

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zementgebundener Holz- faserplatten in Abhängigkeit der Plattenfeuchte

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas KOLBITSCH

E206-4

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dominik Markus SIGMUND

0626348/505

Gudrunstraße 124/5

A-1100 Wien

Wien, am 15.06.2015

Danksagung

In erster Linie will ich Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas KOLBITSCH, dafür danken, dass er es mir ermöglicht hat, diese Diplomarbeit an dem Institut für Hochbau und Technologie zu verfassen.

Mein ganz besonderer Dank ergeht an meine Betreuer Dipl.-Ing. Aleksandar Milkov RADOEVSKI und Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael JAMEK dafür, dass sie mir nicht nur mit Rat sondern auch mit Tat stets zur Seite standen. Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit, die schon zuvor - während der vorangegangenen Projektarbeit - auf welcher diese Arbeit zum Teil auch aufbaut - begann, während der gesamten Durchführung der Labortätigkeiten im Zuge dieser Diplomarbeit und der hervorragenden Betreuung und Korrektur der selbigen.

Weiters will ich mich noch recht herzlich bei Dipl.-Ing. Thomas SRDINKO für seine Hilfe und sein Know-How in allen Belangen, die die Sensortechnik und die zugehörige Programmierung betrafen, bedanken.

Ein ganz großes Dankeschön ergeht auch an meine ganze Familie, an alle meine Freunde sowie an meine Studienkollegen, die mich während meiner gesamten Studienlaufbahn tatkräftig unterstützt haben.

Kurzfassung

Den Zuschlag für ein Bauprojekt bekommt meist die Firma mit dem günstigsten Angebot bei zugleich hoher Qualität. Diese zwei Kriterien stehen jedoch häufig im großen Gegensatz zueinander. Daher werden Möglichkeiten gesucht die Kosten zu senken, ohne dabei auf ein qualitativ hochwertiges Produkt verzichten zu müssen. Neben den Materialkosten fällt ein großer Anteil der Kosten auf die Lohnkosten und Gehälter der Mitarbeiter auf der Baustelle und im Werk.

Ein Lösungsansatz hier wäre die Reduktion von Arbeitsschritten, wie es zum Beispiel der Vorteil einer verlorenen Schalung im Gegensatz zu einer herkömmlichen Schalung ist. Da hier der Vorgang des Ausschalens und der Herstellung einer geeigneten, weiterverarbeitbaren Oberfläche entfällt. Als verlorene Schalung bezeichnet man formgebende Elemente, die auf der Baustelle nach deren Errichtung mit Ortbeton verfüllt werden. Diese stellen mit dem erstarrenden Beton einen Verbund her und werden später an Ort und Stelle belassen. In Bezug auf die Qualität der Produkte wird ebenfalls nach neuartigen Möglichkeiten gesucht, kostengünstiger zu produzieren. Hier wird heutzutage vor allem auf die Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien geachtet und auf die immer wichtiger werdende Wiederverwertung von Baurestmassen.

Die Firma CETRIS® stellt hierfür zementgebundene Holzfaserplatten her, welche zu ca. 60 Volumprozent aus Holz bestehen. Einem nachhaltigen, nachwachsenden und vor allem natürlichen Rohstoff. Weiters bestehen diese aus Zement, Wasser und weniger als 2% chemischen Zusätzen. Weiters wird bei der Herstellung auch ein Recyclat aus dem Produktionsausschuss, bestehend aus mit Zement vermengten Holzspänen, beigemischt. Diese Platten eignen sich auf Grund ihrer Eigenschaften sehr gut für die Herstellung von verlorenen Schalungselementen.

Bei den hergestellten Schalungselementen ergeben sich jedoch mitunter prozessbedingte Schadensfälle, wie zum Beispiel das Abplatzen der Holzfaserplatten vom Beton, was zu Hohlstellen innerhalb des Bauteils führt. Diese Diplomarbeit versucht, die Ursachen dieser Schadensfälle zu ergründen und Lösungsansätze zu finden. Dabei wurden bruchmechanischen Kenngrößen in Zusammenhang mit der Materialfeuchtigkeit anhand von Würfelproben mittels der Keilspaltmethode nach ÖNORM B 3592 ermittelt.

Im Gegensatz zu der vorangegangenen Projektarbeit „Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton“, bei der das Hauptaugenmerk nur auf die Ergebnisse gerichtet war, geht diese Diplomarbeit einen Schritt weiter und befasst sich auch mit der Protokollierung von Messwerten während der Aushärtung der Betonproben. Die Grundidee dahinter ist, die relative Materialfeuchtigkeit während des Erhärtungsprozesses gezielt zu beobachten und dann in direkten Zusammenhang mit den Messergebnissen, also den bruchmechanischen Werten der Keilspaltmethode zu setzen. Daraus ließen sich Erkenntnisse gewinnen, die den Einfluss der Plattenfeuchtigkeit auf die Materialfestigkeit und dann weiter auf den Verbund bestätigten. Das Resultat aus den Versuchen war, das die Stellen der Schalungsplatten mit einer höheren Feuchtigkeit länger im Verbund mit dem Beton blieben.

Eine weitere vorgestellte Methode ist die Knalldetektion durch Mikrofone. Dabei werden schlagartige Abplatzungen, die durch ein Geräusch entstehen, aufgezeichnet. Während der Aufnahmen wurden keine Abplatzungen registriert. Das Ergebnis wurde dann durch manuelles Abklopfen der Schalungshaut bestätigt.

Abstract

Usually, the firm offering the lowest price in combination with the highest quality is chosen for the realization of construction projects. However, those two criteria are often in conflict with each other. Hence, possibilities to decrease costs without abstaining from high-quality products are searched. In addition to material costs, salaries and related personnel costs (for both employees working at the site and in the plant) are one of the main cost drivers in construction projects.

A possible approach would be to reduce work steps – e.g. having a permanent formwork instead of a normal formwork makes shuttering and the production of a suitable, processable surface unnecessary. Permanent formworks are forming elements which are pre-fabricated and filled with concrete after its erection directly at the site. The elements compound with the concrete and are then left at the site. In connection with product quality, also new alternatives are looked for in order to improve cost efficiency in the production process. In this respect, the sustainability of the used raw material and the recyclability of reused products become more and more important.

The company Cetris produces cement-bonded wood fiberboards which consist of 60 percent by volume of wood – a sustainable, renewable and above all natural raw material. Those boards also contain cement, water and less than 2% of chemical substances. A recycle resulting from the production waste consisting of cement and chipped wood is also added during the production process of the boards. Because of their attributes these boards are used for permanent formwork.

Unfortunately the formwork boards show cases of damage, like a spalling of the boards from the concrete, which leads to cavities within the structural element. This diploma thesis aims at examining these damages and their causes and tries to propose solutions for them. The consumption mechanical characteristics in reliance with the formworks humidity were evaluated on cube samples by a method, known as Wedge Splitting Test and was conducted as described in ÖNORM B 3592

This diploma thesis aims at expanding the existing research „Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton“ which was done in the same field and primarily focused on results by additionally dealing with the recording of measured values during the hardening phase of the concrete samples. The underlying idea is, to systematically observe the relative humidity of the material during the hardening process and to study its correlation to the measurement results (ie. the fracture mechanic values) obtained from the wedge-splitting method. This allows us to gain insights into the impacts of slab humidity on the strength of the material and also on the compound structure. The results showed that areas of the fiberboards with a higher humidity bond better with the concrete.

A further approach presented in this paper is the bang detection via spring-loaded condenser microphones. In this case, the main concept is that the spalling inside of a formwork-concrete compound is accompanied by a clearly audible noise.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Überblick zu den bisher durchgeführten Untersuchungen.....	1
1.3 Ziel der Arbeit.....	3
1.4 Einleitung.....	3
2 Die CETRIS-Platte [3]	5
2.1 Bestandteile der Cetris-Platte.....	5
2.2 Herstellung der Cetris-Platte.....	6
3 Schalungen [3]	10
3.1 Entwicklung der Schalungen	10
3.1.1 Schalträger.....	11
3.1.2 Schalplatten	11
3.1.3 Trennmittel	11
3.1.4 Ankerung.....	12
3.2 Verlorene Schalung.....	13
3.3 Das Schalungssystem mittels <i>Cetris</i> ®-Platten	14
4 Selbstverdichtender Beton [3]	16
5 Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test [4]	19
6 Schallpegelmessung zur Knalldetektion	24
6.1 Einleitung.....	24
6.2 Versuchsprinzip	24
6.3 Versuchsaufbau.....	25
6.4 Versuchsauswertung	28
6.5 Ergebnisse	30
7 Feuchtigkeitsuntersuchungen mittels Sensoren	31
7.1 Einleitung.....	31
7.2 Aufgabenstellung und Messprogramm	31
7.3 Messtechnik	32
7.3.1 Sensoren.....	33

7.3.2	Der Multiplexer	37
7.3.3	Arduino	47
7.4	Probenherstellung	50
7.4.1	Vorversuch.....	50
7.4.2	Herstellung und Präparierung der Sensorplatten	52
7.4.3	Herstellung der Betonproben.....	59
7.5	Messungen der Würfelproben – Versuchsdurchführung	66
7.5.1	Plattenfestigkeit: Versuchsproben RF	66
7.5.2	Verbund mit Sensoren: Versuchsproben SF-SN	72
7.5.3	Verbund ohne Sensoren: Versuchsproben RN	75
7.6	Ergebnisse	77
7.6.1	Plattenfestigkeit: Versuchsproben RF	77
7.6.2	Verbund mit Sensoren: Versuchsproben SF-SN	78
7.6.3	Verbund ohne Sensoren: Versuchsproben RN	89
7.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zum Verbund- und zur Plattenfestigkeit aller Testreihen	91
8	Zusammenfassung	95
	ANHANG A:	97
	ANHANG B:	99
	ANHANG C:	102
	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	103
	Abbildungsverzeichnis	104
	Tabellenverzeichnis	107

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zuge der Projektarbeit am Institut "Hochbau und Technologie" an der Technischen Universität Wien wurden wir - Dominik Sigmund und Christian Hanisch - auf eine neuartige Schalungstechnik basierend auf dem System der verlorenen Schalungen mittels Platten aus Holz-Zement aufmerksam gemacht. Hierbei handelt es sich um zementgebundene Holzfaserplatten, die dem Beton als formgebende Schalung dienen und später am Betonbauteil verbleiben. Da es bei der praktischen Anwendung des Systems immer noch zu Fehlern im Verbund zwischen den zementgebundenen Holzfaserplatten und dem selbstverdichtenden Beton kam, sollte die Projektarbeit mit dem Titel "*Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*" sich mit der Suche nach Lösungsmöglichkeiten und einer genauen Analyse der Einflussfaktoren auf die Verbundqualität befassen.

Wir begannen uns intensiv mit der Problematik und diesem Schalungssystem auseinanderzusetzen und erkannten das enorme Potential, welches sich in diesem Bauverfahren verbirgt. Die vielseitige Einsatzmöglichkeit und Flexibilität, sowie der hohe Grad an werkseitiger Vorfertigung der Schalungen aus der zementgebundenen Holzfaserplatte erlauben es damit in kürzester Zeit, kostengünstig Wände, Decken und Treppen herzustellen. In der Verkürzung der Bauzeit liegt die Effizienz dieses Schalverfahrens, da dadurch der größte Teil der Kosten - die Lohnkosten - reduziert werden können. Neben der Kostenreduktion wurde auch das Thema Nachhaltigkeit zum zweiten wesentlichen Punkt im harten Konkurrenzkampf der Bauunternehmen. Der Holzanteil von bis zu 60% der Schalplatten kommt nicht nur dem Ruf nach erneuerbaren Baustoffen nach, sondern ist zudem auch noch äußerst gut recycelbar und nutzt zudem auch viele positiven Einflüsse des Werkstoffes Holz im Allgemeinen.

Da es sich jedoch um ein sehr neuartiges Verfahren handelt, ist dieses innovative Verfahren leider noch nicht gänzlich frei von Fehlern und immer wieder auftretenden Schadensfällen. Um die Hinter den Schäden stehenden Mechanismen und materialspezifischen Abläufe verstehen und lösen zu können, wurden an der technischen Universität Wien unter der Führung von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch weitere Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt, welche in dieser Diplomarbeit beschrieben, protokolliert und bewertet wurden, um die Mechanismen zu analysieren und diesem vielseitigen Baustoff der Zukunft weiter zu verbessern.

1.2 Überblick zu den bisher durchgeführten Untersuchungen

Um den Verbund zwischen den ca. 150x150x24 mm großen Plättchen und dem selbstverdichtenden Beton bestimmen zu können, wurde eine Reihe von unterschiedlichen Messvariationen angelegt. Diese unterschieden sich sowohl in der Vorbehandlung der Platten als auch in der Lagerung während der 28 Tage der Aushärtung des Betons bis zum Test. Hierbei wurde vor allem der Einfluss der Feuchtigkeit untersucht. Insgesamt wurden 84 Proben in 7 unterschiedlichen Messchargen zu je zweimal sechs Proben hergestellt. Neben Vorbehandlungen, wie Trocknen, Tiefkühlen oder Wassersättigen der Platten, wurden auch eine veränderte Betonrezeptur und eine Kontrollgruppe aus unbehandelten Plättchen getestet.

Die Herstellung aller Proben der verschiedenen Messchargen erfolgte in einem "Präparationsraum", der immer ähnliche klimatische Bedingungen aufwies. Um den Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit während der Aushärtung erheben zu können, wurden sechs Proben einer Charge jeweils in einem Raum mit höherer Luftfeuchtigkeit und weitere sechs Proben derselben Charge in einem Raum mit niedrigerer Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach Ablauf der 28 Tage wurden die Proben entsprechend vorbereitet und mittels Keilspaltverfahren, welches später im Kapitel 5 "*Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test*" genauer beschrieben wird, getestet. Als Ergebnis erhielten wir 2 bruchmechanische Werte: Kerbbiegezugfestigkeit und spezifische Bruchenergie. Aus diesen Messwerten und einer quantitativen Beurteilung der Bruchflächen ließen sich Rückschlüsse auf die Qualität des Verbundes schließen.

Alle Proben wurden auf dieselbe Art und Weise getestet und anschließend vermessen und dokumentiert. Die im Keilspaltversuch gemessenen Werte von Bruchenergie und Kerbbiegezugfestigkeit wurden in eine „feuchte“ und eine „trockene“ Gruppe gegliedert. Hier wurden als Ausgangspunkt die Ergebnisse der Standardproben herangezogen. Die besten Ergebnisse erzielten die Platten, die mittels der Betonvariation – einem geringeren Anteil an Fluamix C und damit um einen 0,60% höheren Zementanteil – hergestellt wurden. Auch die von der Firma *CETRIS*® gelieferten Plättchen mit der veränderten Oberfläche konnten sowohl in der Gruppe „feucht“ als auch in der Gruppe „trocken“ ähnlich gute Werte erzielen, wiesen dabei aber eine wesentlich geringere Streuung auf als die Ergebnisse der Standardproben. Eindeutige Ergebnisse lieferten die Varianten der Chargen, die vorbehandelt wurden. Sowohl eine Trocknung der Platten als auch eine Wassersättigung bzw. Abkühlung auf -20 °C erreichten nur sehr schlechte Verbundwerte. Da diese Verfahren in der Praxis nur schwer bei der Herstellung anwendbar sind und wie gezeigt werden konnte, keinen positiven Einfluss auf den Verbund erzielen würden, scheidet diese für weitere Untersuchungen aus. In der Unterscheidung der Lagerung hingegen zeigte sich, dass die Gruppe der „feucht“ gelagerten Proben einen – wenn auch nur geringfügig – besseren Verbund aufwiesen als die vergleichbaren Proben der „trockenen“ Lagerung.

Die enorme Streuung der Ergebnisse und die unerwartet guten Ergebnisse der Betonvariation waren ausschlaggebend, weitere Untersuchungen in diese Richtung anzustellen. Da hierbei die Einflussfaktoren noch nicht gänzlich geklärt werden konnten und es sich um ein sehr umfangreiches Forschungsgebiet handelt, arbeiten wir - Dominik Sigmund und Christian Harnisch - gemeinsam im Zuge zweier Diplomarbeiten weiter an der Lösung dieses Problems.

Die Gesamte Arbeit gliedert sich in zwei Abschnitte:

- Teil 1: *Untersuchungen zur Materialfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*
- Teil 2: *Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*

1.3 Ziel der Arbeit

Im ersten Teil dieser Diplomarbeit soll die Frage beantwortet werden, wie sich ein Kompositwerkstoff, bestehend aus Holz und Zement, unter dem Einfluss der Feuchtigkeit verhält.

Im zweiten, Ihnen hier vorliegenden, Teil wird dabei die Frage geklärt, welchen Einfluss die Feuchtigkeit auf den Verbund zwischen dieser zementgebundenen Holzfaserplatte und dem Beton ausübt.

Für die Beurteilung werden bruchmechanische Kennwerte wie die Kerbbiegezugfestigkeit σ_{KBZ} und die spezifischen Bruchenergie G_F herangezogen. Die Ermittlung dieser Kenngrößen erfolgt mittels des Keilspaltverfahrens nach ÖNORM B 3592, womit sowohl eine Untersuchung des Verbunds zwischen der zementgebundenen Holzfaserplatte und des Betons, also auch die Materialfestigkeit der Platte selbst erfolgen kann.

Bei erwähntem Keilspaltverfahren, wird eine Würfelprobe mittels einer Spaltvorrichtung, auf den durch die Prüfmaschine eine horizontale Druckkraft aufgetragen wird, gespalten. Dabei werden die Kräfte und die Öffnung des Risses gemessen und, wie später in Kapitel 5: „*Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test [4]*“ beschrieben wird, ausgewertet. Um die Verbundfestigkeit zu erhalten, findet der Spaltvorgang genau im Interface zwischen der Schalungsplatte und dem Beton statt.

Um die rel. Feuchtigkeit in diesem Verbund messen zu können, wurden Messsensoren in die Versuchsplatten eingebaut die eine digitale Auswertung der Prüfergebnisse ermöglichen.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Annahme, dass die Abplatzungen der Schalungsplatten vom Beton mit einem deutlich hörbaren Knall einhergehen, was mit einem Experiment in einem Testhaus untersucht wurde.

1.4 Einleitung

Diese Arbeit baut auf die bereits erwähnte Projektarbeit „*Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*“ auf, während der schon einige wichtige Aspekte zu den zementgebundenen Holzfaserplatten aufgezeigt wurden.

Für die Herstellung der meisten Hochbauten kommen im Allgemeinen Schalungen aus Holz zum Einsatz, die nach dem Erreichen der Frühfestigkeit des Betons wieder entfernt werden und für einen weiteren Einsatz gesäubert und vorbereitet werden müssen. Schalungen in Kombination mit dem Massenbaustoff Beton sind in der heutigen Zeit aus dem modernen Hoch- und Tiefbau nicht mehr wegzudenken. Dies ist nicht zuletzt der Grund weshalb viele Firmen auf dem Gebiet der Schalungstechnik nach Innovationen suchen.

Bei der Herstellung von Hoch- und Tiefbauten entfällt ein wesentlicher Teil der Baukosten auf die Löhne der Arbeiter. Um auf einem Gebiet mit hohem Konkurrenzdruck bestehen zu können, ist es notwendig die Kosten mittels neuartiger Produktionsverfahren bei gleichbleibender Qualität auf ein möglichst niedriges Niveau zu senken, um sich damit einen Vorteil im freien Wettbewerb verschaffen zu können. Im Hochbau beträgt der Lohnanteil bei der Herstellung mit konventionellen Schalungen ungefähr 80%. Aus diesem Grund wird auf Alternativen wie "verlorene Schalungselemente", bei welchen der Aufwand für das Ausschalen und das Reinigen der Elemente entfällt und somit eine Zeitersparnis mit sich bringt, zurückge-

griffen. Ein wirtschaftlicher Erfolg lässt sich genau dann erzielen, wenn die Materialkosten der Alternativvariante geringer sind als die Herstellungskosten mittels konventionellen Schalungen. Die zu Grunde liegende Funktionsweise aller sich derzeit am Markt befindlichen Systeme, die auf "verlorene" Schalelemente basieren, ist das Verbleiben der für den Beton formgebenden Elemente als Teil des Bauteils, ein sich zu diesen nichttragenden Elementen bildender Verbund und mit der Außenseite der Elemente eine ohne weitere Maßnahmen weiterverarbeitbare Oberfläche gegeben ist. [3]

Neben dem auf der zementgebundenen Holzfaserplatte der Firma *CETRIS*[®] basierenden System befinden sich noch etliche andere Produkte, wie z.B. Polystyrolschalsteine auf dem Markt. Die Anforderungen, die an Baustoffe im Allgemeinen gestellt werden, haben sich in den letzten Jahren stark in die Richtung der erneuerbaren Werkstoffe und nachhaltiger Produktionsmethoden hin entwickelt. Da die Firma *CETRIS*[®] bei der Herstellung der Platten zum größten Teil Holzabfälle weiter verarbeitet, erfüllt sie diese Anforderungen und könnte sich, nicht zuletzt wegen ihrer Flexibilität und Vielseitigkeit, zu einer zukunftsweisenden Alternative zu der Verwendung herkömmlicher Schalungssysteme entwickeln.

Durch die aus dieser Arbeit vorangegangenen Projektarbeit erlangten Erkenntnisse war es nun möglich, weitere Messprogramme und Untersuchungen zu erstellen, die noch offene Fragen klären und damit helfen konnten, die in Zusammenhang mit dem Einsatz der zementgebundenen Holzspanplatten als verlorene Schalungselemente auftretenden Schadensfälle in Zukunft zu vermeiden.

Im 1. Teil unserer Diplomarbeit mit dem Titel "*Untersuchungen zur Materialfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*" wurde das Hauptaugenmerk auf den Zementgehalt der zementgebundenen Holzfaserplatten und deren Verhalten bei zunehmender Plattenfeuchte während der Aushärtung, Lagerung und im Endzustand gelegt.

Im 2. Teil dieser Diplomarbeit die den Titel „*Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*“ trägt wird das Hauptaugenmerk hingegen nicht mehr auf die Materialeigenschaften, respektive den Zementgehalt geworfen, sondern auf den Verbund zwischen dem selbstverdichtendem Beton und der *CETRIS*[®]-Platte selbst. Hierzu bediente ich mich digitalen Untersuchungsmethoden, wie einer Akustikversuchsreihe mit Knalldetektion und einer Sensorversuchsreihe, die Feuchtigkeit und Temperatur im Interface zwischen den beiden besagten Materialien misst.

2 Die CETRIS-Platte [3]

Durch die hohe Konkurrenz am Bausektor ist es im Zuge der Angebotsabgabe enorm wichtig, die geforderte Leistung in entsprechender Qualität zu liefern. Da die Lohnkosten in den vergangenen Jahren stetig gestiegen sind, muss an alternativen Werkstoffen und Produktionsvarianten geforscht werden. Vor allem in den letzten 10 bis 20 Jahren rückten die Punkte „Nachhaltigkeit“ und „saubere Energie“ im Bewusstsein der Menschen immer mehr in den Mittelpunkt. Viele Ausschreibungen, vor allem im öffentlichen Bereich, fordern die Einhaltung ökologischer Richtlinien, geringe Emissionen und den Einsatz erneuerbarer Baustoffe, um schlussendlich die Belastung durch Abfälle und Baustoffrestmassen auf Dauer zu reduzieren. Diesem Grundsatz hat sich die Firma *CETRIS*[®] mit ihrem Werk in der Tschechischen Republik gewidmet und stellt eine extrem vielseitig einsetzbare Platte aus zementgebundenen Holzspänen her.

2.1 Bestandteile der Cetriss-Platte

Die Idee den mineralischen Zusatzstoff durch einen leichteren organischen Stoff zu ersetzen, der neben einer Kostenreduktion auch eine Gewichtsersparnis mit sich bringt, ist nicht neu. Bereits während des Zweiten Weltkrieges wurde an einem Werkstoff bestehend aus Holzspänen und Zement geforscht. Die Entwicklung dieses Baustoffes erfolgte aus der Not heraus, da zu dieser Zeit Zement in zu geringen Mengen verfügbar war und man nach alternativen Zuschlagsstoffen suchen musste. Dennoch gelang es den Forschern von damals nicht eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eindringende Feuchtigkeit zu erreichen, was wiederum nur zu einer geringen Lebensdauer der Bauwerke führte. Heute wird die Weiterentwicklung dieses Baustoffes als besonders nachhaltig und zukunftssträchtig angesehen.

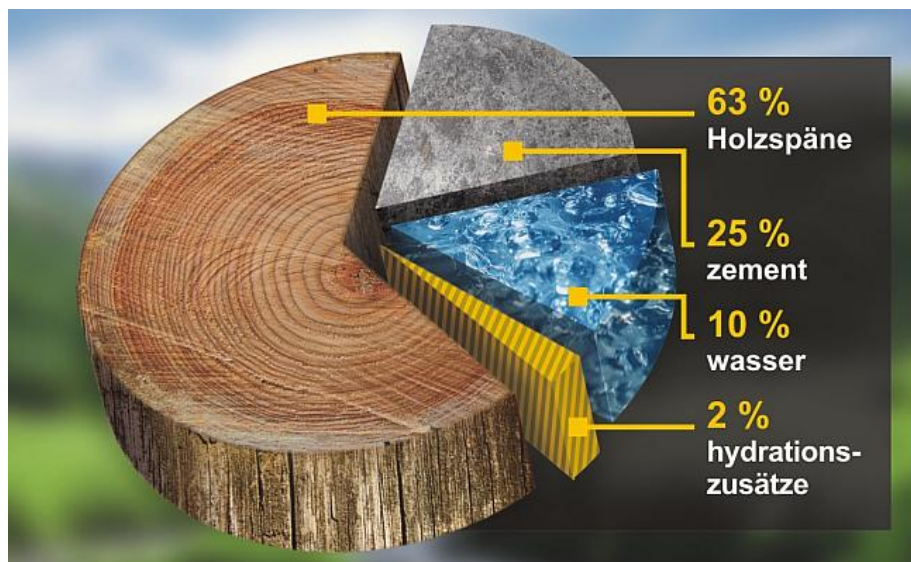


Abbildung 2.1: Zusammensetzung der Cetriss-Platte [1]

Die zementgebundene Spanplatte der Firma *CETRIS*[®] versucht nun die Vorteile der Werkstoffe Holz und Beton zu kombinieren. Durch den hohen Holzanteil der Platte von 63% und den nur geringen Mengen an für die Hydratation und den Verbund erforderlichen chemischen Zusätzen von lediglich 2% gilt diese zementgebundene Platte als sehr umweltfreundlich.

Nicht zuletzt weil neben dem erneuerbaren Stoff Holz auch keine gesundheitsgefährdenden Stoffe wie z.B. Asbest zum Einsatz kommen. Im Vergleich zu reinen Grobspanplatten, auch als OSB (orientedstrandboard) bezeichnet, besitzen zementgebundene Spanplatten eine wesentlich höhere Festigkeit. Die Rohdichte der CETRIS[®]- Platte liegt somit mit 1.250 kg/m³ deutlich über der der OSB mit 700 kg/m³. Durch das höhere spezifische Gewicht der zementgebundenen Spanplatte wirkt diese im Vergleich auch zusätzlich schalldämmend.

Der Zementanteil von 25% an der Zusammensetzung der CETRIS[®]- Platte macht diese besonders widerstandsfähig gegen das Eindringen von Feuchtigkeit und erhöht zudem die Festigkeit der Platte. Dies ermöglicht den Einsatz der CETRIS[®]- Platte als Schalungselement für Außenbereiche, als Außenwandschale und in Räumen mit hoher Feuchtigkeit bei der geplanten Endnutzung, wie zum Beispiel Bäder, Waschräume, etc. Da nur begrenzt Feuchtigkeit in die Platten eindringen kann, erfolgt so gut wie keine Beschädigung durch die sich bildenden und wachsenden Eiskristalle bei häufigen Frost-Tau-Wechseln. Für den Einsatz spricht weiter das niedrige Gewicht und die gute Verarbeitbarkeit der Platten. Diese letzten zwei Punkte beziehen sich vor allem auf die Vorfertigung der Schalungselemente im Werk und den Einbau sowie das Ausbetonieren auf der Baustelle. Obwohl der Hauptbestandteil der CETRIS[®]- Platte Holz ist, gilt sie als feuerfest und ist nach europäischer Norm als „nicht brennbar“ einzustufen.

2.2 Herstellung der Cetriss-Platte

Die Herstellung dieser Platte erfolgt seit mehr als 20 Jahren durch die Firma CETRIS[®] im eigenen Werk. Für die Produktion der Platten werden vor allem widerstandsfähige Fichten- und Tannenhölzer verwendet. Diese erhält die Firma von Sägewerken und anderen holzverarbeitenden Firmen in Form von Verschnitt und Produktionsabfällen, die diese nicht weiter verarbeiten können aber dennoch eine gute Qualität aufweisen. Nach der Anlieferung erfolgt die Lagerung in sogenannten Spansilos, wo die Feuchte der Holzmasse gemessen und überwacht wird. Eine weitere Zerspannung auf die für die Produktion erforderliche Größe erfolgt durch eigene Maschinen im Werk. Für die Weiterverarbeitung zu zementgebundenen Spanplatten werden im Wesentlichen die unterschiedlichen Größen an Holzspänen benötigt:

- Grobspäne
- Feinspäne
- Sägemehl

Bei den **Grobspänen**, wie in Abbildung 2.2: Grobspäne dargestellt, handelt es sich um Späne mit Längen bis zu ungefähr 4 cm. Diese werden gemahlen und zu den weiteren Bestandteilen verarbeitet. Um eine geschlossene Struktur und eine glatte Oberfläche schaffen zu können, werden diese in einem speziell entwickelten Verfahren so aufgetragen, dass die **Feinspäne**, wie sie die folgende Abbildung 2.3: Feinspäne zeigt, den Kern der Platten bilden. Durch die Feianteile in Form von **Sägemehl**, zu sehen in Abbildung 2.4: Sägemehl, wird eine glatte Oberfläche geschaffen.

Die maximale Größe der Feinspäne beträgt, wie in nachfolgender Abbildung zu sehen ist, nur mehr 1 cm.



Abbildung 2.2: Grobspäne [6]



Abbildung 2.3: Feinspäne [6]

Der anteilmäßig zweitgrößte Ausgangstoff ist qualitativ hochwertiger **Portlandzement** der Klasse CEM II 42,5 mit einer Druckfestigkeit von $42,5 \text{ kN/cm}^2$ nach einer Aushärtungsdauer von 28 Tagen. In einer Mischanlage wird dieser mit den Holzspänen verschiedener Größe vermischt und anschließend Wasser hinzugegeben. Die Menge an Wasser variiert und ist abhängig von der Holzfeuchte und muss daher an diese angepasst werden, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten.

Wie im Kapitel 2.1 "*Bestandteile der Cetriss-Platte*" bereits erwähnt, besteht die zementgebundene CETRIS[®]- Spanplatte aus 63% Holzspänen, 25% Zement, 10% Wasser und 2% an für die Hydratation erforderlichen Zusätzen. In der Mischanlage kommen nun auch die 2% an Zusätzen zum Einsatz. Es handelt sich vorwiegend um **Aluminiumsulfat**. Diese auch in der Natur vorkommende chemische Aluminiumverbindung, hier in der Form eines farblosen Pulvers, wird der Mischung beigemischt, um den Verbund zwischen Holz und Beton zu verbessern. Dies ist dadurch möglich, da Aluminiumsulfat auch als Festigungsmittel oder Stabilisator bezeichnet wird, der unter anderem mit organischen Substanzen, in diesem Fall Holz, feste Verbindungen eingeht.



Abbildung 2.4: Sägemehl [6]

Zusätzlich wird, um weitere Ressourcen zu sparen, den Holzgangstoffen noch ein aufbereitetes, in Abbildung 2.5 zu sehendes, **Recyclat** beigemischt. Dieses besteht vorwiegend aus dem Abfall, der durch den Produktionsausschuss, Verschnitt und die Bearbeitung entsteht. Hierbei handelt es sich um bereits mit Zement und Zusatzstoffen behandelte Holzspäne der sich in der fertigen Platte befindlichen Spangrößen.



Abbildung 2.5: Recyclat [6]

Aus der vollautomatischen Mischanlage gelangt das Holzzementgemisch in eine Streueinrichtung und wird anschließend auf vorbereiteten Stahlplatten gleichmäßig verteilt. Diese werden mit Trennölen vorbehandelt, damit das Gemenge nach dem Pressen wieder leicht von den Stahlplatten gelöst werden kann, ohne die Oberfläche zu beschädigen. Durch getrennte Kammern in der Streueinrichtung ist es möglich, die Deck- und Mittelschicht der Platte in einem Arbeitsgang herzustellen. Die feineren mit Zement umhüllten Holzspäne werden dabei beidseitig auf die aus gröberen Spänen bestehende Mittelschicht aufgetragen, so dass die CETRIS®- Platte im Endzustand eine glatte Oberfläche aufweist. Die einzelnen Stahlplatten werden übereinander gestapelt und mit hohem Druck gepresst. Die weitere Lagerung erfolgt gemeinsam mit dem frisch aufgetragenen Plattengemisch in Öfen bei 70 °C für acht Stunden, um den Aushärtungsprozess zu beschleunigen. Nach dem Entfernen der Stahlplatten erfolgt eine weitere mindestens siebentägige Lagerung bevordie Platten auf einen Feuchtegehalt von ungefähr neun Gewichtsprozent getrocknet werden. Mit dem Abschluss der Trocknung ist die Platte für die weitere Verarbeitung bereit. Die Lagerung bis zur Weiterverarbeitung erfolgt dabei liegend auf Holzpaletten.

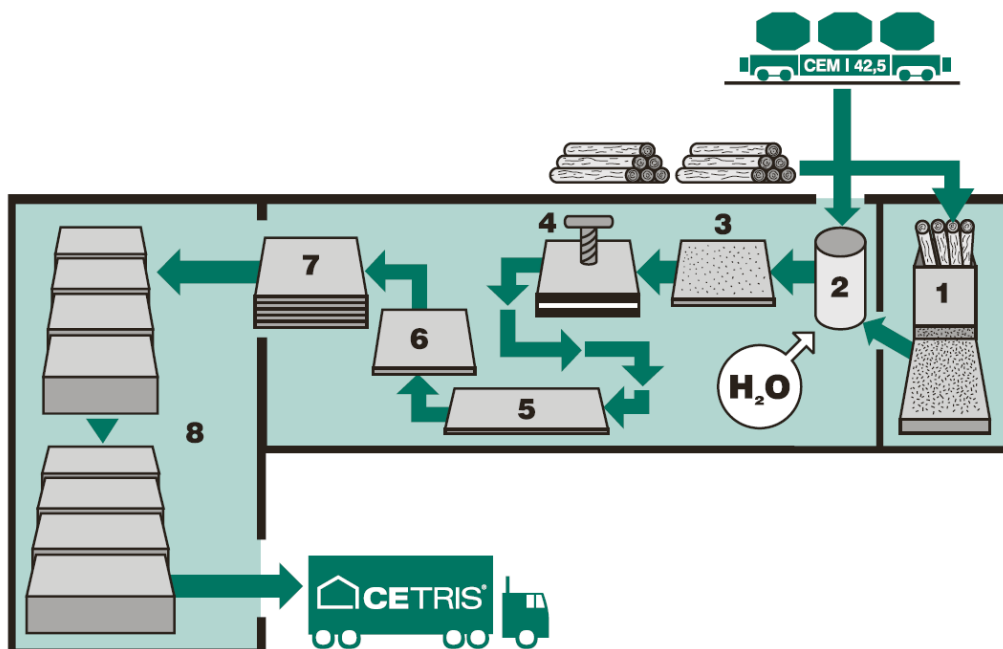


Abbildung 2.6 : Herstellungsschema [1]

(1 Zerspanung, 2 Mischung, 3 Plattenbestreuung und Schichtung, 4 Pressen, 5 Trocknung, 6 Formatierung, 7 Lagerung, 8 Versand/Transport)

3 Schalungen [3]

Als "Schalung" wird im Hoch- und Tiefbau eine Art Gussform bezeichnet, welche für die Herstellung von Wänden, Stützen, Treppen und Decken aus Holz angepasst und mit Frischbeton vor Ort verfüllt wird. Die Schalung, meist aus Holz, wird nachdem Erreichen der Frühfestigkeit des Betons wieder entfernt und bildet somit das Negativ zum entstehenden Bauteil.

Mit dem Beginn der Herstellung der ersten Bauwerke mittels Beton in der Antike waren Schalungen erforderlich. Bereits die Römer verwendeten vor ungefähr 2000 Jahren ein erhärtendes Mörtelgemisch, um ein druckfestes konglomeratähnliches Gestein zu erhalten. Dies wurde als "opuscaementicium" bezeichnet und wurde zur Herstellung von Gussmauerwerken verwendet. Diese Substanz gilt als einer der ersten Vorläufer des sich heute in Verwendung befindlichen Betons und war diesem auch sehr ähnlich. Das Anwendungsgebiet beschränkte sich nicht nur auf die Herstellung von Wänden und Stützen sondern "opuscaementicium" wurde auch zum Auskleiden von Aquädukten herangezogen, um diese abzudichten. Zu jener Zeit entstand auch eines der noch heute wohl bekanntesten Bauwerke in Rom, das Pantheon, welches mit seinem Kuppeldurchmesser von 43,45 m und einer Schalendicke von 1,35 m bis Anfang des 18. Jahrhunderts das größte seiner Art darstellte. Eine derartige Ingenieurleistung wäre ohne den Einsatz von Schalungen und dem "neuartigen" Werkstoff Beton nicht möglich gewesen.

3.1 Entwicklung der Schalungen

Die ersten Schalmauerwerke entstanden im Römischen Reich aus sauber gemauerten Innen- und Außenschalen aus Ziegeln und ersetzten damit Schalungen aus Naturstein sowie die Natursteinbauweise fast völlig. Dies bedeutete eine erhebliche Arbeitserleichterung, da die Suche nach passgenauen bzw. die mühsame Bearbeitung von Natursteinen zur Gänze entfallen konnte. Obwohl diese Art der Herstellung von Massivbauteilen im Mittelalter eher in Vergessenheit geriet und erst um das Jahr 1700 wieder Einzug in das Bauwesen fand, änderte sich an der Herstellung nichts. Erst ab dem 18. Jahrhundert erkannte man wieder dessen Bedeutung und Potential und so kam es zu einer ständigen Weiterentwicklung. Heute ist die Herstellung von Bauwerken mittels in Schalungen gegossenen Beton nicht mehr wegzudenken.

Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts bestanden Schalungen ausschließlich aus Holz. Dies ist auch heute noch größtenteils so, jedoch werden sie nicht mehr aus groben Brettern und Kanthölzern zimmermannsmäßig sondern aus glatten mehrschichtigen Holzplatten hergestellt. In Verwendung sind heutzutage Systemschalungen, die auf Grund der hohen Wiederverwendbarkeit weniger Holzabfall verursachen und damit nicht nur einen Kostenvorteil sondern auch einen ökologischen Vorteil bieten. Neben der Formgebung hat die Schalung noch weitere Aufgaben; so muss sie zum Beispiel in der Lage sein, die Lasten des Frischbetons, der Bewehrung und weiterer Belastungen, wie Wind aufzunehmen und abzuleiten. Wichtig ist eine Sicherung der Lage gegen seitliches Verschieben.

Neben holzbasierenden Schalsystemen sind mehr und mehr bausteinartige Systeme am Markt verfügbar, die auf Styropor-Schalungssteine setzen, die nach dem Aufbau mit Beton ausgegossen werden. Eines dieser Systeme stammt von der Firma *ARGISOL*[®]. Diese Bauweise beschränkt sich bisweilen auf die Errichtung von hochwärmegedämmten Einfamilienhäusern und anderen kleineren Projekten.

Im Wesentlichen bestehen diese Schalungssysteme aus folgenden Bestandteilen:

- Schalträger
- Schalhaut
- Unterstützung
- Anker
- Trennmittel

3.1.1 Schalträger

Heute bestehen Schalträger meist aus I-Träger aus Massivholz oder auch bei sehr hohen Lasten bei Wandschalungen aus Doppel-C-Aluminiumprofilen. Durch seine Höhe ist der I-Träger in der Lage große Biegemomente aufzunehmen und die Lasten weiter zu leiten. Weiter dienen die Schalträger zur Aufnahme der Schalhaut.

3.1.2 Schalplatten

Früher bestand die Schalhaut aus groben Brettern, die stumpf gestoßen und von Kanthölzern getragen wurden. Auf Grund der unbehandelten Oberfläche der Bretter waren diese durch die Verschmutzung kaum wieder zu verwenden und deren Maserung war auf dem fertigen Beton zu sehen. Moderne Schalhäute bestehen aus Sperrholzplatten, deren Oberfläche zusätzlich noch beschichtet werden kann, um die hohen Anforderungen für Sichtbetonoberflächen zu erfüllen. Die Hauptaufgabe der Schalhaut hinsichtlich der Lastableitung ist es die Lasten aus Frischbeton, Bewehrung und weiteren Belastungen gleichmäßig auf die Schalträger zu verteilen. Die Beschaffenheit der Schalhaut ist maßgebend für die Qualität der sichtbaren Betonoberfläche. Gerade bei Sichtbetonoberflächen muss sichergestellt werden, dass die Schalhäute gründlich gereinigt und mit dem passenden Trennmittel versehen werden, um Fehlstellen zu vermeiden.

3.1.3 Trennmittel

Die Beschichtung der Schalhaut mit Trennmitteln reduziert die Haftung des Betons an der Schalhaut. Dies kann mit Hilfe von folgenden Arten von Trennmitteln erfolgen:

- mineralische Öle
- biologische Öle
- Emulsionen
- Wachse
- Lacke
- Pasten

Diese Mittel bilden einen hydrophoben, das heißt einen wasserabweisenden Film und erzeugen damit eine Oberfläche, mit der sich der Beton beim Aushärten nur schwer verbinden kann. Reicht dieser Effekt nicht aus, können die Schalhäute zusätzlich mit einem Mittel überzogen werden, welches in einer Zone direkt an der Schalhaut die Hydratation des Zements durch einen chemischen Prozess gezielt stört. Der Einsatz des richtigen Trennmittels ist für die geforderte Oberflächenqualität entscheidend. Die Auswahl ist abhängig vom Schalungstyp, denn nicht jede Schalhaut ist auch für jedes Trennmittel geeignet. Daher sollten Herstellerangaben eingehalten und die Trennmittel auf den jeweiligen Schalungstyp abgestimmt werden. Die Trennmittel sind richtig zu dosieren, sodass die gesamte Schalhaut gleichmäßig mit einem dünnen Film überzogen ist. Dabei ist zu beachten, dass das Saugverhalten vom

Alter der Schalplatte abhängig ist und dadurch die zu verwendende Menge an Trennmittel variieren kann.

Weiter muss das Trennmittel folgende Anforderungen erfüllen:

- Einerseits muss es die Haftung der Schalhaut zum Beton hin ausreichend reduzieren, auf der anderen Seite darf es aber die Tragfähigkeit und Betonqualität des fertigen Bauteils nicht beeinträchtigen.
- Es dürfen auch keine Rückstände auf der Betonoberfläche zurückbleiben, die entweder zu einer Minderung der optischen Qualität der Sichtbetonoberfläche oder zu einer Beeinträchtigung der Haftung von später aufzubringenden Putzen, Farben oder anderen Baustoffen führen können.

3.1.4 Ankerung

Wandschalungen bestehen aus vertikalen Schalelementen, die auf Grund der hohen Frischbetondrücke gegeneinander zu verankern sind. Die Belastung von Wandschalungen ist wesentlich höher als bei Deckenschalungen, da hier nicht die Dicke sondern die Höhe maßgebend ist. Am Fußpunkt der Schalung ist der Frischbetondruck mit dem hydrostatischen Druck $p = \gamma * h$ anzusetzen. Das bedeutet, der Druck p in $[\text{kN}/\text{m}^2]$ ergibt sich aus der Multiplikation der Höhe h [m] mit der Dichte des Betons in $[\text{kN}/\text{m}^3]$. Diese Annahme ist vor allem bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SCC) zutreffend, da dieser eine flüssige Konsistenz besitzt. Bei modernen Rahmenschalungen werden diese Drücke durch Anker und seitliche Abstützungen aufgenommen. Bestehen die Schalträger aus Doppel-C-Profilen können die Anker durch deren Öffnung zwischen den beiden C-Profilen durch die Schalträger und durch das Bauteil geführt werden, sind keine Schalträger erforderlich werden die Anker wie in Abbildung 3.1 dargestellt, nur durch Bohrungen in der Schalplatte geführt. Zur Anwendung kommen hier Gewindestäbe aus Stahl, die in Hüllrohren verlaufen und im Zuge des Ausschalens wieder entfernt werden.

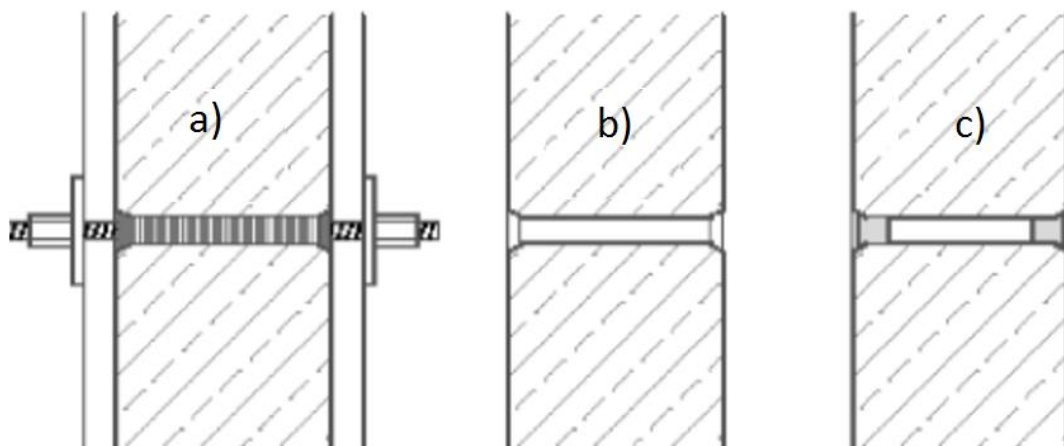


Abbildung 3.1: Funktion eines Ankers bei Wandschalungen

- a) Anker nimmt den Druck des Frischbetons auf; b) leeres Hüllrohr nach dem Entfernen des Ankers;
c) Verschließen der Öffnung

3.2 Verlorene Schalung

Die wesentliche Funktion der „verlorenen Schalung“ ist exakt die gleiche wie die der konventionellen Schalungen. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass die nichttragenden Schalelemente nach dem Aushärten des Betons nicht mehr entfernt werden bzw. in schwer zugänglichen Bereichen nicht mehr entfernt werden können. Dadurch entfallen vor allem Arbeitsstunden für Ausschalen und Reinigung der Elemente. Auf Grund der steigenden Lohnkosten und des hohen Lohnkostenanteils der Schalung im Allgemeinen liegt hier das wesentlichste Einsparungspotential „verlorener Schalungen“ im Vergleich zu konventionellen Schalsystemen, wobei auf die meist höheren Kosten der Schalungselemente zu achten ist. [3]

Neben den konstruktiven und wirtschaftlichen Vorteilen sind auch einige der dabei immer wieder auftretenden Probleme zu beachten. Ein großer und wohl der entscheidendste Nachteil von am Bauteil verbleibender Schalelemente ist, dass keine Prüfung der Betonoberfläche hinter der Schalung vorgenommen werden kann. Durch den hohen hydrostatischen Druck kann es durch unzureichende Lagesicherung zu einem Aufschwimmen der Schalung kommen. Ein anderer häufiger Schadensfall, neben dem Versagen durch Aufschwimmen der Elemente, ist ein Versagen durch Eindringen der Elemente, ebenfalls verursacht durch den hohen hydrostatischen Druck in Abhängigkeit der Bauteilhöhe.

Vor- u. Nachteile verlorener Schalungen gegenüber konventioneller Schalungen:

Vorteile:

- keine Ausschalungskosten
- Zeitersparnis im Baubetrieb
- Vorfertigung im Werk und dadurch eine Qualitätssicherung möglich
- keine Entsorgungskosten
- Strukturierung der Oberfläche möglich
- erhöhter Schallschutz
- ggf. Integrierung von Leitungen möglich

Nachteile:

- höhere Produktionskosten
- kein Zugang zur Betonoberfläche
- Verlust von Nutzfläche durch die nichttragenden Schalungselemente
- keine Wiederverwendung (= Materialverlust)

Der Termindruck ist ein für den Erfolg eines Projektes im Bauwesen nicht außer Acht zu lassender Faktor und nicht zuletzt Ursache für deutliche Mehrkosten. Ist es nun möglich, Elemente in einer Art und Weise herzustellen, die aus einer rein wirtschaftlichen Betrachtung günstiger sind als der Prozess des Ein- und Ausschalens von Betonbauteilen mit konventionellen Schalungen. Die Vorteile liegen deutlich auf der Hand; dennoch gibt es Bauvorhaben, wo das Verlangen nach Sicherheit und Prüfbarkeit die Kosten- und Zeitersparnis überwiegt. Daher konnten sich "verlorene Schalungen" im Brückenbau, einem Gebiet mit dem höchsten Sicherheitsniveau, nicht durchsetzen.

3.3 Das Schalungssystem mittels *Cetris*[®]-Platten

Wie schon eingangs erwähnt ist die zementgebundene Holzspanplatte der Firma CETRIS[®] auf Grund des geringen Gewichts, der hohen Flexibilität und der enormen Widerstandsfähigkeit vielseitig einsetzbar. Diese Eigenschaften macht sich der Schalungshersteller zu Nutze, um eine große Palette an Einsatzmöglichkeiten der zementgebundenen Holzspanplatte als verlorene Schalungselemente anbieten zu können.

Die Platten werden nach der Anlieferung in das Werk des Schalungsherstellers zu Elementen zugeschnitten. Der Zuschnitt erfolgt größtenteils automatisch und nur kleine Details werden händisch nachgearbeitet. Da die Elemente bei Wandschalungen jeweils eine Innen- und Außenplatte aufweisen, erfolgt der Zuschnitt in doppelter Ausführung. Sind die Platten auf die später daraus entstehenden Elemente zugeschnitten, gelangen sie zur Montage. In der Montagehalle werden die zwei gleichen Elemente immer parallel von einem Montageteam bearbeitet. Im ersten Schritt der Vormontage werden im Abstand von ca. 20 cm die Halterungen verschraubt. Hierbei handelt es sich um Spezialteile aus Stahl, die sobald die zwei Seiten zusammengesetzt werden sich miteinander verbinden. In den weiteren Arbeitsschritten wird von den Montagearbeitern die Bewehrung verlegt. Dadurch, dass die Elemente noch nicht verbunden sind, kann die Bewehrung leicht und unkompliziert verlegt werden. Es muss nur Rücksicht auf die Verbindungselemente genommen werden. Nachstehende Abbildung 3.2 zeigt ein Wandelement mit den Verbindungsstücken und bereits verlegter Bewehrung. Wie bei herkömmlichen Hochbauteilen wird die Anschlussbewehrung ebenfalls einfach über den Rand des Elements hinaus verlegt. Sind nun alle Arbeiten abgeschlossen, werden die beiden Platten, die sich während der Montage auf Rollwagen befinden, zueinander geschoben und aneinander gedrückt. Dadurch rasten die Verbindungsstücke auch in den Öffnungen des gegenüberliegenden Winkels ein und die Platten sind fest miteinander verbunden.



Abbildung 3.2: Montage der Elemente im Werk

Ein wesentlicher Vorteil dieser Systemschalung ist die leichte Zugänglichkeit, welche nicht nur das leichte Verlegen der Bewehrung sondern auch das werkseitige Verlegen von Installationsschächten und Anschlussdosen ermöglicht. Die folgende Abbildung 3.3 zeigt zwei für den Transport vorbereitete, fertige Wandelemente.

Da sich der selbstverdichtende Beton wie eine Flüssigkeit verhält, ist nicht die Dicke der Elemente, sondern deren Höhe maßgebend. Am Fußpunkt der Schalung entspricht der Frischbetondruck genau dem hydrostatischen Druck mit $p = \gamma * h$. Dadurch ergibt sich die relativ dichte Verteilung der Verbindungsstücke, die diese Kräfte aufnehmen müssen. Auf den Ein-

satz von Ankern, die in Hüllrohren durch die Schalung geführt werden, wie es bei konventionellen Schalungen der Fall ist, wird bei diesem System komplett verzichtet.

Da viele der ausgeführten Schalelemente größere Abmessungen aufweisen als die von der Firma *CETRIS*[®] gelieferten Platten, müssen diese gestoßen werden. Diese Verbindungen werden als geklebte Nut-Feder-Verbindungen oder bei maschineller Verarbeitung von Wandelementen mittels Stumpfstoß ausgeführt. Als Kleber dient bei stumpf gestoßenen Platten *Purocol*, einEinkomponentenkleber auf Polyurethanbasis, beziehungsweise ein Einkomponenten-Massivholzkleber bei der Ausführung von Nut-Feder-Verbindungen.



Abbildung 3.3: Wandelemente

Neben Wand- und Deckenschalungen können auch Treppenelemente hergestellt werden. Auf Grund der Lage bestehen Deckenschalungen nur aus einem Element. Die Platten werden, wie auch bei den Wandschalungen werkseitig vorbereitet und auf die Baustelle transportiert. Auf Wunsch des Kunden ist es bei der Verwendung der Systemwandschalungen möglich, diese in der Planung der Decken zu berücksichtigen. Das bedeutet, die äußere Schale der Außenwand wird bis an die Oberkante der Decke gefertigt und stellt somit auch gleichzeitig die Deckenrandabschalung dar. Eine zeitaufwendige Fertigung dieser Abschalungen auf der Baustelle entfällt somit.

4 Selbstverdichtender Beton [3]

Bei selbstverdichtendem Beton, im internationalen Sprachgebrauch auch als „self compacting concrete“ oder kurz als SCC bezeichnet, handelt es sich um einen Beton, der in der Lage ist, sich auf Grund der Schwerkraft von selbst zu verdichten. Die Möglichkeit, sich selbst zu entlüften, erhält der Beton entweder durch einen hohen Mehlkornanteil oder durch die Zugabe chemischer Verflüssiger bzw. einer Kombination aus beidem. Unabhängig vom SCC-Typ ist die Zugabe von hochwirksamen Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) unverzichtbar. Da keine äußere Verdichtungsenergie zugeführt werden muss, eignet sich diese Art von Beton für eine Vielfalt an Bauteilformen mit unterschiedlicher Oberflächenqualität.

Die selbstverdichtende Wirkung erhält der Beton vor allem durch die Zugabe von Hochleistungsverflüssigern, die ihre Wirkung sowohl am Zement als auch dem Feinstoffanteil entfalten, indem sie vor allem die innere Reibung zwischen den einzelnen Partikeln durch den Abbau der Oberflächenspannung des Wassers reduzieren. Dies geschieht auf molekularer Ebene und führt zu einer Verringerung der elektrischen Bindung und damit zu einer Reduktion der erforderlichen Mischwassermenge. Die Menge an Wasser ist zur Vermeidung späterer Schwindverformungen gering zu halten.

Selbstverdichtender Beton besteht im Vergleich zu Normalbeton aus einem höheren Mehlkornanteil, dessen Korngröße einen maximalen Durchmesser von 0,125 mm aufweist. Bei den Zuschlagstoffen kommen sandreiche Kornzusammensetzungen zum Einsatz, deren Größtkorn (GK) auf 16 mm im Durchmesser zu beschränkt ist. Da sich SCC wie eine Flüssigkeit verhalten, sind stabile und tragfähige Schalungen zu verwenden. Beim Betonieren einer Wand wirkt am Fußpunkt der Schalung der gesamte hydrostatische Druck, der von der Schalung und deren Stützung aufzunehmen und in angrenzende Bauteile bzw. den Baugrund abzuleiten ist. Neben den Eigenschaften der einzelnen Komponenten sind für die Qualität des SCCs auch Mischungsverhältnis und Mischzeit maßgebend. Um beim Einbau ein Entmischen des Betons zu verhindern, sind die Schalungen wie bei Unterwasserbetonierarbeiten mittels Schlauch von unten zu befüllen, sodass der Beton von unten in der Schalung nach oben steigt, ohne dabei zu fallen. Diese Art des Betonierens wird im Baubetrieb als "Kontraktorverfahren" bezeichnet.

Schon nach der Entwicklung von SCC Ende der 80er Jahre galt dieser als revolutionär, denn bei herkömmlichem Beton entsteht erst durch das sorgfältige Verdichten mittels Rüttlern ein dichtes Gefüge. Sowohl bei der Herstellung als auch im Baubetrieb bietet selbstverdichtender Beton einige Vorteile. Auf Grund seiner weichen honigähnlichen Konsistenz und seiner Fließfähigkeit ist es möglich, mit SCC eine hohe Einbauleistung und damit höhere Produktivität im Vergleich zu Normalbeton zu erzielen. Auch durch den Verzicht auf Rüttler und der damit verbundenen Begrenzung der Schütthöhe auf 50 cm entsteht neben dem Entfall an Gerätemieten für Rüttler auch eine Kostenreduktion durch den Zeitgewinn im Arbeitsablauf. Ferner sinkt die Lärmbelastung für Arbeiter und Anrainer.

Durch den Einsatz von SCC ist es möglich, schwer zugängliche Stellen und komplexe Schalungsgeometrien zu verfüllen. Auch Bauteile mit einem hohen Bewehrungsgrad können mittels fließfähigem Beton wie „leichtverdichtenden Beton“, kurz LVB, welcher nur eine geringe Rüttelenergie erfordert, oder SCC verfüllt werden, ohne dass sich zwischen Schalung und Bewehrung oder zwischen den Bewehrungselementen Hohlräume bilden. Neben den bautechnischen bietet die Verwendung von SCC auch optische und umweltrelevante Vorteile. Mittels SCC lassen sich optisch anspruchsvolle Sichtbetonoberflächen herstellen und bieten dazu noch die Möglichkeit gewünschte Strukturen zu erzeugen. Diese ideale Sichtbetonoberfläche lässt sich durch das dichte Gefüge verwirklichen, welches auch zu einer erhöhten Dau-

erhaftigkeit des Betons führt. Wird bei der Herstellung keine verlorene Schalung verwendet, wie es bei herkömmlichem Betonierarbeiten der Fall ist, wird das Bauteil nach dem Erreichen der Frühfestigkeit ausgeschalt, wobei nur ein geringes Maß an Nachbehandlung erforderlich ist.

Die Anwendung des SCC erfolgt nach den in den europäischen Normen wie ÖNORM EN 206-9 geregelten Richtlinien für die Verwendung und den Einbau von selbstverdichtendem Beton. Dieser ist vor dem Einbau auf seine Qualität in puncto Fließfähigkeit und Viskosität zu testen:

- Überprüfung der Fließfähigkeit mittels Setzfließmaß:

Der zur Prüfung entnommene Frischbeton wird, wie in Abbildung 4.1 zu sehen, in einem Behälter, der sich auf der Prüfplatte befindet, eingebracht und anschließend die unten offene Form nach oben gezogen. Gemessen wird die Ausbreitung des Betons auf der Platte. Zusätzlich kann ein Blockierring angebracht werden, der die in der Schalung befindliche Bewehrung simulieren soll und somit Auskunft über das Fließverhalten geben kann. Erreicht der SCC ein Setzmaß von rund 700 – 800 mm und beträgt der Niveauunterschied beim Test mit Blockierring zwischen innerhalb und außerhalb des Ringes weniger als 50 mm, erfüllt der Beton die Anforderungen.



Abbildung 4.1: Überprüfung der Fließfähigkeit mit Blockierring [2]

- Sedimentationsneigung:

Um die Sedimentationsneigung eines selbstverdichtenden Betons beurteilen zu können, wird der Beton in einen, wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt, 50 cm hohen Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm gefüllt. Mittels in den Drittpunkten der Zylinderhöhe angebrachten Schiebern kann die Probe in 3 Teilproben unterteilt werden. Erst 30 Minuten nach dem Befüllen werden die Trennbleche in den Zylinder geschoben und anschließend der selbstverdichtende Beton abschnittsweise in unterschiedliche Behälter gefüllt. Der Zementleim wird ausgewaschen und die getrockneten Siebrückstände mit der Genauigkeit auf 1 g gewogen.

Der SCC ist dann als sedimentationsstabil einzustufen, wenn die Abweichung der Masse der groben Gesteinskörnung sich um höchstens 20-Masse-% vom mittleren Grobgehalt der Probe unterscheidet.

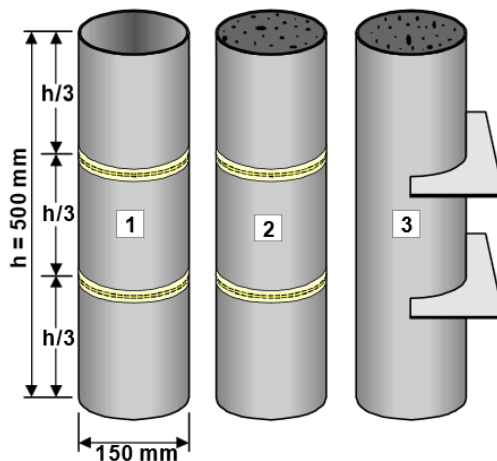


Abbildung 4.2 Sedimentationsversuch

- Auslauftrichter:

Ein genormter Trichter, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, wird zur Gänze mit Frischbeton gefüllt. Ohne den Beton zu verdichten, wird er durch die Trichterunterseite ausgelassen und die dabei benötigte Zeit gemessen. Die ermittelte Trichterauslaufzeit stoppt sobald der erste Blick von oben durch den Trichterauslauf möglich ist. Die bei diesem Versuch für SCC benötigte Zeit liegt laut Norm zwischen 5 und 20 Sekunden.



Abbildung 4.3: Auslauftrichter [3]

Selbstverdichtender Beton bietet in der Herstellung und in baubetrieblicher Hinsicht viele Vorteile, demgegenüber stehen allerdings ein höherer Preis und die Tatsache, dass zur Überprüfung der Betonqualität Fachpersonal erforderlich ist. SCC ist deswegen nicht auf Spezialanwendungen beschränkt und stellt somit eine ideale Ergänzung zum Massenbaustoff des herkömmlichen Betons dar.

5 Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test [4]

Zur Prüfung der Proben dieser Versuchsreihe wurde, wie auch bei der vorherigen, der Keilspaltversuch oder international als „Wedge Splitting Test“ bezeichnetes Prüfverfahren verwendet. Da dieser wesentlich für die von uns gefundenen Ergebnisse ist, möchten wir hier näher auf die bruchmechanischen Grundlagen und die Funktion des Tests eingehen, um eine Grundlage für die nachfolgenden Kapitel zu schaffen.

Der Versuch wurde im Jahr 1986 patentiert und dient der Ermittlung von materialspezifischen bruchmechanischen Kennwerten. Der Einsatz des Verfahrens eignet sich besonders gut für sich beim Bruch spröde oder sich quasi-spröde verhaltende Materialien. Die Kraft wird von einer Druckprüfmaschine erzeugt, die die Kraft über einen Metallkeil in eine vorgeschchnittene Kerbe überträgt. Die Umleitung der Kraft ist notwendig, um eine gleichbleibende und stabile Rissausbreitung über das Erreichen der Maximalkraft hinaus aufzuzeichnen.

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen, muss eine Nut als Träger der Kraftübertragungsstücke hergestellt werden. Diese bestehen im Wesentlichen aus Lagern als Wälzkörpern, die die vertikale Maschinenkraft F_M in eine um den Keilfaktor verstärkte Horizontalkraft umsetzen. Diese vom Metallkeil übertragene horizontale Kraft wird in weiterer Folge als Spaltkraft F_H bezeichnet.

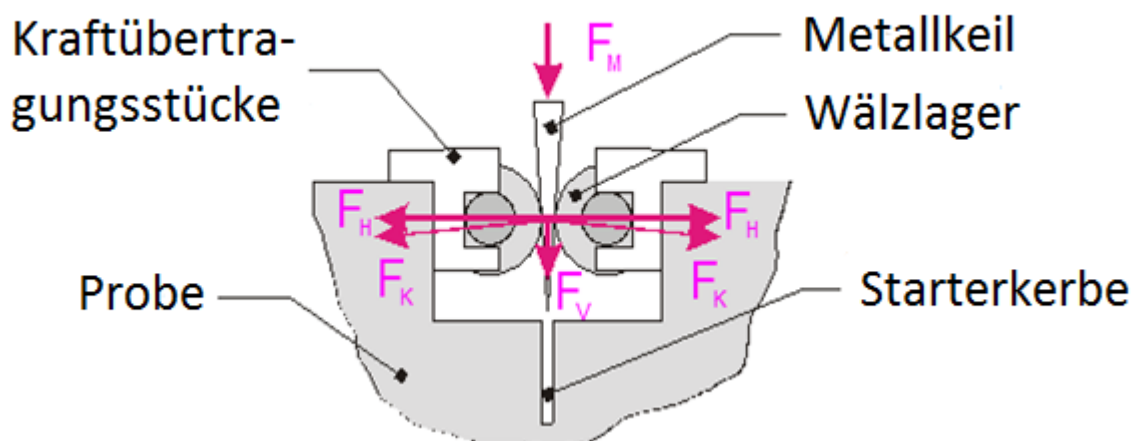


Abbildung 5.1: Kräfte am Keil [5]

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Keilspalttests sind elektronische Wegaufnehmer, die auf Höhe der Nut mittels einer speziell für diesen Versuch angefertigten Halterung angebracht werden und damit die Rissöffnung auf Höhe der Krafteinleitung messen. Diese Messung erfolgt an beiden Seiten der Probe, um bei ungleichmäßiger Öffnung ein Mittel der erhaltenen Werte als ein brauchbares Messergebnis zu erhalten. Diese gemessene Rissbreite wird als „Crack Mouth Opening Displacement“, kurz CMOD, bezeichnet. Dabei kommt es auf Grund der Öffnung der Probe in der Kerbe zu einer Öffnung von oben nach unten und dadurch zu einem Winkelfehler in der Öffnungsmessung durch die Wegaufnehmer.

Da der Fehler bei einer Rissöffnung von 1mm lediglich im Mikrometerbereich liegt, hat dieser keinen Einfluss auf das Messergebnis und kann somit vernachlässigt werden.

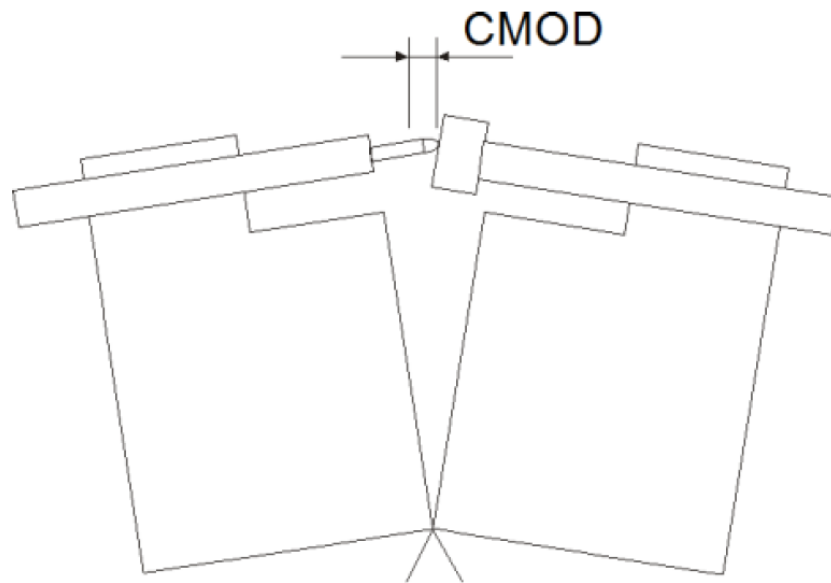


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Rissöffnung [6]

Die vertikale Vorschubgeschwindigkeit der Druckprüfmaschine liegt bei der in den Normen festgelegten Geschwindigkeit von 1 mm/min . Als Ergebnis des Keilspaltversuchs erhält man ein Last-Verschiebungs-Diagramm, im weiteren als LVK (Last-Verschiebungs-Kurve) bezeichnet. Es zeigt die von den beiden Wegaufnehmern gemessene gemittelte Rissbreite in Abhängigkeit der Spaltkraft F_H . Die Bruchenergie entspricht dabei dem Flächeninhalt, der von der Kurve und der Abszisse eingeschlossen wird.

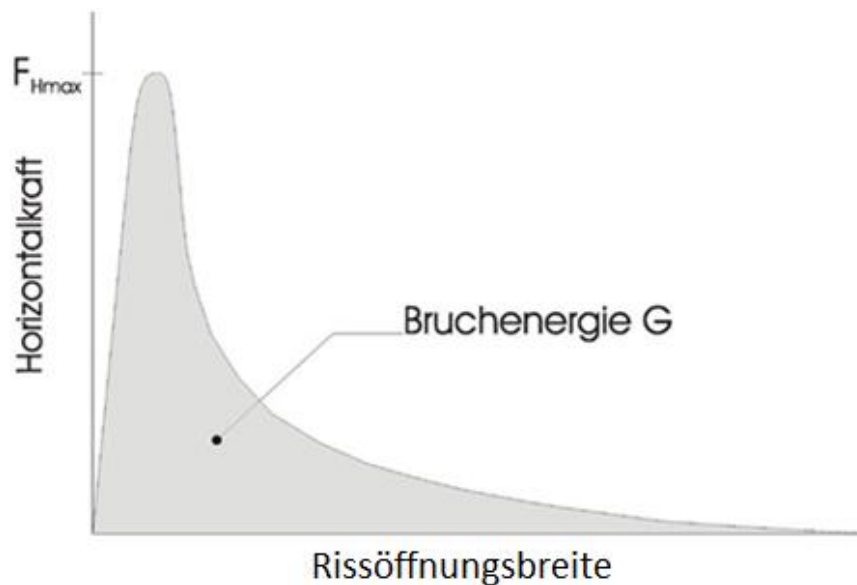


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung einer Lastverschiebungskurve [5]

Um daraus die materialspezifische Bruchenergie zu erhalten, muss der Wert noch durch die projizierte Ligamentfläche (= die neu geschaffene Fläche) dividiert werden:

$$G_F = \frac{1}{A_{Lig}} \cdot \int_0^{\infty} F_H \cdot ds \quad \begin{array}{l} G_F \text{spez. Bruchenergie [N/m]} \\ A_{Lig} \text{Ligamentfläche [mm}^2\text{]} \\ F_H \text{Horizontalkraft [N]} \\ s \text{CMOD[mm]} \end{array} \quad (5-1)$$

Im folgenden werden die wichtigsten physikalischen Größen, die mit der LVK in Verbindung stehen, beschrieben:

- **Hooke'sche Gesetz:**

Idealisierter Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Da in der LVK der Zusammenhang von Kraft und Verschiebung dargestellt ist, ist die LVK dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm zwar ähnlich, unterscheidet sich aber grundlegend dadurch, dass beim Zugversuch ausschließlich Zugspannungen und beim Keilspaltversuch eine Kombination aus Zugkraft und Biegemoment auftritt. [5]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \begin{array}{l} \sigma \text{Spannung[N/mm}^2\text{]} \\ E \text{E-Modul [N/mm}^2\text{]} \\ \varepsilon \text{Dehnung [-]} \end{array} \quad (5-2)$$

- **Dehnung:**

Die Dehnung ist als absolute Längenänderung eines Körpers bezogen auf seine Ausgangslänge definiert. Sie wird als Abszisse im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen.[5]

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \begin{array}{l} l \text{ gedehnte Länge [mm]} \\ l_0 \text{Ausgangslänge [mm]} \\ \varepsilon \text{Dehnung [-]} \end{array} \quad (5-3)$$

Man kann keine örtlichen Dehnungen (exakt) messen, sondern nur mittlere Dehnungen, etwa entlang von Verbindungslinien zweier Punkte, wobei diese nicht zu stark gekrümmt sein dürfen. [5]

- **Spezifische Rissinitiierungsenergie:**

Sie wird aus der LVK berechnet und stellt die plastische Energie bezogen auf die Bruchfläche dar, die nötig ist, um den Bruch der Probe einzuleiten. [5]

$$G_i = \frac{1}{A_{Lig}} \cdot \left(\int_0^{s_1} F_H \cdot ds - \frac{F_{H \max}^2}{2 \cdot E_{LVK}} \right) \quad \begin{array}{l} G_i \text{Rissinitiierungsenergie [N/m]} \\ F_{H \max} \text{max. Horizontalkraft [N]} \\ E_{LVK} \text{Anstieg der LVK [N/mm]} \\ ds \text{CMOD [mm]} \end{array} \quad (5-4)$$

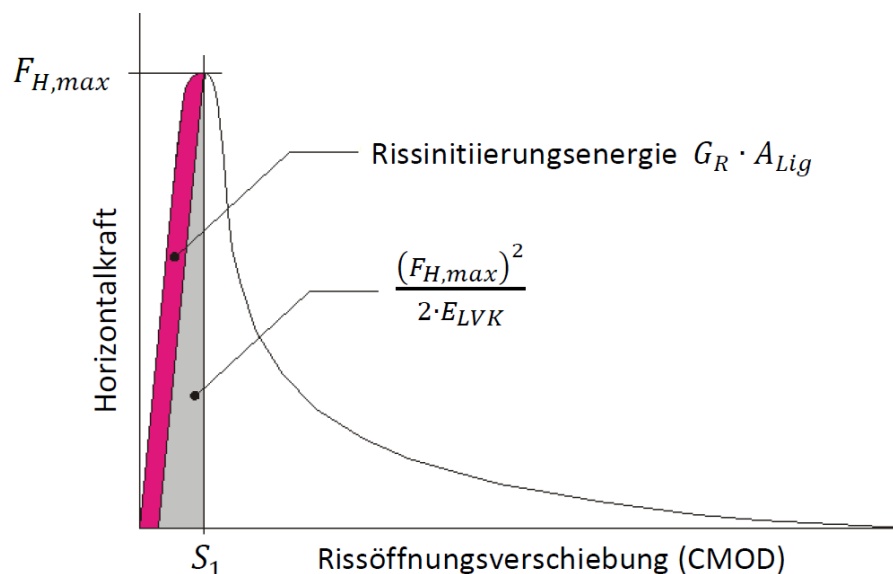


Abbildung 5.4: Rissinitiierungsenergie im LVD [6]

Die grau dargestellte Fläche unter der Kurve entspricht der elastischen Energie, die bis zum Erreichen von $F_{H,max}$ in der Prüfmaschine gespeichert ist und danach idealerweise langsam wieder abgegeben wird. [5]

- **Kerbbiegezugfestigkeit:**

Sie ist eine Kenngröße der Festigkeit (LEBM), liefert aber keine Aussage über das Bruchverhalten. Mit einer einfachen Programmroutine lässt sich die maximale Horizontalkraft $F_{H,max}$ aus der LVK bestimmen. Aus ihr resultiert nach der Belastungsart "Biegung mit Normalkraft" die nominelle Kerbbiegezugfestigkeit σ_{KBZ} (Kerbbiegezugspannung). Der Einfluss der Vertikalkomponente F_V und des Probeneigengewichts ist bei dieser Berechnung vernachlässigt worden. [5]

$$\sigma_{KBZ} = \frac{F_{H,max}}{A_{Lig}} + \frac{M_b}{W_y}$$

σ_{KBZ}Kerbbiegezugspannung [N/mm²]
 M_bBiegemoment [Nmm]
 $F_{H,max}$max. Horizontalkraft [N]
 A_{Lig}Ligamentfläche [mm²]
 W_yaxiales Widerstandsmoment der Ligamentfläche [mm³]

(5-5)

$$M_b = F_{H,max} \cdot \left(c - p + T_{Kerbe} + \frac{H_{Lig}}{2} \right)$$

$(c-p)$ Abmaß siehe Abbildung 5.5 [mm]
 a Tiefe der Starterkerbe [mm]
 $F_{H,max}$ max. Horizontalkraft [N]

(5-6)

$$W_y = \frac{B_{Lig} \cdot H_{Lig}^2}{6}$$

B_{Lig}Ligamentbreite [mm]
 H_{Lig}Ligamenthöhe [mm]

(5-7)

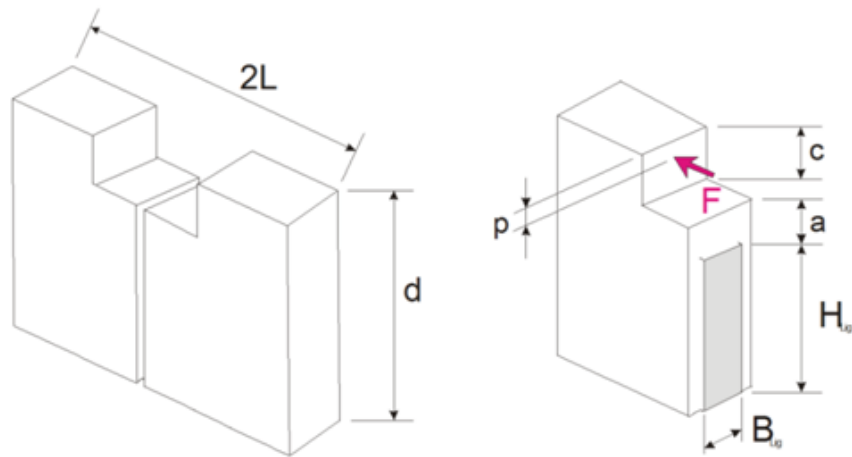


Abbildung 5.5: Abmessungen der Probe [6]

6 Schallpegelmessung zur Knalldetektion

6.1 Einleitung

Im Zusammenhang mit den verschiedenen Versagensmustern der Schalen aus zementgebundenen Holzfaserplatten wurde auch immer wieder beobachtet, dass vor allem die Abplatzung der Schale vom Betonkern mit einem deutlich hörbaren Knall einher geht. Dies lässt auf große Kräfte und ein sprödes schlagartiges Versagen schließen. Da dieses akustische Signal deutlich zu hören sein soll, kam man auf den Gedanken, über eine Aufzeichnung der Schallpegel in einem Raum, der mit dem System der verlorenen Schalungen aus zementgebundenen Holzfaserplatten hergestellt wurde, Anzeichen erkennen zu können, die ein Versagen des Verbunds ankündigen beziehungsweise zumindest den Moment und die Anzahl der Schadensfälle auf diese Weise zu dokumentieren.

6.2 Versuchsprinzip

Die ersten Versuche hierzu wurden in dem eigens für Versuche gebauten Testhaus durchgeführt. Das Testhaus wurde auf Initiative des Auftraggebers der Studie, zu welcher auch diese Diplomarbeit gehört in der Umgebung von Wien gebaut. Dies sollte den Einsatz des Systems und die Untersuchung allfälliger Schäden unter realen Bedingungen schaffen. Das verwendete Schalungssystem aus verlorenen Wand- und Deckenschalungen besteht aus fertigen Elementen die aus Cetris[®]-Platten im Werk gefertigt wurden und vor Ort auf der Baustelle nurmehr aufgestellt und montiert werden mussten. Das Betonieren erfolgte in drei Durchgängen, wobei die einzelnen Betonierhorizonte an den Schalungen markiert wurden.

Während der, zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit beginnenden Aushärtungszeit traten bereits einige der erwarteten Schadensfälle, wie zum Beispiel Abplatzungen der Schalungen vom Betonkern, ein. Um realistische Bedingungen zu schaffen, wurde, wie in den Abbildungen 6.1 und 6.2 ersichtlich ist, ein Teil des Testhauses mit einer Wärmedämmung versehen, während der baugleiche zweite Teil als Rohbau belassen wurde.

Die am Testhaus durchgeführten Untersuchungen umfassen neben der Mängeldokumentation auch Feuchtemessungen und eine Untersuchung der werk- und bauseitigen Plattenstöße, welche aber nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit sind und daher nur der Vollständigkeit halber erwähnt, aber im Weiteren nicht behandelt werden.



Abbildung 6.6: Testhaus Ansicht: links in gedämmter Ausführung und rechts ungedämmt

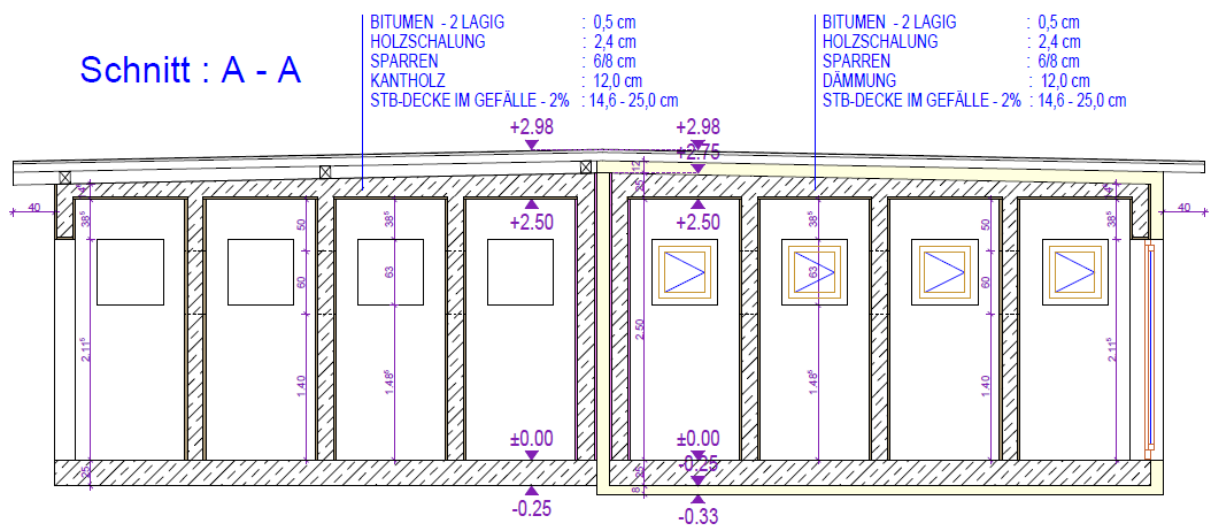


Abbildung 6.7: Schnitt durch das Testhaus: links ungedämmt, rechts gedämmt. [7]

6.3 Versuchsaufbau

In der zweiten Woche nach dem Betoniervorgang wurden in beiden Hälften des Gebäudes je ein Mikrofon aufgestellt und mit einem sich in der gedämmten Hälfte befindlichen Messrechner zum Aufzeichnen der Daten verbunden. Die genaue Position der Mikrofone wird in Abbildung 6.3 gezeigt.

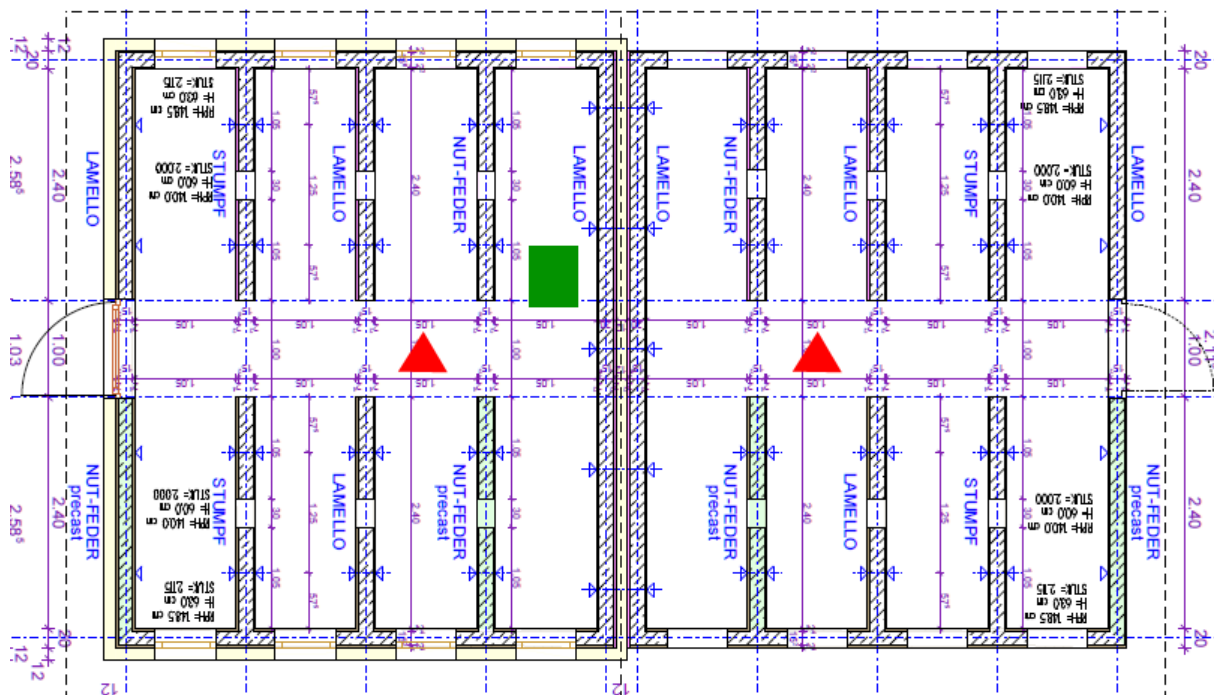


Abbildung 6.8: Die roten Dreiecke markieren die Mikrofon-Standorte und das grüne Viereck die Position des Rechners. [7]

Bei den Mikrofonen, wie in Abbildung 6.4 gezeigt, handelte es sich um federgelagerte USB-Kondensator-Mikrofone, mit einer Sample Rate von 16 bit/48 kHz und eine Empfindlichkeit von -32dB. Die Sample Rate, im Deutschen auch als Abtastrate bezeichnet, gibt an, wie oft innerhalb einer Zeitspanne ein kontinuierliches Signal, wie ein Ton abgetastet wird und in ein zeitdiskretes Signal umgewandelt wird. Zum Vergleich nutzen Audio-CDs eine Abtastrate von nur 44,1 kHz.



Abbildung 6.9: Im Testhaus plaziertes Mikrofon

Die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs beginnt in einem Frequenzbereich von 16 Hz bis etwa 19.000 Hz bei ca. -5 dB. Da die Geräusche, wie die Abplatzungen, Angaben zufolge hörbar waren, müssten diese höhere Werte erzielen. Sollten sie aber wider erwarten unter -5 dB liegen, wären sie nicht wahrnehmbar aber dennoch als Ausschläge auf der Skala erkennbar sofern sie nicht von Umgebungsgeräuschen überdeckt werden. Im Zusammenhang mit den Versuchen, wurden die Mikrofone über die auf dem Messrechner verwendete freie Audiosoftware *Audacity* so eingestellt, dass Schallpegel unter -24 dB als Stille interpretiert wurden, was bedeutete, dass keine Aufnahme erfolgte. Innerhalb von 400 ms (Millisekunden) erkennt die Software ein Signal, das bedeutet, dass ein Geräusch wie zum Beispiel ein Knall mindestens die Dauer von ca. 500 ms haben muss um als Ausschlag erkennbar zu sein. Das zur Aufzeichnung verwendete Programm ermöglichte es uns all unsere gewünschten Einstellungen vorzunehmen und die erforderlichen Tonspuren auf der im Messrechner verbauten Festplatte, zu speichern. Diese bot mit 400 GB genügend Speicherplatz um über mehrere Tage hinweg aufzuzeichnen. *Audacity* speicherte dabei die ca. 37 Minuten langen Audiodateien im *.mp3 – Format ab. Dieses Format ermöglicht es, durch das Weglassen von für den Menschen nicht hörbare Töne, im Vergleich zu anderen Speicherarten sehr gut komprimiert zu werden.



Abbildung 6.10: Aufzeichnung am PC vor Ort

Der Versuch wurde über einen Zeitraum von vier Wochen im Testhaus durchgeführt, wobei die Daten im Abstand von jeweils einer Woche ausgelesen und die Aufzeichnung neu gestartet wurde. In der Zwischenzeit wurden andere Messungen und Versuche am Testhaus durchgeführt die es unmöglich gemacht hätten die Pegel dieser Zeitspanne auszuwerten, da diese von Stimmen und anderen Umgebungsgeräuschen überlagert worden wären. Während der Auswertung zeigte sich jedoch ein weiteres Problem, das zwar bekannt aber dennoch unterschätzt worden ist. Durch den Flugverkehr tiefliegender Passagierflugzeuge kam es immer wieder zu mehreren Sekundenlangen nicht auswertbaren Sequenzen, da diese Umgebungsgeräusche alles andere überschatteten.

6.4 Versuchsauswertung

Die Messpegelaufzeichnung der abgespeicherten Audiodateien erfolgte mit dem ebenfalls aus dem Internet frei beziehbarem Programm *Schallanalysator: Spaichinger Schallpegelmesser*. Das Programm bedarf keiner Installation und kann per USB-Stick an jedem Computer mit einem *Windows* Betriebssystem benutzt werden; gemessen werden können dabei der Schalldruckpegel (in dB), der bewertete Schalldruckpegel (in dB(A)), der mittlere und maximale bewertete Schalldruckpegel (in dB(A)), die Schallintensität (in W/m^2), der effektive Schalldruck (in Pa), die Grundfrequenz (in Hz), das Frequenzspektrum (Schaubild) sowie der Verlauf des Schalldrucks in Abhängigkeit von der Zeit (Speicheroszilloskop). Für unsere Versuchsauswertung genügten uns der bewertete Schallpegel, der Schallpegel, der effektive Schalldruck, die Schallintensität sowie deren Mittelwerte.

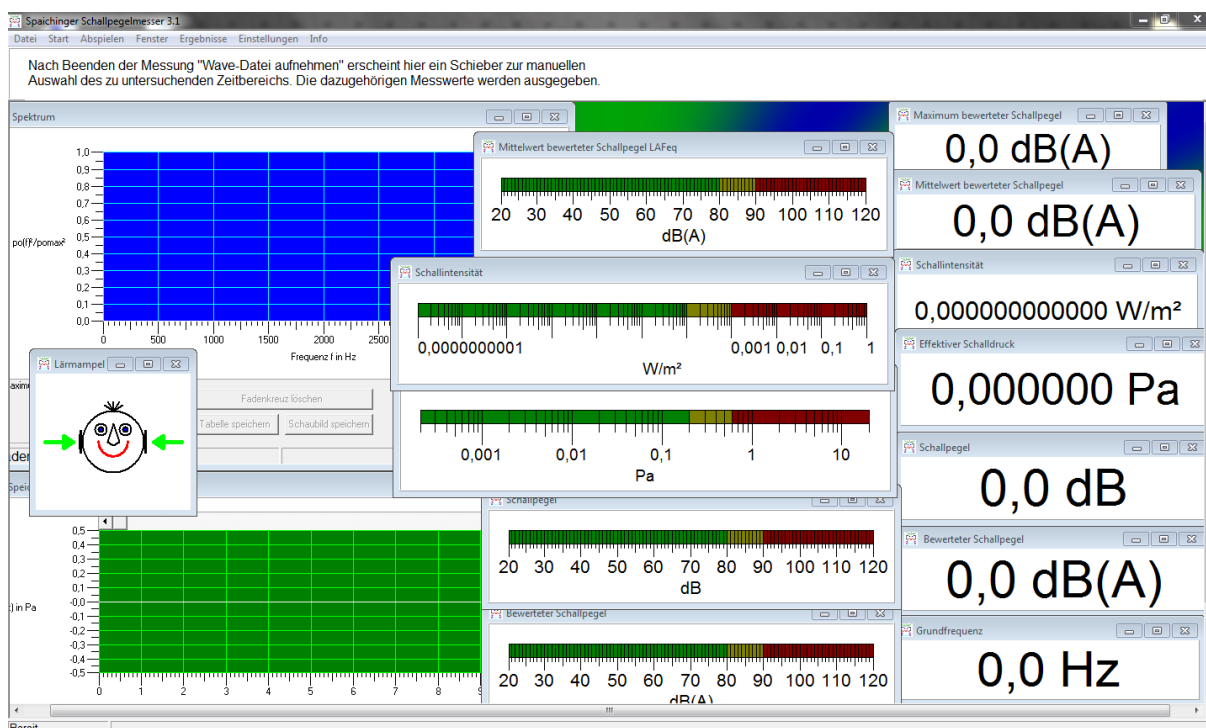


Abbildung 6.11: Benutzeroberfläche Schallanalysator: Spaichinger Schallpegelmesser mit allen aktivierten Fenstern

Im Programm wählte ich die gewünschten Aufzeichnungen als Zahlenwert und auch als Balkendiagramm, indem die Intensität im Ampelsystem von Grün (schwach) zu Rot (stark) - angezeigt wurde. Die gezeigten Schaubilder von Schalldruck und Spektrum wurden dann als Bild-Dateien im Format *.bmp abgespeichert werden.

Das Messintervall, der aufgezeichneten Größen wurde mit der Einstellung „schnell“ auf ca. 0,186 Sekunden eingestellt. Das Ergab aus einem *.mp3-File, die eine Abspieldauer von exakt 37 Minuten und 42 Sekunden hatte, 12.192 Werte. Diese wurden dabei zusammengefasst und in einer *Microsoft Excel*-Tabelle angelegt. So waren die maximalen Ausschläge einfacher zu sehen und konnten bei Bedarf in der Audiodatei überprüft werden. Tabelle 6-1 zeigt zur Veranschaulichung ein Auszug einer solchen Excel-Tabelle.

Tabelle 6-1: Erste Seite des ersten Excel-Sheets der Schallpegelmessungen

<u>Schallpegel</u>				
<u>Messergebnisse</u>				
Datum:	16.07.2014			
Beginn:	09:57:03			
Ende:	10:34:58			
Ort:				
Messintervall:	ca. 0,186 s ("schnell")			
Ergebnisse:				
	Bewerteter		Effektiver	
	Schallpegel	Schallpegel	Schalldruck	Schallintensität
Messung:	in dB(A)	in dB	in Pa	in W/m²
Mittelwerte:	51,7	70,0	0,062959	9,90969E-06
Einzelwerte:				
1	46,2	64,1	0,032079	2,57266E-06
2	42,1	61,3	0,023269	1,35364E-06
3	40,4	58,6	0,016998	7,22294E-07
4	41,3	58,4	0,016710	6,98053E-07
5	40,4	57,9	0,015645	6,11934E-07
6	41,4	56,9	0,013971	4,87984E-07
7	40,5	55,2	0,011553	3,33676E-07
8	52,4	58,2	0,016205	6,56501E-07
9	48,3	55,7	0,012127	3,67678E-07
10	62,5	64,5	0,033489	2,80378E-06
11	51,0	54,9	0,011059	3,05749E-07
12	60,6	62,4	0,026336	1,73391E-06
13	55,4	57,9	0,015626	6,10460E-07
14	61,7	63,9	0,031156	2,42670E-06
15	56,2	59,4	0,018574	8,62473E-07
16	45,1	56,3	0,013107	4,29469E-07
17	45,3	53,2	0,009094	2,06743E-07
18	62,2	68,0	0,050065	6,26625E-06
19	56,0	63,6	0,030107	2,26605E-06
20	51,7	61,4	0,023499	1,38047E-06
21	49,4	59,7	0,019344	9,35499E-07
22	49,5	57,3	0,014645	5,36200E-07
23	44,2	56,3	0,013089	4,28308E-07
24	44,8	56,7	0,013611	4,63177E-07
25	43,3	55,2	0,011481	3,29544E-07
26	42,7	54,4	0,010472	2,74148E-07
27	43,6	55,1	0,011336	3,21286E-07

Das folgende Diagramm bezieht sich auf die gesamte vorhin dargestellte Excel-Tabelle und stellt den bewerteten Schallpegel im Bereich von 30 bis 90 dB(A) für jeden Einzelwert dar.

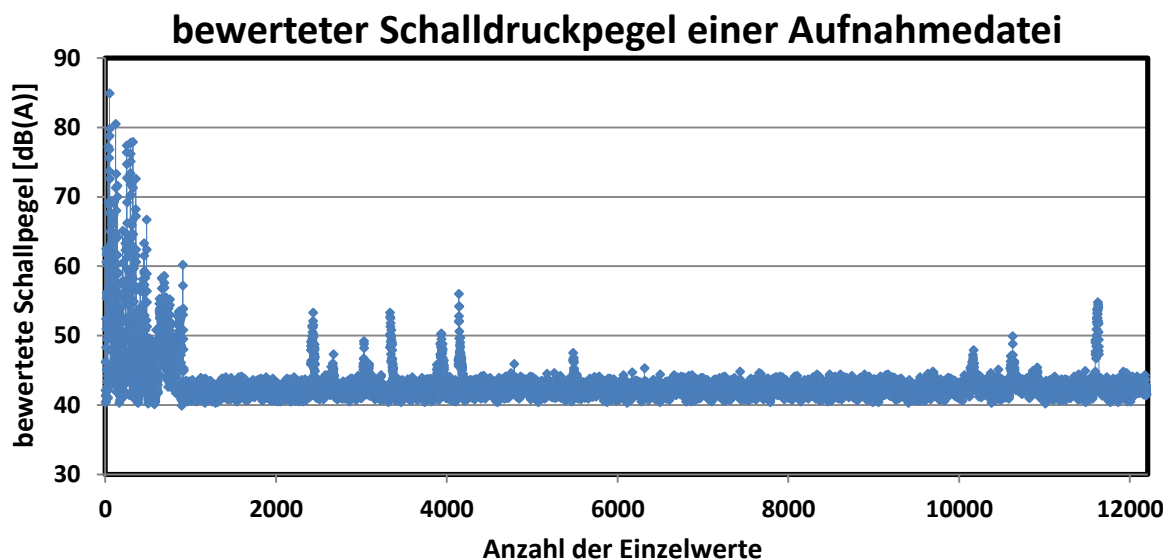


Abbildung 6.12: Darstellung der bewerteten Schallpegel in dB(A) einer Audiodatei mit ca. 12.000 Einzelwerten

Da das Programm alle Messungen in Echtzeit durchführt und ausgibt, dauerte es auch diese Zeit um eine Audiodatei zu analysieren. Die Tonspuren wurden zwischen dem 26. Juni und dem 17. Juli 2014 aufgezeichnet, wobei ein Tonmaterial von 524 Dateien zu je 37,7 min aufgenommen wurde, was in etwa 13,72 Tagen entspricht.

6.5 Ergebnisse

Nach Auswertung aller aufgenommenen Dateien wurde festgestellt, dass für die Dauer der Messung zu keiner Zeit Geräusche entstanden sind, die eine Abplatzung zuzuordnen wären.

Die in Abbildung 6.7 ersichtlichen lokalen Geräuschmaxima wurden durch Abhören der bestimmten Stelle in der Audiodatei überprüft und alle als Umgebungsgeräusche, wie zum Beispiel Tierlaute oder menschliche Aktivitäten, interpretiert.

Die hohen Ausschläge am Anfang des Spektrums sind dadurch entstanden, dass wir uns zu diesem Zeitpunkt im Testhaus befanden und die letzten Einstellungen am Mikrophon sowie am Messrechner vor Ort vornahmen.

Zur Kontrolle wurde eine akustische Methode gewählt, bei der die Schalungsoberfläche aller Innenräume des Testhauses mit einem Hammer abgeklopft wurde. Die Kontrolle ergab, dass keine Abplatzungen vorhanden waren. Dies bestätigte, dass die von uns gewählte Prüfmethode mit Aufnahme und Bewertung des Geräuschpegels zu einem sinnvollen Einsatz führt.

7 Feuchtigkeitsuntersuchungen mittels Sensoren

7.1 Einleitung

Wie bereits im Zuge dieser Arbeit gezeigt, steht die Verbundqualität der verlorenen Schalung und des selbstverdichtenden Betons (SCC) in direkter Verbindung zum im Interface vorherrschenden Wassergehalt. So entstand die Idee, die Verbundqualität in Zusammenhang mit dem Feuchtigkeitseinfluss während der Aushärtung des Betons zu untersuchen. Um die Feuchtigkeit genau aufzeichnen zu können, werden dabei Sensoren, die möglichst im Interface zwischen Platte und Beton liegen, zum Einsatz gebracht werden. Die Aufzeichnung der Messdaten wird dabei von einem Rechner übernommen werden, der diese direkt von den Sensoren zugespielt bekommt.

7.2 Aufgabenstellung und Messprogramm

Die Aufgabenstellung folgte dem bereits aus der vorangegangenen Projektarbeit, mit dem Titel *Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*, bewährten Prinzip der Versuche mit der Keilspaltmethode nach ÖNORM B 3592. Um geeignete Referenzplatten zu erhalten wurden diesmal die benötigten 15x15 cm Holzfaserplatten aus sechs größeren Platten zugeschnitten; diese hatten die Abmessungen 30x15 cm und so erhielten wir durch deren Teilen je eine Platte für die Sensoren und je eine Referenzplatte. Die sechs zukünftigen Sensorplatten wurden nach dem Schema SN 1-3 und SF 4-6 bezeichnet.

Der Buchstabe „S“ steht dabei für die 6 Sensorplatten, „N“ für Normal, also für mit SCC betonierte unbehandelte Platten, bei denen das Augenmerk bei den Tests auf den Verbund zwischen Platte und SCC gelegt wurde und „F“ für die Untersuchung der Festigkeit der Platten, dies bezieht sich jedoch nur auf die Referenzplatten, denn alle 6 Sensorplatten wurden auf ihren Verbund überprüft.

Der Buchstabe F blieb wegen den Referenzplatten erhalten, denn diese 6 wurden unterteilt. Die drei, an denen der Verbund untersucht werden sollte, erhielten die Kurzbezeichnung RN 1-3. Diese Platten sollten die Referenzwerte zu den Platten mit den Sensoren anzeigen, da der Verbund durch die Bohrungen für die Sensoren und durch die Sensoren selbst wahrscheinlich schlechter ausfallen würde, als der Verbund ohne eben diesen Fehlstellen in der Platte.

Die drei Referenzplatten, an denen die Plattenfestigkeit selbst untersucht werden sollte wurden nach dem Schema RF 4-6 benannt und sollten zum Vergleich der Plattenfestigkeit zur Verbundfestigkeit dienen.

In Abbildung 7.1 wird schematisch das Messprogramm zur Sensormesstechnik dargestellt.

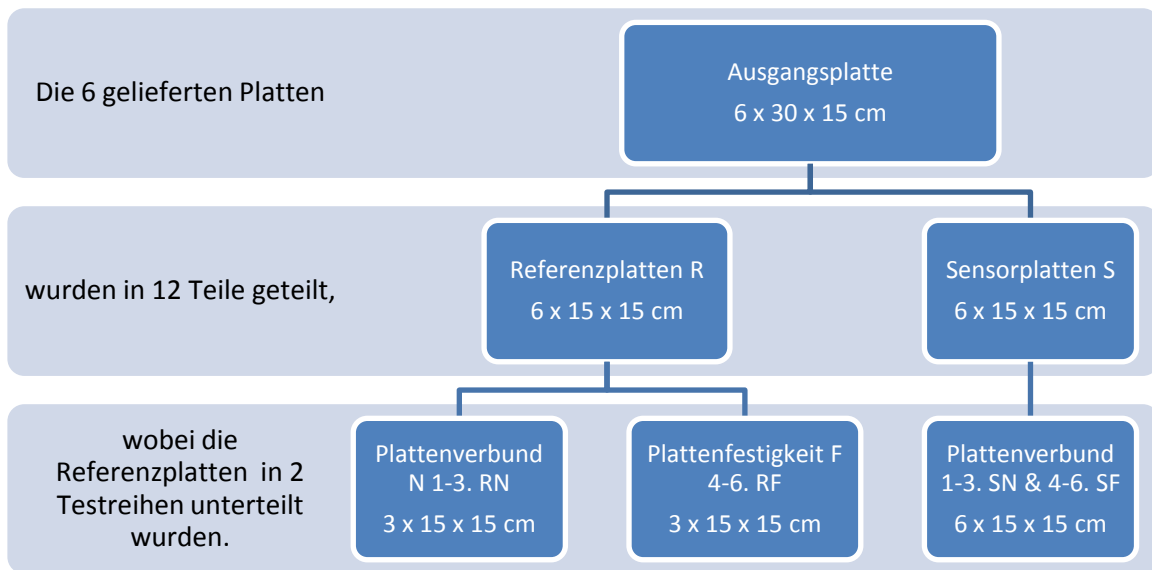


Abbildung 7.1: Messprogramm zur Sensormesstechnik

7.3 Messtechnik

Um die Feuchtigkeit an der maßgebenden Stelle, nämlich im Verbund messen zu können, erforderte es eine Palette an vielen technischen Einzelkomponenten und deren genaue Feinabstimmung untereinander. Angefangen von den Sensoren selbst, über den Anschluss, über selbsthergestellte Kabel, an den Platinen, die die Kommunikation zwischen dem Rechner und den Messgeräten übernahmen, erforderte dies eine sehr hohe Zahl an Qualitätsprüfungen unsererseits und daraus folgenden Überarbeitungen und Ausbesserungen, sodass wir ein brauchbares, fehlerfreies Messinstrument als Endprodukt fertigstellen konnten. In Abbildung 7.2 ist ein Schema der Hauptkomponenten dargestellt, die dazu nötig waren um die gewünschten Werte, nämlich die relative Feuchtigkeit und die Temperatur, im Verbund messen zu können und übersichtlich darzustellen.



Abbildung 7.2: Hauptkomponenten für die digitale Messung der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur

In diesem Kapitel wird nun im Folgenden genauer auf die Eigenschaften dieser Komponenten eingegangen, sowie auf deren Schnittstellen, Aufgaben, Programmierungen und speziell beim Multiplexer auf dessen Herstellung.

7.3.1 Sensoren

Die Auswahl der Sensoren erfolgte anhand folgender ausschlaggebenden Kriterien:

- Die Handhabung – Möglichst kleine Abmessungen
- Die Messgenauigkeit – Möglichst geringe Messtoleranzen
- Die Datenverarbeitung – Vorzug digitaler Verarbeitung gegenüber analoger
- Die Produktverarbeitung – Möglichst robuste, kompakte und geschützte Bauweise
- Der Preis

Letztendlich entschieden wir uns für das in Abbildung 7.3 abgebildete Modell *SHT21* von der *Sensirion AG*, einer schweizer Firma, die sich auf Sensoren spezialisiert hat.



Abbildung 7.3: Vorderseite des 3x3mm großen SHT21 Sensors mit klar erkennbarem Sensor-„Auge“ zur Messung der Daten. [8]

Der SHT21 mit dem eingebauten 4C CMOSens[®] Chip bildete dabei einen guten Kompromiss zwischen der billigeren Variante SHT20 und der High-End-Variante SHT25.

Neben den Sensoren für die relative Luftfeuchtigkeit und der Temperatur, enthält der Chip einen Verstärker, einen A/D-Wandler, einen OTP-Speicher und eine digitale Verarbeitungseinheit mit I²C Protokoll, auf das in diesem Kapitel später genauer eingegangen wird.

Eine erste Anforderung an den Sensor war die Größe. Da wir neun Sensoren pro CETRIS[®]-Platte unterbringen mussten und die Sensoren selbst Störbereiche im Verbund zwischen dieser und dem Beton darstellten, mussten die Sensoren sehr klein ausfallen, um auch die Lücken im Verbund klein zu halten. Der SHT21 sollte mit seiner 3x3mm großen Oberfläche diesem Kriterium nachkommen. Weiters musste der Sensor trotz der geringen Größe eine gute Handhabung und Verarbeitbarkeit aufweisen, denn die jeweiligen Drähte für zum Beispiel die Stromzufuhr oder die Datenübertragung mussten an der Rückseite festgelötet werden. Die genauen Abmessungen sind der folgenden Abbildung 7.4 und die Anordnung der Pins, an denen die Drähte angelötet wurden, der Abbildung 7.5 zu entnehmen.

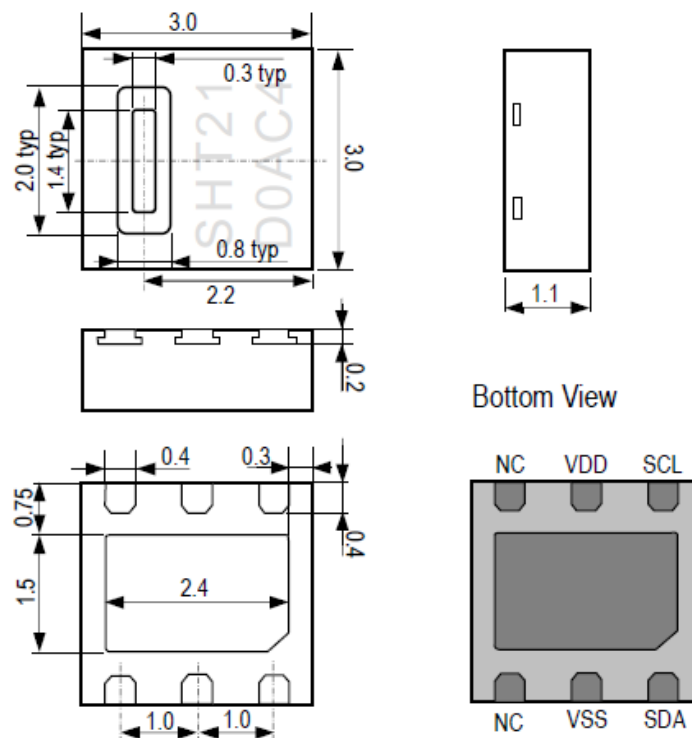
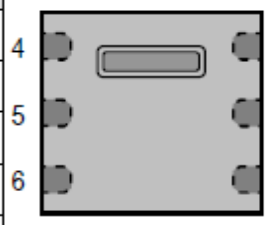


Abbildung 7.4: Abmessungen des Sensors. [8]

Pin	Name	Comment
1	SDA	Serial Data, bidirectional
2	VSS	Ground
5	VDD	Supply Voltage
6	SCL	Serial Clock, bidirectional
3,4	NC	Not Connected



The pinout diagram shows a square package with six pins. Pin 1 is at the bottom-right, Pin 2 is at the bottom-right, Pin 3 is at the top-right, Pin 4 is at the top-right, Pin 5 is at the bottom-left, and Pin 6 is at the bottom-left. The sensor area is in the center.

Abbildung 7.5: Anordnung der Pins am Sensor von vorne betrachtet. [8]

Wichtig war ebenfalls eine ausgezeichnete Langzeitstabilität, denn der Sensor war ja speziell bei der Gießung und beim Aushärten des Betons einem unwirtlichen Milieu ausgesetzt.

Der SHT21 Feuchtesensor kann dank der Vergießung zu kompakten DFN-Bauteilen äußeren Einflüssen trotzen. Das Gehäuse des aus Silikon hergestellten Sensors besteht aus einem Kupfer Leiterahmen und einer grünen Formmasse auf Epoxy-Basis. Da es so vollständig RoHS und WEEE konform ist, ist es Beispielsweise frei von giftigen Stoffen wie Blei, Cadmium oder Quecksilber.

Das vorrangige Kriterium war natürlich die Performance und die Messgenauigkeit. Die Ansprechzeit für die Luftfeuchtigkeit, im Weiteren auch RH für Relative Humidity genannt liegt bei 8 Sekunden. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 100 Prozent. Der typische Toleranzbereich bei diesen Messungen bewegt sich bei +/- 2%. Siehe dazu die Abbildung 7.6.

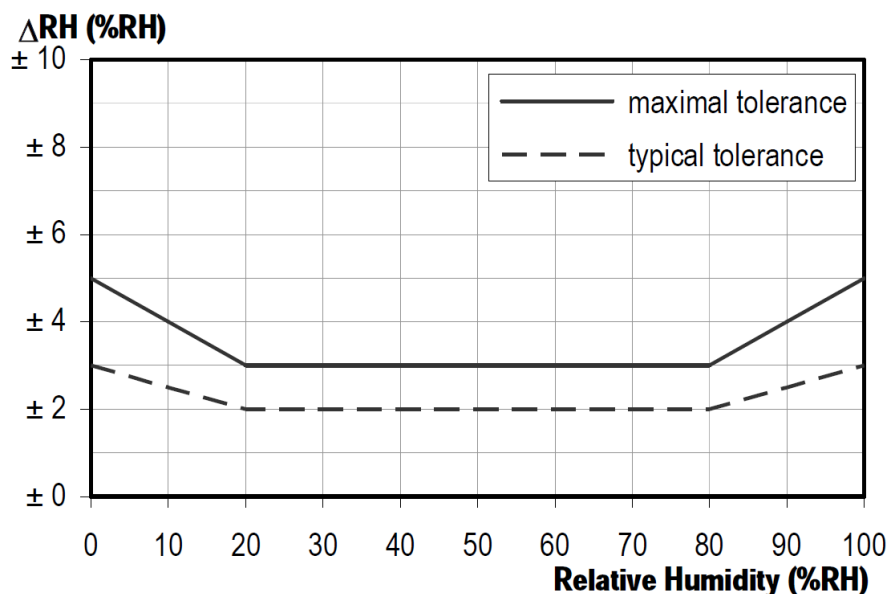


Abbildung 7.6: Typische und Maximale Toleranzen bei 25°C. [8]

Der Messbereich der Temperatur liegt beim SHT21 zwischen -40 und 120°C. Die Toleranzen hierzu sind in der unteren Abbildung ersichtlich. Unsere Messungen fanden bei Raumtemperatur statt. Wie später noch beschrieben wird, wurde auch noch ein einzelner Sensor direkt am Multiplexer angelötet, der die Umgebungsluftfeuchtigkeit und die Raumtemperatur messen sollte.

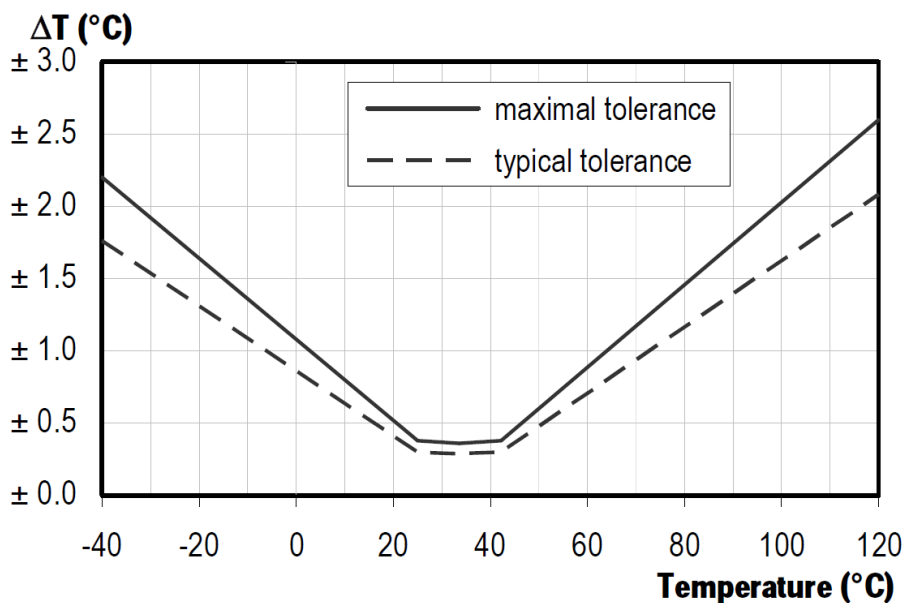


Abbildung 7.7: Temperaturoleranzen in ° Celsius. [8]

Ein weiterer ausschlaggebender Punkt war eine geeignete und zuverlässige Datenübertragung. Der Sensor bietet dafür ein digitales Output über eine I²C Schnittstelle.

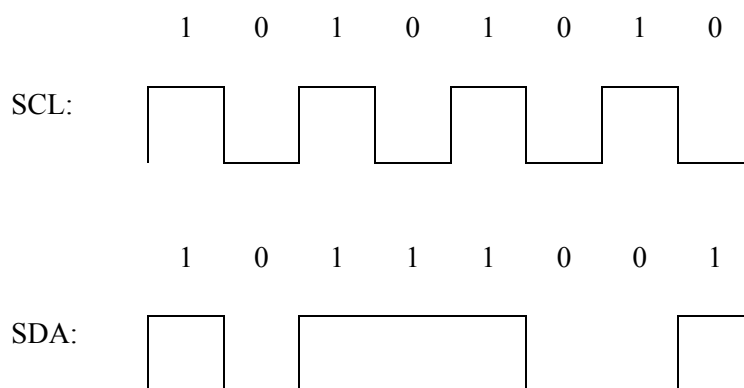
Der im Jahr 1982 von der Firma Philips entwickelte I²C Bus um Fernsehgeräten eine geräteinterne Kommunikation zu ermöglichen, dient der I²C seither als Standard Datenbus für

Microkontroller. Bei einem Binary Unit System, kurz Bus handelt es sich im Allgemeinen um eine Datenübertragungssystem wo mehrere Teilnehmer über eine gemeinsame Datenleitung kommunizieren, wobei die die einzelnen an der Datenübertragungen anderer Teilnehmer nicht beteiligt sind. Dabei sind diese Systeme immer so organisiert, dass zu jedem Zeitpunkt immer nur ein einzelner Teilnehmer Daten auf den Bus ausgibt, die vom Empfänger weiterverarbeitet werden. Die Identifikation des Knotenpunktes erfolgt mittels seiner spezifischen Adresse. So erfolgt die Datenübertragung in einem seriellen Bussystem in Datenpaketen, wobei jedes Datenpaket aus der Sender- und Empfänger-Adresse bestehen und dem Teilnehmer somit vermitteln die empfangenen Daten zu verarbeiten oder zu verwerfen. Es handelt sich somit um einen bidirektionalen Bus, da auf der Datenleitung die Datenpakete in beide Richtungen versandt werden.

Das I²C-Bussystem (Inter-Integrated Circuit) ist als ein Master-Slave-Bus konzipiert, das bedeutet ein als Master bezeichneter Teilnehmer initiiert den Datentransfer und der durch die im Datenpaket enthaltene Adresse angesprochene Empfänger (Slave) reagiert und verarbeitet die empfangenen Daten weiter. Die Übertragung findet bei I²C über 2 Signalleitungen statt. Mit SCL (CL für Clock) wird die Takt- und mit SDA (DA für Data) die Datenleitung bezeichnet. Beide liegen mit sogenannten Pull-Up-Widerständen an der im Allgemeinen vom Bauteilabhängigen Versorgungsspannung VDD. Ein Pull-Up-Widerstand im Bereich von 1,0 k Ω bis 10 k Ω hat die Aufgabe die Signalleitung auf eine höheres Spannungspotenten zu bringen, solange kein andere Befehlt gegeben wird. Der Bus arbeitet im Betrieb mit einer sogenannten "positiven Logik", das bedeutet, dass ein High Pegel der Datenleitung mit mindestens 0,70 x VDD eine logische "1", eine Low-Pegel mit einer Spannung von höchstens 0,30 x VDD einer logischen "0" entspricht. Jeweils 8 Bit bilden dabei eines der Datenpakete bei der Übertragung, wobei die ersten sieben Bits die Adresse des Empfängers und das letzte der acht Bits dem Empfänger mitteilt, ob Daten empfangen oder zum Master gesendet werden sollen. Der sich daraus ergebende Adressraum umfasst 112 mögliche Knoten. Benötigt man eine größere Anzahl, kann anstatt der 8-Bit eine 10-Bit Adressierung vorgenommen werden, welche die Zahl der möglichen Knoten auf 1136 erhöht. [13]

Die häufige Verwendung des I²C ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Microkontroller ein ganzes Netzwerk an integrierten Schaltungen kontrollieren kann, welche nur über zwei Pins (SDA u. SCL) verbunden sind. SCL (Serial Clock) ist dabei, wie schon erwähnt, die Taktleitung und ist somit ebenfalls wie SDA (Serial Data = Datenleitung) für den digitalen Datenaustausch verantwortlich. Vereinfacht dargestellt gibt Clock also den Takt oder Puls einer Bitlänge vor und definiert sie so. Data gibt innerhalb eines Bitdatenstranges dabei die Werte als binäre Zahlen, wie in folgender Tabelle 7-1 dargestellt, aus:

Tabelle 7-1: Darstellung eines Bitdatenstranges durch SCL und SDA



In dem von uns gewählten Sensor SHT21 sind NC (Not Connected, vergleiche Abbildung 7.5) und das zentrale Pad auf der Rückseite des Sensors intern mit dem VSS verbunden. Abbildung 7.5 zeigt dabei die Anordnung der Anschlüsse am Sensor selbst. VSS steht dabei für GND also Ground für Erdung und SDA für DATA. Abbildung 7.8 zeigt die minimalen, typischen und maximalen elektronischen Spezifikationen des Sensors, sowie deren Einheiten.

VDD wurde bei unseren Versuchen weitgehend mit 3,3 V [Volt] bezeichnet. Die Betriebsspannung des Sensors liegt bei 2,1 bis 3,6 V und der Energieverbrauch bei 3,2 μ W bei 8 Bit und einer Messung pro Sekunde.

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Supply Voltage, VDD		2.1	3.0	3.6	V
Supply Current, IDD ⁶	sleep mode	-	0.15	0.4	μ A
	measuring	270	300	330	μ A
Power Dissipation ⁶	sleep mode	-	0.5	1.2	μ W
	measuring	0.8	0.9	1.0	mW
	average 8bit	-	3.2	-	μ W
Heater	VDD = 3.0 V	5.5mW, $\Delta T = + 0.5-1.5^{\circ}\text{C}$			
Communication	digital 2-wire interface, true I ² C protocol				

Abbildung 7.8: Übersicht über die elektronischen Spezifikationen des SHT21. [8]

7.3.2 Der Multiplexer

Als Multiplexer wurde ein 1-8 Channel-Wechsler der Firma Phillips mit der Modellbezeichnung PCA9548A, der in Form eines SMD-Chips hergestellt wird, verwendet. Die Wahl fiel auf dieses Modell, da dessen Parameter mit denen des SHT21 und dem Arduino-Board kompatibel waren.

Im Grunde genommen ist der Multiplexer ein Wechselschalter, der einen Sensor absteckt und den nächsten aktiviert. Es werden sozusagen alle Sensoren abgeschaltet und nur einer angesprochen. Dies lässt sich über die Software steuern. Der Multiplexer ist dabei nötig, da der SHT21 Sensor keinen eigenen eingebauten Speicher für Adressen besitzt. Ein Multiplexer kann dabei maximal 8 Kanäle (0 bis 7) durchschalten. Diese 8 Kanäle ergeben sich wieder aus einer binären Zeichenfolge aus der einfachen Exponentialgleichung $x = 2^3$. Die Zahl 2 ergibt sich aus dem Kontakt „-“, auch als „0“ bezeichnet, und dem Kontakt „+“, auch als 1 bezeichnet und die Zahl 3 des Exponenten aus den drei Anschlüssen A0, A1 und A2. Die nach x gelösten 8 Möglichkeiten für die Zustände für die Adresspins ergeben sich also wie in folgender Tabelle 7-2 dargestellt.

Tabelle 7-2: Die 8 Kanäle eines Multiplexers und ihre binäre Zuordnung

A0	A1	A2	Dezimalzahl	Kanalnummer
0	0	0	0	1
0	0	1	1	2
0	1	0	2	3
0	1	1	3	4
1	0	0	4	5
1	0	1	5	6
1	1	0	6	7
1	1	1	7	8

Da wir 6 Platten mit je 9 Sensoren hatten, brauchten wir dementsprechend auch 54 Kanäle und folglich ergab sich daraus auch, dass wir 8 Chips brauchten. Die Maximalanzahl von 8 Multiplexern pro Bus ergibt sich ebenfalls daraus, dass jede Adresse nur einmal vorkommen darf und daher aus der Gleichung für die Möglichkeiten die Binärzahlen anzuordnen, nämlich $2^3 = 8$. Als Bus bezeichnet man allgemein eine Übertragung von Daten über eine gemeinsame Leitung bei mehreren Teilnehmern, wobei die einzelnen Teilnehmer aber nicht an der Datenübertragung von anderen Teilnehmern beteiligt sind. Wichtig war dabei, dass der Multiplexer nicht nur jeden Sensor ansprechen kann, sondern auch alle anderen abschalten kann. In der folgenden Abbildung 7.9 sieht man dazu das Pin-Setup eines Multiplexers. Will man also einen bestimmten Sensor ansprechen, so besteht seine Adresse aus 6 Zahlen. Die ersten drei definieren einen der 8 Multiplexer und die letzten drei einen der 8 Kanäle. Theoretisch könnten also 64 Sensoren angesprochen werden.

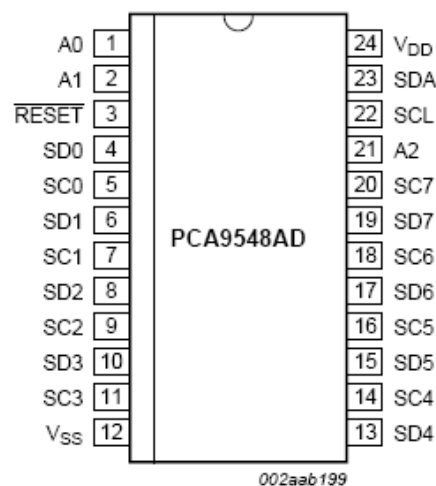


Abbildung 7.9: Anordnung der Pins an einem einzelnen Multiplexer. [9]

Mit A0, A1 und A2 werden darin, wie erwähnt, die Adressen-Inputs bezeichnet. SC und SD bedeuten die jeweiligen Clock und Data Anschlüsse der einzelnen Kanäle, VSS den bisher als GND bezeichneten Ground-Anschluss.

In Abbildung 7.10 ist nun ersichtlich, wie über die unterschiedliche Nummerierung – durch A0-A2 - ein I²C-Bus Protokoll zugewiesen wird, das in Wechselwirkung mit dem Wechselschalter steht. A0, A1, A2 und VSS ergeben dabei den Multiplexer 1.

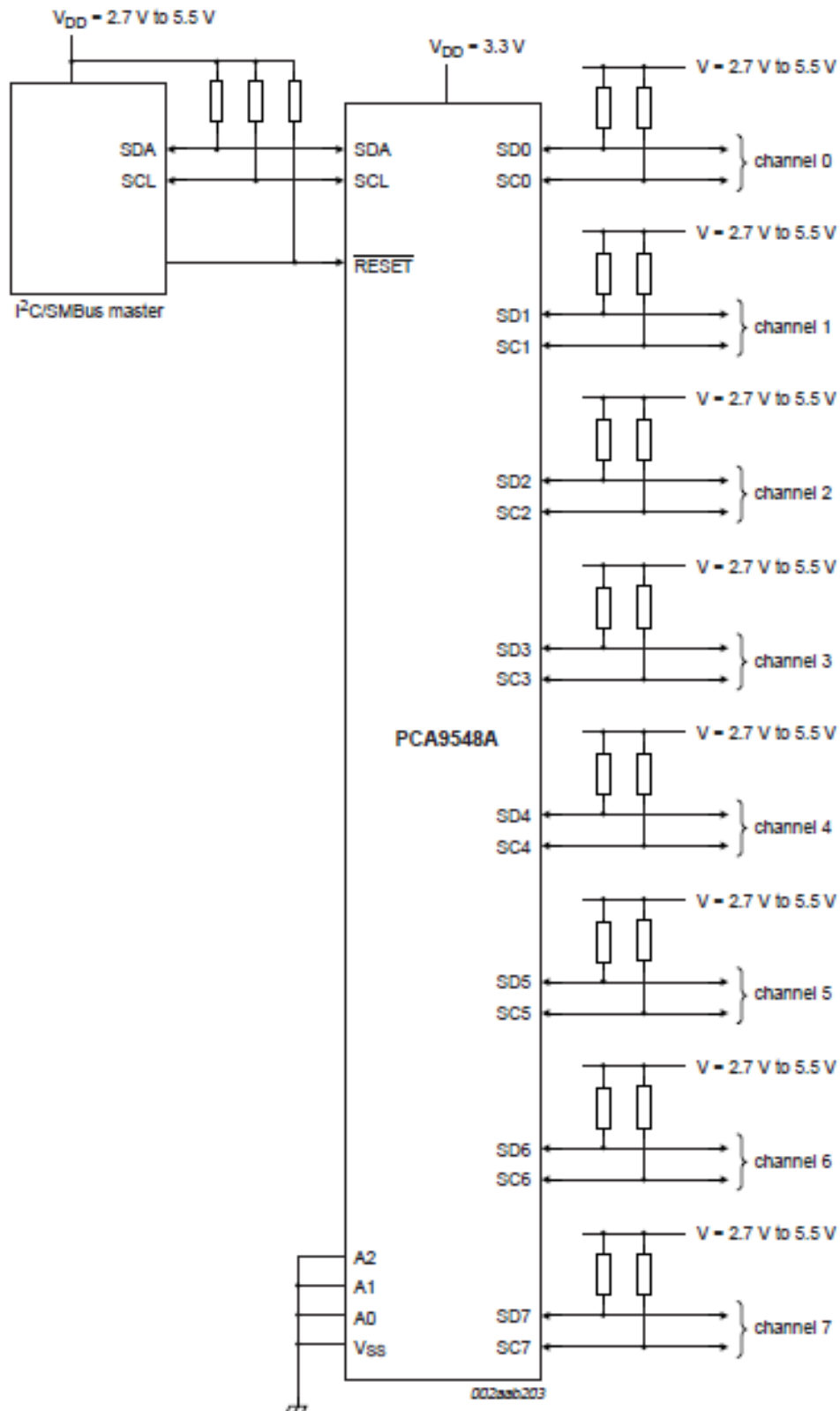


Abbildung 7.10: Typische Applikation des Multiplexers. [9]

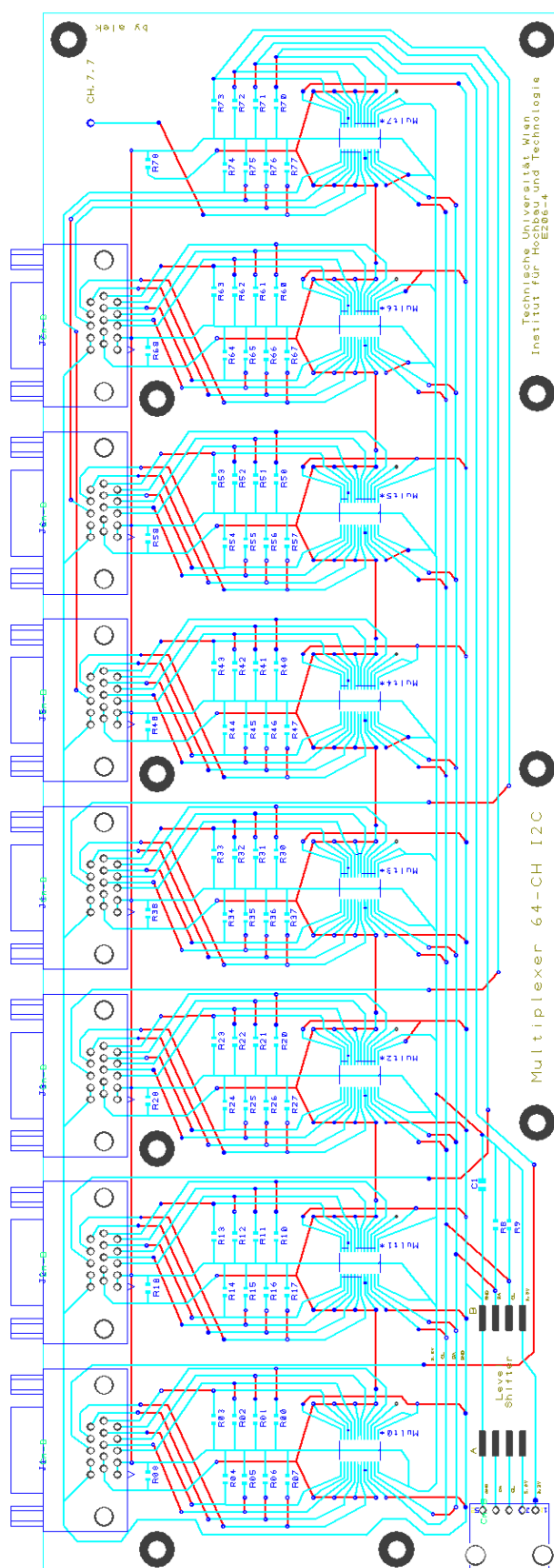


Abbildung 7.11: Leiterplattenplan des Multiplexer-Bus, bestehend aus 8 Chips

Abbildung 7.11 zeigt den Leiterplattenplan des 64 Channel Multiplexer-BUSes. Jeder Multiplexer führt zu einem weiblichen Teil eines D-Sub-Anschlusses, an diese später die Proben über die Verlängerungskabel hängt wurden. Der verwendete „HD15“ D-Sub-Anschluss ist ein dreireihiger 15 poliger Stecker, der auch oft als VGA-Anschluss bei Computermonitoren Verwendung findet. Die Belegung der einzelnen Pins wurde aber komplett neu gewählt.

Wie in Abbildung 7.11 ersichtlich geht ein einzelner Strang des letzten Multiplexer-Anschlusses an die freie Stelle ohne D-Sub-Anschluss. An dieser Stelle wurde ein einzelner Sensor direkt auf der Multiplexer-Bus Platine eingesetzt um die vorhandene relative Luftfeuchtigkeit im Raum und die Umgebungstemperatur messen zu können. Dieser Sensor ist in Abbildung 7.12 rot eingekreist. Der in Abbildung 7.11 schematisch dargestellte Multiplexer-Bus wurde wie in folgender Abbildung 7.12 ersichtlich noch mit zusätzlichen Abdeckplatten geschützt.



Abbildung 7.12: Der fertige Multiplexer-Bus mit rot eingekreistem Sensor zur Messung der RH und der Raumtemperatur

Da ein Multiplexer 8 Kanäle besitzt, wir aber 9 Sensoren pro Probe hatten, wurden die jeweils neunten Sensoren über den letzten Multiplexer aufgerufen, der auf der Darstellung zu keinem eigenen D-Sub-Anschluss führt sondern zu den jeweils anderen. Hierzu kann die Nummerbelegung der einzelnen Sensoren in der folgenden Abbildung 7.13 betrachtet werden. Der jeweils 9. Sensor einer Platte ist dem letzten Multiplexer mit den Anschluss-Nummern 57 bis 62 zugeteilt.

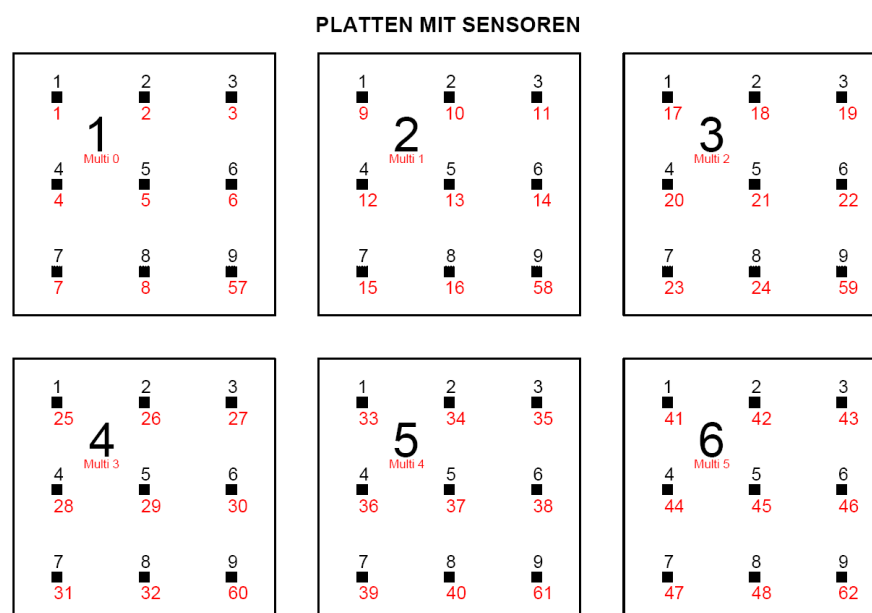


Abbildung 7.13: Zuordnung der Sensoren zu den 6 Multiplexern 0 bis 5. Die jeweils 9. Sensoren einer Platte sind dem 8. Multiplexer mit der Nummer 7 zugeteilt.

Das in C++ geschriebene Programm, das im Arduino läuft und die bis jetzt beschriebenen Abläufe steuert, wird nun schematisch in Abbildung 7.14 dargestellt und anschließend beschrieben.

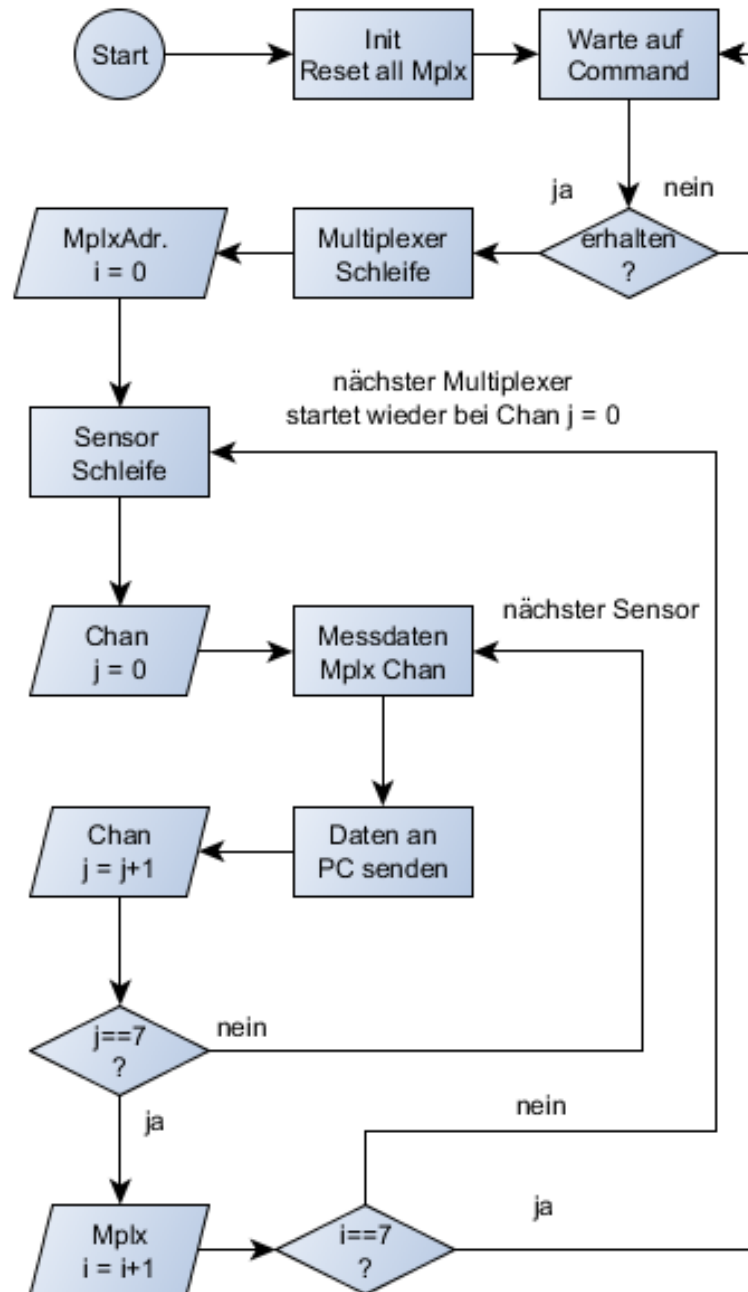


Abbildung 7.14: Flussdiagramm für den Multiplexerbetrieb

Nach dem Start des Programms beginnt die Initialisierung, bei der die Verbindung aller Multiplexer einzeln von 1 bis 8 zu den Sensorchips getrennt wird. Nun reagiert der Multiplexer solange nicht, bis der Befehl zum Ausführen eines Skriptes erteilt wird. Dieser Befehl, also das Auslesen der relativen Luftfeuchte und der Temperatur, wurde mit der Taste „T“ definiert. Die Zeitspanne des Wartens zwischen den Messreihen wurde ebenfalls im Skript mit 6 Stunden definiert, woraus sich vier Messungen innerhalb eines Tages mit 24 Stunden ergeben.

Falls nun der Befehl „T“ erteilt wird, beginnt die Multiplexer Schleife: Es wird mit $i = 0$ der erste Multiplexer angesprochen und mit $j = 0$ der erste Sensor dieses Multiplexers. Dementsprechend kann jeder Sensor anhand von i und j angesprochen werden. Das Computerprogramm speichert die Auswertung dann in eine *.txt Datei, wie folgt:

- | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|-------------|
| • Nummer des Multiplexers | $i + 1$ | } vom Arduino-Board | } Textdatei |
| • Nummer des Sensors | $j + 1$ | | |
| • Wert der relativen Luftfeuchte [%] | | | |
| • Temperaturwert | $[^{\circ}\text{C}]$ | | |
| • Datum und Zeit | | } vom Messrechner (PC) | |

Dabei wurde das Script des Programms so verfasst, dass es jeden Tag eine neue Textdatei anlegen soll. Dies geschah aus Gründen der Übersichtlichkeit und Sicherheit gegenüber eventuellen Ausfällen. Diese Textdateien wurden dabei auf dem in Abbildung 7.15 dargestellten Messrechner abgespeichert und später mit ein paar kleineren Anpassungen in Excel-Dateien importiert. Anhand der Filteroption lassen sich dort die einzelnen Sensoren sehr einfach auswählen und deren Verlauf der Messdaten über die Zeit ablesen.



Abbildung 7.15: Speicherung der Daten am Messrechner

Nachdem der letzte Sensor eines Multiplexers angesprochen wurde, ist die Sensor-Schleife beendet und die Multiplexer-Schleife beginnt wieder mit $i + 1$. Darin werden nun wieder alle Sensoren nacheinander abgearbeitet, während die übrigen abgeschaltet sind. Nachdem der letzte Sensor des letzten Multiplexers aufgerufen wurde, also bei $i=7$ und $j=7$ ist die Multiplexer-Schleife beendet und das Programm startet den Ruhemodus. Nach Ablauf der Wartezeit von 6 Stunden wird das ganze Skript wieder von vorne durchlaufen.

Das beschriebene Programm für die Wertespeicherung wurde in der Programmiersprache Python geschrieben, eine Weiterentwicklung von ABC, das sich durch seine Prägnanz mit anderen Programmiersprachen unterscheidet. Befehle und Einbindungen funktionieren ähnlich wie in der Programmiersprache C++, welche unter anderem auch Einfluss auf den Entwickler von Python hatte. Das Script für den Arduino wurde, wie später beschrieben in C++ geschrieben.

C++ ist eine genormte Programmiersprache, die sich aus der bereits 1979 in Verwendung befindenden Programmiersprache C entwickelte aber heute größten Teils von Java abgelöst. Die Programmiersprache selbst besteht nur aus wenigen Schlüsselwörtern, die durch umfassende und erweiterbare Bibliotheken. Es gibt viele verschiedene "libraries" die von der Arduino-Software mit der Dateierdung ".h" versehen werden. Nutzt man nun Befehle, die dazugehörige Library, welche den Befehl kennt aber nicht eingebunden hat, wird der Befehl auch nicht erkannt.

Das Python-Script:

```
import serial
import datetime
import time
import os

#initialize and set parameters for serial port
ser = serial.Serial()
ser.baudrate = 9600 #set boudrate
ser.port = 2 # 2nd serial port of system (COM3)
ser.parity = serial.PARITY_NONE
ser.bytesize = serial.EIGHTBITS
ser.stopbits = serial.STOPBITS_ONE
ser.timeout = 1.5 #to give the hardware handshake time to happen
ser.xonxoff = False
ser.rtscts = False
ser.dsrdrtr = False
```

```

print("\n\n=====\\n")
print("Program to poll measurement data from array of SHT21 sensors. \nData retrieved via serial interface.\n")
print("=====\\n\n")
print("Details about opened Serial Port: \n")
print(ser, "\\n")

ser.open() #open serial port
print("Serial port",ser.name," open: ",ser.isOpen())
ser.readline() #to give the hardware handshake time to happen
#port is now open
for t in range(2000): #total number of measurements
    line=ser.write("t".encode('ascii')) #send letter S as ASCII
    filename="SHT_"+datetime.datetime.now().strftime("%y-%m-%d")+".txt"
    print("Start measurement")
    print("logfile: ",filename)

    #check if file exists, if yes, append

    if os.path.isfile(filename):
        with open(filename, "a") as logfile:
            for i in range(64):
                line=ser.readline()
                ##line='777'
                ##print(i+1," Timestamp:
",datetime.datetime.now().strftime("%y-%m-%d
%H:%M"),line.decode('utf-8')[:-2])
                print(datetime.datetime.now().strftime("%y-%m-%d
%H:%M"),"ID:", "%02d" % (i+1),line.decode('utf-8')[:-2],file=logfile)
                #time.sleep(1)
    #if not, create new file
else:
    with open(filename, "w") as logfile:
        for i in range(64):
            line=ser.readline()

```

```

    ##line='777'
    ##print(i+1," Timestamp: ",datetime.datetime.now().strftime
("%y-%m-%d %H:%M"),line.decode('utf-8')[:-2])
        print(datetime.datetime.now().strftime("%y-%m-%d %H:%M"),
"ID:", "%02d" % (i+1),line.decode('utf-8')[:-2],file=logfile)
        #time.sleep(1)
    print("sleeping between measurements...")
    time.sleep(21600)    #time between measurements in seconds

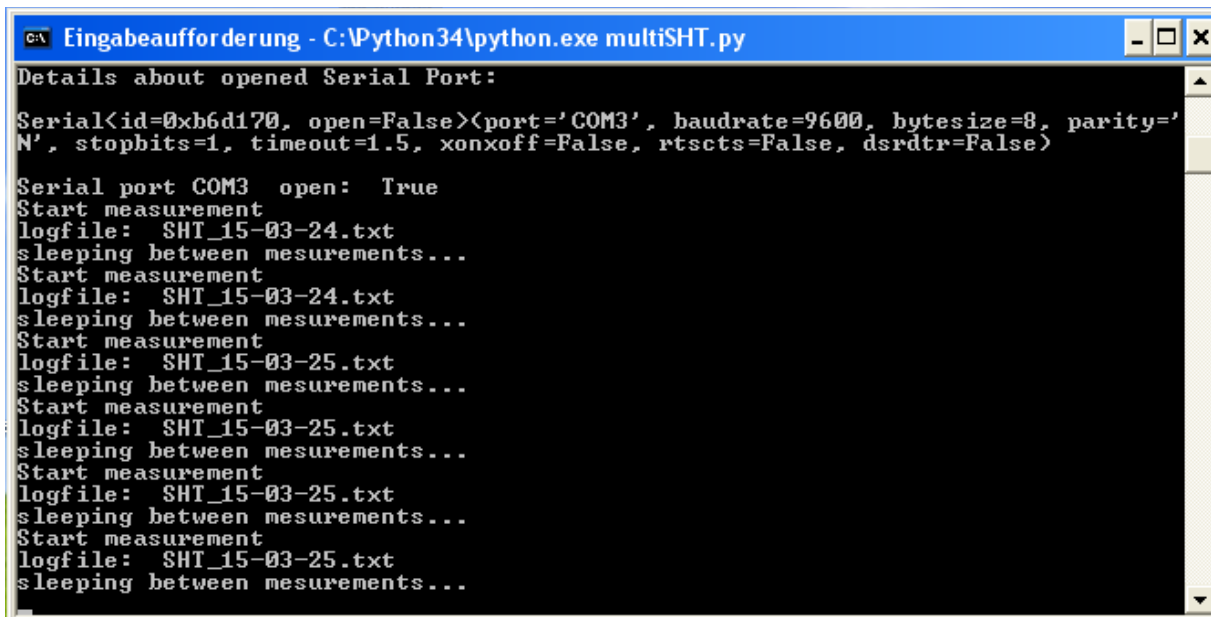
ser.close()    #close serial port
print("Serial port",ser.name,"closed: ", not ser.isOpen())

```

Mittels `import` werden die einzelnen Bibliotheken, auf die das Skript zugreift, importiert. *Import.serial* steht für eine serielle Schnittstelle. Das Arduino-Board besitzt direkt auf der Platine Wandlerchips, die den USB-Anschluss direkt zu einer seriellen Schnittstelle umwandeln können. Durch das Einbinden dieser Bibliothek wird somit ein serieller Treiber für COM3 installiert, was eine Kupplung zwischen USB und serieller Schnittstelle erspart. Das Betriebssystem erkennt nun wegen den Converterchips das angeschlossene USB-Kabel als gewünschten seriellen Anschluss. Die Bibliotheken *datetime* und *time* werden benötigt um das aktuelle Datum und die Uhrzeit direkt vom Rechner beziehen zu können.

Die angegebene *baudrate* von 9600, verwandt mit der *bitrate*, beschreibt die Geschwindigkeit der Zeichenübertragung. Diese muss bei Sender und Empfänger gleich sein, weshalb dieser Wert, ebenso wie *port*, *parity*, *bytesize* und *stopbit*, aus dem Arduino Datenblatt übernommen werden muss. *Ser.timeout* und *stop.bit* werden dazu benötigt um die Zeiten des Empfängers und des Senders zu synchronisieren. Diese können nämlich nach längerem Einsatz von einander abweichen. Der Befehl *print* gibt an, dass gewisse Texte an der Konsole angezeigt werden, wie zum Beispiel die Überschrift, Absätze und Werte.

Um letztendlich den Port für die Datenkommunikation zu aktivieren, wird die Aufforderung *ser.open* benötigt. *Ser.readline* liest nun die relative Luftfeuchtigkeit der Sensoren ab. Die Befehlszeile *for t in range(2000)* sorgt dafür, dass das Programm in Wirklichkeit in keiner Endlosschleife läuft und bestimmt die maximale Anzahl an Messungen mit 2000. Der Befehl *write* fordert das Programm nun auf die Taste „T“ zu drücken, welche das Arduino-Skript aktiviert und die Schnittstelle im ASCII-Code an den Arduino. Nun werden, wie bereits beschrieben, die Multiplexer und Sensoren anhand von „i“ und „j“ einzeln angesprochen und ausgelesen. Die Senderzuordnung, zum Beispiel Sender 42, wird als *string* an den Arduino gesendet. Nachdem alle Werte mit einem Zeitstempel versehen und in der Textdatei abgespeichert wurden, begibt sich das Programm, wie in Abbildung 7.14 zu sehen ist, mit *time.sleep* für 21600 Sekunden, was genau 6 Stunden entspricht, in den Ruhemodus, um dann erneut in der Schleife zu beginnen.



```

c:\ Python34\python.exe multiSHT.py
Details about opened Serial Port:
Serial(id=0xb6d170, open=False)(port='COM3', baudrate=9600, bytesize=8, parity='
N', stopbits=1, timeout=1.5, xonxoff=False, rtscts=False, dsrdtr=False)

Serial port COM3 open: True
Start measurement
logfile: SHT_15-03-24.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-24.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-25.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-25.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-25.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-25.txt
sleeping between measurements...
Start measurement
logfile: SHT_15-03-25.txt
sleeping between measurements...

```

Abbildung 7.16: Screenshot der laufenden Konsole mit geladenem Python Script

7.3.3 Arduino

Das im Jahre 2005 entwickelte Arduino-Board ist eine aus einem I/O-Board und einem Mikrokontroller, sowie analogen und digitalen Ein- und Ausgängen bestehende Schnittstelle, die es auf relativ einfache Weise ermöglicht, eigenständige interaktive Sensoren zu steuern oder um mit Softwareanwendungen auf Computern zu interagieren.

Der Arduino Mega 2560 besitzt einen ATmega 2560 8-bit Mikrokontroller, 54 digitale, sowie 16 analoge Ein- und Ausgänge. Die Arduino-Boards stellen die meisten I/O-Pins des Mikrocontrollers zur Nutzung für elektronische Schaltungen zur Verfügung. Die Übertragung der Daten an den Computer erfolgt über einen USB - B - Anschluss. Die Stromversorgung erfolgt wie bei fast allen Arduino Boards ebenfalls über die USB Verbindung und damit mit 5 Volt. Abbildung 7.17 zeigt das angeschlossene Arduino-Board mit deutlich erkennbarer Datenleitung DA, Erdung GND, Spannung 3,3V und dem USB-B 2.0 Anschluss.

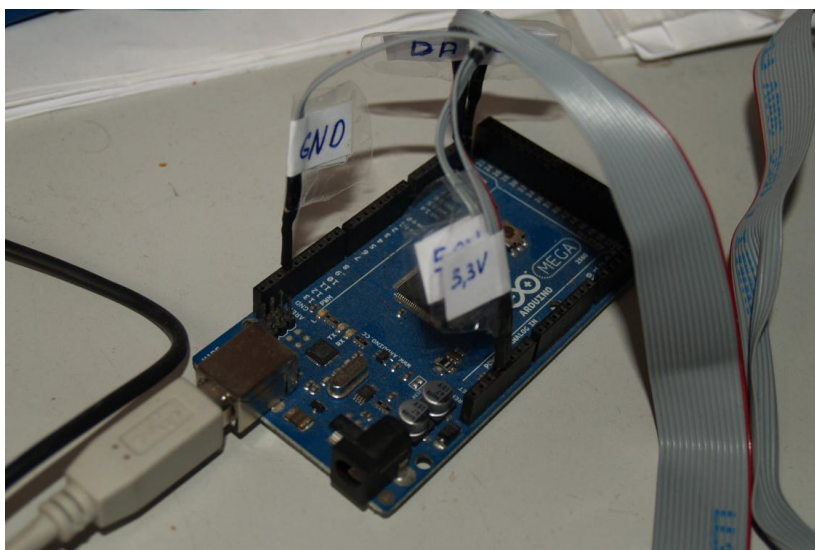


Abbildung 7.17: angeschlossenes Arduino-Board

Zu den Arduino-Boards bietet der Hersteller eigene Software an, die zusammen mit der Hardwarekomponente die Arduino-Plattform darstellt. Der Quellcode der Software ist nach dem open source-Gedanken frei zugänglich und somit von Nutzern bearbeitet, angepasst und weiterentwickelt werden. Die Programmierung selbst erfolgt, wie bereits in Kapitel 7.3.3 „*Multiplexer*“ erwähnt, über die Programmiersprache C++.

Ähnlich wie bei dem Python-Script werden, wie später gezeigt, auch hier zuerst die Bibliotheken eingelesen wie zum Beispiel *wire.h*, einer header-Datei die Methoden zur Verfügung stellt, um Daten über das I²C-Protokoll zu senden und zu empfangen. Die eingebundene Datei *HT21D.h* ist eine eigene frei beziehbare Bibliothek, die die Voreinstellungen aus dem Datenblatt des SHT21 Sensors enthält. Sie sendet die Befehle an den SHT21 um die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur zu bekommen. Details zu dieser Bibliothek befinden sich in Anhang A.

Mit *IMAX7* definiert man die Anzahl der Multiplexer von 0 bis 7. Da Arduino kein eigenes Betriebssystem besitzt, kann es nur Schleifen durchlaufen. Diese werden, wie im folgenden Auszug aus dem Quellcode gezeigt wird, mit `void.loop` begonnen:

```
#include <Wire.h>
#include "HTU21D.h"
#define IMAX 7
//Create an instance of the object
HTU21D myHumidity;
char startChar = ' '; //blank initial value for start trigger
void init_multi();
void setup()
{
```

```

Serial.begin(9600);
Serial.println("SHT21 TU-WIEN!");
myHumidity.begin();
}
void loop()
{
    if (Serial.available() > 0) {    // read the incoming byte:
        startChar = Serial.read();

```

Ab hier beginnt die erwähnte Schleife. In ihr sind Befehle wie zum Beispiel das Auslesen der binären Adressen (*if T* → *multiAddr*) oder *init.multi* für das Abstecken aller Multiplexer enthalten. *Switch off* gewährleistet, dass jeder Sensor nur solange wie benötigt eingeschaltet bleibt und nie zwei zur selben Zeit. Die Bit-Shift-Operation *sw_on* erhöht die binären Zahlen jeweils um eins. Für die Indizes der Multiplexer und der Sensoren wurden wieder *j* und *i* gewählt:

```

[...]
    if(toupper(startChar)=='T'){
        int sw_off = 0b00000000;
        int imax=1;
        int multiAddr = 0b1110000;
        int sw_on = 0b00000001;
        byte status;
        float humd;
        float temp;

        init_multi();                //Multiplexer loop
        multiAddr = 0b1110000;
        for (int i = 0; i <= IMAX; ++i) {    //Channel loop
            int sw_on = 0b00000001;
            for (int j = 0; j <= 7; ++j) {

```

7.4 Probenherstellung

Zur Probenherstellung zählte nicht nur das gießen des Betons in Betonformen um später dessen Verbund mit der verlorenen Schalung zu messen, sondern auch das Anbringen der Sensorchips bis hin zu den Leitungen über den Multiplexer und das Arduino Board an den Messrechner.

7.4.1 Vorversuch

Um sicher zu gehen, dass die Sensoren geeignet waren und bis zuletzt funktionstüchtig blieben, startete ich einen Vorversuch, bei dem ein einzelner Sensorchip wie eine Sonde in dem auch später verwendeten selbstverdichtenden Beton eingegossen wurde. Die Sonde selbst wurde am 24.08.14 erstellt und bestand wie in Abbildung 7.18 ersichtlich, aus dem Sensorchip SHT21 und einem Kapillarröhrchen, das zur Stabilisierung diente.

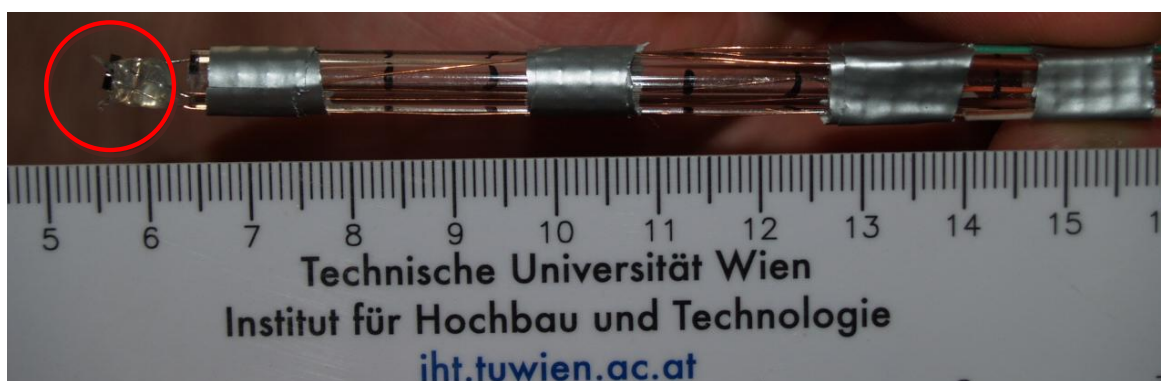


Abbildung 7.18: Die knapp 11 cm lange fertige Sonde. Der rote Kreis markiert den an der Spitze des Kapillarröhrchens befestigten Sensorchip.

Zuerst wurden ca. 0,2 mm dünne Kupferdrähte mittels Lötzinn und einem Weller WD 1000T LötKolbenset bei 250 °C an die Schnittstellen CL, GND, VDD und DA des Chips gelötet, an die wiederum stärkere farbige Kabel, die mit dem Arduino-Board verbunden werden konnten, angelötet wurden.

Daraufhin wurde die Sonde in einer oben aufgeschnittenen Dose fixiert und mit SCC laut Tabelle 7-3 aufgegossen. Die Mischung des selbstverdichtenden Betons erfolgte nach einer angepassten Rezeptur der Firma Lafarge Permooser Holding AG - Wien.

Eine Vorversion des Temperatur- und Feuchtigkeitsmessprogramms mit vereinfachtem Code genügte, um alle erforderlichen Werte auszulesen. Zu Beginn war der Wasseranteil im Beton noch so groß, dass keine Werte ausgegeben werden konnten, weshalb wir circa nach einer Woche mit den Messungen beginnen konnten. Tabelle 7-4 zeigt dabei den Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit und den der Temperatur im Messzeitraum von ca. einem Monat.

Tabelle 7-4: Gemessene rel. Luftfeuchtigkeit (RH) und Temperatur (T) des Vorversuchs

	Datum	Rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Temperatur [°C]
Mo	01.09.2014	90,0	23,0
Di	02.09.2014	85,0	22,5
Mi	03.09.2014	80,0	23,6
Fr	04.09.2014	74,6	23,7
Mi	10.09.2014	65,7	24,6
Do	11.09.2014	61,9	24,0
Fr	12.09.2014	61,1	22,4
Di	16.09.2014	64,9	23,3
Fr	19.09.2014	57,6	22,9
Do	25.09.2014	49,8	22,7
Fr	26.09.2014	50,3	23,1
Di	30.09.2014	54,2	23,2
Mi	08.10.2014	52,8	24,0

Das Steigen und Fallen der relativen Luftfeuchtigkeit im SCC lässt darauf schließen, dass diese Werte in gewisser Weise von der Raumluftfeuchtigkeit, die im Mittel ca. 45% betrug, und der Umgebungstemperatur beeinflusst wurden. Der Messbereich der Sensoren liegt zwischen 0 und 100 Prozent, weshalb es direkt nach dem vergießen der Proben, wegen des hohen Wasseranteils zu kurzfristigen Ausfällen kam. Diese waren aber nicht weiter tragisch, da uns die Feuchtigkeit nach dem Aushärten des Betons, also nach 28 Tagen interessierte.

Da der Vorversuch ein voller Erfolg war, stand dem präparieren der sechs Sensor-Proben nichts mehr im Weg.

7.4.2 Herstellung und Präparierung der Sensorplatten

Zunächst wurden die 6 30x15cm Platten, wie zuvor erwähnt, in zwei Teile geteilt. In 6 der so erhaltenen 15x15cm Platten sollten die Sensoren eingebaut werden und 6 dienten als Referenzplatten zur Erhebung der Plattenfeuchtigkeit und der ungestörten Verbundwerte. Die Referenzplatten wurden, wie in Kapitel 7.2 „Aufgabenstellung und Messprogramm“, mit 1-3RN und 4-6RF beschriftet und waren somit fertig für die folgenden Versuche, die in Kap. 7.5 „Messungen der Würfelproben – Versuchsdurchführung“ näher beschrieben werden.

In die 6 Platten für die Sensoren, wurden zunächst je 9 Löcher im Durchmesser von 3,0 mm in einem vorgegeben 3x3 Raster mit je 5 cm Achsabstand gebohrt. In jede Ecke der Platten wurden dann sowohl auf der Vorderseite, also der Seite im Interface, und der Rückseite, der Seite, wo später die Kabelführung verlaufen sollte eine Schraube angebracht. Diese vier Schrauben an jeder Seite sollten wie Tischbeine fungieren, um die sensiblen Sensorchips vor etwaigen Einflüssen zu schützen.

Für die 6 mal 9 gebohrten Löcher wurden nun insgesamt 54 Sensorchips benötigt. An die Sensorchips wurde nun, genau wie beim Vorversuch, vier circa 6 bis 7 cm lange Kupferdrähte, die aus den Litzen eines gewöhnlichen Stromkabels stammten, an die Kontaktstellen CL, GND, 3V und DA gelötet. In Abbildung 7.20 wird ein solcher, fertiger Sensorchip gezeigt. Direkt nach der Herstellung wurden alle Chips getestet und bei Bedarf neu gelötet beziehungsweise bei Ausfall gänzlich ersetzt.

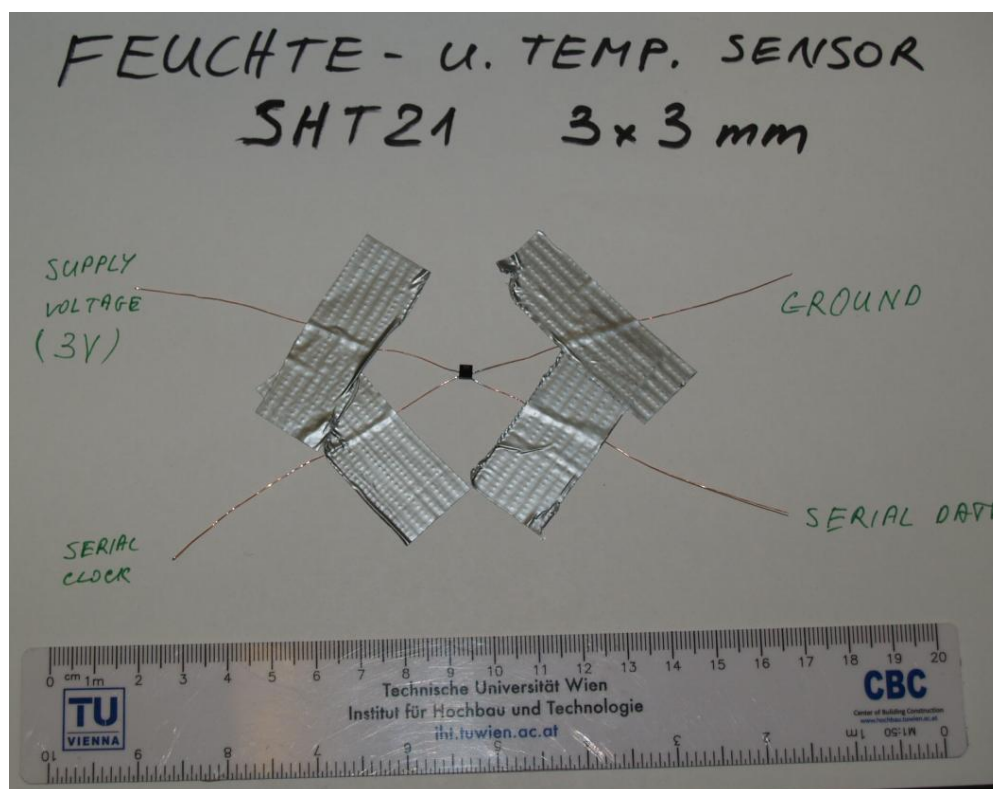


Abbildung 7.20: Ein SHT21 Sensorchip mit angelöteten Drähten

Die so präparierten Sensorchips wurden nun durch die Löcher gesteckt und mit einer Heißklebepistole verklebt. Um die Drähte vor Wasser zu schützen, wurden, wie in Abbildung 7.21 zu sehen ist, die Hohlräume mit Silikon aufgefüllt. Hier war äußerste Präzision geboten, denn es waren zwei Sachen zu beachten. Erstens durften sich die Drähte nicht berühren und zur späteren Identifizierung richtig angeordnet sein und zweitens durfte kein Silikon auf die später im Interface liegende Seite auf der sich nun das Sensor-Auge befand, gelangen, denn so könnte der Sensor nicht mehr die rel. Luftfeuchtigkeit richtig messen. Zusätzlich wären Silikonflecken auf der, dem Beton zugewandten, Plattenoberfläche ein erheblicher Störfaktor für den Betonierverbund.



Abbildung 7.21: Rückseite einer Platte mit eingesetzten Chips

Nun folgte das Anlöten der einzelnen Drähte an einen Kabelstrang, an dessen Ende ein 15 Pin-D-Sub-Stecker, angelötet wurde. Dazu konnten die Drähte die zu den Anschlüssen CL, 3V und GND führten, wie in Abbildung 7.22 zu sehen ist, jeweils zu einem einzelnen zusammengefasst werden.

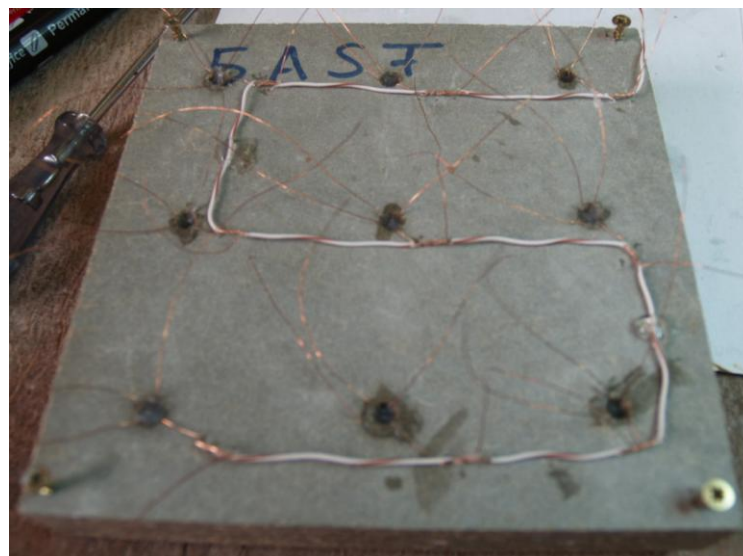


Abbildung 7.22: Die einzelnen 3V-Drähte werden zu einer einzigen Leitung zusammengefasst

Die Drähte, die zu den Kontaktstellen der DATA-Leitungen führten, mussten einzeln verkabelt werden, da ja diese die Messwerte der einzelnen Sensoren an den Rechner senden. Zur Übersichtlichkeit wurden den vier Anschlüssen, wie schon zuvor beim Vorversuch verschiedene Farben zugeordnet; so stand orange für CL, weiß für 3V, braun für GND und grün beziehungsweise blau für DA.

Nach dem Lötten wurden wieder alle Sensoren getestet und auftretende Fehlstellen abermals ausgebessert. Danach wurden die exponierten Leitungen mit Kleber aus der Heißklebepistole überzogen um ausreichend Halt und Schutz zu gewährleisten, wie später auf Abbildung 7.25 zu sehen ist.

Die drei Kabelleitungen CL, 3V und GND sowie die 9 DA pro Platte wurden nun zu einem Strang in der rechten oberen Ecke an der Rückseite der Platten gelegt. Diese 12 Kabel wurden nun an einen 15 Pin-D-Sub-Stecker gelötet. Dabei wurde die Reihenfolge laut Abbildung 7.23 gewählt. Die drei Kabel CL, 3V und GND wurden jeweils an zwei Pins angelötet, damit waren die Hauptleitungen im Kabel zusätzlich gesichert

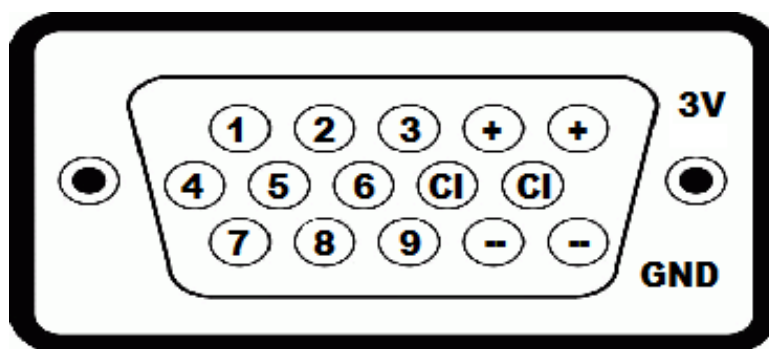


Abbildung 7.23: Belegungsschema eines 15 Pin-D-Sub-Steckers, 1-9 ist jeweils die DATA-Leitung des jeweiligen Sensors.

Sobald alle Kabel an den Stecker gelötet waren erfolgte vor und nach dem Zusammenbau des Steckers wieder ein Test aller Chips auf ihre Funktionalität. Die 12 Kabel einer jeden Platte wurden ebenfalls für einen besseren Zusammenhalt und Schutz mit Isolierband umwickelt. Abbildung 7.24 zeigt nun die Vorderseite einer fertiggestellten Platte und Abbildung 7.25 die Rückseiten aller 6 Platten.



Abbildung 7.24: die Vorderseite inklusive Sensoren einer fertiggestellten Platte



Abbildung 7.25: Die Rückseiten mit Verkabelung und Abdichtung aller fertiggestellten Platten

Für die Verlängerungskabel wurden natürlich die gleichen 15-Pin-Steckverbindungen wie für die Anschlussleitungen der Platten verwendet. Hier jedoch auf der Plattenseite ein weiblicher und an der Multiplexer-Seite ein männlicher Teil. Die Verkabelung erfolgte durch ein 15 strahliges Flachkabel dessen erste Leitung rot markiert war. Für das Verlöten benutzte ich folgende Reihenfolge:

--- 3V
--- 3V
--- CL
--- CL
--- GND
--- GND
--- 1
--- 2
--- 3
--- 4
--- 5
--- 6
--- 7
--- 8
--- 9

Die Kabel wurden nach den bereits in Abbildung 7.23 gezeigten Plänen an die jeweiligen Stecker angelötet. Auch hier erfolgte selbstverständlich wieder ein Qualitätscheck, um keine Ausfälle garantieren zu können. Die fertigen Kabel laut Abbildung 7.26 und 7.27 hatten eine Länge von circa zwei Metern.



Abbildung 7.26: Verbindungskabel mit geöffneten Steckern: links der männliche und rechts der weibliche Teil

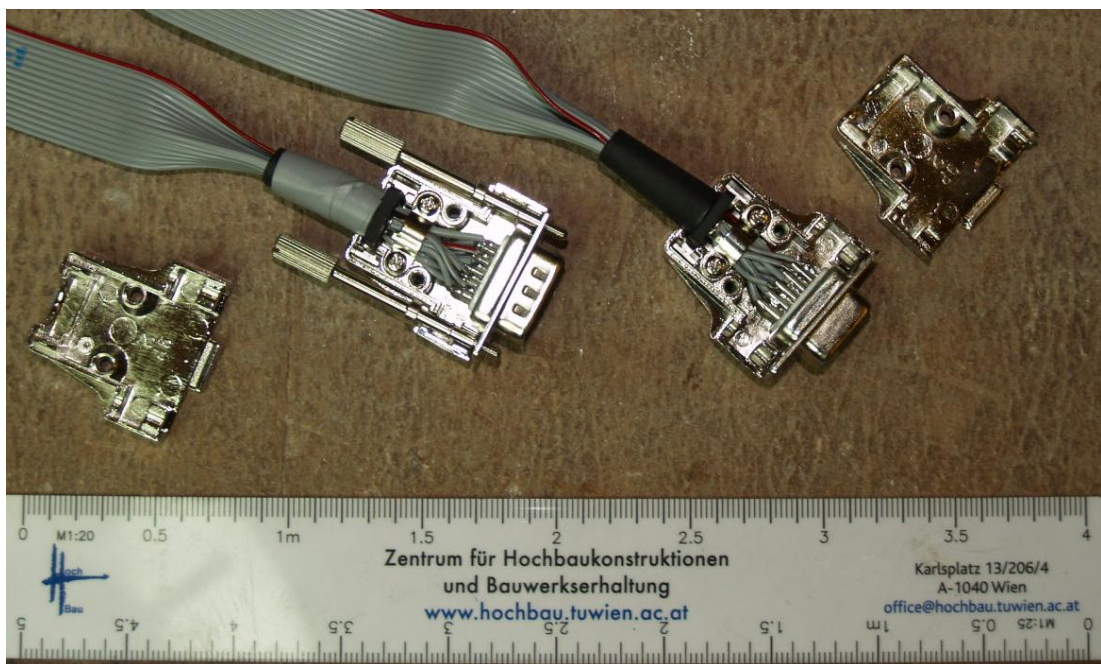


Abbildung 7.27: Verbindungskabel Draufsicht

7.4.3 Herstellung der Betonproben

Nachdem die Sensoren in die Platten eingebaut worden waren, konnte die Herstellung der Versuchskörper erfolgen.

Der Aufbau der Probe gliederte sich in zwei Teile: Dem primären Probenteil und den sekundären Probenteil. Da beim späteren Vergießen des selbstverdichtenden Betons darauf geachtet wurde, dass das Interface zwischen der Schalplatte und dem Beton genau in der Mitte der 15 cm langen Versuchskörper liegt, entstanden zwei unterschiedlich große Betonteile: Der primäre Probenteil bezeichnet dabei die Hälfte des Probenkörpers, bei der der Verbund später getestet wird und enthielt deshalb die CETRIS®-Platte und den größeren (7,5 cm langen) Betonteil, wie er in Abbildung 7.28 gezeigt wird. Der sekundäre Probenteil besteht lediglich aus dem kleineren (ca. 5,1 cm langen) Betonteil, der später an die Rückseite der zementgebundenen Holzfaserplatte geklebt wird und so als Gegengewicht während des Prüfvorgangs dient.

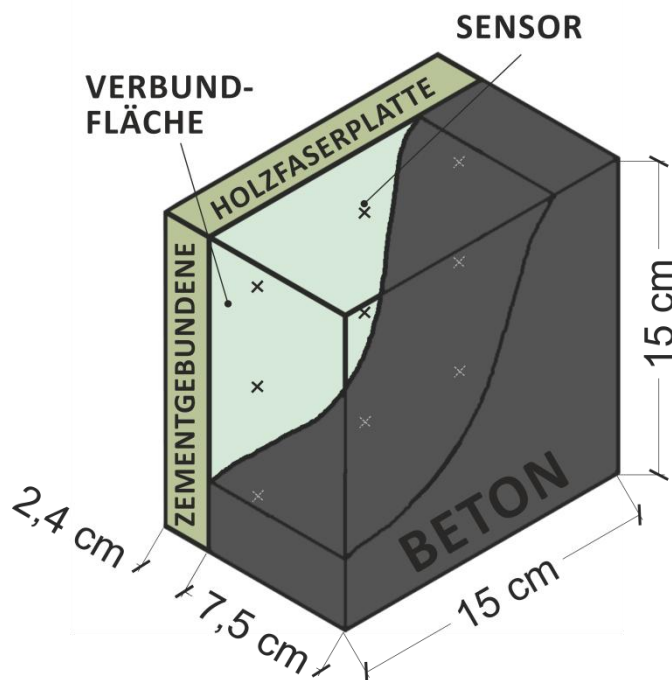


Abbildung 7.28: Schematische Darstellung primärer Probenteil mit Sensoren

Die Verbundfläche, also die Schnittstelle zwischen dem Beton und der Platte musste deshalb genau in der Mitte liegen, damit die Probe während des Prüfvorganges symmetrisch belastet werden kann. Durch einen asymmetrischen Probenkörper würden sich unerwünschte Zwänge innerhalb des gesamten Probenwürfels einstellen. Die Probenteile teilte dabei eine 0,20 mm dünne PE-Folie.

Als erster Schritt wurden deshalb die Folien zurechtgeschnitten und später, wie in Abbildung 7.29 zu sehen ist, an die Schalplatten mit Klammern festgetackert, um die Verkabelung zu schützen und hauptsächlich um den Verbund dieser Seite mit dem Beton zu verhindern.

Dieser Schritt ist deshalb so wichtig um exakte wirklichkeitsnahe Bedingungen herzustellen, um wie auch in der Realität bei der Aushärtung eine Trocknung durch die freie äußere Oberfläche der Schalplatten gewährleisten zu können. Die Klammern wurden aus dem Grund gewählt, da ein Kleber bzw. Silikon den Feuchtigkeitstransport bei der Trocknung behindert hätte.



Abbildung 7.29: Anbringen der Schutzfolie an die Probenplättchen

Darauf erfolgte wieder ein Funktionstest, dieses Mal war der Multiplexer schon fertig und wir konnten auch dessen Funktion sowie das gesamte Zusammenspiel (siehe Abbildung 7.30) aller Komponenten überprüfen. Nach einer kleineren Nachbesserung funktionierte alles einwandfrei und die Proben waren bereit betoniert zu werden.



Abbildung 7.30: Der letzte Funktionstest des Zusammenspiels der folierten Platte, der Verbindungskabel, des Multiplexers, des Arduino-Boards sowie der Software

Der nächste Schritt war das Vorbereiten der Schalungen für den Betoniervorgang. Als Schalungen wurden Stahlwürfelschalungen mit den Innenabmessungen von 15x15x15 cm gewählt. Um dem Haften des Betons an der Schalungsform vorzubeugen, wurde ein pflanzliches Trennöl benutzt. Mit einem Pinsel wurde ein dünner Film dieses Schalungsöls auf die Innenseiten der Würfelschalungen aufgetragen. Danach wurde die genaue Mitte der Würfel ausgemessen und markiert.



Abbildung 7.31: Einölen der Stahlwürfelschalungen

Die Markierung half die Holzfaserplatten mittig zu platzieren. Dabei musste Acht gegeben werden, dass kein Trennöl die Oberfläche der Platten verunreinigte, da dies den Verbund gestört hätte und somit die Testergebnisse verfälscht hätte.

Die Mischung des SCC erfolgte genau wie beim Vorversuch nach einer industriellen Rezeptur der Firma Lafarge Perlmooser Holding AG - Wien. Dieses Mal kam aber ein Kipptrummelmischer, wie er in Abbildung 7.32 zu sehen ist, als Betonmischmaschine zum Einsatz:



Abbildung 7.32: Betonmischen mittels einer Kipptrummelmischmaschine

Eine der Würfelschalungen umfasste ein Volumen von 2,835 Litern. Die Mischmaschine fasste circa 18,25 Liter Frischbeton. Für die Proben, die an einem Betoniertag hergestellt wurden, war eine Menge von 28,25 Litern erforderlich, was zwei Mischungen laut Tabelle 7-5 entsprach:

Tabelle 7-5: Betonrezeptur für 10 Liter Frischbeton

Bezeichnung:	Menge:	EH
FLUAMIX C	2,00	[kg]
DER SCHWARZE	3,50	[kg]
SAND 0/4	8,75	[kg]
KIES 4-16	7,16	[kg]
Proplast 200	0,020	[kg]
Profluid VP3	0,025	[kg]
Reinwasser	1,9	[kg]

Dabei bezeichnen die Zutaten folgende Materialien:

Fluamix C ist ein Betonzusatzstoff zur Verbesserung der Betoneigenschaften. Es können damit Effekte wie eine Reduzierung des Wasserbedarfs, Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons und eine Reduktion der Hydratationswärme während der Erhärtung erzielt werden. Bei **Der Schwarze** handelt es sich um einen Universalzement der Festigkeitsklasse 42,5 [kN/cm^2] und ist für Sichtbetonoberflächen besonders geeignet. Nach österreichischer Betonnorm ON B 4710-1 wird dieser genauer als CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT 38 bezeichnet. **Sand 0/4** weist eine Körnung von 0 bis 4 mm auf und ist damit sehr feinkörnig, wie es für die Herstellung von selbstverdichtenden Beton erforderlich ist. Als weiterer Zuschlagstoff dient Betonschotter mit einer Körnung von 4 bis 16 mm, hier als **Kies 4-16** bezeichnet. Damit erfüllt auch der Schotter den für die Herstellung von SCC notwendigen Parameter mit einem Größtkorn von 16 mm Durchmesser.

Neben den genannten festen werden auch eine Reihe flüssiger Bestandteile zur Herstellung des SCCs benötigt. Diese umfassen neben Reinwasser vor allem den Anteil der Bauchemie. Die Anwendung moderner Hochleistungsverflüssiger ist essentiell für die richtige Konsistenz von selbstverdichtenden Beton. Der bei den Versuchen zum Einsatz gekommene Verflüssiger war **Proplast 200**, der generell zu einer Verringerung der Grenzflächenspannung innerhalb des Frischbetons führt. Dadurch kommt es zu einer besseren Mischung mit dem Anmachwasser und der Beton erhält eine weichere Konsistenz. Proplast 200 ist mit dem Superfließmittel **Profluid VP3** kombinierbar. Hierbei handelt es sich um ein Fließmittel auf Polycarboxylatbasis, das eine enorme Wassereinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Fließmitteln ermöglicht. Weiter verlängert Profluid VP3 die mögliche Verarbeitungszeit und macht den Beton leichter pumpfähig. Alle Bestandteile der Bauchemie werden mit dem Anmachwasser in den Frischbeton dosiert.

Im ersten Schritt der Betonmischung wurde die Trommel der Betonmischmaschine mit etwas Wasser befüllt und in Drehung versetzt, um die Trommel ausreichend zu befeuchten. Das Wasser wurde anschließend wieder abgelassen. Dieser Schritt ist notwendig, um genau jene Menge Wasser laut Rezeptur zu erhalten, da ansonsten ein Teil des Wassers an die trockene

Trommel der Zementmischmaschine verloren gehen würde. Im zweiten Schritt werden alle festen Bestandteile abgewogen, dosiert und in die Trommel gegeben. Nachdem Sand, Kies und Zement in die Mischmaschine gegeben wurden, erfolgte das Trockenmischen. In der Zwischenzeit wurden die flüssigen Bestandteile, Reinwasser und Bauchemie, gewogen und mit dem Anmachwasser vermengt. Das Anmachwasser wurde inklusive der bauchemieschen-Zusätze bei laufender Maschine langsam zugegeben und bis zum Erreichen einer leicht zähen honigartigen Konsistenz, für ca. 3 – 5 Minuten weiter gemischt. Das Abwiegen der Betonbestandteile erfolgte mittels einer Waage nach der zuvor bereits angegebenen Rezeptur. Dabei wurden folgende Toleranzen eingehalten: [4]

- Feststoffe ± 20 g
- Bauchemie ± 1 g
- Wasser ± 5 g

Beim Betoniervorgang, der am 06.02.2015 erfolgte, wurde darauf geachtet, die zwei durch die Platte entstandenen Kammern innerhalb der Würfelschalung abwechselnd zu befüllen um so ein Kippen der Platte durch den hydrostatischen Druck des Betons zu verhindern. Durch das abwechselnde Befüllen stellte sich ein Gleichgewicht zwischen den beiden auf die Platte wirkenden Drücke ein. Abbildung 7.33 zeigt nun die fertig Vergossenen Versuchsproben. In den blauen Schalungen befinden sich die Platten mit den Sensoren und in den grünen die Referenzplatten.



Abbildung 7.33: Stahlwürfelschalungen vor (oben) und nach (unten) dem Betoniervorgang

Nach drei Tagen konnten die Versuchskörper, nachdem der SCC seine Frühfestigkeit von ca. 80% erreicht hatte, ausgeschalt werden. Mittels Schrauben konnten die Klammern an der Seite der Würfelschalung gelöst werden und die Seitenwände abmontiert werden.

Die Versuchsproben wurden gereinigt und von der PE-Folie befreit. Nachdem alle Proben-
teile wie in Kapitel 7.2 „Aufgabenstellung und Messprogramm“ erwähnt wurde nach
Tabelle 7-6 Kennung beschriftet waren, wurden sie bei ca. 15° Celsius gelagert.

Tabelle 7-6: Kennung der einzelnen Versuchsprobenteile

Plattenfestigkeit	Verbundfestigkeit	Verbundfestigkeit
	1RN-A / 1RN-B	1SN-A / 1SN-B
	2RN-A / 2RN-B	2SN-A / 2SN-B
	3RN-A / 3RN-B	3SN-A / 3SN-B
4RF-A / 4RF-B		4SF-A / 4SF-B
5RF-A / 5RF-B		5SF-A / 5SF-B
6RF-A / 6RF-B		6SF-A / 6SF-B

Die primären Probenteile der Sensorserie wurden mittels den D-SUB Anschlüssen über die bereits beschriebenen Komponenten an den Messrechner gesteckt. Durch den hohen Feuchtigkeitsanteil von über 100% in den Proben konnten während der ersten Woche keine Daten aufgezeichnet werden.

7.5 Messungen der Würfelproben – Versuchsdurchführung

Die Temperatur und Feuchtigkeitsmessungen der Sensoren wurden bereits in Kapitel 7.3 „Messtechnik“ ausführlich beschrieben, weswegen hier nur noch auf genanntes Kapitel verwiesen wird.

Die Verbundqualität der einzelnen Würfelproben wurde mittels der in Kapitel 5 „Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test“ beschriebenen Keilspaltmethode getestet, mittels der sich qualitative und quantitative Messdaten zum Verbund ermitteln lassen. Die qualitativen Rückschlüsse ergeben sich aus der Bruchfläche und die quantitativen bilden die Werte der Kerb- biegezugfestigkeit und die spezifische Bruchenergie. Bevor die Proben jedoch mit der Prüfmaschine getestet werden konnten, mussten zuvor noch weitere Vorbereitungen getroffen werden. Im Weiteren werden diese für jeden Probentyp beschrieben:

7.5.1 Plattenfestigkeit: Versuchsproben RF

Nachdem die sechs 30x15 cm Platten halbiert worden waren, wurden drei der so bekommenen 12 Plattenhälften für den Test der Plattenfestigkeit ausgewählt und mit 4RF, 5RF und 6RF, wobei R für Referenzplatte und F für die Festigkeit stand, beschriftet. Da man für die Keilspaltmethode einen Würfelförper benötigt, wurden je zwei speziell dafür aus SCC gegossene Würfelhälften mit den Abmessungen 15x15x7,50 cm genommen und mittels eines Klebemörtels, dem *SikaDur*[®] - 31 AUT Normal, an die Seiten dieser drei Platten geklebt. Der dabei gewählte Klebemörtel war ein Zweikomponentenkleber der wegen seiner Epoxidharzbasis die Feuchte des Betons und der zementgebundenen Holzfaserplatte nicht beeinflusste. Der Klebemörtel wurde mit einem Spachtel ca. 1 mm dick auf die Betonklötze und die Referenzplatten aufgetragen. Alle drei Teile wurden fest aneinander gepresst und der an den Seiten herausquillende Kleber abgeschabt. Um die Seiten der Würfelproben möglichst eben zu bekommen, wurden sie mit einer 15x15 cm großen Stahlplatte in zwei Richtungen. Da der Kleber nach 24 Stunden ausgehärtet war, konnte am darauffolgenden Tag zum nächsten Schritt der Probenpräparierung übergegangen werden.

Wie in Kapitel 5 „Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test“ beschrieben wurde, wird eine Starterkerbe als Initiator einer Sollbruchstelle benötigt. Diese Starterkerbe wurde mittels einer wassergekühlten Bankkreissäge genau in die Mitte der Referenzplatte geschnitten. Das verwendete Sägeblatt für Universalmauerwerk war 2,4 mm dick und hatte einen Durchmesser von 12 Zoll.

Nach kurzer Zeit waren die Proben wieder trocken und es konnten zwei Marmorprismen an die Oberseite der Probe geklebt werden, die als Nut fungierten, da das Fräsen einer solchen zu aufwendig gewesen wäre. Diese Nut wird benötigt, um später die für den Druckversuch benötigten Walzlager auflegen zu können, über die die vertikale Prüfkraft von 100 kN über den Keil in eine auf die Verbundfläche wirkende Horizontalkraft umgewandelt wird. Aus einer Marmorplatte wurden, wie Abbildung 7.34 zeigt, mit der zuvor beschriebenen Kreissäge mehrere ca. 4,5 x 3,0 x 12,0 cm große Prismen ausgeschnitten und mit dem gleichen Klebemörtel, der schon zuvor bei der Herstellung des Probenwürfels eingesetzt wurde, in einem Abstand von exakt 4,1 cm mittig aufgeklebt.

Um den Abstand jedes Mal genau einhalten zu können, wurde ein ebenso großer Stahlquader als Lehre benutzt. Dieser hatte längs seiner Mitte eine Markierung die auf die Starterkerbe gelegt wurde.



Abbildung 7.34: Schneiden der Marmorprismen

Nach einem Tag war der Kleber wieder ausgehärtet und nach dem Beschriften waren die Proben fertig für die Prüfmaschine.

Um generell während der Prüfung Rissöffnungswerte zu erhalten, muss ein Aluminiumrahmen an der Probenoberseite befestigt werden. Dieser besteht aus zwei Teilen, die wiederum mit jeweils zwei Feststellschrauben an der Probe fixiert werden. Dieser Rahmen dient zur Aufnahme von zwei Wegaufnehmern, die im Verlauf des Tests die Öffnung der Probe in Höhe der Marmorprismen, an welchen auch die Kraftereinleitung erfolgt, messen. Der Einsatz von zwei Wegaufnehmern bei der Versuchsdurchführung kam, da sich die Proben nicht gleichmäßig spalten ließen. Die Werte der beiden Wegaufnehmer mit einer Präzision von einem Tausendstel Millimeter wurden im Zuge der Auswertung gemittelt. Beim Anbringen der Wegaufnehmer war darauf zu achten, dass diese bereits vor dem elektronischen Trieren des Messprogramms eine möglichst geringe Distanz zum Nullpunkt anzeigten, um ihnen den vollen Verschiebungsbereich in beide Richtungen während des Versuches zu ermöglichen. [4]

Nachdem der Aluminiumrahmen an der Probe angebracht wurde, wurde diese, wie in Abbildung 7.35 zu sehen, mittig in der Prüfmaschine platziert; dabei war darauf zu achten, dass sich die Platte genau mittig über dem linearen Auflager befindet. Um ein Kippen der Probe zu verhindern, wurden diese mittels PE-Schaumkeilen bis zum Anliegen der Prüfkraft gestützt. Nun erfolgte das Befestigen der beiden Wegaufnehmer an den dafür vorgesehenen Öffnungen des Aluminiumrahmens.

Die Steuerung des Versuchs und der Druckprüfmaschine erfolgte durch ein Steuermodul der Firma „DOLI GesmbH“. Mittels eines an die Maschine angeschlossenen PCs wurden Messdaten der Maschine und des Messequipments von einer Messsoftware verarbeitet und als Ergebnis ausgegeben bzw. an die Prüfmaschine zurückgesendet. [4]



Abbildung 7.35: Probe in der Prüfmaschine

Vor dem Start jedes einzelnen Prüfdurchganges muss für jede Probe ein neues Prüfprotokoll angelegt und die Messwerte von Kraftmessdose und Wegaufnehmern auf null gesetzt werden. Ist dies erfolgt, kann der Versuch über die Messsoftware gestartet werden. Ab dem ersten Kontakt mit dem Keil liegt die vertikale Vorschubgeschwindigkeit der Druckprüfmaschine bei 1 mm pro Minute. Die Messung dauert solange an, bis entweder die Prüfkraft unter einer definierten Größe fällt oder die Wegaufnehmer einen gewissen Weg überschreiten. Anschließend fährt die Presseinrichtung wieder nach oben, sodass die Wegaufnehmer aus dem Aluminiumrahmen und die Probe aus der Maschine entfernt werden können. Durch das Lösen der Fixierschrauben des Rahmens konnte dieser ebenfalls von der Probe entfernt und mit dem Test der nächsten Probe begonnen werden. [4]



Abbildung 7.36: Wegaufnehmer [4]

Das Programm „ORIGIN“ generiert ein Last-Verschiebungs-Diagramm, das die gemittelte Rissöffnung der Probe am Kräfteinleitungspunkt in Abhängigkeit der Spaltkraft zeigt. Die folgende Abbildung 7.37 zeigt den gemittelten Verlauf der durch die 2 Wegaufnehmer ermittelten Kurven der Probe 6RF.

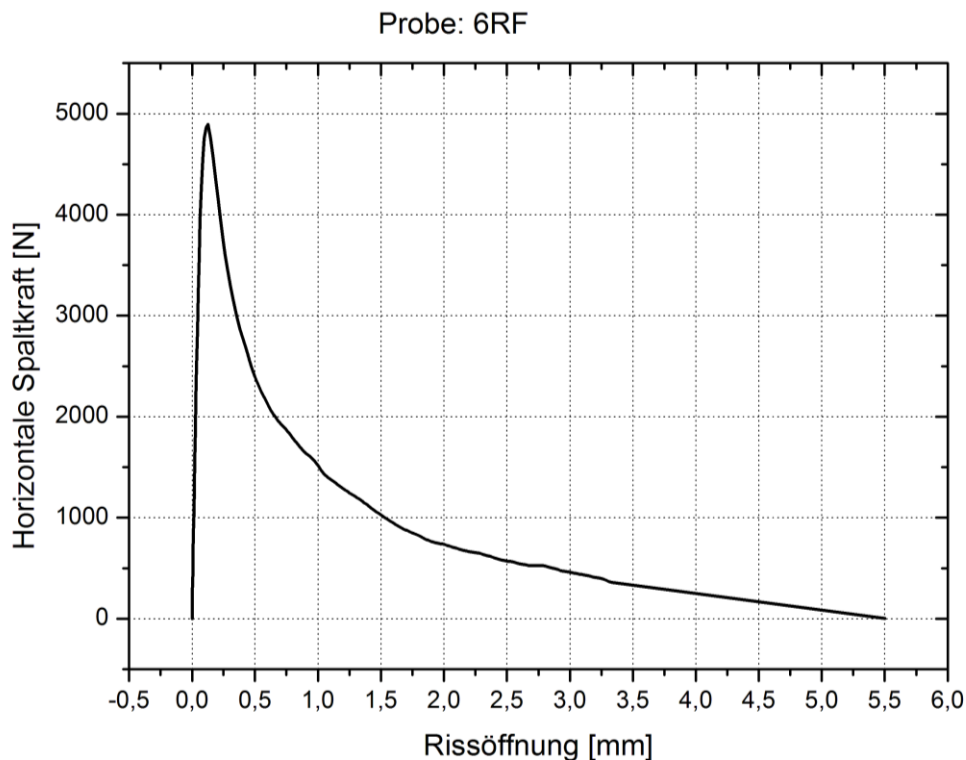


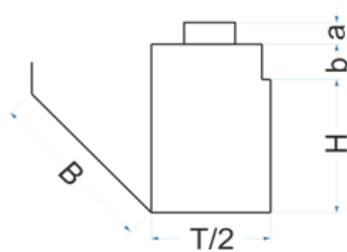
Abbildung 7.37: Last-Verschiebungs-Diagramm der Probe 6RF

Direkt nach dem Test erfolgte die Erhebung der Messdaten der jeweiligen Probe. Dazu wurde der Aluminiumrahmen gelöst und die Probe, wie Abbildung 7.38 zeigt, mit geringem Kraftaufwand händisch auseinandergebrochen.



Abbildung 7.38: links: Probe 6RF mit Aluminiumrahmen, Walzlager und Keil
rechts: Probe 6RF mit vollständig durchtrennter Platte

Danach wurde die Probe aufgeklappt und die, für die später erfolgte Schenck-Auswertung benötigten Größen, mit einem Messschieber abgemessen:



a ... Höhe der Marmorprismen inkl. Kleber [mm]

b ... Tiefe der Starterkerbe [mm]

H ... Höhe der Verbundfläche [mm]

B ... Breite der Verbundfläche [mm]

T ... Tiefe der Würfelprobe [mm]

Abbildung 7.39: Probenabmessungen und Erläuterung der Bezeichnungen einer Probenhälfte [4]

Diese Messwerte wurden für die Datenerfassung in einen Prüfbericht (Anhang B) eingetragen und später für die Berechnungen in Microsoft® Excel übertragen. Die von der Prüfmaschine ausgegebenen Daten wurden in das Programm „ORIGIN“ eingelesen. Auf diese Weise erhielten wir durch die Auswertung der Last-Verschiebungs-Diagramme, wie sie in Abbildung 7.37 dargestellt sind, einen Wert für die Bruchenergie G [Joule/m²] und den Maximalwert der horizontalen Spaltkraft $F_{h,max}$ [kN]. Für die weitere Berechnung war die Anwendung folgender Formeln erforderlich:

$$\sigma_F = \frac{F_{h,max}}{A_{Verbundfläche}}$$

F_{h,max}.... max. Horizontalkraft [N]

A_V..... Verbundfläche [mm²]

σ_F..... Spannung infolge der Horizontalkraft [N/mm²]

(7-1)

a Höhe der Marmorprismen inkl. Kleber [mm]

$$\sigma_M = \frac{M}{W} = \frac{F_{h,max} * \left(a - 5 \text{ mm} + b + \frac{H}{2} \right)}{(B_{red} * H^2) * 6}$$

b Tiefe der Starterkerbe [mm]

H Höhe der Verbundfläche [mm]

B Breite der Verbundfläche [mm]

σ_M..... Spannung infolge Biegemoment [Nmm]

(7-2)

$$\sigma_{KBZ} = \sigma_F + \sigma_M$$

σ_{KBZ}.. Kerbbiegezugfestigkeit [Nmm]

(7-3)

Die Kerbbiegezugfestigkeit σ_{KBZ} setzt sich aus einem σ_F Kraft- und einem σ_M Momentenanteil zusammen. Die in die Berechnung eingehenden Parameter sind neben der maximalen Spaltkraft die geometrischen Abmessungen, die im Laufe der Probenvermessungen nach dem Spaltzugversuch erhoben wurden.

Die spezifische Bruchenergie G_F wird ebenfalls aus der EXCEL-Tabelle ermittelt. Die Bruchenergie G wird mittels des Programms ORIGIN als Integral der Last-Verschiebungskurve ermittelt und ist somit mit dem Flächeninhalt, der von Kurve und Abszisse eingeschlossen wird, gleichzusetzen: [4].

$$G_F = \frac{G}{H * B} * 1000$$

$$\begin{aligned} G_F & \dots\dots \text{spezifische Bruchenergie [J/m}^2\text{]} \\ G & \dots\dots \text{Bruchenergie [J]} \\ H & \dots\dots \text{Höhe der Verbundfläche [m]} \\ B & \dots\dots \text{Breite der Verbundfläche [m]} \end{aligned} \quad (7-4)$$

Nachdem vermessen der Proben wurden auch die Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt der Referenzplatten gemessen. Bei dem zum Einsatz gekommenen BES BOLLMANN combo 200 Feuchtigkeitsmesser handelte es sich dabei um ein spezielles Holz-/Baufeuchtemessgerät mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,1%. Bei der Feuchtemessung wurden dabei die zwei Messsonden des Messgerätes mit dem am Griff befindlichen Fallhammer in die Holzfaserverplatte geschlagen (siehe Abbildung 7.40). Durch den elektrischen Widerstand zwischen den zwei Messnadeln errechnet sich die relative Feuchtigkeit der Platte. Die erhaltenen Werte, die zwischen 25 und 30% lagen, wurden ebenfalls in den Prüfbericht eingetragen.



Abbildung 7.40: Feuchtemessung der Referenzplatten nach dem „Wedge-Splitting-Test“

7.5.2 Verbund mit Sensoren: Versuchsproben SF-SN

29 Tage nach den Tests der Plattenfestigkeit der Referenzplatten erfolgte die Vorbereitung der Proben für den Verbundtest der S-Serie. Diese gestaltete sich ähnlich der bereits beschriebenen RF-Serie. Die Probe 6SF wurde dabei, 3 Tage vor den übrigen 5 Sensorproben, sozusagen als Kontrollprobe zeitgleich mit den drei Proben der RN-Serie präpariert. Dies passierte, weil wir ein gemischtes Bruchbild erhalten wollten, um die verschiedenen Stellen, also jene mit und ohne Verbund untersuchen zu können. Nur ein Bruchbild mit beiden Varianten liefert auch Rückschlüsse auf den Einfluss der Feuchtigkeit auf den Verbund. Wäre der Bruch der Probe 6SF entweder ganz in der Platte oder ganz im Interface verlaufen, hätte eine weitere Probe als Kontrollprobe fungieren müssen. Im Folgenden wird nicht nur auf Probe 6SF eingegangen sondern generell auf alle Sensorproben.

Nachdem ein letzter Sensorendurchlauf am Messrechner beendet war, wurden alle Proben abgesteckt und die Verkabelung an der Rückseite der primären Probenteile mit einem Meißel bzw. einer Spachtel und einem Hammer, wie Abbildung 7.41 zeigt, abgeschabt.

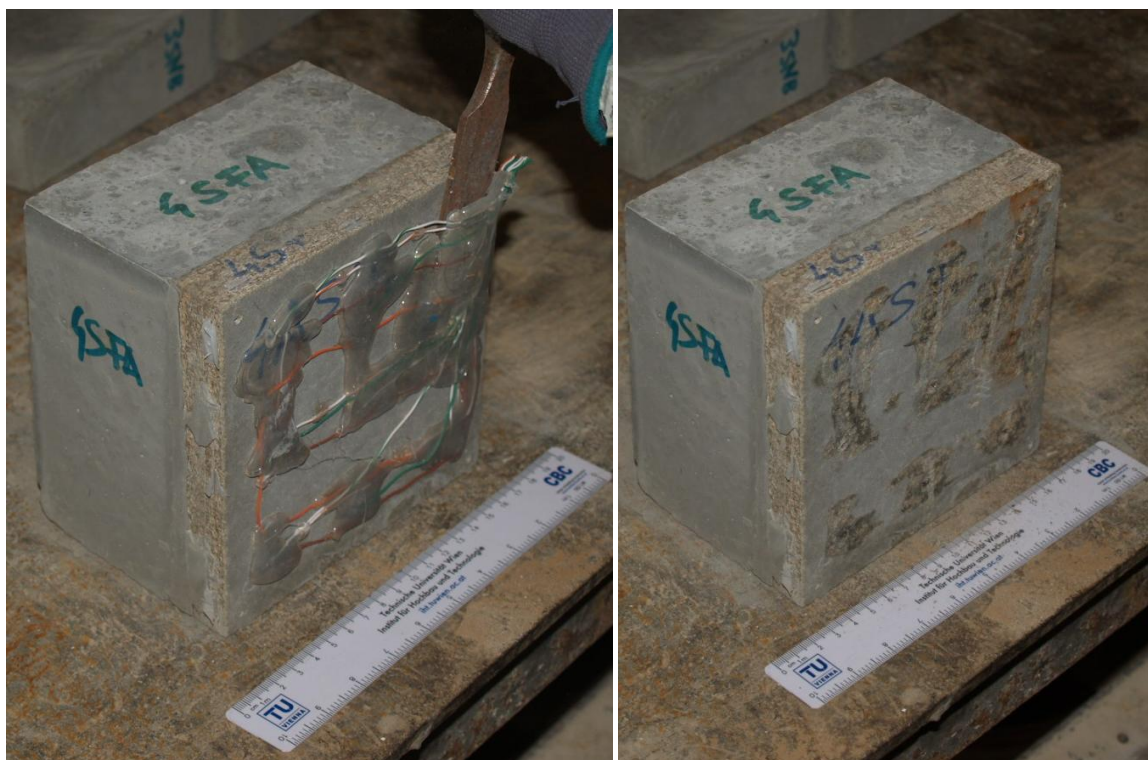


Abbildung 7.41: Ablösen der Verkabelung an der Probe 4SF-A, dem primären Probenteil
Links: Der Ablösevorgang, Rechts: Von Unreinheiten befreiter Probenteil

Im Gegensatz zur RN-Serie musste hier nur mehr ein zweiter Betonklotz zur Vervollständigung der notwendigen symmetrisch aufgebauten Probengeometrie an je eine Probe geklebt werden. Hierzu kommt der zugehörige sekundäre Probenteil. Da die der Platte zugewandte Seite dieses Teils durch die Verkabelung eine unebene Fläche hatte, wurde die glatte äußere, also die der Stahlschalung zugewandte Seite, genommen, um so einen besseren Haftgrund zu erhalten und den Klebemörtelverbrauch gering zu halten.

Bevor der Kleber auf die Platte und den sekundären Probenteil aufgetragen wurde, wurden, wie Abbildung 7.42 zeigt, die Markierungen für die späteren Marmorprismen gesetzt. Nach dem Auftragen des Klebers auf die Platte und den sekundären Probenteil wurde der aufgrund des Zusammenpressens der beiden Komponenten herausquillende Kleber abgeschabt und die Probenhälften wurden mit der Stahlplatte parallel ausgerichtet. Danach wurden die Proben ohne weitere Bewegungen gelagert.

Da die Schalplatte in die Stahlschalung so eingesetzt wurde, dass sich die Oberfläche für den späteren Verbund genau in der Mitte der Würfelprobe befand, passte der nur 5,1 cm tiefe sekundäre Probenteil optimal, um die Würfelprobe zu ergänzen.



Abbildung 7.42: Probe 4SF mit um 180° gedrehtem Probenteil B und den Markierungen für die späteren Marmorprismen: „X“

Nach der Austrocknungszeit von 24 Stunden erfolgte das schneiden der Starterkerbe. Da dieses Mal der Verbund getestet wurde, wurde der 2,4 mm dicke Schnitt so in das Interface zwischen SCC und Schalplatte gesetzt, dass der Beton und die Holzfaserplatte zu gleichen Teilen eingefräst wurden. Das Aufkleben der Marmorprismen erfolgte in der gleichen Weise wie bei den Proben RN für die Plattenfestigkeit in einem Abstand von 4,1 cm mittels des Abstandquaders und des *SikaDur*® Zweikomponentenklebers.

Am darauffolgenden Tag konnten die Proben in der Prüfmaschine getestet werden. Hierbei setzte der Keil nun genau in der Schnittfläche des SCC und der Holzfaserplatte an, wie Abbildung 7.43 zeigt:

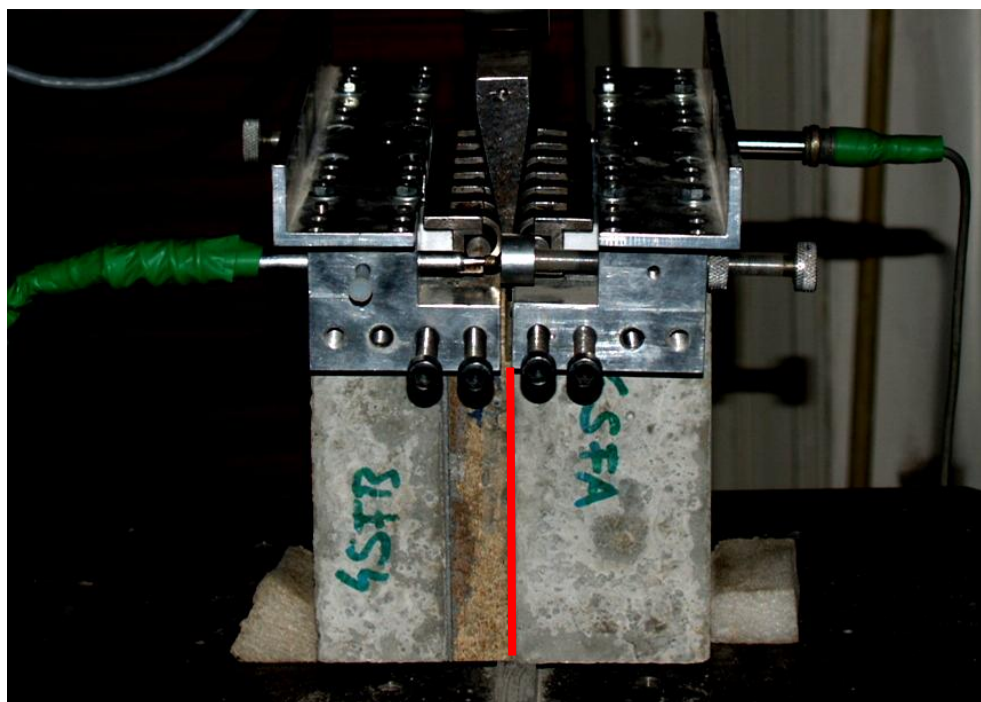


Abbildung 7.43: Probe 4SF in der Prüfmaschine aufgestellt, samt Messequipment. Der rote Strich kennzeichnet die Ebene, die auf Biegezug getestet wird, die Verbundfläche.

Für die Fotodokumentation wurden alle Probenteile mit deren Kennung an den Marmorprismen beschriftet. Die Gießrichtung wurde mit dem Schriftzug „oben“ gekennzeichnet, siehe Abbildung 7.44.

Nachdem die Messgrößen mit dem Messschieber ermittelt und dokumentiert waren, wurde auch die Bruchfläche in Prozent ausgerechnet. Dazu wurden die durch guten Verbund vorhandenen Rückstände der Schalungsplatte, die in Abbildung 7.44 rot umrandete Fläche A darstellen, abgemessen und durch die gelb umrandete Gesamtfläche B dividiert, um die Verbundrate in Prozent zu erhalten.

Auch hier wurde die rel. Feuchtigkeit der Platten mit dem BES BOLLMANN combo 200 gemessen und im Prüfbericht vermerkt. Da hier durch die Sensoren in der Platte markant unterschiedliche Feuchtigkeiten zwischen den Messhorizonten normal zur Gießrichtung gemessen wurden, wurden nun, anstatt nur einer Messstelle, drei gewählt: Diese Messstellen für das bereits beschriebenen Feuchtigkeitsmessgerät befanden sich ca. bei den in Abbildung 7.44 erkennbaren Sensoren 2, 5 und 8 und wurden mit „o“ für oben, „m“ für mittig und „u“ für unten bezeichnet und in die Prüfberichte eingetragen. Der Prüfbericht für diese Messungen am 25.03.2015 (bzw. dem 23.03.2015 für die Probe 6SF) findet sich in Anhang B wieder.

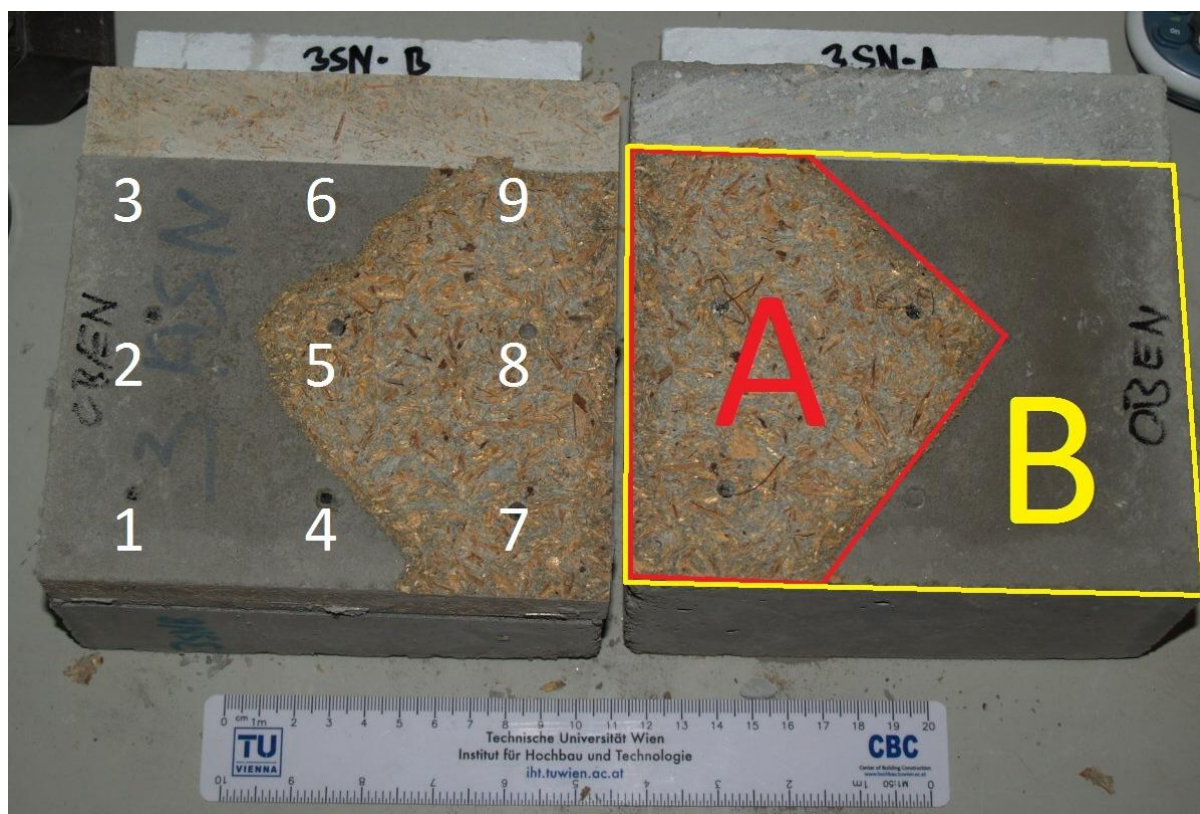


Abbildung 7.44: Probe 3SN mit rot markierter Bruchfläche A und gelb markierter Gesamtverbundfläche. Links sind die 9 Sensoren durchnummeriert.

Der Prüfbericht wurde wieder digitalisiert und die Werte zusammen mit der Bruchenergie G und der maximalen Kraft $F_{h,max}$ aus dem Programm Origin in die Excel-Auswertung eingetragen, woraus die Kerbziegezugfestigkeit σ_{KBZ} sowie die spezifische Bruchenergie G_F berechnet werden konnte. Die einzelnen Auswertungen jeder Probe wurden ebenfalls wieder als Bild und als Objekt abgelegt.

7.5.3 Verbund ohne Sensoren: Versuchsproben RN

Fünf Tage vor den Sensorproben wurden die Referenzplatten, deren Verbundfestigkeit getestet werden sollte, für den Keilspaltversuch vorbereitet. Dazu wurden die Platten von eventuellen Betonresten gesäubert und mit einem Spachtel wurde der Zweikomponentenkleber dünn aufgetragen. Als Gegengewicht fungierte hier wieder der sekundäre Probeneteil, der dieses Mal nicht umgedreht werden musste. Da hier wieder der Verbund zwischen dem SCC und der Holzfaserplatte getestet wurde, gestalteten sich das Schneiden der Starterkerbe und das Aufkleben der Marmorprismen gleich wie bei den Proben der Sensor-Reihe.

Nach dem Aushärten des Klebers konnte am 23.03.2015 der „Wedge-Splitting-Test“ an den Proben durchgeführt werden. Abbildung 7.45 zeigt den Rissverlauf nach dem Verbundfestigkeitstests zwischen dem Beton und der Referenzschalungsplatte. Am primären Probeneteil befinden sich Rückstände der Holzfaserplatte, was auf einen guten Verbund an dieser Stelle zurückzuführen ist.



Abbildung 7.45: Probe 1RN

Der Prüfbericht enthielt auch hier wieder die bereits in Kap. 7.5.1 „Plattenfestigkeit: Versuchsproben RF“ erwähnten benötigten Abmessungen der Würfelproben wie die Ligamentfläche, die Breite, die Tiefe der Starterkerbe und die Höhe der Marmorprismen sowie die Temperaturen und relativen Feuchtigkeiten an jeweils drei Stellen der Referenzplatten. Siehe zur digitalen Variante Anhang B.

Die Werte aus dem digitalisierten Prüfbericht und die jeweiligen spezifischen Bruchenergien G sowie die maximalen Kräfte $F_{h,max}$ aus der ORIGIN Auswertung wurden wieder in die Excel-Auswertung eingetragen und erhielt wieder die Kerbbiegezugfestigkeit σ_{KBZ} sowie die spezifische Bruchenergie G_F durch die Formeln 7-1, 7-2, 7-3 und 7-4.

7.6 Ergebnisse

Die Excel-Auswertung ermöglichte es, die Kerbbiegezugfestigkeit σ_{KBZ} , die spezifische Bruchenergie G_F und gegebenenfalls auch die Verbundrate anschaulich in Diagrammen zu visualisieren. Diese Diagramme dienen zur leichteren Interpretation der Werte. Weiters wurden für die Interpretation auch die Last-Verschiebungs-Diagramme des PC-Programms an der Druckprüfmaschine herangezogen.

7.6.1 Plattenfestigkeit: Versuchsproben RF

Wie in der Excel-Auswertung im Anhang B und in Abbildung 7.46 und Abbildung 7.47 ersichtlich ist, erreichten die Werte der Kerbbiegezugfestigkeit bei der Prüfung der Plattenfestigkeit die Ergebnisse wie sie in den Diagrammen dargestellt sind.

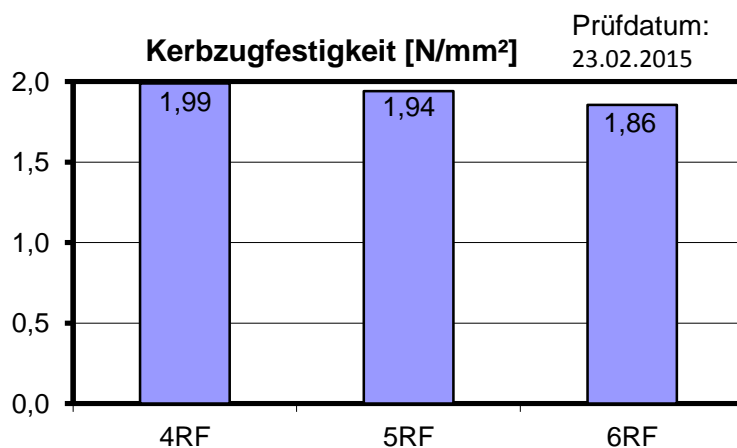


Abbildung 7.46: Kerbbiegezugfestigkeiten der RF-Versuchsreihe

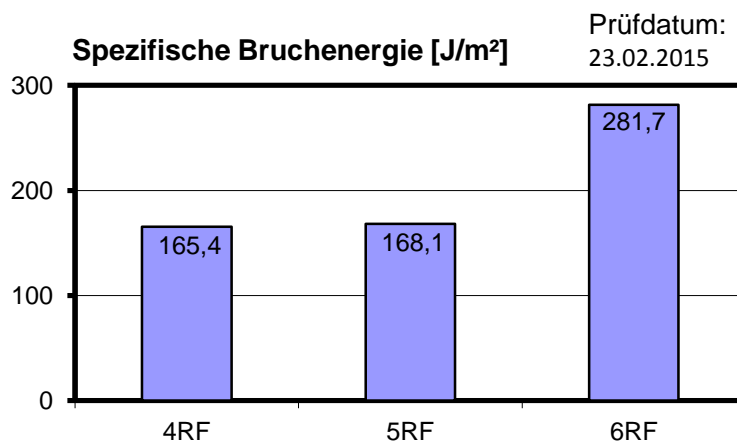


Abbildung 7.47: Spezifische Bruchenergie der RF-Versuchsreihe

7.6.2 Verbund mit Sensoren: Versuchsproben SF-SN

Das Last-Verschiebungs-Diagramm der Probe 1SN zeigte schon am PC während des *Wedge-Splitting-Tests* eine, den andern Proben gegenüber abweichende Bruchenergiekurve mit einem Sprung bei einer Rissöffnung von ca. 0,25 mm: ein lokales Maximum (siehe Abbildung 7.48).

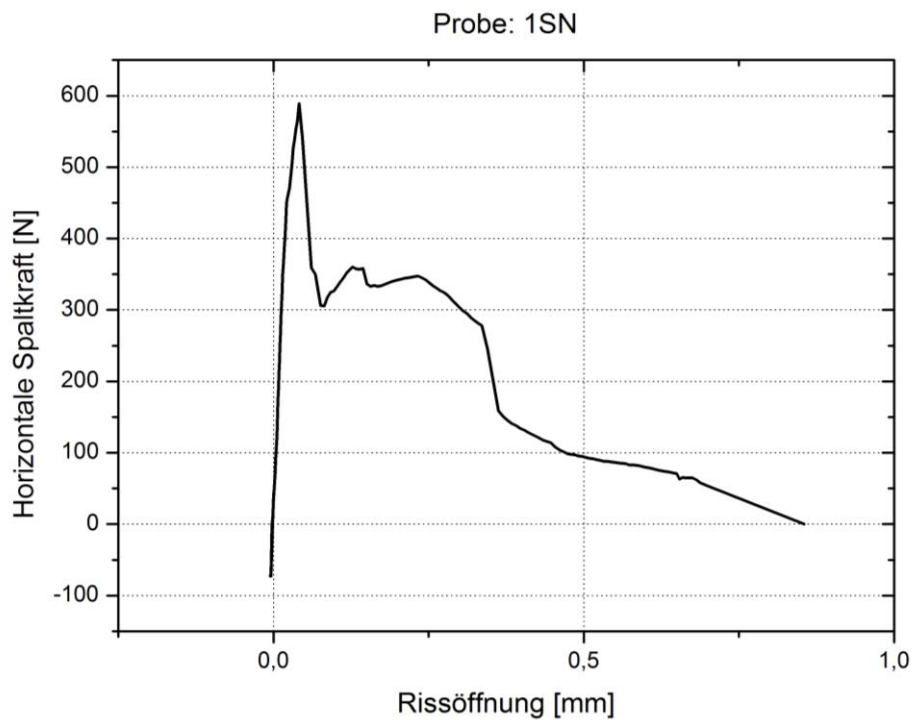


Abbildung 7.48: Probe 1SN mit signifikant kleinen Werten

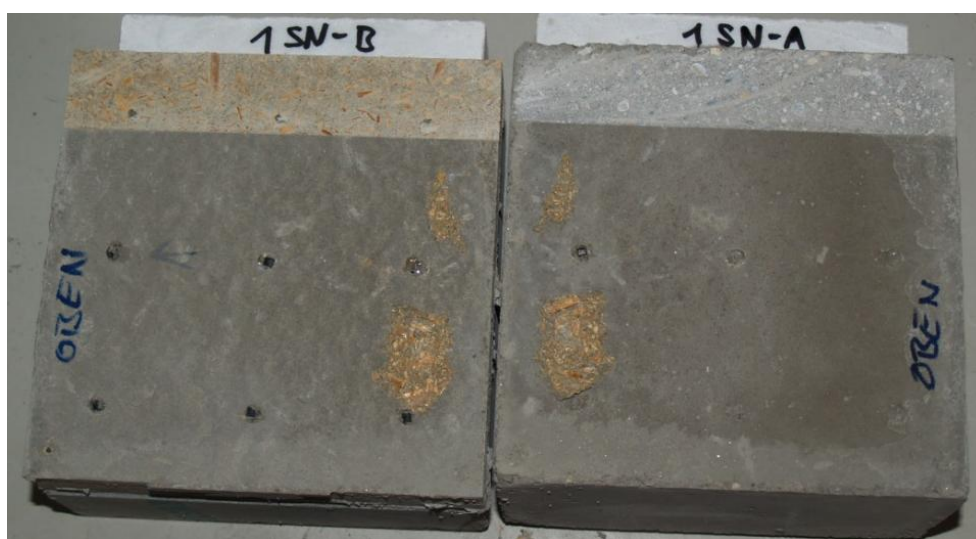


Abbildung 7.49: Bruchbild der Probe 1SN

Bei genauerer Betrachtung konnte dies auf eine Verkeilung des Stahlkeils in der Schallungsplatte zurückgeführt werden. Zum Vergleich sind die Werte der Referenzprobe, bei der aber nicht der Verbund sondern die Plattenfestigkeit getestet wurde, um ein wesentliches höher. Die Probe 1RN erreichte nämlich, wie in Abbildung 7.50 zu sehen ist, den höchsten Kerbfestigkeitswert von allen Proben.

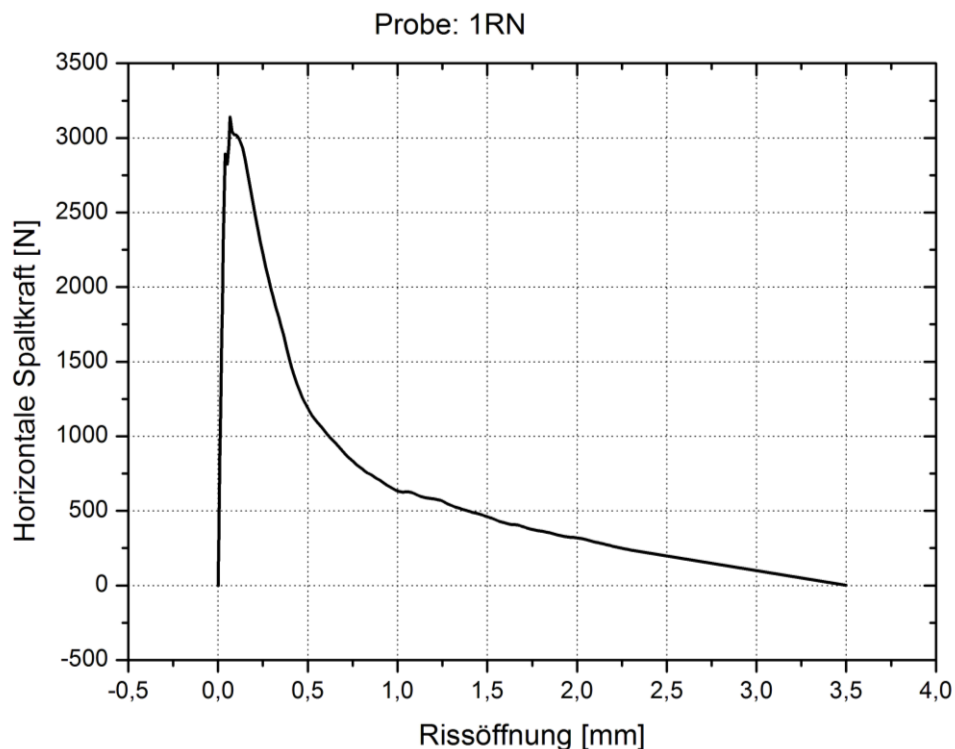


Abbildung 7.50: Referenzplatte zur Probe 1SN

Im Vergleich zu einer anderen Probe der Sensorproben-Reihe kann man erkennen, dass der Ausschlag der Kurve der Probe 1SN nicht ungewöhnlich ist. Die lokalen Spitzen ergeben sich zB. auch bei Probe 4SF (Abbildung 7.51).

Probe 4SF hatte dabei die höchsten Werte der gesamten Prüfreihe S sowohl bei der Kerbbiegezugfestigkeit als auch bei der spezifischen Bruchenergie.

Der höchste Punkt der horizontalen Spaltkraft der Probe 1SN beträgt nach Abbildung 7.48 knapp unter 600 N. Ist die Kurve, die in der Abbildung von den Koordinaten (0|0) zu diesem Punkt führt, recht steil (annähernd senkrecht) so bedeutet dies, dass der Verbund sehr fest ist. Wäre die Kurve zum Beispiel in einem 50° Winkel geneigt, würde das auf ein elastisches Verhalten hindeuten.

Dieser höchste Punkt bezogen auf die Verbundfläche ergibt dabei laut Formel (7-1) die Spannung infolge der Horizontalkraft. Die nach Addition mit der Spannung infolge des Biegemoments die Kerbbiegezugfestigkeit ergibt.

Die Probe 4SF (Abbildung 7.51) ergab während der gesamten Testreihe S sowohl bei der Kerbbiegezugfestigkeit, als auch bei der spezifischen Bruchenergie die höchsten Werte.

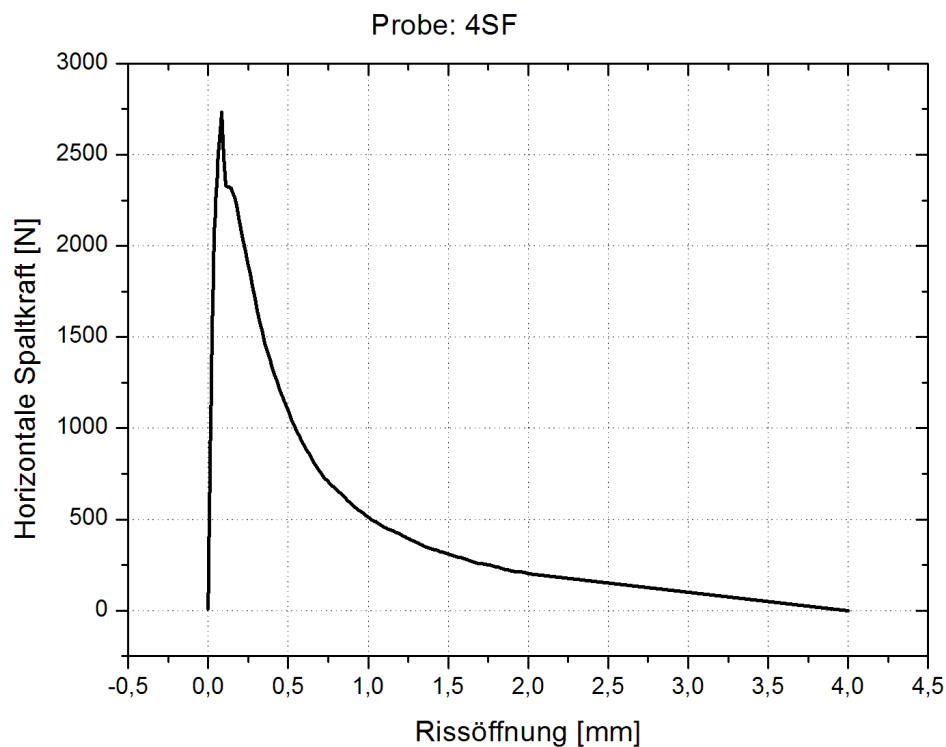


Abbildung 7.51: Verschiebungs-Dehnungs-Diagramm der Probe 4SF

Die Keil-Spalt-Prüfung ergab dabei nach den Berechnungen laut den Formeln 7-1, 7-2, 7-3 und 7-4 die Werte laut den Diagrammen in Abbildung 7.52, Abbildung 7.53 und Abbildung 7.54.

Wie dort zu erkennen ist, sinkt durch die Abnahme der Feuchtigkeit auch die gemessene Kerbbiegezugfestigkeit der jeweiligen Probe und somit auch die Verbundfestigkeit. Als gutes Beispiel kann man hier Probe 1 und 4 heranziehen: Vergleicht man den Verbund mit dem Mindestwert der relativen Feuchtigkeit sieht man, dass die Probe mit der kleineren Feuchtigkeit jene probe ist, die die kleinste Verbundrate aufweist.

Die Excel Auswertung wieder eine Diagrammdarstellung wie sie die Abbildungen Abbildung 7.52, Abbildung 7.53 und Abbildung 7.54 zeigen:

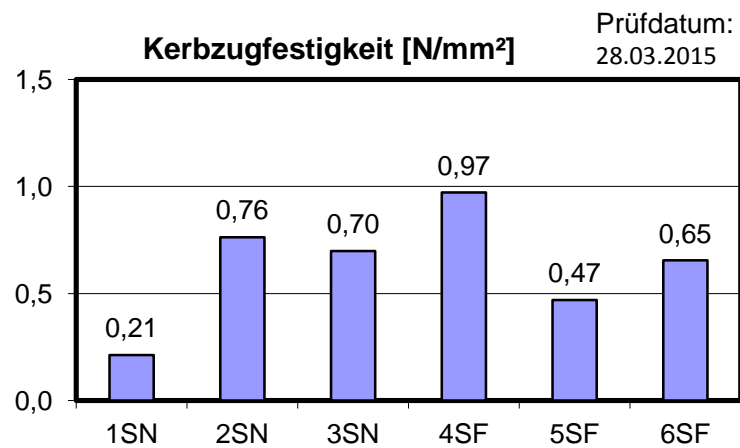


Abbildung 7.52: Kerbbiegezugfestigkeiten der S-Versuchsreihe

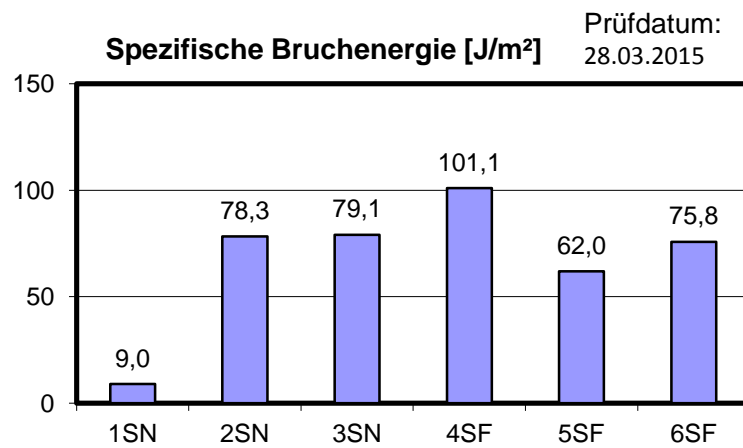


Abbildung 7.53: Spezifische Bruchenergie der S-Versuchsreihe

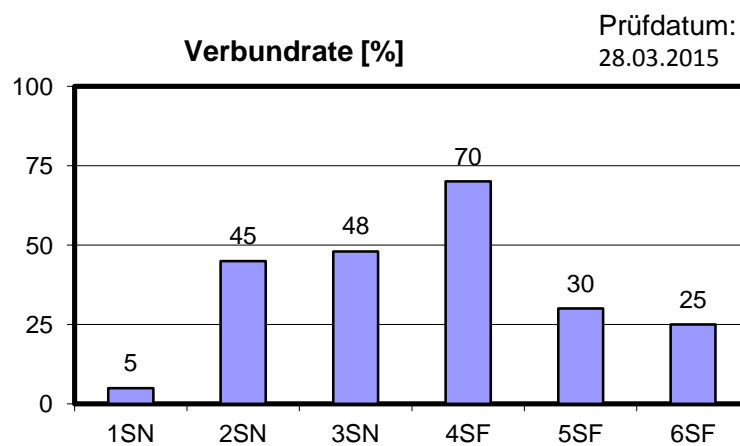


Abbildung 7.54: Verbundrate der S-Versuchsreihe

In den Diagrammen sind ganz klar Übereinstimmungen der einzelnen Proben und deren drei ermittelten Werte erkennbar. So weist wie schon erwähnt die Probe 1SN überall die geringsten Werte auf, gefolgt von den Proben 5SF und 6SF und Probe 4SF die höchsten, gefolgt von den Proben 2SN und 3SN.

Die Feuchtigkeitsergebnisse der Sensormessung ergaben dabei die in Tabelle 7-8 aufgelisteten Werte. Die 6 einzelnen Tabellen darin stellen die 6 Platten und deren 9 Sensoren pro Platte dar. Die drei Werte pro Sensorfeld, sind die relativen Luftfeuchtigkeiten am jeweiligen Messtag. Siehe hierzu Tabelle 7-7.

Die Anordnung der Platten sowie deren Sensoren ist dabei Abbildung 7.13 in Kapitel 7.3.3 „Der Multiplexer“ zu entnehmen.

Sensor 3 der Probe 1SN sowie in späterer Folge Sensor 4 der Probe 2SN und zuletzt, am letzten Messtag, Sensor 8 der Probe SN1 dürften leider während der Beobachtungsperiode ausgefallen sein und lieferten somit keine Werte. Die Sensoren der Probe 6SF weisen am letzten Messtag, dem 26.03.2015, dem Tag an dem die Präparierung der Proben für den Keilspaltversuch vorgenommen wurde, keine Werte auf, da sie bereits mit der vorherigen Charge der RN-Reihe am 25.03.2015 getestet wurden.

Tabelle 7-7: Umgebungsbedingungen, gemessen am Anfang, in der Mitte und zum Schluss der Messperiode (Beobachtungszeitraum)

Pos.	Messdatum	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Raumtemperatur [°C]
Oben	18.02.2015	36,42	17,3
Mitte	19.03.2015	53,42	17,0
Unten	26.03.2015	66,50	17,0

Tabelle 7-8: Sensordaten der Feuchtigkeitsmessungen

Probe 1SN			Probe 2SN			Probe 3SN		
80,27	90,95	-	89,68	85,58	90,79	86,29	96,55	86,10
65,73	76,29	-	69,98	68,70	70,13	69,07	77,44	70,51
65,73	75,41	-	69,93	67,76	69,94	69,72	76,66	70,32
89,95	100,32	98,16	98,91	90,05	94,66	94,04	102,56	91,47
74,22	88,80	81,18	-	79,57	77,85	78,33	89,31	75,14
73,06	86,76	79,24	-	78,31	76,48	77,40	87,65	73,71
101,57	103,49	94,15	93,26	101,73	88,70	100,39	96,81	97,61
80,84	81,85	78,13	76,08	85,96	72,67	78,79	82,49	79,04
78,95	-	76,31	74,80	83,92	73,15	77,47	80,85	77,55

Probe 4SF			Probe 5SF			Probe 6SF		
85,82	87,45	90,89	89,16	93,12	88,70	84,13	89,14	89,33
70,79	73,65	72,15	72,69	77,40	72,67	71,01	74,64	71,67
71,61	73,38	72,09	73,36	76,94	73,15	-	-	-
99,03	97,45	98,64	94,44	95,94	100,19	91,65	93,07	93,63
81,91	86,16	79,55	79,55	90,04	81,86	79,42	82,86	79,49
80,85	85,22	78,15	78,81	89,05	80,58	-	-	-
93,98	102,57	95,34	95,21	94,07	89,87	94,60	94,17	97,21
77,56	88,16	80,08	81,79	85,10	75,40	80,40	85,98	81,80
76,57	86,35	78,55	80,47	83,32	74,19	-	-	-

Die Werte liefern hier in etwa überall vergleichbare Ergebnisse. Die Proben trocknen in der Regel, von der Betongießrichtung her, oben schneller aus als unten, da dort die Feuchtigkeit nicht an die Luft abgegeben werden kann. Generell sind in der Mitte der Platte ebenfalls höhere Werte als an den Seiten, da hier das Verdunsten an der freien Oberfläche behindert wird.

Die automatisch gemessenen Feuchtigkeitsmesswerte der 6 mal 9 Sensoren wurden vom in Kapitel 7.3.2: „Der Multiplexer“ beschriebenen Programm in Form von *.txt-Dateien am Messrechner gespeichert. Durch die Konvertierung der Textdateien in Excel-Tabellen und anschließender Zusammenfassung in einer einzigen Excel-Tabelle war es möglich über eine Filterfunktion jeden einzelnen Sensor auszuwählen und darstellen zu lassen.

Die nach dem Keilspaltversuch manuell gemessenen Feuchtigkeitsmesswerte des BES BOLLMANN combo 200 ergaben dabei die Werte laut folgender Tabelle 7-9. Diese Werte lassen sich aus einem einfachen Grund nicht mit den automatisch gemessenen vergleichen: Bei der Präparation der Betonproben wird wie bereits erwähnt die Starterkerbe mit einer wassergekühlten Bankkreissäge in der Kontaktfläche zwischen den Schalplatten und dem selbstverdichtenden Beton gefräst. Die Wasserkühlung besteht dabei aus einem Schlauch, der das kalte Wasser direkt zum Schnitt leitet und somit das Sägeblatt gekühlt. Dabei trifft das Wasser aber auch ungehindert auf das Schnittgut. Beim Trocknen der Platten bei Raumtemperatur an der Luft, verdunstet das Wasser nicht nur, sondern wird auch vom Beton und besonders von der zementgebundenen Holzfaserplatte aufgesogen. Dies kann man z.B. sehr gut an Probe 3SN erkennen, bei der das manuell gemessene Feuchtigkeitsbild genau umgekehrt zum automatisch ermittelten steht. Auffallend ist hier, dass Probe 1SN die höchsten Feuchtigkeitswerte aufweist, aber den geringsten Verbund. Dies lässt darauf schließen, dass die Feuchtigkeitswerte während der Austrocknung der Betonproben eine weitaus höhere Rolle spielt, als die Feuchtigkeit während des Keilspaltversuchs.

Tabelle 7-9: gemessene rel. Materialfeuchte der manuellen Feuchtigkeitsmessungen nach erfolgtem Wedge-Slitting-Test in Prozent [%] mittels des BES BOLLMANN com- bo 200

Probe 1RN	Probe 2RN	Probe 3RN
60	70	55
85	85	80
70	65	70

Probe 1SN	Probe 2SN	Probe 3SN
27	26	36
50	27	25
50	23	23

Probe 4SF	Probe 5SF	Probe 6SF
21	34	26
28	35	33
27	30	33

Die folgende Abbildung 7.55 zeigt nun den Verlauf der Sensoren 42, 45 und 48 über den Beobachtungszeitraum für die Probe 6SF. Dies entspricht laut Abbildung 7.13 in Kapitel 7.3.3 „Der Multiplexer“ den Sensoren 2, 4 und 8 der sechsten Platte und somit den Messhorizonten „oben“, „mittig“ und unten“ normal zur Gießrichtung. Die violette Kurve stellt dabei die relative Luftfeuchtigkeit im Raum, in dem die Messproben positioniert waren, dar. Die x-Achse gibt die relative Feuchtigkeit in einem Spektrum von 30 bis 100% an und die y-Achse, die gemessenen Einzelwerte der 52 Messungen. Die Werte wurden dabei aus der sich im ANHANG C befindlichen Excel-Datei entnommen.

Rel. Feuchtigkeit - Probe 6SF 18.02. – 26.03.2015

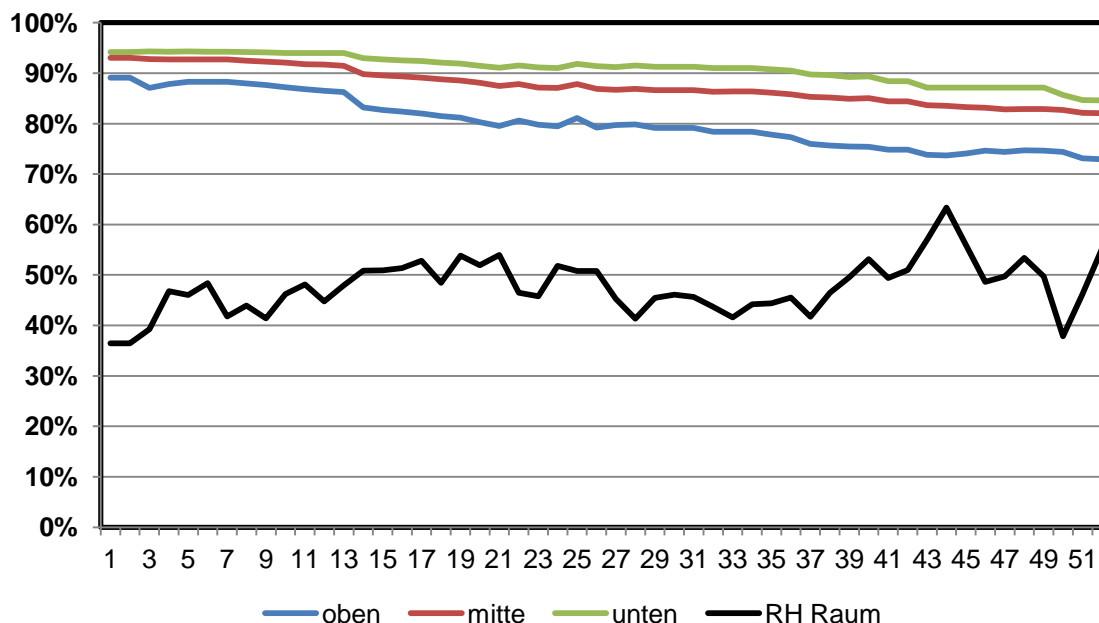


Abbildung 7.55: Verlauf der Feuchtigkeit In Probe 6SF bei 52 Messungen

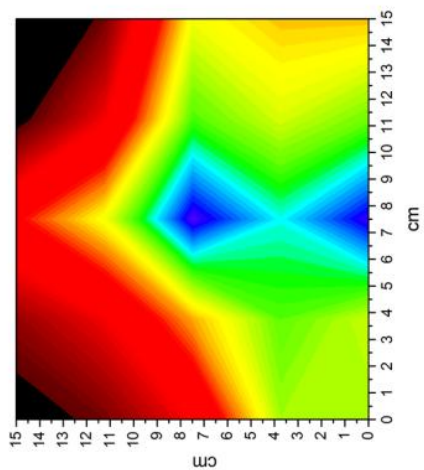
Da bei der Beobachtung der Vorversuchsprobe (siehe hierzu Kapitel 7.4.1: „Vorversuch“) die Feuchtigkeitswerte sehr schwankten und sich zeitweise erhöhten, wurde davon ausgegangen, dass die Raumluftfeuchte und die Raumtemperatur erheblichen Einfluss auf die Probe hätten. Dies widerlegt die Abbildung 7.55. Eine Erklärung warum die Vorversuchsprobe so stark durch die Umgebungsgrößen beeinflusst wurde, wäre, dass der Vorversuch aufgrund seiner kleineren Abmessungen äußeren Einwirkungen gegenüber anfälliger gewesen ist.

In Abbildung 7.56 und Abbildung 7.57 wird nun der Feuchtigkeitsgehalt und dessen Verteilung über die Bruchfläche der einzelnen Proben farblich dargestellt. So wird eine relative Luftfeuchtigkeit von weniger als 60 % in schwarz dargestellt, 70 % in Rot, 75 % in Gelb, 80 % in Grün, 85 % in Blau und 90 % in Violett. Hier lässt sich der Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit und dem Bruchbild unbestreitbar erkennen.

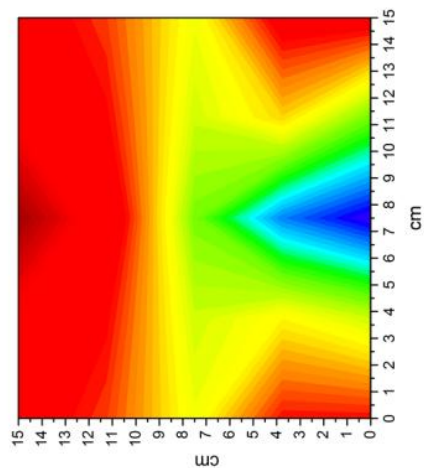
Vor allen die Proben 1, 3 und 4 weisen eine genau passende Bruchfigur auf: So gibt es z.B. bei Probe 1SN die niedrigsten Feuchtigkeitswerte in der gesamten ausgewerteten Versuchsreihe wobei das Farbspektrum in den Ecken bereits im tiefschwarzen Bereich ist. Dies erklärt auch den extrem schwachen Verbund dieser Probe und die kleinen gemessenen Kräfte die nötig waren um die Probe zu spalten. Einzig an der unteren Seite der Betonprobe (siehe zur Orientierung die Beschriftung „OBEN“ auf den jeweiligen Probenansichten) und in der Mitte, wo sich die relative Luftfeuchtigkeit sogar im violetten Bereich befindet, kann man einen guten Verbund zwischen dem Beton und der Holzfaserplatte erkennen.

Sieht man sich den grünen Bereich der Probe 4SF genauer an, so geht er mit dem Verbund der Platte mit dem Beton einher. Im Farbspektrum von dunkelrot bis gelb lassen sich keine Plattenreste und somit auch kein Verbund feststellen. Probe 3SN zeigt wenn man sich den grünen Bereich ansieht, sogar ein noch deutlicheres und ganz exakt passendes Bruchbild.

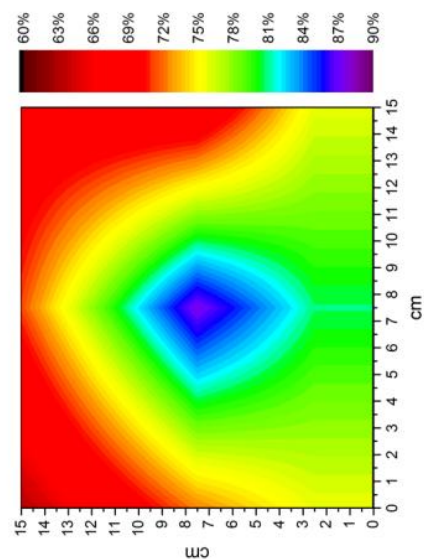
ZUSAMMENFASSUNG



Probe 1



Probe 2

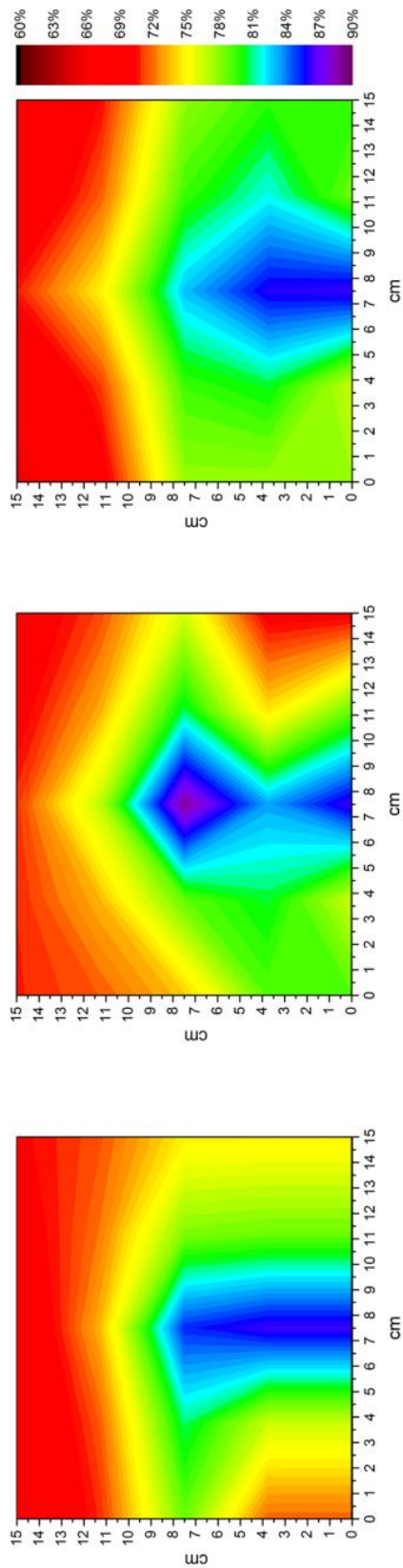


Probe 3



Abbildung 7.56: Vergleich des Farbspektrums des Feuchtigkeitsgehaltes der Proben 1SN bis 3SN mit deren Bruchbild

ZUSAMMENFASSUNG



Probe 4

Probe 5

Probe 6

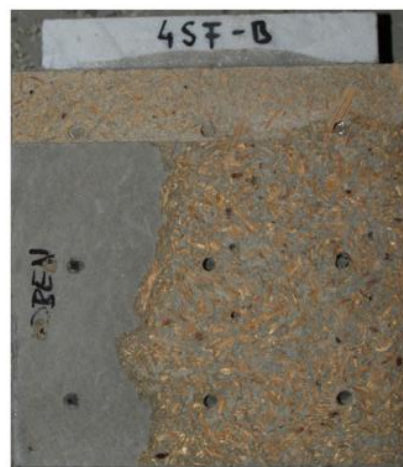


Abbildung 7.57: Vergleich des Farbspektrums des Feuchtigkeitsgehaltes der Proben 4SF bis 6SF mit deren Bruchbild

Abbildung 7.58 zeigt keine Korrelation der Werte der Verbundrate mit den gemittelten Werten der rel. Feuchtigkeit aller 9 Sensoren je Probe. Vergleicht man aber die Trendlinie aus den Mindestwerten der rel. Feuchtigkeiten (im Diagramm rot dargestellt) mit der aus der Verbundrate, findet man jedoch eine relative Übereinstimmung dieser zwei Kenngrößen. Da bei diesen Versuchen nicht die Mittelwerte, sondern die Mindestwerte der rel. Feuchtigkeiten eine stärkere Aussage besitzen, wird damit der Zusammenhang der Materialfeuchtigkeit mit der Verbundqualität bestätigt.

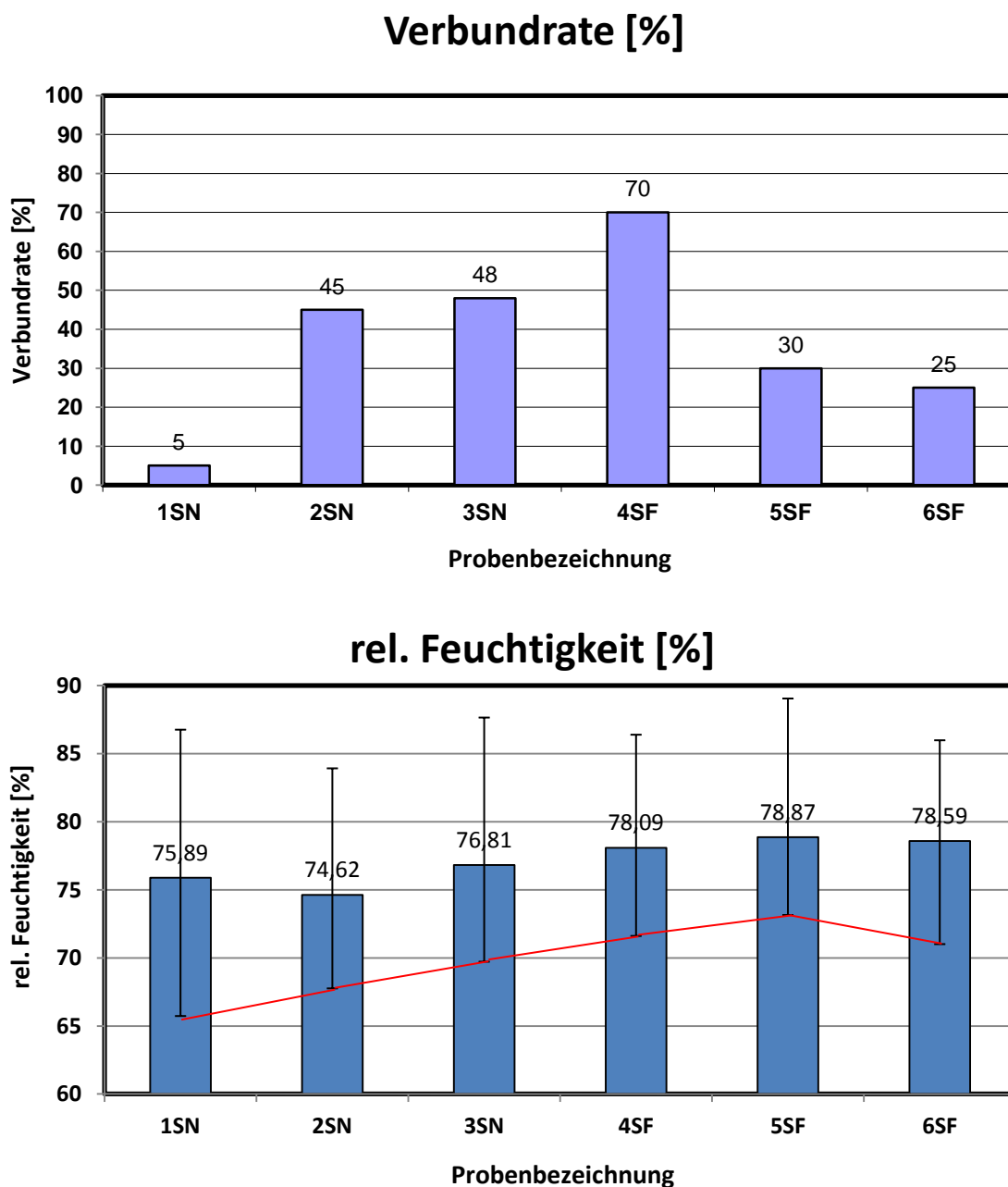


Abbildung 7.58: Gegenüberstellung Verbundrate in % (oben) und relative Feuchtigkeit in % (unten); mittels den schwarz dargestellten Fehlerbalken sind jeweils der maximale und der minimale rel. Feuchtigkeitswert der 9 Messsensoren in der Probe angegeben. Rot abgebildet ist der Trendline der Mindestwerte der rel. Feuchtigkeit.

7.6.3 Verbund ohne Sensoren: Versuchsproben RN

Die Excel Auswertung im Anhang B, Abbildung 7.59, Abbildung 7.59 und

Abbildung 7.61 zeigen nun die erreichten die Werte der Kerbbiegezugfestigkeit der Plattenfestigkeitsprüfung:

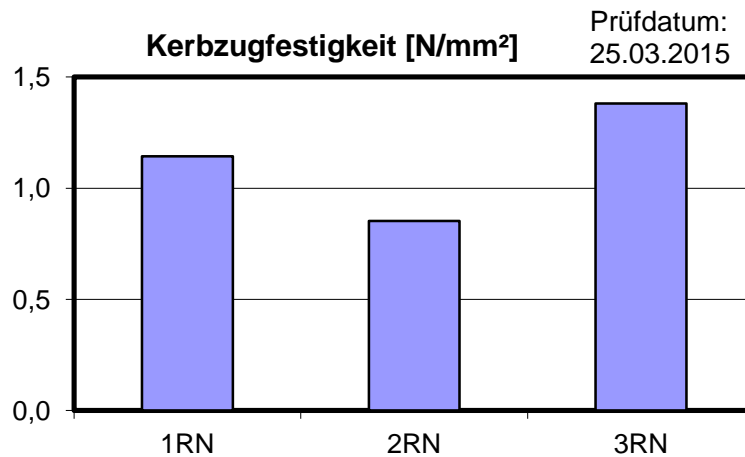


Abbildung 7.59: Kerbbiegezugfestigkeiten der RN-Versuchsreihe

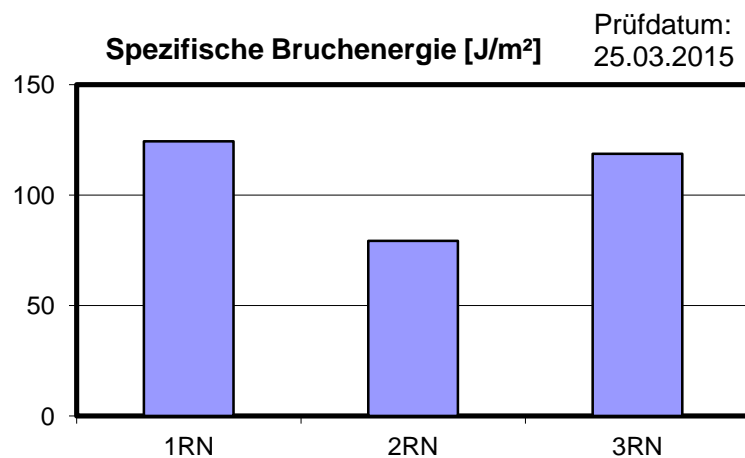


Abbildung 7.60: Spezifische Bruchenergie der RN-Versuchsreihe

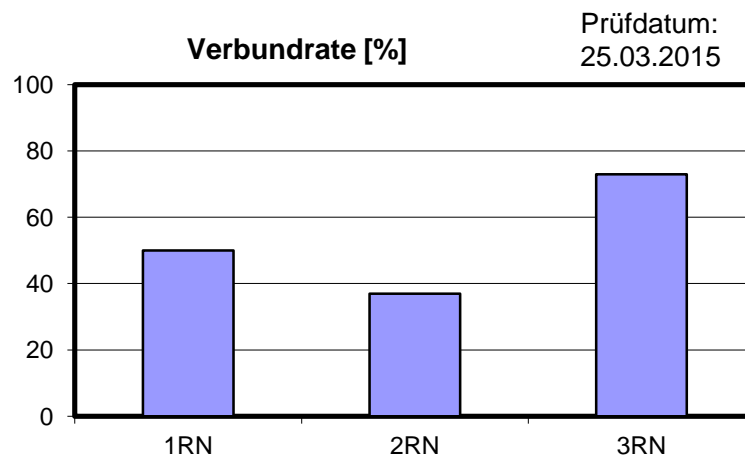


Abbildung 7.61: Verbundrate der RN-Versuchsreihe

Die Abbildung 7.59 und die Abbildung 7.61 zeigen eine eindeutige Korrelation zwischen der Kerbbiegezugfestigkeit und der Verbundrate.

Die Probe 3RN erzielt bei der Kerbbiegezugfestigkeit, der spezifischen Bruchenergie sowie bei der Verbundrate die höchsten Werte und die Probe 1RN die niedrigsten. Probe 2RN hält sich bei allen drei Diagrammen genau in der Mitte der anderen zwei Proben. Eine solche Übereinstimmung ist zwar häufig, muss sich aber, wie an der Versuchsreihe RF gezeigt wurde, nicht immer bewahrheiten.

Auch die Verschiebungs-Dehnungs-Diagramme des *Wedge-Splitting-Tests* lieferten wie z.B. Abbildung 7.62 zeigt, die erwartete Bruchenergiekurve.

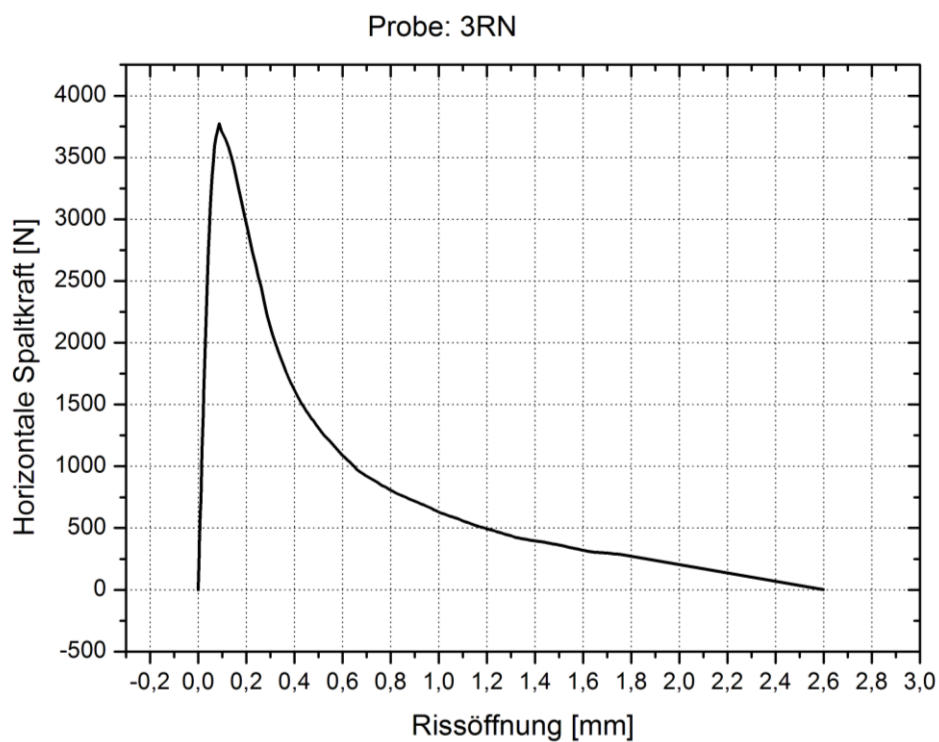


Abbildung 7.62: Verschiebungs-Dehnungsdiagramm der Probe 3RN

7.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse zum Verbund- und zur Plattenfestigkeit aller Testreihen

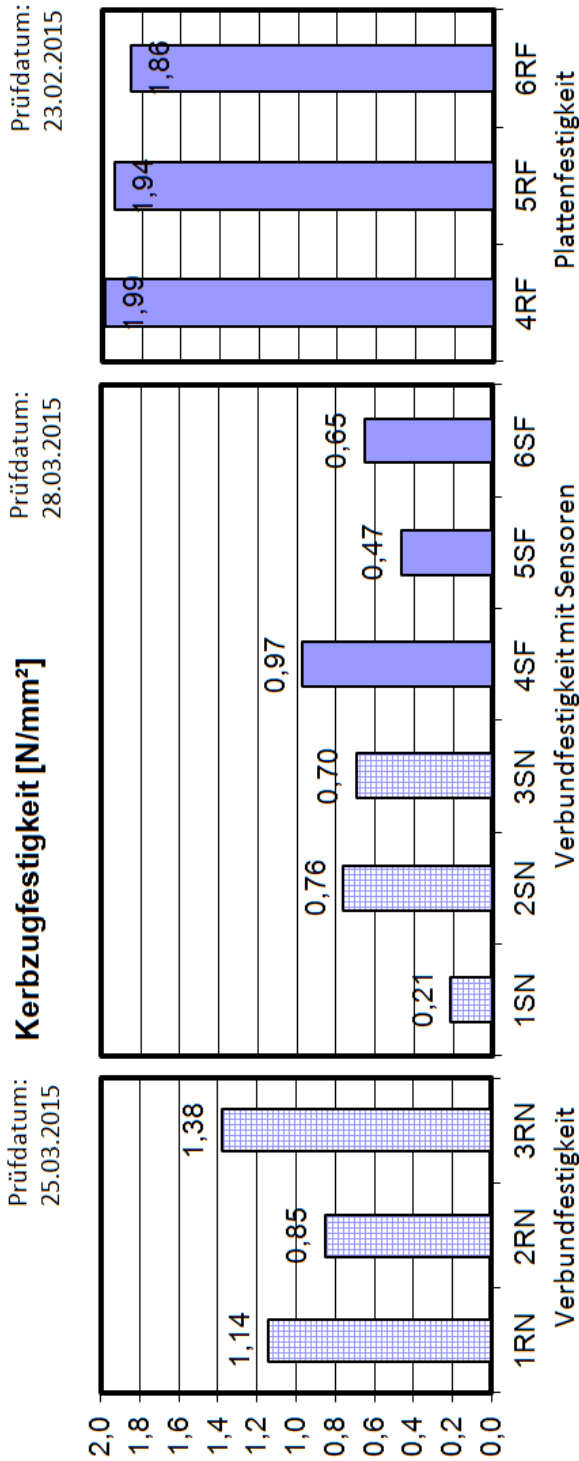


Abbildung 7.63: Vergleich der Kerbbezugfestigkeit in [N/mm²] der Referenz und Sensorplatten

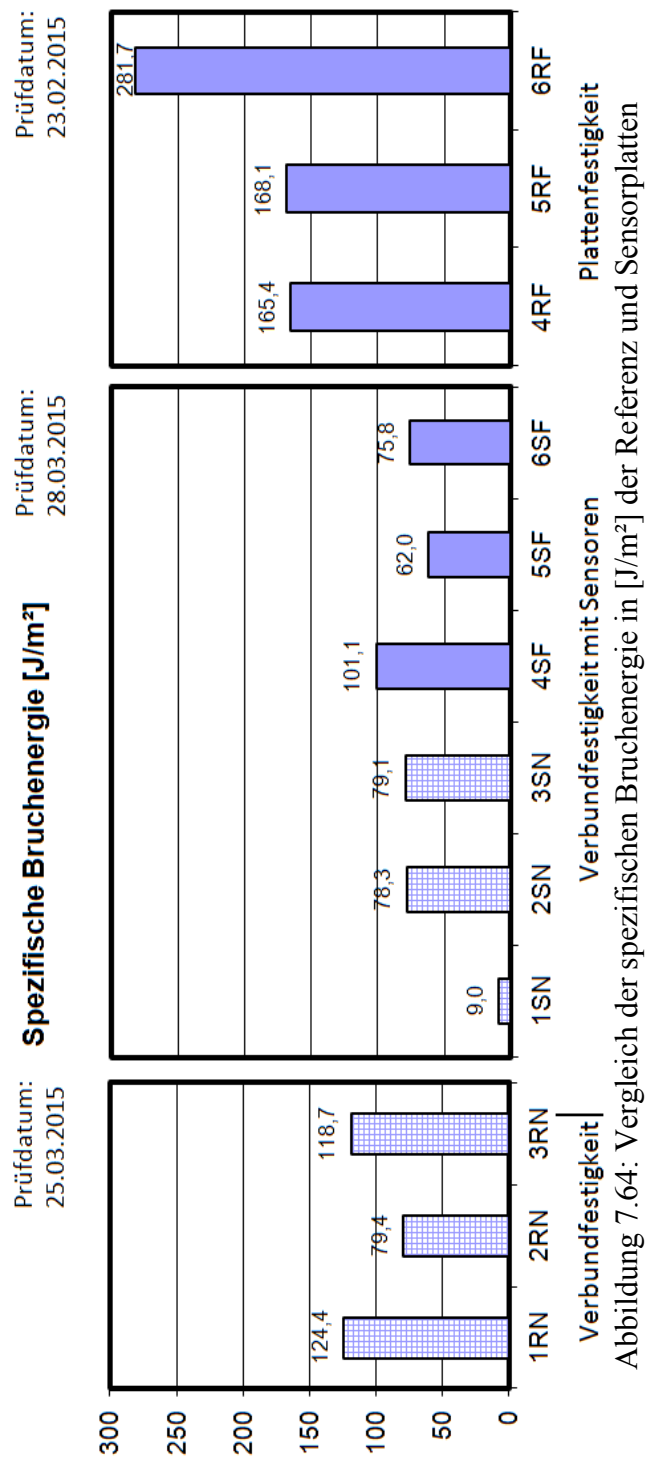


Abbildung 7.64: Vergleich der spezifischen Bruchenergie in [J/m²] der Referenz und Sensorplatten

Vergleicht man nun die Proben der Sensorplattenreihe mit deren ihrer jeweiligen Referenzplatten wie es die Grafiken in Abbildung 7.63 und Abbildung 7.64 zeigen, so lassen sich nur wenig Parallelen zwischen den gemessenen bruchmechanischen Werten der beiden Messreihen ziehen. Ausgegangen wurde davon, dass die Proben durch die Bohrlöcher und den darin eingesetzten Sensoren zwar einen schwächeren Verbund und daraus geringere Messwerte aufweisen würden, aber unter einander, wenn auch nicht quantitativ so jedoch qualitativ vergleichbar bleiben würden.

Probe 1SN weist z.B. sowohl die geringsten Kerbbiegezugfestigkeitswerte als auch die kleinste spezifische Bruchenergie auf, während Probe 1RN bei beiden Messungen höhere Werte als Probe 2RN zeigt.

Auch der Vergleich der Verbundrate auf Abbildung 7.65 macht deutlich, dass die hellblau strichliert dargestellten Prozentsätze der Proben 1RN, 2RN und 3RN nicht zu den ebenfalls hellblau dargestellten Prozentsätzen der Proben 1SN und 2SN passen. Eine plausible Erklärung konnte dazu leider nicht gefunden werden.

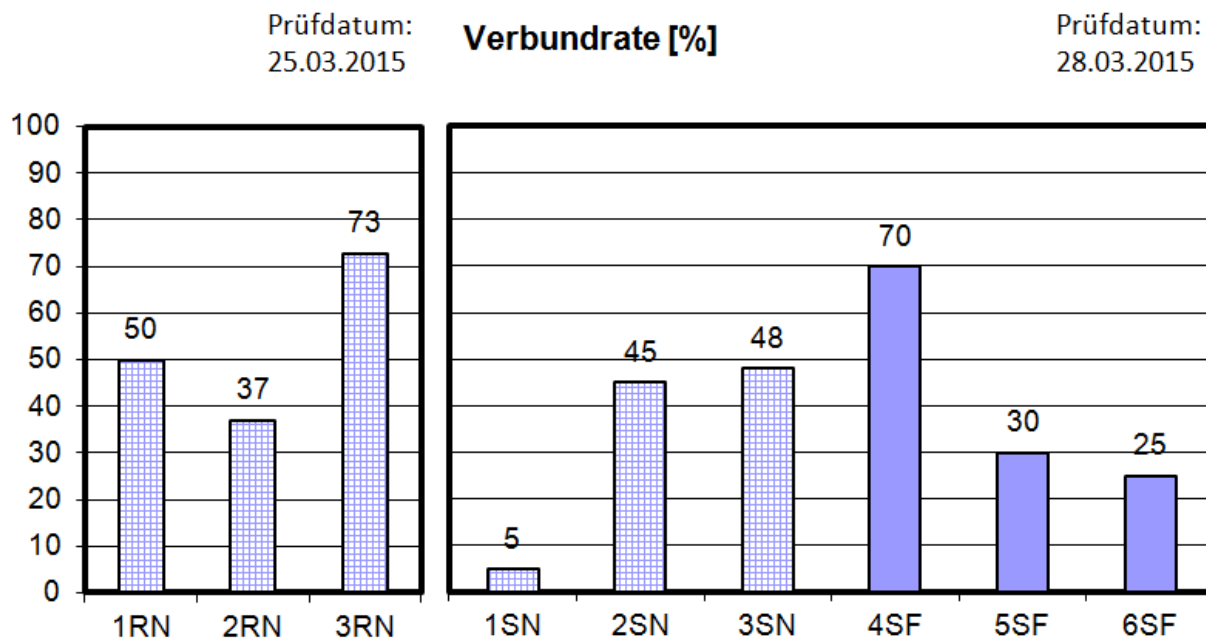


Abbildung 7.65: Vergleich der Verbundrate in % von der Referenzplatte mit der Sensorplatte

Als Conclusio kann festgehalten werden, dass generell beobachtet werden konnte, dass die Stellen der Holzfasernplatten, die eine höhere Feuchtigkeit aufwiesen länger im Verbund blieben.

Die Erwartungen, dass die Schalplatte bei höheren Feuchtigkeitsgehalt an Elastizität gewinnt und an Festigkeit bzw. Steifigkeit verliert, geht auf die Annahme zurück, dass die Cetris®-Schalplatte durch ihren hohen Holzbestandanteil von bis zu 60 Vol.-% die Eigenschaften des Holzes zum Großteil übernehmen müsste. Dieser Effekt wurde bis jetzt mehrmals bewiesen.

Der Effekt stimmt zwar, hat aber kaum Auswirkung, da die Feuchtunterschiede in einem relativ kleinen Ausmaß sind. Dies bedeutet, dass bei diesen Versuchen durch die Feuchtigkeit nicht die Platte, sondern hauptsächlich der Verbund beeinflusst wurde. Das zeigen auch die Ergebnisse in Abbildung 7.63, Abbildung 7.64 und Abbildung 7.65. Wie man dort sehen kann, bedeutet eine höhere Feuchtigkeit, nicht eine weichere und elastischere Platte, sondern einfach einen stärkeren Verbund. Ansonsten wäre der Anstiegswinkel der Kurven in den Verschiebungs-Dehnungsdiagramm flacher und die gemessenen Kerbbiegezugfestigkeiten in den Balkendiagrammen niedriger. Da die Proben mit einer größeren Verbundrate auch größere Kerbbiegezugfestigkeiten aufweisen und dabei die Platte versagt hat, heißt das, dass nicht die Platte schwach ist, sondern der Verbund, der den SCC und die Platte zusammenhält, stärker als die Materialfestigkeit der Platte war. Wären die Kerbbiegezugfestigkeitswerte der Proben mit dem überwiegendem Bruch in der Platte niedriger als jene bei denen die Verbundrate sehr gering war, wie zum Beispiel bei der Probe 1SN, würde das auf eine schwächere Plattenfestigkeit hinweisen.

Die hygroskopische Eigenschaft des Holzes wird benutzt, um anhand der relativen Luftfeuchtigkeit und über ein sogenanntes KEYLWERTH-Diagramm (siehe Abbildung 7.66) das Holzfeuchtegleichgewicht zu bestimmen. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 65,73 % wie bei Sensor eins der Probe 1SN und eine Raumtemperatur von 17 °C lässt sich damit z.B. zu einer Gleichgewichtsfeuchtigkeit (= Sorptionsgleichgewicht) von 11,7% umrechnen. Sensor eins der Probe 4SN wies eine rel. Luftfeuchte von 71,61 % auf, was sich auf eine Gleichgewichtsfeuchte von 13,3 % umrechnen lässt.

Da die Umrechnung jedoch nur ein weiterer Schritt ist, der Werkstoff nicht zur Gänze aus Holz besteht und die qualitative Darstellung erhalten bleibt, wurde während der gesamten Arbeit mit der relativen Luftfeuchte gerechnet.

Weiters wurde durch die Differenz der Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Holzanteils von nur 1,6 % zwischen den zwei Sensoren der Platte mit dem schlechtesten Verbund (1SN) und der Platte mit dem besten Verbund (4SF) gezeigt, dass die Materialfeuchte kaum Einfluss auf die Festigkeit der Platte haben kann.

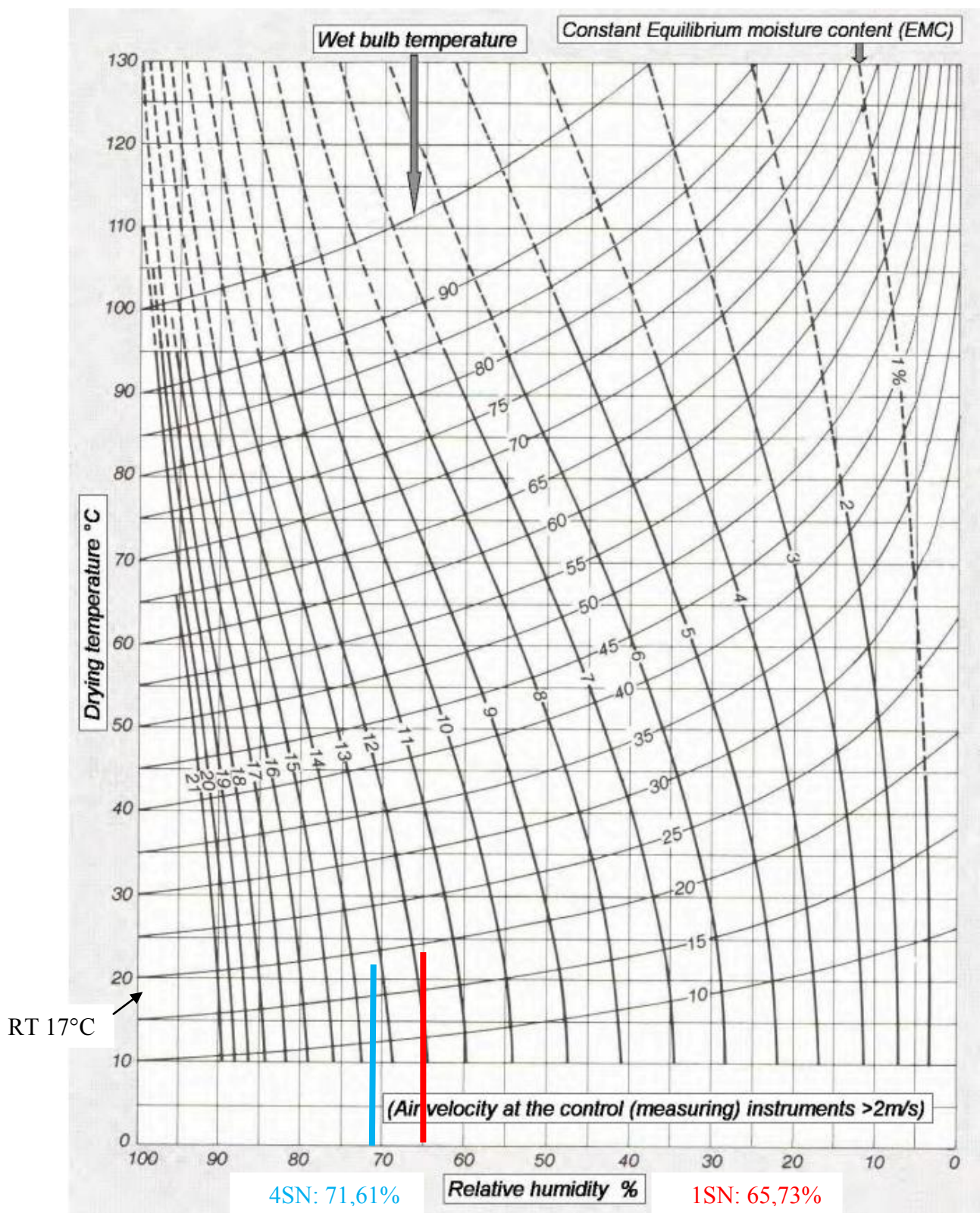


Abbildung 7.66: Holzfeuchtegleichgewicht nach Keylwerth [10]

Der RH-Wert des Sensors 1 der Probe 1SN ist dabei rot und der der Probe 4SN blau dargestellt

8 Zusammenfassung

Seit nun mehr als 20 Jahren existieren Baustoffe wie die zementgebundene Holzspanplatte der Firma *CETRIS*[®] am Markt. Obwohl aus der Not und der Rohstoffknappheit des 2. Weltkrieges heraus geboren, entwickelten sich diese Baustoffe weiter und wurden nicht zuletzt wegen des Verlangens nach ressourcenschonender und nachhaltiger Bauverfahren zu einem der zukunftsträchtigsten Baustoffe unserer Zeit. Geringes Gewicht, Flexibilität, Feuerbeständigkeit und hohe Festigkeit schaffen ideale Voraussetzungen für den Einsatz dieser zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalungselemente für die Herstellung von Hochbauten.

Für das Erstellen von Betonbauteilen im Hochbau sind in erster Linie formgebende Schalungselemente, in die der Frischbeton gegossen wird, erforderlich. Der Frischbeton, der sich wie eine Flüssigkeit verhält, übt enorme Kräfte auf die Schalung aus, denen diese bis zum Erreichen der Frühfestigkeit des Betons entgegenwirken muss. Auch die Elemente verlorener Schalungen müssen in der Lage sein diesen Kräften zu widerstehen, allerdings entfallen Zeit und Kosten für Ausschalen und Reinigung der Elemente. Die zementgebundenen Holzfaserplatten bauen einen Verbund mit dem Betonkern auf und verbleiben daher am fertigen Bauteil und können daher bereits werkseitig mit allen benötigten Einbauten versehen werden. Allerdings sind mit dieser Bauweise auch einige Schadensfälle aufgetaucht, die zu erforschen und zu lösen sind.

Eine Methode, um Schäden in Bauteilen mit verlorener Schalung zu finden, ist durch die Auswertung akustischer Signale. Diese wurde im ersten Teil dieser DA durchgeführt und beschäftigt sich mit der Messung von Geräuschen in einem speziell dafür errichteten Testhaus, da vermutet wurde, dass die Abplatzungen mit einem lauten Knall einhergehen würden. Während der Auswertungsdauer kam es aber zu keinerlei Abplatzungen, was durch das Abklopfen mit einem Gummihammer der Schalungstafeln im und am Testhaus bestätigt wurde.

Um die Ursache von Fehlstellen im Verbund zu ergründen, wurden im Zuge der Diplomarbeit mehrere bruchmechanische Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Feuchtigkeit, die durch den Frischbeton in die Schalelemente eingetragen wird, auf den Verbund zu untersuchen. Die Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte erfolgte dabei mittels der Keilspaltmethode nach ÖNORM B 3592.

Zum Zwecke der Feuchteuntersuchung wurden Würfelproben hergestellt. 6 Schalungsplatten mit den Abmessungen 300x150x24 mm wurden halbiert, um 2 Gruppen exakt gleicher Plattenproben zu bekommen. In die eine Probengruppe wurden 9 Sensoren so verarbeitet, sodass sie die Feuchtigkeit und die Temperatur im Interface zwischen Holzfaserplatte und SCC messen konnten. Die Auswertung dieser Messdaten erfolgte digital über einen Computer.

Die zweite Probengruppe wurde als Referenzprobenreihe genutzt, um die Werte der Sensorprobenreihe mit den Werten der Proben aus derselben 300x150x24 mm Platte vergleichen zu können. Die Referenzprobenreihe wurde wieder in zwei Gruppen eingeteilt. Bei den ersten drei Proben dieser Reihe wurde, wie bei den Sensorproben, die Verbundfestigkeit getestet, um hier den Einfluss der Sensoren und den dafür gebohrten Löchern erörtern zu können. Bei den anderen drei wurde nicht die Verbundfestigkeit sondern die Plattenfestigkeit selbst untersucht. Dies erfolgte ebenfalls durch die Keilspaltmethode. Die Ergebnisse ergaben im Vergleich mit den Sensorproben, dass die aufgenommene Feuchtigkeit keinen Einfluss auf die Materialfestigkeit der Holzfaserplatten ausübt.

Die Lagerung während der Aushärtung, sowie die Testbedingungen waren für alle Platten immer gleich. Es konnte mit den Versuchen aller Testreihen und dem Vergleich der bruchmechanischen Kennwerte der Kerbzugfestigkeit und der spezifische Bruchenergie gezeigt werden, dass die Stellen mit einer höheren Feuchtigkeit länger im Verbund blieben. Die Materialfestigkeit der Holzfaserplatten wurde durch die vom Beton zugefügte Feuchtigkeit gar nicht bis vernachlässigbar gering beeinflusst.

Gelingt es in Zukunft die Fehler im Zusammenhang mit dem Verbund der Platten und der Feuchtigkeit in den Griff zu bekommen, besitzt dieses Bauverfahren großes Potential um Kundenwünsche in kürzester Zeit kostengünstig umzusetzen und das Verlangen nach nachhaltigen Alternativen im Bereich der Bauindustrie zu befriedigen.

ANHANG A:**Quellcode zur HTU21D Bibliothek, die in den Quellcode des Arduino-Boards eingespielt wird:**

```

/*
  HTU21D Humidity Sensor Library
  By: Nathan Seidle
  SparkFun Electronics
  Date: September 22nd, 2013

  License: This code is public domain but you buy me a beer if you
  use this and we meet someday (Beerware license).

  Get humidity and temperature from the HTU21D sensor.
  */

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
  #include "Arduino.h"
#else
  #include "WProgram.h"
#endif
#include <Wire.h>

#define HTDU21D_ADDRESS 0x40 //Unshifted 7-bit I2C address for the
sensor
#define TRIGGER_TEMP_MEASURE_HOLD 0xE3
#define TRIGGER_HUMD_MEASURE_HOLD 0xE5
#define TRIGGER_TEMP_MEASURE_NOHOLD 0xF3
#define TRIGGER_HUMD_MEASURE_NOHOLD 0xF5
#define WRITE_USER_REG 0xE6
#define READ_USER_REG 0xE7
#define SOFT_RESET 0xFE

class HTU21D {

public:
  HTU21D();

  //Public Functions
  bool begin();

```

```
float readHumidity(void);
float readTemperature(void);
void setResolution(byte resBits);

//Public Variables

private:
    //Private Functions

    byte read_user_register(void);
    byte check_crc(uint16_t message_from_sensor, uint8_t
check_value_from_sensor);

    //Private Variables

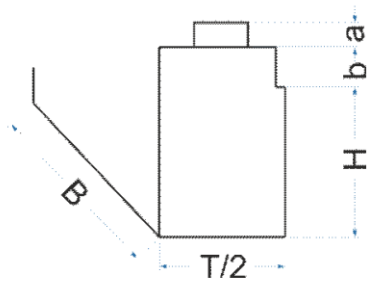
};
```

ANHANG B:

Prüfberichte des Wedge-Splitting-Tests:

MESSUNGEN WST VERBUND VST-PLATTE - BETON SCC

Messdatum: 23.02.2015

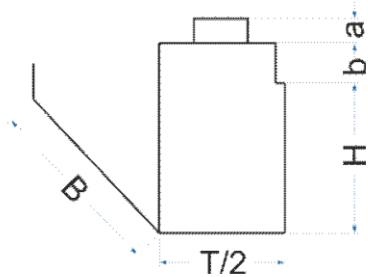


$V = 1 \text{ mm/min}$
Keil: $19,2^\circ$
Alle Maßen in mm!

Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
4RF	21,8	27,0	120,4	147,0	150,0	20°C 25% Materialfeuchte
5RF	25,8	27,3	120,5	147,0	150,0	20°C 30% Materialfeuchte
6RF	22,0	31,0	116,2	147,0	150,0	20°C 27% Materialfeuchte

MESSUNGEN WST
VERBUND VST-PLATTE - BETON SCC

Messdatum: 25.03.2015

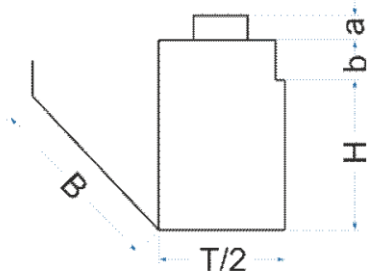


V = 1 mm/min
Keil: 19,2°
Alle Maßen in mm!

Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
1RN	21,0	31,3	119,2	147,0	150,0	50% Plattenbruch; RH: o: 60%, m: 85%, u: 70%
2RN	20,8	30,6	119,4	147,0	150,0	37% Plattenbruch; RH: o: 70%, m: 80%, u: 65%
3RN	21,2	31,3	118,9	147,0	150,0	73% Plattenbruch; RH: o: 55%, m: 80%, u: 70%
6SF	21,3	30,9	119,3	147,0	150,0	25% Plattenbruch; RH: o: 26%, m: 33%, u: 33%

**MESSUNGEN WST
VERBUND VST-PLATTE - BETON SCC**

Messdatum: 28.03.2015



V = 1 mm/min
Keil: 19,2 °
Alle Maßen in mm!

Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
1SN	21,6	30,1	119,6	147,0	150,0	5% Plattenbruch; RH: o: 27%, m: 50%, u: 50%
2SN	21,8	305,0	119,0	147,0	150,0	45% Plattenbruch; RH: o: 26%, m: 27%, u: 23%
3SN	21,1	29,4	119,8	147,0	150,0	48% Plattenbruch; RH: o: 36%, m: 25%, u: 23%
4SF	21,3	29,4	120,2	147,0	150,0	70% Plattenbruch; RH: o: 21%, m: 28%, u: 27%
5SF	22,3	29,0	118,9	147,0	150,0	30% Plattenbruch; RH: o: 34%, m: 35%, u: 30%

ANHANG C:

Sensorenmessergebnisse vom 18.02.2015

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Datum	Uhrzeit	ID:	X	Multi:	M	Ch.:	X	Humidity:	RH%	Temperature:	T °C
2	18.02.2015	16:39	ID: 1	X	Multi: 0	M	Chan: 0	X	Humidity: 80,27	RH%	Temperature: 15,4	
3	18.02.2015	16:39	ID: 2	X	Multi: 0	M	Chan: 1	X	Humidity: 90,95	RH%	Temperature: 15,7	
4	18.02.2015	16:39	ID: 3	X	Multi: 0	M	Chan: 2	X	Humidity: 998,00	RH%	Temperature: 998,0	
5	18.02.2015	16:39	ID: 4	X	Multi: 0	M	Chan: 3	X	Humidity: 89,95	RH%	Temperature: 15,6	
6	18.02.2015	16:39	ID: 5	X	Multi: 0	M	Chan: 4	X	Humidity: 100,32	RH%	Temperature: 15,6	
7	18.02.2015	16:39	ID: 6	X	Multi: 0	M	Chan: 5	X	Humidity: 98,16	RH%	Temperature: 15,6	
8	18.02.2015	16:39	ID: 7	X	Multi: 0	M	Chan: 6	X	Humidity: 101,57	RH%	Temperature: 15,7	
9	18.02.2015	16:39	ID: 8	X	Multi: 0	M	Chan: 7	X	Humidity: 103,49	RH%	Temperature: 15,8	
10	18.02.2015	16:39	ID: 9	X	Multi: 1	M	Chan: 0	X	Humidity: 89,68	RH%	Temperature: 15,7	
11	18.02.2015	16:39	ID: 10	X	Multi: 1	M	Chan: 1	X	Humidity: 85,58	RH%	Temperature: 15,7	
12	18.02.2015	16:39	ID: 11	X	Multi: 1	M	Chan: 2	X	Humidity: 90,76	RH%	Temperature: 15,6	
13	18.02.2015	16:39	ID: 12	X	Multi: 1	M	Chan: 3	X	Humidity: 98,91	RH%	Temperature: 15,4	
14	18.02.2015	16:39	ID: 13	X	Multi: 1	M	Chan: 4	X	Humidity: 90,05	RH%	Temperature: 15,6	
15	18.02.2015	16:39	ID: 14	X	Multi: 1	M	Chan: 5	X	Humidity: 94,66	RH%	Temperature: 15,6	
16	18.02.2015	16:39	ID: 15	X	Multi: 1	M	Chan: 6	X	Humidity: 93,26	RH%	Temperature: 15,6	
17	18.02.2015	16:39	ID: 16	X	Multi: 1	M	Chan: 7	X	Humidity: 101,73	RH%	Temperature: 15,7	
18	18.02.2015	16:39	ID: 17	X	Multi: 2	M	Chan: 0	X	Humidity: 86,29	RH%	Temperature: 15,5	
19	18.02.2015	16:39	ID: 18	X	Multi: 2	M	Chan: 1	X	Humidity: 96,55	RH%	Temperature: 15,5	
20	18.02.2015	16:39	ID: 19	X	Multi: 2	M	Chan: 2	X	Humidity: 86,10	RH%	Temperature: 15,5	
21	18.02.2015	16:39	ID: 20	X	Multi: 2	M	Chan: 3	X	Humidity: 94,04	RH%	Temperature: 15,5	
22	18.02.2015	16:39	ID: 21	X	Multi: 2	M	Chan: 4	X	Humidity: 102,56	RH%	Temperature: 15,5	
23	18.02.2015	16:39	ID: 22	X	Multi: 2	M	Chan: 5	X	Humidity: 91,47	RH%	Temperature: 15,5	
24	18.02.2015	16:39	ID: 23	X	Multi: 2	M	Chan: 6	X	Humidity: 100,39	RH%	Temperature: 15,5	
25	18.02.2015	16:39	ID: 24	X	Multi: 2	M	Chan: 7	X	Humidity: 96,81	RH%	Temperature: 15,5	
26	18.02.2015	16:39	ID: 25	X	Multi: 3	M	Chan: 0	X	Humidity: 85,82	RH%	Temperature: 15,4	
27	18.02.2015	16:39	ID: 26	X	Multi: 3	M	Chan: 1	X	Humidity: 87,45	RH%	Temperature: 15,4	
28	18.02.2015	16:39	ID: 27	X	Multi: 3	M	Chan: 2	X	Humidity: 90,89	RH%	Temperature: 15,6	
29	18.02.2015	16:39	ID: 28	X	Multi: 3	M	Chan: 3	X	Humidity: 99,03	RH%	Temperature: 15,3	
30	18.02.2015	16:39	ID: 29	X	Multi: 3	M	Chan: 4	X	Humidity: 97,45	RH%	Temperature: 15,4	
31	18.02.2015	16:39	ID: 30	X	Multi: 3	M	Chan: 5	X	Humidity: 98,64	RH%	Temperature: 15,4	
32	18.02.2015	16:39	ID: 31	X	Multi: 3	M	Chan: 6	X	Humidity: 93,98	RH%	Temperature: 15,4	
33	18.02.2015	16:39	ID: 32	X	Multi: 3	M	Chan: 7	X	Humidity: 102,57	RH%	Temperature: 15,4	
34	18.02.2015	16:39	ID: 33	X	Multi: 4	M	Chan: 0	X	Humidity: 89,16	RH%	Temperature: 15,6	
35	18.02.2015	16:39	ID: 34	X	Multi: 4	M	Chan: 1	X	Humidity: 93,12	RH%	Temperature: 15,2	
36	18.02.2015	16:39	ID: 35	X	Multi: 4	M	Chan: 2	X	Humidity: 88,70	RH%	Temperature: 15,3	
37	18.02.2015	16:39	ID: 36	X	Multi: 4	M	Chan: 3	X	Humidity: 94,44	RH%	Temperature: 15,2	
38	18.02.2015	16:39	ID: 37	X	Multi: 4	M	Chan: 4	X	Humidity: 95,94	RH%	Temperature: 15,3	
39	18.02.2015	16:39	ID: 38	X	Multi: 4	M	Chan: 5	X	Humidity: 100,19	RH%	Temperature: 15,4	
40	18.02.2015	16:39	ID: 39	X	Multi: 4	M	Chan: 6	X	Humidity: 95,21	RH%	Temperature: 15,2	
41	18.02.2015	16:39	ID: 40	X	Multi: 4	M	Chan: 7	X	Humidity: 94,07	RH%	Temperature: 15,3	

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] **CIDEM Hranice, a.s.** Division CETRIS [online]
<http://www.cetris.cz/de/>
- [2] **Deutschland Bundesrep. Universität der BW München** [online]
<http://www.unibw.de>
- [3] **FORM+TEST Seidner + Co.GmbH** Prüfsysteme [online]
<http://www.formtest.de>
- [4] **Hanisch Christian BSc., Sigmund Dominik BSc.** Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserverplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton - Wien 2014: Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien, 2014
- [5] **Jamek Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael** Bestimmung der Energiebilanz bei Rissinitiierung und Rissausbreitung in quasispröden Werkstoffen [Buch]. - Wien : Institut für Festkörperphysik (E138) der Technischen Universität Wien, 2002.
- [6] **Radoevski Dipl.-Ing. Aleksandar Milkov** Verbunduntersuchung zwischen selbstverdichtendem Beton und verlorenen Schalungselementen aus zementgebundenen Holzfaserverplatten [Buch]. - Wien: Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien, 2014
- [7] **VPG Verbundsysteme GmbH.** Werkspläne VST TESTRÄUME + MODELLE + DETAILS M 1 : 50 - Datum: 01.04.2014
- [8] **Sensirion AG** – Datasheet zu SHT21 [online]
http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V4.pdf
- [9] **NXP Semiconductors N.V. 2014** – Datasheet zu PCA9548A [online]
http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCA9548A.pdf
- [10] **Keylwerth, R.: Betriebsblatt 1, Sorptionsgleichgewicht von Holz.** - Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) Heft 1, S. 31. [online]
<http://www.faktum.eu/Resources/Keylwert-Diagramm.pdf>

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: ZUSAMMENSETZUNG DER CETRIS-PLATTE [1].....	5
ABBILDUNG 2.2: GROBSPÄNE [6].....	7
ABBILDUNG 2.3: FEINSPÄNE [6].....	7
ABBILDUNG 2.4: SÄGEMEHL [6].....	8
ABBILDUNG 2.5: RECYCLAT [6].....	8
ABBILDUNG 2.6 : HERSTELLUNGSSCHEMA [1].....	9
ABBILDUNG 3.1: FUNKTION EINES ANKERS BEI WANDSCHALUNGEN.....	12
ABBILDUNG 3.2: MONTAGE DER ELEMENTE IM WERK.....	14
ABBILDUNG 3.3: WANDELEMENTE.....	15
ABBILDUNG 4.1: ÜBERPRÜFUNG DER FLIEßFÄHIGKEIT MIT BLOCKIERRING [2].....	17
ABBILDUNG 4.2 SEDIMENTATIONSVERSUCH.....	18
ABBILDUNG 4.3: AUSLAUFTRICHTER [3].....	18
ABBILDUNG 5.1: KRÄFTE AM KEIL [5].....	19
ABBILDUNG 5.2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER RISSÖFFNUNG [6].....	20
ABBILDUNG 5.3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER LASTVERSCHIEBUNGSKURVE [5].....	20
ABBILDUNG 5.4: RISSINITIERUNGSENERGIE IM LVD [6].....	22
ABBILDUNG 5.5: ABMESSUNGEN DER PROBE [6].....	23
ABBILDUNG 6.6: TESTHAUS ANSICHT: LINKS IN GEDÄMMTER AUSFÜHRUNG UND RECHTS UNGEDÄMMT.....	25
ABBILDUNG 6.7: SCHNITT DURCH DAS TESTHAUS: LINKS UNGEDÄMMT, RECHTS GEDÄMMT. [7]	25
ABBILDUNG 6.8: DIE ROTEN DREIECKE MARKIEREN DIE MIKROFON-STANDORTE UND DAS GRÜNE VIERECK DIE POSITION DES RECHNERS. [7].....	26
ABBILDUNG 6.9: IM TESTHAUS PLAZIERTES MIKROFON.....	26
ABBILDUNG 6.10: AUFZEICHNUNG AM PC VOR ORT.....	27
ABBILDUNG 6.11: BENUTZEROBERFLÄCHE SCHALLANALYSATOR: SPAICHINGER SCHALLPEGELMESSER MIT ALLEN AKTIVIERTEN FENSTERN.....	28
ABBILDUNG 6.12: DARSTELLUNG DER BEWERTETEN SCHALLPEGEL IN DB(A) EINER AUDIODATEI MIT CA. 12.000 EINZELWERTEN.....	30
ABBILDUNG 7.1: MESSPROGRAMM ZUR SENSORMESSTECHNIK.....	32
ABBILDUNG 7.2: HAUPTKOMPONENTEN FÜR DIE DIGITALE MESSUNG DER RELATIVEN FEUCHTIGKEIT UND DER TEMPERATUR.....	32
ABBILDUNG 7.3: VORDERSEITE DES 3X3MM GROßEN SHT21 SENSORS MIT KLAR ERKENNBAREM SENSOR-„AUGE“ ZUR MESSUNG DER DATEN. [8].....	33
ABBILDUNG 7.4: ABMESSUNGEN DES SENSORS. [8].....	34
ABBILDUNG 7.5: ANORDNUNG DER PINS AM SENSOR VON VORNE BETRACHTET. [8].....	34
ABBILDUNG 7.6: TYPISCHE UND MAXIMALE TOLERANZEN BEI 25°C. [8].....	35
ABBILDUNG 7.7: TEMPERATUROLERANZEN IN ° CELSIUS. [8].....	35
ABBILDUNG 7.8: ÜBERSICHT ÜBER DIE ELEKTRONISCHEN SPEZIFIKATIONEN DES SHT21. [8]..	37
ABBILDUNG 7.9: ANORDNUNG DER PINS AN EINEM EINZELNEN MULTIPLEXER. [9].....	38
ABBILDUNG 7.10: TYPISCHE APPLIKATION DES MULTIPLEXERS. [9].....	39
ABBILDUNG 7.11: LEITERPLATINENPLAN DES MULTIPLEXER-BUS, BESTEHEND AUS 8 CHIPS..	40
ABBILDUNG 7.12: DER FERTIGE MULTIPLEXER-BUS MIT ROT EINGEKREISTEM SENSOR ZUR MESSUNG DER RH UND DER RAUMTEMPERATUR.....	41
ABBILDUNG 7.13: ZUORDNUNG DER SENSOREN ZU DEN 6 MULTIPLEXERN 0 BIS 5. DIE JEWEILS 9. SENSOREN EINER PLATTE SIND DEM 8. MULTIPLEXER MIT DER NUMMER 7 ZUGETEILT.	41
ABBILDUNG 7.14: FLUSSDIAGRAMM FÜR DEN MULTIPLEXERBETRIEB.....	42
ABBILDUNG 7.15: SPEICHERUNG DER DATEN AM MESSRECHNER.....	43
ABBILDUNG 7.16: SCREENSHOT DER LAUFENDEN KONSOLE MIT GELADENEM PYTHON SCRIPT	47
ABBILDUNG 7.17: ANGESCHLOSSENES ARDUINO-BOARD.....	48
ABBILDUNG 7.18: DIE KNAPP 11 CM LANGE FERTIGE SONDE. DER ROTE KREIS MARKIERT DEN AN DER SPITZE DES KAPILLARRÖHRCHENS BEFESTIGTEN SENSORCHIP.....	50

ABBILDUNG 7.19: FERTIG BETONIERTE PROBE MIT SENSORSONDE FÜR DEN VORVERSUCH: DER SICH IM BETON BEFINDENDE SENSORCHIP IST ÜBER EINEN MULTIPLEXER AN DAS ARDUINO-BOARD ANGESCHLOSSEN.....	51
ABBILDUNG 7.20: EIN SHT21 SENSORCHIP MIT ANGELÖTETEN DRÄHTEN.....	53
ABBILDUNG 7.21: RÜCKSEITE EINER PLATTE MIT EINGESETZTEN CHIPS	54
ABBILDUNG 7.22: DIE EINZELNEN 3V-DRÄHTE WERDEN ZU EINER EINZIGEN LEITUNG ZUSAMMENGEFASST	54
ABBILDUNG 7.23: BELEGUNGSSCHEMA EINES 15 PIN-D-SUB-STECKERS, IST JEWEILS DIE DATA-LEITUNG DES JEWEILIGEN SENSORS.	1-9 55
ABBILDUNG 7.24: DIE VORDERSEITE INKLUSIVE SENSOREN EINER FERTIGGESTELLTEN PLATTE	56
ABBILDUNG 7.25: DIE RÜCKSEITEN MIT VERKABELUNG UND ABDICHTUNG ALLER FERTIGGESTELLTEN PLATTEN	56
ABBILDUNG 7.26: VERBINDUNGSKABEL MIT GEÖFFNETEN STECKERN: LINKS DER MÄNNLICHE UND RECHTS DER WEIBLICHE TEIL.....	58
ABBILDUNG 7.27: VERBINDUNGSKABEL DRAUFSICHT	58
ABBILDUNG 7.28: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG PRIMÄRER PROBENTEIL MIT SENSOREN ...	59
ABBILDUNG 7.29: ANBRINGEN DER SCHUTZFOLIE AN DIE PROBENPLÄTTCHEN.....	60
ABBILDUNG 7.30: DER LETZTE FUNKTIONSTEST DES ZUSAMMENSPIELS DER FOLIERTEN PLATTE, DER VERBINDUNGSKABEL, DES MULTIPLEXERS, DES ARDUINO-BOARDS SOWIE DER SOFTWARE.....	61
ABBILDUNG 7.31: EINÖLEN DER STAHLWÜRFELSCHALUNGEN	62
ABBILDUNG 7.32: BETONMISCHEN MITTELS EINER KIPPTROMMELMISCHMASCHINE.....	62
ABBILDUNG 7.33: STAHLWÜRFELSCHALUNGEN VOR (OBEN) UND NACH (UNTEN) DEM BETONIERVORGANG	64
ABBILDUNG 7.34: SCHNEIDEN DER MARMORPRISMEN	67
ABBILDUNG 7.35: PROBE IN DER PRÜFMASCHINE	68
ABBILDUNG 7.36: WEGAUFNEHMER [4].....	68
ABBILDUNG 7.37: LAST-VERSCHIEBUNGS-DIAGRAMM DER PROBE 6RF	69
ABBILDUNG 7.38: LINKS: PROBE 6RF MIT ALUMINIUMRAHMEN, WALZLAGER UND KEIL RECHTS: PROBE 6RF MIT VOLLSTÄNDIG DURCHTRENNTER PLATTE	69
ABBILDUNG 7.39: PROBENABMESSUNGEN UND ERLÄUTERUNG DER BEZEICHNUNGEN EINER PROBENHÄLFTE [4]	70
ABBILDUNG 7.40: FEUCHTEMESSUNG DER REFERENZPLATTEN NACH DEM „WEDGE-SPLITTING- TEST“	71
ABBILDUNG 7.41: ABLÖSEN DER VERKABELUNG AN DER PROBE 4SF-A, DEM PRIMÄREN PROBENTEIL LINKS: DER ABLÖSEVORGANG, RECHTS: VON UNREINHEITEN BEFREITER PROBENTEIL.....	72
ABBILDUNG 7.42: PROBE 4SF MIT UM 180° GEDREHTEM PROBENTEIL B UND DEN MARKIERUNGEN FÜR DIE SPÄTEREN MARMORPRISMEN: „X“.....	73
ABBILDUNG 7.43: PROBE 4SF IN DER PRÜFMASCHINE AUFGESTELLT, SAMT MESSEQUIPMENT. DER ROTE STRICH KENNZEICHNET DIE EBENE, DIE AUF BIEGEZUG GETESTET WIRD, DIE VERBUNDFLÄCHE.	74
ABBILDUNG 7.44: PROBE 3SN MIT ROT MARKIERTER BRUCHFLÄCHE A UND GELB MARKIERTER GESAMTVERBUNDFLÄCHE. LINKS SIND DIE 9 SENSOREN DURCHNUMMERIERT.	75
ABBILDUNG 7.45: PROBE 1RN.....	76
ABBILDUNG 7.46: KERBBIEGEZUGFESTIGKEITEN DER RF-VERSUCHSREIHE	77
ABBILDUNG 7.47: SPEZIFISCHE BRUCHENERGIE DER RF-VERSUCHSREIHE.....	77
ABBILDUNG 7.48: PROBE 1SN MIT SIGNIFIKANT KLEINEN WERTEN	78
ABBILDUNG 7.49: BRUCHBILD DER PROBE 1SN	78
ABBILDUNG 7.50: REFERENZPLATTE ZUR PROBE 1SN	79
ABBILDUNG 7.51: VERSCHIEBUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMM DER PROBE 4SF	80
ABBILDUNG 7.52: KERBBIEGEZUGFESTIGKEITEN DER S-VERSUCHSREIHE	81
ABBILDUNG 7.53: SPEZIFISCHE BRUCHENERGIE DER S-VERSUCHSREIHE	81
ABBILDUNG 7.54: VERBUNDRATE DER S-VERSUCHSREIHE.....	81
ABBILDUNG 7.55: VERLAUF DER FEUCHTIGKEIT IN PROBE 6SF BEI 52 MESSUNGEN	85
ABBILDUNG 7.56: VERGLEICH DES FARBSPEKTRUMS DES FEUCHTIGKEITSGEHALTES DER PROBEN 1SN BIS 3SN MIT DEREN BRUCHBILD.....	86

ABBILDUNG 7.57: VERGLEICH DES FARBSPEKTRUMS DES FEUCHTIGKEITSGEHALTES DER PROBEN 4SF BIS 6SF MIT DEREN BRUCHBILD.....	87
ABBILDUNG 7.58: GEGENÜBERSTELLUNG VERBUNDRATE IN % (OBEN) UND RELATIVE FEUCHTIGKEIT IN % (UNTEN); MITTELS DEN SCHWARZ DARGESTELLTEN FEHLERBALKEN SIND JEWEILS DER MAXIMALE UND DER MINIMALE REL. FEUCHTIGKEITSWERT DER 9 MESSSENSOREN IN DER PROBE ANGEZEIGT. ROT ABGEBILDET IST DER TRENDLINE DER MINDESTWERTE DER REL. FEUCHTIGKEIT.....	88
ABBILDUNG 7.59: KERBBIEGEZUGFESTIGKEITEN DER RN-VERSUCHSREIHE.....	89
ABBILDUNG 7.60: SPEZIFISCHE BRUCHENERGIE DER RN-VERSUCHSREIHE.....	89
ABBILDUNG 7.61: VERBUNDRATE DER RN-VERSUCHSREIHE.....	89
ABBILDUNG 7.62: VERSCHIEBUNGS-DEHNUNGSDIAGRAMM DER PROBE 3RN.....	90
ABBILDUNG 7.63: VERGLEICH DER KERBBIEGEZUGFESTIGKEIT IN [N/MM ²] DER REFERENZ UND SENSORPLATTEN.....	91
ABBILDUNG 7.64: VERGLEICH DER SPEZIFISCHEN BRUCHENERGIE IN [J/M ²] DER REFERENZ UND SENSORPLATTEN.....	91
ABBILDUNG 7.65: VERGLEICH DER VERBUNDRATE IN % VON DER REFERENZPLATTE MIT DER SENSORPLATTE.....	92
ABBILDUNG 7.66: HOLZFEUCHTEGLEICHGEWICHT NACH KEYLWERTH [10].....	94

Tabellenverzeichnis

TABELLE 6-1: ERSTE SEITE DES ERSTEN EXCEL-SHEETS DER SCHALLPEGELMESSUNGEN	29
TABELLE 7-1: DARSTELLUNG EINES BITDATENSTRANGES DURCH SCL UND SDA	36
TABELLE 7-2: DIE 8 KANÄLE EINES MULTIPLEXERS UND IHRE BINÄRE ZUORDNUNG.....	38
TABELLE 7-3: BETONREZEPTUR FÜR 0,2 LITER FRISCHBETON	51
TABELLE 7-4: GEMESSENE REL. LUFTFEUCHTIGKEIT (RH) UND TEMPERATUR (T) DES VORVERSUCHS.....	52
TABELLE 7-5: BETONREZEPTUR FÜR 10 LITER FRISCHBETON	63
TABELLE 7-6: KENNUNG DER EINZELNEN VERSUCHSPROBENTEILE	65
TABELLE 7-7: UMGEBUNGSBEDINGUNGEN, GEMESSEN AM ANFANG, IN DER MITTE UND ZUM SCHLUSS DER MESSPERIODE (BEOBACHTUNGSZEITRAUM).....	82
TABELLE 7-8: SENSORDATEN DER FEUCHTIGKEITSMESSUNGEN.....	82
TABELLE 7-9: GEMESSENE REL. MATERIALFEUCHTE DER MANUELLEN FEUCHTIGKEITSMESSUNGEN NACH ERFOLGTEM WEDGE-SLITTING-TEST IN PROZENT [%] MITTELS DES BES BOLLMANN COMBO 200	84