperaturschwankungen, die Genauigkeit der Temperatursteuerung in Bezug auf die zeitliche Verzögerung und die Abweichungen von der gewünschten Normbrandkurve. Zusätzlich zu den Brandraummessfühlern wurden in alle Testkörper Temperaturmessstellen in unterschiedlichen Tiefen einbetoniert [Abb. 7-1]. Mit diesen Messstellen kann das Durchwärmungsverhalten der Testkörper dokumentiert werden. Sie dienen darüber hinaus auch als einfaches qualitatives Mittel zur Abplatztiefenbestimmung. An einem sprunghaften Anstieg der Temperatur eines einbetonierten Sensors auf die Brandraumtemperatur kann man erkennen, dass die Messstelle in diesem Moment durch Abplatzungen freigelegt wurde.



Abb. 7-1: In der Schalung angeordnete Leitern mit Temperturmessstellen in verschiedenen Tiefen.

Die Ergebnisse aller Temperaturaufzeichnungen sind dem Anhang zu entnehmen. Die Informationen und Erkenntnisse, die aus den Temperaturaufzeichnungen gewonnen werden, sind im Folgenden exemplarisch an vergrößerten Darstellungen der Datensätze Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP dargestellt [Abb. 7-5 bis Abb. 7-10].

Die Anordnung und Nummerierung der einbetonierten Temperaturmessstellen sind Abb. 7-3, und für die plattenförmigen Testkörper Abb. 7-4 zu entnehmen. Im Brandraum wurden sechs Messstellen eingesetzt (MSt. 1-6), davon je drei auf jeder Seite des Ofens [Abb. 7-2 und Abb. 7-3]. Bei der gleichzeitigen Prüfung von drei Testkörpern waren somit unter jedem Testkörper zwei Messstellen angeordnet. Bei der Prüfung der Platten sowie einzelner Quader Testkörper wurden diese mittig auf den Ofen aufgelegt, die Position der Brandraummessfühler blieb gleich. Die Temperaturmessstellen im Inneren der Testkörper wurden im unteren Bereich im Abstand von 2 cm und im oberen Bereich mit den Abständen 2,5 cm und 5 cm einbetoniert. Zur Befestigung wurden Leitern aus Schweißdraht verwendet [Abb. 7-1].

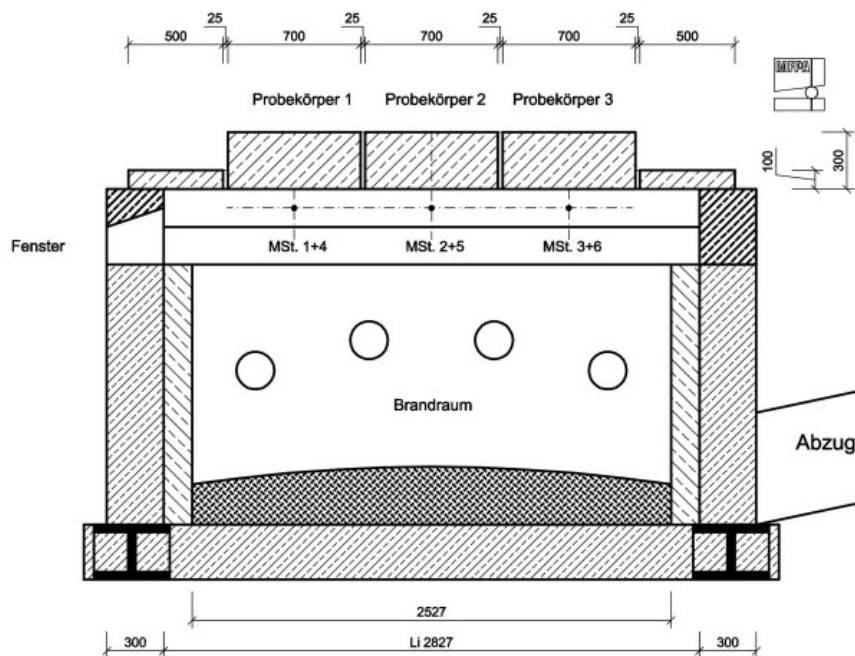


Abb. 7-2: Vertikaler Schnitt durch den großen Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH mit Positionierung der Brandraummessfühler, alle Maße in [mm] [Juknat 2014].

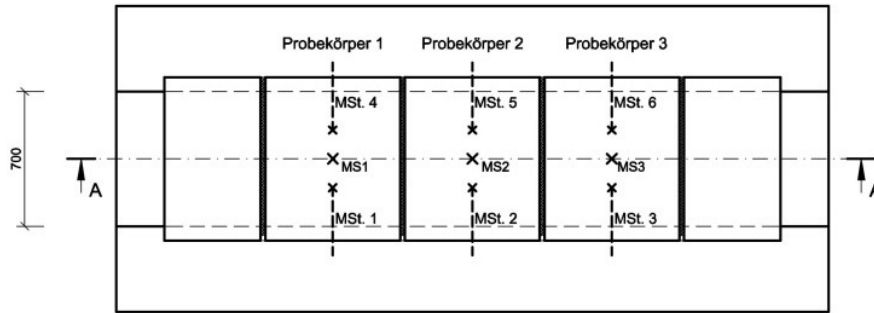


Abb. 7-3: Draufsicht auf drei Testkörper auf dem großen Tunnelofen der MFPA Leipzig GmbH mit der Anordnung der einbetonierten Temperaturmessstellen und der Positionierung der Brandraummessfühler, alle Maße in [mm] [Juknat 2014].

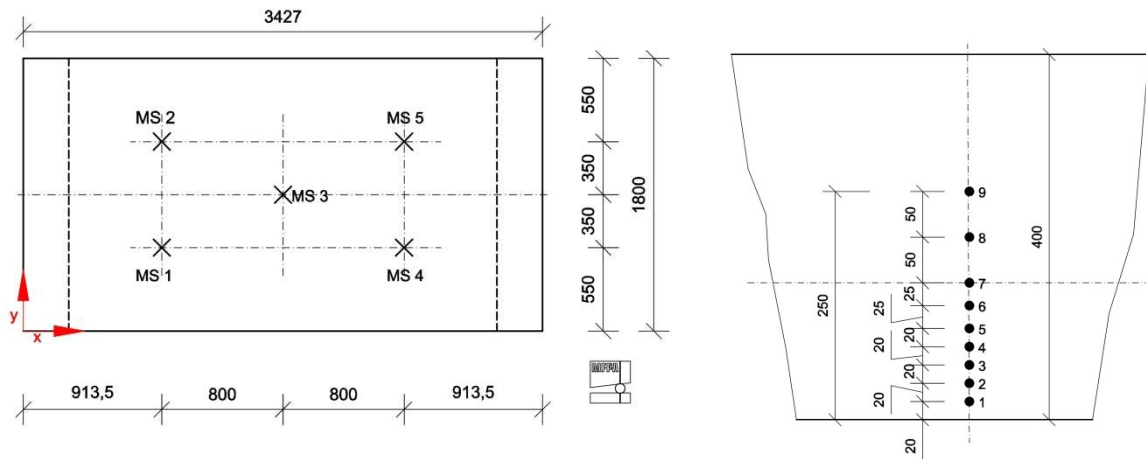


Abb. 7-4: Draufsicht auf einen plattenförmigen Testkörper (P) mit Positionierung der einbetonierten Temperaturmessstellen (links) und Detailschnitt mit den Tiefen der einbetonierten Temperaturmessstellen (rechts), alle Maße in [mm] [Juknat 2014].

In Abb. 7-5 sind die Ergebnisse der Messungen mit jeweils sechs Brandraummessfühlern bei den Experimenten Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP zu sehen. Die Temperaturen folgen der ZTV-ING als Standard-Brandkurve [Kap. 3.2.5]. Zu erkennen sind die Abweichungen von der Standardkurve, mit welcher der Brandprüfofen gesteuert wurde. Im Anfangsbereich, bis ca. 3 min, steigt die Temperatur steiler an bis nachgeregelt wird. Auch im Übergangsbereich zwischen Anstieg und Haltephase bei 5 min Versuchsdauer ist ein deutlicher Unterschied in den Kurven zu erkennen.

Um die Unterschiede der Temperaturverteilung deutlich zu machen, wurden in den Abb. 7-6 und Abb. 7-7 die Mittelwerte der Messstellen parallel (MW MSt. 1 und 4, MW MSt. 2 und 5 sowie MW MSt. 3 und 6) und senkrecht (MW MSt. 1, 2, 3 und MW MSt. 4, 5, 6) zur Ofenachse dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass die Temperaturen im Ofen örtlich nicht gleich verteilt sind. Dies ist einer der Gründe für das örtlich ungleichmäßig verteilte Auftreten der Abplatzungen.

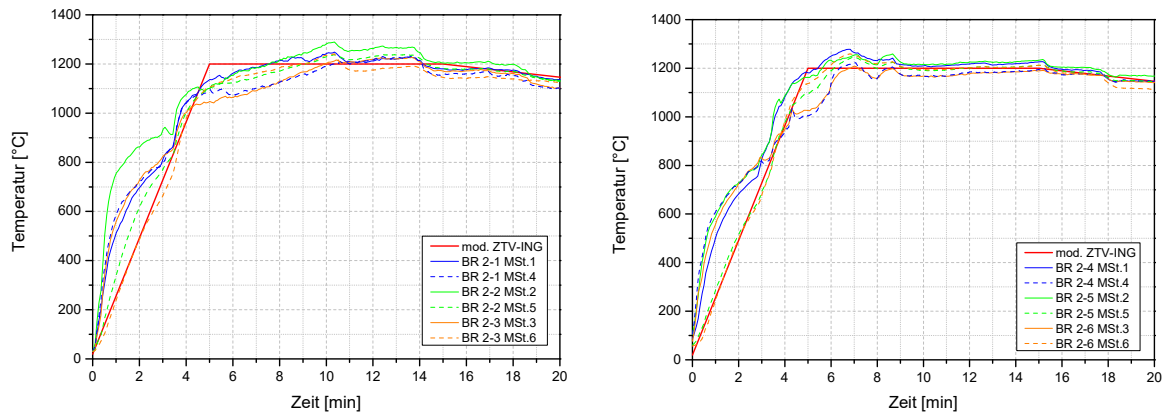


Abb. 7-5: Brandraumtemperaturen MSt. 1-6: Q-ZTV-90-0PP (links) und Q-ZTV-80-1PP (rechts).

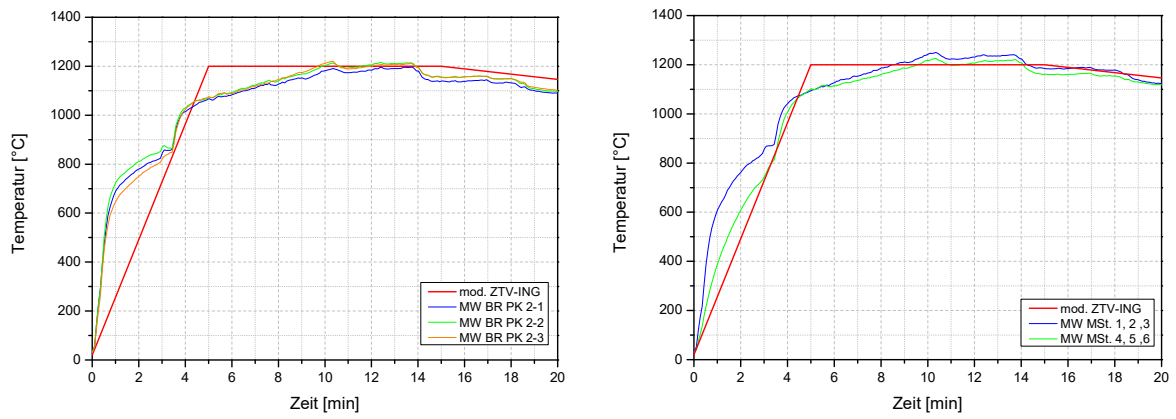


Abb. 7-6: Q-ZTV-90-0PP Mittelwerte der Brandraummessfühler, senkrecht (links) und parallel (rechts) zur Ofenachse.

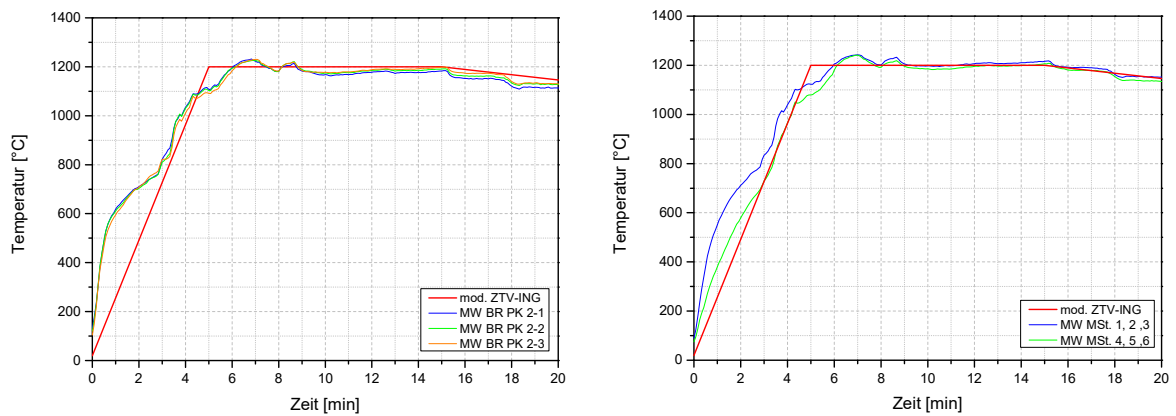


Abb. 7-7: Q-ZTV-80-1PP Mittelwerte der Brandraummessfühler, senkrecht (links) und parallel (rechts) zur Ofenachse.

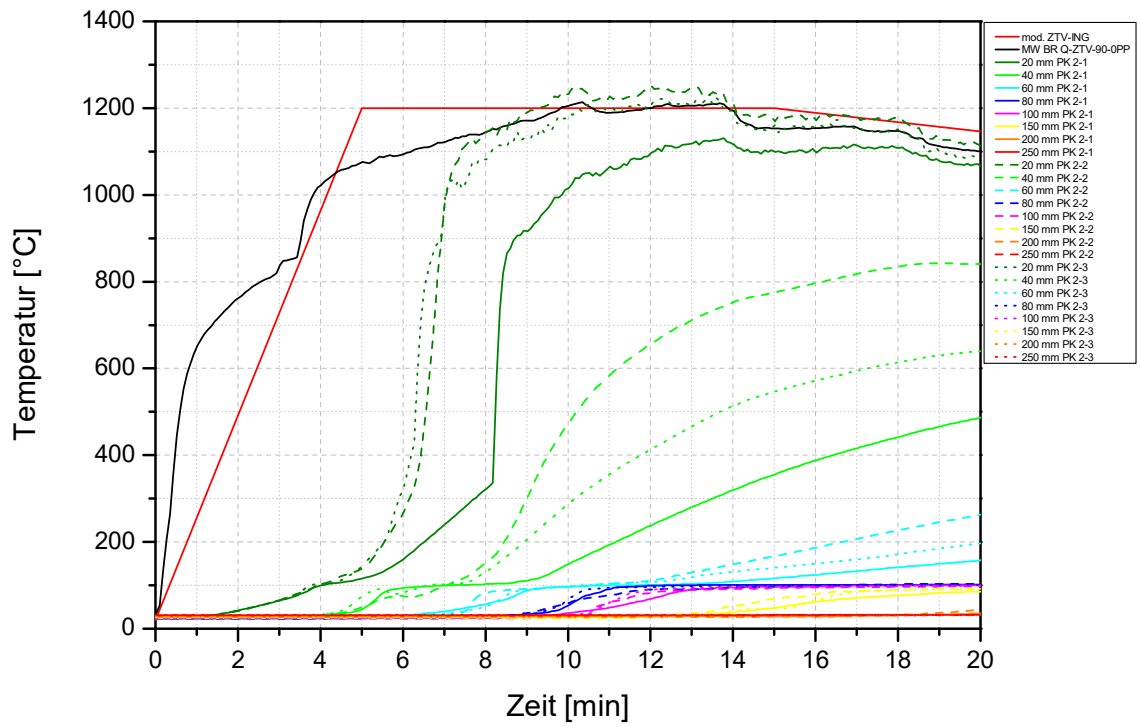


Abb. 7-8 Einbetonierte Temperaturmessstellen: Q-ZTV-90-0PP

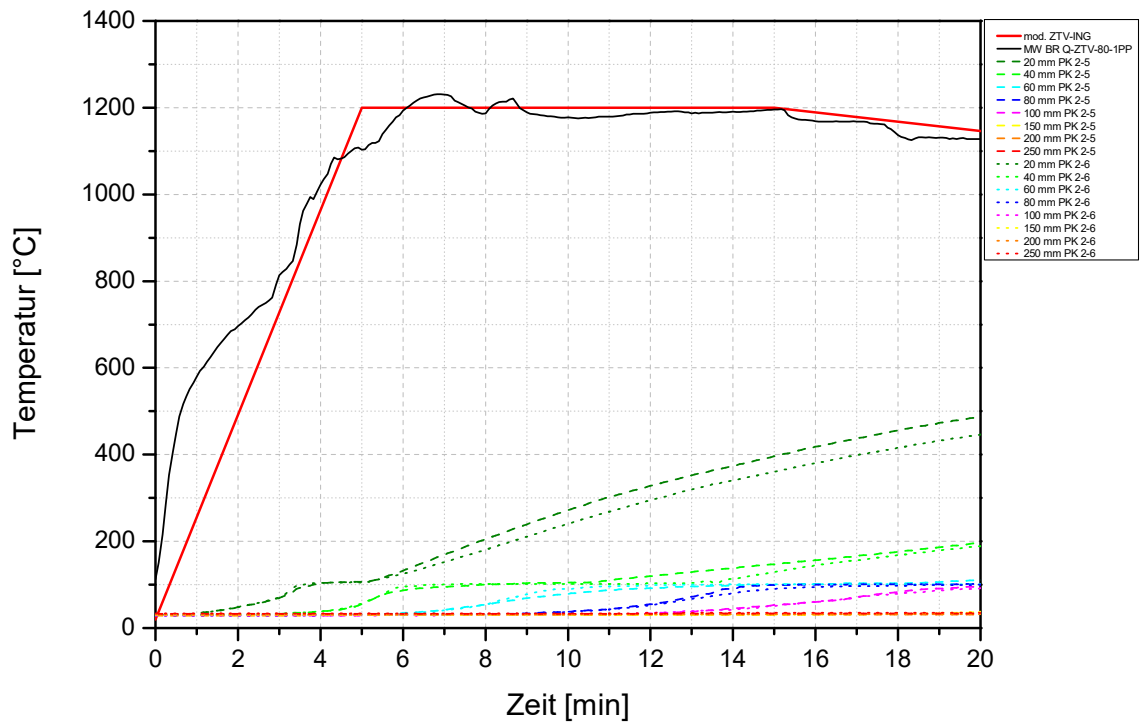


Abb. 7-9: Einbetonierte Temperaturmessstellen: Q-ZTV-80-1PP

Abb. 7-8 und Abb. 7-9 zeigen die Aufzeichnungen der einbetonierten Temperaturmessstellen in den Tiefen 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 und 250 mm. Die Verwendung von PP-Fasern hat keinen Einfluss auf die Durchwärmung der Testkörper. Bei allen Messstellen ist bei ca. 100 °C eine Haltephase in der Temperaturentwicklung zu erkennen.

Zur näheren Betrachtung des Temperaturverlaufes wurde die Temperatur über die Testkörpertiefe dargestellt [Abb. 7-10]. Die Temperaturprofile sind in 5-min-Intervallen dargestellt, um die zeitliche Entwicklung erkennen zu können. Auch hier sind die Haltephasen bei 100°C zu beobachten. Der grundsätzliche Unterschied in den beiden Grafiken ist auf die Abplatzungen zurückzuführen. Dadurch verschiebt sich die beflammete Oberfläche weiter nach innen. Hier wird deutlich, dass das nach ZTV-ING geforderte Kriterium einer maximal zulässigen Temperatur an der Bewehrung von 300°C, bei einer Bewehrungsüberdeckung von 60 mm, nur durch den Einsatz von PP-Fasern erreicht wird. Dies wurde bereits durch Dehn [2010] nachgewiesen.

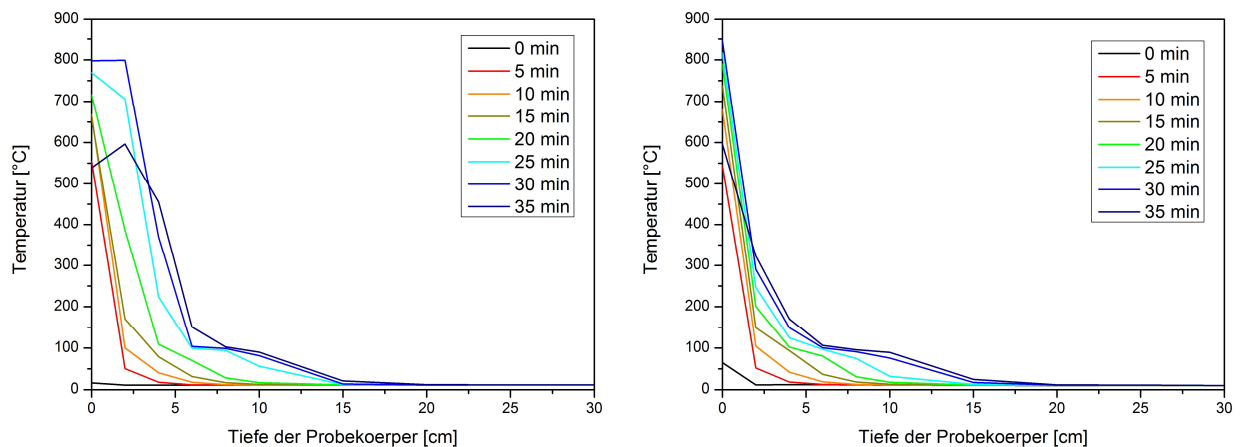


Abb. 7-10: Temperatur über die Testkörpertiefe, erfasst mit jeweils acht einbetonierten Temperaturmessstellen. Der zeitliche Verlauf ist durch die Temperaturprofile in 5-min-Intervallen zu erkennen. Q-ZTV-90-0PP mit Abplatzungen (links) und Q-ZTV-80-1PP ohne Abplatzungen (rechts).

7.2 Visuelle Inspektion

Eines der wichtigsten Hilfsmittel ist die visuelle Inspektion vor, während und im Fortgang der Experimente. Durch die Beobachtungen kann einfach und schnell der Erfolg der Experimente kontrolliert werden. Sofern möglich, werden die Beobachtungen mit Hilfe von Beobachtungsprotokollen dokumentiert und durch die Messung mit Stoppuhren zeitlich eingeordnet. Diese Protokolle beinhalten Informationen über das Abplatzverhalten, Beobachtungen der Rissbildung auf der Oberseite, Feuchtigkeitsbildung und Austrocknung, sowie sonstige Ereignisse und Eingriffe in den Versuchsablauf. Die Beobachtungsprotokolle sind ein wichtiges Hilfsmittel für die Plausibilitätskontrolle.

Beobachtung des Abplatzverhaltens während des Versuchs

Durch Beobachtungsfenster in den Wänden der Brandprüföfen kann der Innenraum und die Unterseite der Testkörper während des Versuchs betrachtet werden. Über diese Öffnungen ist auch eine Dokumentation mittels Videokameras realisierbar [Abb. 7-11]. Prinzipiell ist es über diese Beobachtungsfenster somit möglich, Informationen über den zeitlichen Schädigungsverlauf zu bekommen. Auf diese Weise kann beispielsweise der Beginn der Abplatzungen dokumentiert werden [Abb. 7-13]. Auch die Unterschiede zwischen Abplatzungen (Prüfung bis ca. 1200°C nach ZTV-ING) und Schmelzen der Zuschlagsstoffe (Prüfung bis 1350°C nach RWS) können klar erkannt werden [Abb. 7-14].



Abb. 7-11: Beobachtungsfenster des kleinen Deckenofens der MFPA Leipzig GmbH mit zwei Videokameras zur Beobachtung des Schädigungsverhaltens.

Die Beobachtungsfenster sind allerdings relativ klein, dadurch ist ein ungehinderter Blick auf die Testkörper nicht bei allen Versuchsaufbauten gewährleistet und nie aus einem optimalen Winkel möglich. Darüber hinaus laufen in der Regel nach Versuchsstart die Scheiben aufgrund von Wasserdampf an und eine massive Rauchbildung tritt im Ofen auf [Abb. 7-12 links]. Diese Effekte behindern den Blick auf die Testkörper. Dies tritt in der Regel im selben Zeitintervall auf, in dem mit den ersten Schädigungen zu rechnen ist. Eine bessere Beobachtung ist erst möglich, wenn die Innentemperatur des Ofens ansteigt. Dann kann aber der Blick durch Flammen verdeckt sein [Abb. 7-12 rechts].



Abb. 7-12: Beobachtungsfenster der Brandöfen mit eingeschränkter Sicht während des Versuchs. Links mit angelaufener Scheibe und Rauch im Ofen, rechts verhindern Flammen eine komplette Sicht auf den Testkörper.



Abb. 7-13: Beobachtungsfenster mit ungehindertem Blick auf die Abplatzungen der Betonoberfläche.



Abb. 7-14: Links: Beobachtung von Abplatzungen bei einer Brandbelastung bis 1200°C (P-ZTV-70-0,9PP) und einem Schmelzen der Zuschlagsstoffe und der Stahlbewehrung bei einer Brandbelastung bis 1350°C (P-RWS-70-0,9PP).

Beobachtung der Oberseite der Testkörper während des Versuchs

Während der Branduntersuchungen besteht nicht nur die Möglichkeit, die beflammete Testkörperunterseite zu beobachten, sondern natürlich auch die Oberseite der Testkörper. Dokumentiert wird mit Fotos, Videokameras und Thermographiekameras. Die Videoaufnahmen können, abgesehen von Informationen über das Schädigungsverhalten der Testkörper, auch für die Dokumentation von Störeinflüssen für die Schallemissionsmessungen verwendet werden. So können einige Zeitbereiche mit auffällig erhöhter Schallemissionsaktivität damit erklärt werden, dass sich zu diesen Zeiten jemand auf dem begehbaren Teil des Ofens bzw. auf den Belastungsrahmen aufhielt, um eine Kontrolle der Sensoren oder die Fotodokumentation durchzuführen.

Bei der Betrachtung der Testkörperoberseiten während der Prüfungen ist zuerst eine leichte Rauch- und Wasserdampfbildung zu beobachten, da die Brandräume nicht ausreichend abgedichtet werden konnten. Ab ca. 5 min Versuchsdauer sind die ersten Risse auf der Oberseite zu erkennen. Die Risse verlaufen senkrecht zur beflamten Oberfläche an den Seiten der Testkörper [Abb. 7-15]. Sie haben zueinander einen Abstand von ca. 10-20 cm und gehen von der Unterseite bis wenige Zentimeter unter die Oberseite. Es handelt sich eher um wenige, aber dafür große Risse. Sie sind auf thermo-mechanisches Schädigungsverhalten aufgrund der einseitigen Temperaturbelastung zurückzuführen.

Aus allen Rissen ist ein Austreten von Wasser zu erkennen. Bedingt durch die Temperturbelastung von der Unterseite, findet ein Feuchtigkeitstransport an die Oberseite und die Seiten statt. Dieser wird im Bereich der Risse und der Kabelleitungen der einbetonierten Temperturmessfühler [Abb. 7-17 rechts] beschleunigt. Daher ist in diesen Bereichen und (nach längerer Versuchsdauer) auch ohne Risse, eine Feuchtigkeitsbildung auf der Oberseite zu beobachten [Abb. 7-17 links].

In Abb. 7-18 ist die Austrocknung im unteren Bereich der Testkörper erkennbar. Der obere Bereich zeigt allerdings eine erhöhte Feuchtigkeit, die auf den Feuchtigkeitstransport von unten nach oben zurückzuführen ist.

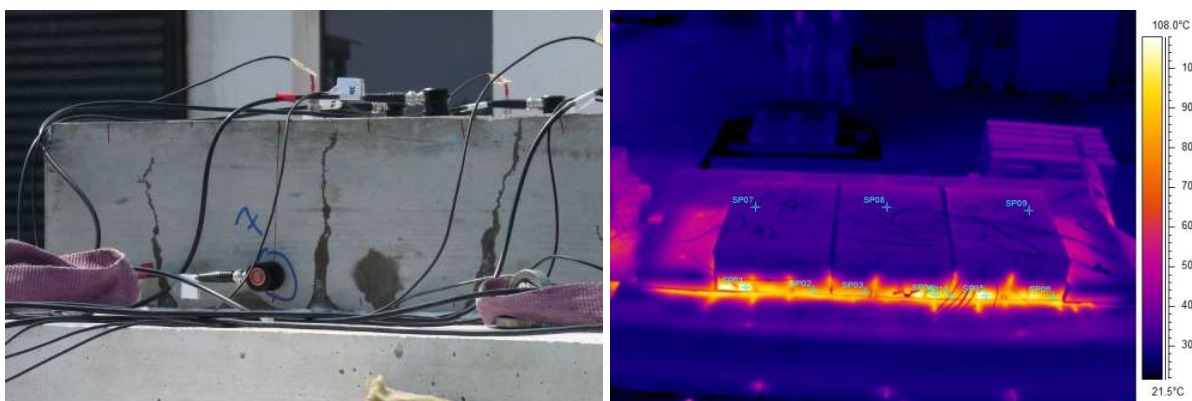


Abb. 7-15: Zu sehen ist Q-ZTV-80-1PP im Bild (links) und als Thermographieaufnahme (rechts). Die senkrecht zur beflamten Oberfläche verlaufenden Risse sind gut zu erkennen.



Abb. 7-16: Wasserführende Risse an der Testkörperoberfläche (P-RWS-70-0,9PP).



Abb. 7-17: Auf der Oberseite der Testkörper tritt während der Brandprüfung Wasser aus. Zu sehen sind die Experimente P-ZTV-70-0,9PP (links) und Qk-RWS-70 (rechts).



Abb. 7-18: Austrocknung im unteren Bereich der Testkörper, hier bei Q-ETK-120-1PP.

Schadensbild nach dem Experiment

Nach dem Abheben der Testkörper von den Brandprüföfen wurden sie aufgestellt, um die brandbeanspruchte Seite begutachten zu können. Im Anhang ist eine vollständige Bilddokumentation der geprüften Testkörper nach den Experimenten zu finden. Abgesehen von der Zuordnung zu den einzelnen Prüfungen, wird eine Testkörpernummerierung eingeführt. Dabei kennzeichnet die erste Zahl die Messreihe und die zweite steht als fortlaufende Nummer für die Testkörper.

Betrachtet man die geprüften Testkörper, sind die Unterschiede durch die Variation von Betonrezeptur und der Brandkurven zu erkennen. Bei der Verwendung von PP-Fasern werden Abplatzungen größtenteils unterdrückt, während die Testkörper ohne PP-Fasern deutliche Schädigungen aufgrund von Abplatzung zeigen [Abb. 7-9]. Darüber hinaus sind Unterschiede in der Abplatztiefe [Abb. 7-20] und örtlicher Verteilung der Abplatzungen zu erkennen.



Abb. 7-19: Direkter Vergleich der Testkörper von Q-ZTV-90-0PP mit Abplatzungen (links) und Q-ZTV-80-1PP (rechts) nach der Brandprüfung.



Abb. 7-20: Abplatzungen nach der Brandprüfung Q-ZTV-90-0PP.

Bei einer näheren Betrachtung der abgeplatzten Bereiche wird eine Schalenbildung sichtbar. Dies tritt vor allem in den Randbereichen der Abplatzungen auf. Die Schalenbildung verläuft parallel zur Oberfläche [Abb. 7-21].

Zu unterscheiden ist grundsätzlich die Schädigung durch Abplatzungen, die Schalenbildung, parallel zur Oberfläche und die Ausbildung von größeren Rissen senkrecht zur brandbeanspruchten Unterseite. Hinzu kommt eine fein verästelte Struktur kleiner Risse, die auf der beflamten Oberfläche zu erkennen ist. Dies ist vor allem bei den Testkörpern mit PP-Fasern zu sehen [Abb. 7-23].

Deutlich ist der Unterschied der Verfärbung der Testkörper zu sehen. Grundsätzlich ändert sich bei allen Prüfungen aufgrund der Zersetzung der Zementmatrix die graue Farbe des Betons in eine sandfarbene bis gelbe Farbe. Betrachtet man die Seite der Testkörper [Abb. 7-23 rechts], reicht diese Verfärbung von der brandbeanspruchten Seite ausgehend bis in eine Tiefe von ca. 3-4 cm. An den Randbereichen, wo die Testkörper auf dem Ofen aufgelegt wurden, und die daher keiner direkten Brandbeanspruchung ausgesetzt wurden, ist keine Verfärbung zu erkennen.

Eine dunklere Verfärbung, die teilweise sogar bis ins Schwarze geht, ist sehr deutlich bei einer Verwendung der RWS-Kurve zu erkennen [Abb. 7-22]. Dies ist auf ein Schmelzen der Zuschlagsstoffe und der Bewehrung aufgrund der Temperaturen bis 1350°C zurückzuführen [Abb. 7-24].



Abb. 7-21: Abgeplatzter Bereich mit Schalenbildung parallel zur Oberfläche (links) angeschmolzene Zuschlagsstoffe (rechts). Beides nach einer Brandbelastung nach ZTV-ING (Q-ZTV-90-0PP).



Abb. 7-22: Vergleich der Betonverfärbung bei unterschiedlichen Brandkurven P-ZTV-70-0,9PP (links) und P-RWS-70-0,9PP (rechts).



Abb. 7-23: Verfärbung der Betonoberfläche der beflamten Oberfläche und die fein verästelte Struktur kleiner Risse auf der Oberfläche.



Abb. 7-24: Geschmolzene Zuschlagsstoffe und geschmolzene Bewehrung (P-RWS-70-0,9PP).

Zusammenfassung der Beobachtungen

Zusammenfassend lässt sich durch die visuelle Beobachtung der Testkörper das Schädigungsverhalten beobachten. Zunächst einmal in Form von Makrorissbildung senkrecht zur Testkörperunterseite aufgrund thermo-mechanischer Schädigung. Kombiniert wird dies mit explosiven Abplatzungen auf der Unterseite. Abplatzungen gibt es natürlich nur, wenn keine PP-Fasern verwendet wurden. Zusätzlich werden eine Mikrorissbildung und eine sichtbare farbliche Veränderung der Zementmatrix beobachtet.

Dieses Schädigungsbild ist aufgrund des Versuchsaufbaus und der Literatur [Kap. 3.2] keineswegs überraschend. Die Erkenntnis ist aber wichtig für das Verständnis und die Einordnung der Ergebnisse der Schallemissionsanlysemessungen. Die Informationen dienen im Rahmen dieser Arbeit vor allem zur Plausibilitätsbetrachtung für die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse. Von besonderem Interesse sind darüber hinaus Testkörper, bei denen nur ein Teilbereich der Oberfläche abgeplatzt ist, da diese zur Überprüfung von Lokalisierungsrechnungen verwendet werden.

8 Parameterbasierte Auswertung von Schallemissionssignalen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde grundsätzlich eine quantitative, signalbasierte Schallemissionsanalyse verwendet. Das bedeutet, dass bei der Messung die kompletten Wellenformen der erfassten Signale aufgezeichnet wurden. Dies steht im Gegensatz zur parameterbasierten, qualitativen Schallemissionsanalyse, bei welcher nur einzelne Parameter von jedem Signal abgespeichert werden [Große 1996]. Die signalbasierte Schallemissionsanalyse ist deutlich langsamer und führt zu größeren Datensätzen, ermöglicht aber eine umfangreiche Signalverarbeitung nach den Experimenten. Darüber hinaus können verschiedene Analyseverfahren zur Anwendung kommen [Große 2008].

Die Informationen, die bei einer qualitativen Schallemissionsanalyse in Form von Parametersätzen enthalten sind, können aber auch aus den vollständig registrierten Signalen generiert werden. Dies hat den Vorteil, dass die Analyseprogramme auf verschiedene Fragestellungen eingestellt werden können und eine Kontrolle der Ergebnisse am Originalsignal jederzeit möglich ist. Ein Vorteil davon ist die oftmals einfache Darstellung, da es möglich wird, die Ergebnisse in zweidimensionalen Grafiken, z.B. über die Zeit aufzutragen. Dies vereinfacht den Vergleich zu anderen Kurven wie den Temperaturoaufzeichnungen. Die Ergebnisse der Parameterextraktion aus den komplett aufgezeichneten Schallemissionssignalen werden im folgenden Kapitel dargestellt und diskutiert.

8.1 Größe der Datensätze und Anzahl aufgezeichneter Ereignisse

Eine erste Übersicht und Kontrolle über den Erfolg einer Schallemissionsmessung bietet die Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen. Wenn sehr wenige Ereignisse aufgezeichnet wurden, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Messgeräte für die Anwendung zu unempfindlich eingestellt wurden. Eine zu empfindliche Einstellung führt hingegen dazu, dass für einzelne Ereignisse mehrere Blöcke geschrieben werden und sehr viele Störgeräusche miterfasst wurden, die in der Datenverarbeitung aufwendig aussortiert werden müssen [Kap. 8.2]. Darüber hinaus werden die Datensätze dadurch deutlich größer, was hinsichtlich des verfügbaren Speicherplatzes und der Arbeitsspeicher für die Datenverarbeitung problematisch sein kann. Einen Wert für die passende Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen anzugeben ist weder sinnvoll noch möglich, da sie sehr stark von der Prüfaufgabe und damit von den Geräteeinstellungen und natürlich vom Schädigungsverhalten des Materials abhängt. Ein erfahrener Prüfer kann aber abschätzen in welchem Bereich die Anzahl an aufgezeichneten Schallemissionen für das jeweilige Experiment liegen sollte, um eine schnelle Überprüfung des Messerfolges zu erhalten. Eine Übersicht der Anzahl der aufgezeichneten Schallemissionsereignisse aller Datensätze, sowie die daraus resultierenden Dateigrößen, sind in Tab. 8-1 zu finden.

Auffällig sind die großen Datensätze der Brandversuche Q-ETK-130-0PP und Q-ETK-120-1PP-TA-V103. Dies waren die ersten Experimente und es gab noch keine Informationen, wie Signale aufgrund von Abplatzungen aussehen. Daher wurden Abtastrate, Blocklänge und Verstärkung sehr groß gewählt, was zu einer empfindlichen Messgeräteeinstellung und damit zu sehr großen Datensätzen führte. Bei späteren Experimenten konnten die Messgeräte gezielter

eingestellt werden. Die Unterschiede der Dateigrößen zwischen Experimenten mit und ohne PP-Fasern lassen einen ersten Schluss zu, dass die aufgezeichneten Schallemissionsereignisse mit einem Schädigungsverhalten von Beton in Form von explosiven Abplatzungen zusammenhängen.

Tab. 8-1: Anzahl der aufgezeichneten Schallemissionsereignisse, sowie die Dateigrößen der Datensätze:

Code	Anzahl SE-Ereignisse	.bdf	.tpc5	.dat + .par
Q-ETK-130-OPP-TA	65.738	43,7 GB	92,7 GB	-
Q-ETK-130-OPP-TO-V103	22.384	-	-	3,5 GB
Q-ETK-120-1PP-TA-V103	12.801	2,4 GB	9,9 GB	-
Q-ETK-120-1PP-TO-V103	1.474	-	-	143 MB
Q-ZTV-90-OPP-TA-V103	36.185	2,8 GB	24,8 GB	-
Q-ZTV-90-OPP-TA-Glaser	45.991	3,5 GB	31,5 GB	-
Q-ZTV-90-OPP-TO-V103	14.369	-	-	954 MB
Q-ZTV-80-1PP-TA-V103	4.246	320 MB	2,9 GB	-
Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser	3.362	262 MB	2,3 GB	-
Q-ZTV-80-1PP-TO-V103	462	-	-	30,7 MB
P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103	47.968	5,1 GB	65,8 GB	-
P-RWS-70-0,9PP-TA-V103	47.999	5,2 GB	66,7 GB	-
Qk-RWS-70	7.855	2,2 GB	27,8 GB	-
Q-ZTV-75-2PP-US_unten-TA-V103	7.854	860 MB	10,7 GB	-
Q-ZTV-75-2PP-US_oben-TA-V103	6.768	741 MB	9,3 GB	-
B-Real-TA-V103	24.205	3,68 GB	33,2 GB	-

8.2 Signalbetrachtung, Mustererkennung und Signalqualität

Bei der signalbasierten Schallemissionsanalyse wird grundsätzlich die gesamte Signalform aufgezeichnet. Abgesehen davon, dass verschiedenste Analyseverfahren diese Informationen benötigen, bietet es die Möglichkeit sich die einzelnen Signalformen anzusehen. Ein gut ausgebildeter Experte kann aus diesen Signalen Rückschlüsse auf die Qualität und den Erfolg der Messung ziehen. Darüber hinaus ist es ein wichtiges Mittel, um Auswerteverfahren und vor allem deren Grenzen zu verstehen. Bei dem großen Umfang der Datensätze ist es nur möglich, stichprobenartig einzelne Signale zu betrachten. Allerdings ist diese Vorgehensweise die Basis für alle Auswerteverfahren der Schallemissionsanalyse.

Eine solche Sichtung wurde für alle Datensätze durchgeführt. Im Folgenden sind beispielhaft Signale aus dem Datensatz Q-ZTV-90-0PP-TA-V103 dargestellt [Abb. 8-1 bis Abb. 8-3]. Es ist jeweils ein aufgezeichneter Block von einem einzelnen Sensor zu sehen. Grundsätzlich handelt es sich um eine Auswahl von Signalformen, die in allen Datensätzen vermehrt aufgefunden wurden und für die Ergebnisse charakteristisch sind. Es ist somit möglich verschiedenen Signalformen als Muster zu erkennen und entsprechend zu sortieren. Eine Möglichkeit der Auswertung besteht darin, eine solche Mustererkennung mit dem Auftreten von bestimmten Schädigungsmechanismen zu koppeln. Somit kann bei anschließenden Messungen aus den Signalformen auf spezifische Schädigungen geschlossen werden.

In Abb. 8-1 links handelt es sich um ein qualitativ gutes Schallemissionssignal. Zu erkennen ist ein Signal, welches sich aus dem Grundrauschen erhebt, bis zu einer Maximalamplitude anwächst und dann wieder abklingt. Die Signalqualität wird hierbei durch das Signal/Rausch-Verhältnis entscheidend bestimmt. Bei einem großen Signal/Rausch-Verhältnis ist das Signal gut erkennbar und der Übergang von Rauschen auf das Signal, also der Signalbeginn, gut zu bestimmen. Man spricht hier von Ersteinsatzbestimmung oder Picken. Dieser Ersteinsatz bezeichnet den Moment des zeitlich ersten Auftreffens eines Signales am Sensor und ist entscheidend für eine Lokalisierungsrechnung.

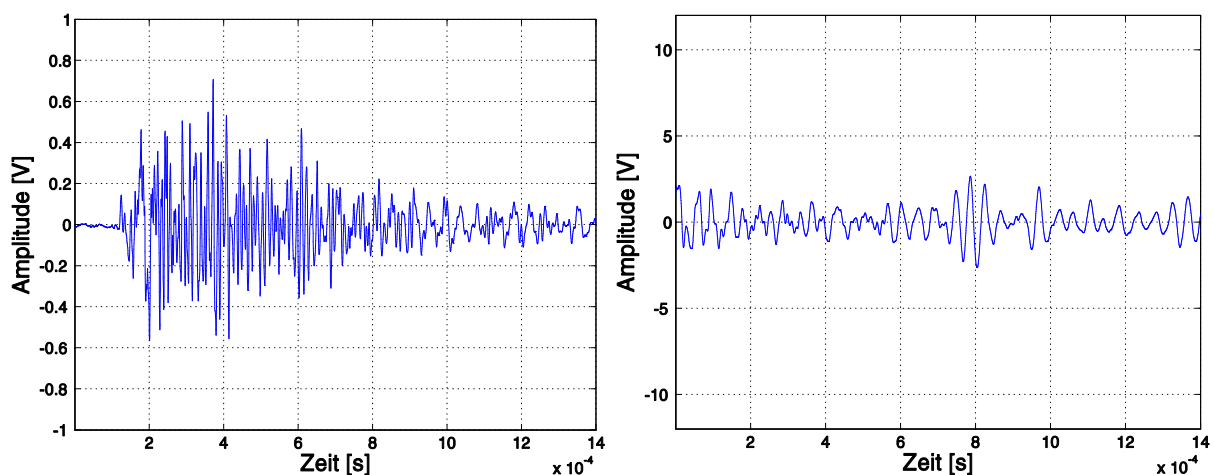


Abb. 8-1: Qualitativ gutes Schallemissionssignal (links) im Vergleich mit aufgezeichnetem Rauschen ohne erkennbare Signalform (rechts).

Im Gegensatz zu diesem guten Signal ist in Abb. 8-1 rechts nur Rauschen zu sehen. Eine transiente Signalform ist hier kaum zu erkennen. Daher ist es für eine Auswertung nicht zu verwenden. Die Amplitude ist deutlich größer im Vergleich zum Grundrauschen zu Beginn des Signales in Abb. 8-1 links. Dies kann ein erhöhtes Grundrauschen aufgrund von Geräuschen aus der Umgebung sein, Teil eines vorangegangenen Signales oder eine Störung durch andere Messgeräte. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit, dass diesem Rauschen ein niedrigerenergetisches Signal überlagert ist. An der Signalform ist dies aber nicht ohne weiteres zu erkennen.

In Abb. 8-2 sind zwei Beispiele zu finden, bei denen mehrere Signale innerhalb eines Blocks auftreten. Dies führt bei verschiedenen Auswertungen zu einer Verfälschung des Ergebnisses. Bei einer Auswertung der Schallemissionsaktivität [Kap. 8.3] werden beispielsweise nur ein Signal und nicht beide Signale gezählt. Bei der Auswertung von Maximalamplituden berücksichtigt man immer nur die größere, während bei einer Energiebetrachtung [Kap. 8.4] beide Signale zu einem zusammengerechnet werden. Dieses Problem könnte man in Abb. 8-2 links durch eine Verkürzung der Blocklänge verbessern. Dies ist aber natürlich abhängig von der Energie des Ereignisses und der Länge seiner Abklingphase. Eine solche Verkürzung wäre in Abb. 8-2 rechts nicht zielführend, da die Ereignisse zeitlich viel zu nah aufeinander stattfanden. Diese Beispiele demonstrieren auch gut die Probleme, die eine rein parameterbasierte Auswertung aufwerfen.

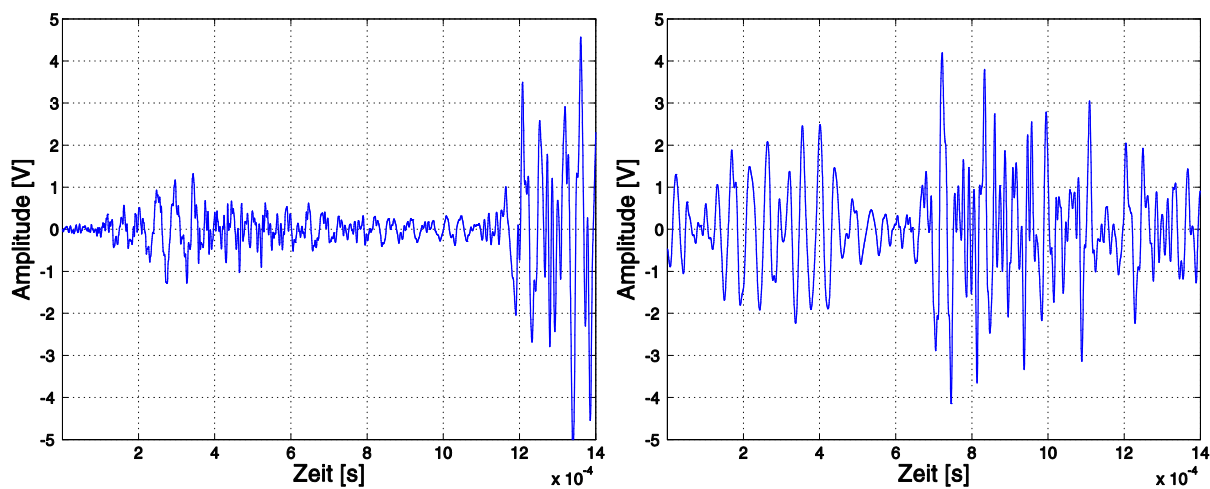


Abb. 8-2: Zwei Beispiele für das Auftreten mehrerer Signale innerhalb eines Blocks.

Ein weiterer Effekt, der bei den vorliegenden Datensätzen häufiger auftrat, ist beispielhaft in Abb. 8-3 zu sehen. Hierbei handelt es sich um zwei aufeinanderfolgende Blöcke. Die Signale sind bei ca. 8 V in der Amplitude abgeschnitten, da die hohen Signalenergien an die Grenzen der Vorverstärker bzw. des Transientenrekorders stießen. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich um ein einzelnes hochenergetisches Signal handelt. Dies beginnt in Abb. 8-3 links. Durch die große Amplitude hat das Signal eine deutlich längere Abklingphase. Daher liegt zu Beginn des Blocks von Abb. 8-3 rechts noch immer ein Signal und somit auch eine Triggerbedingung vor. Dieses Signal klingt erst nach mehreren Blöcken ab. Ein Auftreten solcher Signale führt beispielsweise bei der Auswertung der Schallemissionsaktivität [Kap. 8.3] dazu, dass mehr

Signale gezählt werden, als tatsächlich aufgetreten sind. Auf der anderen Seite erhöht sich dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass Signale gleichzeitig auftreten, bzw. während des Abklingens eines hochenergetischen Signales auftreten. Signale die sich in dieser Form überlagern sind aus der Signalform heraus nicht zu identifizieren. Dies wäre nur bei einer geringeren Verstärkung möglich. Dann wären niedrigerenergetische Signale allerdings nicht mehr zu erfassen.

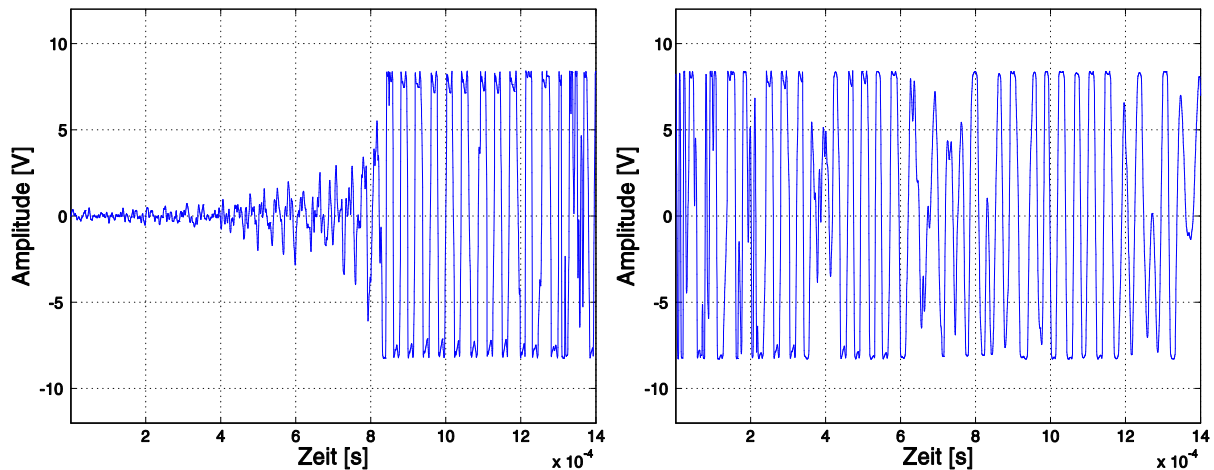


Abb. 8-3: Signalformen zweier aufeinanderfolgender Blöcke. Zu erkennen sind ein Signalbeginn (links) sowie die aufgrund der hohen Signalenergie abgeschnittenen Amplituden.

Abschließend lässt sich zur Betrachtung einzelner Signale sagen, dass man wichtige Informationen über den Datensatz, den Erfolg einer Messung und eine Schädigungscharakteristik bekommen kann. Einzelne Signalmuster sind gut zu identifizieren und für die weitere Auswertung verwendbar. Auch wenn bei einem großen Datensatz nur die strichprobenhafte Betrachtung von Signalen möglich ist, ist es dennoch wichtig, damit man ein Gefühl für den Datensatz bekommt. Ein Experte kann mit dem Auge entscheidende Unterschiede identifizieren. Darüber hinaus hängt die Qualität jedes einzelnen Signales grundsätzlich mit der Sensorik und den Messereinstellungen zusammen. Es ist wichtig, sich über die Verstärkung und die Verwendung von Filtern Gedanken zu machen und im Vorfeld darüber zu entscheiden, da es grundsätzlich nicht möglich sein wird, alle Signale und Informationen mit einem Messsetup gleichzeitig zu detektieren

Der Aussagegehalt von Signalen lässt sich verbessern, indem man nicht nur ein Signal, sondern alle Signale eines Ereignisses betrachtet, welches mit mehreren Sensoren aufgezeichnet wurde [Abb. 8-4 und Abb. 8-5]. Hier wird der Ersteinsatz der einzelnen Signale deutlich. Je kleiner der Abstand des einzelnen Sensors zum Ursprungsort ist, desto früher kommt das Signal an. Somit wird eine erste Eingrenzung des Ortes möglich. Bei starken Signalen mit großem Signal/Rausch-Verhältnis ist dies gut zu erkennen [Abb. 8-4]. Bei schwachen Signalen, zu stark ausgeprägtem Grundrauschen oder zu großem Sensor-Ursprung-Abstand, kann es sein, dass einzelne Signale überhaupt nicht zu erfassen sind [Abb. 8-5]. Eine solche Betrachtung mehrerer Kanäle erhöht den Informationsgehalt. Aussagen über Schädigungsmechanismen oder deren zeitliche Verläufe werden allerdings erst bei einem Vergleich mehrerer aufeinanderfolgender Ereignisse bzw. einer Betrachtung des gesamten Datensatzes möglich.

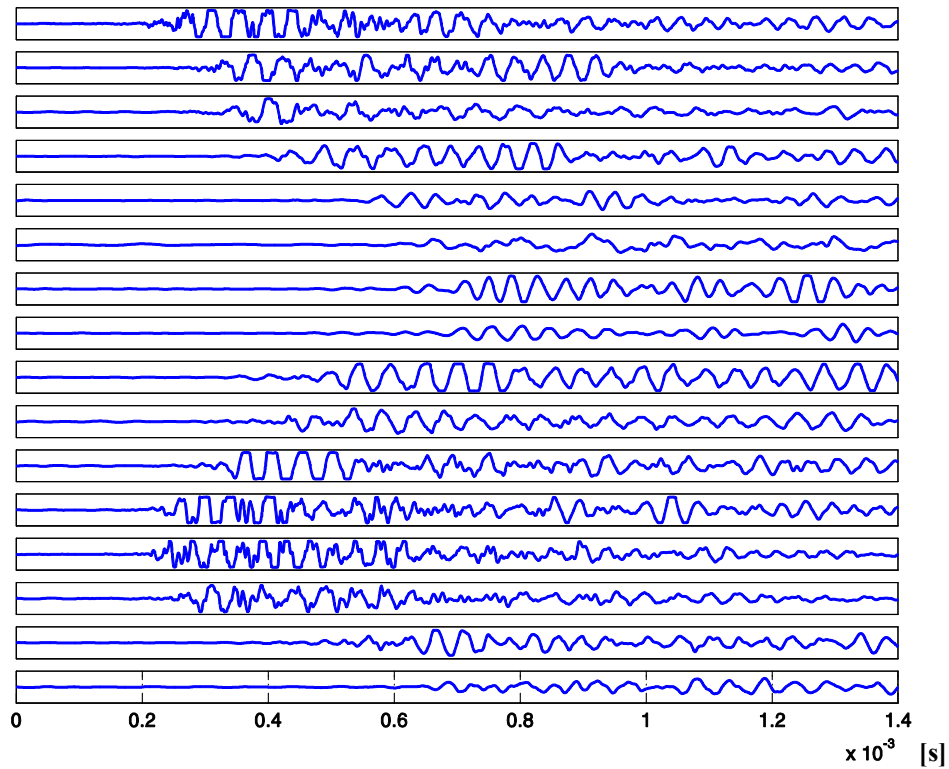


Abb. 8-4: Energetisch starkes Ereignis, das mit einem 16-Kanal-Transientenrekorder aufgezeichnet wurde. Zu sehen sind alle 16 Kanäle.

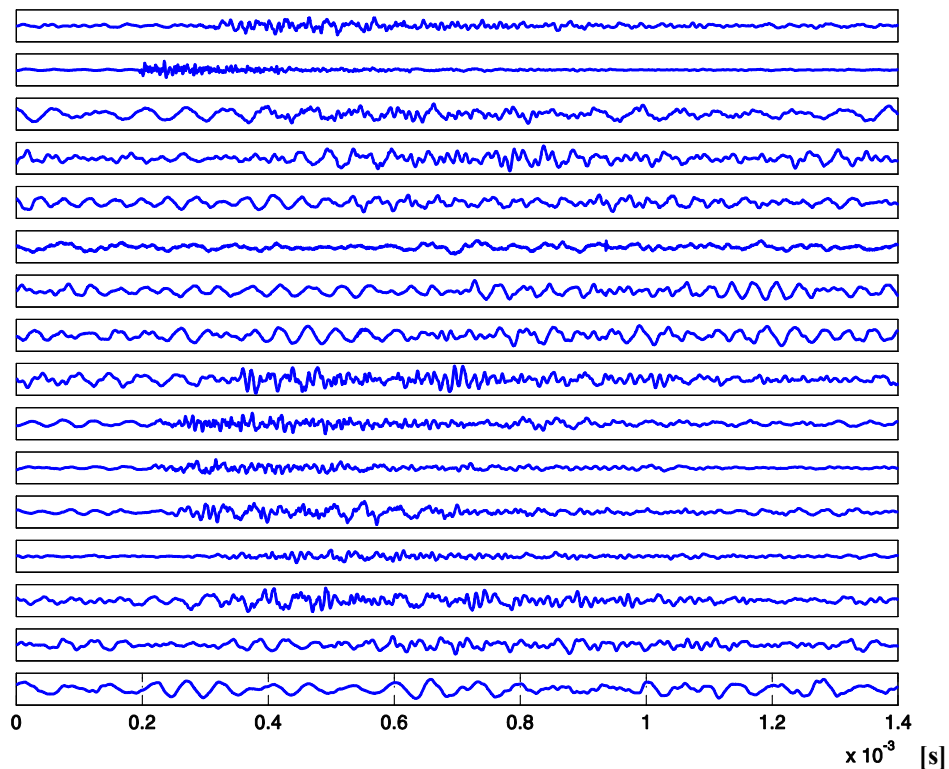


Abb. 8-5: Energetisch schwaches Ereignis, das mit Rauschen überlagert ist. Zu sehen sind alle Kanäle, die mit einem 16-Kanal-Transientenrekorder aufgezeichnet wurde.

8.3 Schallemissionsaktivität

Um den zeitlichen Verlauf der einzelnen Brandexperimente nachzuvollziehen, wurde die Schallemissionsaktivität ausgewertet. Dabei werden die auftretenden Einzelereignisse kumuliert und in Abhängigkeit zur Versuchsdauer dargestellt. Ein steiler Anstieg der Kurve lässt auf eine hohe Aktivität und damit auf eine erhöhte Schädigung schließen, ein horizontaler Kurvenverlauf zeigt Bereiche ohne Aktivität an.

Abb. 8-6 zeigt die Schallemissionsaktivität bei Experimenten mit und ohne PP-Faserzusatz (Q-ZTV-90-0PP-TA-V103 und Q-ZTV-80-1PP-TA-V103). Es handelt sich um annähernd die gleiche Betonrezeptur, allerdings wurden einmal PP-Fasern verwendet und dadurch das Auftreten von Abplatzungen verhindert [Kap. 3.2.3]. Bei beiden Experimenten wurde derselbe Transientenrekorder, mit denselben Sensoren und Vorverstärker, mit gleichen Messgeräteeinstellungen und vergleichbarer Sensoranordnung eingesetzt [Tab. 4-4].

Als Erstes ist ein deutlicher Unterschied in der Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen zu erkennen. Während beim Versuch ohne PP-Faserzusatz [Abb. 8-6 links] über 30000 Ereignisse aufgezeichnet wurden, begrenzt sich die Schallemissionsaktivität mit PP-Fasern [Abb. 8-6 rechts] auf ein Maximum von ca. 4200 Ereignissen. Man hat also ein sichtbares Messergebnis, welches mit der Beobachtung und dem Zustand der Testkörper nach dem Versuch zusammenpasst. Die aufgetretenen Abplatzungen lassen sich folglich mit der Schallemissionsaktivität nachweisen. Die Tatsache, dass bei den Testkörpern mit PP-Fasern, die wenig bis keine Abplatzungen zeigten, trotzdem eine Schallemissionsaktivität aufgezeichnet wurde, ist auf die Rissbildung im Testkörper aufgrund von Spannungen aus Temperaturdehnungen zurückzuführen [Kap. 7.2].

Des Weiteren lässt sich an der Schallemissionsaktivität das zeitlich erste Auftreten von Schallemissionsereignissen und damit der Beginn von Schädigungen im Beton erkennen. Dies beginnt für beide Datensätze bei ca. 2,5 Minuten [Abb. 8-6]. Es folgt daraufhin eine kurze Phase mit einem langsamen Anstieg bis ca. 3-3,5 Minuten. Dies geht dann in eine erhöhte Aktivität mit annähernd linearem Verlauf über.

Der lineare Verlauf, im Bereich zwischen 4 und 8 Minuten, in der Kurve in Abb. 8-6 links, hängt mit der Sättigung des Messgerätes zusammen. Das bedeutet die Leistungsfähigkeit des Messgerätes reichte bei den gewählten Einstellungen nicht aus, um alle Ereignisse aufzuzeichnen. Dadurch zeichnet das System annähernd konstant auf, was zu einem linearen Verlauf der Schallemissionsaktivität führt. Eine Interpretation dieser Kurve ist dann nicht mehr sinnvoll. Es wäre möglich, dies durch eine unempfindlichere Einstellung des Messgerätes zu ändern, wobei dann aber andere Messergebnisse wie der Beginn der Schädigungen schlechter zu erfassen wären.

Grundsätzlich wird es nur bei wenigen Prüfaufgaben tatsächlich möglich sein, alle auftretenden Schallemissionsereignisse zu erfassen. Oftmals verliert man Signale, wenn das Messsystem zu empfindlich eingestellt wurde. Bei weniger empfindlichen Messgeräten reagieren diese auch

auf Störgeräusche. Dies äußert sich in einer erhöhten Schallemissionsaktivität, wobei der daraus nutzbare Informationsgehalt in Frage zu stellen ist. Erst nach dem aufwendigen Aussortieren von Signalen könnte wieder auf Material- und Schädigungsverhalten geschlossen werden. Darüber hinaus ist es möglich, dass Signale gleichzeitig oder zumindest kurz hintereinander auftreten. Dadurch werden mehrere Signale als ein einzelnes Signal interpretiert, der Anstieg der Schallemissionsaktivität wird daher zu flach angezeigt.

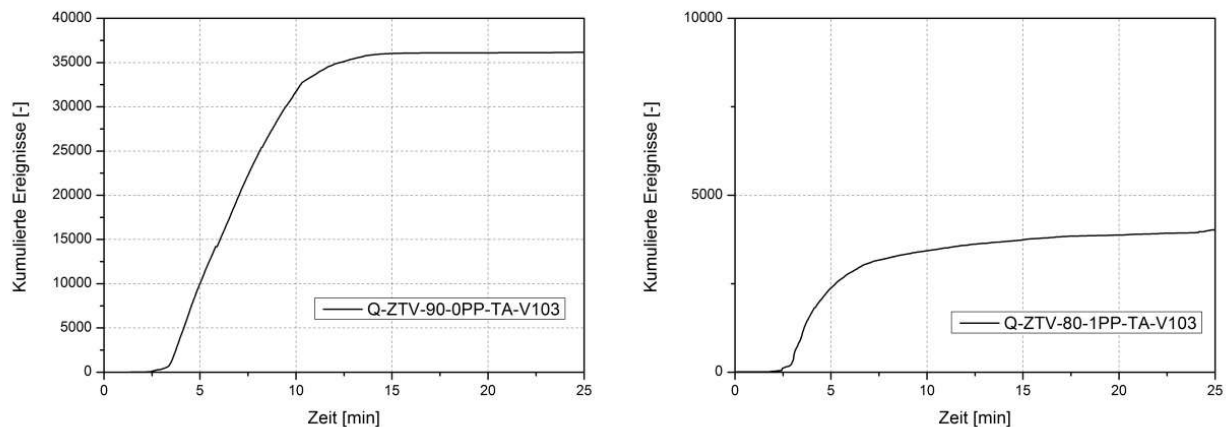


Abb. 8-6: Links: Schallemissionsaktivität von Q-ZTV-90-0PP-TA-V103 (ohne PP-Fasern) und rechts die Schallemissionsaktivität von Q-ZTV-80-1PP-TA-V103 (mit PP-Fasern).

Einer der entscheidenden Versuchsparameter ist die verwendete Brandkurve [Kap. 3.2.5]. Die Aufheizrate, also wie steil die Brandkurve in den ersten Minuten ansteigt und die Maximaltemperatur sind nachweislich entscheidend für den Grad der Schädigung. Vergleicht man die Schallemissionsaktivität zweier Experimente mit unterschiedlichen Brandkurven, sind deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf zu erkennen [Abb. 8-7 links]. Die zugehörigen aufgezeichneten Brandraumtemperaturen sind in Abb. 8-7 rechts dargestellt. Bei einer Steuerung der Brandöfen nach der ZTV-ING Brandkurve werden früher Schallemissionen detektiert und die Kurve steigt sofort steil an. Im Gegensatz dazu, steigt die Kurve bei einer Erwärmung nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) über einen Zeitraum bis 10 Minuten deutlich langsamer an.

Die ZTV-ING Brandkurve hat einen steileren Anstieg und erreicht eine höhere Temperatur als die ETK. Im vorliegenden Experiment wurde mit der modifizierten ZTV-ING geprüft. Diese Kurve geht nach 15 Minuten in eine Abkühlphase über, während bei der ETK die Temperatur bis zum Ende der Prüfung immer weiter gesteigert wird [Kap. 3.2.5]. Dies führt dazu, dass bei der durch die ZTV-ING angeregten Schallemissionsaktivität nach 15 Minuten keine Steigung mehr auftritt, also keine Ereignisse mehr registriert werden. Bei dem nach ETK gesteuerten Experiment ist allerdings weiterhin eine Zunahme der Ereignisse zu verzeichnen, obwohl die absolute Temperatur deutlich tiefer ist.

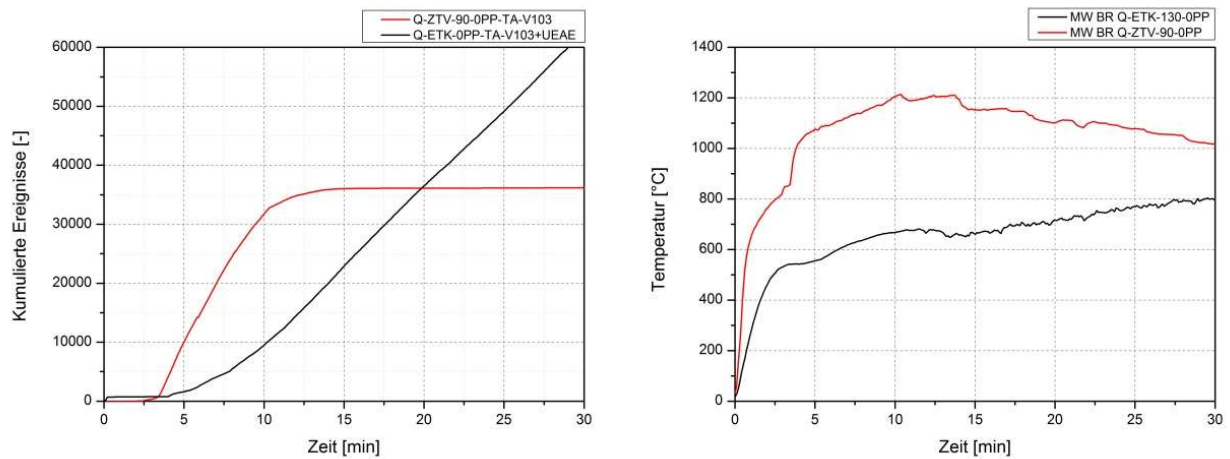


Abb. 8-7: Einfluss der verwendeten Brandkurven (ZTV-ING und ETK) auf die Schallemissionsaktivität. Zu sehen sind die Schallemissionsaktivität (links) und die mittleren Brandraumtemperaturen von Q-ETK-0PP-130-TA-V103+UEAE und Q-ZTV-0PP-90-TA-V103 (rechts).

Grundsätzlich lassen sich die beiden Kurven in Abb. 8-7 jedoch nur bedingt miteinander vergleichen. Die Testkörper wurden nicht aus dem gleichen Material hergestellt und haben unterschiedliche Festigkeiten. Darüber hinaus zeigen beide Schallemissionsaktivitätskurven ab einem bestimmten Punkt einen linearen Verlauf mit unterschiedlicher Steigung. Das bedeutet, dass die Sättigung der Messgeräte erreicht wurde. Allerdings lässt sich an den Steigungen erkennen, dass die Messgeräte unterschiedlich empfindlich eingestellt wurden. Ein direkter Vergleich der Experimente, wie er hier dargestellt ist, erscheint also wenig sinnvoll. Aus den Beobachtungen und Zeitpunkten der ersten auftretenden Ereignisse und der Wendepunkte lassen sich jedoch Informationen ableiten. Somit kann angenommen werden, dass das Schädigungsverhalten nicht zwangsläufig mit der Maximaltemperatur, sondern vielmehr mit der Aufheizrate und grundsätzlich einer Temperaturerhöhung zusammenhängt.

Die Vertrauenswürdigkeit der Schallemissionsmessungen kann anhand der Grafiken in Abb. 8-8 überprüft werden. Hier ist das Ergebnis der Schallemissionsaktivität beim gleichen Experiment zu sehen, das mit drei voneinander unabhängigen Transientenrekorder-Sensor-Kombinationen aufgezeichnet wurde. Dargestellt sind die Ergebnisse ohne PP-Fasern (links, Q-ZTV-90-0PP) und mit PP-Fasern (rechts, Q-ZTV-80-1PP). Die Messgeräteeinstellungen wurden so gewählt, dass die Signale auf die Anregung mit Bleistiftminenbrüchen vor dem Experiment möglichst annähernd die gleiche Amplitude aufwiesen.

In beiden Fällen weichen die drei Kurven voneinander ab, obwohl sie durch den gleichen Schädigungsprozess entstanden sind. Dies zeigt, wie stark die Schallemissionsaktivitäten von Sortierkriterien und Messgeräteeinstellungen abhängen. Es ist daher davon abzuraten, aus diesen Kurven auf das tatsächliche Werkstoff- oder Schädigungsverhalten zu schließen. Quantitative Aussagen werden erst bei mehreren Experimenten mit genau gleichen Messgeräten und Einstellungen, sowie gleichen Testkörperabmessungen und Sensoranordnungen möglich. Da es jedoch grundsätzlich nicht möglich ist, alle Ereignisse zu erfassen, ist eine gezielte Auswahl von Schallemissionsereignissen notwendig um weitere Informationen aus den Kurven zu erhalten.

Hierfür werden weitere Signalparameter, wie beispielsweise die Signalenergie [Kap. 8.4] verwendet, wodurch sich der Informationsgehalt erhöht. Darüber hinaus können dadurch der Wert und die Aussagekraft der Darstellung überprüft werden. Ein direkter Vergleich von Experimenten anhand der Schallemissionsaktivität erscheint also nur sinnvoll, wenn möglichst nur ein Versuchsparameter geändert wird und die Messgeräteinstellungen und Sensoranordnungen gleich sind.

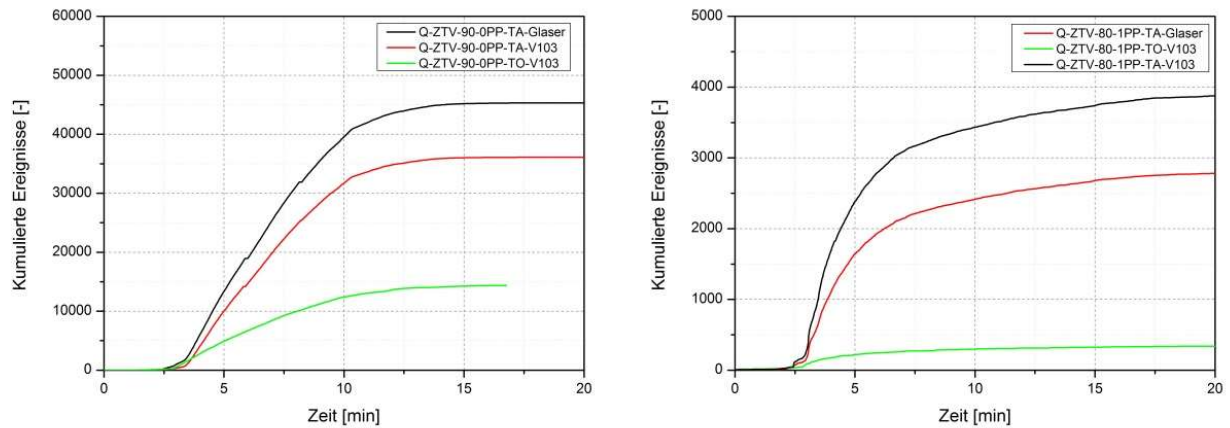


Abb. 8-8: Schallemissionsaktivität von Q-ZTV-90-0PP (links) und Q-ZTV-80-1PP (rechts). Die drei Kurven zeigen jeweils die Ergebnisse der Datensätze -TO-V103, -TA-V103 und TA-Glaser.

Grundsätzlich kann die Reproduzierbarkeit untersucht werden, indem zwei Experimente mit den gleichen Versuchsparametern durchgeführt werden. Dies wurde bei den Experimenten Q-ZTV-75-2PP-US_oben und Q-ZTV-75-2PP-US_unten realisiert. Beide wurden nach der ZTV-ING bis 20 min geprüft. Die aufgezeichnete Schallemissionsaktivität und die mittleren Brandraumtemperaturen sind Abb. 8-9 zu entnehmen.

Es zeigte sich bei beiden Experimenten ein erster Anstieg von Schallemissionsereignissen nach ca. 3 Minuten. Auch der Kurvenverlauf und die Form sind ähnlich. Jedoch zeigt die Schallemissionsaktivität von Q-ZTV-75-2PP-US_unten einen steileren Anstieg und endet dadurch bei ca. 1000 Ereignissen mehr als Q-ZTV-75-2PP-US_oben.

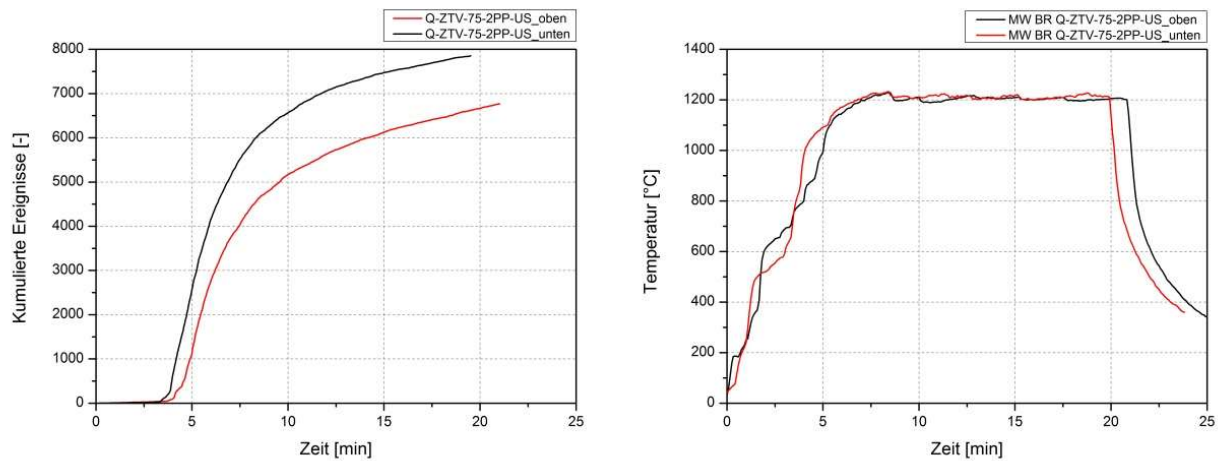


Abb. 8-9: Vergleich zweier Experimente mit gleicher Betonrezeptur und gleicher Brandkurve. Schallemissionsaktivität (links) und mittlere Brandraumtemperaturen (rechts) von Q-ZTV-75-2PP-US_unten und Q-ZTV-75-2PP-US_oben.

Die Testkörper wurden zeitgleich mit dem gleichen Material hergestellt und gleich gelagert. Sie wurden am gleichen Tag auf demselben Ofen geprüft. Der einzige Unterschied war, dass die beiden Testkörper nacheinander, mit einer Zeitdifferenz von ca. 3 Stunden, geprüft wurden. Beim zweiten Experiment (Q-ZTV-75-2PP-US_unten) war der Ofen noch leicht erwärmt und es setzte Nieselregen ein.

Die Sichtprüfung der beiden Testkörper nach den Experimenten ergab keinen entscheidenden Unterschied des Schädigungsgrades [Kap. 0]. Es traten sehr wenige bis keine Abplatzungen auf. Zu sehen war eine fein verästelte Rissbildung auf der Oberfläche und eine deutliche Verfärbung.

Weitere Abweichungen können noch durch die Inhomogenität des Betons, ungleichmäßige Verdichtung und die Abweichungen in der Temperatursteuerung entstehen. Diese Einflüsse müssen aber grundsätzlich als gegeben betrachtet werden, da sie bei den Prüfungen nur mit sehr hohem Aufwand verbessert werden könnten. Einige dieser Einflüsse sind bestenfalls zu minimieren, bleiben jedoch immer vorhanden. Beim Aufbau dieser Experimente wurde bereits sehr stark auf die Vergleichbarkeit geachtet.

Als erste Annahme sind die hier aufgetretenen Abweichungen, also als Genauigkeit der Schallemissionsaktivität bei Brandversuchen an Beton, anzusehen. Für eine ausreichende Untersuchung und Erfassung der Reproduzierbarkeit sind diese Experimente natürlich nicht ausreichend. Hierfür wäre eine umfangreiche Parameterstudie notwendig, die ressourcenintensiv und teuer wäre.

8.4 Signalenergie

Ein weiterer Parameter, der aus den Schallemissionssignalen erfasst werden kann, ist die Energie, welche die einzelnen Signale enthalten. [Große 2008]. Die Signale entstehen durch die Energie, die bei Schädigungsprozessen freigesetzt wird. Daher hängt die Signalenergie mit dem Ausmaß der Schädigung zusammen. Jedoch hat die gesamte Messkette einen Einfluss auf die Signalenergie. Zu beachten ist das Material und dessen Zustand, der Abstand von der Quelle zum Sensor aufgrund der Materialdämpfung, die Übertragungsfunktion der Sensoren, die Vorverstärkung und auf welche Art die Signalenergie berechnet wird. Es gibt zwar Möglichkeiten für eine absolute Kalibrierung der Sensoren [McLaskey 2011, McLaskey 2013], dies ist aber mit einem erheblichen Aufwand verbunden und kann darüber hinaus nur einen Teil der Messkette erfassen. Daher wird die Energie in dieser Arbeit dimensionslos angegeben und nur qualitativ betrachtet.

Eine Möglichkeit ist es, die Fläche unter der Signalkurve zu erfassen. Hierfür werden die Amplitudenwerte quadriert und mit den einzelnen Zeitschritten multipliziert. Diese Berechnung wird entweder auf das gesamte Signal angewandt, wobei dann bei Vergleichen mit anderen Datensätzen die Blocklänge beachtet werden muss, oder es wird über ein festgelegtes Zeitfenster gerechnet. Dies kann entweder am Triggerzeitpunkt beginnen, oder am durch den AIC-Picker berechneten Ersteinsatz. Letzteres ist genauer, erfordert aber einen korrekt ermittelten Ersteinsatz.

Für jedes Ereignis wird auf jedem erfassten Kanal eine eigene Signalenergie berechnet, da sich die Sensoren unterschiedlich weit von der Quelle befinden. Um den Einfluss dieses Abstandes zu minimieren und für jedes Ereignis einen einzelnen Wert zu bekommen, wird der Mittelwert der Signalenergie aller Sensoren gebildet. Hierfür ist eine gleichmäßige Sensorabdeckung des Testkörpers notwendig.

8.4.1 Zeitlicher Verlauf der Signalenergie

Betrachtet man die Signalenergie der einzelnen Ereignisse in Abhängigkeit von der Versuchsdauer, bekommt man einen Überblick wann der Testkörper am stärksten geschädigt wird. Jedes Ereignis wird durch einen Punkt dargestellt. Wenn in einem Zeitbereich eine Häufung dieser Punkte auftritt, kann von einer erhöhten Schallemissionsaktivität ausgegangen werden. Im Vergleich zu einer reinen Darstellung der Schallemissionsaktivität [Kap. 8.3] erhöht sich die in der Grafik erfasste Information.

Zu sehen ist dieser Vergleich in Abb. 8-10. Hier werden die Ergebnisse des Brückenbrandversuches (B-Real) [Kap. 5.6]. betrachtet. Es handelt sich dabei um die Schallemissionsaktivität (links) und die Signalenergie dargestellt über der Versuchsdauer (rechts). Der Beginn der Schädigung bei ca. 7 min ist in beiden Darstellungen gut zu erkennen. Ab ca. 16,5 min treten jedoch nur noch niedrigenergetische Signale auf. Ab diesem Zeitpunkt kann von einer deutlich verminderten Schädigung ausgegangen werden. Dies ist jedoch in der Darstellung der Schallemissionsaktivität nicht zu erkennen. Ähnlich verhält es sich in der Zeitspanne von 13 bis 14 min. Auch hier ist eine verringerte Schädigung aus der Signalenergie abzulesen.

Es zeigt sich also, dass die Änderungen der Brandeinwirkung, welche eine direkte Auswirkung auf die Schädigung haben, tatsächlich mit der aufzuzeichnenden Signalenergie der Schallemissionsereignisse zusammenhängen.

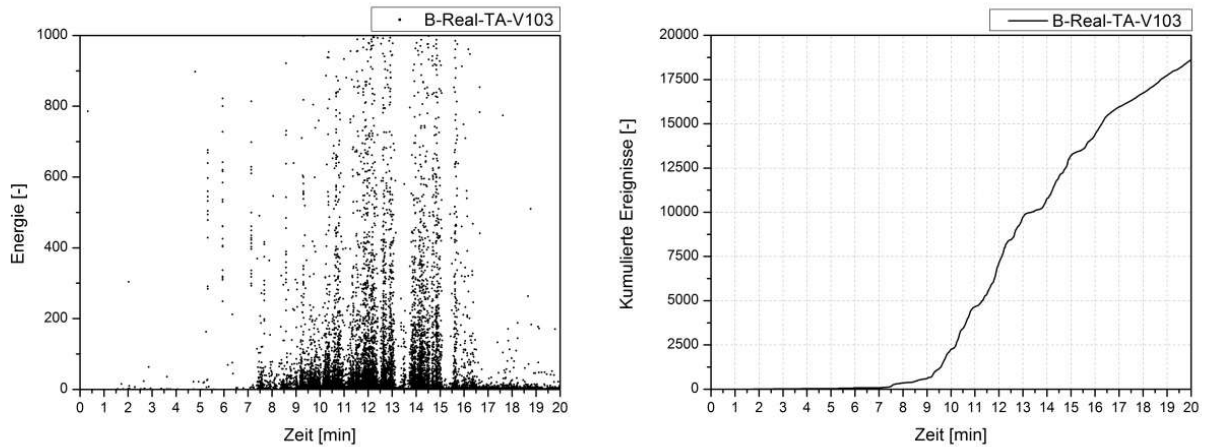


Abb. 8-10: Signalenergie über den zeitlichen Verlauf (links) und Schallemissionsaktivität (rechts) beim Brückenbrandversuch (B-Real).

Bei Brandexperimenten stellt die Brandeinwirkung die Belastung dar. Grundsätzlich sollten Messergebnisse mit der Einwirkung verglichen werden. In Abb. 8-11 werden die mittleren Brandraumtemperaturen mit der Signalenergie dargestellt. Verglichen werden dabei zwei Experimente, bei denen als Versuchsparameter nur die Brandkurven verändert wurden. Es wurde einmal nach RWS (links) und einmal nach ZTV-ING (rechts) geprüft. Bei beiden Kurven zeigt sich ein deutlicher Beginn des Auftretens von Schallemissionsereignissen ab 900°C. Also nach ca. 4-5 min.

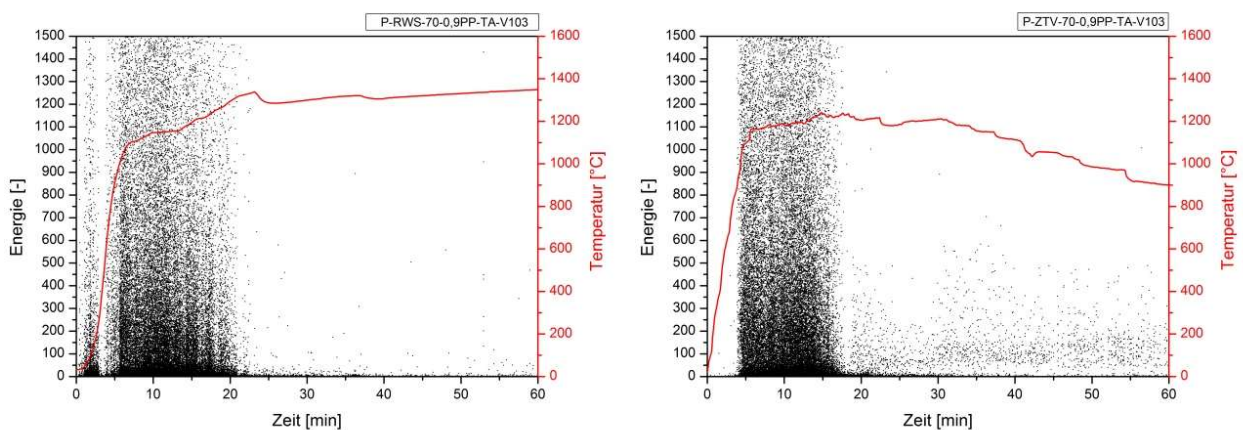


Abb. 8-11: Signalenergie über den zeitlichen Verlauf im direkten Vergleich mit der mittleren Brandraumtemperatur bei der Prüfung von plattenförmigen Testkörpern mit unterschiedlichen Brandkurven P-RWS-70-0,9PP-TA-V103 (links) und P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103 (rechts).

Die auffallende Aktivität beim Experiment P-RWS-70-0,9PP-TA-V103 [Abb. 8-11 links] im Bereich bis 4 min konnte nicht abschließend geklärt werden. Eine solch erhöhte Schädigung zu

einem so frühen Zeitpunkt ist im Vergleich zu dem Experiment P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103 [Abb. 8-11 rechts] nicht zu erwarten. Die Brandkurven RWS und ZTV-ING steigen zu diesem Zeitpunkt sehr ähnlich an. Die anderen Experimentalparameter wie Ofenaufbau, Testkörpergeometrie, Betonrezeptur und Messgeräteeinstellungen waren alle gleich. Eine Störung der Schallemissionsmesstechnik von außen oder durch die Temperaturmesstechnik, hätte kein so breites Spektrum der Signalenergie erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der Ofensteuerung und des Versuchsstarts das am Ofen angebaute Gerüst bei diesem Experiment öfter begangen wurde, was solche Ereignisse hervorrufen kann. Dies kann aber im Nachhinein nicht geklärt werden. Bei anderen Experimenten konnte durch Videoaufzeichnungen der gesamten Versuchsablauf überwacht werden. Eine solche Überwachung lag hier jedoch nicht vor.

8.4.2 Unterscheidung von Abplatzungen und Rissbildung

Da der Einsatz von PP-Fasern das Abplatzverhalten von hochfestem Beton in besonderem Maße beeinflusst, ist eine Änderung dieses Versuchsparameters am deutlichsten in den Versuchsergebnissen zu erkennen. Abb. 8-12 zeigt einen Vergleich zweier Experimente mit und ohne PP-Fasern, die ansonsten gleich aufgebaut waren und mit dem gleichen Messgeräteaufbau und Messgeräteeinstellungen aufgezeichnet wurden. Der Unterschied durch die Verwendung von PP-Fasern zeigte im Versuchsergebnis, dass bei dem Experiment ohne PP-Fasern Abplatzungen auftraten und bei dem anderen Experiment nicht.

Betrachtet man die messtechnischen Ergebnisse der Schallemissionsanalyse in Form der Energiedarstellung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer [Abb. 8-12], zeigt sich ein signifikanter Unterschied im hohen Energiebereich. In diesem Bereich treten nur dann verstärkt Signale auf, wenn im Experiment auch Abplatzungen stattfanden. Diese hochenergetischen Signale müssen also mit den Abplatzungserscheinungen zusammenhängen. Dies überrascht nicht, da die Abplatzungen teilweise explosiv und sehr stark auftreten. Im Vergleich zu einer Rissbildung ist damit eine höhere Energiefreisetzung logisch und damit auch eine größere Amplitude bei Schallemissionssignalen messbar.

Dagegen zeigen die Grafiken im niedrigerenergetischen Bereich ein vergleichbares Ergebnis. Man kann ein Auftreten von niedrigerenergetischen Signalen ab ca. 1,5 min erkennen. Bei ca. 2,5 min gibt es eine Häufung von Signalen. Darunter sind vereinzelt auch hochenergetische Signale zu finden. Bei ca. 3 min treten diese dann verstärkt auf und ab ca. 3,5 min werden beim Experiment ohne PP-Fasern verstärkt Signale mit hoher Energie aufgezeichnet. Signale mit niedriger Energie sind hier deutlich weniger zu erkennen. Dies hängt mit einer Überlagerung durch die hochenergetischen Signale zusammen.

Die Erklärung für ein Auftreten von Signalen mit niedriger Energie bei beiden Experimenten ist die Rissbildung. Diese trat bei allen Experimenten unabhängig von den Abplatzungserscheinungen auf. Diese Rissbildung wird mit der Schallemissionsanalyse grundsätzlich miterfasst. Je nach Messgeräteeinstellung und Empfindlichkeit der verwendeten Sensoren kann man den Anteil an aufgezeichneter Rissbildung entweder minimieren oder gezielt betrachten.

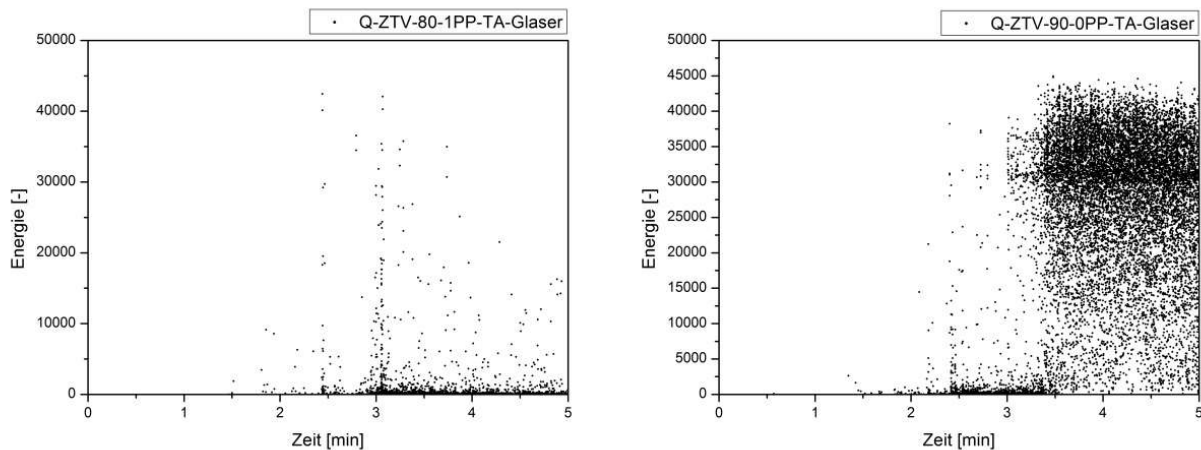


Abb. 8-12: Signalenergie über den zeitlichen Verlauf. Links: Q-ZTV-1PP-80-TA-Glaser (ohne Abplatzungen) und Rechts: Q-ZTV-0PP-90-TA-Glaser (mit Abplatzungen).

Aus Abb. 8-12 rechts lässt sich ein Beginn der Schädigung bei ca. 1,5 min, erste Abplatzungen bei ca. 2 min und ein massives Auftreten von Abplatzungen ab ca. 3 min ablesen. Dies lässt sich noch genauer ablesen, da das zeitliche Auftreten der Signale mit der Schallemissionsanalyse genau dokumentiert wird. Zum Vergleich mit dem Beobachtungsprotokoll [Tab. 8-2] ist diese Betrachtung aber ausreichend. Dieses Protokoll wurde durch eine Beobachtung der beflamten Testkörperunterseite durch ein kleines Beobachtungsfenster erstellt. Es zeigt deutliche Übereinstimmungen mit dem Ergebnis der Schallemissionsanalyse.

Tab. 8-2: Ausschnitt aus dem Beobachtungsprotokoll von Q-ZTV-90-0PP

Zeit [min:s]	Beobachtung
00:40	TO Start
02:00	Erste Abplatzung PK2
02:15	Erste Abplatzung PK 3
02:20	Abplatzung
02:37	Abplatzung
03:07	massive Abplatzung, zeitlich nicht mehr trennbar
04:30	Oberfläche der Probekörper nahezu vollständig abgeplatzt

Der Vergleich der beiden Experimente in Abb. 8-12 zeigt die grundsätzliche Möglichkeit, durch eine Energiebetrachtung zwischen Rissbildung und Abplatzungen zu unterscheiden. Risse generieren Signale mit niedriger Energie, während Abplatzungen zu hochenergetischen Signalen führen. Die Darstellung der Signalenergie über die Zeit ist jedoch auch abhängig von den Messgeräteeinstellungen. Deutlich wird dies in Abb. 8-13. Hier sieht man die gleichen Experimente wie in Abb. 8-12, allerdings mit einem anderen Messgerätesetup. Es wurden andere Sensoren (V103 anstatt Glaser-Sensoren) verwendet und damit auch andere Vorverstärker und Messgeräteeinstellungen. Verglichen werden auch hier die beiden Experimente nach ZTV-ING einmal mit und einmal ohne PP-Fasern.

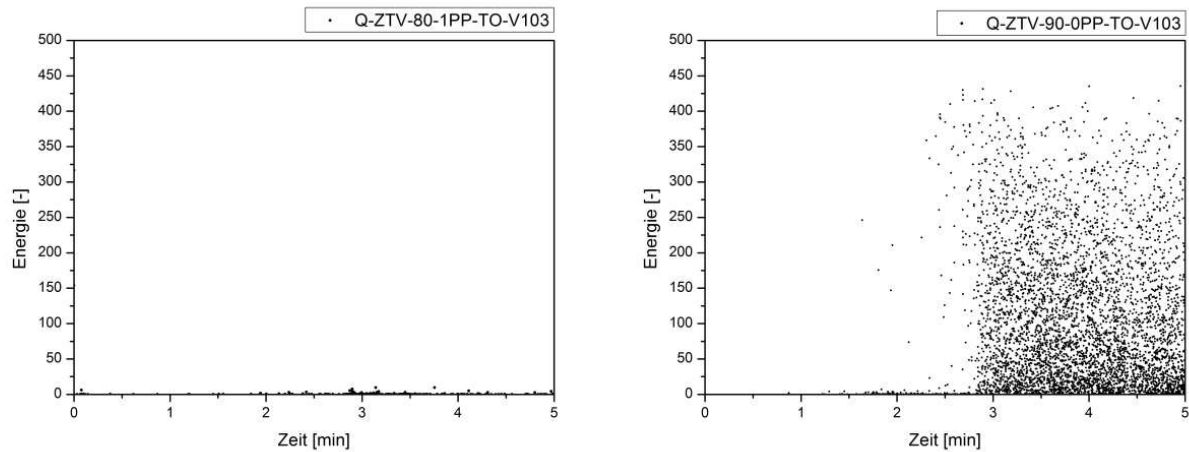


Abb. 8-13: Signalenergie über den zeitlichen Verlauf. Links: Q-ZTV-1PP-80-TO-V103 (ohne Abplatzungen) und rechts: Q-ZTV-0PP-90-TO-V103 (mit Abplatzungen).

Hier ist auch ein signifikanter Unterschied durch die Abplatzungen zu erkennen. Beim Experiment mit PP-Fasern zeigen sich nur wenige niedrigenergetische Ereignisse [Abb. 8-13 links]. Beim Auftreten von Abplatzungen [Abb. 8-13 rechts] ist ab ca. 2,8 min ein deutlich erhöhtes Auftreten von Schallemissionssignalen zu erkennen. Diese treten mit deutlich höherer Energie auf und verteilen sich über einen deutlich größeren Energiebereich. Auch diese Signale sind auf Abplatzungserscheinungen zurückzuführen, da der PP-Fasergehalt als einziger Versuchsparameter geändert wurde. Im Vergleich zu Abb. 8-12 rechts ist allerdings keine Häufung im hochenergetischen Bereich zu erkennen. Dennoch sind Werte wie der Beginn der Schädigung bei ca. 1,5 min und der Beginn massiver Abplatzungserscheinungen bei ca. 3 min deutlich erkennbar.

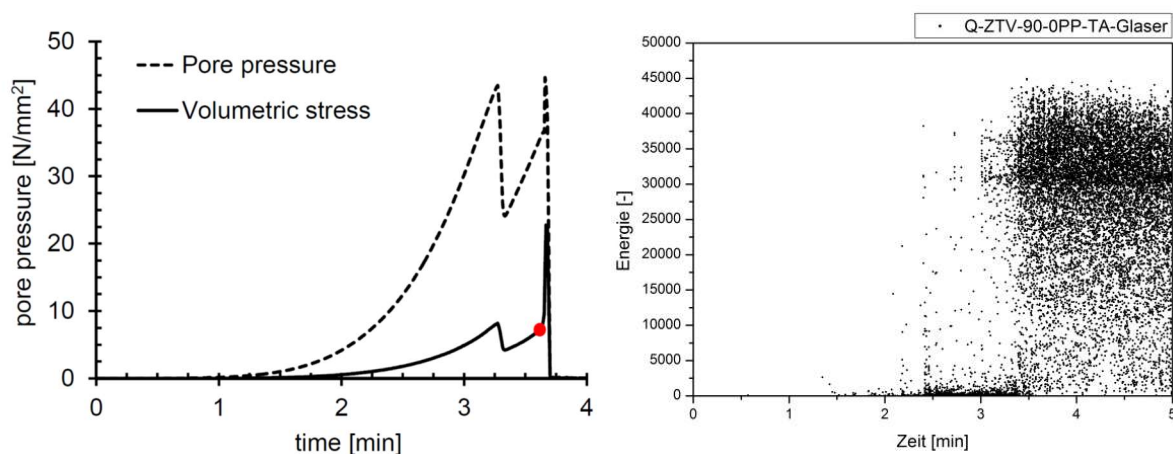


Abb. 8-14: Vergleich zwischen Porendruck und Beginn der Abplatzungen. Links: Ergebnis der numerischen Simulation des Porendrucks und der thermisch induzierten Spannungen [Bošnjak 2014]. Rechts: Signalenergie der Schallemissionen über den zeitlichen Verlauf.

Dies passt auch zu den Ergebnissen von numerischen Simulationen mit thermo-hygro-mechanischen Modellen. Ein Teil der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wurden von Bošnjak [2014] im Rahmen des gemeinsamen DFG-Forschungsprojektes „Explosive

Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung“ (GR 1664/7-1) mit numerischen Untersuchungen nachvollzogen. Für ein Experiment mit der ZTV-ING Brandkurve zeigt Abb. 8-14 einen Vergleich zwischen dem numerisch errechneten Porendruck, den thermisch hervorgerufenen Eigenspannungen und dem Ergebnis der Energiebetrachtung der Schallemissionsanalyse. Zu erkennen ist, dass bei ca. 3 Minuten der Zeitpunkt der ersten Abplatzungen sehr genau mit dem numerisch errechneten Zeitpunkt eines stark ansteigenden und durch ein Abplatzungsereignis schlagartig abfallenden Porendrucks übereinstimmt. Dieser Vergleich gibt einerseits einen Hinweis auf die Abhängigkeit von Porendruck und explosiven Abplatzungen. Darüber hinaus zeigt es, wie sich die Methoden der zerstörungsfreien Prüfung und der numerischen Simulation verbinden lassen.

Es lässt sich somit festhalten, dass es möglich ist, verschiedene Schädigungsmechanismen in den Ergebnisplots zu erkennen. Zur Unterscheidung von Rissen und Abplatzungen ist ein Energiekriterium sehr gut geeignet. Die Schwankung der Ergebnisse aufgrund von Messgeräteeinstellungen ist aber unbedingt zu berücksichtigen um eine Überinterpretation der Daten zu vermeiden. Wenn verschiedene Experimente miteinander verglichen werden, sind ein identischer Versuchsaufbau und ein identisches Messsetup unverzichtbar. Wichtig ist, dass auch hier nur ein qualitativer Vergleich gegeben ist. Dieser basiert allerdings auf erweiterten Parametern, was die Aussagesicherheit deutlich erhöht.

Ansätze zur Entwicklung von qualitativen Aussagen sind mit umfangreichen Parameterstudien und einer Beschreibung aller Faktoren der Messkette verbunden. Bei einer solchen Parameterstudie empfiehlt sich der tabellarische Vergleich von bekannten Schallemissionsquellen, wie beispielsweise einer HSU-Nielsen-Quelle, verschieden großen Kugeln, die auf die Betonoberfläche fallen oder einer künstlichen Quelle in Form eines Ultraschall-Gebers [Kap. 11.4]. Eine einfache Machbarkeitsstudie wurde in der Arbeit von Wegener [2013] durchgeführt. Hier wurde aus dem Gewicht von Glaskugeln verschiedener Größe, deren Energie berechnet, die beim Auftreffen auf Betonoberflächen nach freiem Fall auftritt. Diese Auftreffereignisse wurden mit der Schallemissionsanalyse erfasst und mit der Signalenergie tabellarisch verglichen. Im Folgenden wurde die Signalenergie einzelner, gezielt angeregter Abplatzungen aufgezeichnet und das Volumen der einzelnen Abplatzungen abgeschätzt. Im Endergebnis zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Größe der Glaskugeln und der Größe der Abplatzungen, die über die aufgezeichneten Signalenergien vergleichbar wurden. Es erscheint also möglich, die Energie und somit die Größe von explosiven Abplatzungen im Beton durch die Zuordnung von künstlichen Quellen beschreiben zu können. Für allgemeingültige Aussagen waren der Umfang der Untersuchung und die Anzahl der Experimente allerdings zu gering. Des Weiteren war der Vergleich auch nur möglich bei der Verwendung gleicher Testkörper und genau des gleichen Messgerätesetups. Für eine allgemeingültige Aussage wäre eine umfassende Beschreibung und Erfassung der Einflüsse aus der Messkette erforderlich. Zu einer solchen Beschreibung aller Faktoren der Messkette ist beispielsweise eine absolute Kalibrierung der Sensoren nach McLaskey 2013 notwendig. Dies müsste daraufhin für verschiedene Messgeräteeinstellungen und Verstärkungen gezeigt werden. Des Weiteren ist eine Kenntnis der Abstände zwischen Quelle und den einzelnen Sensoren unerlässlich, da auf diesem Weg Energie abgebaut wird. Hierfür

benötigt man jedoch eine ausreichend genaue Lokalisierung, deren Machbarkeit und Grenzen in Kap. 11 behandelt werden.

8.4.3 Temperaturabhängigkeit der Signalenergie

Da die Brandversuche jedoch über die Temperatur gesteuert werden, ist eine zeitliche Darstellung der Ergebnisse nur bedingt zielführend. Besser ist eine direkte Darstellung der Messergebnisse über die eigentliche Belastung. Bei Brandversuchen wird die thermische Belastung über die Brandkurven gesteuert. Diese Brandkurven wurden mit den Darstellungen der Energie über die Zeit [Kap. 8.4.1] synchronisiert. Hierfür wurde die Energie von jedem Punkt im Energie-Zeit-Diagramm einer Temperatur zugeordnet. Erreicht wurde dies durch eine Betrachtung, welche Temperatur zu dem Zeitpunkt, an dem das Signal auftrat, vorherrschte. Als Temperaturkurven wurden nicht die Temperaturen im Luftraum des Ofens, sondern die Temperatur im Inneren der Betontestkörper in 2 cm Tiefe verwendet. Damit konnte die Zeitverzögerung durch das Erwärmen des Betons berücksichtigt werden.

Abb. 8-15 zeigt diese Darstellung über die Temperatur für die beiden Experimente die in Abb. 8-12 über die Zeit dargestellt sind. Es handelt sich um Experimente mit gleicher Brandkurve (ZTV-ING), gleichem Versuchsaufbau und gleichen Messereinstellungen, aber unterschiedlichen Betonmischungen. Der Unterschied ist die Verwendung von PP-Fasern. Was einmal zu einer Verhinderung von Abplatzungen führt [Abb. 8-15 links] und im anderen Fall zu einem massiven Auftreten derselben [Abb. 8-15 rechts]. Ausgehend von den Ergebnissen aus Kap. 8.4.2, die zeigen, dass Abplatzungen und Risse durch einen Energieunterschied zu erkennen sind, kann man bei beiden Experimenten den Beginn einer Rissbildung ab ca. 50°C zuordnen [Abb. 8-15]. Besonders gut erkennbar ist der Beginn der Abplatzungen, die durch hohe Energien sichtbar werden. Dieser Beginn ist mit einer klaren Grenze im Bereich von 100°C gekennzeichnet. Das lässt den Rückschluss auf ein Verdampfen des verbliebenen Porenwassers und damit auf eine thermo-hydraulische Ursache der Abplatzungen zu.

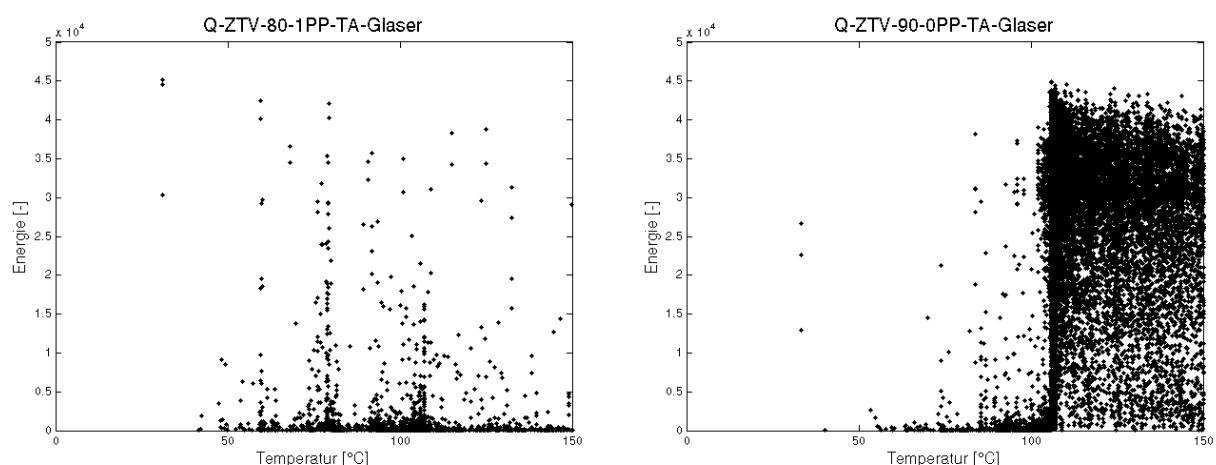


Abb. 8-15: Signalenergie in Anhängigkeit der Temperatur im Inneren des Testkörpers, mit 2cm Abstand zum Brandraum. Links mit PP-Fasern, also ohne Abplatzungen (Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser) und rechts ohne Fasern mit Abplatzungen (Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser).

Es ist also möglich, die Schädigung in Form von Abplatzungen durch die Verwendung von Energiekriterien und der Synchronisierung von Schallemissionsanalyse und Temperaturmonitoring erkennbar zu verfolgen und die thermo-hydraulische Schädigung sichtbar zu machen. Die Grenze bei 100°C ist in Abb. 8-15 sehr deutlich, ist aber in allen durchgeführten Experimenten, bei welchen Abplatzungen auftraten, vorhanden und gut zu erkennen. Trotzdem sind natürlich auch diese Ergebnisse in ihrer Qualität abhängig von den Versuchsparametern wie Messgerätesetup und Einstellungen, Testkörpergeometrie und verwendeter Brandkurve. Für einen direkten Vergleich sollte also immer nur ein Parameter geändert werden. Für eine intensive Begutachtung der Grenzen und Möglichkeiten dieser Darstellung wäre eine umfangreiche Parameterstudie erforderlich, die im vorliegenden Versuchsprogramm aus Zeit und Kostengründen nicht möglich war.

9 Lokalisierung unter Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeitsverteilung

Zur Berechnung der Lokalisierung wird bei den meisten Verfahren von einer homogenen Schallgeschwindigkeit im Material ausgegangen [Kap. 3.1.6]. Diese Vereinfachung reicht normalerweise aus und führt zu brauchbaren Ergebnissen. Im folgenden Kapitel wurde daher grundsätzlich eine homogene Schallgeschwindigkeit zur Berechnung verwendet, die vor dem Experiment mittels Ultraschalldurchschallung bestimmt wurde.

9.1 Lokalisierung einzelner Abplatzungen

Eine grundlegende Frage im Rahmen der Untersuchung von Abplatzungen war, ob es überhaupt möglich ist, durch Abplatzungen entstandene Schallemissionen zu identifizieren und ihren Ursprungsort zu lokalisieren. Die bei den Brandversuchen aufgezeichneten Datensätze sind so groß [Kap. 8.1], dass es schwierig war, diese Fragestellung zu klären. Um dennoch Informationen über die grundsätzliche Machbarkeit zu erhalten, wurden Experimente an kleinen Testkörpern durchgeführt [Wegener 2013].

Bei den Testkörpern handelt es sich um Würfel ($30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$) aus ultrahochfestem Beton ohne groben Zuschlag. Dadurch waren die Testkörper sehr homogen und konnten mit den zur Verfügung stehenden 16 Sensoren gut abgedeckt werden [Abb. 9-1 links]. Dies verkleinert die Einflüsse von Sensoranordnung, Sensorabständen und Materialinhomogenität. Auf einer Seite wurden keine Sensoren platziert, um Platz für die Anregung und Schädigung zu haben. Die Sensoren wurden durch brandbeständige Rigipsplatten vor der Temperatureinwirkung geschützt.

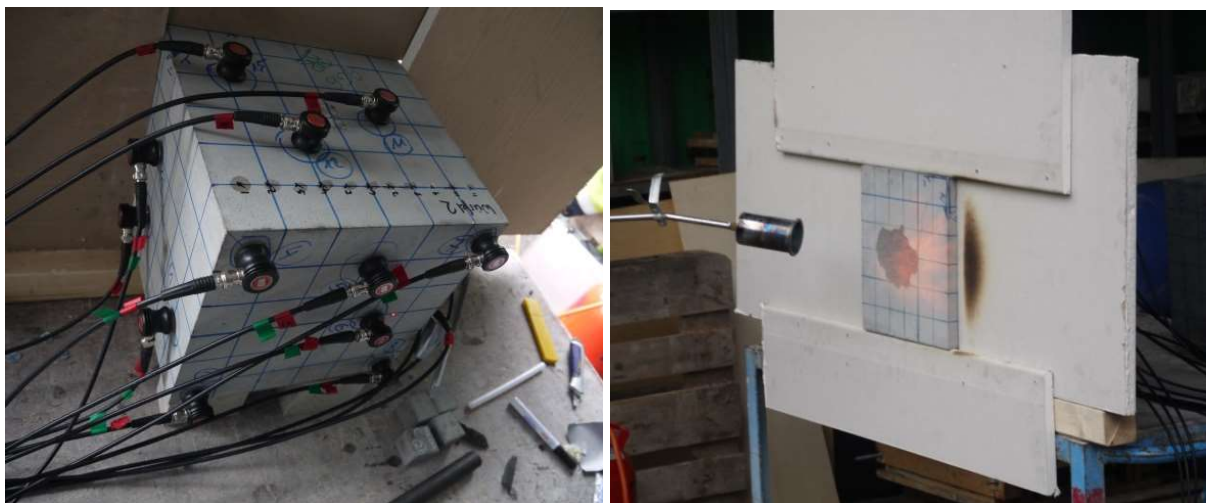


Abb. 9-1: Versuchsaufbau zur Lokalisierung einzelner Abplatzungen. Schallemissionssensoren die hinter einem Schutz aus Rigipsplatten auf den Testkörper aufgeklebt wurden (links) und die örtlich gezielte Anregung von Abplatzungen mittels handgeführtem Gasbrenner (rechts) [Wegener 2013].

Als Schädigung wurden gezielt Abplatzungen auf der Oberfläche angeregt. Hierfür wurde ein Gasbrenner auf begrenzte Bereiche des Testkörpers gehalten und direkt nach dem Entstehen

von Abplatzungen entfernt. Dadurch wurde es möglich, Störgeräusche und Signale aufgrund von Rissbildung zu minimieren. Die den Abplatzungen zugehörigen Signale konnten zweifelsfrei identifiziert und dem Ursprungsort bereits vor der Lokalisierungsrechnung zugeordnet werden.

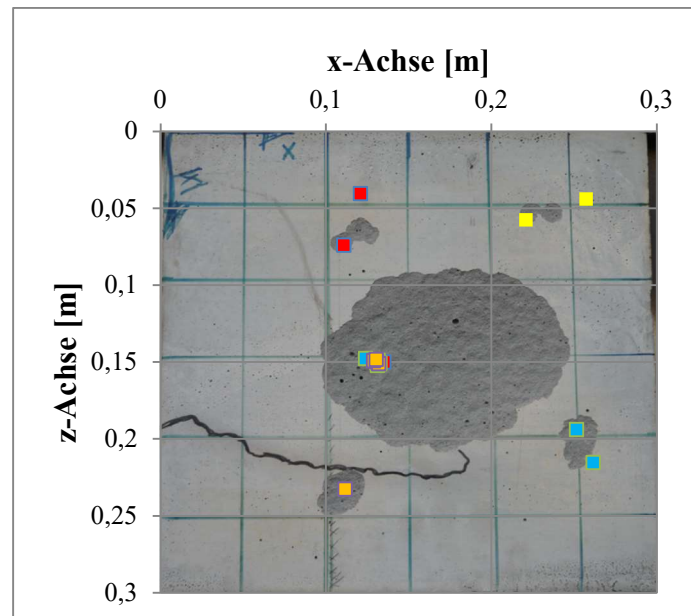


Abb. 9-2: Lokalisierungsergebnisse bei der Anregung von einzelnen Abplatzungen auf der Oberfläche des Testkörpers [Wegener 2013].

Abb. 9-2 zeigt die Ergebnisse von sieben gezielt angeregten Abplatzungen in den Eckbereichen des Testkörpers. Die berechneten Ursprungsorte wurden über die Fotografie gelegt, um die Ergebnisse direkt vergleichen zu können. Zu sehen ist, dass die Ursprungsorte in der XZ-Ebene auf etwa 2 cm genau und teilweise genauer lokalisiert wurden.

Bei den Lokalisierungsergebnissen in der Mitte bei $x=13$ cm und $z=15$ cm handelt es sich um Signale, die auf ein Ansprechen der Messsysteme auf das Nachschwingen der Sensoren bei den Abplatzungen zurückzuführen sind. Auf den Ursprung und die Identifizierung solcher Signale wurde in Kap. 8.2 eingegangen. Da bei diesen Signalen keine Ersteinsätze bestimmt werden können, ist eine sinnvolle Lokalisierungsrechnung unmöglich und es kommt eine Häufung im Mittenbereich des Testkörpers zustande. Dies liegt in diesem Fall daran, dass bereits zu Beginn der Signalaufzeichnung für jeden Kanal die Triggerbedingungen erfüllt sind. Somit führt die automatische Ersteinsatzbestimmung dazu, dass auf jedem Kanal die Ankunftszeiten gleich sind. Da die Sensoren gleichmäßig um den Testkörper verteilt sind, liegt der errechnete Ursprungsort bei gleichen Ankunftszeiten in der Mitte der Testkörper. Aufgrund dieser Erkenntnis ist ein Identifizieren und Aussortieren aufgrund der Signalform möglich und sinnvoll [Kap. 8.2.].

Für die größere abgeplatzte Fläche in der Mitte des Testkörpers wurde die Gasflamme länger an den Testkörper gehalten und dadurch mehrere aufeinanderfolgende Abplatzungen produziert, die aber auf einen begrenzten Bereich beschränkt waren. Die Ergebnisse der

Lokalisierungsberechnung sind in Abb. 9-3 als Projektion auf die XZ-Ebene zu sehen. Mit Ausnahme weniger Ausreißer sind alle Lokalisierungsergebnisse im tatsächlich abgeplatzten Bereich des Testkörpers zu finden.

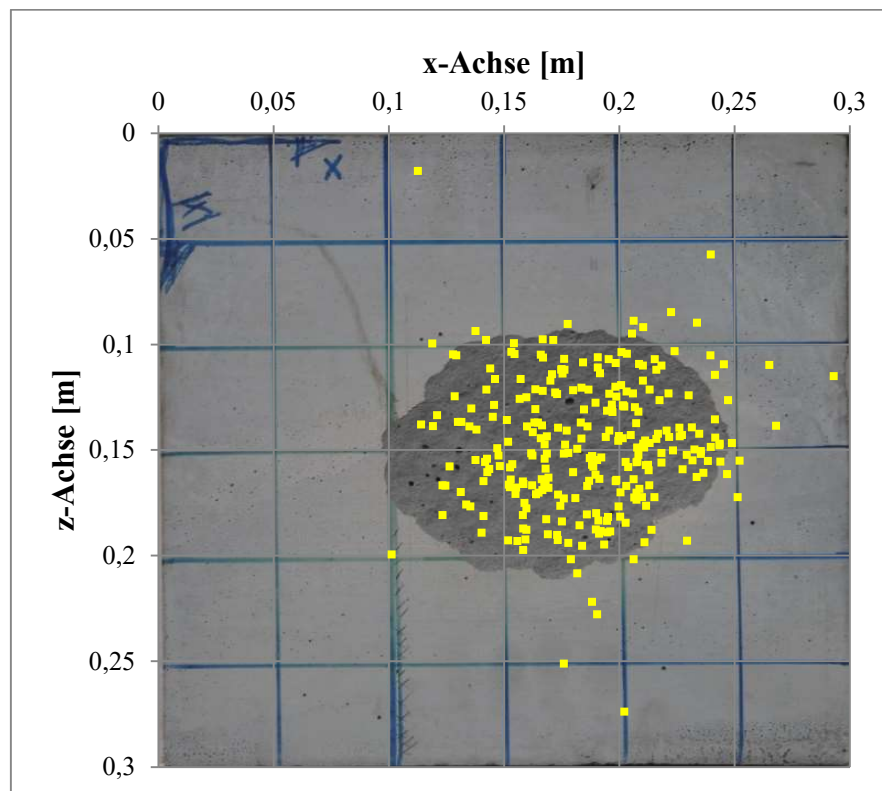


Abb. 9-3: Überlagerung der Projektion von Lokalisierungsergebnissen in die XZ-Ebene mit einem Bild des Testkörpers nach dem Experiment [Wegener 2013].

Betrachtet man die Projektion der Ergebnisse in die YZ-Ebene [Abb. 9-4 links] fällt auf, dass die Lokalisierungsgenauigkeit in y-Richtung deutlich schlechter ist. Ein Großteil der Ereignisse ist zwar im richtigen Bereich (Oberfläche mit den Abplatzungen bei $y=0$) zu finden, die Ergebnisse verteilen sich aber weit über die Mitte hinaus.

Die Lokalisierungsergebnisse im Bereich zwischen 0,15 m und 0,3 m auf der y-Achse sind wie in Abb. 9-2 auf mehrfaches Triggern auf die Coda zurückzuführen. Diese Signale können durch eine Auswahl nach Signalenergie und Signal-Rausch-Verhältnis identifiziert und aussortiert werden [Kap. 8.2]. Das Ergebnis ist im Unterschied der beiden Grafiken in Abb. 9-4 zu erkennen. Nach einem Aussortieren sind in der rechten Grafik fast ausschließlich Lokalisierungsergebnisse übrig, die in zu erwartenden Bereichen liegen.

Auch die Unterschiede bei der Verwendung verschiedener Lokisierungsalgorithmen ist gut zu erkennen. Die roten Kreuze zeigen Ergebnisse mit der Geiger-Methode, die schwarzen Sterne die Lokalisierungen mit dem Algorithmus nach Bancroft [Kap. 3.1.6]. Bei diesem Experiment sind die Ergebnisse des Bancroft-Algorithmus zu großen Teilen näher an der Oberfläche, was mit den Beobachtungen besser übereinstimmt. Dies kann daran liegen, dass der Bancroft-Algorithmus keine Iteration benötigt, er daher weniger anfällig für Instabilitäten ist

[Bancroft 1985]. Beide Lokalisierungsalgorithmen zeigen aber eine sehr gute Lokalisierungsgenauigkeit in der XZ-Ebene.

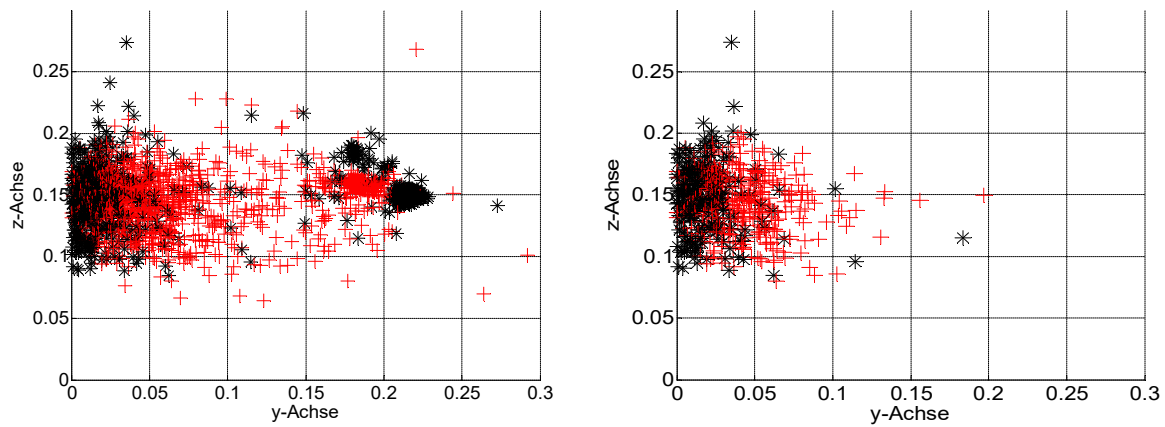


Abb. 9-4: Projektion der Lokalisierungsergebnisse von Bancroft-(schwarz) und Geigeralgorithmus (rot) in die Y-Ebene. Darstellung aller Ereignisse (links) und einer Auswahl nach dem Signal-Rausch-Verhältnis und der Signalenergie (rechts) [Wegener 2013].

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen ableiten, dass es durchaus möglich ist, Abplatzungen zu lokalisieren. In verschiedenen Raumrichtungen können unterschiedliche Lokalisierungsgenauigkeiten auftreten. Verschiedenen Algorithmen führen zu unterschiedlich guten Lokalisierungsergebnissen.

Abplatzungen können durch Energiekriterien und das Signal-Rausch-Verhältnis identifiziert und von Störsignalen getrennt werden. Es zeigte sich aber, dass selbst bei einer, im Verhältnis zu den Experimenten auf den Versuchsofen kurzen Beflammungsdauer, eine große Anzahl an Ereignissen auftreten kann. Für Aussagen über das Schädigungsverhalten und eine sinnvolle Lokalisierung ist ein Sichten und Aussortieren der Daten definitiv notwendig.

9.2 Lokalisierung von Schallemissionsereignissen aus Brandversuchen

Für die Lokalisierung wurden verschiedene Lokalisierungsverfahren und Auswertungsprogramme verwendet [Kap. 3.1.6], wovon einige Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. Hierbei wurde primär von einer homogenen und gleichbleibenden Schallgeschwindigkeitsverteilung ausgegangen. Verwendet wurde die vor den Experimenten in Durchschallung ermittelte Schallgeschwindigkeit des ungeschädigten Testkörpers. Eine Darstellung aller Lokalisierungsergebnisse eines Datensatzes ist aufgrund der Anzahl an Ereignissen [Kap. 8.1] nicht sinnvoll. Auch bei Verwendung sehr kleiner Punkte für jedes Ereignis sind es so viele, dass keine Unterschiede oder Clusterbildungen zu erkennen sind. Es wurden daher ausgewählte Zeiträume herausgegriffen. Zunächst wurden die ersten Ereignisse eines Experimentes analysiert. Zum einen ist die Wahrscheinlichkeit brauchbarer Lokalisierungsergebnisse höher [Kap. 11.2] und zum anderen ist ein Vergleich mit Fotos durch das Beobachtungsfenster noch am ehesten möglich.

Das Ergebnis einer solchen Auswertung ist beispielhaft in Abb. 9-5 zu sehen. Verwendet wurde der Datensatz P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103 von einem Experiment an einem Plattentestkörper. Dargestellt ist ein Vergleich zwischen der Bilddokumentation nach dem Experiment mit den Lokalisierungsergebnissen des Bancroft-Algorithmus. Der Testkörper eignet sich für einen solchen Vergleich sehr gut, da er aufgrund der verwendeten PP-Fasermenge von $0,9 \text{ kg/m}^3$ zwar eine Schädigung aufgrund von Abplatzungen aufweist, diese aber nicht auf der gesamten Oberfläche aufgetreten ist. Die im Bild untere rechte Ecke ist verhältnismäßig wenig geschädigt. Es ist also zu erwarten, dass bei einer sinnvollen Lokalisierung in diesem Bereich weniger Ereignisse zu verzeichnen sind. Betrachtet man nun das Ergebnis der Lokalisierung [Abb. 9-5 unten], so ist dieser Effekt zwar nicht überdeutlich ausgeprägt, aber dennoch zu erkennen. Ganz allgemein treten an der rechten Seite des Testkörpers weniger Ereignisse auf als auf der restlichen Testkörperoberfläche.

Ein weiterer auffälliger Punkt ist das verstärkte Auftreten von Schallemissionsereignissen im Mittenbereich des Testkörpers. Im Randbereich werden deutlich weniger Ereignisse lokalisiert. Dieser Effekt wurde bereits bei früheren Experimenten beobachtet [Richter 2009] und hat verschiedene Ursachen. Einerseits ist in den Randbereichen tatsächlich ein Streifen vorhanden in denen keine Abplatzungen aufgetreten sind. Dies ist auf dem Bild gut zu erkennen und hängt mit dem Versuchsaufbau zusammen. Auflagerpunkte des Ofens aus Beton und deren Übergänge zum Testkörper führen aufgrund ihrer Masse zu einer anderen Temperaturverteilung in diesen Bereichen und übernehmen teilweise eine Stützfunktion. Abgesehen von dieser Tatsache gibt es aber noch Einflüsse aufgrund der Messtechnik. Aufgrund der Sensoranordnung werden Signale aus der Mitte des Testkörpers deutlich genauer lokalisiert [Große 2008]. Dies führt bei Verwendung des Bancroft-Algorithmus [Kap 3.1.6] zu einem Bild wie es hier auftritt. Ein weiterer Grund ist die vermutlich zu hoch angenommene Schallgeschwindigkeit im Testkörper [Kap. 11.3], was zu einer Verschiebung der Lokalisierungsergebnisse zur Mitte hinführen kann [Andreisek 2012].

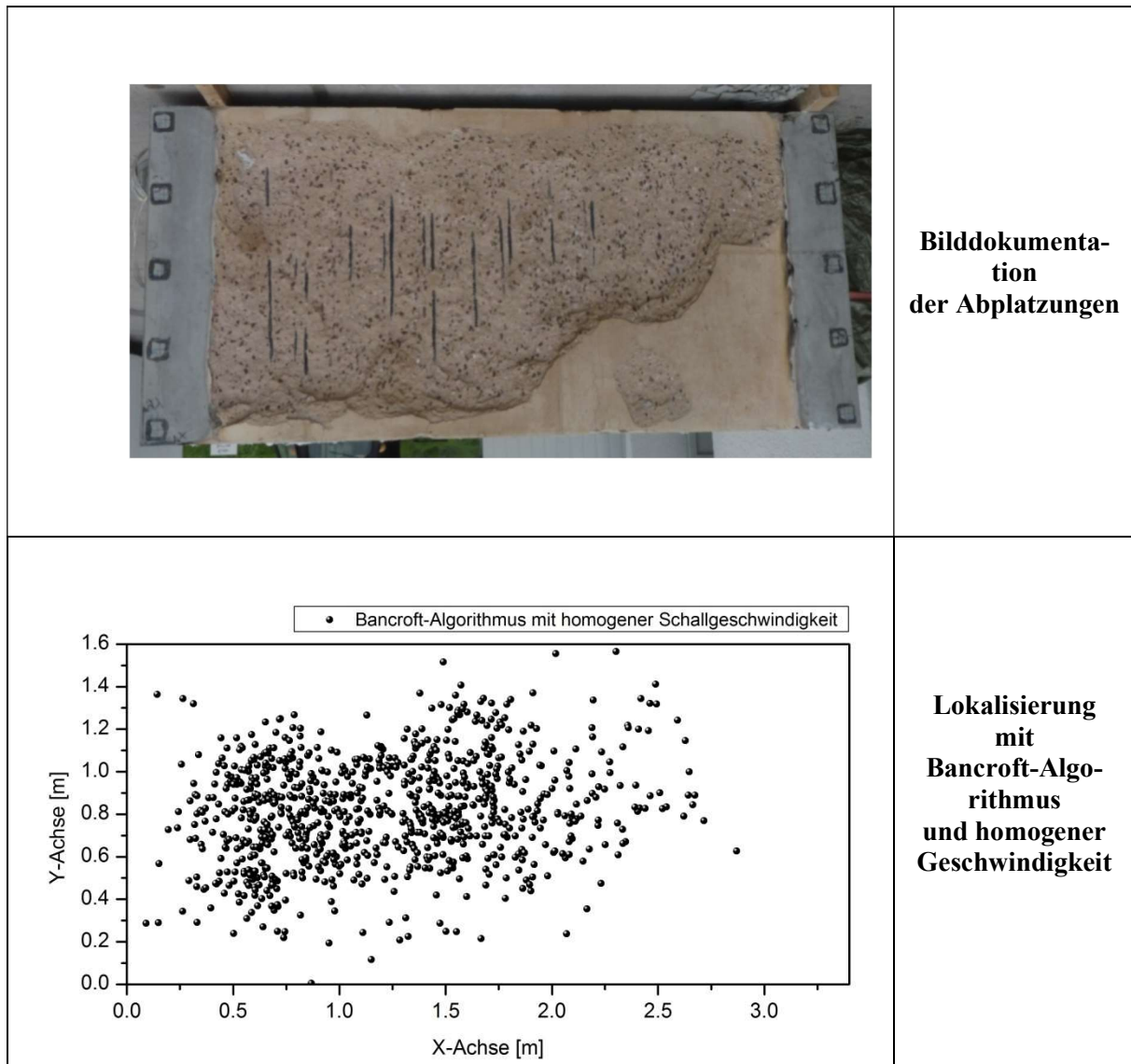


Abb. 9-5: Lokalisierungsergebnis bei den ersten 200 Ereignissen von P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103 im Vergleich mit dem Schadensbild nach dem Brandversuch.

9.3 Lokalisierung mit einer Auswahl nach der Lokalisierungsgenauigkeit

Eine weitere Möglichkeit, große Datenmengen übersichtlicher darzustellen, besteht in der Auswahl von relevanten Signalen aufgrund der Lokalisierungsgenauigkeit. Man kann davon ausgehen, dass nur Signale, deren Ursprungsort mit ausreichender Genauigkeit zu lokalisieren sind, auch tatsächlich ausreichend sinnvolle Informationen über die Prozesse im Inneren der Testkörper enthalten. Man bekommt mit einer Sortierung und Auswahl nach der Genauigkeit also weniger Datenpunkte, die noch dazu eine ausreichende Qualität haben. Das Programm PolarAE bietet die Möglichkeit, eine Lokalisierung nach dem Geiger-Algorithmus zu berechnen und gibt dabei die Genauigkeit der Lokalisierung als Standardabweichung an [Kap. 3.1.6].

Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist für den Datensatz Q-ETK-130-0PP-TO in Abb. 9-6 bis Abb. 9-8 sowie in Abb. 11-1 bis Abb. 11-3 dargestellt. Dabei handelt es sich um einen Quader mit den Seitenlängen 70 cm x 70 cm x 30 cm.

Ein erstes Sortierkriterium ist die Anzahl der Sensoren, die das Programm nach einer erfolgreichen Ersteinsatzbestimmung zur Lokalisierungsberechnung verwenden kann. Da für eine Lokalisierungsberechnung im Dreidimensionalen mindestens vier Sensoren notwendig sind, ist eine Genauigkeitsberechnung erst ab fünf Sensoren sinnvoll möglich. Um aus der Berechnung ein stabiles Ergebnis zu bekommen, erscheint die Verwendung von sechs Sensoren sinnvoll. Daher wurden für die Darstellung in Abb. 9-6 nur Ergebnisse zugelassen für deren Berechnung mindestens sechs Kanäle verwendbar waren.

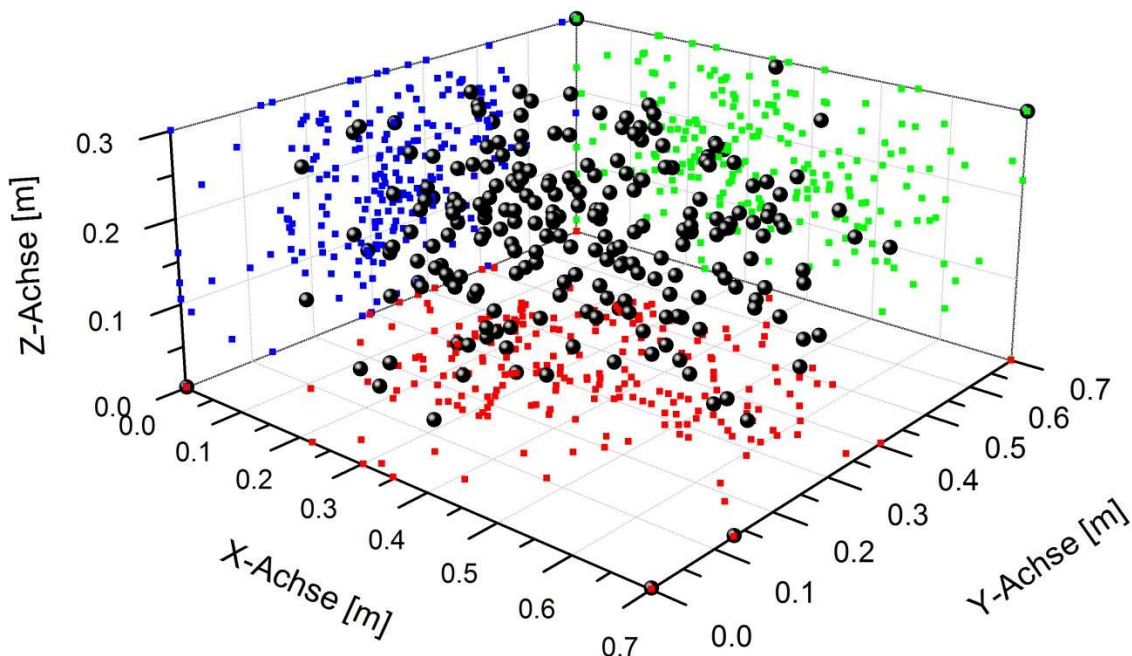


Abb. 9-6: Q-ETK-130-0PP-TO-V103: 3D-Darstellung mit dem Ergebnis der Lokalisierung unter Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeit von 5250 m/s. Verwendet wurden alle Ereignisse von denen mindestens sechs Kanäle zur Lokalisierung verwendbar waren. In schwarz sind die Punkte im Raum zu sehen, rot, grün und blau deren Projektionen auf die Ebenen.

Der dreidimensionale Plot [Abb. 9-6] zeigt die Lokalisierung im Raum schwarz und die Projektionen in die XY, XZ und YZ Ebene jeweils rot, blau und grün. Zu erkennen ist wiederum eine Anordnung der Signale im mittleren Bereich der XY-Ebene des Testkörpers, wie schon in Kap. 9.2. Darüber hinaus fällt die gleichmäßige Verteilung in Z-Richtung auf, da die Abplatzungen tendenziell eher an der Unterseite zu erwarten sind. Insgesamt lassen sich aus dem Bild aber keine sinnvollen Rückschlüsse auf die Schädigungsmechanismen ziehen, da keinerlei hilfreiche Strukturen zu erkennen und zuzuordnen sind. Dies zeigt, dass eine Betrachtung der Ergebnisdaten des gesamten Experimentes, ohne weitere Einschränkungen wenig hilfreiche Erkenntnisse liefern.

Da jedoch nur nach verwendeter Sensoranzahl sortiert wurde, kann das Ergebnis noch eine große Anzahl an Lokalisierungsergebnissen mit hoher Ungenauigkeit enthalten., Es ist davon auszugehen, dass mit ungenauen Lokalisierungsergebnissen auch keine scharfen Strukturen erkennbar sein können. Daher ist ein weiteres Bearbeiten und Sortieren der Daten unerlässlich.

Um nun die Genauigkeit der Lokalisierung als Parameter mit zu berücksichtigen, wurden die Daten von Q-ETK-130-0PP-TO-V103 nach der errechneten Standardabweichung und zeitlich sortiert. Verwendet wurden diejenigen Ereignisse, welche mit einer Standardabweichung kleiner als 0,15 m bestimmt wurden.

Da auch hierbei noch sehr viele Ergebnisse übrigblieben, wurde im Folgenden nur ein begrenzter Zeitraum betrachtet. Hierfür wurden aus dem Gesamtdatensatz nur die ersten 100 Ereignisse verwendet.

Als Ergebnis ist in Abb. 9-7 zu erkennen, dass sich die übrigbleibenden Ereignisse mittig, parallel zur X-Achse anordnen. In Z-Richtung ist nach wie vor eine Streuung zu erkennen.

Vergleicht man die Projektion in die XY-Ebene mit einem Bild aus der Videoüberwachung zu einem frühen Zeitpunkt, ist entlang dieser Achse tatsächlich eine Schädigung durch Abplatzungen zu erkennen [Abb. 9-8 links]. Betrachtet man den Testkörper nach dem Experiment, ist zudem in dieser Richtung eine mittig ausgerichtete Schädigung zu erkennen [Abb. 9-8 rechts]. Dies lässt auf eine grundsätzliche Verwendbarkeit der Lokalisierungsberechnung, allerdings auch auf die damit verbundenen Schwierigkeiten schließen, die in Kap. 11 näher untersucht werden.

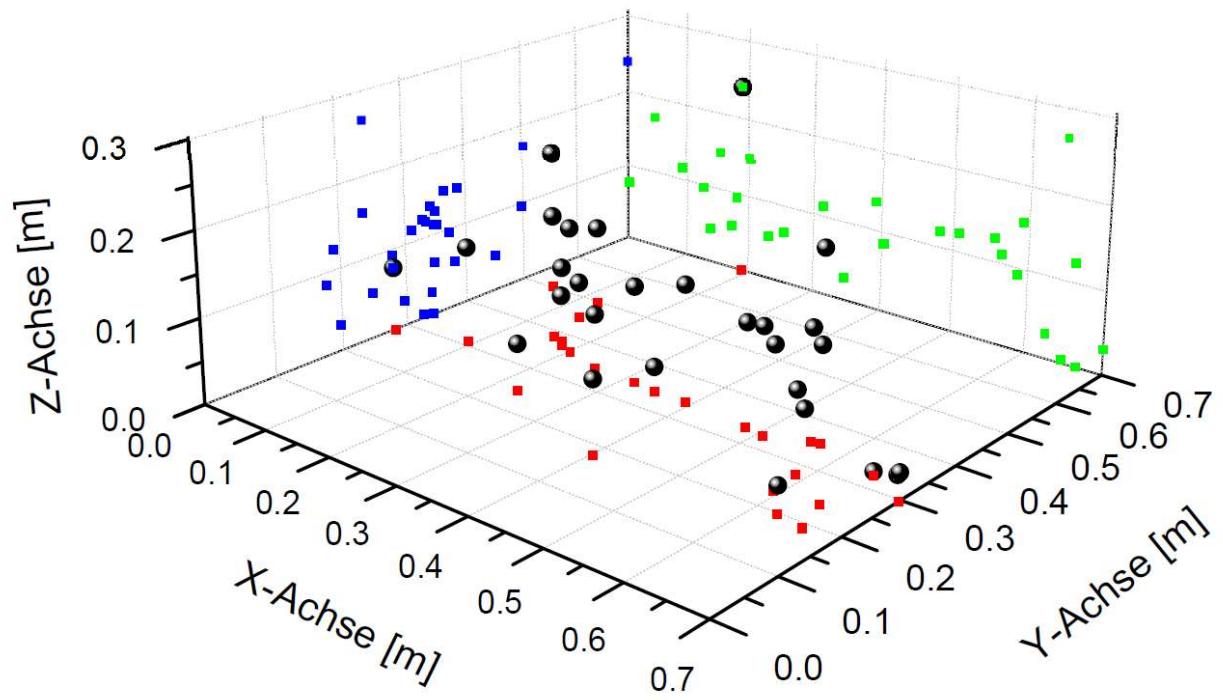


Abb. 9-7: Q-ETK-130-0PP-TO-V103: 3D-Darstellung mit dem Ergebnis der Lokalisierung unter Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeit von 5250 m/s. Verwendet wurden von den ersten 100 Ereignissen alle mit einer Standardabweichung $d < 0.15$ m.



Abb. 9-8: Q-ETK-130-0PP-TO-V103: Ausschnitt aus dem Beobachtungsvideo (links) und Testkörper 1-1 nach dem Experiment (rechts).

9.4 Lokalisierung am Brückenbrandprüfstand mit einer Erfassung des zeitlichen Verlaufs der Abplatzungen

Ein grundsätzliches Problem bei der Lokalisierung von Abplatzereignissen im Rahmen dieser Arbeit war oftmals die fehlende Möglichkeit, Ergebnisse zu quantifizieren. Gerade, weil erst mit der Schallemissionsanalyse eine Möglichkeit zur zeitlichen Überwachung des Schädigungsverlaufes vorliegt, ist es eigentlich nicht möglich dies mit anderen Verfahren zu vergleichen. Ein Vergleich mit Bilddaten wurde in Kap. 9.1 und Kap. 9.3 gezeigt und macht die Einschränkungen deutlich. Verschiedene weitere Bemühungen, Experimente frühzeitig abzubrechen, um nur teilgeschädigte Testkörper zu bekommen, waren nicht erfolgreich. Eine Möglichkeit der zeitlichen Einordnung lag allerdings im Falle des Brückenbrandversuches vor [Kap. 5.6]. Während des Experimentes am Brückenbrandprüfstand wurde die Wand des Versuchsgebäudes mit der Schallemissionsanalyse überwacht. Die Schallemissionssensoren waren auf der brandabgewandten Wandrückseite angebracht [Abb. 6-14]. Dadurch wurde eine Schädigung der Sensorik vermieden. Die brandbeaufschlagte Vorderseite der Wand wurde sowohl mit Videokameras als auch mit Thermographiekameras überwacht. Diese wurden im Vorfeld zeitlich synchronisiert.

Durch die freie Zugänglichkeit der Wand konnte so ein direkter Vergleich zwischen Videoüberwachung bzw. Bilddokumentation, Thermographieaufnahmen und der Schallemissionsanalyse realisiert werden. Es gab also drei verschiedene Systeme, die man zeitlich miteinander in Verbindung bringen konnte. Zwar war die Bild und Videodokumentation aufgrund des Brandrauches nicht durchgängig möglich, kann aber zur Einordnung des Gesamtschadens hinzugezogen werden. Die Thermographieaufnahmen wurden durch den Brandrauch nicht beeinträchtigt und lieferten daher durchgängig ein Bild der Wandoberfläche. Aufgrund des Versuchsaufbaus ist zwar eine bessere Überwachung mit Kameras, aber dafür keine so zielgerichtete Beflammung und Temperaturentwicklung wie in den Versuchsofen möglich. Unter anderem hatte der Wind einen Einfluss, der die Flammen auf die rechte Seite der Wandinnenseite drückte. Daher ist im Endeffekt eine maximale Schädigung der Betonoberfläche nicht wie zu erwarten mittig, sondern im oberen Bereich, nach rechts verschoben, zu erkennen [Abb. 9-10 unten].

Durch die Verwendung mehrerer Schaltafeln bei der Herstellung der Wand, sind deren Übergänge auf der Oberfläche zu erkennen. Daraus entsteht ein Raster mit fünf Feldern in vertikaler und vier Feldern in horizontaler Richtung. Diese dienen im Folgenden zur Orientierung beim Vergleich der Ergebnisse aus Fotos, Thermographieaufnahmen und Lokalisierungsergebnissen. Die Abplatzungen traten in den oberen Feldern auf. Besonders stark im zweiten Feld von rechts.

Betrachtet man nun die Lokalisierungsergebnisse mit der Grid-Search-Methode [Abb. 9-10 oben], so wurden annähernd über den gesamten Testkörper hinweg Ereignisse lokalisiert. Jedoch sind unten und rechts deutlich weniger Ergebnisse zu erkennen. Die Häufung in Richtung der maximalen Schädigung oben rechts ist deutlich zu erkennen. Diese Häufung ist allerdings nicht so eindeutig wie aufgrund des Schädigungsbildes zu erwarten wäre.

Nach den Erkenntnissen aus Kap. 8.4, nach denen durch eine Energiebetrachtung zwischen Abplatzungen und sonstigen Schädigungen unterschieden werden kann, wurde die Energie als weiterer Parameter verwendet. Die einzelnen Lokalisierungsergebnisse aus Abb. 9-10 oben wurden daraufhin mit ihrer jeweiligen Energie gewichtet und entsprechend dieser Energie als unterschiedlich große Kugeln dargestellt. Als Ergebnis sieht man in Abb. 9-10 Mitte, ein deutlich klareres Lokalisierungsergebnis der Abplatzungen, das sehr gut zur Position der durch Abplatzungen geschädigten Bereiche passt [Abb. 9-10 unten].

Um dieses Ergebnis nun mit den Aufzeichnungen der Thermographiekameras zu vergleichen, wurden vier Zeitpunkte gewählt, die im Folgenden verglichen werden. Es handelt sich dabei um die Zeitpunkte 10 min, 11 min, 13 min und 15 min nach dem Anzünden des LKWs. In Abb. 9-11 wird diese zeitliche Entwicklung der Schädigung dargestellt. Zu sehen sind die Bilder der Thermographiekamera zu diesen Zeitpunkten. Daneben angeordnet sind die Lokalisierungsergebnisse der bis zum jeweiligen Zeitpunkt aufgetretenen Schallemissionsereignisse. Deren Signalenergie wird durch die Punktgröße dargestellt. Hier ist ein deutlicher Fortschritt der Schädigung erkennbar, der von wenig sichtbarer Schädigung nach 10 min bis zu einer deutlichen Schädigung, die bereits sehr nahe am Endzustand ist, reicht. Die Schädigung fand also zwischen 10 und 15 Minuten nach Versuchsbeginn statt. Dies passt auch zu den parameterbasierten Ergebnissen der Schallemissionsanalyse. In diesem Zeitbereich ist sowohl ein massiver Anstieg der Schallemissionsaktivität [Abb. 9-9 links], als auch ein verstärktes Auftreten von Ereignissen mit hoher Signalenergie [Abb. 9-9 rechts] zu verzeichnen.

Insgesamt zeigt dieses Experiment, dass eine Lokalisierung und zeitliche Zuordnung von Schallemissionssignalen zum Schädigungsverhalten von Beton unter Brandbeanspruchung möglich ist. Die parameterbasierte Auswertung passt in diesem Fall sehr gut, wobei grundsätzlich die in Kap. 8 ausgeführte Abhängigkeit von Versuchsaufbau und Messgeräteeinstellung berücksichtigt werden muss.

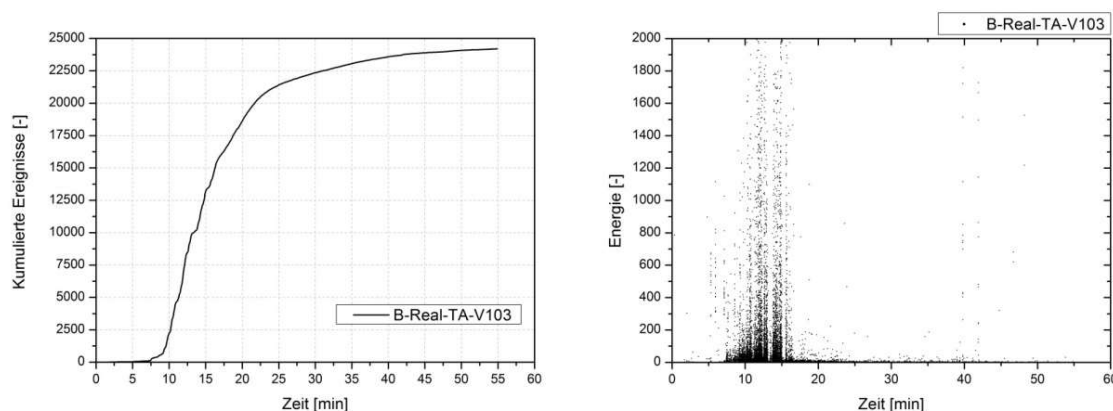


Abb. 9-9: Parameterbasierte Schallemissionsanalyseergebnisse des Brückenbrandversuchs. Links ist die Schallemissionsaktivität zu sehen und rechts ist die Signalenergie über der Zeit dargestellt.

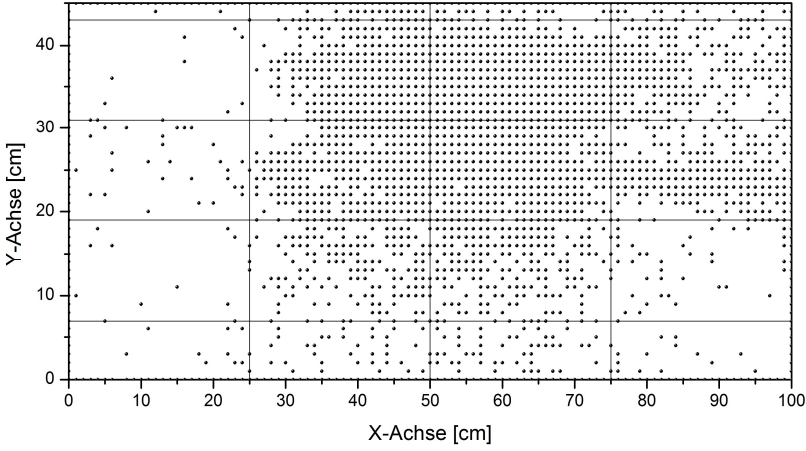
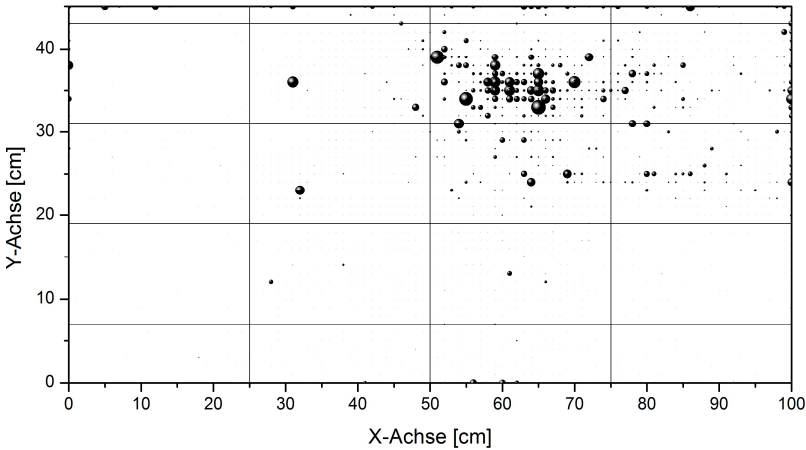

	<p>Lokalisierungsergebnis (Grid-search)</p>
	<p>Lokalisierungsergebnis Skaliert nach der Signalenergie</p>
	<p>Geschädigte Wand nach dem Experiment</p>

Abb. 9-10: Lokalisierungsergebnisse am Brückenprüfstand ohne und mit Skalierung nach der Signalenergie im Vergleich mit einem Bild der geschädigten Wand.

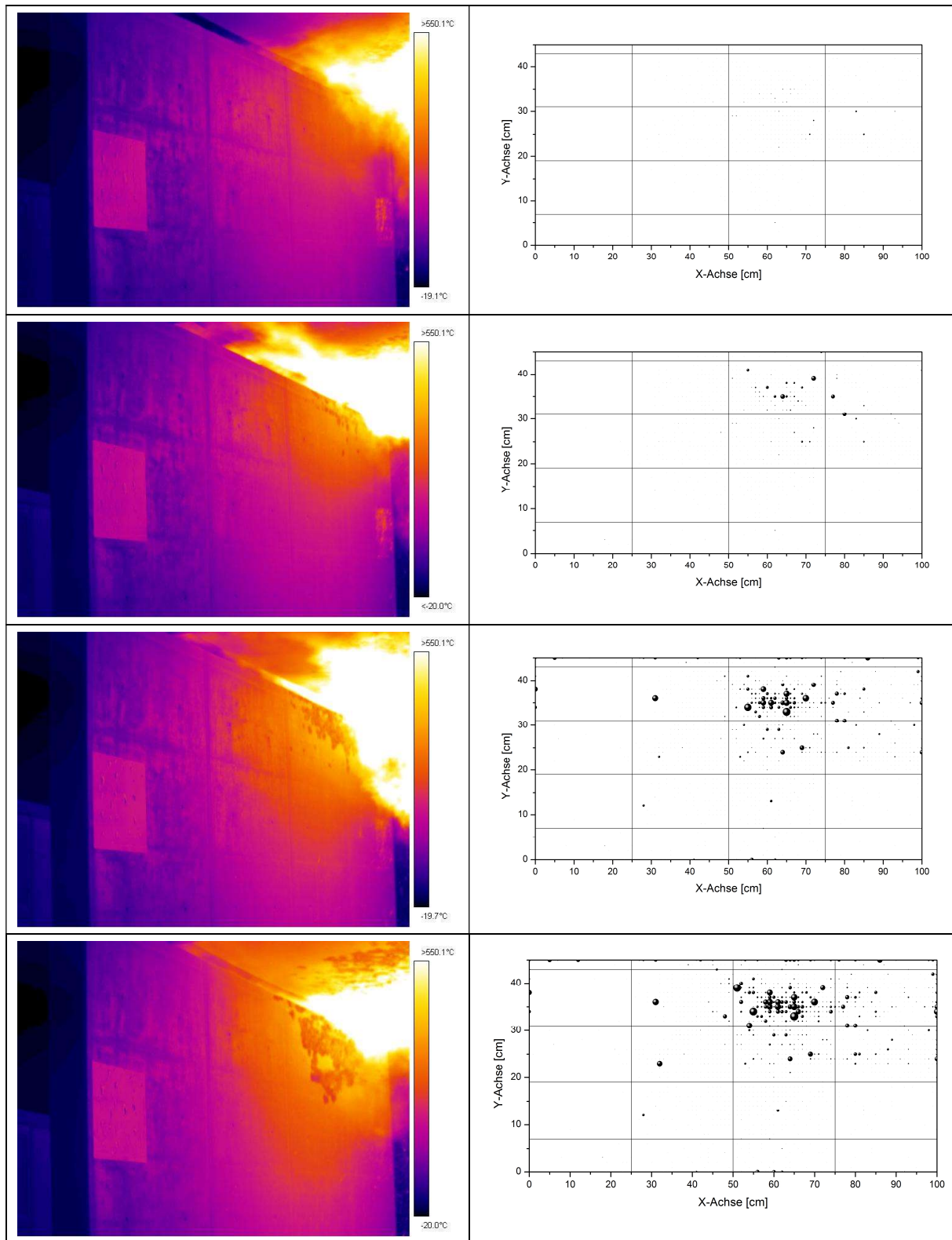


Abb. 9-11: Lokalisierungsergebnisse im Vergleich mit Thermographieaufnahmen nach 10 min, 11 min, 13 min und 15 min Versuchsdauer.

10 Lokalisierung mit Geschwindigkeitsmodellen

10.1 Entwicklung und Implementierung

Die Untersuchungen in Kap. 11.3 zeigen, dass bei Brandversuchen an Beton nicht von einer homogenen Schallgeschwindigkeitsverteilung ausgegangen werden kann. Vielmehr ändert sich die Schallgeschwindigkeit im Testkörper durch die Temperaurbelastung sowohl dreidimensional, als auch über den zeitlichen Verlauf. In Kap. 9 konnte gezeigt werden, dass eine Lokalisierungsberechnung trotzdem verwertbare Ergebnisse liefern kann. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass durch eine Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeitsverteilung die Lokalisierungsergebnisse deutlich verbessert werden können. Um dies zu erreichen soll hier ein Lokalisierungsverfahren zur Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeitsverteilung in Beton unter Brandbelastung entwickelt, getestet und diskutiert werden.

Bei der Grid-search-Lokalisierung handelt es sich um eine Lokalisierungsmethode die bereits von Ringger [2003] erfolgreich zur zweidimensionalen Schallemissionslokalisierung an Holz eingesetzt wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode für eine räumliche Lokalisierung in Verbindung mit Geschwindigkeitsmodellen entwickelt und implementiert.

Die Grundidee der Grid-search-Methode besteht darin, im Vorfeld ein einheitliches Gitterraster über den Testkörper zu legen. Die Positionen der Schallemissionssensoren auf der Oberfläche werden ebenfalls erfasst. Im Folgenden wird für jeden Gitterpunkt der Frage nachgegangen, wie das Messergebnis der Schallemissionsanalyse aussehen würde, wenn der Ursprung des Ereignisses genau in diesem Gitterpunkt liegt.

Hierfür wird zunächst der Abstand und daraus, in Verbindung mit der Schallgeschwindigkeit, die resultierende Laufzeit eines Ultraschallimpulses von jedem Gitterpunkt zu allen Sensoren berechnet. Daraus ergibt sich für jeden Gitterpunkt ein charakteristisches Verhältnis der Ankunftszeiten bezogen auf die Sensoren. Um eine Lokalisierung eines gemessenen Ereignisses durchzuführen, werden die Unterschiede zwischen den aufgezeichneten Ankunftszeiten an den Sensoren mit den charakteristischen Verhältnissen der Ankunftszeiten aller Gitterpunkte verglichen. Der Gitterpunkt, dessen errechneten Verhältnisse der Ankunftszeiten am besten zu den gemessen passen, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Ursprungsort.

Um diese Lokalisierung mit einem Geschwindigkeitsmodell zu verbinden, wird bei der Berechnung vom Gitter-Sensor-Abstand in die entsprechende Laufzeit, die Geschwindigkeit als nicht konstant angenommen. Es wird ein weiteres Gitterraster über den Testkörper gelegt und den jeweiligen Bereichen Geschwindigkeiten zugewiesen. Die Geschwindigkeit für die Laufzeitberechnung ergibt sich aus einer Mittelung der Geschwindigkeitsbereiche durch die der Laufweg führt. Bei dreidimensionalen Modellen kann dies auch mit einer eigenen Geschwindigkeit für jede Raumrichtung erfolgen, um einem anisotropen Werkstoffverhalten, wie beispielsweise in Kap. 10.2 bei Holz, Rechnung zu tragen.

10.2 Lokalisierung an Konstruktionsvollholz mit der Grid-search-Methode

Im Anschluss an die Entwicklung und Implementierung der Grid-search in die bestehende Programmstruktur zur SEA-Auswertung, wurde die Methode zuerst in Laboruntersuchungen getestet. Hierfür wurden Messungen an unterschiedlichen Holztestkörpern durchgeführt. Bei Holz handelt es sich um einen anisotropen Werkstoff. Es hat eine unterschiedliche Ultraschallgeschwindigkeit parallel zur Faser und senkrecht zur Faser. Für eine Lokalisierung von Schallemissionsereignissen an Holz ist man daher ebenfalls auf die Verwendung eines Geschwindigkeitsmodells angewiesen. Aus diesem Grund eignen sich Holztestkörper sehr gut, um die Verbesserung der Lokalisierung bei der Verwendung von Geschwindigkeitsmodellen zu untersuchen.

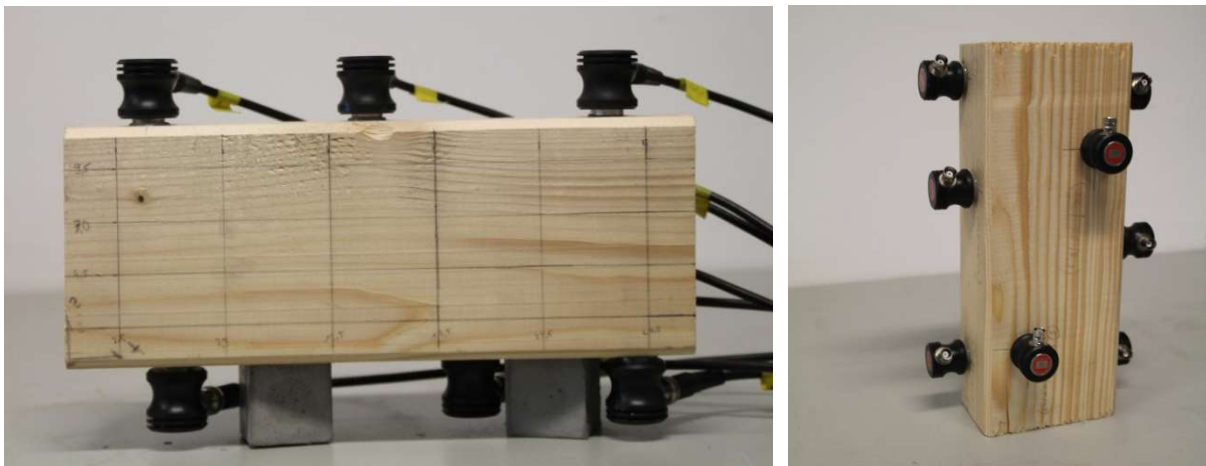


Abb. 10-1: Testkörper aus Konstruktionsvollholz mit aufgezeichnetem Raster für die künstlichen Quellen (links) und den acht aufgeklebten Schallemissionssensoren (rechts).

Auf einen Testkörper aus Konstruktionsvollholz (30 cm x 7,5 cm x 12 cm) wurden 8 Schallemissionssensoren aufgeklebt. Die Sensoren wurden auf drei Seiten befestigt. An den beiden Sägekanten senkrecht zur Faser war aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit mit einer schlechten Ankopplung zu rechnen, daher wurden hier keine Sensoren angebracht. Auf der verbleibenden Seite ohne Sensorik wurde ein Messraster mit 5 cm x 2,5 cm aufgezeichnet [Abb. 10-1].

Mittels Bleistiftminenbrüchen (HSU-Nielsen-Quelle) wurde auf den Kreuzungspunkten des Messrasters Schallemissionen angeregt und mit der Schallemissionsanalyse aufgezeichnet. Diese Schallemissionen wurden daraufhin mit Hilfe der Grid-Search-Methode lokalisiert.

Die Ultraschallgeschwindigkeit des Konstruktionsvollholzes wurde mittels Ultraschall-Durchschallung bestimmt [Abb. 10-2]. Gemessen wurde immer in Feldmitte des aufgezeichneten Messrasters.

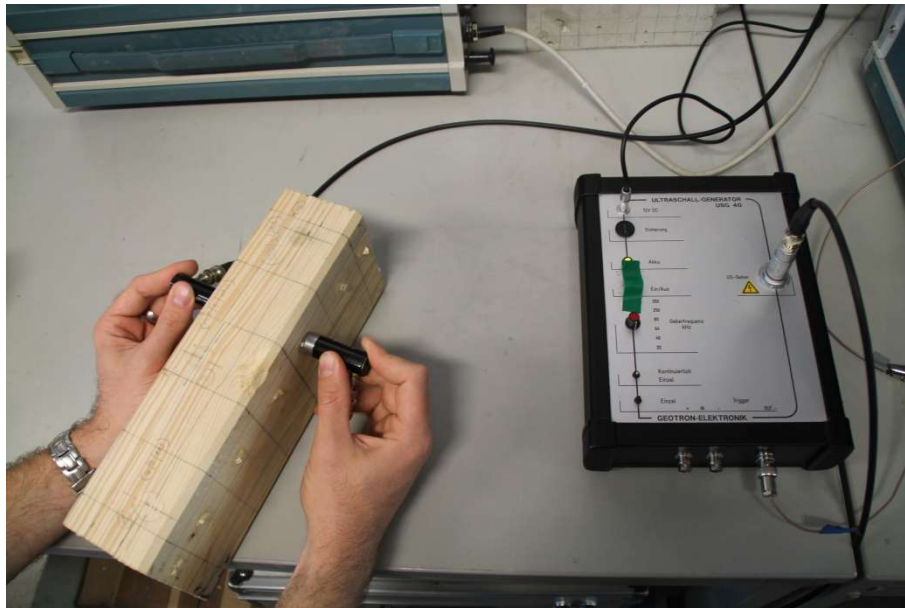


Abb. 10-2: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit des Testkörpers aus Konstruktionsvollholz mittels US-Durchschallung.

Um den Einfluss der Schallgeschwindigkeitsverteilung und deren Berücksichtigung bei einer Lokalisierungsrechnung zu untersuchen, wurden zwei Berechnungen durchgeführt. Als Erstes wurden die Quellorte unter Annahme einer homogenen Geschwindigkeit von 3000 m/s berechnet. Diese Geschwindigkeit wurde nach einer Mittelung aller Ultraschallmessungen in allen drei Raumrichtungen und anschließender Rundung gewählt. Zum Vergleich wurde in einer weiteren Berechnung für jede Raumrichtung eine andere Geschwindigkeit angenommen [Tab. 10-1]. Diese drei Geschwindigkeiten ergeben sich durch Mittelung der Ultraschallmessergebnisse für jede einzelne Richtung.

Tab. 10-1: Gemittelte US-Geschwindigkeiten für die drei Raumrichtungen des Holztestkörpers:

Achse	Orientierung	US-Geschwindigkeit [m/s]	Standardabweichung [m/s]
X	parallel zur Faser	5757	301
Y	radial zu den Jahrringen	1869	224
Z	tangential zu den Jahrringen	1573	72

Die Ergebnisse sind in Abb. 10-3 mit homogener Geschwindigkeitsannahme und Abb. 10-4 mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten für alle drei Raumrichtungen zu sehen. Die Lokalisierungen sind als Projektionen in die X/Z-Ebene dargestellt, um die Abweichung zum Messraster zu zeigen auf dem die Schallemissionen ausgelöst wurden. Bei einer homogenen Geschwindigkeitsannahme sind die Ergebnisse an den Rändern des Testkörpers und vor allem eher im Zentrum der Sensoranordnung zu finden. Durch die Berücksichtigung des Geschwindigkeitsmodells zeigt sich eine deutliche breitere Verteilung und Annäherung der Lokalisierungsergebnisse an das Messraster. Die Lokalisierung verbessert sich also deutlich.

Die Abweichungen, die sich trotzdem vom Messraster ergeben, sind zum einen, besonders im Randbereich, auf die Sensoranordnung zurückzuführen [Kap. 11.1]. Darüber hinaus ist Holz ein sehr inhomogener Werkstoff mit Faserrichtungen und Astlöchern. Dies gilt auch für den vorliegenden Testkörper [Abb. 10-1]. Das verwendete Geschwindigkeitsmodell unter Annahme einer Geschwindigkeit für jede Raumrichtung könnte noch deutlich verfeinert werden.

Durch die Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die dreidimensionale Grid-search richtig implementiert wurde und funktioniert. Darüber hinaus konnte eine Verbesserung der Lokalisierung durch die Berücksichtigung von Geschwindigkeitsmodellen nachgewiesen werden.

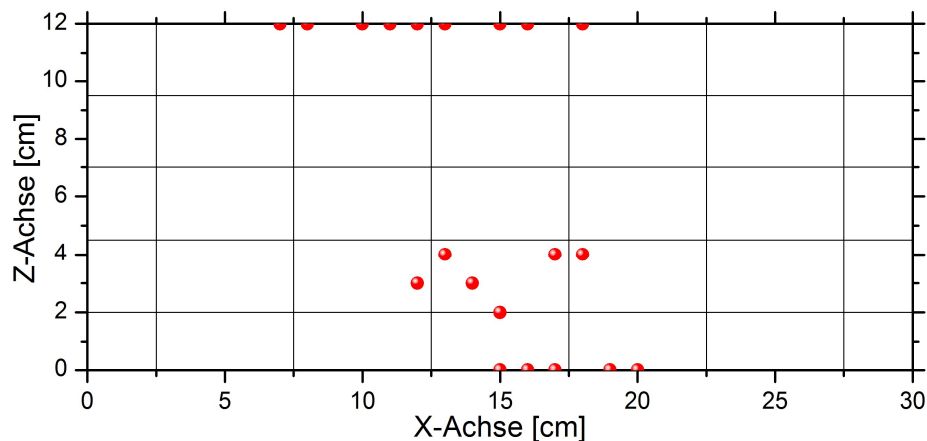


Abb. 10-3: Lokalisierungsergebnisse bei der Berechnung mit homogenem Geschwindigkeitsmodell und einer gemittelten Schallgeschwindigkeit für alle drei Raumrichtungen.

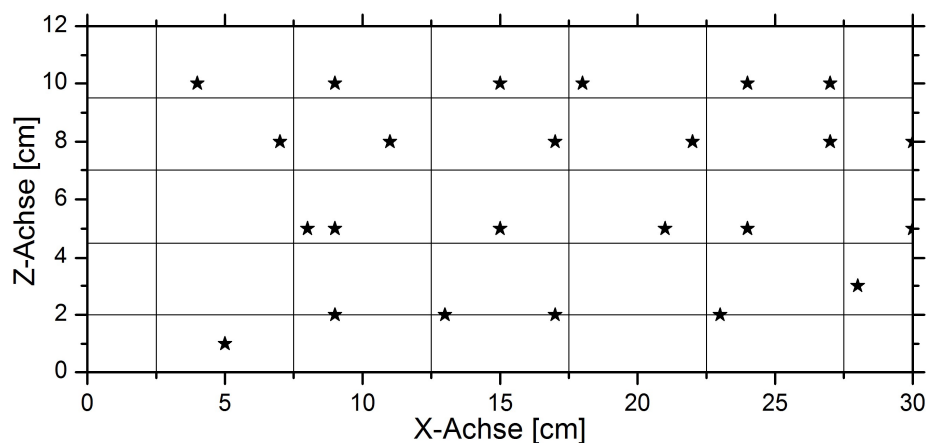


Abb. 10-4: Grid-search-Lokalisierungsergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen aufgrund des anisotropen Aufbaus des Holzes. Die Ursprungsorte der Signale liegen in den Knotenpunkten des Gitterrasters.

10.3 Lokalisierung mit einem einfachen Geschwindigkeitsmodell für brandbeanspruchten Beton

Um den entwickelten Grid-search-Algorithmus zur Lokalisierung von Schallemissionen für Beton unter Brandbeanspruchung anzuwenden, ist ein passendes Geschwindigkeitsmodell notwendig. Für eine erste Machbarkeitsstudie [Richter 2012] wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Geschwindigkeit rein aufgrund der Temperatur ändert. Eine Schädigung der Testkörper beeinflusst zwar ebenfalls die Geschwindigkeitsentwicklung, wird aber auch durch die Temperatur ausgelöst. Durch die Ergebnisse aus Kap. 11.3.2 und Kap. 11.3.3 wurde ein schneller Einbruch der Ultraschallgeschwindigkeit im Testkörper bei einer Temperatur von 100°C nachgewiesen. Daher wurde im Modell kein Übergangsbereich, sondern ein schlagartiger Einbruch der Schallgeschwindigkeit um 50% bei Erreichen einer Temperatur von 100°C vorgesehen. Die Temperaturdaten für das verwendete Modell stammen aus Temperatursimulationen der MFPA Leipzig GmbH [Juknat 2014], die begleitend zu den Branduntersuchungen erstellt wurden [Abb. 10-5]. Die Simulationsergebnisse wurden anhand der Messergebnisse der einbetonierten Temperaturmessfühler validiert. Um die zeitliche Veränderung zu erfassen, wurde jeweils für 30 Sekunden ein Temperaturmodell gemittelt und entsprechenden Schallgeschwindigkeiten zugeordnet.

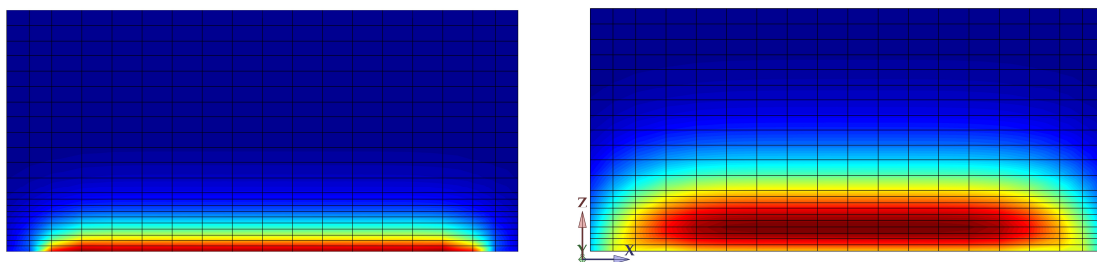


Abb. 10-5: Temperatursimulation eines Betontestkörpers, für das Experiment Q-ZTV-80-1PP, mit der Brandkurve nach ZTV-ING belastet. Der Testkörper liegt auf zwei Seiten am Ofenrand auf. Links nach 26 min und rechts nach 144 min [Juknat 2014].

Die Ergebnisse einer Lokalisierungsberechnung mit diesem vereinfachten Geschwindigkeitsmodell und dem Grid-search-Algorithmus sind in Abb. 9-5 zu sehen. Das Ergebnis ist dargestellt im Vergleich zum geschädigten Testkörper und einer Lokalisierung mit dem Bancroft-Algorithmus, die bereits in Kap. 9.2 gezeigt wurden. Es handelt sich um die ersten 200 Ereignisse des Experimentes P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103. Beim Vergleich mit dem Bancroft-Algorithmus wird die höhere Anzahl an erfolgreich berechneten Ereignissen deutlich. Auch die Verteilung, besonders in den Randbereichen lässt auf ein realistischeres Ergebnis schließen. Die Verteilung mit einer verstärkten Aktivität in der Mitte des Testkörpers, aber einer eher geringen Aktivität im Bereich unten rechts, sind im Vergleich mit dem Bild des geschädigten Testkörpers ebenfalls ein Anzeichen für ein plausibles Ergebnis. Dennoch fällt der Vergleich bei weitem nicht so eindeutig aus, dass sich ein prinzipieller Erfolg der Grid-search-Methode daraus direkt ableiten lässt. Für eine solche Aussage sind weitere Untersuchungen und genauere Geschwindigkeitsmodelle notwendig.

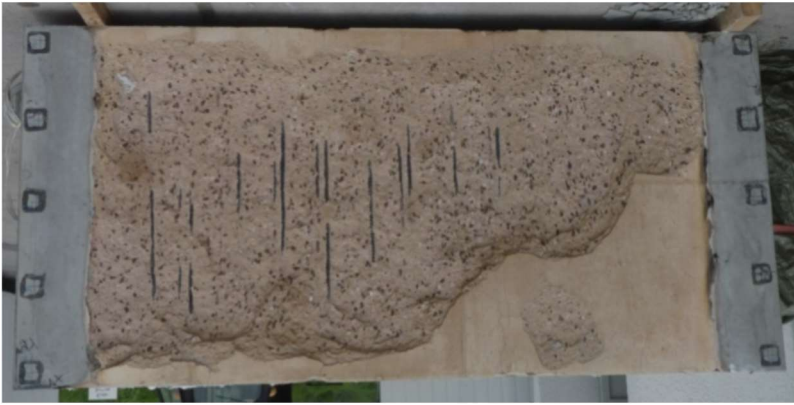
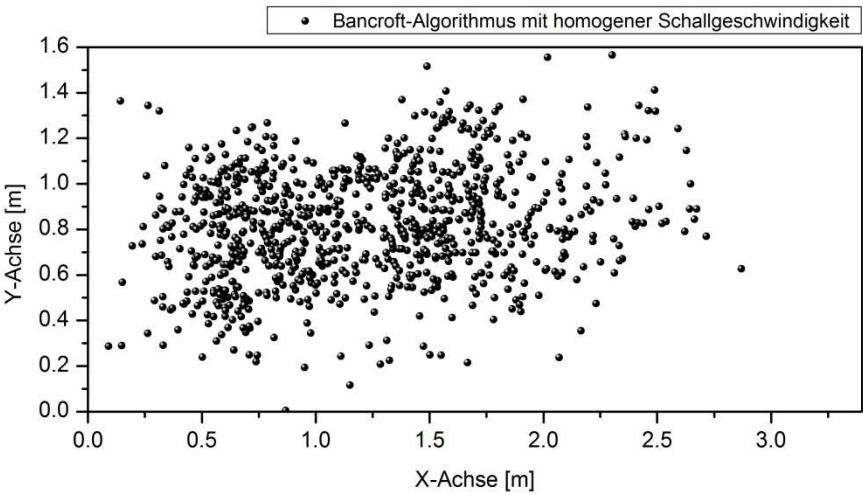
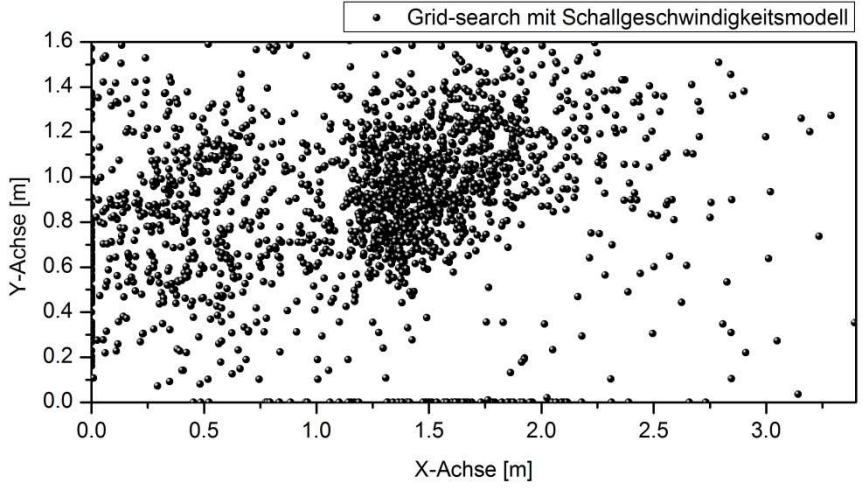
	<p>Bilddokumentation der Abplatzungen</p>
 <p>• Bancroft-Algorithmus mit homogener Schallgeschwindigkeit</p>	<p>Lokalisierung mit Bancroft-Algorithmus und homogener Geschwindigkeit</p>
 <p>• Grid-search mit Schallgeschwindigkeitsmodell</p>	<p>Lokalisierung mit Grid-search und heterogenem Geschwindigkeitsmodell</p>

Abb. 10-6: Vergleich verschiedener Lokalisierungsmethoden bei den ersten 200 Ereignissen von P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103.

11 Grenzen der Lokalisierung bei Brandversuchen

Dem Einsatz der Schallemissionsanalyse und im Besonderen die Lokalisierungsberechnung sind grundsätzlich Grenzen unterworfen. Dabei handelt es sich zum einen um Grenzen der Messtechnik, im Speziellen der Messgeräteeinstellungen, die unabhängig von der Anwendung sind. Zum anderen gibt es Beschränkungen aufgrund des Materials, für welches das Prüfsystem eingesetzt wird. Diese Grenzen und Probleme werden in Kap. 3.1 angesprochen, da es sich um bekannte Phänomene handelt, die bereits ausreichend untersucht wurden. Grundsätzlich ist ein Wissen dieser Grenzen wertvoll. Es hilft bei der Frage ob und in wie weit sich die Messtechnik für eine spezielle Prüfaufgabe eignet.

Darüber hinaus gibt es aber für jede Anwendung spezielle Grenzen und Beschränkungen, die für den jeweiligen Fall gezielt untersucht und beachtet werden müssen. Für den Einsatz der Schallemissionsanalyse bei Beton unter Brandeinwirkung wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden Kapitel zusammengefasst und dargestellt.

11.1 Geometrie der Testkörper und Sensoranordnung

Die Qualität der Lokalisierungsberechnung hängt unter anderem von der Testkörpergeometrie ab. Eine schlecht gewählte Geometrie kann Mehrfachreflexionen und somit Störungen begünstigen. Die Testkörpergeometrie beeinflusst darüber hinaus die Abstände der Sensoren zueinander und damit den Sensorabstand zur Quelle. Dieser Laufweg wird vom Material und dem Schädigungsgrad beeinflusst und das Signal wird bei längeren Laufwegen gedämpft, was zu Schwierigkeiten in der Signalauswertung führen kann. Grundsätzlich hat eine Sensoranordnung einen nachgewiesenen Einfluss auf die Qualität der Lokalisierung [Schechinger 2005]. Ereignisse, deren Ursprünge von allen Sensoren einen ähnlichen Abstand haben und im Zentrum der Sensoranordnung liegen, werden verhältnismäßig gut lokalisiert. Liegen die Quellen am Rande der Sensorabdeckung oder gar außerhalb, sinkt die Lokalisierungsgenauigkeit.

Dies ist auch bei den in Abb. 11-1 und Abb. 11-2 dargestellten Lokalisierungsergebnissen zu erkennen. Es handelt sich hierbei um eine Auswahl von lokalisierten Schallemissionsereignissen des Experiments Q-ETK-130-0PP, welches bereits in Kap. 9.3 umfangreich betrachtet wurde. Um bei der großen Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen überhaupt etwas erkennen zu können, wurden die dargestellten Ereignisse gezielt ausgewählt. Es wurden nur die ersten 100 Ereignisse betrachtet, da zu Beginn des Experiments die Wahrscheinlichkeit einer guten Lokalisierung höher ist [Kap. 11.2 und Kap. 11.4]. Von diesen wiederum wurden nur diejenigen dargestellt, die nach einer Lokalisierung mit dem Geiger-Algorithmus mit einer Standardabweichung von 0,15 m oder geringer bewertet wurden. Bei den dargestellten Ereignissen ist also von einer sinnvollen und guten Lokalisierung auszugehen.

Betrachtet man die Darstellung der Ergebnisse in der XY-Projektion (Grundfläche des Testkörpers mit Blick Richtung Brandofen), wird zunächst die Anordnung der Ereignisse in einer Parallele zu X-Achse ungefähr bei $Y = 0,35$ m deutlich. Dies konnte durch Beobachtungen als tatsächliches Abplatzverhalten zu Beginn des Experimentes verifiziert werden [Kap. 9.3].

Darüber hinaus ist deutlich zu erkennen, dass die Ereignisse in Testkörpermitte besser lokalisiert wurden als am Testkörperrand. Bei der zusätzlichen Betrachtung von Abb. 11-2 kommt noch hinzu, dass die Standardabweichungen in X und Y-Richtung für ein einzelnes Ereignis häufig in einer ähnlichen Größenordnung liegen, während die jeweilige Abweichung in Z-Richtung deutlich größer ausfällt.

Diese Effekte traten bereits bei früheren Untersuchungen [Richter 2009] auf und konnten auf die Sensoranordnung und Testkörpergeometrie zurückgeführt werden. Da die Testkörper in Z-Richtung geringere Bauteildicken aufweisen (Ausbildung als Platte oder Deckenelemente) und der Abstand der Sensoren zum Ofen und somit die Gefährdung am höchsten ist, konnten die Sensoren in Z-Richtung nicht optimal platziert werden [Kap. 6.2]. Dies führt zu den erhöhten Abweichungen in Z-Richtung. Durch eine Platzierung einzelner Sensoren an Stellen in direkter Ofennähe, kann dem entgegengewirkt werden.

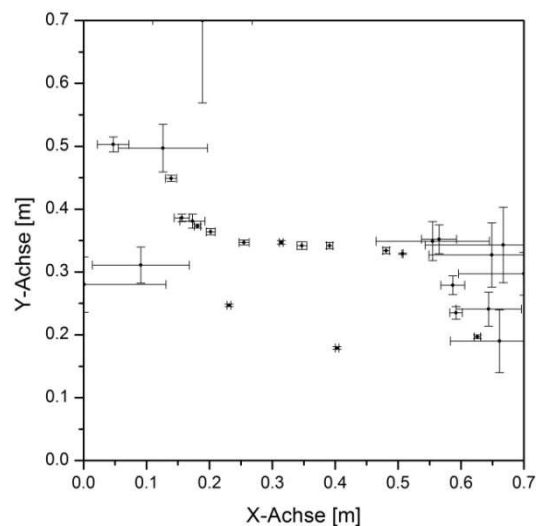


Abb. 11-1: Q-ETK-130-0PP XY-Projektion mit dem Ergebnis der Lokalisierung inklusive Standardabweichung unter Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeit von 5250 m/s. Verwendet wurden von den ersten 100 Ereignissen, alle mit einer Standardabweichung $d < 0,15$ m.

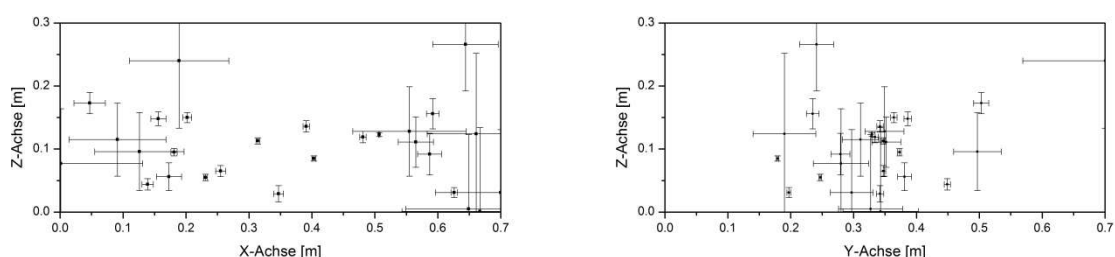


Abb. 11-2: Q-ETK-130-0PP Ergebnis der Lokalisierung inklusive Standardabweichung unter Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeit von 5250 m/s. Verwendet wurden von den ersten 100 Ereignissen alle mit einer Standardabweichung $d < 0,15$ m. XZ-Projektion (links), YZ-Projektion (rechts).

11.2 Zeitliche Verschlechterung der Lokalisierungsgenauigkeit

Zur Untersuchung der zeitlichen Abhängigkeit der Lokalisierungsgenauigkeit wurden die errechneten Standardabweichungen der Lokalisierungsberechnungen als Qualitätsmerkmal über der Zeit dargestellt. Beispielhaft ist dies für den Datensatz Q-ETK-130-0PP-TO in Abb. 11-3 zu sehen. Dies ist der gleiche Datensatz, der auch in Kap. 11.1 und Kap. 9.3 verwendet wurde. Hierbei wird sehr schnell die große Anzahl an sehr schlecht lokalisierten Ereignissen deutlich. Viele Ergebnisse liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit außerhalb des Testkörpers. Diese Ergebnisse sind daher für eine Bewertung des Schädigungsverhaltens nicht verwendbar und sollten aussortiert werden. Die Mehrzahl der Ereignisse befindet sich in einem Bereich zwischen ca. 0 und 2 m. Diese Häufung verändert sich nach ca. 8 min. Es ist eine deutliche Erhöhung der Standardabweichung der Mehrzahl der Ereignisse festzustellen. Gleichzeitig werden es ab ca. 15 min sichtbar weniger Ereignisse mit geringer Standardabweichung. In Verbindung mit den Erkenntnissen aus Kap. 8.3 und Kap. 8.4.2 lässt dies auf den Zeitpunkt des Beginns von Abplatzungen schließen. Daraus lässt sich ableiten, dass sich die Lokalisierung mit zunehmender Zeit also zunehmender Schädigung verschlechtert. Der Zustand der Testkörper hat einen direkten Einfluss auf das Ergebnis. Bei beginnender Rissbildung oder Schädigung durch Abplatzungen scheint dies zu einer Problematik hinsichtlich der Lokalisierung zu kommen. Dies erscheint logisch, da die Schädigungen eine direkte Schallausbreitung im Testkörper verhindern, was zu einer Verfälschung des Messergebnisses führt. Demnach ist im Hinblick auf die Lokalisierung nur zu Beginn der Aufzeichnung mit aussagekräftigen Ergebnissen zu rechnen, solange die Schädigung in der Lokalisierung nicht berücksichtigt werden kann [Kap. 10.3].

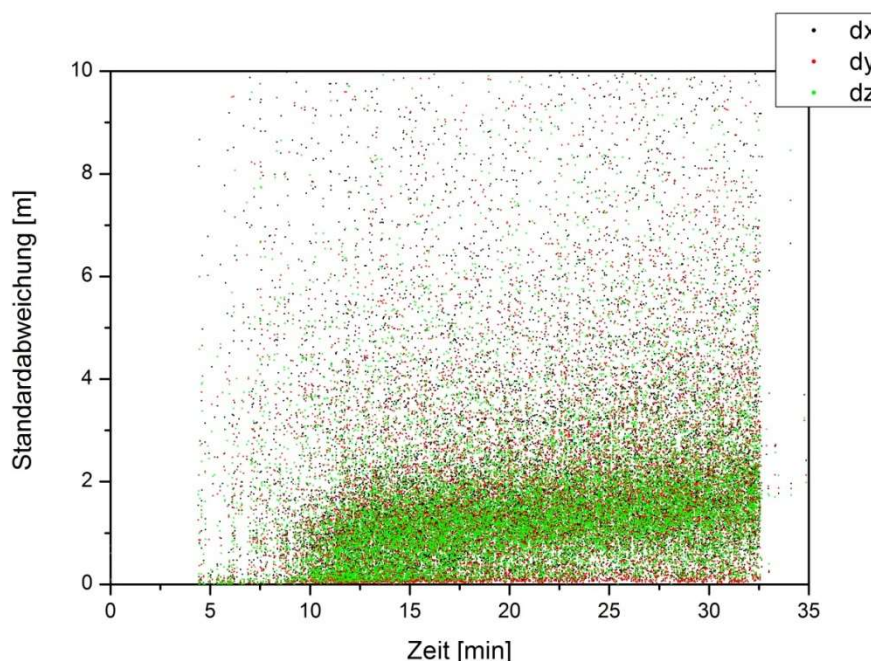


Abb. 11-3: Q-ETK-130-0PP-TO-V103: Standardabweichung der Lokalisierung in drei Raumrichtungen über den zeitlichen Versuchsverlauf.

11.3 Inhomogene und veränderliche Schallgeschwindigkeitsverteilung

Eine Kenntnis der Schallgeschwindigkeit im Testkörper ist im Zusammenhang mit dem Einsatz der Schallemissionsanalyse als Grundlage für Lokalisierungsrechnungen notwendig. Zur Ermittlung der unterschiedlichen und sich zeitlich und geometrisch verändernden Schallgeschwindigkeitsverteilung in den Testkörpern aufgrund von Schädigung und Temperatureinfluss wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Diese werden hier zusammengefasst und in Zusammenhang mit der Fragestellung dieser Arbeit diskutiert.

11.3.1 Ultraschallgeschwindigkeit der Testkörper nach den Experimenten

Grundsätzlich wurde die Schallgeschwindigkeit in allen Testkörpern vor Versuchsbeginn in Durchschallung ermittelt [Tab. 4-3]. Diese war bei den ungeprüften Testkörpern über den gesamten Testkörper, im Rahmen der Ungenauigkeiten aufgrund des Materials, als gleich anzusehen. Anders verhält es sich bei den im Brandversuch einseitig beflamnten Testkörpern nach dem Experiment. Diese wurden von Zhang [2011] untersucht. Hierfür wurden die Ultraschallgeschwindigkeiten in den geprüften Testkörpern 1-2 (Q-ETK-130-0PP) [Abb. 11-5 oben links] und 1-6 (Q-ETK-120-1PP) [Abb. 11-5 oben rechts] in Durchschallung ermittelt [Abb. 11-4]. Hierbei handelte es sich um einen durch Abplatzungen geschädigten Testkörper und einen, bei dem dies durch die Verwendung von PP-Fasern verhindert wurde.



Abb. 11-4: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit im Testkörper in Durchschallung.

Das Ergebnis [Abb. 11-5] zeigt verschiedene Effekte. Zu erkennen ist als erstes die Abnahme der Schallgeschwindigkeit auf bis zu 3000 m/s. Auffällig ist auch die große Schwankung der Messergebnisse zwischen 5500 m/s und 3000 m/s, wobei die Abnahme der Schallgeschwindigkeit bei dem Testkörper mit PP-Fasern bei weitem nicht so groß und auch deutlich gleichmäßiger ist. Bei einer Betrachtung der X/Z-Ebene erkennt man eine Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeitsabnahme von der Temperatur, da die Testkörper nur einseitig beflamnt wurden. Die brandraumzugewandte Seite der Testkörper zeigt die größte Geschwindigkeitsabnahme, während auf der brandraumabgewandten Seite kaum Änderungen zu verzeichnen sind. Der Rand auf dem die Testkörper aufgelagert sind, zeigt keine Änderung der Schallgeschwindigkeit. Hier waren auch wenig bis keine Schäden und keine Farbänderungen zu erkennen.

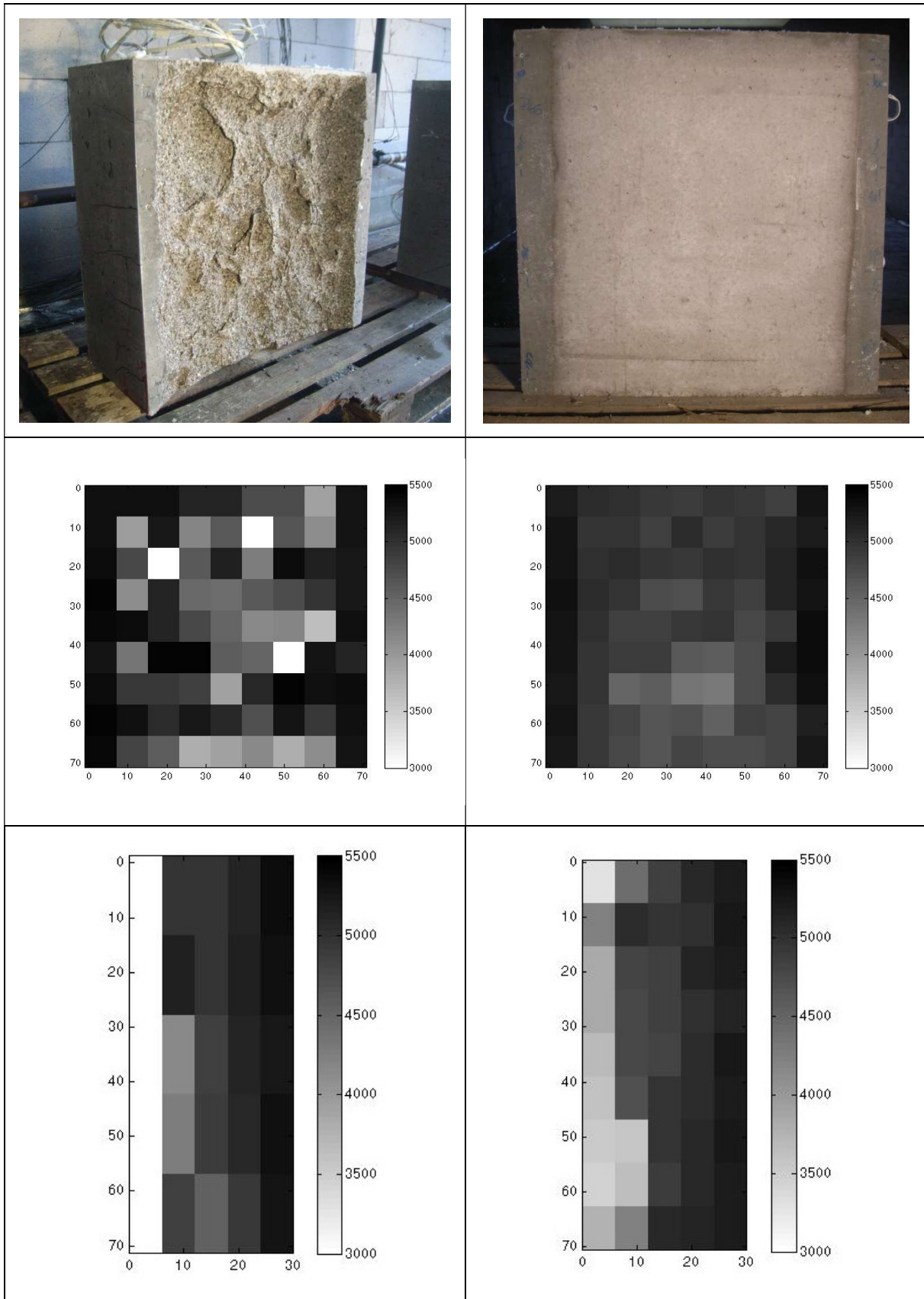


Abb. 11-5: Bild der geprüften Testkörper (oben), mit den zugehörigen Ergebnissen der Geschwindigkeitsmessung [m/s] in der X/Y-Ebene (Mitte) und in X/Z-Richtung (unten). Es handelt sich um die Testkörper 1-2 (Q-ETK-130-0PP) (links) und 1-6 (Q-ETK-120-1PP) (rechts). Nach Zhang [2011].

11.3.2 Zeitlicher Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit während der Experimente

Um nicht nur die Schallgeschwindigkeit vor und nach dem Experiment vergleichen zu können [Kap. 11.3.1], sondern auch brauchbare Information über den zeitlichen Verlauf während der Experimente zu bekommen, wurden ergänzende Ultraschallmessungen durchgeführt. Es wurden bei zwei Experimenten (Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP) auf beiden Seiten des mittleren Testkörpers im unteren Bereich Ultraschallsensoren angebracht [Abb. 11-6]. Einer davon diente als Sender und einer als Empfänger. Somit waren Ultraschalltransmissionsmessungen durch den Testkörper während des Experimentes möglich. Durch die Anbringung im unteren Teil des Testkörpers verlief die Messung durch einen Bereich des Testkörpers in dem über den Versuchsverlauf eine Schädigung zu erwarten war. Die Ultraschallmessung wurde während der beiden Experimente in regelmäßigen Abständen durchgeführt.



Abb. 11-6: Position der Ultraschallsensoren im unteren Bereich des mittleren Testkörpers. Für die Durchschallung wurde auf der einen Seite ein Geber-Sensor, auf der anderen Seite ein Empfänger verwendet.

Die Ergebnisse der Messungen wurden von Meier [2012] ausgewertet und anschließend dargestellt [Abb. 11-7]. Hier ist die Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit über die Versuchszeit zu erkennen. Mit zunehmender Zeit sinkt die Ultraschallgeschwindigkeit. Die einzelnen Ultraschallsignale wurden durch die auftretenden Schallemissionen und von Störgeräuschen des Ofens überlagert und mussten zunächst identifiziert und der Ersteinsatz bestimmt werden. Hieraus erklärt sich eine Ungenauigkeit der Ergebnisse. Messergebnisse, die als völlig unrealistisch eingestuft wurden, sind als Kreuze dargestellt und wurden zur besseren Übersichtlichkeit nicht in die resultierende Kurve aufgenommen.

Da die Ergebniskurven aufgrund der Messungenauigkeiten einer Schwankung unterliegen, wurde anschließend ein gleitender Mittelwert (Ordnung $n = 20$) berechnet und für beide Experimente dargestellt [Abb. 11-8]. Zu erkennen ist ein deutlicher Einbruch der Ultraschallgeschwindigkeit in den Testkörpern nach ca. 2 min. Die Ultraschallgeschwindigkeit verringert sich in den folgenden 5 Minuten um ungefähr die Hälfte. Im Anschluss bleibt die Ultraschallgeschwindigkeit bei der Betonrezeptur mit PP-Fasern (Q-ZTV-80-1PP) gleich. Bei der Betonrezeptur ohne PP-Fasern hingegen sinkt sie weiter ab, wenn auch deutlich verlangsamt. Dies

lässt auf eine Änderung der Schallgeschwindigkeit in Folge fortschreitender Schädigung aufgrund von Abplatzungen schließen.

Ein Vergleich zu den Ergebnissen von Zhang [2011] [Kap. 11.3.1] ist nur bedingt möglich, da es sich dort um Experimente aus einer anderen Versuchsreihe handelte. Es wurde eine andere Betonrezeptur und vor allem eine andere Temperaturkurve verwendet. Die absoluten Werte können also nicht miteinander verglichen werden. Eine Plausibilitätsprüfung ist jedoch möglich und die Ergebnisse der beiden Untersuchungen passen durchaus gut zusammen.

Aus den Ergebnissen ist eine Änderung der Schallgeschwindigkeit über den Versuchsverlauf zu erkennen. Dies geschieht aber nicht über den gesamten Versuchsverlauf, sondern beginnt zu einem verhältnismäßig frühen Zeitpunkt und beschränkt sich auf einen Zeitbereich von wenigen Minuten.

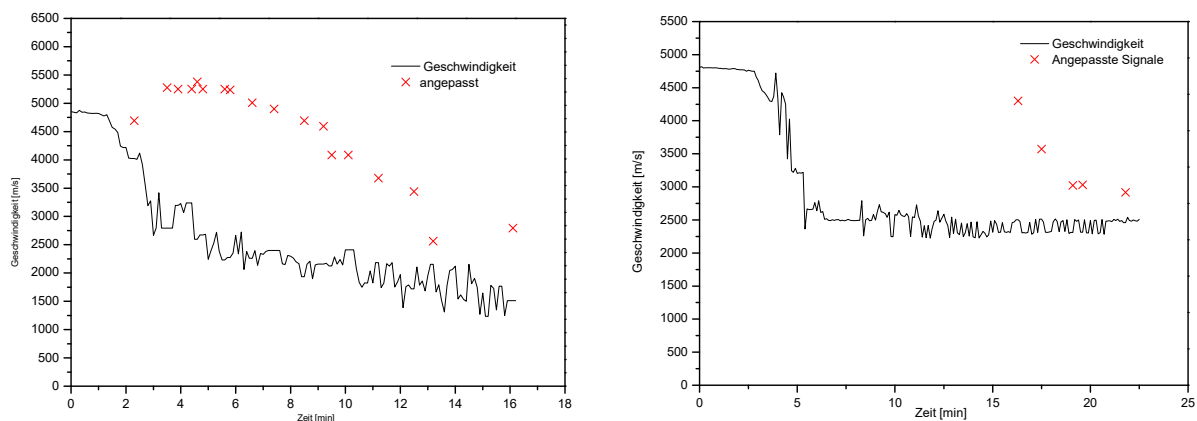


Abb. 11-7: Gemessene Geschwindigkeit über die Zeit. Links ohne PP-Fasern, rechts mit PP-Fasern [Meier 2012].

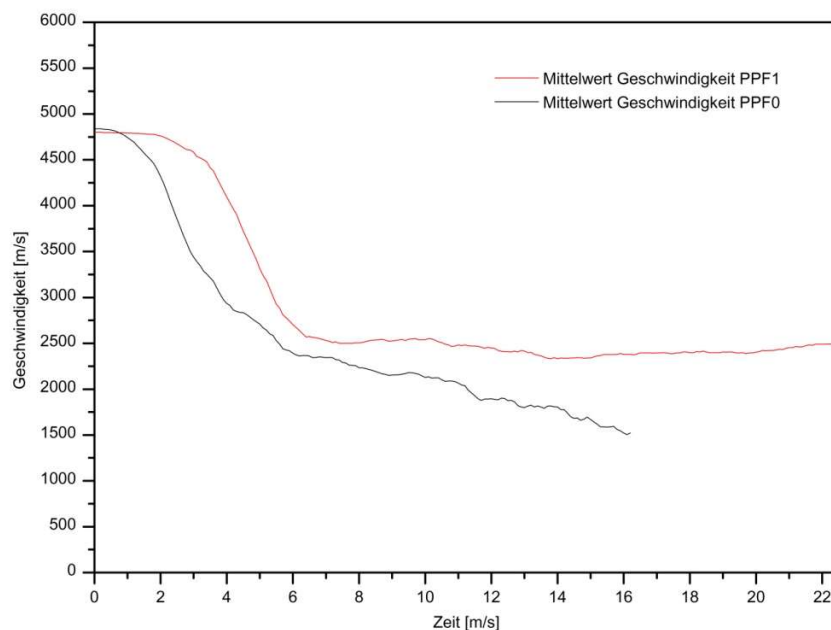


Abb. 11-8: Gleitender Mittelwert der Geschwindigkeit (Ordnung $n = 20$) [Meier 2012].

11.3.3 Temperaturabhängige Ultraschallgeschwindigkeitsentwicklung

Da die Belastung der Testkörper durch Brandeinwirkung weniger durch die Zeit, als vielmehr durch die Temperatur entsteht, wurden zusätzliche Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit durchgeführt.

Hierfür wurden die Ergebnisse für die Ultraschallgeschwindigkeitsentwicklung [Meier 2012] [Abb. 11-8], nicht über die Zeit, sondern über die Temperatur dargestellt. Die Daten wurden analog zu Kap. 8.4.3 mit den Temperaturlaufzeichnungen eines einbetonierten Sensors im Inneren des Testkörpers synchronisiert.

Die Darstellung der Ultraschallgeschwindigkeit über der Temperatur ist für das Experiment Q-ZTV-80-1PP in Abb. 11-9 zu sehen. Hierbei zeigt sich, dass der Einbruch der Ultraschallgeschwindigkeit im Bereich von 100°C stattfindet. Bezogen auf die Temperaturentwicklung geschieht die Änderung schlagartig und ist deutlicher zu erkennen wie im Zeitdiagramm [Abb. 11-9]. Diese Ergebnisse lassen auf einen Zusammenhang der Schallgeschwindigkeitsentwicklung mit der Wasserdampfbildung bei 100°C und der damit verbundenen Schädigung der Testkörper schließen.

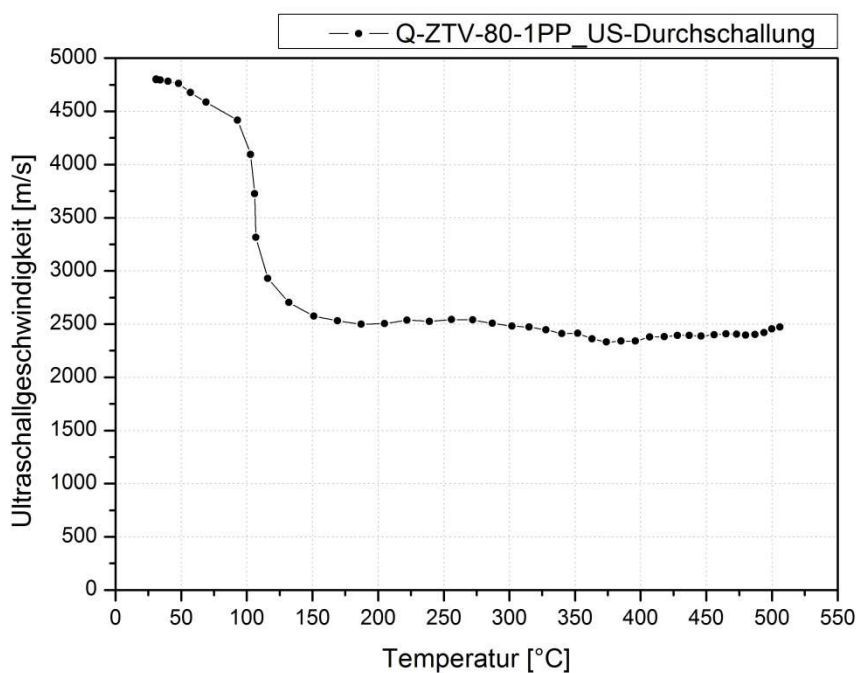


Abb. 11-9: Gleitender Mittelwert der Geschwindigkeit aus Abb. 11-8 über der Temperatur aufgetragen.

Da die temperaturbedingte Schädigung und Ultraschallentwicklung in den Testkörpern allerdings nicht eindeutig auf einen Schädigungsmechanismus zurückzuführen ist und eine mögliche Ultraschallgeschwindigkeitsänderung aufgrund einer temperaturbedingten Veränderung des Zementsteins möglich ist, wurden hierzu von Krapp [2012] gezielt Untersuchungen durchgeführt. Das Ziel war eine Erfassung der Ultraschallgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen ohne Einflussgrößen wie Abplatzungen oder Rissbildung aufgrund einseitiger

Erwärmung zu bekommen. Hierfür wurden Mörtelwürfel mit 4 cm Kantenlänge hergestellt [Abb. 11-10 links]. Geprüft wurden Rezepturen mit und ohne PP-Fasern. Diese Würfel wurden im Ofen auf unterschiedliche Temperaturen erwärmt und im Anschluss, am erwärmten Testkörper, die Schallgeschwindigkeit in Durchschallung gemessen [Abb. 11-10 rechts].

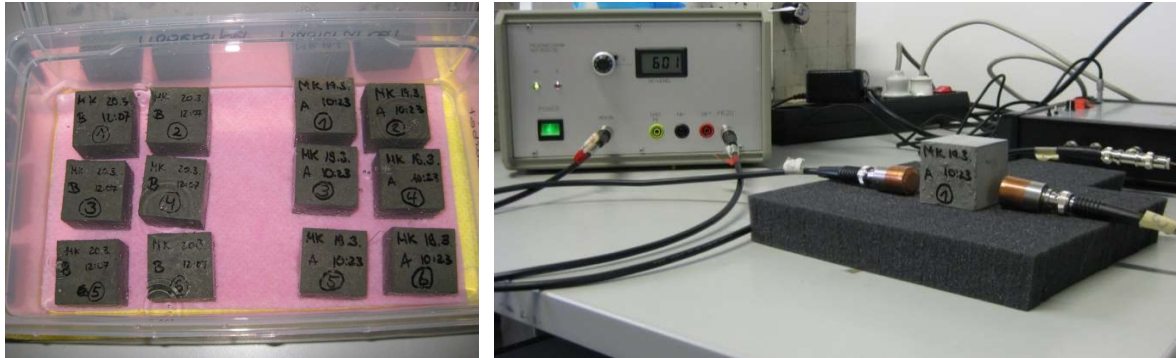


Abb. 11-10: Mörtelwürfel mit 4cm Kantenlänge und Messaufbau zur Durchschallung von erwärmten Testkörpern mit temperaturresistenten Ultraschallsensoren [Krapp 2012].

Das Ergebnis der Messungen zeigt sowohl beim Mörtel mit als auch beim Mörtel ohne PP-Fasern einen kontinuierlichen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei zunehmender Temperatur [Abb. 11-11]. Die Schallgeschwindigkeit sinkt darüber hinaus bis 700°C um mehr als 50%. Bei ca. 150°C und bei 400°C sind signifikante Änderungen in der Steigung zu erkennen. Dies wird bei 150°C auf den Einfluss des verdampfenden Wassers und bei 400°C auf eine Zersetzung des Zementsteins zurückgeführt. Eine Änderung der Ultraschallentwicklung oberhalb von 100°C kann auf die Wasserdampfbildung zurückgeführt werden. Sie findet aber bei weitem nicht so eindeutig und schlagartig wie bei den Ergebnissen in Abb. 11-9 statt. Daraus lässt sich vermuten, dass die schlagartige Änderung der Schallgeschwindigkeit primär durch die auftretende Schädigung bei den Brandversuchen zurückzuführen ist.

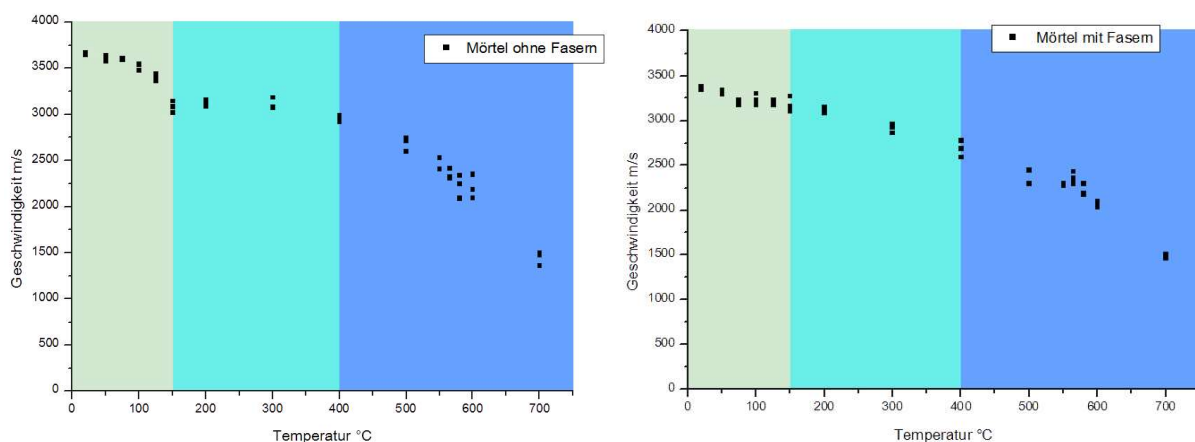


Abb. 11-11: Ultraschallgeschwindigkeit der Mörtelproben in Abhängigkeit der Temperatur [Krapp 2012].

11.4 Untersuchungen mit einbetonierten Ultraschallquellen

Die Untersuchungen in Kap. 11.3 generieren mit der Erfassung der Schallgeschwindigkeitsänderung in den Testkörpern eine Aussage über einen einzelnen Faktor der Lokalisierungsrechnung. Dies sagt jedoch nur in beschränktem Maße etwas über die Möglichkeiten und Grenzen der Lokalisierung aus. Um die Genauigkeit und die Funktionsfähigkeit der Lokalisierungsmethoden über den gesamten Versuchsverlauf der Branduntersuchungen zu überprüfen, wurden künstliche Schallemissionsquellen in Form von Ultraschallgebern verwendet. Dies soll Aufschluss darüber geben, wie lange es möglich ist, eine Quelle mit bekannter Position zu lokalisieren, trotz der in Kap. 11.1 bis Kap. 11.3 beschriebenen Schwierigkeiten.

11.4.1 Versuchsaufbau

Von Andreisek [2012] wurden einfache Ultraschallsensoren getestet, die sich als künstliche Schallemissionsquellen zum Einbetonieren eignen [Abb. 11-12]. Es handelt sich hierbei um scheibenförmige Piezokristalle, die von zwei Seiten mit leitenden Schichten bedampft wurden. Daran wurden zweiadrige, geschirmte Kabel angelötet und der Sensor in Zweikomponentenharz eingegossen. Diese Sensoren wurden in der Arbeit von Andreisek [2012] erfolgreich in mehrere Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm an bekannten Stellen einbetoniert. Anschließend wurde nachgewiesen, dass es möglich ist, von diesen Sensoren ausgelöste Ereignisse mit Schallemissionssensoren auf der Würfeloberfläche zu erfassen und mit hoher Genauigkeit zu lokalisieren.

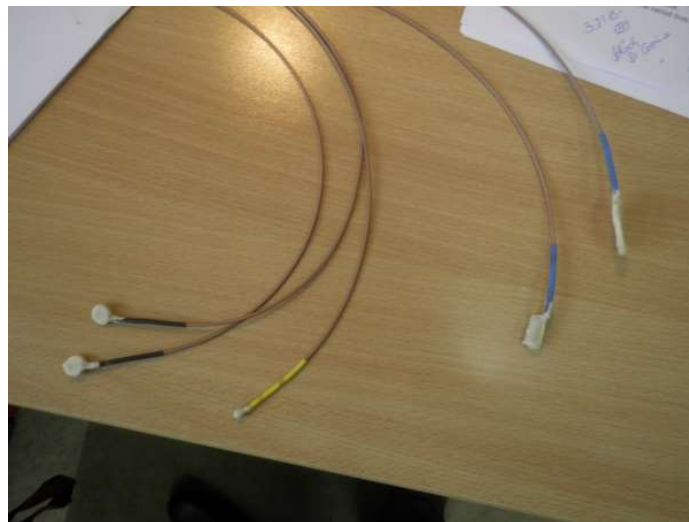


Abb. 11-12: Piezosensoren als Ultraschallgeber zum Einbetonieren [Andreisek 2012].

Für die Brandexperimente wurden in zwei Testkörpern jeweils einer dieser Ultraschallsensoren einbetoniert. Diese wurden an den Halterungen für die Temperatursensoren befestigt und die Position genau vermessen. In einem Testkörper wurde der Sensor im unteren Bereich in 22 mm Nähe zum Brandraum platziert (Q-ZTV-75-2PP-US_unten). In einem zweiten Testkörper (Q-ZTV-75-2PP-US_oben) befand sich der Sensor im oberen Bereich, mit einem Abstand von 220 mm zum Brandraum. Entlang der Y-Achse wurden beide Sensoren mittig, in X-Ausrichtung außermittig platziert [Abb. 11-14].

Es ergeben sich für die einbetonierten Sensoren also die Koordinaten:

- Q-ZTV-75-2PP-US_unten: $X = 430 \text{ mm}$; $Y = 425 \text{ mm}$ und $Z = 22 \text{ mm}$
- Q-ZTV-75-2PP-US_oben: $X = 430 \text{ mm}$; $Y = 425 \text{ mm}$ und $Z = 220 \text{ mm}$

Die Testkörperabmessungen betragen: $X = 700 \text{ mm}$; $Y = 850 \text{ mm}$ und $Z = 300 \text{ mm}$

Die Aufzeichnung der künstlich angeregten Schallemissionsereignisse erfolgte parallel zur Erfassung natürlicher Schallemissionsereignisse durch die Schallemissionsanalyse. Hierfür wurden 15 Schallemissionsensoren bei jedem Experiment verwendet. Auf dem 16. Messkanal wurde das Triggersignal des Ultraschallgenerators aufgezeichnet, um die künstlich angeregten Ereignisse identifizieren zu können.



Abb. 11-13: Befestigung der Ultraschallgeber in der Schalung vor dem Betonieren.

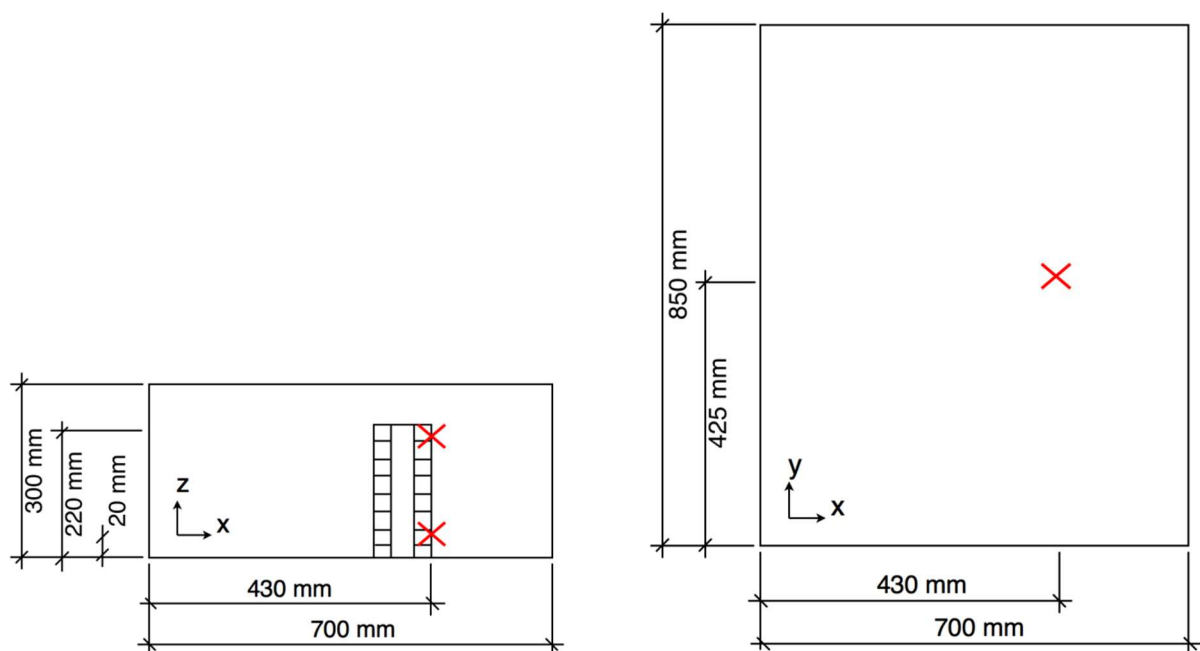


Abb. 11-14: Positionen der beiden einbetonierten Ultraschallgeber in den Testkörpern. Links: Projektion in die X/Z-Ebene, rechts: Projektion in die X/Y-Ebene.

11.4.2 Parameterbasierte Auswertung

Die Auswertung der künstlich angeregten Ereignisse erfolgt analog zur Auswertung in Kap. 8. Als Erstes wird die Schallemissionsaktivität betrachtet [Abb. 11-15 links]. Hierbei zeigt sich, dass die künstliche Anregung in regelmäßigem Abstand erfolgte und auch über einen großen Zeitbereich messtechnisch erfasst wurde. Im Zeitbereich von ca. 4 bis 8 min konnten die künstlichen Ereignisse jedoch nicht sauber erfasst werden. In diesem Zeitbereich traten bei dem Experiment aber auch die meisten natürlichen Ereignisse auf [Abb. 11-15 rechts]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Erfassung der künstlich angeregten Ereignisse durch diese hohe Aktivität natürlicher Ereignisse überlagert wurde und somit nicht erfasst werden konnte.

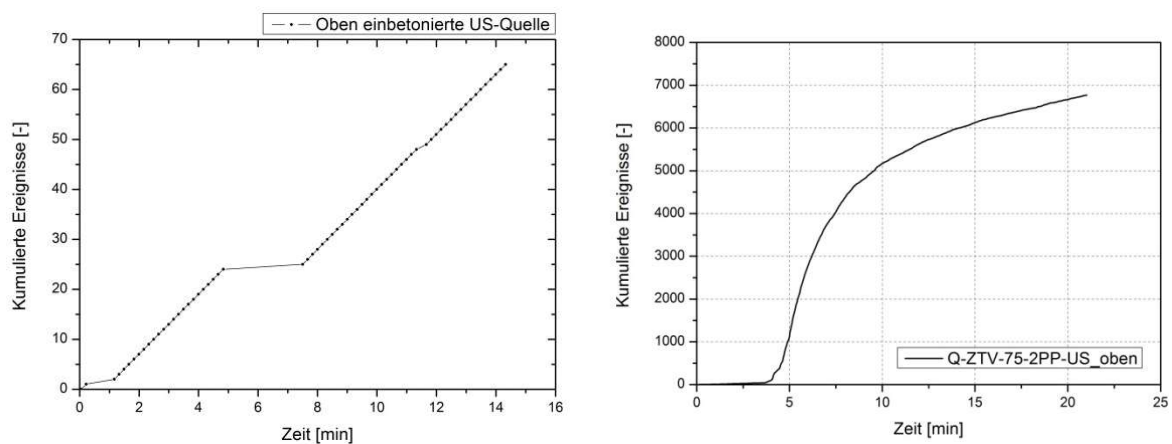


Abb. 11-15: Schallemissionsaktivität für das Experiment Q-ZTV-75-2PP-US_oben. Links: Schallemissionsaktivität der künstlich angeregten Ereignisse, Rechts: Schallemissionsaktivität aller Ereignisse.

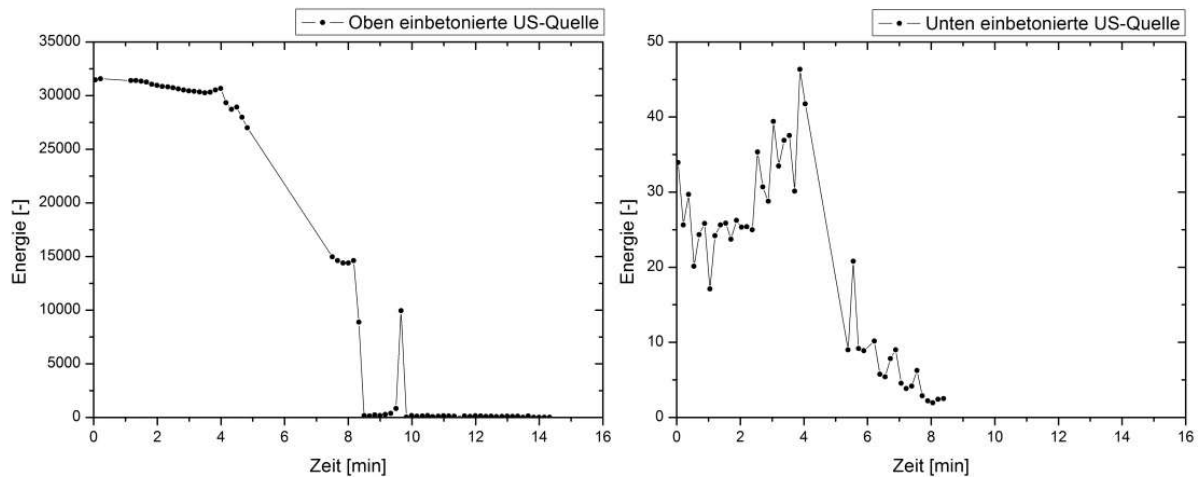


Abb. 11-16: Darstellung der Energieentwicklung über der Zeit für die künstlich angeregten Ereignisse der beiden einbetonierten Sensoren. Links: Q-ZTV-75-2PP-US_oben und rechts: Q-ZTV-75-2PP-US_unten.

Bei der Betrachtung der Energie über der Versuchsdauer [Abb. 11-16] fällt zunächst der Energieunterschied zwischen den Ergebnissen des oben und des unten einbetonierten Sensors auf. Der unten einbetonierte Sensor zeigt von Beginn an eine deutlich geringere Energie. Dies ist primär auf die Verwendung von unterschiedlich großen Piezokristallen für die beiden Sensoren

zurückzuführen. Der oben einbetonierte Sensor war deutlich größer, als der Sensor im unteren Bereich und konnte dadurch mehr Energie in den Testkörper abgeben. Aufgrund der geringen Energie des unten einbetonierten Sensors werden die folgenden Auswertungen auf das Experiment mit dem oben einbetonierten Sensor beschränkt, da die Effekte bei einer höheren Energie deutlicher zu erkennen sind.

Bei beiden Sensoren ist jedoch zu erkennen, dass die Energie in einem Zeitbereich von 4 bis 8 min merklich abnimmt [Abb. 11-16]. Dies ist der gleiche Zeitbereich, in dem aufgrund der verstärkt auftretenden natürlichen Ereignisse eine Aufzeichnung der künstlich angeregten Ereignisse nur schwer möglich war. Betrachtet man nun die Darstellung der Energie aller Ereignisse (künstliche und natürliche) über den Versuchsverlauf [Abb. 11-17], wird deutlich, dass der Abfall der Energie der künstlichen Ereignisse exakt zu dem Zeitpunkt beginnt an dem die ersten natürlichen Ereignisse auftreten. Es ist daher davon auszugehen, dass die Energieverringerng direkt mit der beginnenden Schädigung des Betons zusammenhängt. Durch die Darstellung der Energie über der Temperatur des in 2 cm Abstand zum Brandraum einbetonierten Temperaturfühlers [Abb. 11-18] wird darüber hinaus deutlich, dass sich diese Effekte auch im Bereich einer Temperatur im Inneren des Testkörpers von 100°C zeigen. Mit der Abnahme der Energie, die noch am Sensor ankommt, kann eine verminderte Lokalisierungsqualität verbunden sein. Die Lokalisierungsqualität ist nach Schechinger [2005] mit der Genauigkeit der Ersteinsatzbestimmung verbunden. Diese wiederum hängt von der Signalqualität ab, die sich unter anderem aus dem Signal-Rausch-Verhältnis ergibt.

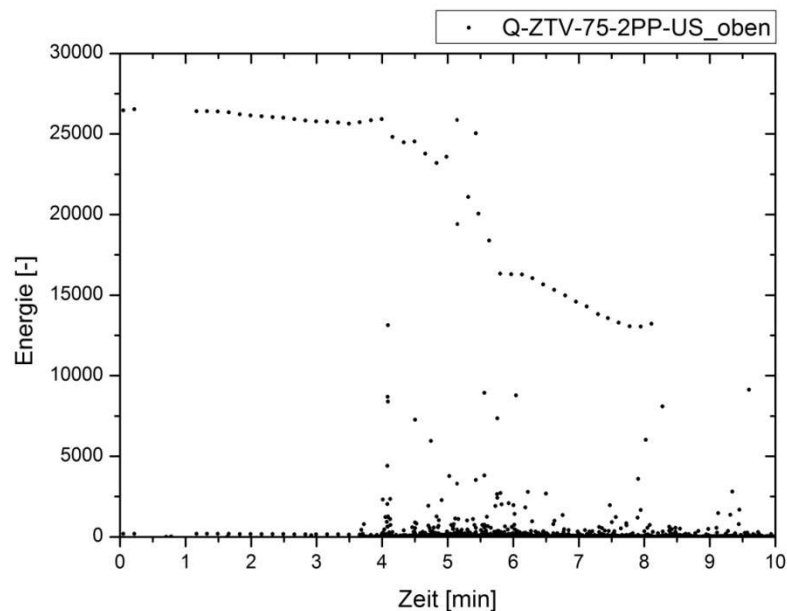


Abb. 11-17: Darstellung der von den Schallemissionssensoren erfassten Energie aller Ereignisse die im Experiment Q-ZTV-75-2PP-US_oben aufgezeichnet wurden. Bei den Ereignissen mit höherer Energie handelt es sich um die künstliche Quelle, die Ereignisse mit niedriger Energie sind auf die Schädigung des Testkörpers zurückzuführen.

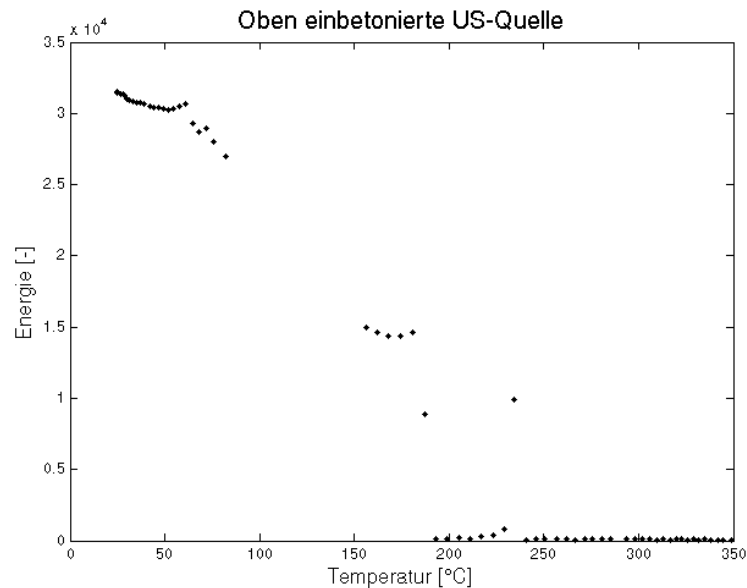


Abb. 11-18: Von den Schallemissionssensoren aufgezeichnete Energie des oben einbetonierten Ultraschallsensors im Experiment Q-ZTV-75-2PP-US_oben, bezogen auf die Temperatur eines einbetonierten Temperaturmessfühlers.

11.4.3 Lokalisierung

Vor Versuchsbeginn wurden mehrere künstliche Ereignisse ausgelöst, um zu überprüfen, ob es überhaupt möglich ist, die künstliche Schallemissionsquelle zu lokalisieren. Die Ergebnisse lagen bei allen Ereignissen mit einer ausreichenden Genauigkeit auf der bekannten Position des einbetonierten Ultraschallgebers.

Daraufhin wurden die Testkörper auf einem Brandofen geprüft (Q-ZTV-75-2PP-US_oben und Q-ZTV-75-2PP-US_unten). Die Ultraschallimpulse aus den künstlichen Quellen wurden in regelmäßigen Abständen Ultraschallimpulse ausgelöst und anschließend lokalisiert. Die Ergebnisse der Lokalisierung während des Brandversuchs sind Abb. 11-19 und Abb. 11-20 zu entnehmen.

Zunächst wurden einige Ereignisse in der Nähe des tatsächlichen Ursprungsortes lokalisiert. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um die Ereignisse mit höherer Energie zu Beginn des Experimentes [Abb. 11-16 links]. Obwohl sie im Bereich der bekannten Sensorposition lokalisiert wurden, unterliegen sie dennoch einer größeren Schwankung als die Ereignisse vor Versuchsbeginn. Besonders in Z-Richtung ist eine Abweichung zu beobachten. Diese Abweichung in Z-Richtung setzt sich bei den zeitlich später folgenden Ereignissen verstärkt fort. Bei diesen kommt noch eine deutliche Streuung in X- und die Y- Richtung hinzu. Die Qualität der Lokalisierungsergebnisse sinkt also mit zunehmender Versuchsdauer.

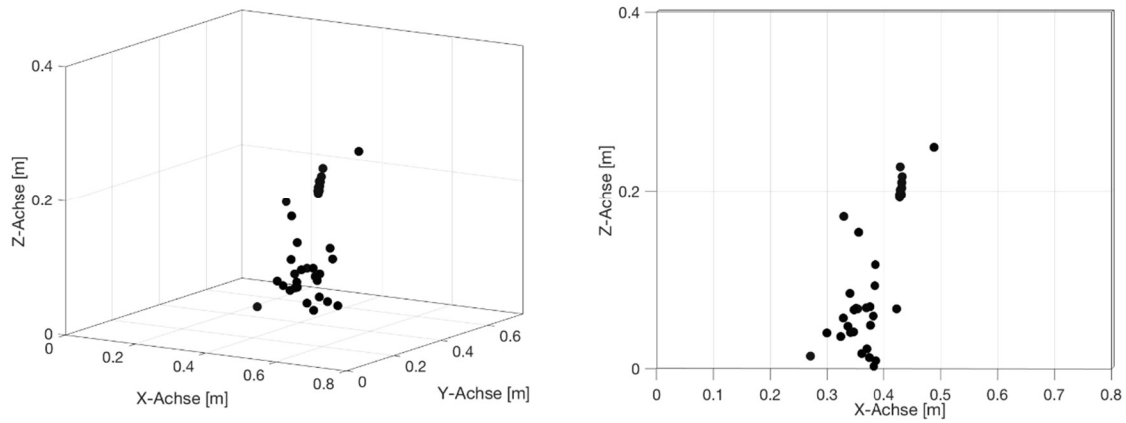


Abb. 11-19: Lokalisierung der künstlichen Quelle während der Brandbelastung beim Experimentes Q-ZTV-75-2PP-US_oben. 3D-Darstellung (links) und Projektion in die XZ-Ebene (rechts).

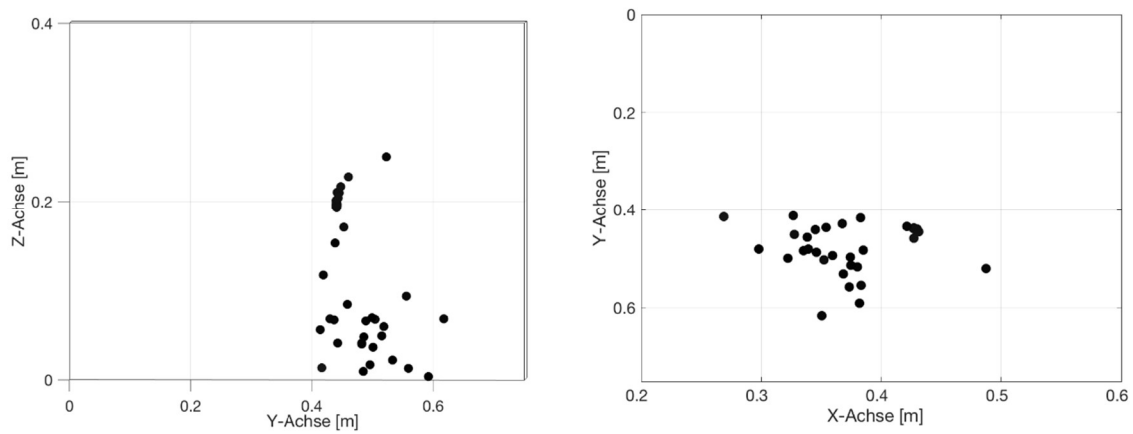


Abb. 11-20: Lokalisierung der künstlichen Quelle während der Brandbelastung beim Experimentes Q-ZTV-75-2PP-US_oben. Projektion in die YZ-Ebene (links) und in die XY-Ebene (rechts).

12 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Machbarkeit und die Grenzen von Messungen mit der Schallemissionsanalyse bei Brandprüfungen von Tunnelbeton untersucht. Übergeordnetes Ziel war es, wissenschaftliche Grundlagen für eine Weiterentwicklung des Messverfahrens in diesem speziellen Anwendungsbereich zu erarbeiten. Hierzu wurden sowohl Untersuchungen an kleineren Testkörpern, als auch aufwendige Brandprüfungen auf Großbrandöfen durchgeführt. Es waren zunächst umfangreiche Untersuchungen im Zusammenhang mit der Adaption der Messtechnik an die bestehenden Prüföfen notwendig. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurden grundsätzlich mindestens zwei Brandexperimente mit jeweils identischem Versuchsaufbau, aber veränderter Betonrezeptur durchgeführt. Darüber hinaus wurden bei jedem Brandexperiment mehrere Messgeräte für die Schallemissionsanalyse verwendet. Somit konnten diese Datensätze direkt miteinander verglichen werden. Die aufgezeichneten Messdaten wurden mit verschiedenen Auswerte- und Analyseverfahren untersucht. Ein Fokus lag hier auf der signalbasierten Aufzeichnung und einer anschließenden parameterbasierten Auswertung. Schwerpunkt der Arbeit waren die Untersuchungen zur Lokalisierungsrechnung. Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden zusammengefasst:

- Die Adaption der sensiblen Messtechnik an die Prüföfen ist aufwendig und hat einen großen Einfluss auf den Messerfolg. Hierfür wurden erfolgreich Verfahren entwickelt und getestet. Man benötigt dennoch nach wie vor erfahrenes Personal für die Umsetzung, da die Anwendung der Schallemissionsanalyse als sehr komplex einzustufen ist.
- Bei Brandprüfungen von Beton treten in kurzer Zeit eine sehr große Zahl an Schallemissionsereignissen auf. Um diese erfassen und verarbeiten zu können, sind hinsichtlich Hardware und Software besondere Anforderungen gegeben. Hierfür wurden Lösungen erarbeitet.
- Durch eine Vielzahl an Forschungsvorhaben standen zu Beginn dieser Arbeit umfangreiche Auswertelgorithmen und -programme zur Verfügung. Die unterschiedlichen Dateiformate verschiedener Messsysteme sowie Auswerteprogramme machten eine ständige Dateiumwandlung notwendig. Die Auswertung wurde dadurch zeit- und rechenaufwendig und war sehr unübersichtlich. Im Rahmen dieser Arbeit konnte nun ein MATLAB-basiertes Auswertetool geschaffen werden, das als Grundgerüst dient. Die Implementierung der Dateiformate unterschiedlicher Messsysteme ist hierdurch einfacher möglich. Darüber hinaus können verschiedene Auswertetools in Modulform angehängt werden, wodurch auch eine Erweiterung jederzeit leicht möglich ist.
- Die signalbasierte Aufzeichnung mit einer anschließenden Offline-Auswertung einzelner Parameter generierte hervorragende Messergebnisse. Durch eine Verbindung mehrerer Parameter konnten Aussagekraft und Qualität der Ergebnisse noch deutlich verbessert werden. Eine direkte parameterbasierte Aufzeichnung und Online-Auswertung, ohne die Möglichkeit auf die Rohdaten zurückzugreifen, muss im Hinblick auf das

Messergebnis als kritisch bewertet werden. Die Gefahr von Fehlinterpretationen wäre sehr hoch.

- Bei den Experimenten konnte der Beginn von Abplatzereignissen einer Testkörpertemperatur von ca. 100°C zugeordnet werden. Somit konnte durch eine messtechnische Analyse der Zusammenhang zwischen der Wasserdampfbildung im Beton und dem Auftreten von Abplatzungen nachgewiesen werden.
- Es konnte gezeigt werden, dass eine Lokalisierung von Schallemissionsereignissen bei Brandversuchen an Beton möglich ist. Schwierigkeiten und Grenzen ergeben sich zum einen durch Veränderungen der Schallgeschwindigkeit im Testkörper, die große Anzahl an zeitlich schnell aufeinander folgenden Ereignissen, sowie aufgrund des zunehmenden Schädigungsgrades der Testkörper. Wenn diese Schädigung versuchsbedingt große Bereiche des Testkörpervolumens betrifft, ist es bereits nach wenigen Minuten nicht mehr möglich, belastbare Lokalisierungsergebnisse zu erhalten. Bei Testkörpern, die nur in einem kleinen Bereich geschädigt werden, sind die Ergebnisse der Lokalisierungsberechnungen über längeren Zeitraum aussagekräftig.
- Schallemissionsmessungen sind grundsätzlich schwer zu kontrollieren. Dies liegt unter anderem daran, dass die Messungen nicht direkt reproduzierbar sind. Eine Kombination mehrere Informationsquellen ist für die Aussagesicherheit daher von hoher Relevanz.
- Sehr sinnvoll ist ein Vergleich der Ergebnisse der Schallemissionsanalyse mit anderen Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung, sowie mit Computersimulationen, welche die Temperatur oder das Abplatzverhalten nachzuvollziehen helfen. Dies zeigt der Vergleich von experimentellen Erkenntnissen, mit den numerischen Ergebnissen von Bošnjak [2014], die im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung“ (GR 1664/7-1) entstanden [Kap. 8.4.2].
- Die Untersuchungen ergeben, dass sich die Schallemissionsanalyse grundsätzlich für diese spezielle Anwendung eignet. Durch die Aufzeichnungen kann die Schädigung zeitlich über den Versuchsverlauf nachvollzogen werden. Die Messergebnisse sind plausibel und geben den Schädigungsverlauf im Beton auch bei unterschiedlichen Versuchsaufbauten wieder. Gerade bei einem direkten Vergleich zwischen mehreren Experimenten, mit gezielt angepassten Versuchsparametern, sind die Ergebnisse der Schallemissionsauswertung sehr aussagekräftig. Mit der Schallemissionsanalyse steht somit ein brauchbares Messwerkzeug zur Verfügung, um Tunnelbrandprüfungen an Beton zu unterstützen

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich verschiedenste Schlussfolgerungen für andere Anwendungen und weiterführende Untersuchungen, auf die an dieser Stelle hingewiesen wird.

Hinsichtlich der betontechnologischen Werkstoffforschung im Zusammenhang mit der Brandbeständigkeit liegt mit der Schallemissionsanalyse eine Messmethode vor, deren Verwendung bei Untersuchungen in Betracht gezogen werden sollte. Da der Fokus der Arbeit auf der Anwendbarkeit und den Grenzen der Schallemissionsanalyse als Messtechnik lag, konnten nur vereinzelt betontechnologische Fragestellungen untersucht werden. Hierfür wären weitere umfangreiche, gezielte Parameterstudien hilfreich. Beispielsweise wurde der Unterschied von Rezepturen mit und ohne PP-Fasern untersucht. Interessant wäre es auch, verschiedene Experimente mit verschiedenem bzw. abgestuften PP-Fasergehalt durchzuführen. Ein weiterer interessanter Themenbereich wären Untersuchungen zum Einfluss von Stahlfasern auf das Abplatzverhalten von Beton.

Zur Unterstützung und Prüfung der Ergebnisse aus den Messungen mit der Schallemissionsanalyse wurden weitere Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt. Zur Anwendung kamen beispielsweise Ultraschall, Thermographie, Impakt-Echo und Feuchtemessungen mit Mikrowellen. Diese bieten für Anwendungen im Bereich von Branduntersuchungen an Beton ein großes Potential, das durch die Konzentration auf die Schallemissionsanalyse in dieser Arbeit bei Weitem noch nicht ausgeschöpft wurde. Hier wären vertiefte Untersuchungen als sehr lohnend anzusehen.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung“ (GR 1664/7-1) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart, sowie des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projektes „Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Betonabplatzungen bei Brandversuchen“, in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig). In dieser Zeit wurden am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München unter Prof. Dr.-Ing. Christian Große umfangreiche Untersuchungen zum Einsatz der Schallemissionsanalyse an verschiedenen Anwendungen durchgeführt. Die Arbeit von Moser [2014] beschäftigte sich im DFG-Forschungsprojektes „MEMIN“ mit der Beobachtung von Schädigungsprozessen in Gestein, bei welchen dieselbe Messtechnik, wenn auch andere Analyseverfahren eingesetzt wurden. Als weitere Spezialanwendungen wurde die Einsetzbarkeit von Schallemissionsmessungen bei Bruchprozessen an Oberschenkelknochen [Malm 2012] und Pulloutversuchen an Verbunddübeln [Raith 2013] untersucht. Darüber hinaus wurden gemeinsame Projekte mit anderen Forschungseinrichtungen durchgeführt, in denen ebenfalls an Themen der Schallemissionsanalyse gearbeitet wurde. Zu nennen sind hier die Arbeiten von Schumacher [2011], McLaskey [2011] und Kocur [2012].

Die vorhandenen Messgeräte und Datenanalysetools wurden weiterentwickelt und optimiert. Sie werden bereits heute im Rahmen von neuen Forschungsvorhaben verwendet. Zur Anwendung kommen sie beispielsweise bei der Fortführung des DFG-Projektes „MEMIN“, sowie dem von der EU geförderten Forschungsvorhaben „healCON“ bei der Untersuchung von selbstheilenden Betonen.

13 Literaturverzeichnis

Alonso, M. C.; Flor-Laguna, V. & Sanchez, M. (2013): *Microstructural response of polypropylene fibres at high temperature to protect concrete from spalling*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 7 p.

Bancroft, S. (1985): *An algebraic Solution of the GPS Equations*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems

Bazant, Z.P. (1997): *Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete*, Proceeding of the international workshop on fire performance of high strength concrete, NIST Gaithersburg

Benedetti, A. (1998): *On the ultrasonic pulse propagation into fire-damaged concrete*, ACI structural journal, 1998, pp. 257-271

Blofeld, J. (2009): *Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 67, ISBN 978-3-86509-935-8, 86 p.

Bošnjak, J. (2014): *Explosive spalling and permeability of high performance concrete under fire – numerical and experimental investigations*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart.

Budelmann, A. (1987): *Zum Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten*, Dissertation, Fachbereich Bauingenieur und Vermessungswesen, Technische Universität Braunschweig

Buland, R. (1976): *The mechanics of locating earthquakes*. Journal article, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66 No 1, pp. 173-187

Colombo, M. & Felicetti, R. (2007): *New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures*. Fire Safety Journal 42 (2007) pp. 461-472

Corpas, F. A.; González, B.; Gómez, L.; Rosa, F. & Figueroa, J. M. (2013): *The fire resistance of concrete with polypropylene fibers*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 8 p.

Dehn, F.; Nause, P. & Fischkandl, H. (2008): *Brandresistenter Beton für den Tunnelbau*. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 4, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, pp. 271-277

Dehn, F.; Hauswaldt S. & Juknat, M. (2009): *Grundsätzliche Überlegungen zur Brandprüfung von Tunnelbetonbauteilen*. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 12, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

Dehn, F.; Nause, P.; Juknat, M.; Orgass, M. & König, A. (2010): *Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 73, ISBN 978-3-86918-063-2, 145 p.

Dehn, F. & Schmidt, J. (2013): *Brandschutztechnische Bauteilprüfungen für die Diagnose werkstofflicher und statischer Aspekte des Tragvermögens*. Der Prüferingenieur, Nr. 43, November 2013, ISSN: 1430-9084, pp. 18-23

Drouillard, T. F. (1996): *A history of acoustic emission*. Journal of Acoustic Emission, Vol. 14, No. 1; Acoustic Emission Working Group AEWG; Los Angeles 1996; pp 1-34

Eden, K. & Gebhard, H. (2011): *Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik*. ISBN 978-3-8348-1600-9

Ehm, C. (1986): *Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton unter zweiachsialer Beanspruchung und hohen Temperaturen*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig

Felicetti, R. (2005): *New NDT techniques for the assessment of fire damaged RC structures*. Technical Report, Dipartimento di Ingegneria Strutturale – Politecnico di Milano

Felicetti, R (2006): *The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete*. Cem Concr Compos 28(4): pp. 321–329

Felicetti, R. & Lo Monte, F. (2013): *Concrete spalling: Interaction between tensile behaviour and pore pressure during heating*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 9 p.

Finck, F. (2005): *Untersuchung von Bruchprozessen in Beton mit Hilfe der Schallemissionsanalyse*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

Fouad, N & Richter, T. (2012): *Leitfaden Thermographie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*, Fraunhofer Irb Verlag, Auflage 4

Fricker, S. (2009): *Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken*. Dissertation, ETH Zürich

Geiger, L. (1910): *Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten*, Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch Physikalische Klasse, Heft 1, Göttingen, pp. 281-298

Gibson A. & Popovics J. (2005): *Lamb wave basis for impact-echo method analysis*. Journal of Engineering Mechanics, Volume 131 Issue 4, pp. 1–6.

Glatzl, J.; Nischer, P.; Steigenberger, J. & Wagner, O. (2004): *PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit*. Zement+Betton, 3/2004, pp. 24-31

Göller, A. (1992): *Mikrowellen-Feuchtemessung unter Einbeziehung wichtiger Materialparameter - Ein verbessertes Konzept der Signalauswertung*. Dissertation, Fakultät für Technische Wissenschaften, Technische Universität Ilmenau

Göller, A. (2008): *Mobiler Mikrowellenscanner MOIST SCAN - Eine neue Ära der Bauwerksdiagnose*. Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 7 p.

Groschup R. & Große C. (2015): *MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo*. Journal article, Sensors 2015, Volume 15 Issue 7

Große, C. (1996): *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

Große, C. & Weiler, B. (1998): *Analyse von Vielfachreflexionen nach mechanischer Pulsanregung*. Brücken und Ingenieurbau Heft B 18, 1998

Große C. & Reinhardt H.-W. (1999): *Schallemissionsquellen automatisch lokalisieren*, MP Materialprüfung, Jahrgang 41, 1999, Carl Hanser Verlag, München

Große, C. (2000): *WinPecker Version 1.2: Instruction Manual*, University of Stuttgart

Große, C. (2004): *Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen*. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart

Große, C. & Ohtsu, M. (2008): *Acoustic Emission Testing*. Springer, ISBN 978-3-540-69895-1, 415 p., Heidelberg

Hager, I. & Tracz, T. (2009): *The impact of amount and length of fibrillated polypropylene fibres on the properties of hpc exposed to high temperature*. Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 9" A.M. Brandt, J.Olek and I.H. Marshall, eds., Warsaw, October 25-28, 2009, pp. 63-70

Heo, Y.; Sanjayan, J. G.; Han, C. & Han, M. (2010): *Synergistic effect of combined fibers for spalling protection of concrete in fire*. Cement and Concrete Research, 40 (2010), pp. 1547-1554

Horvath, J. (2003): *Brandverhalten von Hochleistungsbetonen*. Dissertation, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Technische Universität Wien

Horvath, J., Schneider, U. & Diederichs, U. (2004): *Brandverhalten von Hochleistungsbetonen*. Schriftenreihe Institut für Baustofflehre Bauphysik und Brandschutz, Heft 11, 1. Auflage 2004, Technische Universität Wien, ISBN 3-900576-00-9

Huisman, S. (2010): *Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung*. Dissertation, Institut für Hochbau und Technologie, Technische Universität Wien

Jansson, R. (2013): *Fire spalling of concrete, Theoretical and Experimental Studies*. Dissertation, KTH Royal Institute of Technology in Stockholm, Schweden

Jansson, R. & Boström, L. (2010): *The Influence of Pressure in the Pore System on fire Spalling of Concrete*. Journal article, Fire Technology, Vol. 46 (2010), Springer Science + Business Media, pp. 217-230

Jansson, R. & Boström, L. (2013): *Fire spalling in concrete – The moisture effect, part II*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 7 p.

Jooss, M. & Reinhardt, H.-W. (2002): *Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature*. Cement and Concrete Research, 32 (2002), pp. 1497-1504

Kaiser, J. (1950): *Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. Dissertation, Technische Hochschule München, 117 p.

Kalifa, P., Menneteau, F.-D. & Quenard, D. (2000): *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, cement and concrete Research 30, pp. 1915-1927

Kalifa, P., Chéné, G. & Gallé, C. (2001): *High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. Form spalling to microstructure*, cement and concrete research 31, pp. 1487-1499

Kaundinya, I., Dehn, F., Nause, P., Juknat, M. (2009): *Fire tests at large scaled specimens of ZTV-ING-conform concrete for inner shells of road tunnels*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 1st International workshop 2009, Leipzig

Klingsch, E.; Frangi, A. & Fontana, M. (2010): *Experimental analysis on spalling of high-strength concrete*. Conference paper, 3rd fib International Congress, Washington D.C., 21 p.

Khoury G.A. (2008): *Polypropylen fibres in heated concrete, Part 2: Pressure relief mechanism and modelling criteria*, Magazin of concrete research, Jg. 60, Nr. 3 pp. 189-204

Kocur, G. K. (2012): *Time reverse modelling of acoustic emissions in structural concrete*. Dissertation, ETH Zürich

Kolšek, J.; Saje, M.; Planinc, I. & Hozjan, T. (2013): *Influence of moisture on fire resistance of side-plated RC beams*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 8 p.

Köppel, S. (2002): *Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken*. Dissertation, ETH Zürich

Kordina, K. & Schneider, U. (1975): *Über das Verhalten von Beton unter hohen Temperaturen, Betonwerk und Fertigteil-Technik, 41. Jahrgang, Heft 12. Bauverlag GmbH Wiesbaden, pp. 572-582*

Kordina, K. und Meyer-Ottens, C. (1999): *Beton-Brandschutz-Handbuch*. VBT Verlag Bau und Technik; Auflage: 2. Düsseldorf, Januar 1999

Korsun, V., Korsun, A. & Volkov, A. (2013): *Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 8 p.

Korten, A. & Wetzig, V. (2013): *Spalling of concrete – influence of porosity and specimen size and its critical factors regarding safety*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 7 p.

Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H. (1990): *Ultrasonic testing of materials*, Springer Verlag Heidelberg, ISBN: 978-3-662-10682-2

Kurz, J., Große, C. & Reinhardt, H.-W. (2005): *Strategies for reliable automatic onset picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete*, Ultrasonics Volume 43, Issue 7, 2005 pp. 538-546

Kurz, J. H. (2006): *Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

Kusterle, W. et al. (2004): *Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Österreich, Straßenforschung und Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG, Heft 544

Li, M.; Kao, H. & Quian, C. (2008): *Degradation of permeability resistance of high strength concrete after combustion*. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 08/2008; 2(3), pp. 281-287

Lin, J.-M. & Sansalone M. (1996): *Impact-Echo studies of interfacial bond quality in concrete: Part I – effects of unbounded fraction of area*, ACI Materials Journal 93, 1996

Lun, H. & Lackner, R. (2013): *Permeability of concrete under thermal and compressive stress influence; an experimental study*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire

exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 2 p.

Maluk, C.; Bisby, L. & Terrasi, G. (2013): *Effects of polypropylene fibre type on occurrence of heat-induced concrete spalling*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 8 p.

Mazzucco, G.; Majorana, C.; Salomoni, V. & Xotta, G. (2013): *Aggregate behaviour in concrete materials under high temperature conditions*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 8 p.

McLaskey, G. C. (2011): *Stress Wave Source Characterisation: Impact, Fracture, and Sliding Friction*. PhD thesis, University of California, Berkeley

McLaskey, G. C. & Glaser, S. D. (2013): *Absolute calibration of an acoustic emission sensor*. Nondestructive testing of Materials and structures, O. Büyüköztürk et al. (eds.), RILEM Book-series 6, DOI 10.1007/978-94-007-0723-8_9, RILEM 2013, pp. 67-73

Meyer-Ottens, C. (1972): *Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchungen*, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Meyer-Ottens, C. (1974): *Abplatzversuche an Prüfkörpern aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton bei verschiedenen Temperaturbeanspruchungen*, Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 241, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Meyer-Ottens, C. (1975): *Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 248, Berlin

Moser, D. (2014): *Charakterisierung von Schädigungen in Gesteinen bei Impactprozessen mit zerstörungsfreier Prüfung*, Dissertation, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Mueller, K.; Kurama, Y.; McGinnis, M. & Lisk, M. (2013): *Design and performance of a skid-mounted portable compartment fire gas furnace and monitoring system*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 9 p.

Niry, R., R.; Beaucour, A. L.; Hebert, R.; Noumowé, A.; Ledésert, B. & Bodet, R. (2013): *Thermal stability of different siliceous and calcareous aggregates subjected to high temperature*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 9 p.

Nischer, P. & Wagner, O. (2005): *Beton erhöhter Brandbeständigkeit mit Polypropylenfasern*. Beton - und Stahlbetonbau 100 (2005, Heft 7) Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, pp. 599-604

Oncescu, L. & Große, C. (1996): *Hypo^{AE} – A program for the localization of hypocenters of acoustic emissions*. Handbuch zur Software Vers. 2.0, 15 p.

Paliga, K. (2003): *Entstehung und Vermeidung von Betonabplatzungen bei Tunnelbränden*, Dissertation, Fachbereich Baingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig

Pistol, K. (2016): *Wirkungsweise von Polypropylen-Fasern in brandbeanspruchtem Hochleistungsbeton*, Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Rath, A. & Haberland, C. (2004): *Baulicher Brandschutz unterirdischer Verkehrsbauwerke - Herstellung und Einsatz von PP-Faserbeton für wasserdichte Innenschalen*. Zement+Beton, 3/2004, pp. 18-23

Reinhardt, H.-W. (2007): *Echo-Verfahren zur zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen*, Beton-Kalender 2007, Ernst & Sohn, ISBN: 978-3-433-01833-0

Reinhardt, H.-W., Große C., Kurz J. (2008): *Localization and mode determination of fracture events by acoustic emission*, acoustic Emission and Critical Phenomena, Carpinteri & Lacidogna (eds), ISBN 978-0-415-45082-9, Taylor & Francis Group, London

Reinhardt, H.-W. & Jooss, M. (2003): *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width*. Cement and Concrete Research, 33 (2003), pp. 981-985

Rinder, T. & Reinhardt, H.-W. (2000): *Bestimmung der Druckfestigkeit von hochfestem Beton mittels Rückprallhammer*, Beton- und Stahlbetonbau 95(2000) Nr.6, pp.330-335.

Ringger, T.; Höfflin, L.; Dill-Langer, G. & Aicher, S. (2003): *Measurements on the acoustic anisotropy of soft and hard wood; effects on source location*. Otto-Graf-Journal, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMIPA), Vol.14, 2003, pp. 231-252

Robert, F.; Collignon, C. & Scalliet, M. (2013): *Large scale fire test on tunnel segment: Real boundary conditions in order to evaluate spalling sensitivity and fire resistance*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 7 p.

Rosenbusch, N. (2003): *Entwicklung eines Programmes zur Bestimmung von Ersteinsätzen und Amplituden sowie zur 3D-Lokalisierung von Schallemissionen*, Diplomarbeit, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 94 p.

Rosenbusch, N., Kurz, J. & Finck, F. (2004): *POLAR^{AE} – Operation Manual*, Handbuch zur Software, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 20 p.

Sansalone, M. (1997): *Impact-Echo: The Complete Story*, ACI Structural Journal 94 (1997) 6, pp. 777-786

Santos, C. C. & Rodrigues, J. P. C. (2013): *Compressive strength at high temperatures of a concrete made with recycled tire textile and steel fibers*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 9 p.

Schechinger, B. (2005): *Schallemissionsanalyse als Überwachungsinstrument für Schädigung in Stahlbeton*. Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich

Schlüter, A. (2004): *Baulicher Brandschutz für Tunnelbauwerke: Richtlinien, Vorgaben, die Realität und geeignete Maßnahmen*. Tunnel, 7/2004, pp. 22-33

Schneider, U. (1979): *Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen*, Habilitationsschrift, Technische Universität Braunschweig

Schneider, U. (1982): *Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 337, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Schumacher, T. & Straub, D. (2011): *A Bayesian acoustic emission source location algorithm: Extended model*. Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering - Faber, Köhler & Nishijima (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-66986-3, pp. 91-98

Shearer, P. M. (1999): *Introduction to seismology*. Cambridge University Press, ISBN 978-521-88210-1, 396

Sideris, K. K. & Manita, P. (2013): *Influence of length and dosage of polypropylene fibres on the spalling tendency and the residual properties of self-compacting concrete after heated at elevated temperatures*. Conference proceedings, Concrete spalling due to fire exposure, Proceedings of the 3rd International workshop 2013, Paris, ISBN 978-2-7598-1074-1, 7 p.

SZ (2010): *Schwere Tunnelunfälle seit 1971*. Süddeutsche Zeitung 17.05. 2010.

Tan, G.L., Wolsink, G.M., Hoeksma J., Both, C. & van de Haar, P.W. (2000): *Fire protection for Tunnels*. TNO-report 1998-CBV-R1161 (rev. 1), October 2000

Torrent, R. (1999): *The gas-permeability of high-performance concretes: Site an laboratory tests*. High-Performance Concrete., Performance & Quality of Concrete Structures, American concrete institute ACI SP-186, Paper 17, pp. 291-308

Walter, D. (1999): *Der Neubau von Einröhren-Tunnels ist nicht zu verantworten*, PRO BAHN Zeitung 3/99: Gefahr im Tunnel

Waubke, N.V. (1973): *Brandverhalten von Bauteilen*, Schriftenreihe des Sonderforschungsbereiches 148, Heft 2, TU Braunschweig

Weiler, B. (2000): *Zerstörungsfreie Untersuchung von Stahlfaserbeton*. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen Universität Stuttgart

Wiggenhauser, H. (2004): *Impact-Echo*, in Bauphysikkalender, Ernst & Sohn, Berlin 2004, pp. 358-365

Wohlgemuth, D. (2013): *Feuer legen im Dienst der Wissenschaft*. Leipziger Volkszeitung 23.03.2013

Normen und Richtlinien:

ASTM E976: *Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response*, ASTM Standards, 2015

BMVBW: *Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen*, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2001

DGZfP-B-4: *Merkblatt B-4, Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile*. DGZfP-Ausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (AB), Unterausschuss Ultraschallprüfungen, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin, 1999

DIN 1045: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2001

DIN 1048: *Prüfverfahren für Beton*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1991

DIN 4102: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1998

DIN EN 1991-1-2: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*, Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010

DIN EN 1992-1-2: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*, Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010

DIN EN 12504-2:2012-12: *Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung - Bestimmung der Rückprallzahl*; Deutsche Fassung EN 12504-2:2012. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2012

DIN EN 13791 /A20:2017-02: *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2017

DGZfP (1991) SE-3: *Richtlinie zur Charakterisierung des Schallemissions-Prüfgeräts im Labor*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berlin 1991

EBA-Richtlinie: *Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln*, Ausgabe 1, 1997 Eisenbahn-Bundesamt, Bonn

RABT: *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln*. Ausgabe 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Köln

Richtlinienreihe 853 der DB NetzAG: *Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten*, DB Netz AG Frankfurt, 2003

ZTV-ING: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5: Tunnelbau*, Stand 2012/12, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

ZTV-K: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten*. Ausgabe 1996, Bundesministerium für Verkehr

ZTV-Tunnel: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau und den Betrieb von Straßentunneln*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

www.mfpa-leipzig.de: Webseite der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen mbH (MFPA Leipzig GmbH)

Betreute Arbeiten

Andreisek, G. (2012): *Einbetonierte Ultraschallgeber zur Kalibrierung von Messsystemen für die Schallemissionsanalyse*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Malm, F. (2012): *Schallemissionsanalyse am humanen Femur*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Meier, N. (2012): *Ultraschallmessungen an Beton unter Brandbeanspruchung durch Einsatz des FreshCon-Messsystems*. Studienarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Krapp, M. J. (2011): *Thermographie zur Beobachtung des Abplatzverhaltens von Beton unter Brandbeanspruchung.* Studienarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Krapp, M. J. (2012): *Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung.* master's thesis, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Raith, M. (2013): *Schallemissionsanalyse bei Pulloutexperimenten an Verbunddübeln.* Masterarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Wegener, U. (2013): *Lokalisierung von Abplatzungen aufgrund von Brandeinwirkungen an kleinen Probekörpern.* Studienarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Zhang, D. (2011): *Ultraschallmessungen an Probekörpern die durch Brandeinwirkung geschädigt wurden.* Studienarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München

Eigene Veröffentlichungen

Große, C.; Richter, R. & Ožbolt, J. (2013): *Combined acoustic emission and simulation approach to study fracture behavior of concrete under fire load.* Conference proceedings, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, Toledo, Spain, Eds. J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang, 8 p.

Große, C.; Richter, R. & Meier, N. (2012): *Acoustic emission analysis in media with rapidly changing Green's functions – experiments considering thermo-hydro-mechanical changes.* Conference proceedings, 54th AEWG, Princeton, USA

Große, C.; Richter, R.; Ožbolt, J.; Dehn, F. & Juknat, M. (2011): *Spalling of HPC evaluated by acoustic emission and numerical analysis.* Conference proceedings, Rilem Proc. PRO80 (Eds. E. Koenders, F. Dehn), Proc. 2nd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, ISBN 978-2-35158-118-6, pp. 157-163

Große, C.; Ožbolt, J.; Richter, R. & Periškić, G. (2010): *Acoustic emission analysis and thermo-hygro-mechanical model for concrete exposed to fire.* Journal article, J. of Acoustic Emission, 28 (2010), 16 p.

Juknat, M. & Richter, R. (2014): *Ergebniszusammenstellung zum BMWi-AiF-ZIM-Projekt: Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der Betonabplatzungen bei Brandversuchen.* Interner Projektbericht, Gesellschaft für Materialforschung

und Prüfanstalt für das Bauwesen Leipzig mpH und Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München (unveröffentlicht)

Radlmeier, M.; Richter, R. & Große, C. (2013): *Automatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von autoregressiven Pickerfunktionen*. Konferenzbeitrag, 19. Kolloquium Schallemission, Augsburg, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berichtsband BB 142-CD, Berlin, ISBN 978-3-940283-51-1, 9 p.

Richter, R. (2009): *Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung*. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Richter R., Juknat M., Grosse C., Dehn F. (2015): *Überwachung der zeitabhängigen Entwicklung des Abplatzverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung* Zeitschriftenartikel, Beton- und Stahlbetonbau 05/2015, Ernst & Sohn (Hrsg.), pp.349-354.

Richter R., M.Juknat, M.Raith, B.Portner, J.Schmidt, F.Dehn, Grosse C. (2014): *Methods and Limitations of Source-Localization in Concrete under Tunnel Fire Exposure*. Konferenzbeitrag, 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), Dresden

Richter R., F. Dehn, J. Schmidt, M. Juknat, Grosse C. (2013): *Measurement systems to detect the time-dependant development of concrete spalling under fire exposure*. Conference proceedings, 3rd International workshop on concrete spalling due to fire exposure, Paris

Richter R., F. Malm, Grosse C. (2013): *Lokalisierung von Schallemissionsereignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallemissionsverteilung*. Konferenzbeitrag, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, 19. Kolloquium Schallemission Augsburg, (2013).

Richter R., B. Portner, M. Raith, Grosse C. (2013): *Auswertemöglichkeiten und Darstellung von Schallemissionsdaten am Beispiel von Brandexperimenten*. Konferenzbeitrag, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung Jahrestagung 2013 Dresden, Berichtsband BB 141-CD (ISBN 978-3-940283-49-8), DGZfP, Berlin

Richter R., M. Krapp, Grosse C. (2013): *Anwendung von moderner Messtechnik zur Optimierung von Hochleistungsbeton für den Brandfall*. Zeitschriftenartikel, Messtechnik im Bauwesen 04/2013, Ernst & Sohn-Special (Hrsg.) pp. 75-79.

Richter R., M. Krapp, Grosse C. (2012): *Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines 4D-P-Wellen-Geschwindigkeitsmodelles von hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung*. Konferenzbeitrag, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DACH-Jahrestagung Graz, Berichtsband BB 136-CD (ISBN 978-3-940283-44-3), DGZfP, Berlin, 8 p.

Richter R., M. Krapp, Grosse C. (2011): *Schallemissionsanalyse und Thermographie zur Detektion des Abplatzverhaltens von hochfestem Beton im Realbrandversuch.* Bericht, www.ifrt.org, International Fire & Rescue Training GmbH

Richter R., M. Krapp, Grosse C. (2011): *Thermographie bei Brandversuchen an hochfestem Beton.* Posterbeitrag, Thermographie Kolloquium 2011, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berichtsband BB 130-CD (ISBN 978-3-940283-36-8), DGZfP, Berlin

Richter R., Grosse C., J. Ožbolt, J. Bosnjak (2011): *Schallemissionsanalyse und numerische Simulation zur Schädigungsanalyse bei Brandversuchen mit hochfestem Betonen.* Konferenzbeitrag, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Jahrestagung 2011 in Bremen, Berichtsband BB 127-CD (ISBN 978-3-940283-33-7), DGZfP, Berlin, 7 p.

Richter R., Grosse C. (2011): *Schallemissionsprüfungen zur Untersuchung des Abplatzverhaltens von HPC im Brandfall.* Konferenzbeitrag, 9. Münchener Baustoffseminar, Ultra-Hochfester Beton (UHPC) Stoffliche Grundlagen, Bemessung und Praxiseinsatz, Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Richter R., Grosse C. (2010): *Schallemissionsverfahren zur Schädigungsanalyse bei Beton unter Brandeinwirkung.* Konferenzbeitrag, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Jahrestagung 2010 in Erfurt, Berichtsband BB 122-CD (ISBN 978-3-940283-26-9), DGZfP, Berlin, 6 p.

14 Anhang

I.	Betonrezepturen.....	161
II.	Bilddokumentation geprüfter Testkörper.....	156
III.	Ergebnisse der Schallemissionsanalyse.....	163
IV.	Sensorpositionen und Testkörperabmessungen.....	180
V.	Ergebnisse der Temperaturmessungen.....	190
VI.	Bestimmung der Abplatztiefe mittels Tachymeter.....	208

I. Betonrezepturen

Tab. 14-1: Betonrezepturen Q-ETK-130-0PP und Q-ETK-120-1PP:

	Q-ETK-130-0PP [kg/m ³]	Q-ETK-120-1PP [kg/m ³]
Sand 0/2		
<i>Glück-München</i>	1077	1077
Basalt- Splitt 2/8	798	798
<i>Nordbayrische Basaltunion GmbH</i>		
Zement		
<i>CEM I 42,5 R-HS Schwenk Werk Allmendingen</i>	450	450
Silicastaub		
<i>Centrillit NC</i>	60	60
Wasser	130	130
Fließmittel		
<i>ViscoCrete Gold V20 C</i>	15.3	25.5
PP-Fasern		
<i>PB Eurofibre HPR (Baumhüter)</i>	0	1

Tab. 14-2: Betonrezepturen Q-ZTV-90-0PP und Q-ZTV-80-1PP:

	Q-ZTV-90-0PP [kg/m ³]	Q-ZTV-80-1PP [kg/m ³]
Quarzitischer Sand 0/2		
<i>Kleinpösna</i>	815	814
Basalt- Splitt 2/5		
<i>Mittelherwigsdorf</i>	182	181
Basalt- Splitt 5/8		
<i>Mittelherwigsdorf</i>	727	725
Zement		
<i>CEM I 42,5 R-HS Schwenk Zement KG</i>	500	500
Silicastaub		
<i>Silica Fume, Doral Fused Materials</i>	45	45
Wasser	185	185
Fließmittel		
<i>Woerment FM 787, BASF</i>	5	6
PP-Fasern		
<i>PB Eurofibre HPR (Baumhüter)</i>	0	1

Tab. 14-3: Betonrezeptur Q-ZTV-75-2PP-US:

	Q-ZTV-75-2PP-US [kg/m ³]
Sand 0/1	815
Splitt 2/8	182
Splitt 8/16	727
Zement <i>CEM I 52,5 R en</i>	300
Flugasche HKV; k=0,40	70
Wasser	149
Fließmittel <i>ViscoCrete 20 HE</i>	3,8
Stabilisierer ST3	1,5
PP-Fasern <i>PB EUROFIBER REF 506 (Baumhüter)</i> <i>2,8 dtex 6mm</i>	2

Tab. 14-4: Betonrezepturen Qk-ZTV-70-2PP und Qk-ZTV-70-1,5PP:

	Qk-ZTV-70-2PP [kg/m ³]	Qk-ZTV-70-1,5PP [kg/m ³]
Sand 0/2 <i>Rheinsand Welbers, Werk Geldern</i>	524,9	526,0
Kies 2/5 <i>Rheinkies Welbers, Werk Geldern</i>	689,1	690,6
Kies 8/16 <i>Rheinkies Welbers, Werk Geldern</i>	512,8	513,9
Zement <i>CEM I 42,5 R Schwenk Zement KG</i>	450	450
Wasser	166,5	166,5
Fließmittel <i>Woerment FM 787, BASF</i>	3,6	2,7
PP-Fasern <i>BELMIX BM6 (Länge 6 mm, Durchmesser 34 µm)</i>	2	1,5

II. Bilddokumentation geprüfter Testkörper




	<p>Q-ETK-130-0PP Testkörper 1-1</p>
	<p>Q-ETK-130-0PP Testkörper 1-2</p>
	<p>Q-ETK-130-0PP Testkörper 1-3</p>

Abb. 14-1: Q-ETK-130-0PP: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.




	<p>Q-ETK-120-1PP Testkörper 1-4</p>
	<p>Q-ETK-120-1PP Testkörper 1-5</p>
	<p>Q-ETK-120-1PP Testkörper 1-6</p>

Abb. 14-2: Q-ETK-120-1PP: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.




	<p>Q-ZTV-90-0PP Testkörper 2-1</p>
	<p>Q-ZTV-90-0PP Testkörper 2-2</p>
	<p>Q-ZTV-90-0PP Testkörper 2-3</p>

Abb. 14-3: Q-ZTV-90-0PP: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.

	<p>Q-ZTV-80-1PP Testkörper 2-4</p>
	<p>Q-ZTV-80-1PP Testkörper 2-5</p>
	<p>Q-ZTV-80-1PP Testkörper 2-6</p>

Abb. 14-4: Q-ZTV-80-1PP: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.

	<p>P-HC+K-65-1,5PP_IE Testkörper 3-1</p>
	<p>P-ZTV-70-0,9PP Testkörper 3-2</p>
	<p>P-RWS-70-0,9PP Testkörper 3-3</p>

Abb. 14-5: Unterseite der drei geprüften Platten (P) nach den Branduntersuchungen.



Abb. 14-6: Qk-RWS-70: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.

	<p>Q-ZTV-75-2PP- US_unten Testkörper 5-1</p>
	<p>Q-ZTV-75-2PP-US_oben Testkörper 5-2</p>

Abb. 14-7: Q-ZTV-75-2PP: Bilddokumentation der Testkörper nach dem Experiment.

III. Ergebnisse der Schallemissionsanalyse

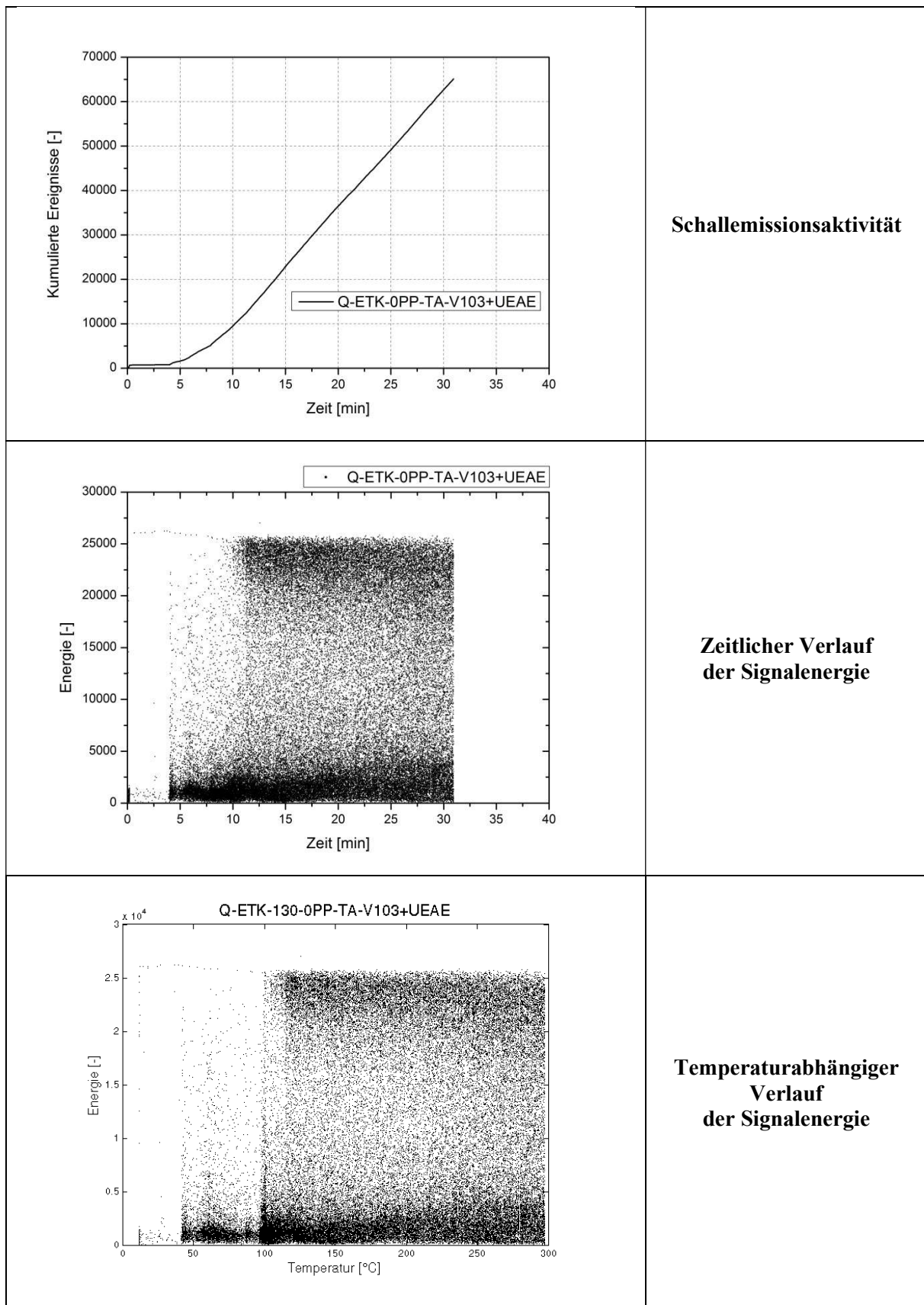


Abb. 14-8: Q-ETK-130-0PP-TA-V103+UEAE: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

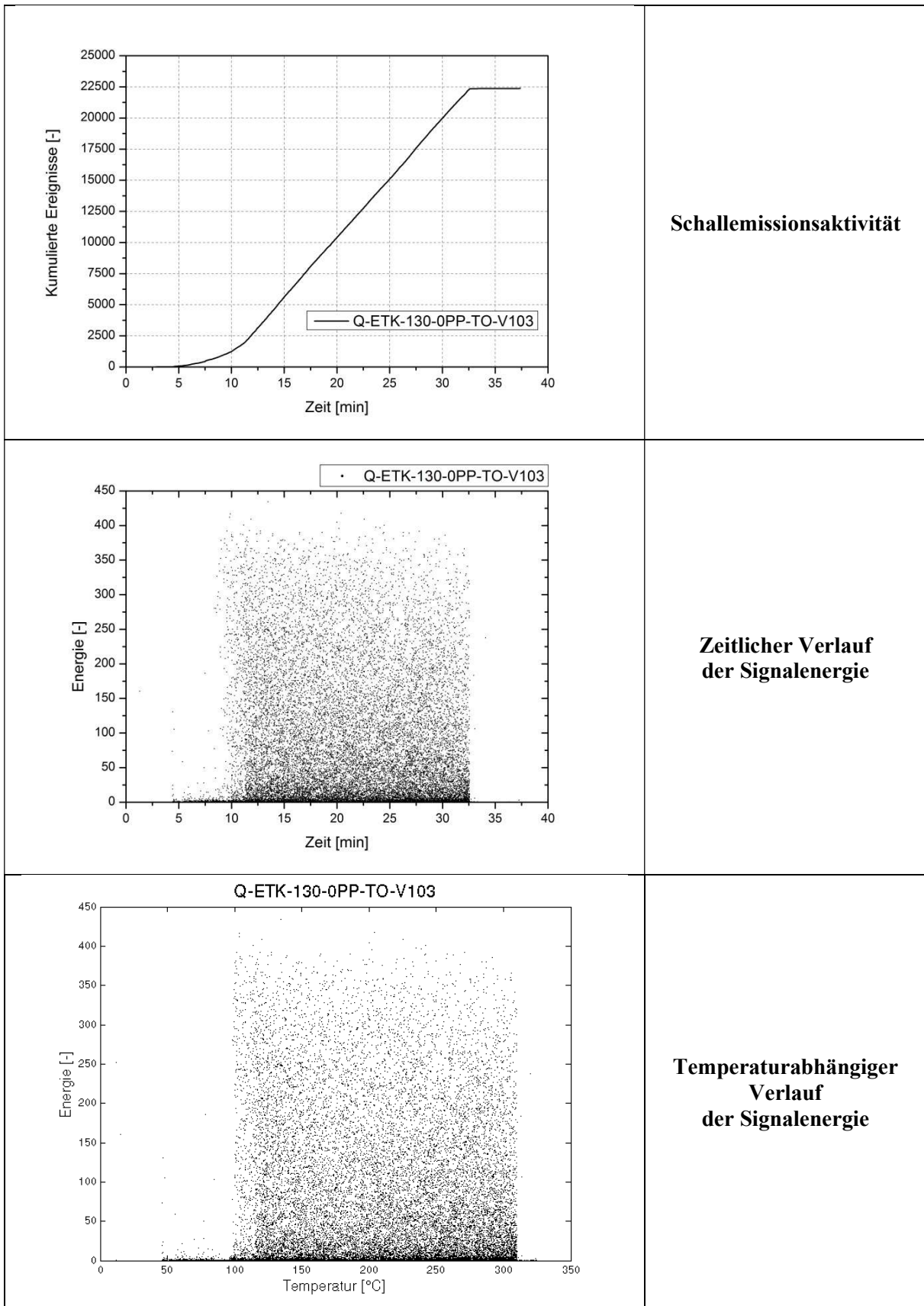


Abb. 14-9: Q-ETK-130-0PP-TO-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

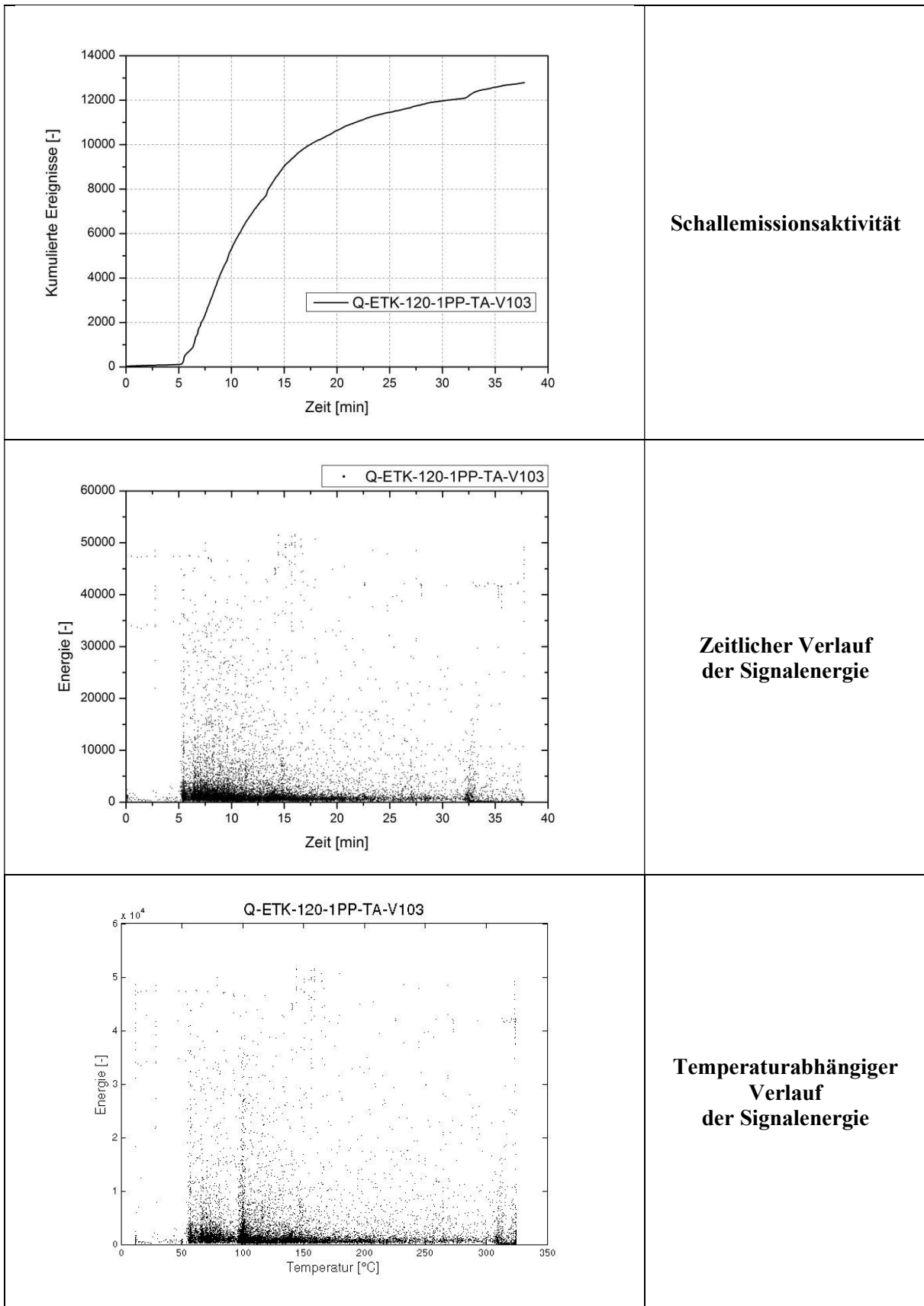


Abb. 14-10: Q-ETK-120-1PP-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

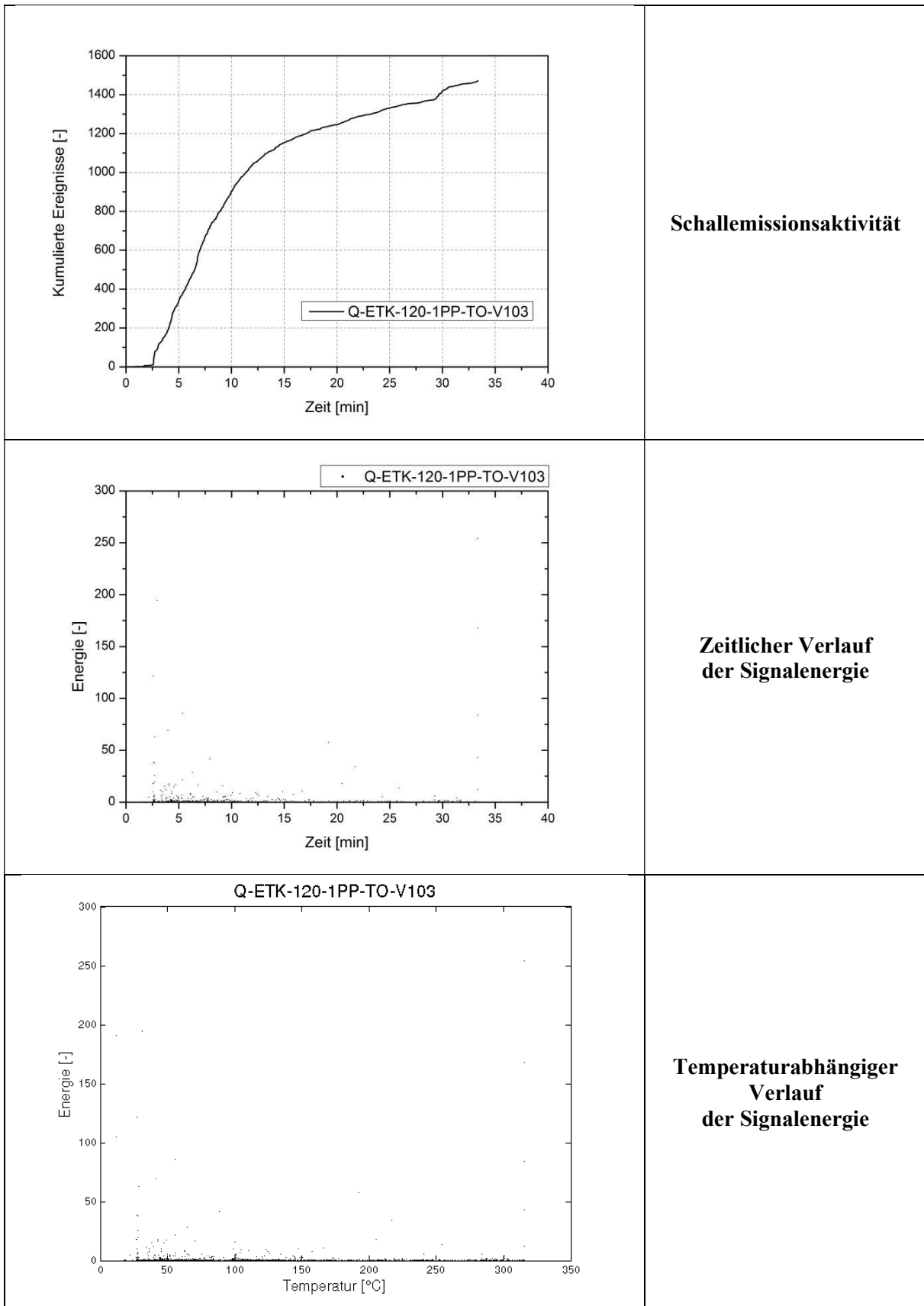


Abb. 14-11: Q-ETK-120-1PP-TO-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

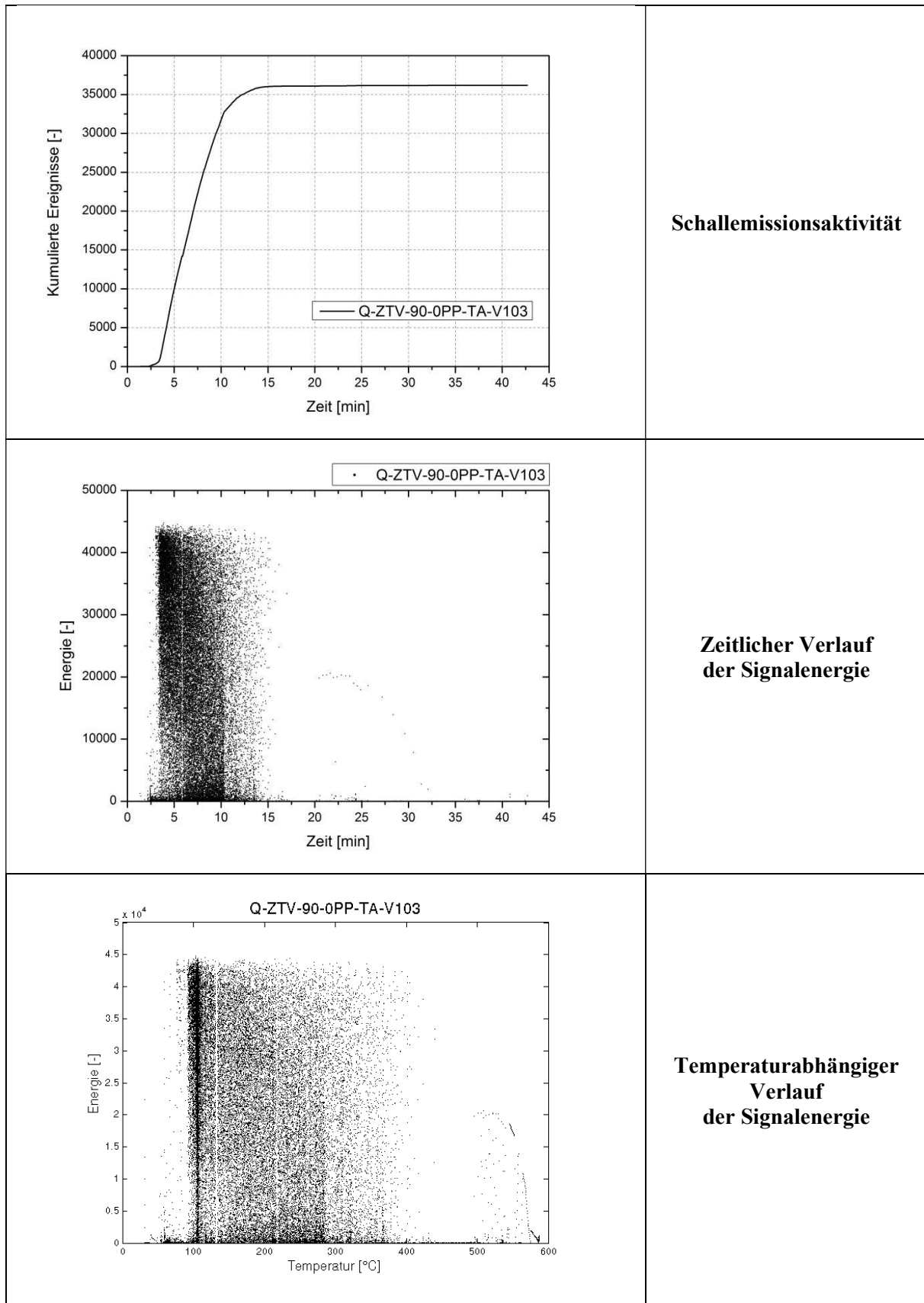


Abb. 14-12: Q-ZTV-90-0PP-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

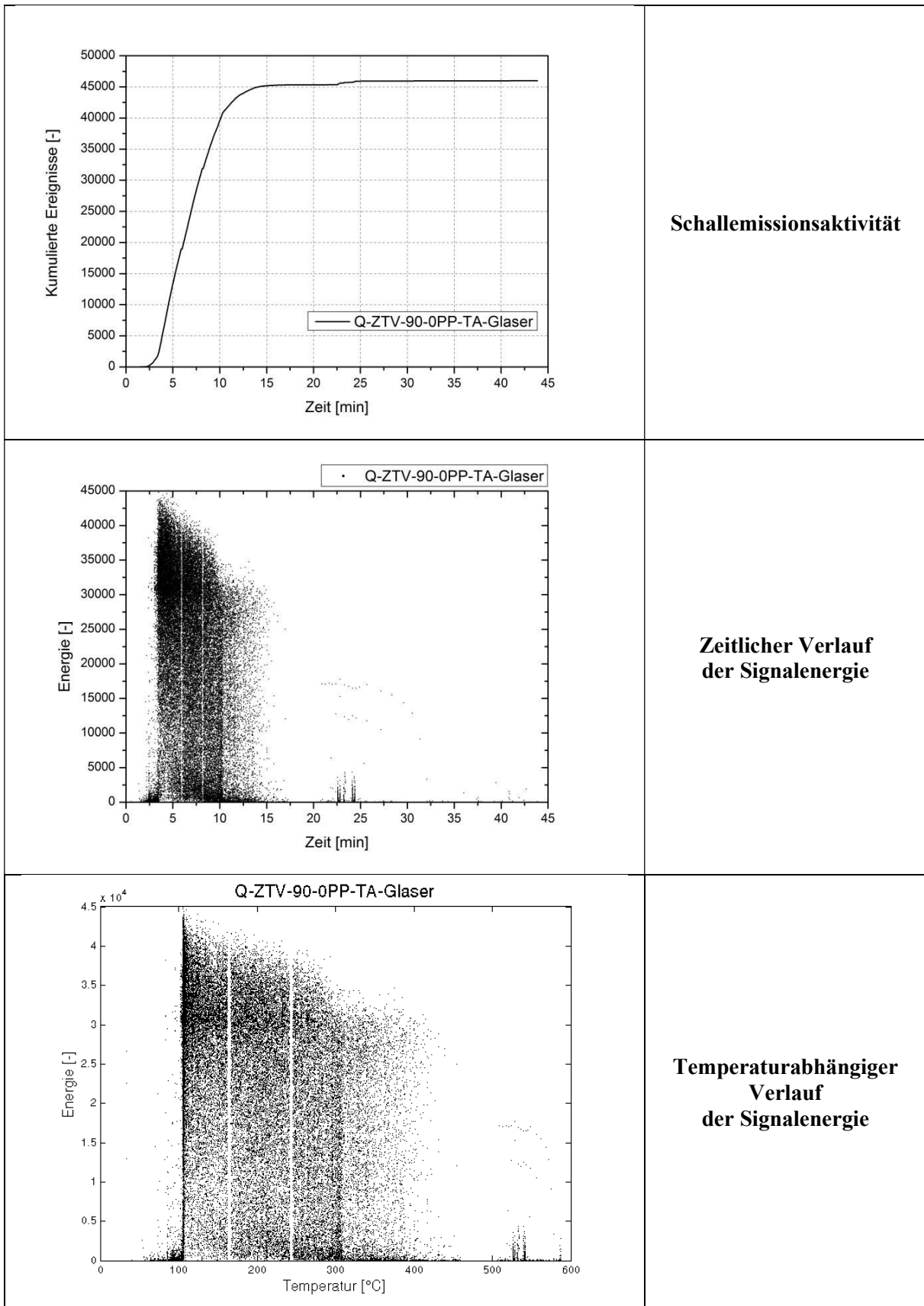


Abb. 14-13: Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

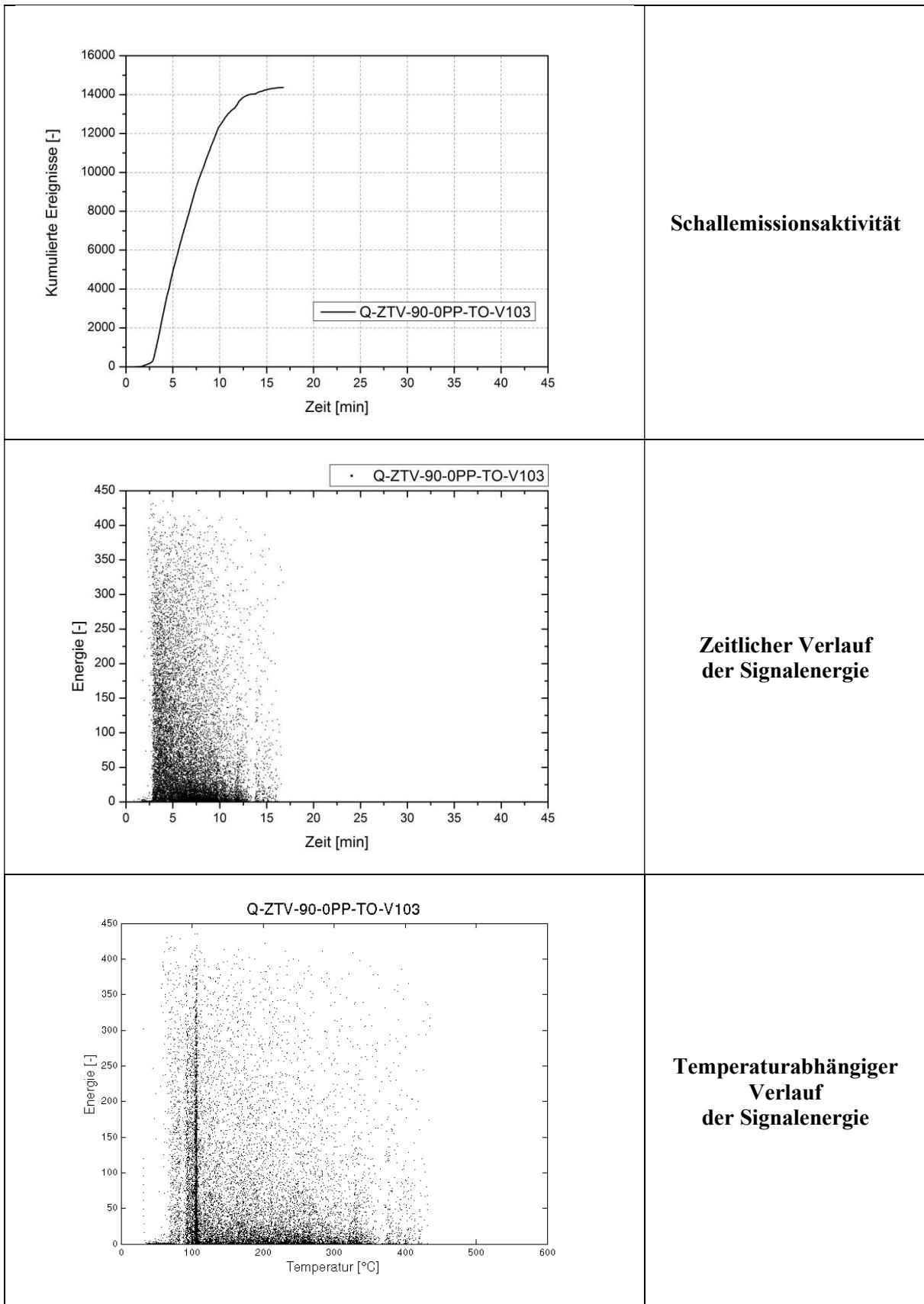


Abb. 14-14: Q-ZTV-90-0PP-TO-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

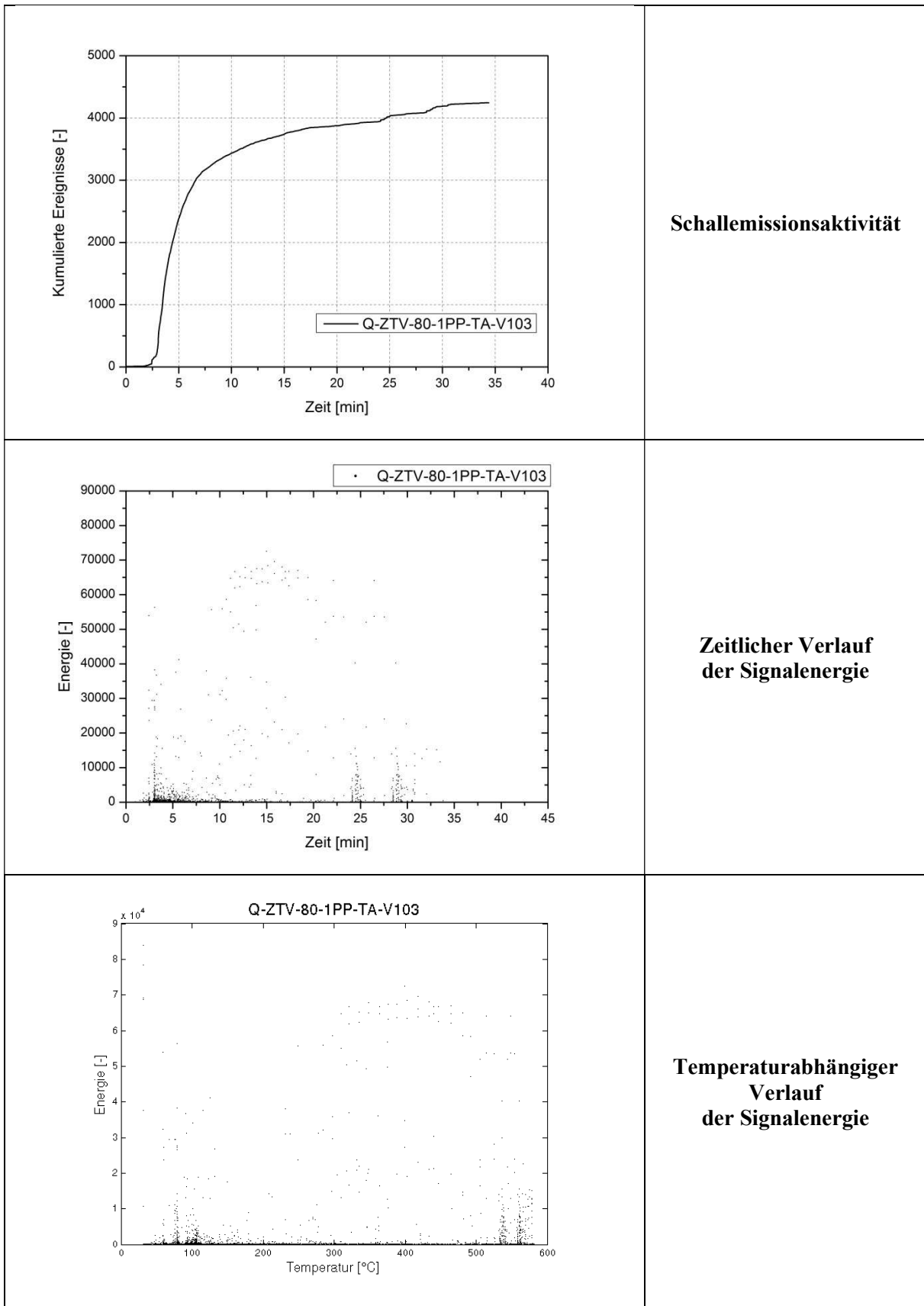


Abb. 14-15: Q-ZTV-80-1PP-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

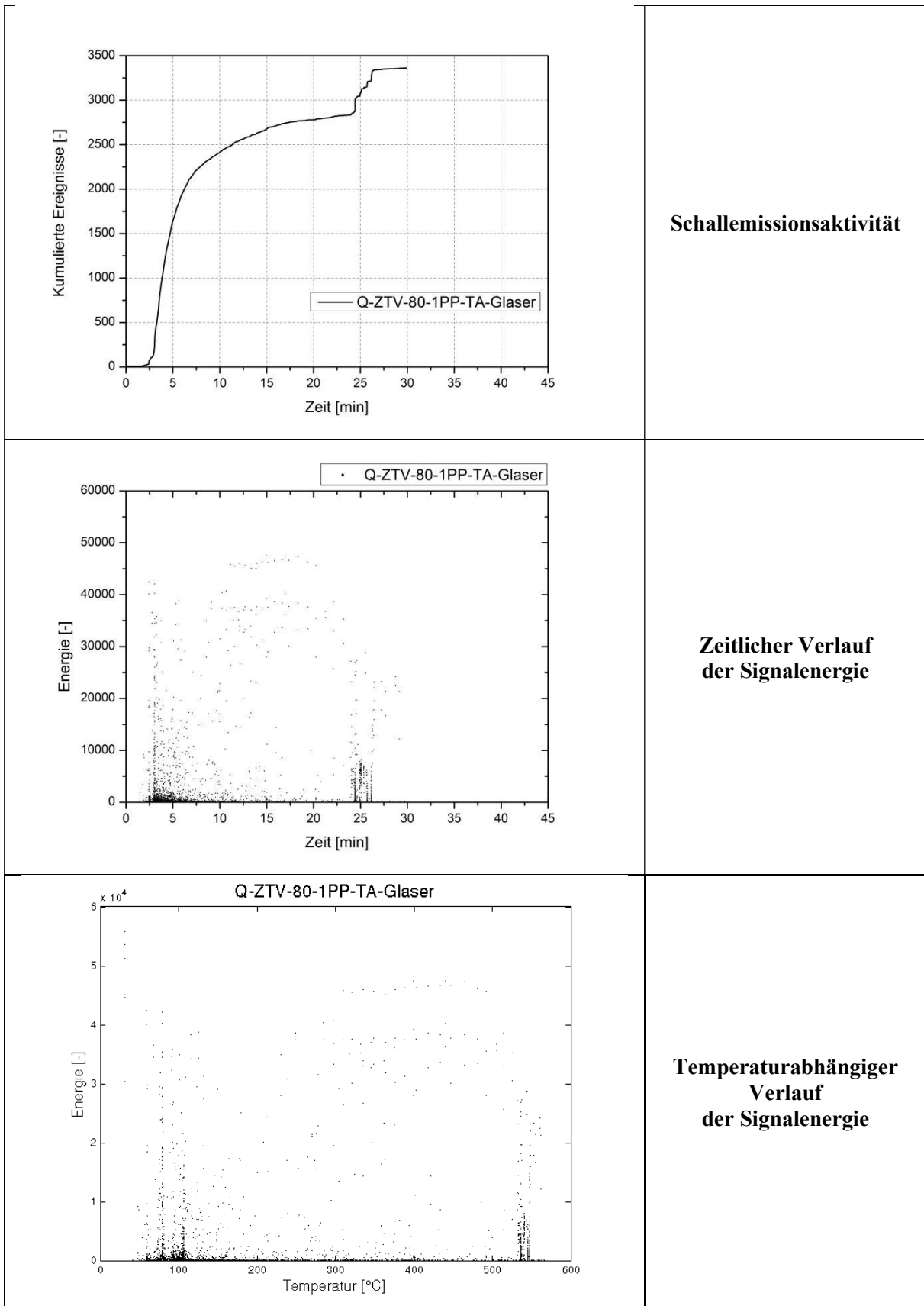


Abb. 14-16: Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

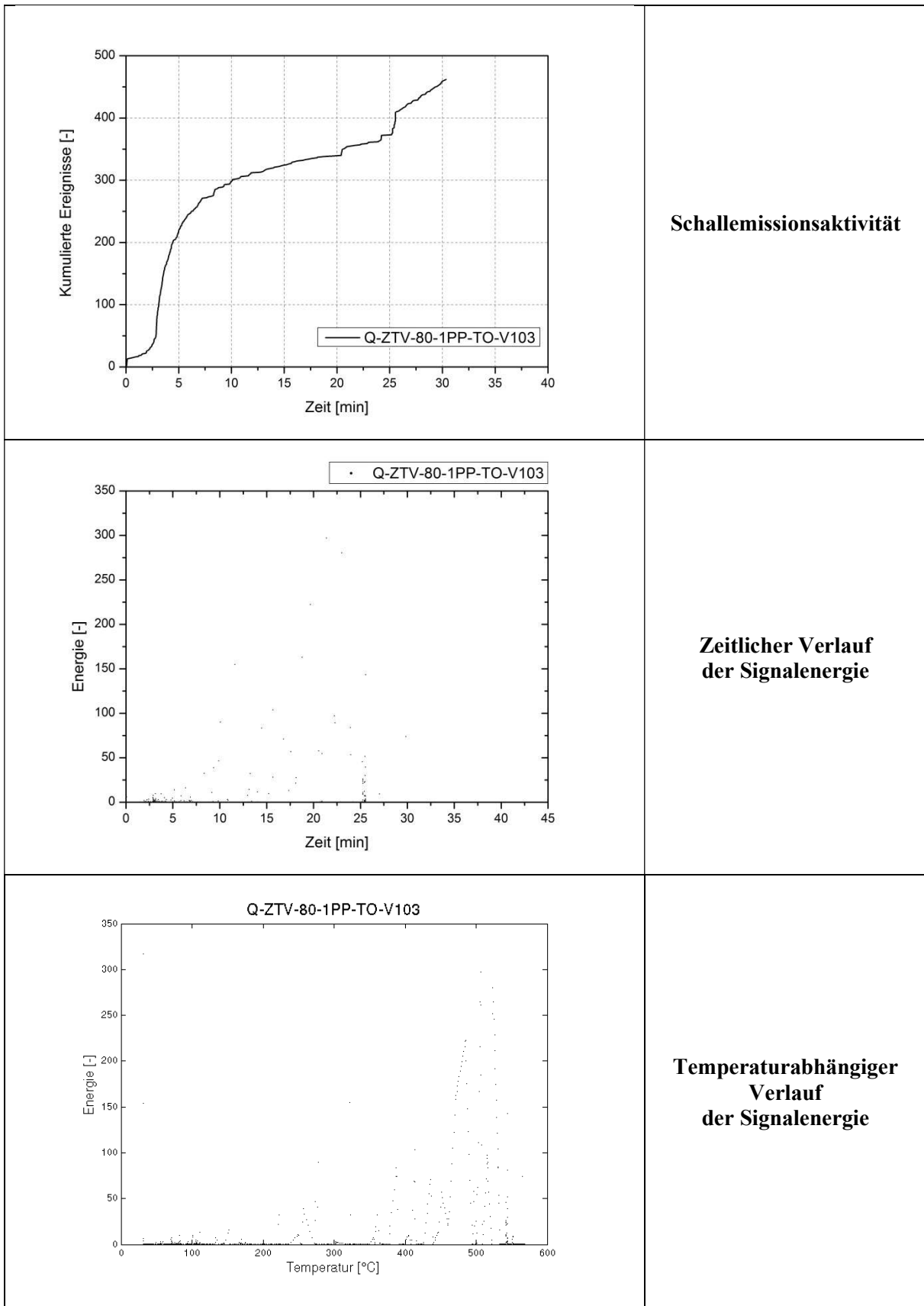


Abb. 14-17: Q-ZTV-80-1PP-TO-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

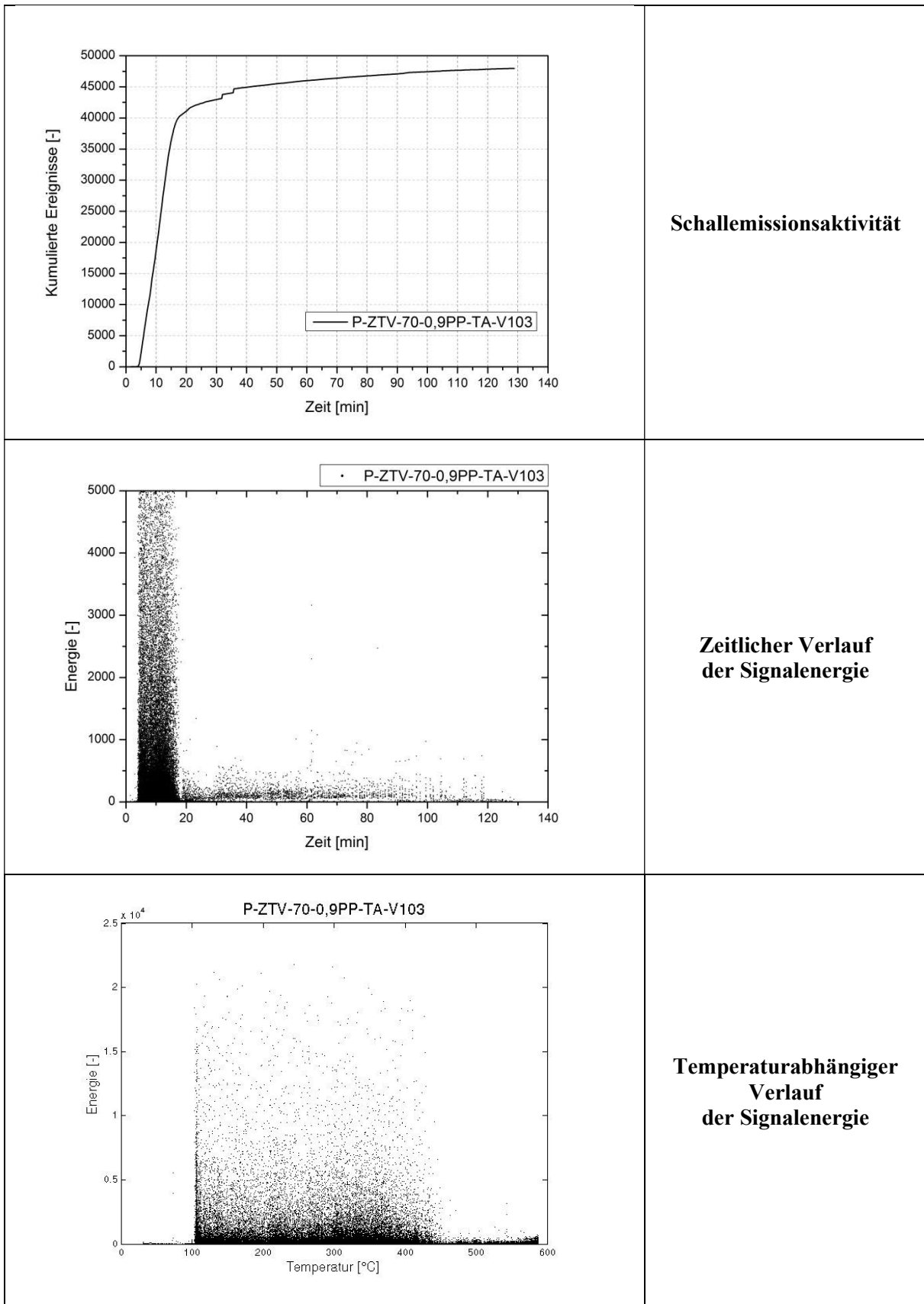


Abb. 14-18: P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

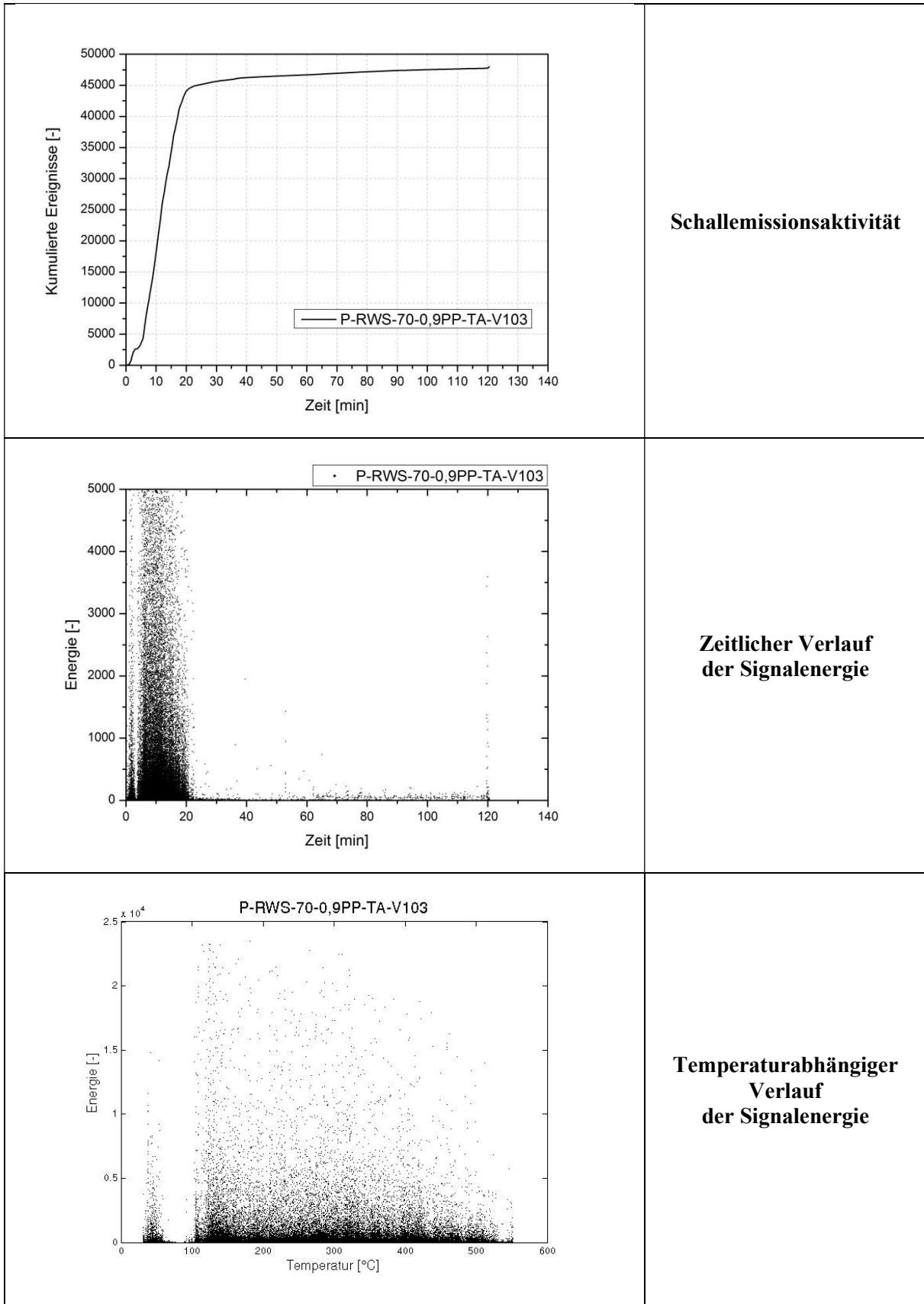


Abb. 14-19: P-RWS-70-0,9PP-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

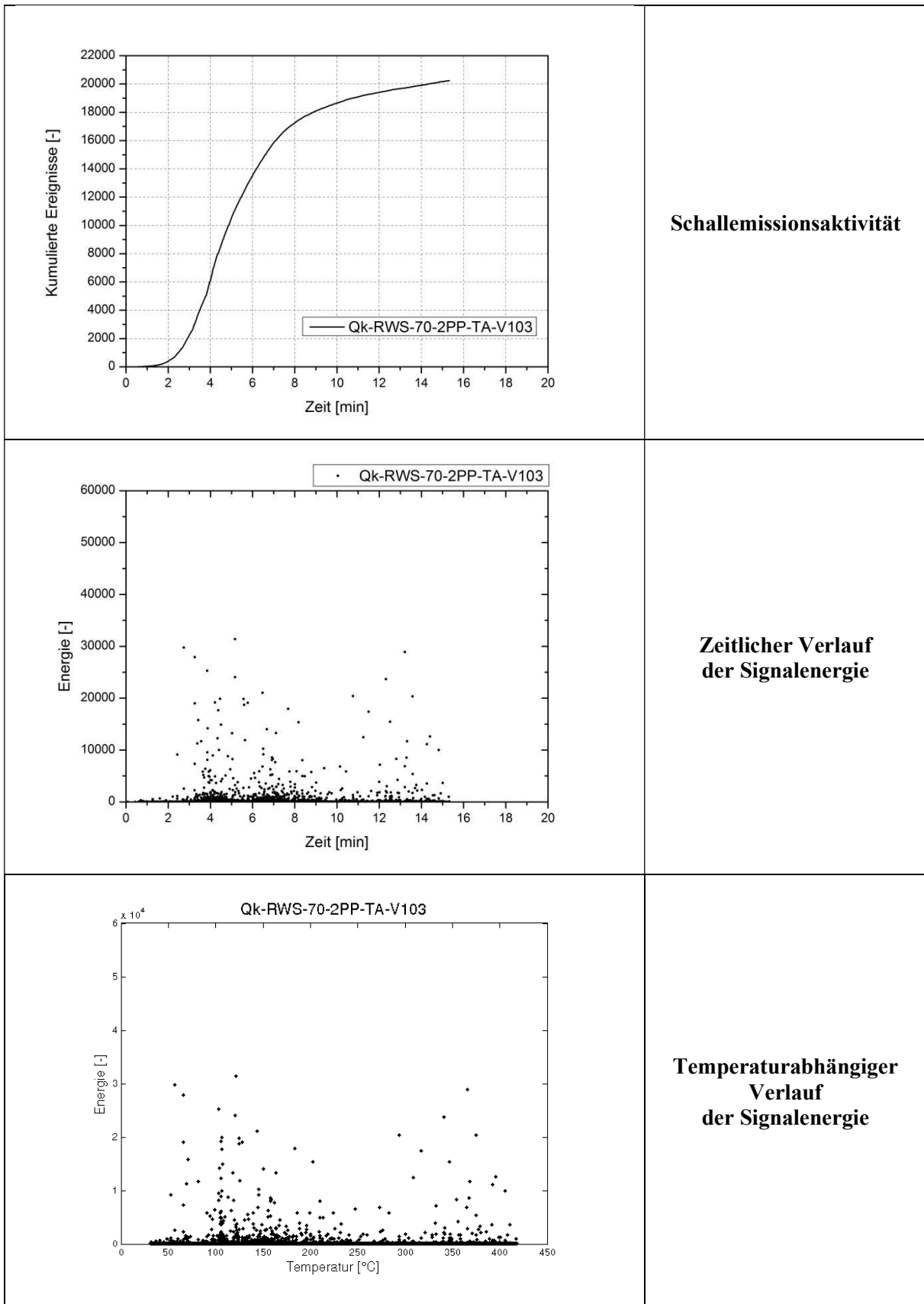


Abb. 14-20: Qk-RWS-70-2PP: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

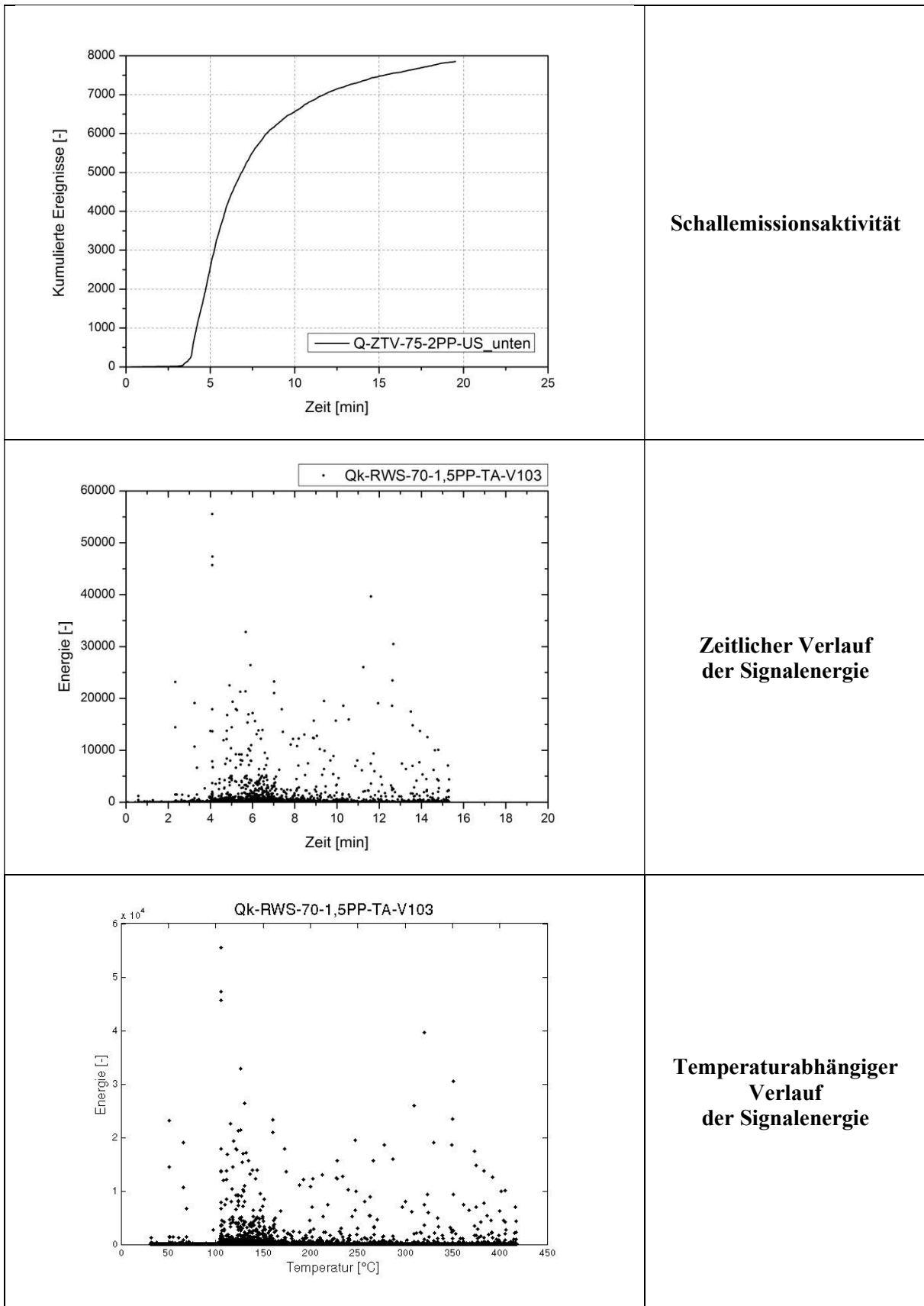


Abb. 14-21: Qk-RWS-70-1,5PP: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

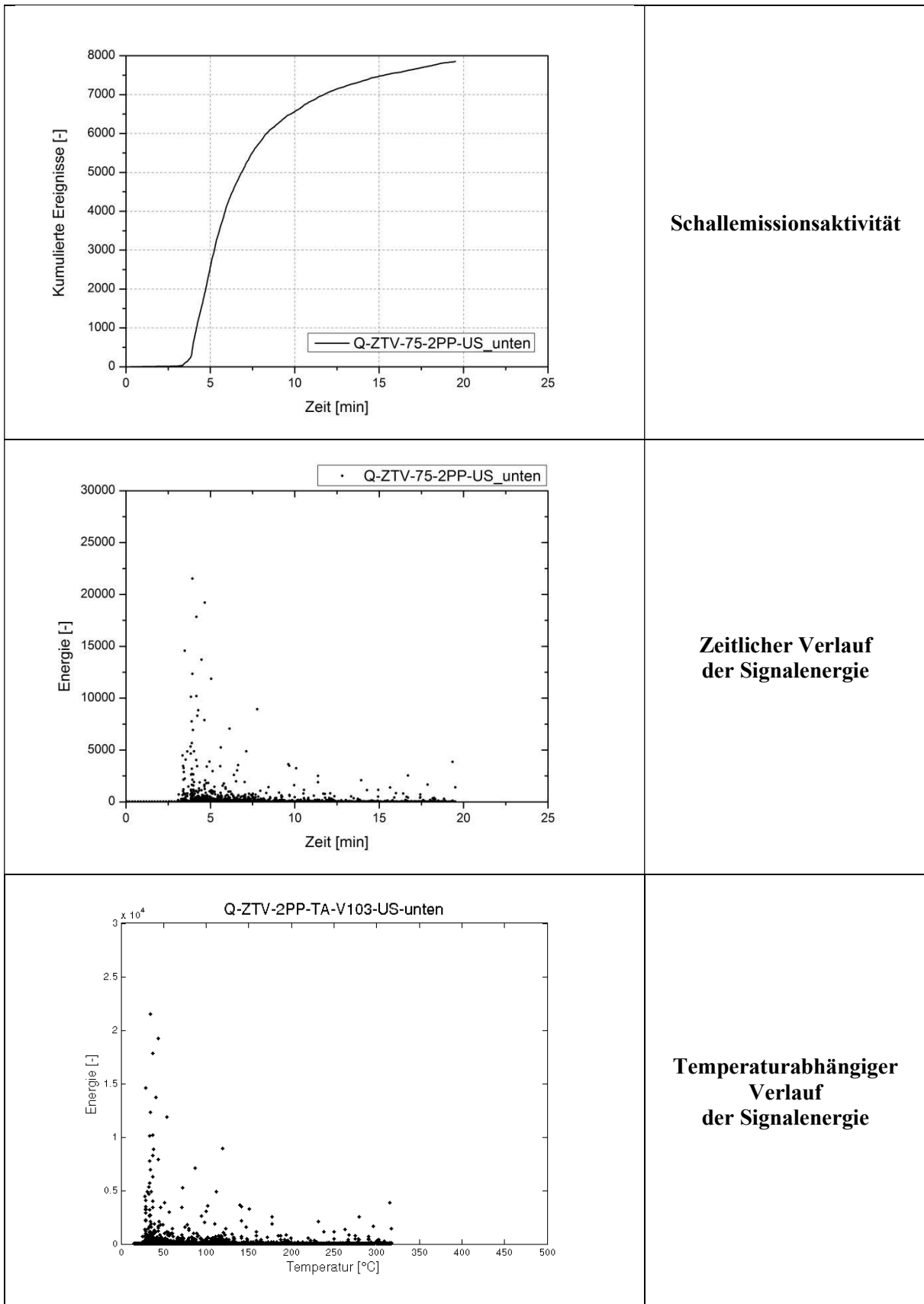


Abb. 14-22: Q-ZTV-75-2PP-US_unten-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

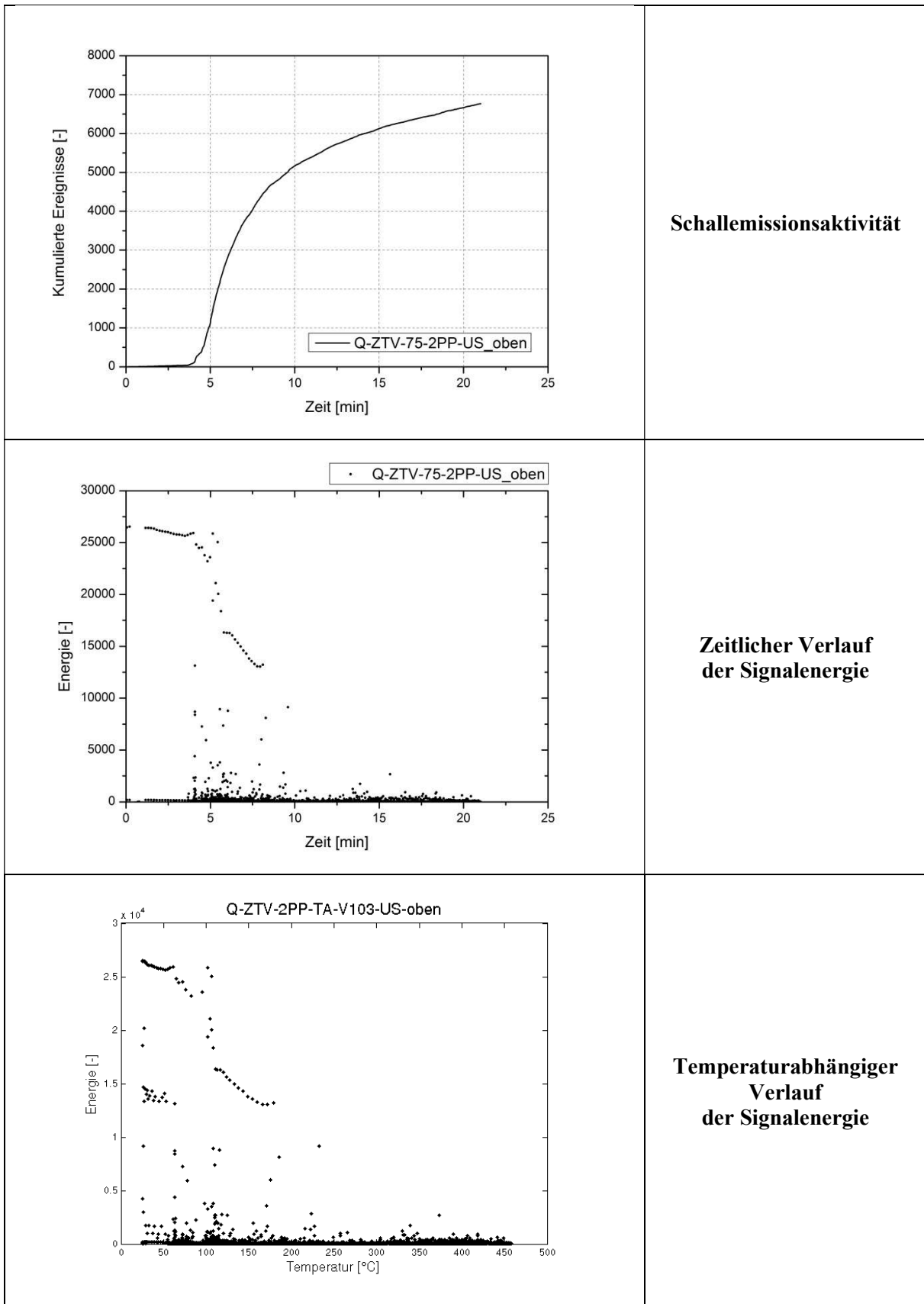


Abb. 14-23: Q-ZTV-75-2PP-US_oben-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

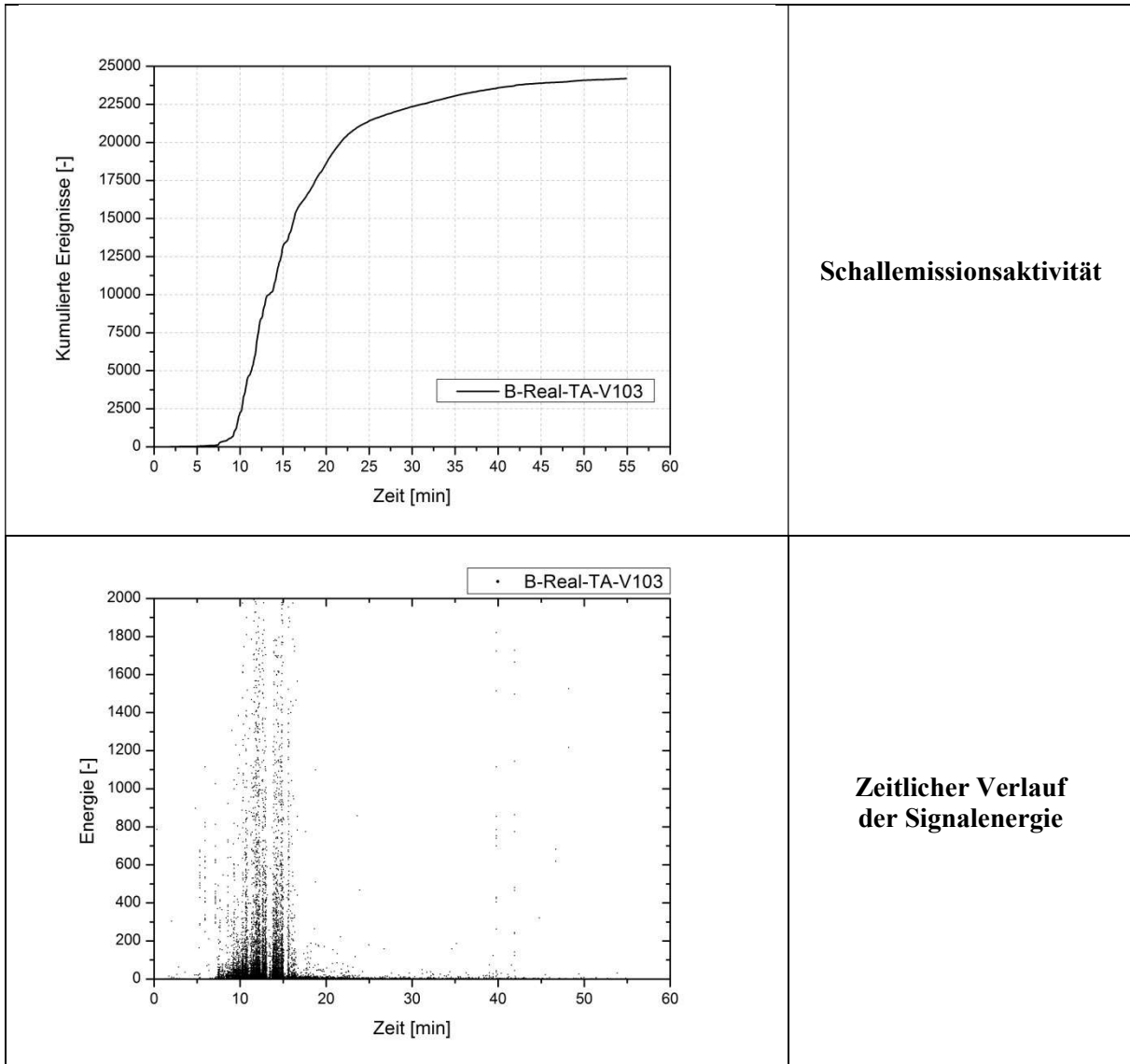


Abb. 14-24: B-Real-35-TA-V103: Ergebnisse der parameterbasierten SEA-Auswertung.

IV. Sensorpositionen und Testkörperabmessungen

Tab. 14-5: Q-ETK-130-0PP-TA-V103 (PK 1-1), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.7	0.3

Tab. 14-6: Q-ETK-130-0PP-TA-V103 (PK 1-1), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.123	0.205	0.300
S2	0.309	0.252	0.300
S3	0.265	0.495	0.300
S4	0.590	0.460	0.300
S5	0.548	0.000	0.167
S6	0.257	0.000	0.073
S7	0.000	0.516	0.199
S8	0.538	0.700	0.084

Tab. 14-7: Q-ETK-130-0PP-TA-UEAE (PK 1-1), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.7	0.3

Tab. 14-8: Q-ETK-130-0PP-TA-UEAE (PK 1-1), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S9	0.336	0.157	0.300
S10	0.515	0.156	0.300
S11	0.222	0.591	0.300
S12	0.531	0.508	0.300
S13	0.512	0.000	0.046
S14	0.000	0.310	0.060
S15	0.162	0.700	0.050
S16	Triggerkanal für Ultraschallmessung		

Tab. 14-9: Q-ETK-130-0PP-TO-V103 (PK 1-3), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.7	0.3

Tab. 14-10: Q-ETK-130-0PP-TO-V103 (PK 1-3), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.180	0.113	0.300
S2	0.163	0.428	0.300
S3	0.441	0.505	0.300
S4	0.560	0.390	0.300
S5	0.238	0.700	0.058
S6	0.700	0.235	0.171
S7	0.526	0.000	0.196
S8	0.276	0.000	0.086

Tab. 14-11: Q-ETK-120 1PP-TA-V103 (PK 1-4), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.7	0.3

Tab. 14-12: Q-ETK-120 1PP-TA-V103 (PK 1-4), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.490	0.170	0.300
S2	0.170	0.325	0.300
S3	0.262	0.483	0.300
S4	0.524	0.581	0.300
S5	0.170	0.700	0.066
S6	0.000	0.174	0.140
S7	0.233	0.000	0.148
S8	0.510	0.000	0.077

Tab. 14-13: Q-ETK-120 1PP-TO-V103 (PK 1-6), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.7	0.3

Tab. 14-14: Q-ETK-120 1PP-TO-V103 (PK 1-6), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.093	0.383	0.300
S2	0.385	0.521	0.300
S3	0.551	0.394	0.300
S4	0.181	0.154	0.300
S5	0.153	0.700	0.085
S6	0.700	0.130	0.160
S7	0.445	0.000	0.137
S8	0.135	0.000	0.054

Tab. 14-15: Q-ZTV-90-0PP-TA-V103 (PK 2-1), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-16: Q-ZTV-90-0PP-TA-V103 (PK 2-1), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.450	0.675	0.300
S2	0.450	0.475	0.300
S3	0.150	0.475	0.300
S4	0.050	0.175	0.300
S5	0.550	0.000	0.250
S6	0.250	0.000	0.050
S7	0.000	0.575	0.150
S8	0.150	0.850	0.150

Tab. 14-17: Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser (PK 2-1), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-18: Q-ZTV-90-0PP-TA-Glaser (PK 2-1), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.550	0.575	0.300
S2	0.350	0.175	0.300
S3	0.150	0.275	0.300
S4	0.250	0.675	0.300
S5	0.250	0.000	0.150
S6	0.000	0.175	0.150
S7	0.250	0.850	0.050
S8	0.450	0.850	0.150

Tab. 14-19: Q-ZTV-90-0PP-TO-V103 (PK 2-3), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-20: Q-ZTV-90-0PP-TO-V103 (PK 2-3), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.400	0.625	0.300
S2	0.200	0.525	0.300
S3	0.500	0.425	0.300
S4	0.200	0.125	0.300
S5	0.200	0.850	0.100
S6	0.700	0.675	0.150
S7	0.700	0.170	0.150
S8	0.500	0.000	0.050

Tab. 14-21: Q-ZTV-80-1PP-TA-V103 (PK 2-3), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-22: Q-ZTV-80-1PP-TA-V103 (PK 2-3), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.450	0.675	0.300
S2	0.450	0.475	0.300
S3	0.150	0.475	0.300
S4	0.050	0.175	0.300
S5	0.550	0.000	0.250
S6	0.250	0.000	0.050
S7	0.000	0.575	0.150
S8	0.150	0.850	0.150

Tab. 14-23: Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser (PK 2-3), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-24: Q-ZTV-80-1PP-TA-Glaser (PK 2-3), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.550	0.575	0.300
S2	0.350	0.175	0.300
S3	0.150	0.275	0.300
S4	0.250	0.675	0.300
S5	0.250	0.000	0.150
S6	0.000	0.175	0.150
S7	0.250	0.850	0.050
S8	0.450	0.850	0.150

Tab. 14-25: Q-ZTV-80-1PP-TO-V103 (PK 2-6), Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-26: Q-ZTV-80-1PP-TO-V103 (PK 2-6), Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.400	0.625	0.300
S2	0.200	0.525	0.300
S3	0.500	0.425	0.300
S4	0.200	0.125	0.300
S5	0.200	0.850	0.100
S6	0.700	0.675	0.150
S7	0.700	0.175	0.150
S8	0.500	0.000	0.050

Tab. 14-27: P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
3.44	1.61	0.4

Tab. 14-28: P-ZTV-70-0,9PP-TA-V103, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.230	0.305	0.400
S2	0.630	1.105	0.400
S3	1.430	0.305	0.400
S4	2.030	0.505	0.400
S5	2.630	1.305	0.400
S6	3.230	0.905	0.400
S7	3.320	1.610	0.030
S8	3.440	1.000	0.020
S9	1.700	1.610	0.020
S10	0.150	1.610	0.040
S11	0.000	1.100	0.030
S12	0.000	0.450	0.020
S13	0.200	0.000	0.050
S14	1.000	0.000	0.260
S15	2.440	0.000	0.270
S16	3.340	0.000	0.020

Tab. 14-29: P-RWS-70-0,9PP-TA-V103, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
3.44	1.61	0.4

Tab. 14-30: P-RWS-70-0,9PP-TA-V103, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.230	0.305	0.400
S2	0.630	1.105	0.400
S3	1.430	0.305	0.400
S4	2.030	0.505	0.400
S5	2.630	1.305	0.400
S6	3.230	0.905	0.400
S7	3.320	1.610	0.030
S8	3.440	1.000	0.020
S9	1.700	1.610	0.020
S10	0.150	1.610	0.040
S11	0.000	1.100	0.030
S12	0.000	0.450	0.020
S13	0.200	0.000	0.050
S14	1.000	0.000	0.260
S15	2.440	0.000	0.270
S16	3.340	0.000	0.020

Tab. 14-31: Qk-RWS-70-2PP-TA-V103, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.8	0.8	0.1

Tab. 14-32: Qk-RWS-70-2PP-TA-V103, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.13	0.00	0.03
S2	0.60	0.00	0.04
S3	0.20	0.20	0.10
S4	0.55	0.25	0.10
S5	0.60	0.50	0.10
S6	0.40	0.70	0.10
S7	0.16	0.80	0.05
S8	0.60	0.80	0.03

Tab. 14-33: Qk-RWS-70-1,5PP-TA-V103, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.8	0.8	0.1

Tab. 14-34: Qk-RWS-70-1,5PP-TA-V103, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.13	0.00	0.03
S2	0.60	0.00	0.04
S3	0.20	0.20	0.10
S4	0.55	0.25	0.10
S5	0.60	0.50	0.10
S6	0.40	0.70	0.10
S7	0.16	0.80	0.05
S8	0.60	0.80	0.03

Tab. 14-35: Q-ZTV-75-2PP-US_unten, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-36: Q-ZTV-75-2PP-US_unten, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.25	0.13	0.30
S2	0.55	0.33	0.30
S3	0.35	0.63	0.30
S4	0.00	0.13	0.15
S5	0.00	0.33	0.05
S6	0.00	0.63	0.25
S7	0.15	0.85	0.05
S8	0.25	0.85	0.25
S9	0.65	0.85	0.05
S10	0.70	0.73	0.15
S11	0.70	0.33	0.05
S12	0.70	0.13	0.25
S13	0.65	0.00	0.05
S14	0.25	0.00	0.15
S15	0.05	0.00	0.05
S16	Triggerkanal für Ultraschallmessung		

Tab. 14-37: Q-ZTV-75-2PP-US_oben, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
0.7	0.85	0.3

Tab. 14-38: Q-ZTV-75-2PP-US_oben, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0.25	0.13	0.30
S2	0.55	0.33	0.30
S3	0.35	0.63	0.30
S4	0.00	0.13	0.20
S5	0.00	0.33	0.05
S6	0.00	0.63	0.25
S7	0.15	0.85	0.05
S8	0.25	0.85	0.25
S9	0.65	0.85	0.05
S10	0.70	0.73	0.15
S11	0.70	0.33	0.05
S12	0.70	0.13	0.25
S13	0.65	0.00	0.05
S14	0.25	0.00	0.15
S15	0.05	0.00	0.05
S16	Triggerkanal für Ultraschallmessung		

Tab. 14-39: B-Real-35, Wand des Brückenbrandprüfstandes, Testkörperabmessungen:

X [m]	Y [m]	Z [m]
10	4.5	0.5

Tab. 14-40: B-Real-35, Wand des Brückenbrandprüfstandes, Sensorpositionen:

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	6.83	2.5	0
S2	6.03	2.5	0
S3	6.43	2.9	0
S4	5.43	2.9	0
S5	6.63	3.5	0
S6	5.83	3.5	0
S7	6.03	3.9	0
S8	5.23	3.7	0
S9	4.43	2.3	0
S10	3.23	2.3	0
S11	4.83	2.7	0
S12	3.63	2.9	0
S13	4.43	3.3	0
S14	3.83	3.5	0
S15	4.43	2.9	0
S16	3.43	3.7	0

V. Ergebnisse der Temperaturmessungen

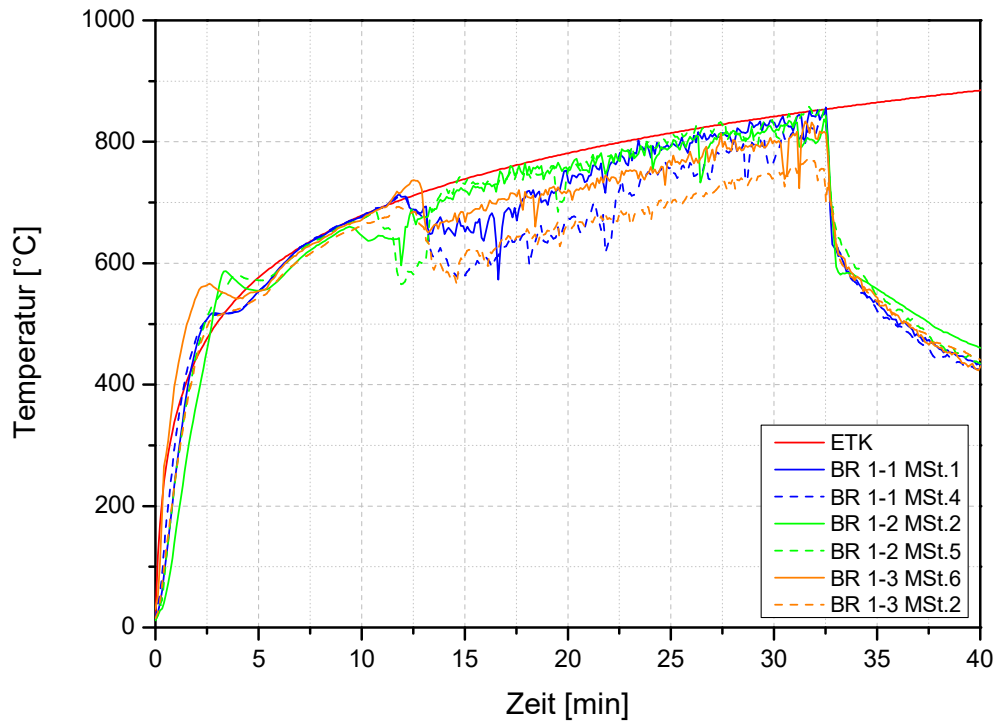


Abb. 14-25: Temperaturdaten Q-ETK-130-0PP.

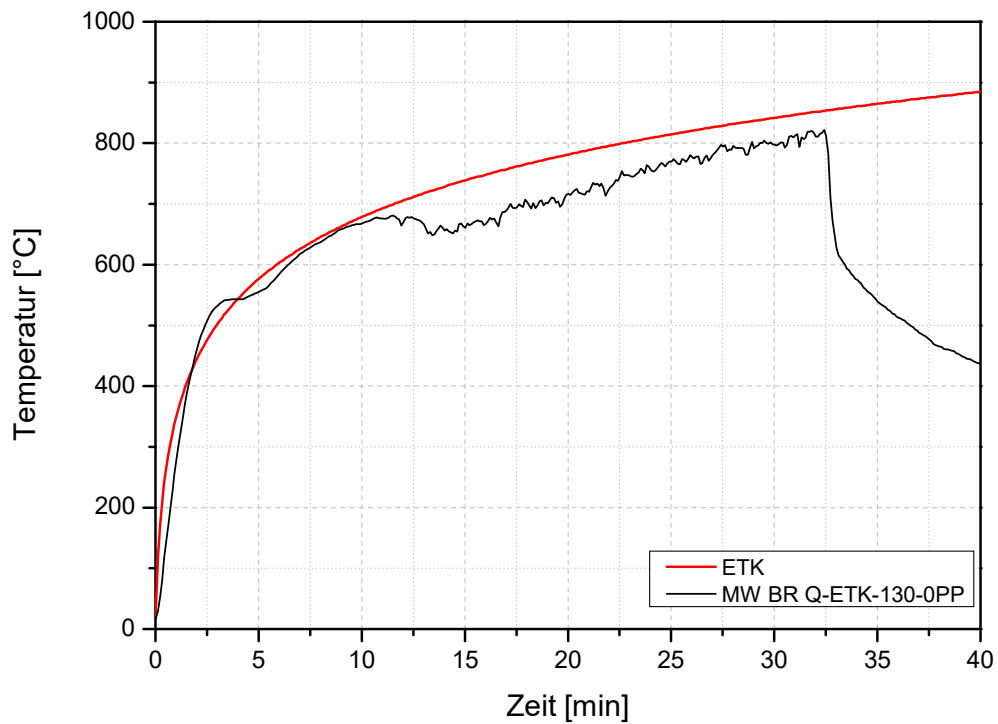


Abb. 14-26: Temperaturdaten Q-ETK-130-0PP.

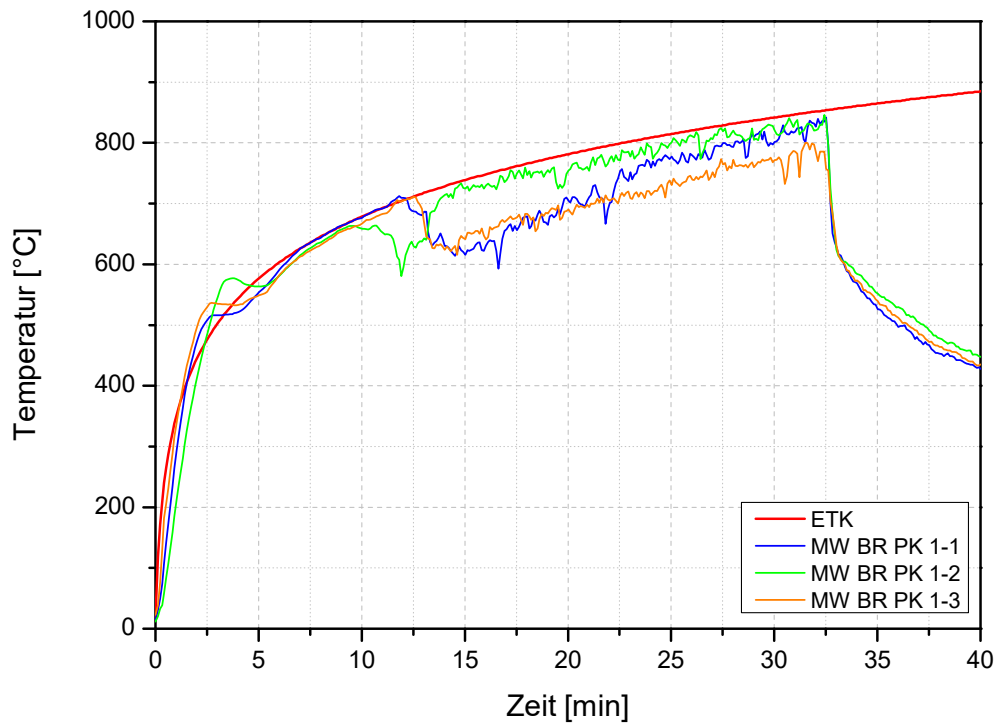


Abb. 14-27: Temperaturdaten Q-ETK-130-0PP.

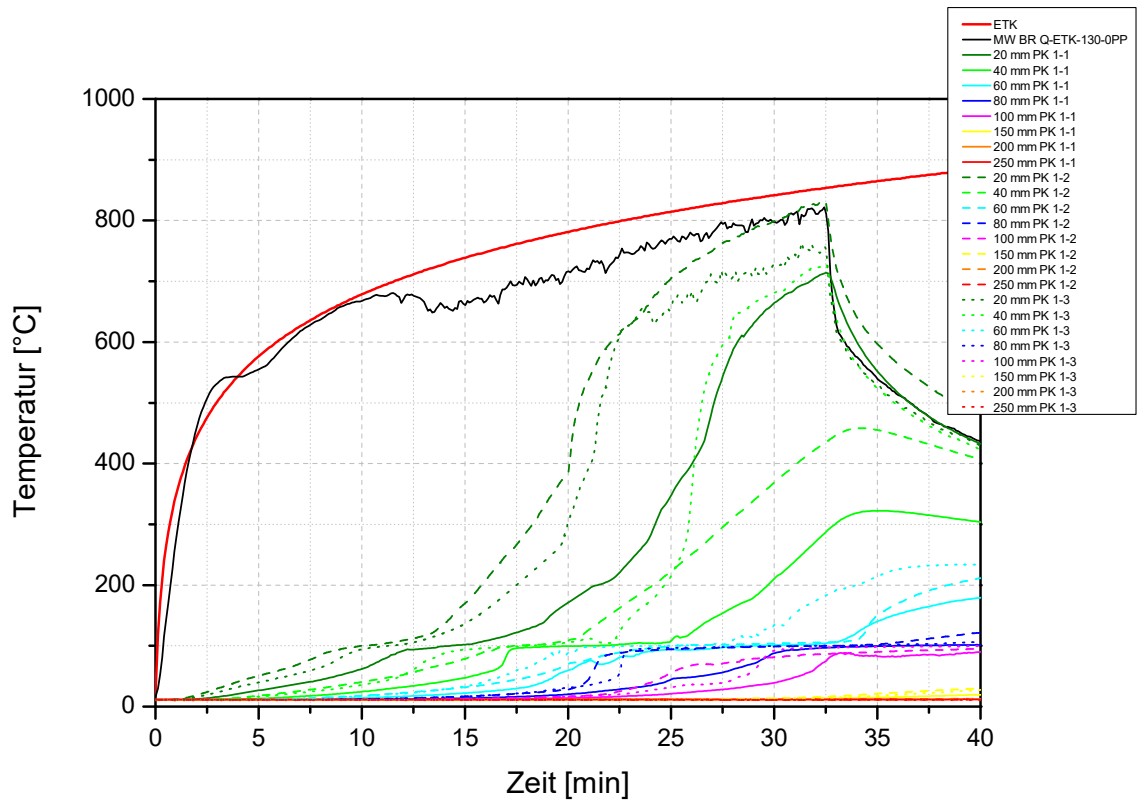


Abb. 14-28: Temperaturdaten Q-ETK-130-0PP.

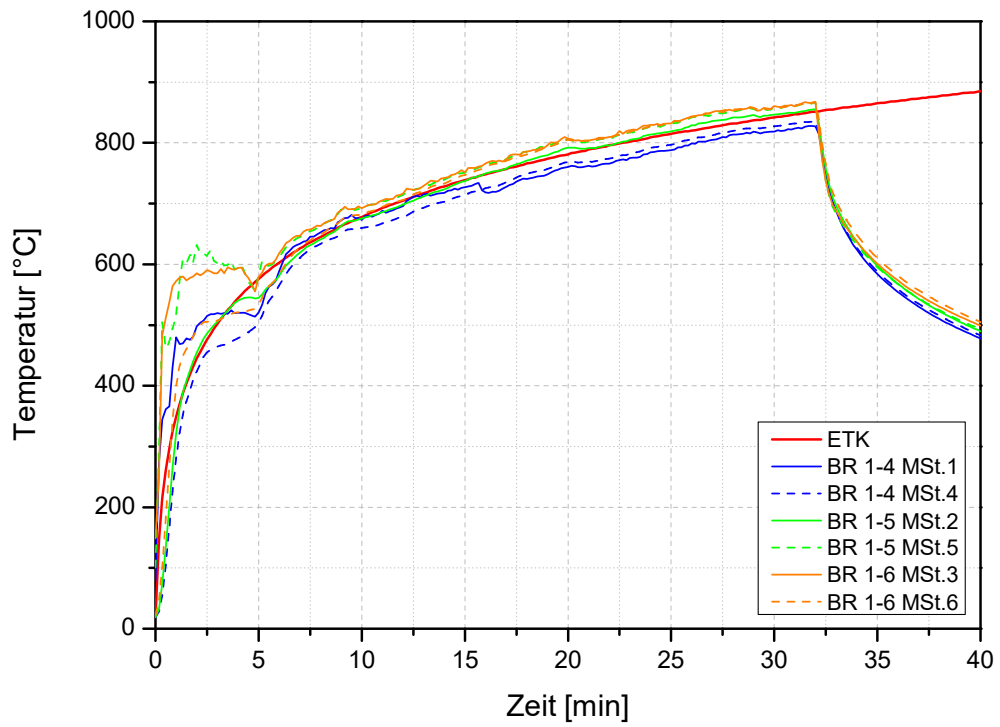


Abb. 14-29: Temperaturdaten Q-ETK-120-1PP.

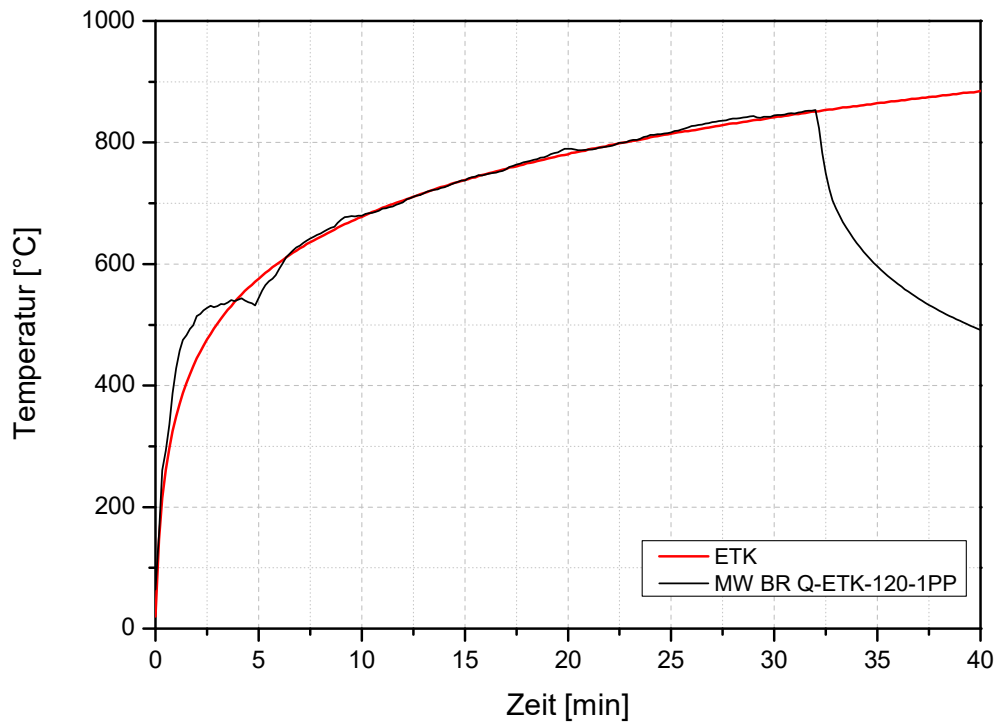


Abb. 14-30: Temperaturdaten Q-ETK-120-1PP.

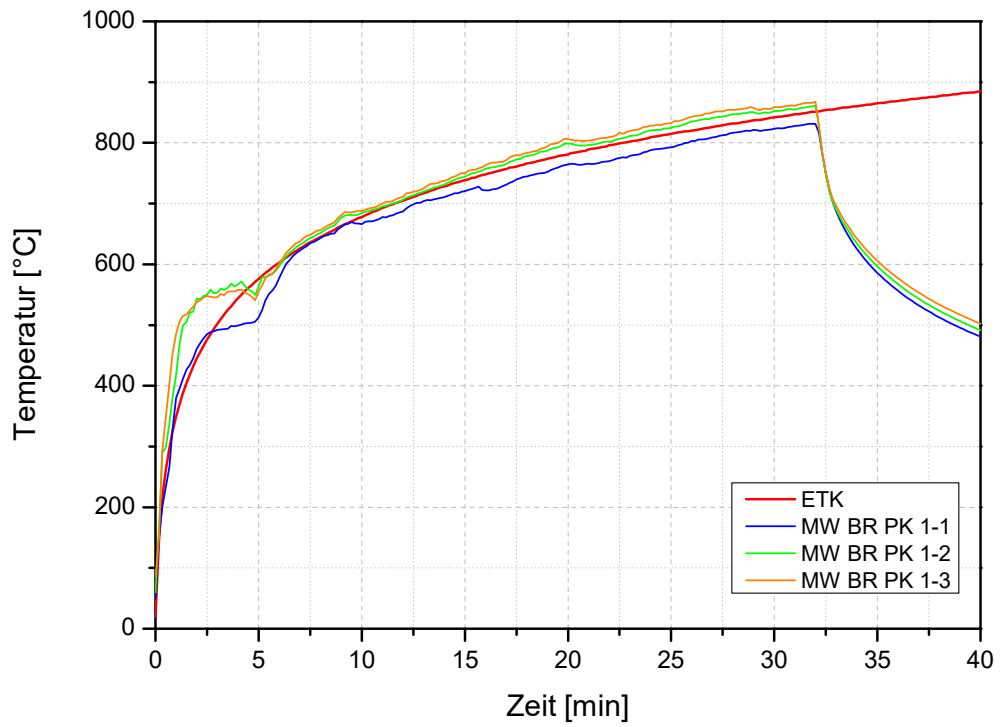


Abb. 14-31: Temperaturdaten Q-ETK-120-1PP.

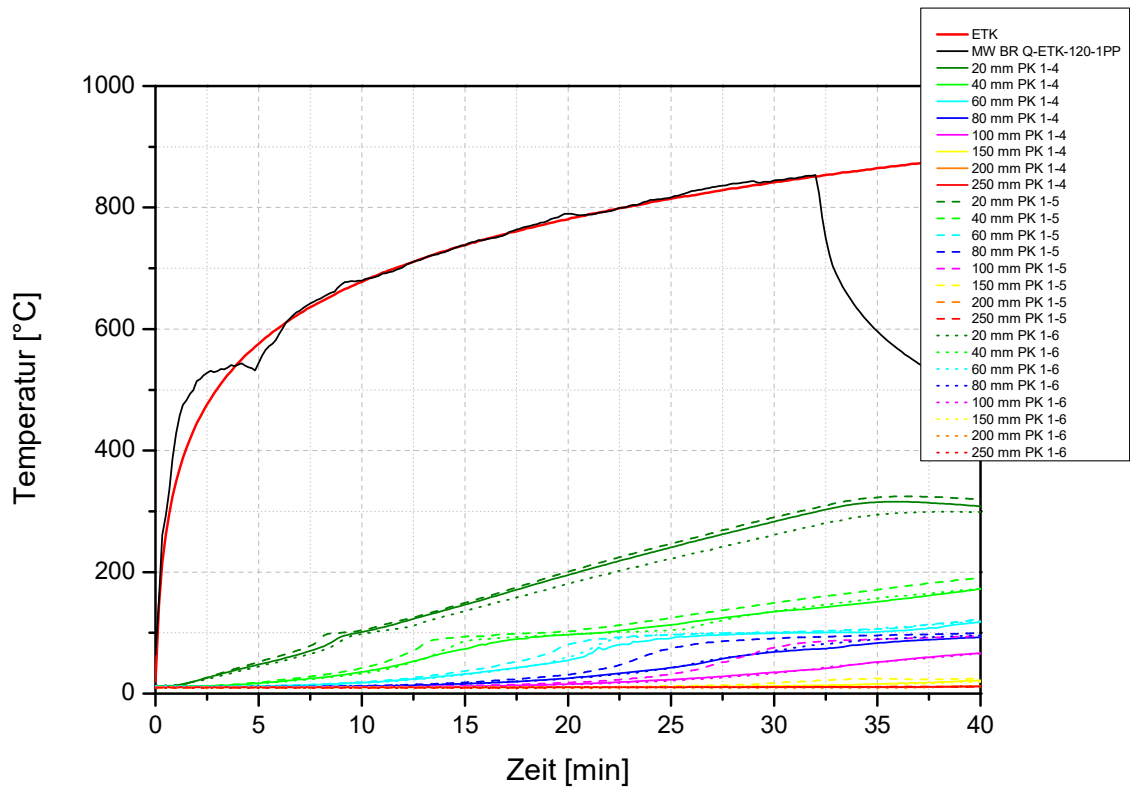


Abb. 14-32: Temperaturdaten Q-ETK-120-1PP.

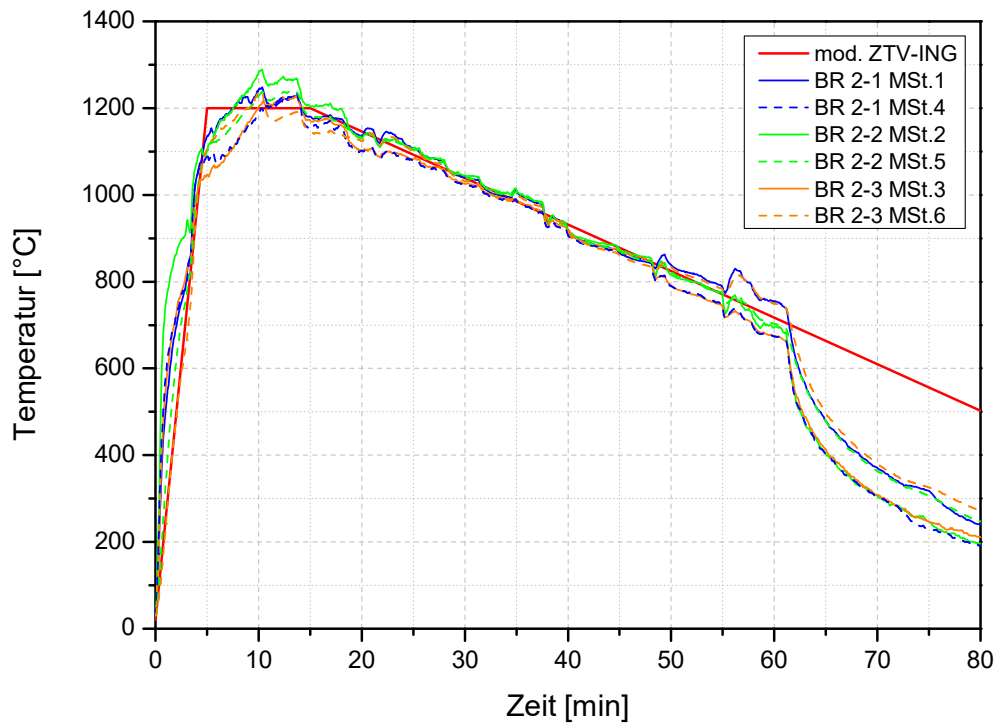


Abb. 14-33: Temperaturdaten Q-ZTV-90-0PP.

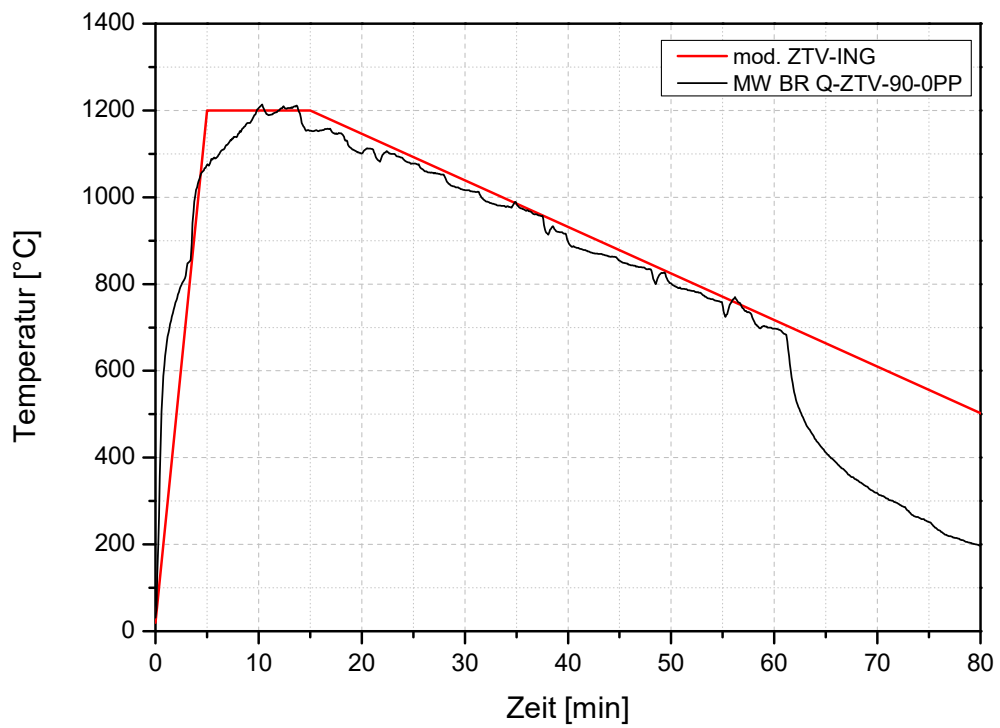


Abb. 14-34: Temperaturdaten Q-ZTV-90-0PP.

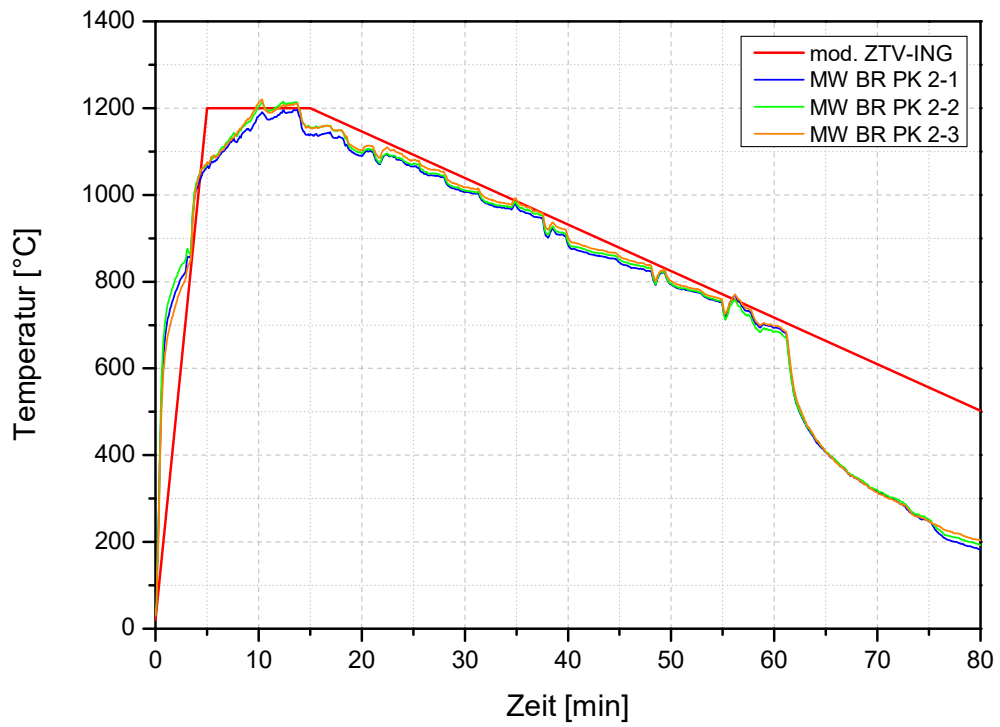


Abb. 14-35: Temperaturdaten Q-ZTV-90-0PP.

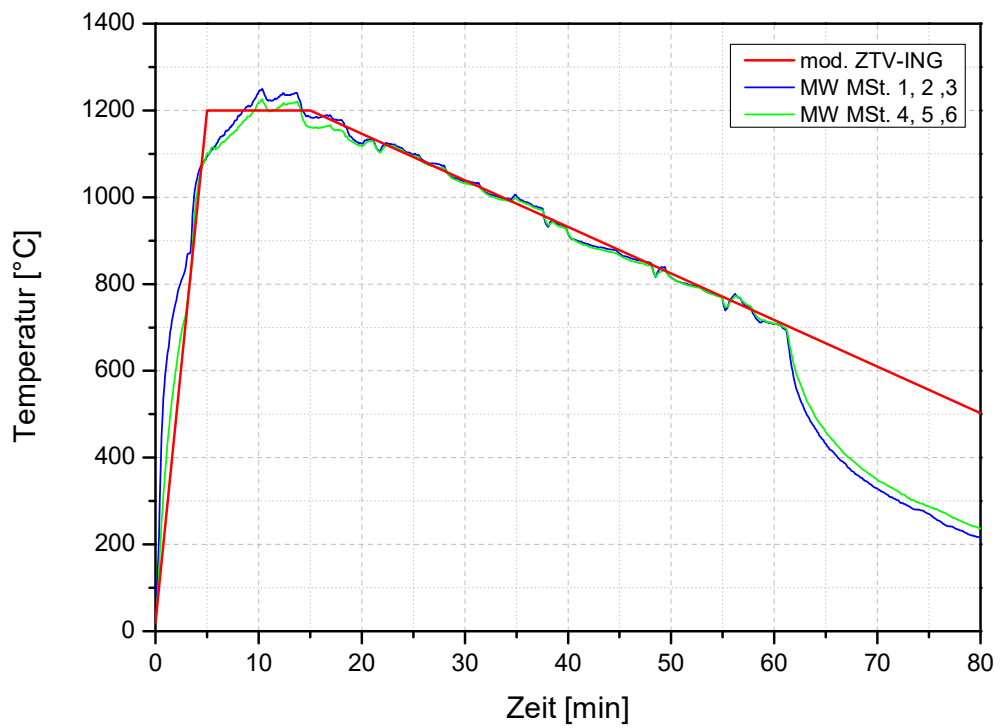


Abb. 14-36: Temperaturdaten Q-ZTV-90-0PP.

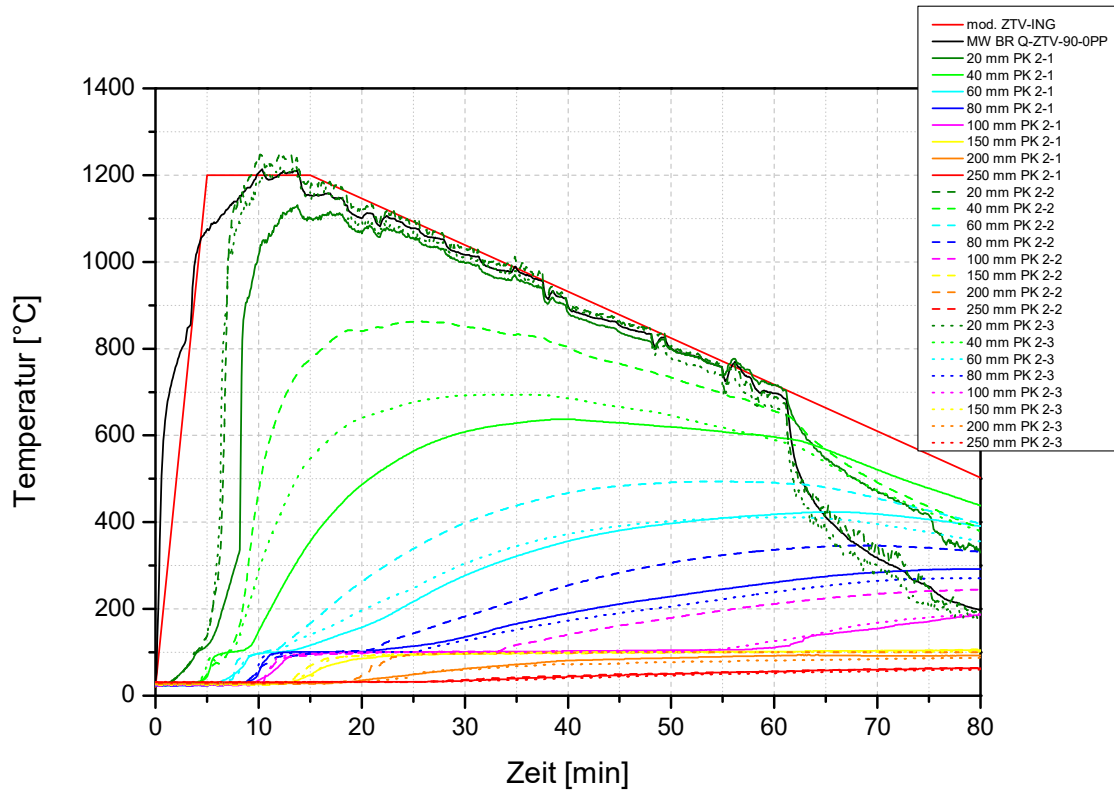


Abb. 14-37: Temperaturdaten Q-ZTV-90-0PP.

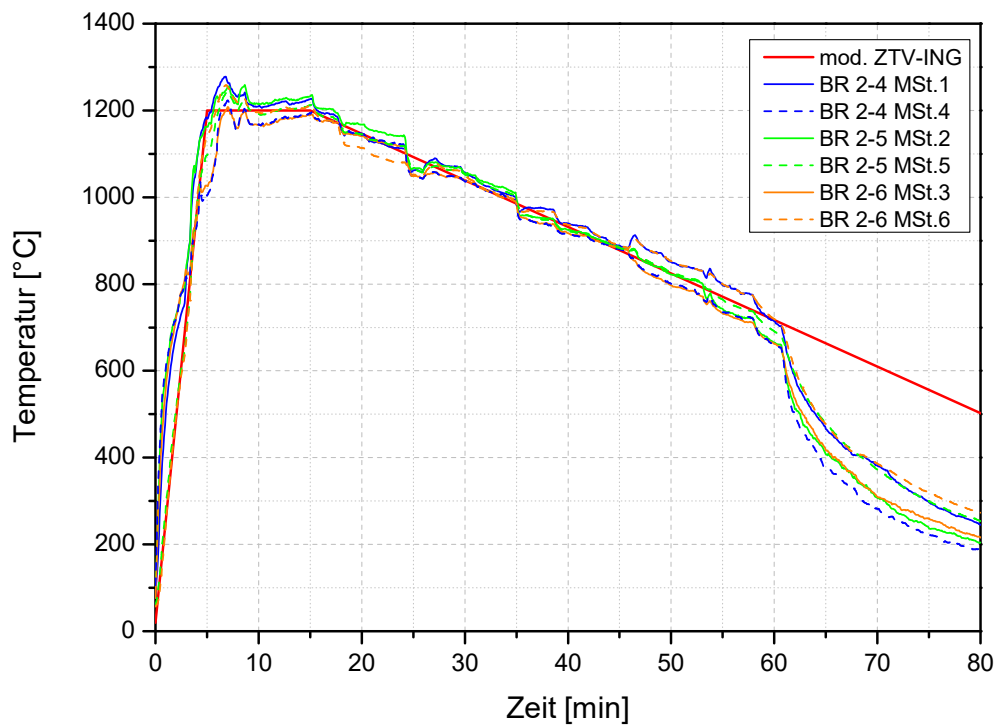


Abb. 14-38: Temperaturdaten Q-ZTV-80-1PP.

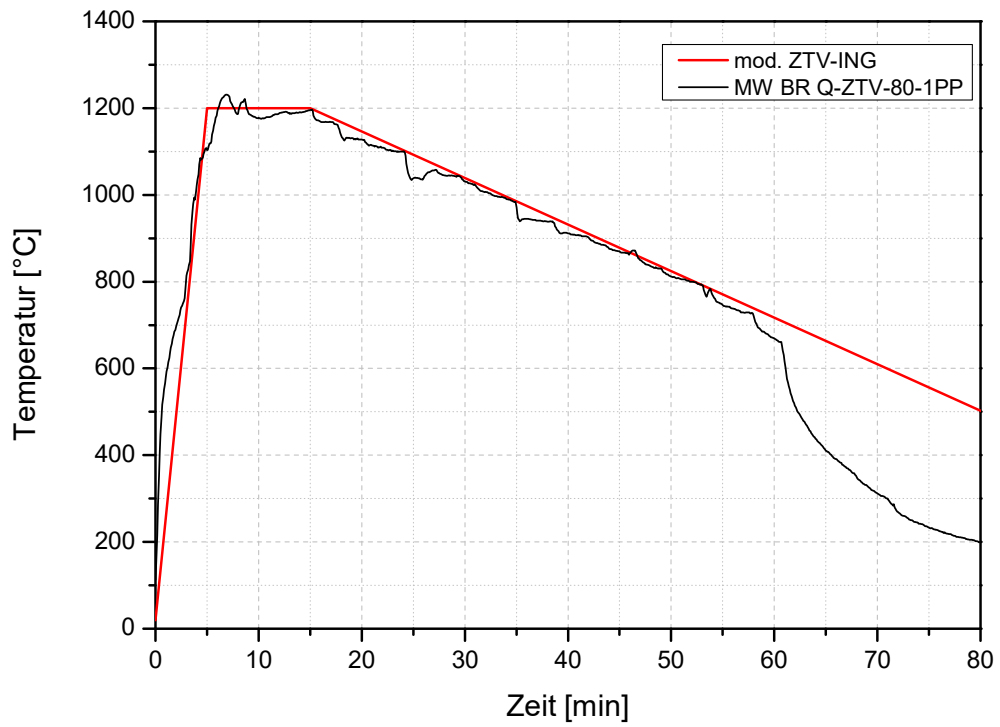


Abb. 14-39: Temperaturdaten Q-ZTV-80-1PP.

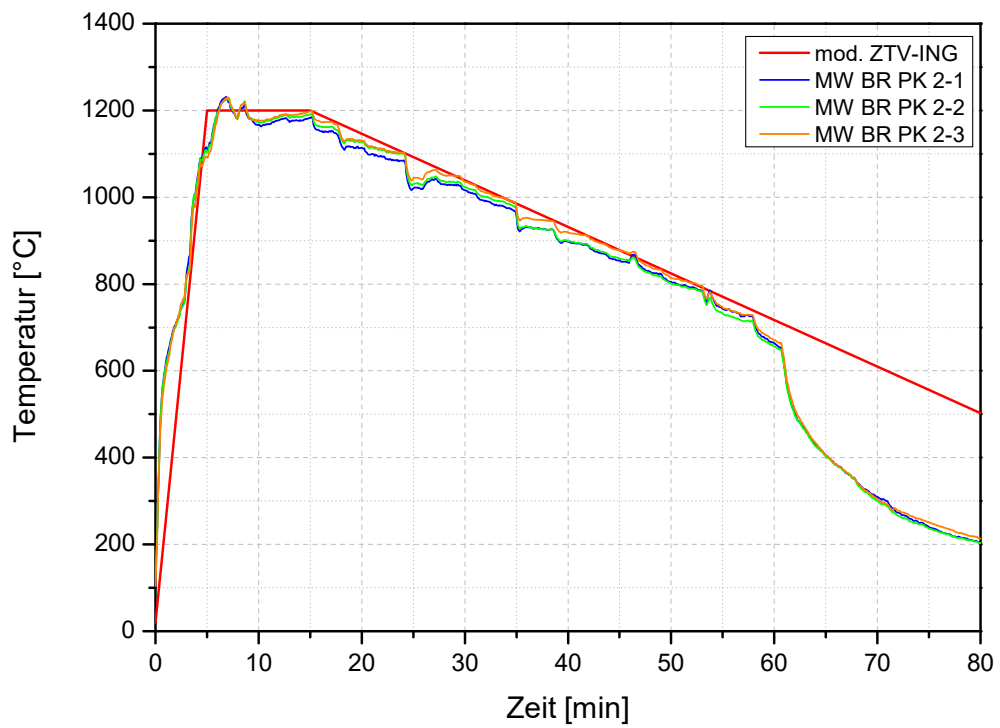


Abb. 14-40: Temperaturdaten Q-ZTV-80-1PP.

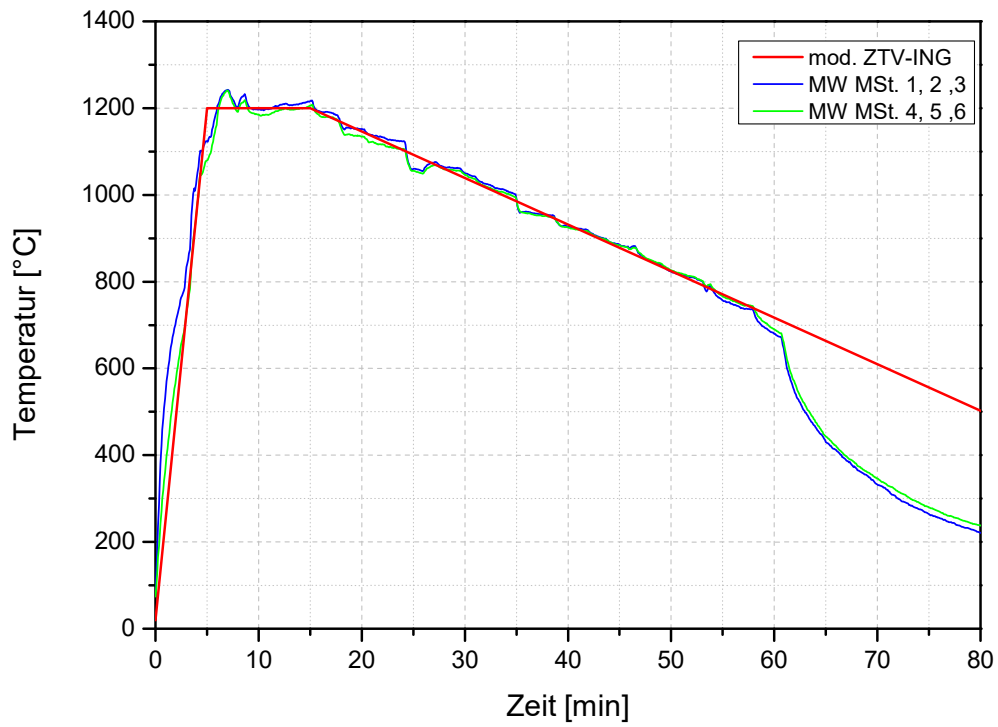


Abb. 14-41: Temperaturdaten Q-ZTV-80-1PP.

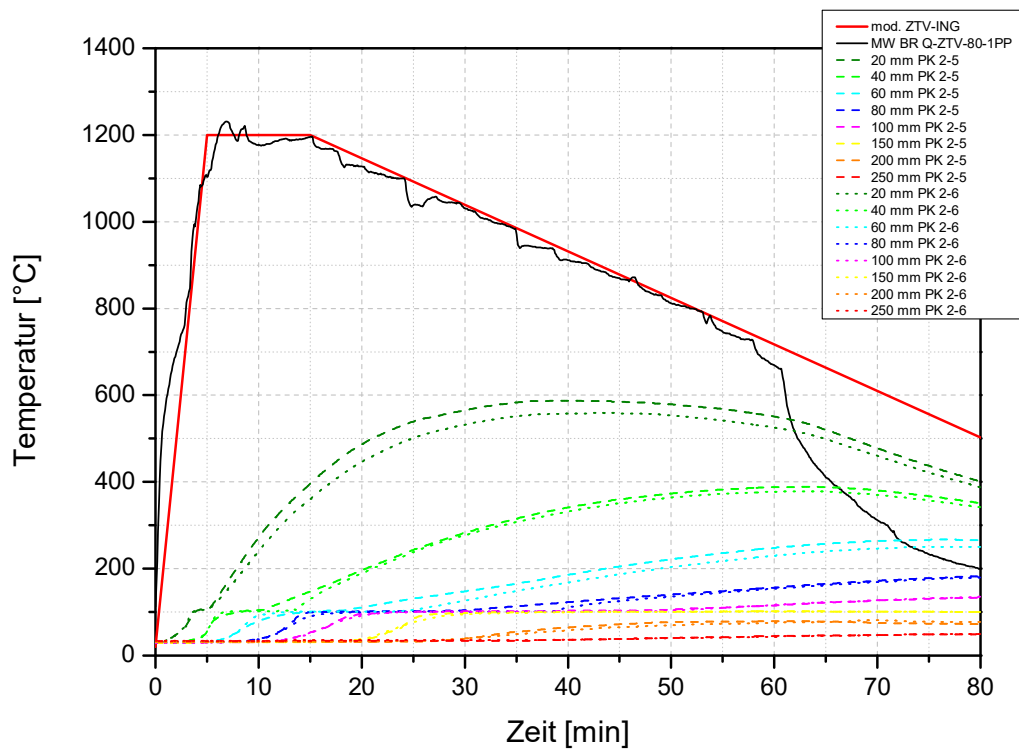


Abb. 14-42: Temperaturdaten Q-ZTV-80-1PP.

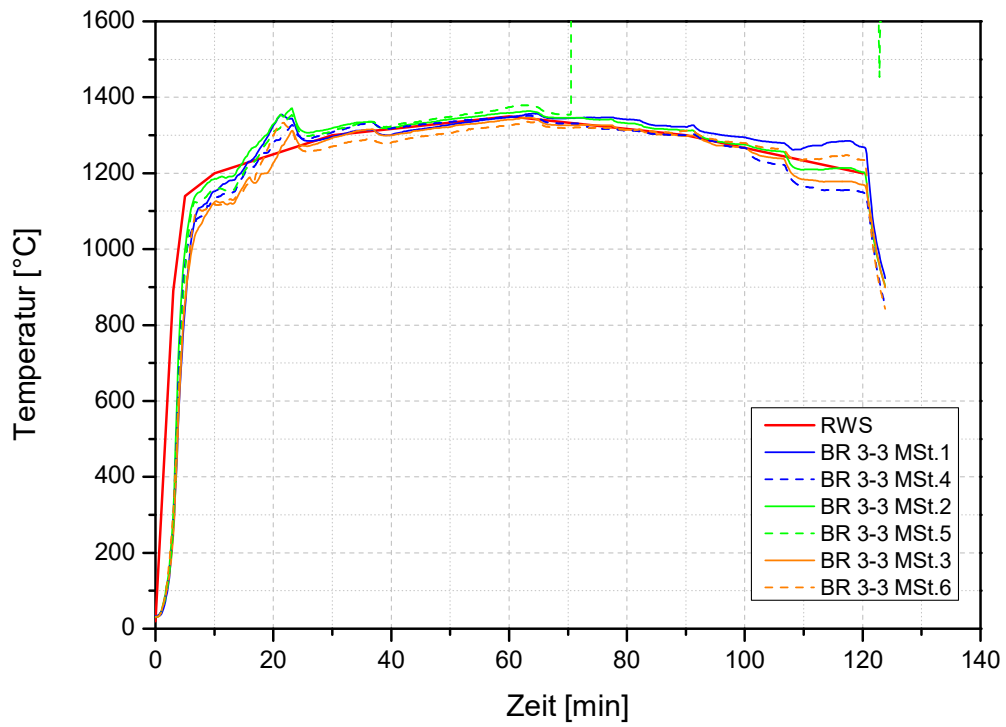


Abb. 14-43: Temperaturdaten P-HC+K-65-1,5PP_IE.

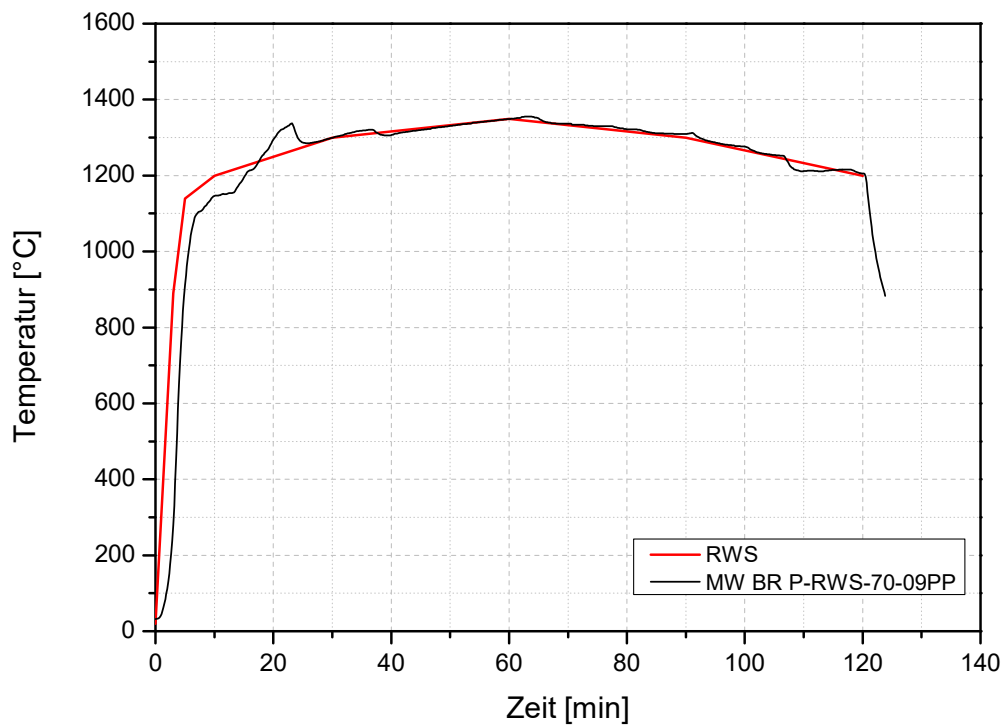


Abb. 14-44: Temperaturdaten P-HC+K-65-1,5PP_IE.

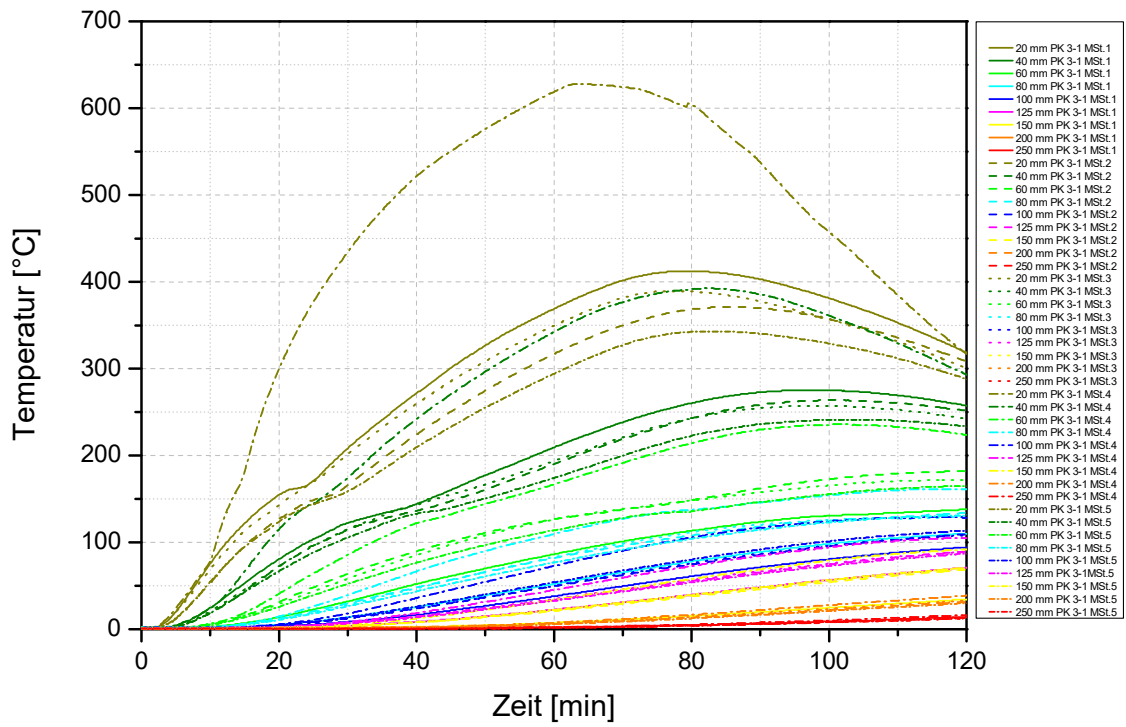


Abb. 14-45: Temperaturdaten P-HC+K-65-1,5PP_IE.

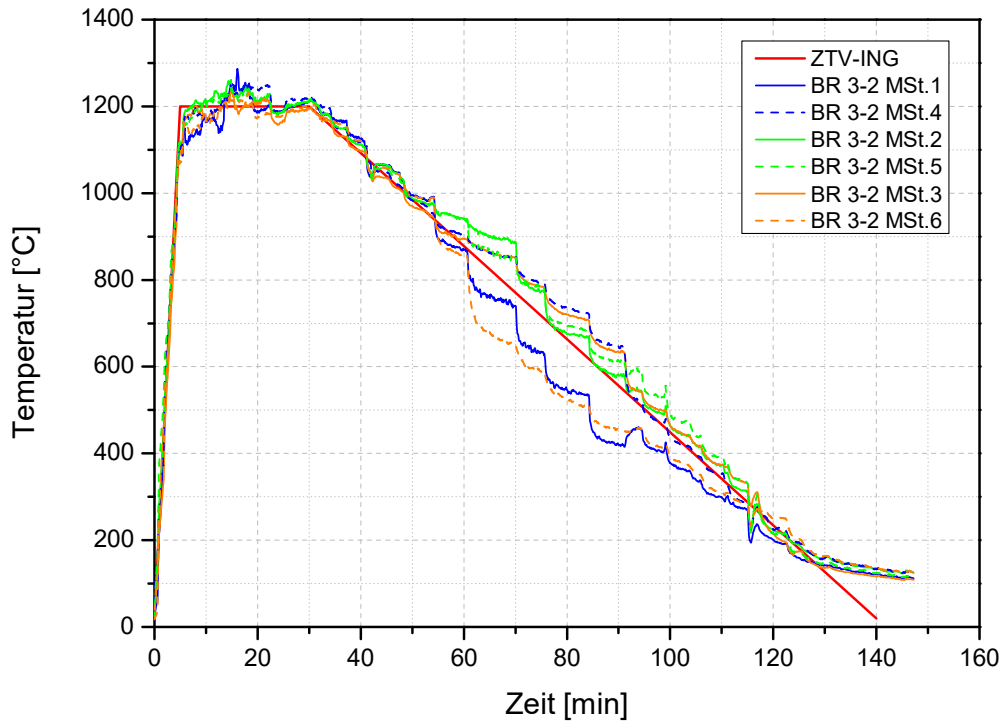


Abb. 14-46: Temperaturdaten P-ZTV-70-0,9PP.

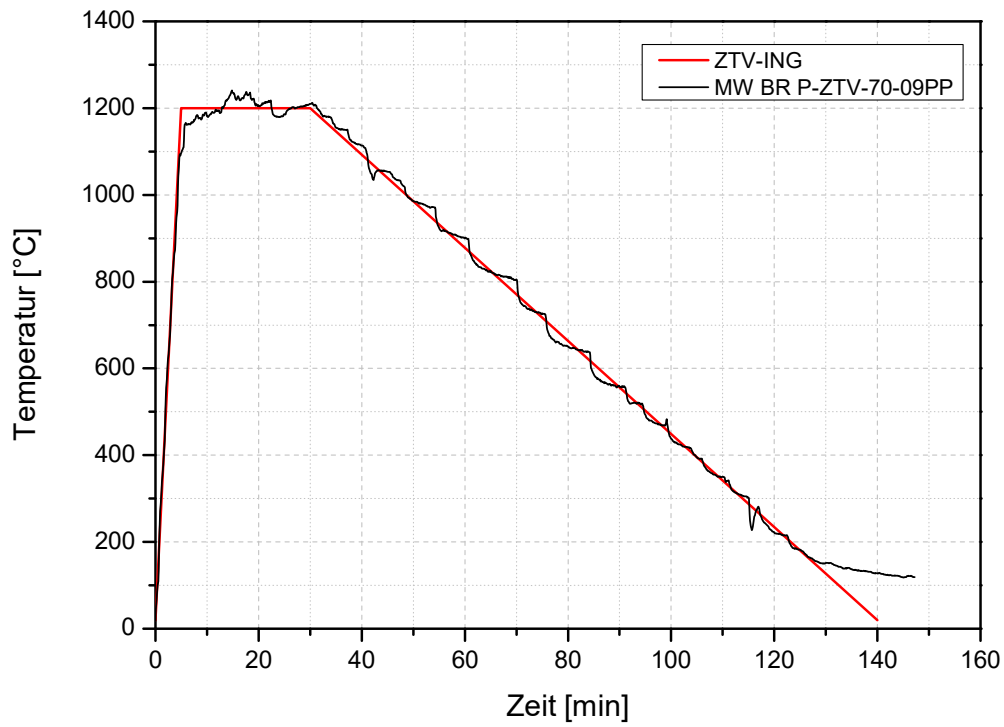


Abb. 14-47: Temperaturdaten P-ZTV-70-0,9PP.

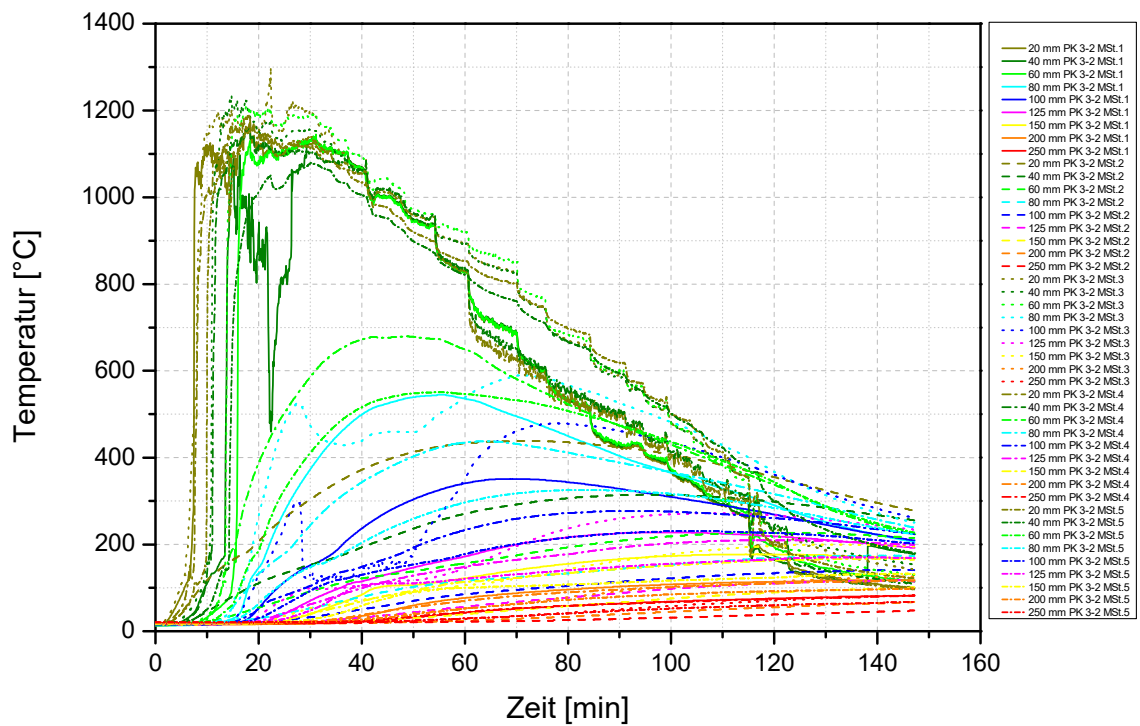


Abb. 14-48: Temperaturdaten P-ZTV-70-0,9PP.

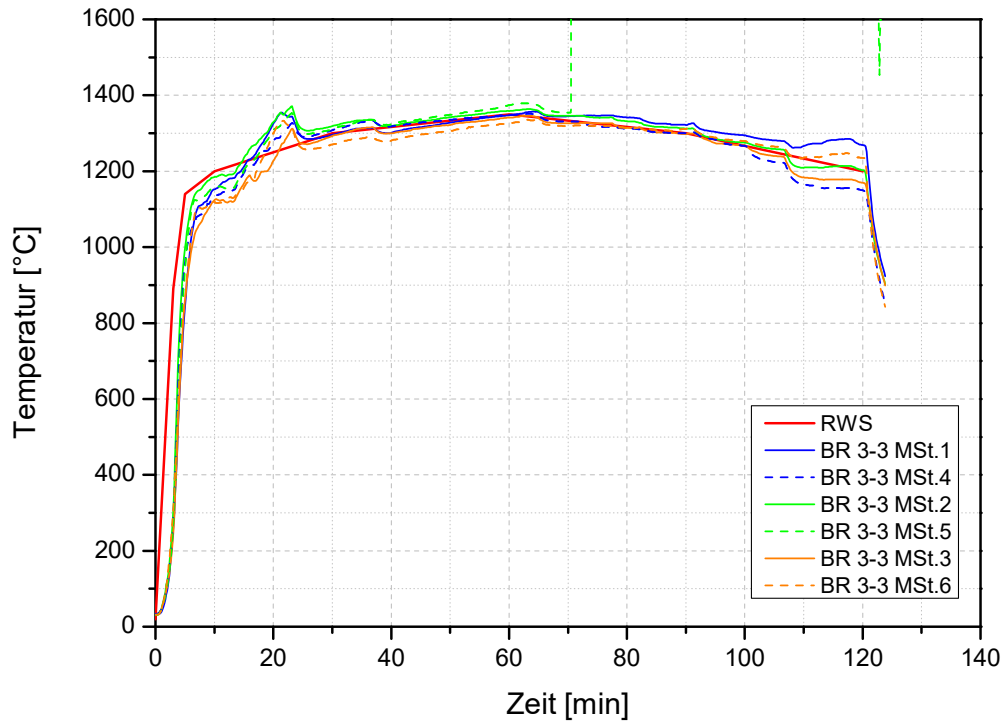


Abb. 14-49: Temperaturdaten P-RWS-70-0,9PP.

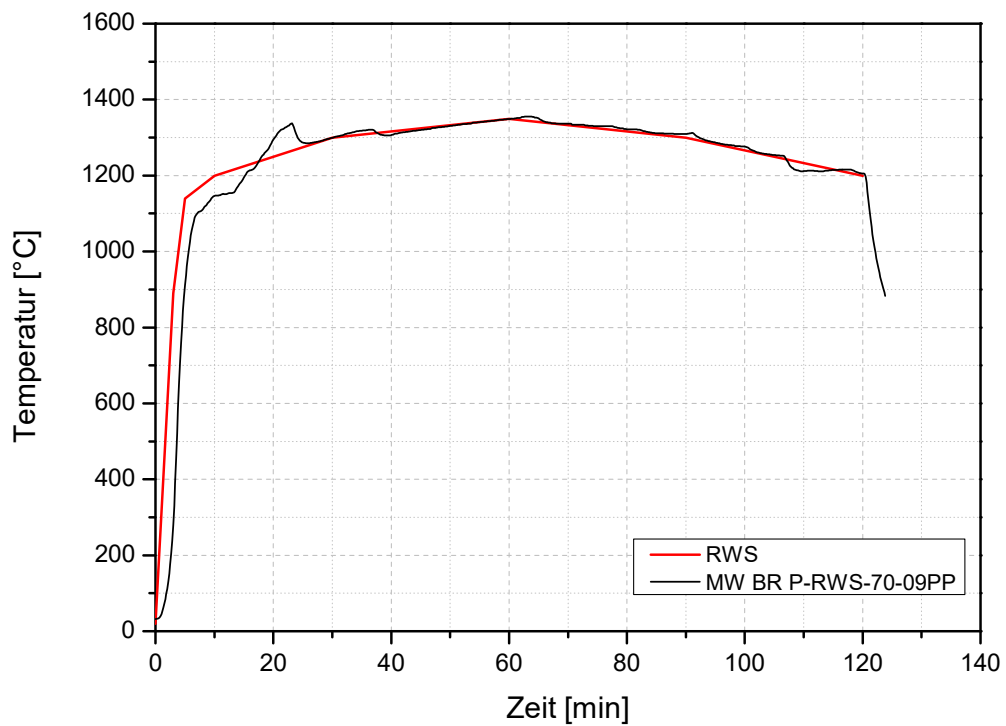


Abb. 14-50: Temperaturdaten P-RWS-70-0,9PP.

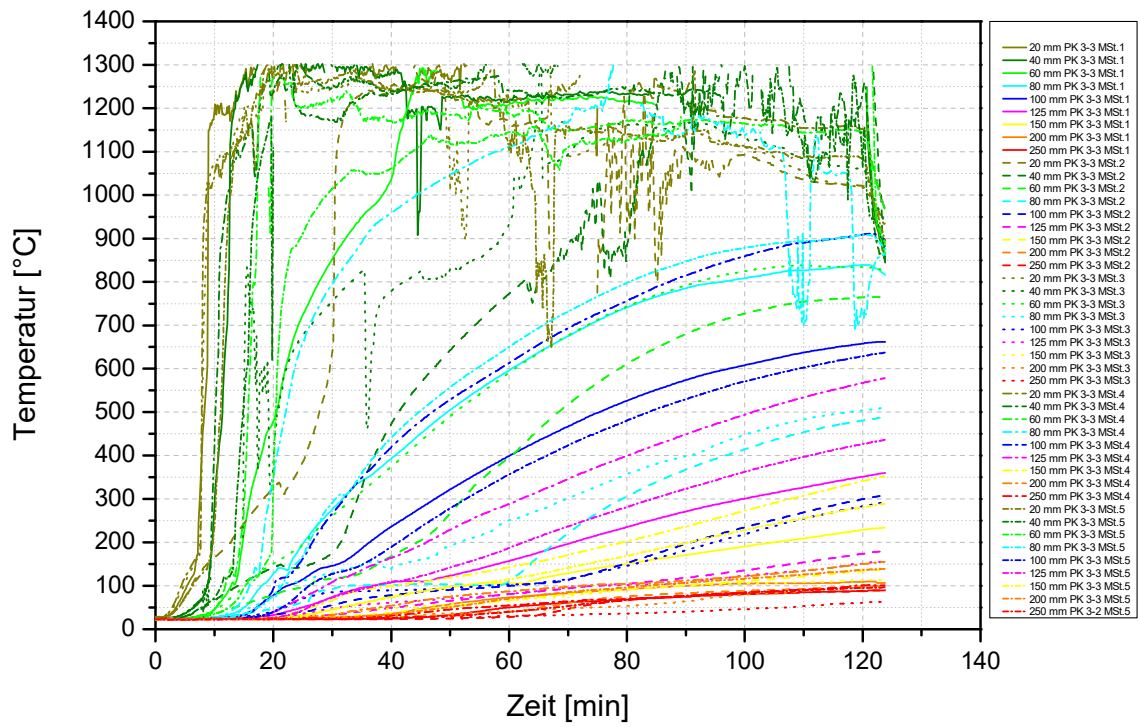


Abb. 14-51: Temperaturdaten P-RWS-70-0,9PP.

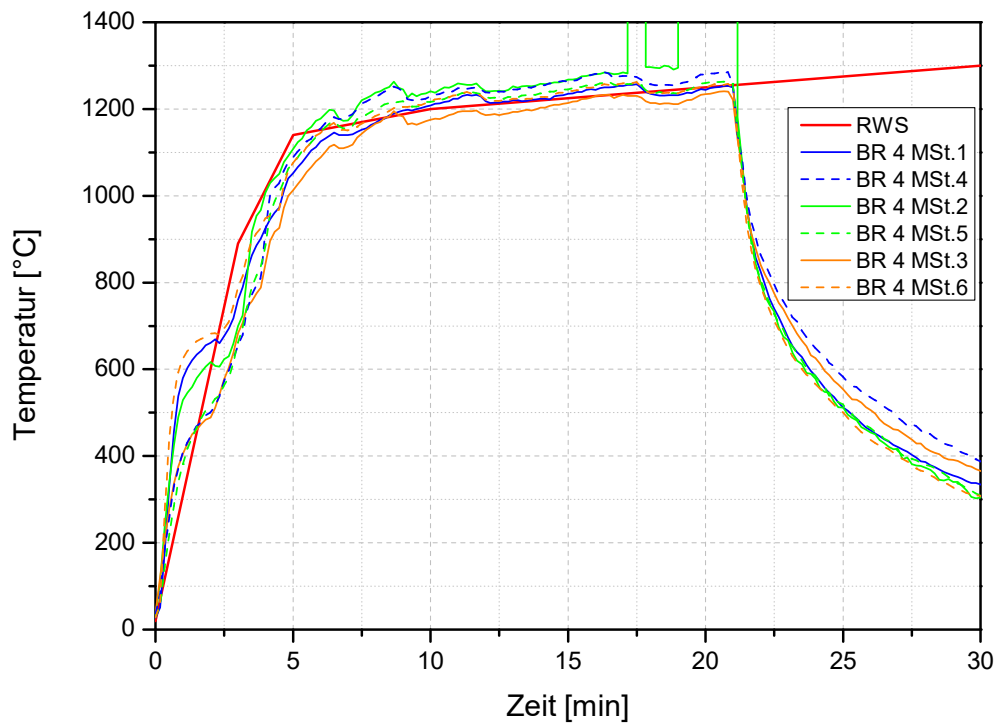


Abb. 14-52: Temperaturdaten Qk-RWS-70.

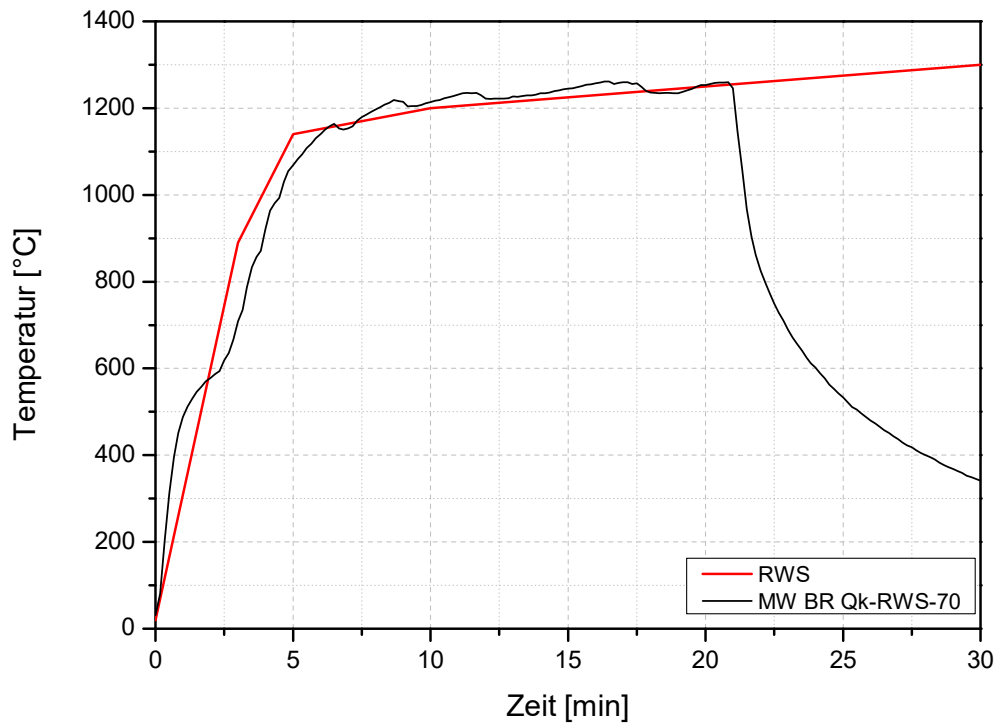


Abb. 14-53: Temperaturdaten Qk-RWS-70.

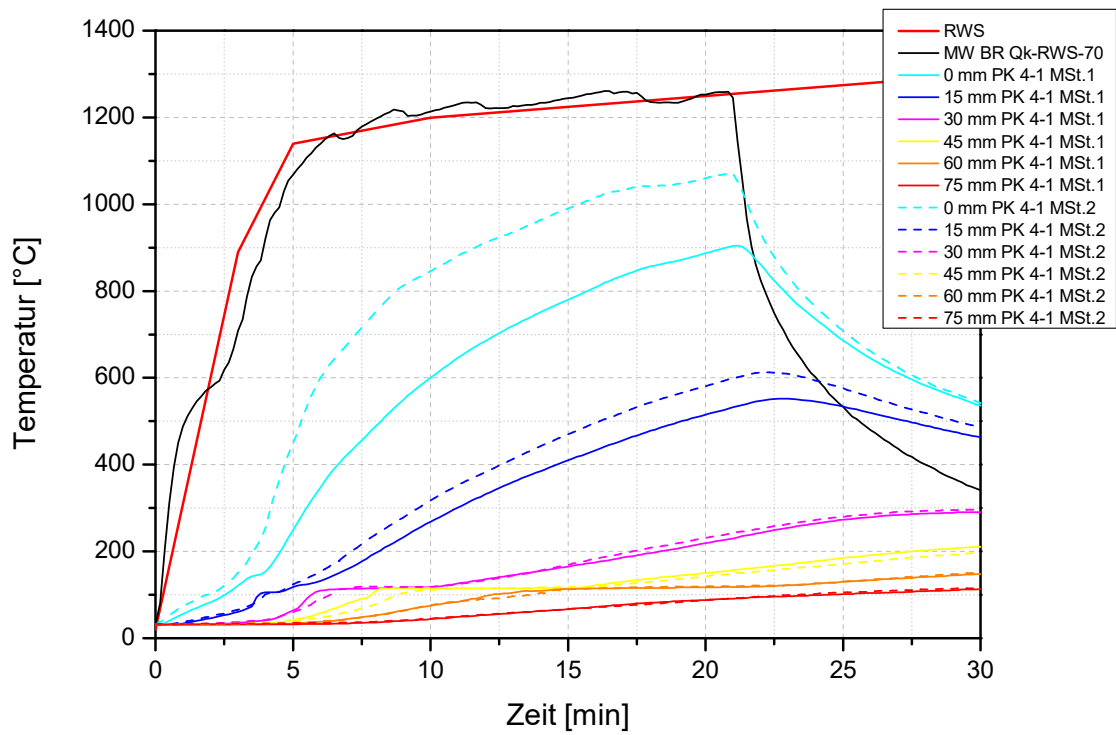


Abb. 14-54: Temperaturdaten Qk-RWS-70.

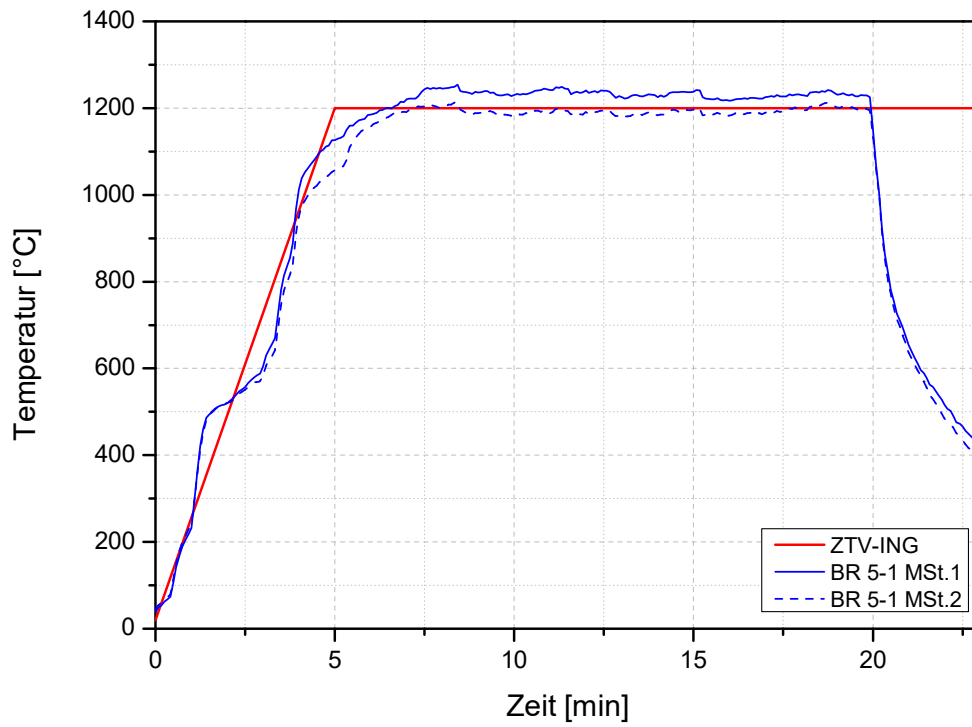


Abb. 14-55: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_unten.

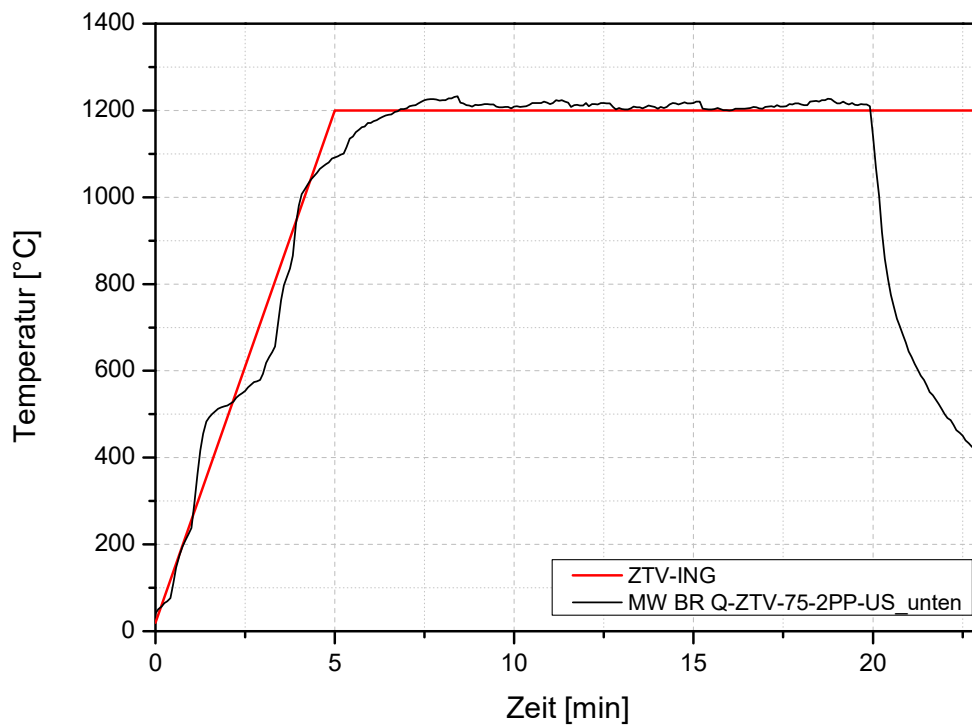


Abb. 14-56: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_unten.

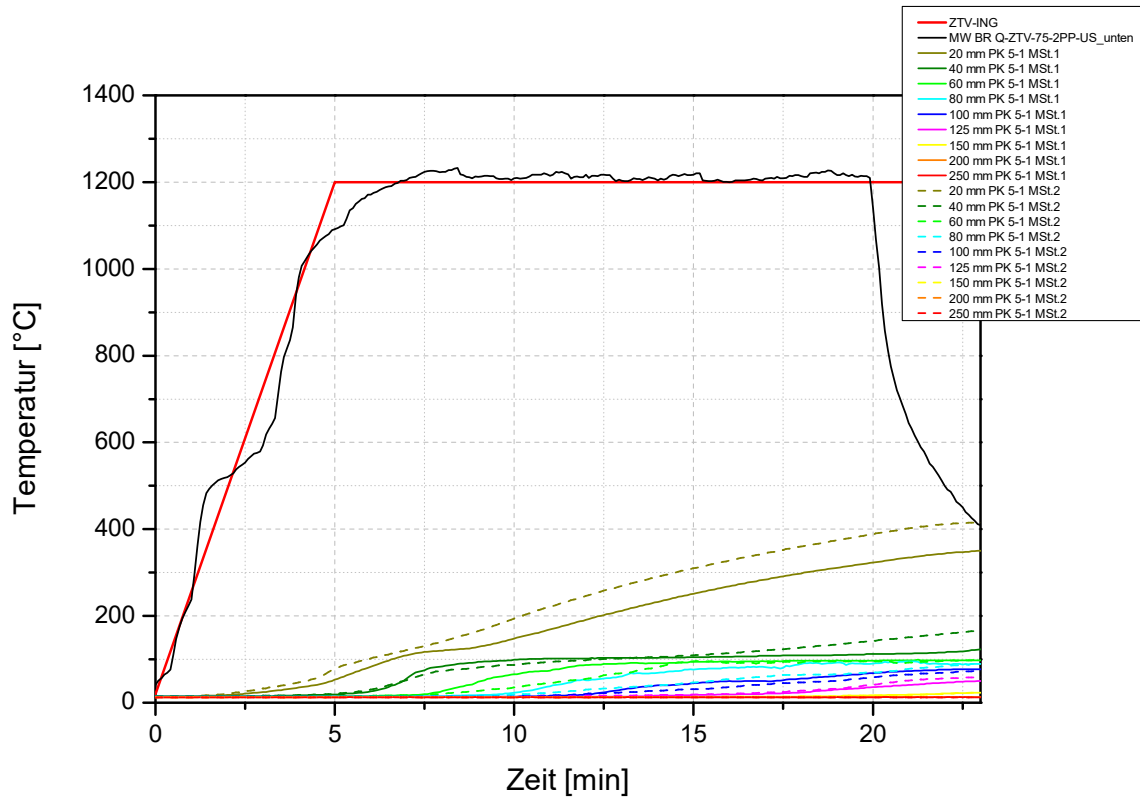


Abb. 14-57: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_unten.

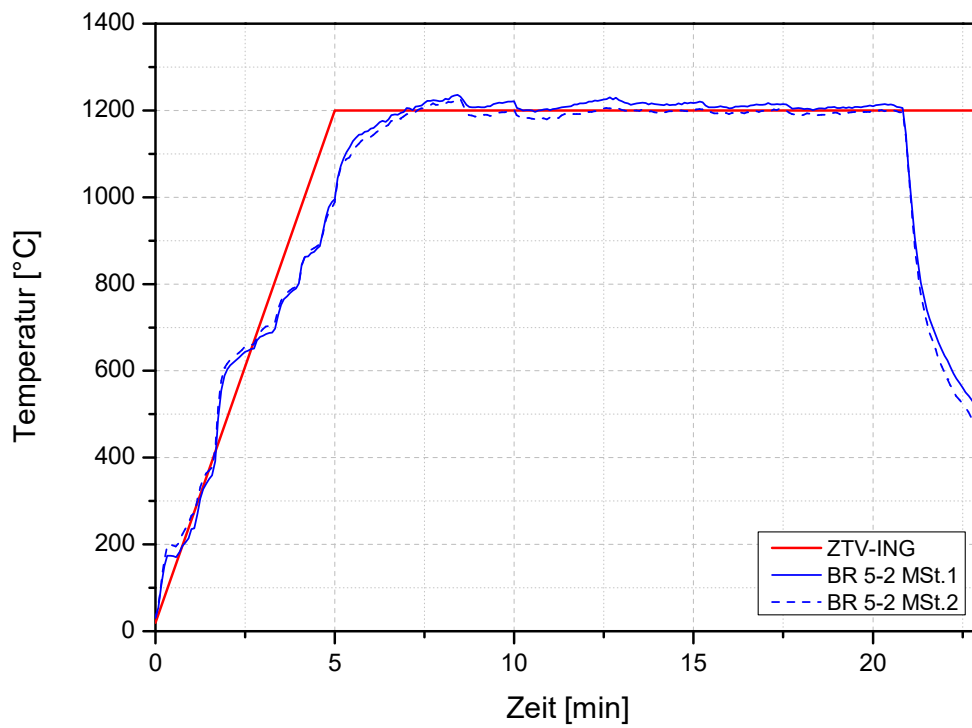


Abb. 14-58: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_oben.

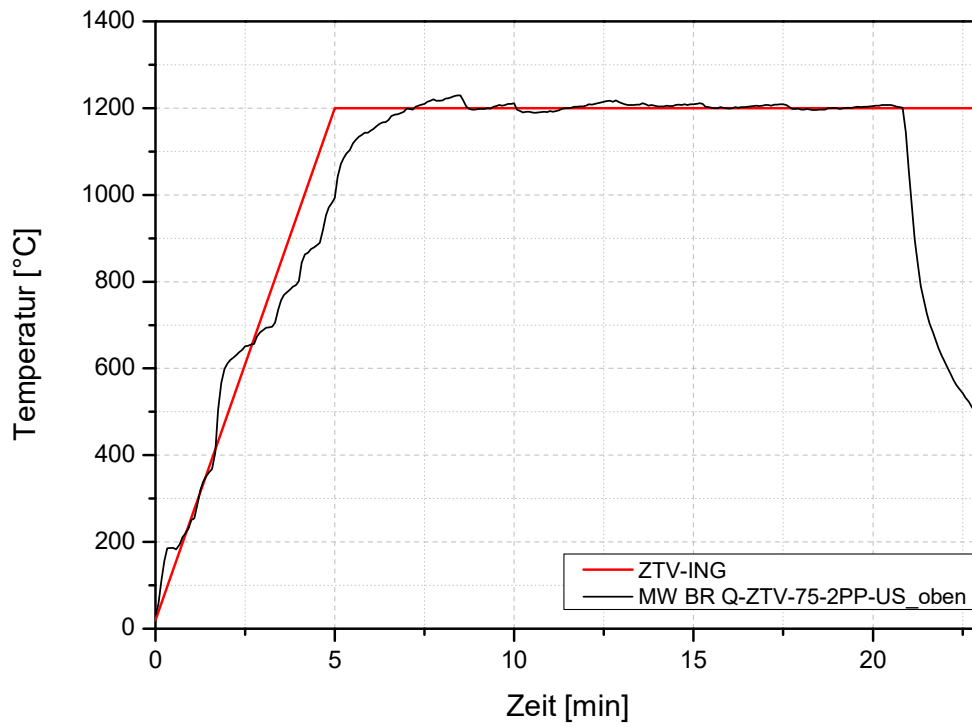


Abb. 14-59: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_oben.

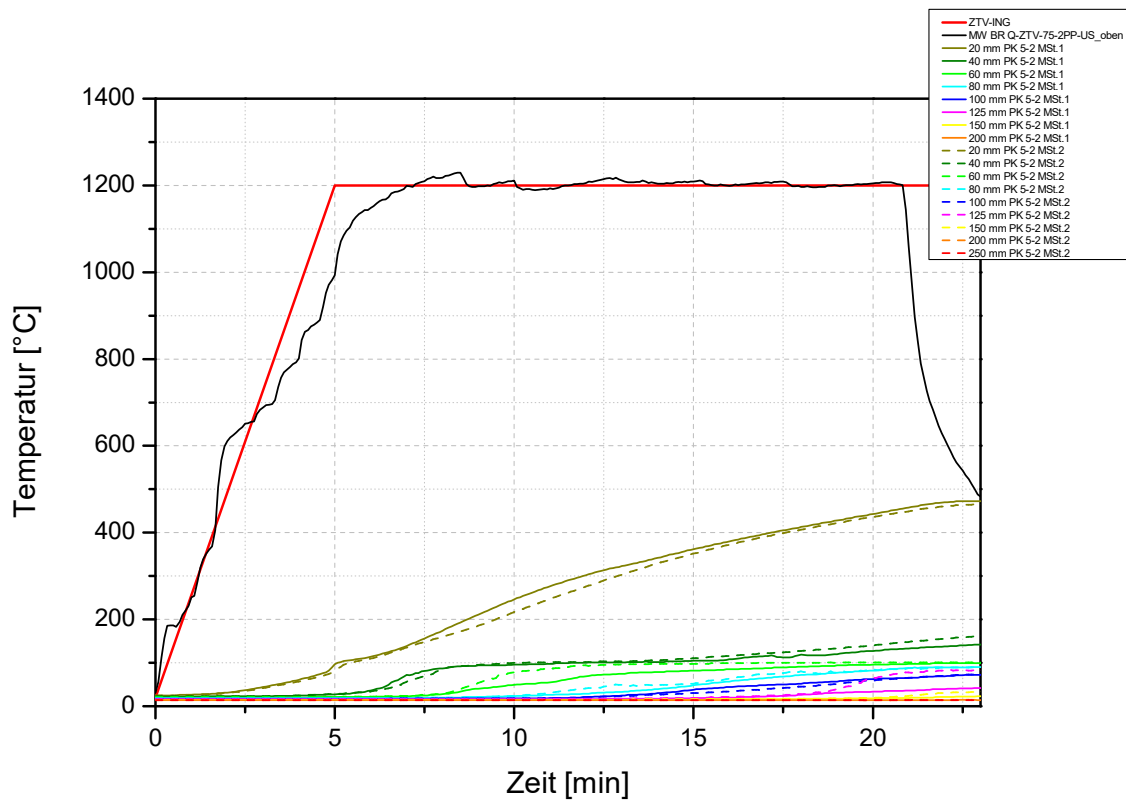
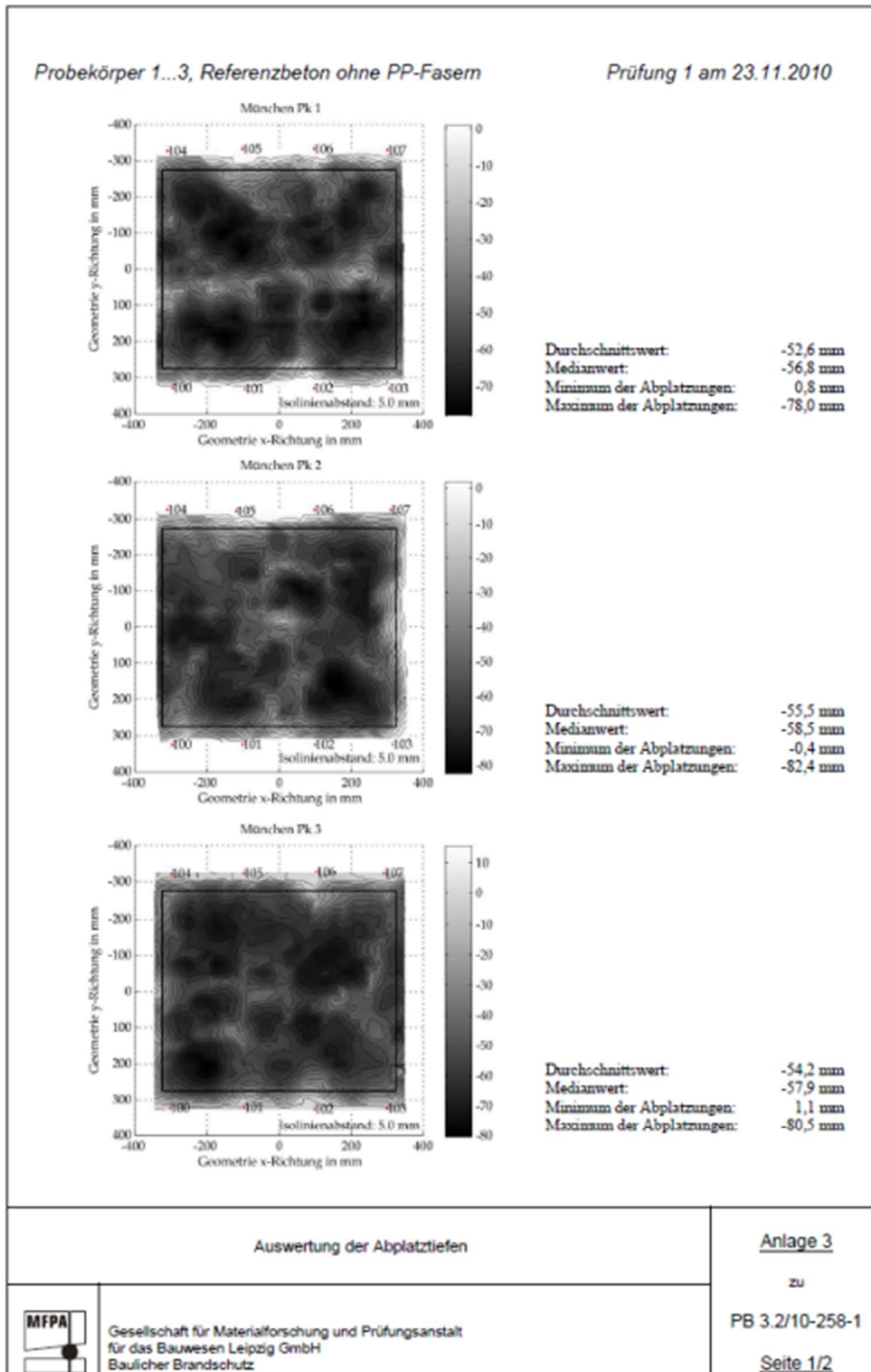


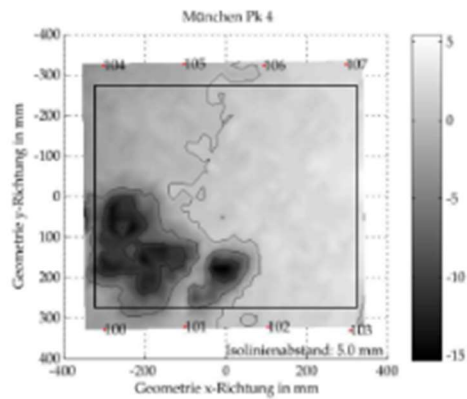
Abb. 14-60: Temperaturdaten Q-ZTV-75-2PP-US_oben.

VI. Bestimmung der Abplatztiefen mittels Lasertachymeter

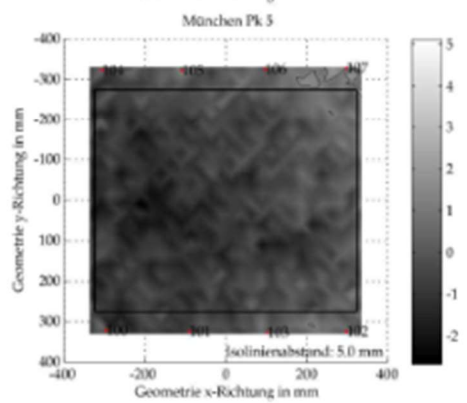


Probekörper 3...6, PP-fasermodifizierte Betonrezeptur

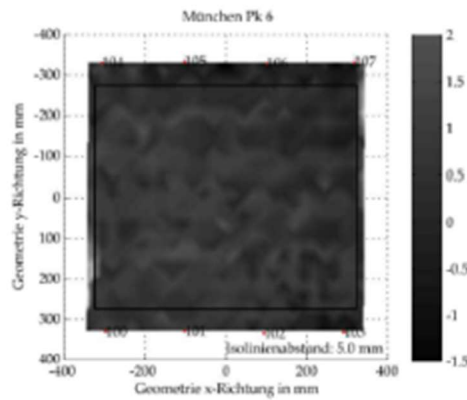
Prüfung 2 am 24.11.2010



Durchschnittswert: -1,2 mm
 Medianwert: 0,4 mm
 Minimum der Abplatzungen: 3,6 mm
 Maximum der Abplatzungen: -15,3 mm



Durchschnittswert: -0,6 mm
 Medianwert: -0,7 mm
 Minimum der Abplatzungen: 1,9 mm
 Maximum der Abplatzungen: -2,7 mm



Durchschnittswert: 0,7 mm
 Medianwert: 0,7 mm
 Minimum der Abplatzungen: 2,0 mm
 Maximum der Abplatzungen: -0,9 mm

Auswertung der Abplatztiefen

Anlage 3

zu

PB 3.2/10-258-1

Seite 2/2



Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt
 für das Bauwesen Leipzig GmbH
 Baulicher Brandschutz

Bestimmung der Abplatztiefen / Oberflächenveränderungen an den einzelnen Probekörpern

Allgemeines / Prinzip

Aufnahme der Prüffläche vor und ca. 24 Stunden nach dem Brandversuchen durch einen Oberflächenscan mittels Tachymeter vom Typ Leica TCRP 1202+ R400.

Aufnahmeraster:	15 mm x 15 mm
Prüffläche:	700 mm x 700 mm
Auswertefenster:	650 mm x 700 mm

Die Messdaten der Oberflächenscans vor und nach der einseitigen Brandbeanspruchung durch die projektgebundene, modifizierte ZTV-ING-Kurve, wurden elektronisch gespeichert und unter Zuhilfenahme von geeigneter Auswertesoftware ausgewertet.

Daraus resultieren die nachfolgend aufgeführten Daten:

- Durchschnittswert der Abplatzungen / Oberflächenveränderungen,
- Medianwert der Abplatzungen / Oberflächenveränderungen,
- Maximalwert der Abplatzungen,
- Minimalwert der Abplatzungen (ggf. ergeben sich auch Oberflächenaufwölbungen aus der Prüffläche heraus).

Begriffe:

Als Abplatzungen (-) werden die Absprengungen von der brandbeanspruchten Probekörperfläche aus (in den Probekörper hinein) definiert. Abplatzungen werden mit negativen Vorzeichen ausgewiesen.

Als Oberflächenaufwölbungen (+) werden die Volumenzunahmen der brandbeanspruchten Prüffläche aus (aus dem Probekörper heraus) definiert. Oberflächenaufwölbungen werden mit positivem Vorzeichen ausgewiesen.

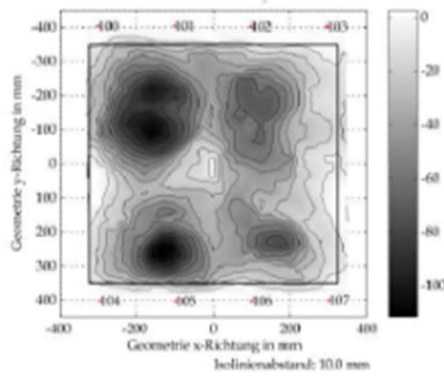
Auswertung der Abplatztiefen		<u>Anlage 4</u>
		zu
		PB 3.2/10-258-1
		<u>Seite 1/3</u>



Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt
für das Bauwesen Leipzig GmbH
Baulicher Brandschutz

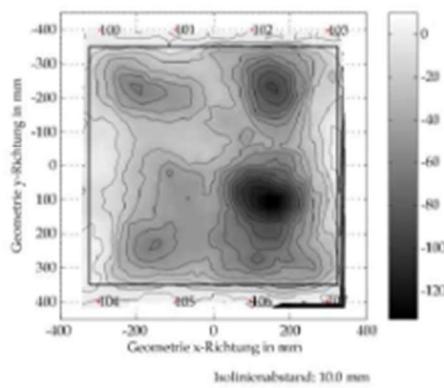
Probekörper Pk1 .. Pk3, Referenzbeton ohne PP-Fasern

Prüfung 1 am 26.07.2011



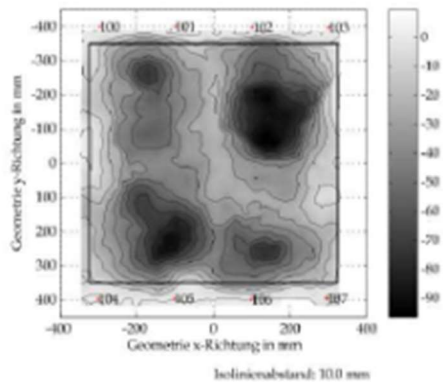
Probekörper Pk1:

Durchschnittswert: -40,2 mm
 Medianwert: -37,4 mm
 Minimum der Abplatzungen: +1,6 mm
 Maximum der Abplatzungen: -111,6 mm



Probekörper Pk2:

Durchschnittswert: -39,7 mm
 Medianwert: -37,4 mm
 Minimum der Abplatzungen: +1,3 mm
 Maximum der Abplatzungen: -133,0 mm



Probekörper Pk3:

Durchschnittswert: -40,0 mm
 Medianwert: -37,7 mm
 Minimum der Abplatzungen: +9,6 mm
 Maximum der Abplatzungen: -96,4 mm

Auswertung der Abplatztiefen

Anlage 4

zu

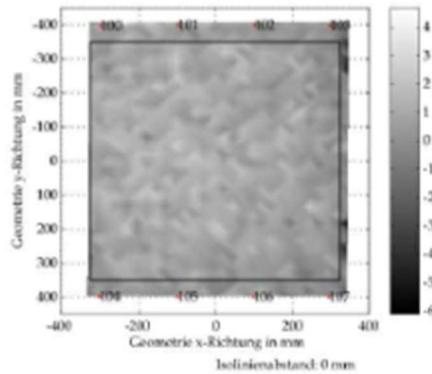
PB 3.2/10-258-1

Seite 2/3



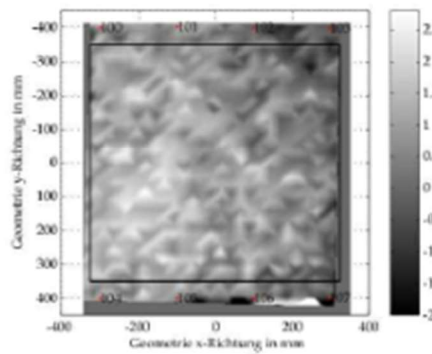
Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt
 für das Bauwesen Leipzig GmbH
 Baulicher Brandschutz

Probekörper Pk4 .. Pk6, PP-fasermodifizierte Betonrezeptur Prüfung 2 am 27.07.2011



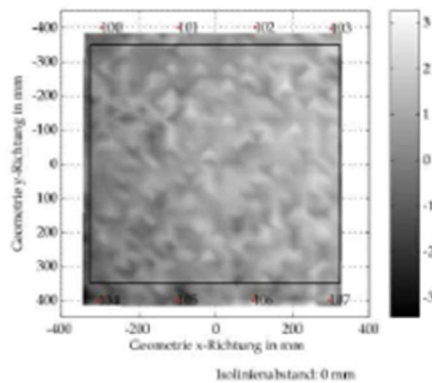
Probekörper Pk4:

Durchschnittswert: +0,8 mm
 Medianwert: +0,9 mm
 Minimum der Abplatzungen: +2,5 mm
 Maximum der Abplatzungen: -1,1 mm



Probekörper Pk5:

Durchschnittswert: +0,9 mm
 Medianwert: +0,9 mm
 Minimum der Abplatzungen: +2,8 mm
 Maximum der Abplatzungen: -2,0 mm



Probekörper Pk6:

Durchschnittswert: +0,6 mm
 Medianwert: +0,7 mm
 Minimum der Abplatzungen: +2,7 mm
 Maximum der Abplatzungen: -2,1 mm

Auswertung der Abplatztiefen

Anlage 4

zu

PB 3.2/10-258-1

Seite 3/3



Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt
 für das Bauwesen Leipzig GmbH
 Baulicher Brandschutz