



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Computertomographie im Bauwesen

Computer tomography at construction engineering

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

unter der Leitung von

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

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Elmar Tschegg

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Schranz, MSc.

Institut für Hochbau und Technologie E206/4

Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Projektass. Michael Höflinger

Mat. 0126570 E610

Technische Universität Wien

Institut für Hochbau und Technologie E206/4

Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung

Wien, am 23. August 2009

„Der Mensch soll lernen, nur die Ochsen büffeln.“

Erich Kästner

Danksagungen

Mein Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch, da er es mir ermöglichte, die im Rahmen meiner Diplomarbeit getätigten Untersuchungen durchzuführen.

Weiterer Dank gebührt Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Schranz, MSc. für seine tatkräftige Unterstützung bezüglich Inhalt und Gestaltung.

Vor allem möchte ich mich aber bei Ao.Univ.Prof.i.R. Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Elmar Tschegg für seine konstruktive Kritik und seine kontinuierliche Hilfestellung bedanken.

Aber mein größter Dank gilt meiner Mutter und meinem Bruder, die mich auch in schwierigen Zeiten meines Studiums unterstützten und mir halfen jedes Hindernis zu meistern.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz der Computertomographie im Bauwesen.

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, mit dem es möglich ist, von den untersuchten Objekten zerstörungsfrei dreidimensionale Abbildungen zu erhalten.

Zuerst wird ein Überblick über die Grundlagen der Computertomographie gegeben. Danach wird ein kurzer Abriss über den derzeitigen Stand der Wissenschaft und der Technik skizziert. Außerdem wird auf die Aufwendungen und die Rahmenbedingungen, die bei der Beschaffung und dem Betrieb eines industriellen Computertomographen nötig sind eingegangen. Darüber hinaus wird ein Überblick über einige Forschungsberichte gegeben, die für das Bauwesen relevant sind.

Danach wird anhand des Beispiels der *Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien* die Anschaffung eines Computertomographen theoretisch durchgeplant. Dazu wurden mit den an der Anschaffung und Benutzung interessierten Instituten Interviews durchgeführt und die Auswertung dieser als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Gerätes herangezogen. Zuletzt werden die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Dabei wurde mittels Computertomographie die chloridbedingte Lochfrass-Korrosion des Spannstahls von vorgespannten Hohlblechen-Elementen (Betondecken-Fertigteile) detektiert.

Abstract

This diploma thesis deals with the application of computed tomography in the field of construction engineering.

Computed tomography is an imaging method which allows to generate a three-dimensional image of the analysed objects in a non-destructive way.

At first, there is an overview about computed tomography principles. Then a short outline of current scientific and technical developments is presented. Furthermore, the diploma thesis deals with necessary expenditures and general conditions in case of purchasing on and working with an industrial computer tomograph. In addition, there is a review about research reports relevant to civil engineering.

A calculated example is given by reference to a theoretical acquisition of a computer tomograph by the Faculty of Civil Engineering at the Vienna University of Technology. Conducted interviews with interested university departments were analysed. In further consequence, they serve as a basis for a founded choice of a convenient CT. At the end, the experimental research for this diploma thesis is presented. A CT was used to detect pitting corrosion of pre-stressing steel of prestressed concrete elements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Computertomographie	4
2.1	Eigenschaften der Röntgenstrahlung	5
2.1.1	Elektromagnetisches Spektrum.....	6
2.1.2	Entstehung der Röntgenstrahlung.....	6
2.1.3	Wechselwirkung mit Materie.....	14
2.1.4	Hounsfield Einheit (CT-Wert)	29
2.1.5	Detektoren und Bildrekonstruktion.....	30
2.1.6	Artefakte	32
3	Geschichtliche Entwicklung der Computertomographie	34
4	Relevante Anwendungsmöglichkeiten der industriellen Computertomographie aus der Sicht des Bauingenieurwesens	37
4.1	Holz und Holzwerkstoffe	37
4.1.1	<i>Rohdichtebestimmung von Holzwerkstoffen mittels Computertomographie [Standfest2008]</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Anwendung der Computertomographie an Holz [Niemz1997]</i>	<i>38</i>
4.1.3	<i>Rotfäuleerkennung bei Fichte in CT-Bildern [Petutschnigg2002]</i>	<i>39</i>
4.1.4	<i>Feuchteverteilung in einem Kiefern Brett während des Trocknens, geschätzt nach einem Modell und gemessen mittels Computertomographie [Pang1998]</i>	<i>40</i>
4.1.5	<i>Feuchtebewegung während der Holz Trocknung oberhalb des FSP, gemessen mittels Computertomographie und digitaler Bildanalyse [Wiberg1999]</i>	<i>42</i>
4.1.6	<i>Die Überprüfung des Eindringverhaltens ausgewählter Kunstharze bei insektengeschädigtem Holz mit Hilfe der Computertomographie [Krieger2003]</i>	<i>43</i>
4.1.7	<i>Computertomographie bei Holz [Pabel2007].....</i>	<i>44</i>
4.1.8	<i>State of the Art Report von Scanning-Technologien in Hinblick auf den Einsatz in der Holztechnologie [Müller].....</i>	<i>45</i>
4.2	Asphalt	46
4.2.1	<i>Charakterisierung von offenporigem Asphalt mit Computertomographie [Goebbels2007]</i>	<i>46</i>
4.2.2	<i>Möglichkeiten der Strukturkennzeichnung von Asphalten mittels 3D- Computertomographie [Recknagel2008].....</i>	<i>47</i>
4.3	Natürliche Gesteine	49
4.3.1	<i>Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natursandstein mittels Computer- Tomographie [Queisser1998].....</i>	<i>49</i>

4.3.2	<i>Ergebnisse experimenteller Untersuchungen des Feuchtetransportes in Baustoffen mittels Computer-Tomographie [Dewitz2000].....</i>	50
4.3.3	<i>Computertomographische Untersuchungen an einem Sandstein-Kleinkern [Schinagl2007]</i>	52
4.4	Beton und andere mineralische Baustoffe	53
4.4.1	<i>Computertomographie – dreidimensionale, zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Werkstoffen [Geier].....</i>	53
4.4.2	<i>Computertomographie für Industrieböden aus Stahlfaserbeton [Mellmann1999]... </i>	53
4.4.3	<i>Untersuchung von faserverstärktem Porenbeton mit Computertomographie [Weidemann2007].....</i>	54
4.4.4	<i>Analyse des Gefüge- und Feuchtezustandes in mineralischen Baustoffen mit der Mikro-Röntgen-3D-Computertomographie [Weise2007]</i>	56
4.4.5	<i>Microfocus Computer Tomographie zur Ermittlung von Frostschäden in modernen Reparaturmörteln [Degryse2001].....</i>	58
4.5	Metalle	59
4.5.1	<i>Anwendungen der industriellen 3D-Computertomographie [Maisl2000].....</i>	59
4.5.2	<i>Messungen von Eigenschaften poröser Materialien in 3D mittels Mikro-Computertomographie [Illerhaus2001]</i>	60
4.5.3	<i>Industrielle Computertomographie zur 3D-Volumenerfassung und Defektanalyse [Flisch2006]</i>	60
4.5.4	<i>Röntgen-Computertomographie zur Charakterisierung von Inhomogenitäten in Gussgefügen von Aluminium und Stahl [Harrer2007]</i>	61
4.5.5	<i>3D-Computertomographie und Materialographie – Potential für angewandte Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse [Löffler2007]</i>	62
4.6	Sonstige Materialien	64
4.6.1	<i>Charakterisierung kohlenstofffaserverstärkter Metalle und Polymere mittels Röntgen-Computertomographie [Cornelis2005].....</i>	64
4.6.2	<i>Photogrammetrische und computertomographische Erfassung von Deformationen, Rissentwicklungen und Strukturveränderungen bei Belastungsversuchen von textilverstärkten Probekörpern [Maas2003]</i>	65
4.6.3	<i>Computertomographie – Ein innovatives Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffentwicklung [Weberbauer1998]</i>	66
5	Anschaffung und Betrieb eines Computertomographen	67
5.1	Gerätetechnik (Geräte und Einsatzgebiet).....	67
5.1.1	Geräte mit geschlossenem Aufbau.....	67
5.1.2	Geräte mit offenem Aufbau	68
5.2	Messraum und Strahlenschutz	70
5.3	Betrieb.....	71

5.4	Kosten	71
5.4.1	Gerätekosten	71
5.4.2	Personalkosten	72
5.4.3	Kosten einer Messung	73
6	Auswertung der Anforderungsparameter eines industriellen Computertomographen aus der Sicht der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien	76
6.1	Fakultät für Bauingenieurwesen	76
6.1.1	Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen – E202	76
6.1.2	Institut für Hochbau und Technologie – E206.....	78
6.1.3	Institut für Geotechnik – E220	78
6.2	Fakultät für Maschinenbau	79
6.2.1	Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie – E308	79
6.2.2	Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik - E317	80
6.3	TVFA GmbH	80
6.4	Zusammenfassung der gewünschten Material- und Untersuchungsparameter ..	81
7	Konkrete Gerätewahl am Beispiel der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien.....	83
7.1	Grundlagen der Entscheidungsfindung (Voraussetzungen)	83
7.2	Planungsschritte	83
7.3	Auswahl eines Gerätes.....	85
8	Anwendung der Computertomographie zur Erkennung von chloridbedingter Spannstahlkorrosion	88
8.1	Einleitung.....	88
8.2	Konstruktion	88
8.3	Problemstellung.....	90
8.4	Voruntersuchungen	90
8.4.1	Korrosion.....	90
8.4.2	Potentialfeldmessungen	91
8.4.3	Bestimmung der Salzkonzentrationen (Chloride)	93
8.5	Computertomographie	95
8.5.1	Einleitung	95
8.5.2	Probenentnahme.....	97
8.5.3	Versuchsaufbau (verwendetes Gerät)	98

8.5.4	Messungen und Ergebnisse.....	100
8.5.5	Ergebnisse	104
8.5.6	Diskussion.....	110
9	Zusammenfassung	111
10	Literaturverzeichnis	113
11	Abbildungsverzeichnis	117
12	Tabellenverzeichnis	121
13	Anhang.....	122

1 Einleitung

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem es mittels mehrerer 2-dimensionaler Projektionen und geeigneter Algorithmen möglich ist, eine 3-dimensionale Abbildung des untersuchten Objekts zu erhalten.

Die physikalischen und mathematischen Grundlagen entstanden Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts, jedoch war es erst mit der Entwicklung leistungsfähiger Computer möglich, diese Technik zielführend einzusetzen.

Zuerst wurde die Computertomographie in der Medizin und mit der Zeit auch in der Industrie eingesetzt, vor allem im Flugzeug- und Automobilbau. Allmählich wurde diese Technik, aufgrund der Weiterentwicklungen und der Verringerung der Kosten, auch in der Materialwissenschaft eingesetzt. Jedoch ist der Einsatz der Computertomographie im Bauwesen noch nicht weit verbreitet und hat eher einen untergeordneten Stellenwert.

Aus diesem Grund soll diese Diplomarbeit die Anwendungsmöglichkeiten und das Forschungs- und Untersuchungspotential der industriellen Computertomographie aufzeigen, um eine Alternative zu den bereits bestehenden Verfahren zu liefern und den Einsatz auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens zu forcieren.

Die Diplomarbeit ist in drei voneinander unabhängige Teile gegliedert. Das Lesen aller drei Teile trägt zum besseren Verständnis bei, jedoch ist es nicht zwingend notwendig um die einzelnen Kapitel nachvollziehen zu können.

- Grundlagen:

Hier wird auf die physikalischen Grundlagen eingegangen. Damit soll ein Basiswissen vermittelt werden, dass zum besseren Verständnis dieser Untersuchungsmethode beitragen soll. Da die Grundlagen der Computertomographie relativ komplex sind, wird nur auf die wesentlichen Aspekte zusammenfassend eingegangen.

- Stand der Wissenschaft und Technik:

Zuerst wird kurz der Stand der Gerätetechnik angeführt. Es wird auf die nötigen Rahmenbedingungen für den Betrieb und vor allem auf die nicht unwesentlichen Kosten eingegangen.

Des Weiteren wird auch ein kurzer Abriss über die bisherigen, für das Bauwesen relevanten Forschungen angeführt, bei denen ein CT zum Einsatz kam. Dadurch soll dem forschenden Wissenschaftler aber auch dem Praktiker ein kurzer Überblick gegeben werden, wozu der CT eingesetzt werden kann und welche Möglichkeiten diese Technik bietet.

- Eigene Untersuchungen:

Im dritten und letzten Teil wird anhand der *Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien* die mögliche Anschaffung eines Computertomographen durchgedacht. Dazu wurden einige Institute interviewt, die Ergebnisse ausgewertet und als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Gerätes herangezogen. Anschließend werden alle damit verbundenen Kosten und Aufwendungen erläutert.

Außerdem wird auf die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführten Untersuchungen, bei denen ein CT zum Einsatz kam, eingegangen. Mit Hilfe eines Computertomographen sollte chloridbedingte Lochfrass-Korrosion bei den Spannstählen von vorgespannten Hohlblechen-Elementen detektiert werden. Dazu wurden aus den Hohlblechen Bohrkern entnommen und mittels Computertomographie untersucht. Die Untersuchungsergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit und die Informationen die, bei geeigneter Wahl der Messungsparameter, mittels CT erhalten werden können.

Teil 1 - Grundlagen

2 Grundlagen der Computertomographie

Zur Erstellung dieses Kapitels wurden folgende Publikationen verwendet:

[Banhart2008], [Baruchel2000], [Berg1999], [Buck1995], [Buzug2004], [Heuck1995], [Jackson1975], [Jackson1981], [Nielsen2001], [Queisser1998], [Regler1967], [Renger2007], [Riegler1967], [Steeb1993]

Das Wort Tomographie leitet sich aus dem Altgriechischen ab und setzt sich aus den beiden Worten *Tome* für Schnitt und *Graphien* für Schreiben zusammen. Tomographische Verfahren verwenden also mehrere einzelne Schnittbilder um auf das Gesamtbild eines Objektes zu schließen. Diese Schnittbilder können mit unterschiedlichen Verfahren, je nach Material und Aufgabenstellung, ermittelt werden. Die derzeit verwendeten Techniken benutzen:

- Ultraschall
- Magnetische Felder
- Elektrische Felder
- Gammastrahlen (γ -rays)
- Röntgenstrahlen (X-rays)

Eine Übersicht über einige derzeit vorhandenen tomographischen Verfahren ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

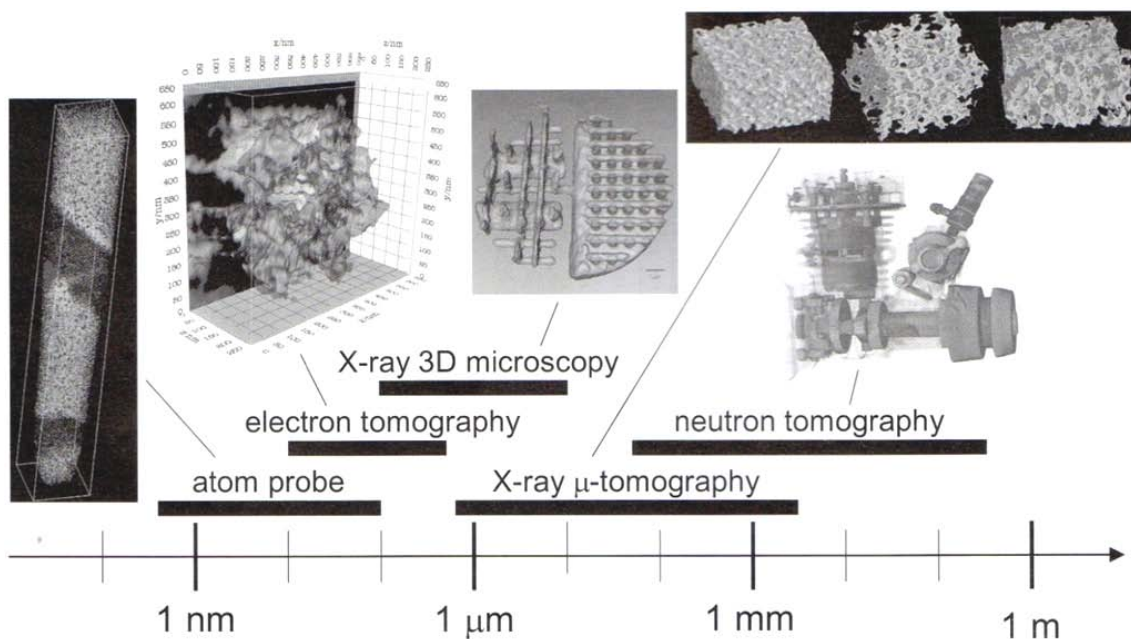


Abbildung 2.1: Übersicht einiger vorhandener Tomographieverfahren und deren Messbereiche [Banhart2008]

Bei der Computertomographie wird Röntgenstrahlung eingesetzt. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel auch auf einige physikalische Grundlagen und die damit verbundenen Effekte der Röntgenstrahlung eingegangen. Diese Diplomarbeit ist für Bauingenieure/innen gedacht, die an der Anwendung der Computertomographie interessiert sind. Daher erhebt diese Arbeit auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da eine genaue und umfassende Erläuterung der physikalischen Grundlagen ganze Bücher füllt und damit den Rahmen dieser Diplomarbeit bei weitem übersteigen würde. Es werden aber die wichtigsten Aspekte kurz und anschaulich dargestellt, um einen Überblick über dieses relativ aufwendige Verfahren zu liefern. Bei genauerem Interesse wird auf die Literatur verwiesen, die bei der Erstellung dieses Kapitels Verwendung fand.

Beim Einsatz der Computertomographie im Fachbereich für Bauingenieurwesen geht es zum Einen um Grundlagenforschung in der Materialwissenschaft, was auch die Bereiche des Maschinenbaues und der Festkörperphysik betrifft und zum Anderen um die nachträgliche Feststellung der Ursachen von Schadensfällen. Vor allem beim Überprüfen von Rechenmodellen und theoretischen Ansätzen auf der Ebene der Micro- und Macro-Strukturen, also der Mehrskalenmodelle, wird eine sehr genaue Auflösung benötigt. Die Auflösung der Messungen, also die erzielbare Genauigkeit oder Feinheit, hängt von einigen Faktoren ab. Im Wesentlichen gibt es folgende Zusammenhänge:

- **Umso höher die erzielte Genauigkeit sein soll, desto kleiner müssen die Probenabmessungen sein.**
- **Ungefähr 1/1000 der durchstrahlten Probenlänge ist als Auflösung erreichbar**
- **Je dichter das Probenmaterial ist, desto stärker muss die Strahlung sein, wodurch sich der Brennfleck vergrößert, der die kleinstmöglich erzielbare Auflösung vorgibt.**

2.1 Eigenschaften der Röntgenstrahlung

Strahlen sind ganz allgemein energiereiche Teilchen, die sich von einer Strahlenquelle aus wellenförmig ausbreiten. Sind die Teilchen im Ruhezustand ohne Masse, also reine Energie, handelt es sich um Photonen. Ist eine Ruhemasse vorhanden, die sich rein theoretisch „wiegen“ lässt, sind es Materieteilchen.

Zu den Photonenstrahlen gehören z.B. Lichtstrahlen, UV-Strahlen, Gamma-Strahlen und auch Röntgenstrahlen. Strahlung aus Materieteilchen entsteht durch Elektronen, Protonen, Neutronen oder Alpha-Teilchen. Allgemein teilt man Strahlung, je nach Wellenlänge und Frequenz, in nichtionisierend (Wellenlänge < 100 nm) und ionisierend (Wellenlänge > 100 nm) ein.

Röntgenstrahlen können auf natürliche Weise entstehen oder künstlich erzeugt werden. Bei der Herstellung und der Wechselwirkung mit anderer Materie gibt es einige Effekte und Eigenschaften der Röntgenstrahlung, die in diesem Kapitel aufgelistet und

erläutert werden, um die wichtigsten Grundlagen für ein breites Publikum verständlich zu machen.

2.1.1 Elektromagnetisches Spektrum

Röntgenstrahlen sind ein Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums wie Licht, Radiowellen und Gammastrahlen (siehe Abbildung 2.2). Ihre Wellenlänge liegt etwa im Bereich von 5 pm bis 50 nm und die dazugehörige Frequenz liegt im Bereich zwischen $3 \cdot 10^{17}$ und $3 \cdot 10^{20}$ Hertz. Die Photonenenergien erreichen etwa 1 bis 250 keV. Sie durchdringen Materie und können daher im Gegensatz zu Licht nur schlecht durch Linsen und dergleichen beeinflusst werden.

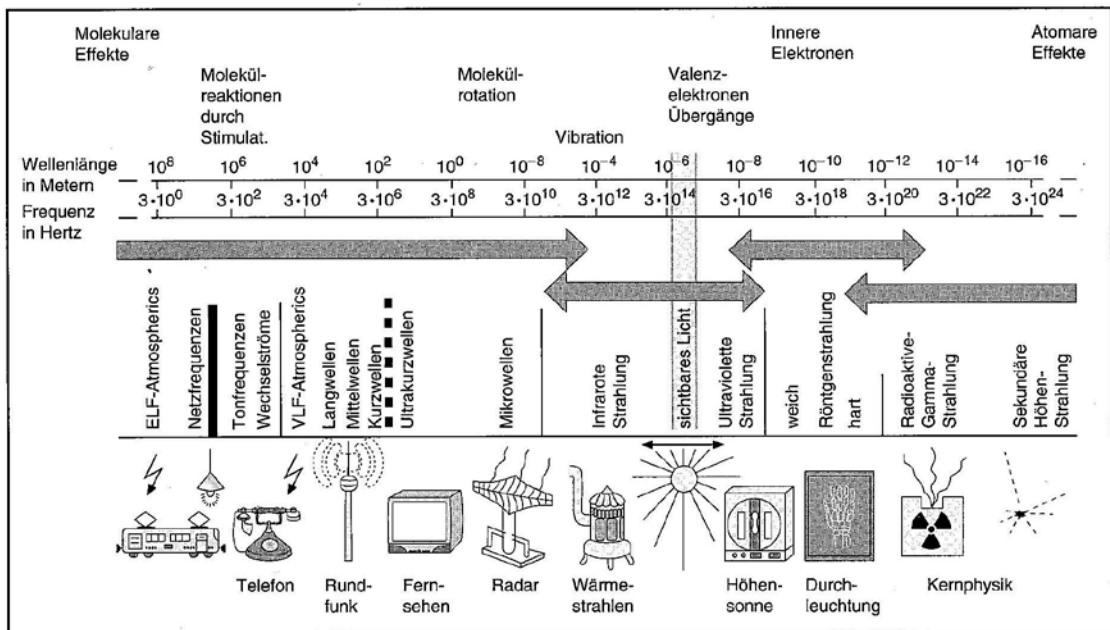


Abbildung 2.2: Darstellung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche [Berg1999]

Für die technische Anwendung in der Röntgendurchstrahlung kann davon ausgegangen werden, dass sie sich geradlinig ausbreiten. Röntgenstrahlen entstehen, wenn schnelle Elektronen auf einen festen Körper auftreffen und dort schlagartig abgebremst werden (Bremsstrahlung) oder wenn aus einem festen Körper einzelne Elektronen herausgeschlagen werden und diese Lücken von anderen Elektronen wieder gefüllt werden.

2.1.2 Entstehung der Röntgenstrahlung

Auf der Erde entstehen Röntgenstrahlen in geringer Intensität in Folge der Absorption anderer Strahlungsarten, die von radioaktivem Zerfall der Höhenstrahlung (Kosmische Strahlung) stammen. Diese Art von Röntgenstrahlung entsteht also auf natürliche Weise. Röntgenstrahlen, die auf anderen Himmelskörpern entstehen, erreichen die Erdoberfläche nicht, weil sie durch die Atmosphäre abgeschirmt werden. Um sie zu untersuchen, werden Röntgensatelliten wie „Chandra“ und „XMM – Newton“ in eine Umlaufbahn um die Erde geschickt.

Die Röntgenstrahlung, die für medizinische sowie sonstige wissenschaftliche und industrielle Untersuchungen Verwendung findet, wird künstlich durch eine Röntgenröhre erzeugt.

2.1.2.1 Aufbau einer Röntgenröhre

Der schematische Aufbau einer Röntgenröhre ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, besteht eine Röntgenröhre aus einem Behälter, meist aus Glas (manchmal Metall), dessen Innenraum stark luftverdünnt ist (Vakuum). Der Heizdraht (Glühkathode) wird mittels Stromdurchfluss auf ungefähr 2400 K erhitzt. Dadurch emittiert der Heizdraht Elektronen. Durch die Beschleunigungsspannung (U_B) werden die Elektronen von der Kathode zur Anode geführt. Auf dem Weg von der Anode zur Kathode passieren die Elektronen einen Kathodentopf (ein sogenannter Wehnelt-Zylinder, in Abbildung 2.3 nicht dargestellt), wodurch sie zu einem Strahl gebündelt werden. Die Elektronen werden also durch den Wehnelt-Zylinder auf einen Brennfleck fokussiert. Dieser Strahl trifft auf den Anodenteller (Drehanode) und erzeugt durch die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Anodenmaterial (z.B. Wolfram-Rhenium-Legierung) Röntgenstrahlung. Die Drehfrequenz der Anode kann bis zu 10.000 Umdrehungen pro Minute betragen. Aufgrund der Drehung des Anodentellers wird die einige Millisekunden dauernde und bis zu ca. 100 kW starke Leistung besser verteilt, wodurch eine gleichmäßige Beanspruchung und Abnutzung des Anodenmaterials ermöglicht wird. Bei diesem Vorgang laufen an der Anodenoberfläche mehrere Prozesse ab.

Das vorhandene Spektrum der Röntgenstrahlung setzt sich aus einem Linienspektrum und einem kontinuierlichen Bremspektrum zusammen, welche beide in den jeweiligen Unterpunkten genauer erläutert werden.

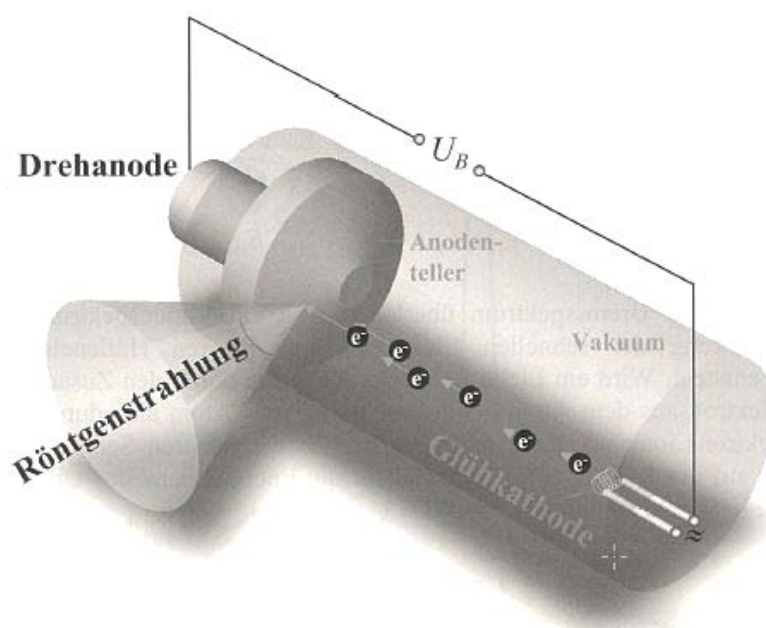


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre [Buzug2004]

Die erzeugte Röntgenstrahlung kann auf zwei unterschiedliche Arten beschrieben werden:

- Als **elektromagnetische Welle**, wobei die Wellenlänge in Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$) oder in nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ \AA}$) angegeben wird.
- Als **Aufeinanderfolge einzelner Röntgenquanten** sogenannter „Blitze“, wobei jedes dieser Röntgenquanten eine bestimmte Energie, gemessen in Elektronenvolt (eV) aufweist. Wenn ein Elektron eine Spannung von 1 Volt durchläuft, besitzt es eine Energie von 1 eV ($1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$).

Die vorhandene Energie eines Röntgenquants hängt von der Geschwindigkeit (v) der einzelnen Elektronen ab, wobei diese wiederum von der Beschleunigungsspannung (U_B) zwischen der Anode und der Kathode abhängt. Die Geschwindigkeit (v) der Elektronen kann mit Formel (2.1) über die Energieerhaltung errechnet werden.

$$e * U_B = \frac{1}{2} * m_e * v^2 \quad (2.1)$$

wobei:

- $e = 1,602 * 10^{-19} \text{ [A * s]}$ oder $[C]$ Elektronenladung
- $U_B =$ Beschleunigungsspannung $[V]$; (Medizin von 25 bis 150 kV, Strahlentherapie von 10 bis 300 kV, Materialprüfung bis 500 kV)
- $m_0 = 9,109 * 10^{-31} \text{ [kg]}$ Elektronenmasse im Ruhezustand
- $m_e = \text{variabel [kg]}$ Elektronenmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- $v =$ Geschwindigkeit $[m/s]$

Bei der Energieumwandlung in Röntgenstrahlung wird mit einer Wolframanode und einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 100 \text{ kV}$ ein Wirkungsgrad von ungefähr 1% erreicht. Aus diesem Grund kommt es an der Anode zu einer sehr hohen thermischen Belastung, was schon vor einigen Jahrzehnten zur Anwendung von Drehanoden führte. Durch die Drehbewegung wird die Anode gleichmäßig belastet (abgenützt) und die entstehende Wärme kann schneller abgegeben werden. Des Weiteren verfügen Computertomographen über eine Kühlung, die ein Überhitzen der Drehanode verhindert.

2.1.2.2 Bremsstrahlung (Bremspektrum)

Diese entsteht durch Abbremsung der Elektronen am Anodenmaterial. Dabei gehen die Elektronen eine Wechselwirkung mit den orbitalen Elektronen und dem Atomkern der Anode ein. Durch das Abbremsen der Elektronen wird Energie in Form einer elektromagnetischen Welle (Photonen), also Röntgenstrahlung, frei. Dieser Vorgang ist auch

in Abbildung 2.6 ersichtlich, in der das Röntgenspektrum einer Molybdänanode bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 30 \text{ kV}$ dargestellt ist. Die Abbildung 2.6 zeigt den Verlauf der Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie den Abbremsvorgang als auch das charakteristische Linienspektrum, welches in Kapitel 2.1.2.3 genauer erläutert wird.

Beim Abbremsvorgang werden oft mehrere Photonen frei, jedoch ist es auch möglich, dass die gesamte freiwerdende Energie eines Elektrons ($e \cdot U_B$) in ein einzelnes Photon umgewandelt wird. Die maximale Energie der Röntgenstrahlung ist durch Formel (2.2) gegeben.

$$E_{max} = e \cdot U_B = h \cdot v_{max} \quad (2.2)$$

wobei:

- E_{max} = maximale Energie der Röntgenstrahlung [J]
- $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [A} \cdot \text{s]}$ Elektronenladung
- U_B = Beschleunigungsspannung [V]; (Medizin von 25 bis 150 kV, Strahlentherapie von 10 bis 300 kV, Materialprüfung bis 500 kV)
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$ Plank'sches Wirkungsquantum
- v_{max} = Geschwindigkeit [m/s]

Die maximale Energie der erzeugten Röntgenstrahlung in keV ist zahlenmäßig gleich der angelegten Röhrenspannung in kV. Diese maximale Energie hängt mit der minimalen Wellenlänge zusammen und ist durch Formel (2.3) gegeben.

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{E_{max}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_B} \quad (2.3)$$

wobei:

- λ_{min} = Wellenlänge [m]
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$ Plank'sches Wirkungsquantum
- $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$; (im Vakuum) Lichtgeschwindigkeit
- $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ [A} \cdot \text{s]}$ Elektronenladung
- U_B = Beschleunigungsspannung [V]; (Medizin von 25 bis 150 kV, Strahlentherapie von 10 bis 300 kV, Materialprüfung bis 500 kV)

Elektronen, die sehr weit an einem Kern des Anodenmaterials vorbeifliegen, verlieren wenig Energie, die sehr dicht an den Kern Herankommenden jedoch sehr viel. Falls die Elektronen dem Atomkern zu nahe kommen, ist es sogar möglich, dass sie ihre gesamte Energie in Form von Bremsstrahlung abgeben. Daher besteht die entstehende Bremsstrahlung aus vielen verschiedenen Energien bzw. Frequenzen.

Das Bremsspektrum ist wegen der Vielfältigkeit des Abbremsprozesses im Anodenmaterial kontinuierlich. Die beschleunigten Elektronen sind ungebunden, wodurch ihre Energie nicht gequantelt ist. Die Energiebilanz wird wie folgt dargestellt:

$$E_{kin}(e^-) (+Atomgitter) \rightarrow (Atomgitter +)E_{kin-hv}(e^-) + h * \nu \quad (2.4)$$

In Abbildung 2.4 ist der schematische Verlauf eines Bremsspektrums dargestellt. Dabei gibt λ_{max} jene Wellenlänge an bei der die vorhandene Strahlung die größte erreichbare Intensität erreicht.

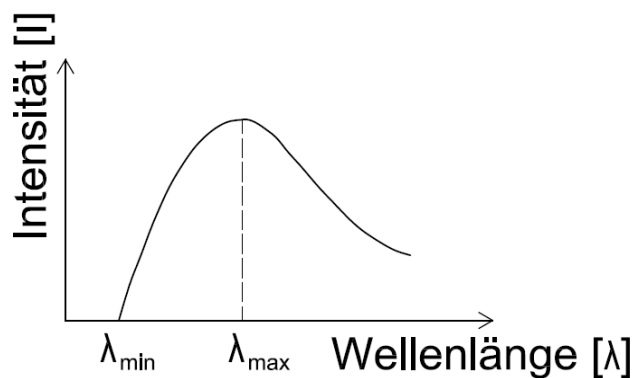


Abbildung 2.4: Schematischer Verlauf eines Bremsspektrums [Steeb1993]

Die Lage des Bremsberges ist unabhängig vom verwendeten Anodenmaterial. Sie hängt nur von der vorhandenen Röhrenspannung ab. Die integrale Intensität unter einem Bremsberg kann mit Formel (2.5) abgeschätzt werden.

$$I \approx i * V^2 * Z \quad (2.5)$$

wobei:

- I = Strahlungsintensität [Röntgenquanten/cm² * s] oder [W/sr]
- i = Röhrenstrom (Stromstärke des Elektronenstromes der von der Anode zur Kathode fließt); [A]
- V = Röhrenspannung [V]
- Z = Ordnungszahl des Anodenmaterials [1]

In Abbildung 2.5 sind die jeweiligen Bremspektren für verschiedene Beschleunigungsspannungen dargestellt. Dabei ist, wie schon erwähnt, die Form des Bremspektrums abhängig von der Röhrensorgung. Die Ordnungszahl des Anodenmaterials ergibt die Höhe des „Berges“. Daher ist die erreichbare Intensität der erzeugten Strahlung direkt vom Material der verwendeten Anode abhängig.

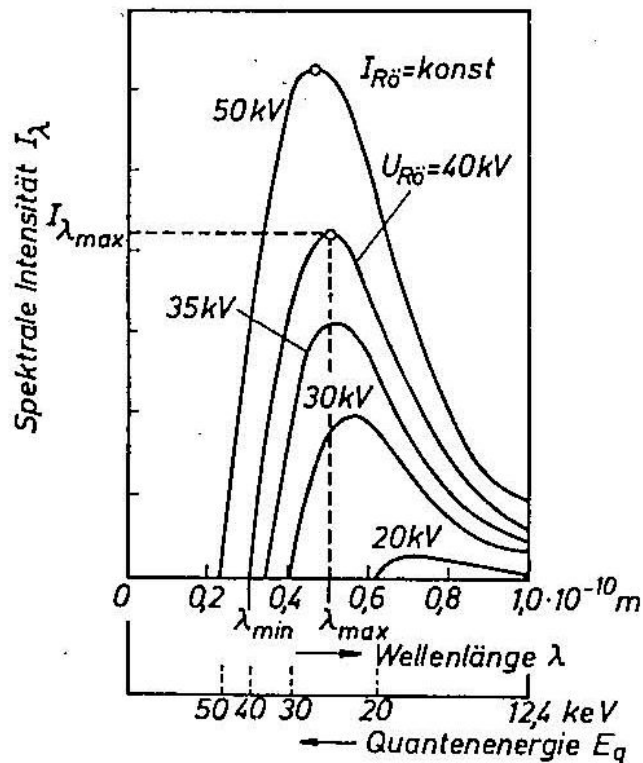


Abbildung 2.5: Unterschiedliche Bremspektren in Abhängigkeit der Röhrensorgung einer Wolframanode [Steeb1993]

2.1.2.3 Charakteristische/Diskrete Strahlung (Linienspektrum)

Die in der Röhre beschleunigten energiereichen Elektronen schlagen weitere Elektronen aus den innersten Schalen der Atome des Anodenmaterials. In diese Lücken „springen“ entweder Elektronen aus höheren Energieniveaus oder „freie“ Elektronen. Da die Bindungsenergie des innersten Elektronenniveaus sehr groß ist, entsteht dabei kein Licht, sondern sogenannte charakteristische (diskrete) Röntgenstrahlung mit einer festen diskreten Energie. Diese Energie entspricht dabei der Differenz aus der Bindungsenergie von z.B. der K-Schale und der energieärmeren N-Schale. Es sind auch alle anderen diskreten Energien möglich, also z.B. die zwischen K- und L-Schale zwischen M- und K-Schale, M- und L-Schale oder, wie bereits erwähnt, auch von „freien“ Elektronen zur K- oder L-Schale. Ein Beispiel für die Energiebilanz des Überganges eines L-Elektrons in die K-Schale ist in Formel (2.6) angeführt.

$$E_K (Atom^+) \rightarrow E_L (Atom^+) + h * \nu_{KL} \quad (2.6)$$

Bei dem eben beschriebenen Vorgang ist jedoch zu beachten, dass die heranfliegenden Elektronen nur Elektronen mit gleicher oder niedrigerer Energie herausschlagen können. Auch ist die Strahlung, die beim Nachfüllen eines Elektrons der inneren Schale erzeugt wird, energiereicher als wenn eine Lücke auf einer der äußeren Schalen gefüllt wird. Es gibt also immer unterschiedliche Strahlung (in der Wellenlänge verschieden), abhängig davon, aus welcher Schale ein Elektron rausflog und aus welcher Schale das nachfüllende kam.

Aufgrund der hohen Energiedifferenz der inneren Schalen sind diese Photonen mit der Wellenlänge λ_{min} Röntgenquanten. Die Wellenlänge kann mittels Formel (2.7) errechnet werden.

$$\lambda_{min} = \frac{h * c}{E_i - E_j} \quad (2.7)$$

wobei:

- λ_{min} = Wellenlänge [m]
- $h = 6,626 * 10^{-34}$ [J * s] Plank'sches Wirkungsquantum
- $c = 2,998 * 10^8$ [m/s] (im Vakuum) Lichtgeschwindigkeit
- E = potentielle Energie der jeweiligen Schalen [J]

Die dadurch entstehenden scharfen Linien sind für jedes Anodenmaterial charakteristisch. Das bedeutet, dass jedes Anodenmaterial ein typisches Spektrum, das sogenannte K-Linienspektrum erzeugt. Es ist möglich anhand der vorhandenen charakteristischen Linien auf das verwendete Material der Anode zu schließen. Diese typischen Spektren werden auch zur Elementaranalyse verschiedener Materialien verwendet. Das Moseley'sche Gesetz, benannt nach *Henry Moseley* gibt die genaue Lage des K-Linienspektrums an. In der allgemeinen Form des Moseley'schen Gesetzes können alle Wellenlängen der vorhandenen Linien des Röntgenspektrums ermittelt werden. Anhand der Formel (2.8) ist es möglich die genaue Lage der K_α -Linie zu berechnen. Diese K_α -Linie entspricht der Strahlung im Röntgenspektrum mit der höchsten Wellenlänge bzw. der höchsten Frequenz. Dabei bezeichnet der Großbuchstabe (K, L, M etc.) die Schale in die das entsprechende Elektron springt und der griechische Buchstabe (α, β etc.) gibt an um wie viele Schalen das jeweilige Elektron gesprungen ist.

$$\lambda = \frac{h * c}{E_n - E_1} = \frac{h * c}{13,6 \text{ [eV]} * (Z - 1)^2 * (1 - \frac{1}{n^2})} \quad (2.8)$$

wobei:

- λ = Wellenlänge [m]
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J * s] Plank'sches Wirkungsquantum
- $c = 2,998 \cdot 10^8$ [m/s] Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- E = potentielle Energie der jeweiligen Schalen [J]
- Z = Kernladungs- bzw. Ordnungszahl des Anodenmaterials [1]
- n = Hauptquantenzahl des auf die K-Schale fallenden Elektrons [1]

Diese diskrete (charakteristische) Röntgenstrahlung mit jeweils festen Energien und damit verbundenen Frequenzen wird jedoch, mit Ausnahme bei der Mammographie (Röntgenuntersuchung der weiblichen Brustdrüsen), nur zum kleinen Teil für die Bilderzeugung genutzt. Von dieser Ausnahme abgesehen, wird für die Bilderzeugung in der Röntgendiagnostik und der industriellen Computertomographie ausschließlich die Röntgenbremsstrahlung verwendet.

In Abbildung 2.6 ist, wie schon im Kapitel 2.1.2.2 erwähnt, das Röntgenspektrum einer Molybdänanode mit der dazugehörigen Bremsstrahlung und dem charakteristischen Linienspektrum dargestellt.

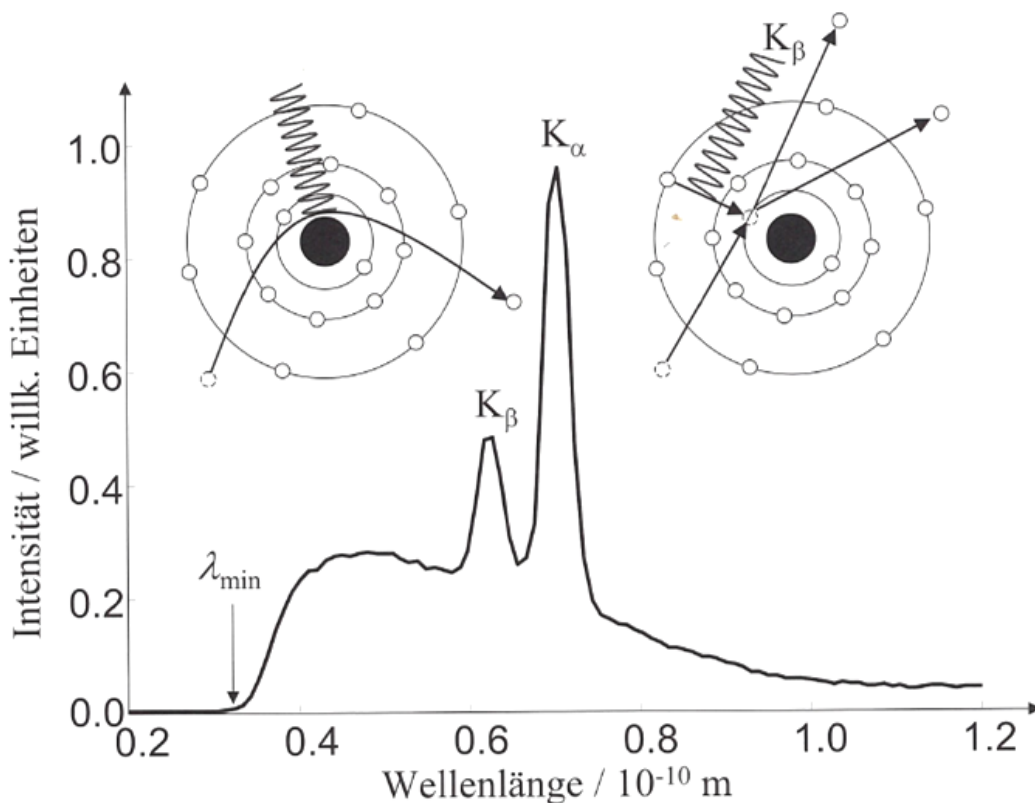


Abbildung 2.6: Darstellung der Bremsstrahlung sowie des charakteristischen Linienspektrums einer Molybdänanode bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 30$ kV. [Buzug2004]

2.1.3 Wechselwirkung mit Materie

Die Röntgenstrahlung unterliegt beim Durchstrahlen von Materie einigen Wechselwirkungen. Wie stark diese Wechselwirkungen zum Tragen kommen ist sehr unterschiedlich und hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Strahlungsintensität
- Strahlungswinkel
- Wellenlänge der Strahlung
- Ordnungszahl der durchstrahlten Materie
- Dichte der durchstrahlten Materie
- Schichtdicke der durchstrahlten Materie
- Schichtaufbau

In Abbildung 2.7 ist der Strahlungsdurchgang bei einer einfachen Materialschicht dargestellt.

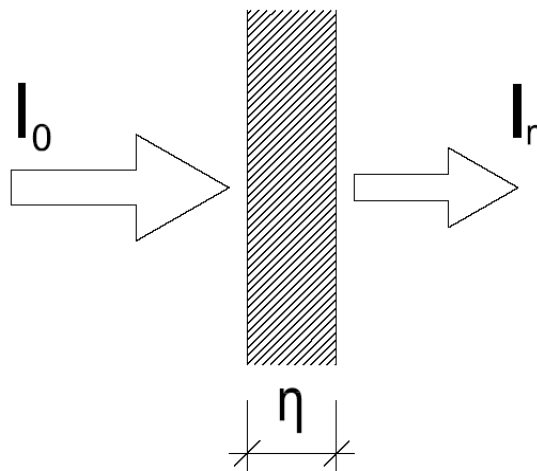


Abbildung 2.7: Strahlungsdurchgang durch eine homogene Materialschicht aus [Steeb1993]

Der grundlegende Zusammenhang bei der Abschwächung der Strahlungsintensität ist in Formel (2.9) ersichtlich. Diese Formel erhält man nach einigen Umformungen unter Voraussetzung eines homogenen Materials. Auf die genaue Ableitung wird hier nicht weiter eingegangen. Bei weiterem Interesse der mathematischen Hintergründe wird auf die verwendete und am Anfang dieses Kapitels erwähnte Literatur verwiesen.

$$I_{\eta} = I_0 * e^{-\mu * \eta} \quad (2.9)$$

wobei:

- I_η = Intensität des Strahlungsdurchganges [W/sr]
- I_0 =gerichtete Strahlungsintensität [W/sr]
- e =Basis des natürlichen Logarithmus (2,71828); [1]
- μ =Schwächungskoeffizient [$1/m$]
- η =Schichtdicke [m]

Das mathematische Problem bei der Rekonstruktion der vorhandenen Information zu einem dreidimensionalen Bild ist nicht so einfach zu lösen wie Formel (2.9) vermuten lässt. Vor allem die Tatsache, dass der Schwächungskoeffizient bei einigen Materialien und Strukturen aufgrund von Inhomogenitäten räumlich nicht konstant verteilt ist, macht die Sache erheblich schwieriger. Die Grundlagen bei der Bildrekonstruktion und der Signalverarbeitung werden in Kapitel 2.1.5 etwas genauer erläutert.

Die räumliche Variation des Schwächungskoeffizienten (μ) ist stark vom zu durchdringenden Material abhängig. Aus diesem Grund wird der Schwächungskoeffizient auch oft in Verbindung mit der Dichte als Massenschwächungskoeffizient (μ/ρ) dargestellt. Um die einzelnen Komponenten genauer zu erklären wird auf Formel (2.10) zurückgegriffen.

$$\mu = \mu_s + \alpha \quad (2.10)$$

wobei:

- μ = Schwächungskoeffizient
- μ_s = Streukoeffizient
- α = Absorptionskoeffizient

Diese Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten vom Material bedeutet, dass die bei der Herleitung der Formel (2.9) verwendete Differentialgleichung nicht vollständig integriert werden kann. Somit müssen die unbekannt Schwächungskoeffizienten beim Durchlaufen einer beliebigen Strecke (x) entlang eines Röntgenstrahls im Exponenten aufsummiert (aufintegriert) werden, wie in Formel (2.11) ersichtlich ist.

$$I(x) = I(0) * e^{-\int_0^x \mu(\eta) d\eta} \quad (2.11)$$

Beim Durchlaufen der Röntgenstrahlung von mehreren Schichten, lassen sich die jeweiligen Schichten mit ihren dazugehörigen Schwächungskoeffizienten in ein Verhältnis zueinander setzen. Es kann auch Formel (2.12) verwendet werden, welche die einzelnen Schichten aufsummiert und somit auf dasselbe Ergebnis führt.

$$I_m = I_0 * e^{-\sum_{i=1}^m \mu_i * \Delta \eta} \quad (2.12)$$

In Abbildung 2.8 sind alle wesentlichen Schwächungseffekte der Strahlungsintensität, die beim Durchstrahlen von Materie auftreten können, dargestellt. Eine grobe Einteilung dieser Effekte ist auch in Formel (2.10) ersichtlich. Hier wird der Schwächungskoeffizient in Streuungs- und Absorptionskoeffizient unterteilt, wobei diese Unterteilung eine sinnvolle Vereinfachung und Zusammenfassung der vorhandenen Wechselwirkungen der Röntgenstrahlung mit der Materie und der einzelnen Effekte untereinander darstellt.

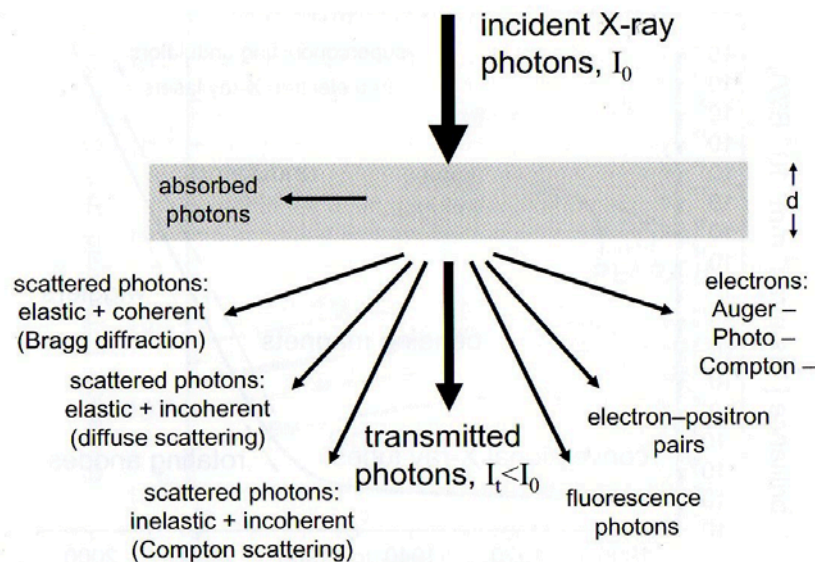


Abbildung 2.8: Zusammenfassung der Schwächungseffekte [Banhart2008]

Jeder Prozess, der die Richtung der aufgebrauchten Röntgenstrahlung ändert oder zu einer Absorption führt, bewirkt eine Abschwächung der Strahlungsintensität und somit auch zu einer Änderungen in der Bildrekonstruktion und des Endergebnisses.

2.1.3.1 STREUUNG

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, welche ein oszillierendes elektromagnetisches Feld erzeugen. Sobald Röntgenstrahlen mit Materie oder anderen Feldern interagieren, kommt es zu einer Beeinflussung der Strahlungsrichtung und somit zu einer Änderung der gerichteten Strahlungsintensität.

Da man Röntgenstrahlung auf zwei verschiedene Arten erklären kann, nämlich als Welle oder als Aufeinanderfolge von einzelnen Röntgenquanten (Photonen), gibt es auch für den Streuvorgang zwei unterschiedliche Begriffe. Bei Wellen spricht man von Brechung und bei Photonen von Streuung. In der Literatur finden beide Begriffe Verwendung, daher seien sie an dieser Stelle nur kurz aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt. In den darauffolgenden Erklärungen der einzelnen Phänomene wird jedoch auf den Begriff der Streuung Bezug genommen.

Es macht einen erheblichen Unterschied, ob man die Streuung eines Photons an einem einzelnen Ziel (Atom) oder an einer Ansammlung von Zielen (Materie) betrachtet. In der industriellen Computertomographie ist die erste der beiden Möglichkeiten nur von untergeordneter Bedeutung, da es sich bei der Analyse von Materialien immer um eine Ansammlung von mehreren Zielen handelt.

Des Weiteren wird unterschieden, ob die Streuung kohärent, inkohärent, elastisch oder unelastisch ist.

Kohärente Streuung ist immer dann gegeben, wenn die Streuung zu Interferenzen zwischen den einzelnen Streuungsereignissen führt. Eine weitere Voraussetzung ist, dass die vorhandene Phase der gestreuten Welle erhalten bleibt, dies ist zum Beispiel der Fall bei der Rayleigh-, jedoch nicht bei der Compton-Streuung. Die Stärke der Streuung ist in den einzelnen Richtungen unterschiedlich und hängt vom Wellenvektor, also von der vorhandenen Energie und der Wellenlänge ab.

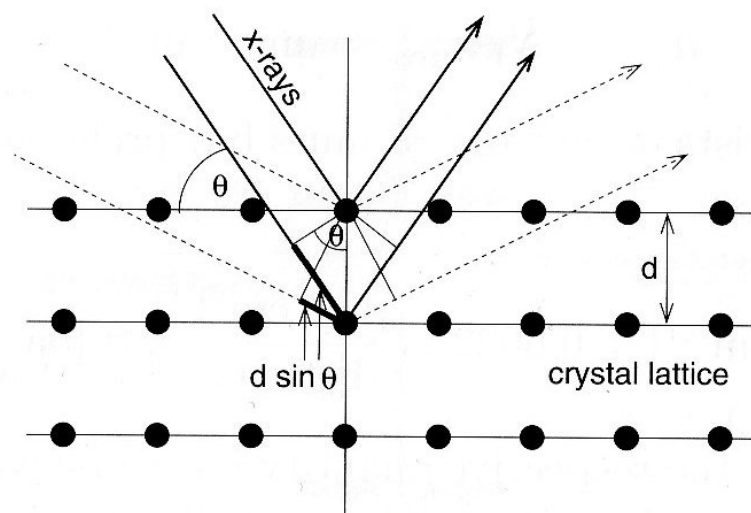


Abbildung 2.9: Brechung einer Welle am atomaren Kristallgitter (Bragg-Reflexion) [Banhart2008]

Einige Materialien weisen eine kristalline Struktur auf. Das bedeutet, dass die einzelnen Atome auf den Kristallgittern identische Abstände aufweisen. Das Phänomen der Streuung an solchen Kristallgittern wird durch das Gesetz von *Bragg* beschrieben und ist in Formel (2.13) ersichtlich. Die einzelnen Komponenten der Gleichung von *Bragg* sind auch anhand der Abbildung 2.9 ersichtlich.

$$2 * d * \sin(\theta) = n * \lambda \quad (2.13)$$

wobei:

- d = Kristallgitter- oder Netzaabstand [m]
- θ = Einfallswinkel der Strahlung (Streuwinkel) oder auch Glanzwinkel [$^\circ$]
- n = natürliche Zahl [1]
- λ = Wellenlänge der Röntgenstrahlung [m]

Inkohärente Streuung ist im Gegensatz dazu dann gegeben, wenn die einzelnen Streuungsereignisse sich gegenseitig nicht beeinflussen. In diesem Fall ist die gesamte Streuung nur die Summe der individuellen Streuungsereignisse. Die Ursachen für inkohärente Streuung sind vielfältig. So können zu große Abstände zwischen den einzelnen Atomen dazu führen. Aber auch mechanische, thermische, chemische oder nukleare Einflüsse können eine Rolle spielen.

Immer wenn ein Strahlenteilchen durch die Probe wandert, wird es öfter als einmal gestreut. Dieser Vorgang wird auch *multiple Streuung* genannt. In der praktischen Anwendung zeigt sich, dass es sich meist um eine Mischung aus kohärenter und inkohärenter Streuung handelt. Aus diesem Grund ist es, bei der Detektion der einzelnen Strahlungsteilchen und der daraus resultierenden Bildrekonstruktion auch schwierig zu unterscheiden, ob die Strahlungsintensität ein Resultat der Streuung oder der Absorption durch ein dichteres Material ist. Dieser Aspekt spielt bei der industriellen Computertomographie eine große Rolle.

ELASTISCHE STREUUNG (Rayleigh-Streuung)

Immer wenn elektromagnetische Wellen mit einem Elektron in einem Probekörper zusammen treffen, interagieren sie hauptsächlich durch ihr oszillierendes elektromagnetisches Feld. Egal ob ein Elektron schwach an ein Atom gebunden oder ungebunden (frei) ist, kann es bei einem Photon eine elastische Streuung bewirken. Dieser Effekt wird auch Rayleigh- oder Thomson-Streuung genannt.

Dabei wird bei kleinem, also vernachlässigbarem Impuls des Photons nur die Richtung des Wellenvektors jedoch nicht die Wellenlänge der gestreuten Strahlung, wie in Abbildung 2.10 zu sehen ist, verändert. Die Rayleigh-Streuung tritt auf, solange der Durchmesser der Streuteilchen klein gegenüber der Wellenlänge der vorhandenen Strahlung ist, was bedeutet, dass die Energie des eingestrahnten Photons zu klein ist um das Atom anzuregen.

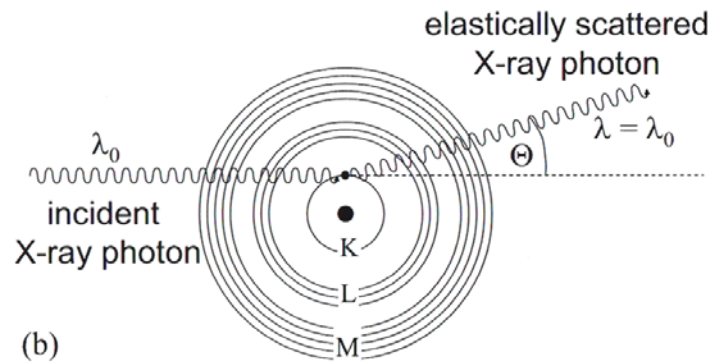


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Rayleigh-Streuung [Banhart2008]

Bei der Rayleigh-Streuung an einem freien Elektron hängt der Wirkungsquerschnitt (cross-section) nicht von der Photonenenergie ab und entspricht: $\sigma_T = 0,665 \text{ barn}$ nach [Jackson1975]. Der Wirkungsquerschnitt σ gibt an mit welcher Wahrscheinlichkeit es zwischen zwei Teilchen zu einer Wechselwirkung kommt. Dabei entsprechen ein großer Wechselquerschnitt einer großen Wahrscheinlichkeit, dass ein gewisser Prozess (Streuung etc.) eintritt und ein kleiner Wechselquerschnitt einer kleinen Wahrscheinlichkeit. Bildlich gesehen kann der Wechselquerschnitt auch als Zielscheibe (Teilchen) erläutert werden auf die ein einfallendes Teilchen auftrifft oder auch nicht. Daher hat der Wirkungsquerschnitt auch die Dimension einer Fläche, wobei in der Teilchenphysik die Einheit *barn* verwendet wird.

Für atomar gebundene Elektronen ist die auftretende elastische Streuung bei kleinen Streuwinkeln ungefähr proportional zu dem Quadrat der jeweiligen Ordnungszahl (Z) und wächst mit steigender Photonenenergie an, wie in dem Verhältnis (2.14) dargestellt ist [Jackson1981].

$$\sigma_{el}(Z) \propto Z^2 \quad (2.14)$$

wobei:

- σ_{el} = Wirkungsquerschnitt für die Rayleigh-Streuung [*barn*]
- Z = Kernladungs- bzw. Ordnungszahl des bestrahlten Materials [1]

Dadurch wird bei dichteren Materialien, also Materialien mit höherer Ordnungszahl (Kernladungszahl), die einfallende Strahlung erheblich mehr gestreut als bei Materialien mit kleinerer Ordnungszahl. Für die Anwendung der Computertomographie bedeutet das, dass bei dichteren Materialien wie z.B. Beton oder Stahl mit viel höheren Strahlungsintensitäten gearbeitet werden muss als bei weniger dichten Materialien wie z.B. Aluminium, Holz oder auch menschliches Gewebe. Vorausgesetzt wird natürlich, dass es sich um eine vergleichbare Probengeometrie und somit auch um dieselbe Durchstrahlungslänge handelt. Dies erklärt auch, warum einige industrielle Computer-

tomographen (bis ca. 500 kV) mit leistungsstärkeren Röntgenröhren ausgestattet sind als ein medizinischer CT (bis ca. 200 kV).

Sobald diese Art von Streuung (Rayleigh-Streuung) auf ein geordnetes Feld von Streuzentren trifft, kommt der Bragg-Effekt (siehe Abbildung 2.9) zum Tragen und man spricht von einer kohärenten elastischen Streuung.

UNELASTISCHE STREUUNG (Compton-Streuung)

Sobald ein Röntgenquant über einen nicht mehr vernachlässigbaren Impuls verfügt, tritt die Compton-Streuung (Compton-Effekt) ein. Dieser Effekt wurde 1922 von *Arthur Compton* beobachtet. Dabei trifft das Photon auf ein freies oder quasifreies Elektron (z.B. ein schwach gebundenes Valenzelektron) aus dem Probekörper zusammen, wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist.

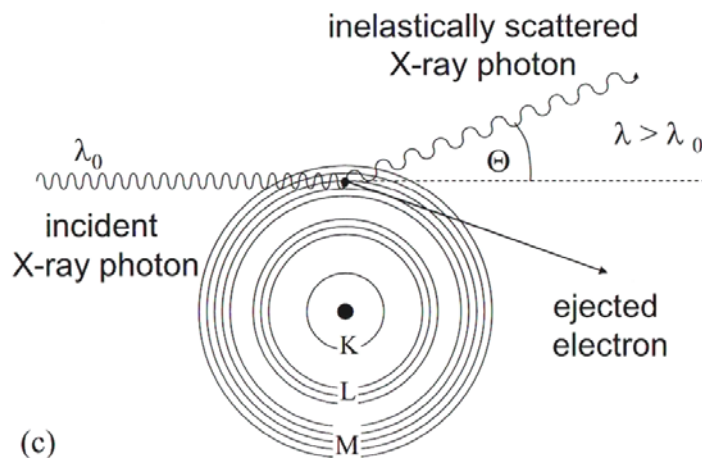


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der Compton-Streuung [Banhart2008]

Bei diesem Vorgang wird nicht nur die Richtung verändert, sondern auch die vor der Streuung vorhandene Wellenlänge der gestreuten Strahlung vergrößert. Das bedeutet, dass bei der Compton-Streuung die Energie des Röntgenquants, im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung, nicht vollständig erhalten bleibt, jedoch nicht wie beim Photo-Effekt seine ganze sondern nur einen Teil seiner Energie abgibt. Da die Intensität der Strahlung, also die vorhandene Energie, abnimmt und auf dem weiteren Weg durch die Materie das gestreute Photon aufgrund der verringerten Energie durch den Photo-Effekt absorbiert werden kann, wird die Compton-Streuung in der Literatur auch manchmal den Effekten der Absorption zugeordnet.

Die geringere Energie des gestreuten Photons lässt sich mit Formel (2.15), unter Berücksichtigung des Streuwinkels (θ), anhand der Wellenlängenänderung bestimmen. Oder bei bekannter Energie lässt sich anhand des Streuwinkels (θ) die Wellenlängenänderung bestimmen. Formel (2.15) zeigt auch, dass die auftretende Wellenlängenänderung des Photons nur vom vorhandenen Streuwinkels (θ) abhängt.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 * c} * (1 - \cos(\theta)) \quad (2.15)$$

wobei:

- $\Delta\lambda$ = Wellenlängenänderung [m]
- $h = 6,626 * 10^{-34}$ [J * s] Plank'sches Wirkungsquantum
- $m_0 = 9,109 * 10^{-31}$ [kg] Elektronenmasse im Ruhezustand
- $c = 2,998 * 10^8$ [m/s] Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- θ = Einfallswinkel der Strahlung (Streuwinkel) oder auch Glanzwinkel [°]

Der Vorgang ist aus der Sicht des gestreuten Photons unelastisch. Außerdem wird das Elektron, falls es vor dem Aufprall gebunden war, aus seiner jeweiligen Bahn herausgeschlagen. Der Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts wächst mit der Anzahl der vorhandenen Elektronen, also mit der Ordnungszahl des bestrahlten Elements, an und ist durch nachstehende Formel gegeben.

$$\sigma_{Compt}(Z, E) = Z * \sigma_{KN}(E) \quad (2.16)$$

wobei:

- σ_{Compt} = Wirkungsquerschnitt für den Compton-Effekt
- Z = Kernladungs- bzw. Ordnungszahl des bestrahlten Materials [1]
- σ_{KN} = Wirkungsquerschnitt eines einzelnen freien Elektrons in der Klein-Nishina-Darstellung
- E = Photonenenergie der Strahlung ($h\nu$)

In Formel (2.16) wird die Klein-Nishina-Darstellung ($\sigma_{KN}(E)$) verwendet um den Zusammenhang zwischen dem Streuquerschnitt, der Ordnungszahl des Probenmaterials und dem Wirkungsquerschnitt eines einzelnen freien Elektrons wiederzugeben. Auf die Darstellung und Erläuterung der Klein-Nishina-Formel wird in dieser Arbeit verzichtet und auf die verwendete Basisliteratur verwiesen.

2.1.3.2 ABSORPTION

Da die Paarbildung erst bei sehr hohen Energien auftritt, ist für die industrielle CT der wesentlichste Absorptionseffekt der Photo-Effekt. Des Weiteren bedeutet das nicht, dass der Compton-Effekt zu vernachlässigen sei, jedoch wird er in der Literatur entweder den Streuungs- oder den Absorptions-Prozessen zugeordnet, da dabei auch die

Strahlungsenergie der Photonen verringert wird. Daher wird zwar in diesem Kapitel der Compton-Effekt den beiden anderen Prozessen gegenübergestellt, wie in den Abbildungen 2.13 bis 2.15 ersichtlich ist, jedoch ist die genauere Erklärung im Kapitel 2.1.3.1 nachzulesen.

In Abbildung 2.12 ist eine schematische Zusammenfassung der die Absorption von Röntgenstrahlung beeinflussenden Faktoren dargestellt.

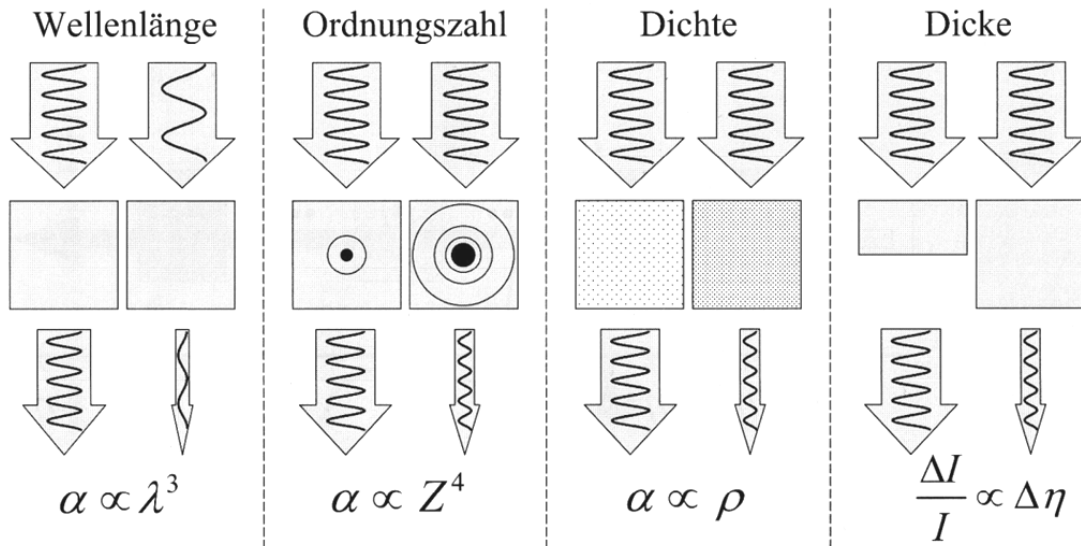


Abbildung 2.12: Zusammenfassung der Einflüsse auf das Absorptionsverhalten [Buzug2004]

Dabei ist gut erkennbar, dass die vorhandene Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung und die Höhe der Ordnungszahl Z des durchstrahlten Materials einen sehr großen Einfluss auf die Verringerung der Strahlungsintensität haben (3. bzw. 4. Potenz). Im Vergleich dazu wirken sich die Dichte und die Dicke der durchstrahlten Probe direkt proportional auf die Verringerung der Strahlungsintensität aus.

Photoeffekt

Dieser Prozess wird auch Photoelektrischer-Effekt genannt. Er wurde von *Alexander Edmond Becquerel* erstmals 1839 beobachtet und 1905 von *Albert Einstein* vollständig erklärt, wofür er 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt. Einsteins Arbeit bezieht sich dabei nicht auf die Wellen- sondern auf die Teilcheneigenschaften der Strahlung. Der Wellen-Teilchen-Dualismus legte somit den Grundstein für die heutige Quantenmechanik.

Beim Photoeffekt ist die vorhandene Energie ($h \cdot \nu$) des Röntgenquants geringer als beim Compton-Effekt, wodurch die gesamte Energie durch ein Atom in der Probe absorbiert werden kann. Der Vorgang ist in Abbildung 2.13 ersichtlich und tritt auch oft auf, nachdem ein Röntgenquant durch die Compton-Streuung geschwächt wurde. Dabei wird ein Elektron der unteren Schale des Atoms herausgeschlagen und erhält die volle Energie des Röntgenquants, abzüglich der Bindungsenergie im Atom. Somit wird das Atom ionisiert, wobei die Bilanz des Photo-Effekts lautet:

$$h * \nu (+Atom) \rightarrow E_{ion} (Atom^+) + E_{kin}(e^-) \quad (2.17)$$

Falls die Strahlungsenergie des Rekombinationsprozesses für das laut Formel (2.17) entstehende Loch ausreicht um ein weiteres Elektron aus dem Atomverband herauszuschlagen, wird jenes neue freie Elektron Auger-Elektron genannt, welches monoenergetisch ist. Dieser sogenannte Auger-Effekt (oder auch Auger-Meitner-Effekt) wird auch als innerer Photoeffekt bezeichnet, da die zuerst freiwerdende Energie nicht durch Emission eines Photons abgestrahlt wird (Photoeffekt), sondern vollständig auf ein anderes Elektron (somit Auger-Elektron) übertragen wird. Dieser Prozess wurde 1923 von *Pierre Auger* und bereits 1922 von *Lise Meitner* beschrieben.

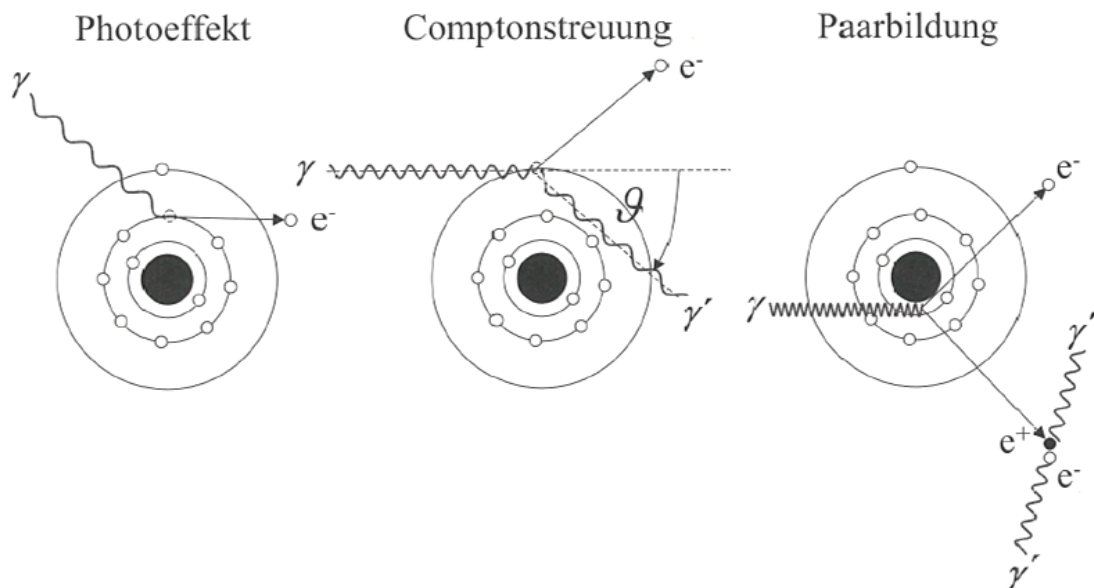


Abbildung 2.13: Gegenüberstellung der Absorptionsmechanismen [Buzug2004]

Der Wirkungsquerschnitt für den Photo-Effekt (Photoionisation) hängt von der Ordnungszahl des Probenmaterials und der Photonenenergie der verwendeten Strahlung ab. Folgende Formel gibt diesen Zusammenhang wieder und wird auch als *Bragg-Pierce-Gesetz* bezeichnet.

$$\sigma_{pe}(Z, E) \propto Z^5 * E^{-3,5} \quad (2.18)$$

wobei:

- σ_{pe} = Wirkungsquerschnitt für den Photo-Effekt [barn]
- Z = Kernladungs- bzw. Ordnungszahl des bestrahlten Materials [1]
- E = Photonenenergie der Strahlung ($h\nu$) [J]

Auch andere Formulierungen, die teilweise leichte Abweichungen von Formel (2.18) ergeben, sind in der Literatur zu finden. Außerdem ist es auch nicht möglich, den Wirkungsquerschnitt (σ_{pe}) über den gesamten Wertebereich exakt zu quantifizieren. Vielmehr wird dieses Problem numerisch gelöst und gibt nur exakte Lösungen in der näheren Umgebung der jeweiligen Energiebereiche wieder.

Aus Formel (2.18) ist sehr gut ersichtlich, wie stark der Photo-Effekt vom verwendeten Material abhängt, da die Ordnungszahl mit der 5. Potenz eingeht, wodurch Blei ($Z=82$) um ein vielfaches mehr Röntgenstrahlung absorbiert als z.B. Aluminium ($Z=13$). Des Weiteren zeigt sich, dass mit steigender Photonenenergie der Wirkungsquerschnitt wegen der negativen Potenz abnimmt. Dies ist auch in Abbildung 2.15 gut zu sehen. Dies gilt aber nur, solange die Zahl der Elektronen des Atoms, die zur Ionisierung zur Verfügung stehen, konstant ist. Denn sobald die Photonenenergie so weit steigt, dass sie die Bindungsenergie der jeweils nächsten fest gebundenen Elektronenschale erreicht, springt der Wirkungsquerschnitt auf ein entsprechend höheres Niveau, von dem er bei weiterer Steigerung der Photonenenergie wieder abfällt. Aus diesem Grund ergeben sich auch die markanten Strukturen, wie in Abbildung 2.14 ersichtlich ist, die sogenannten Absorptionskanten.

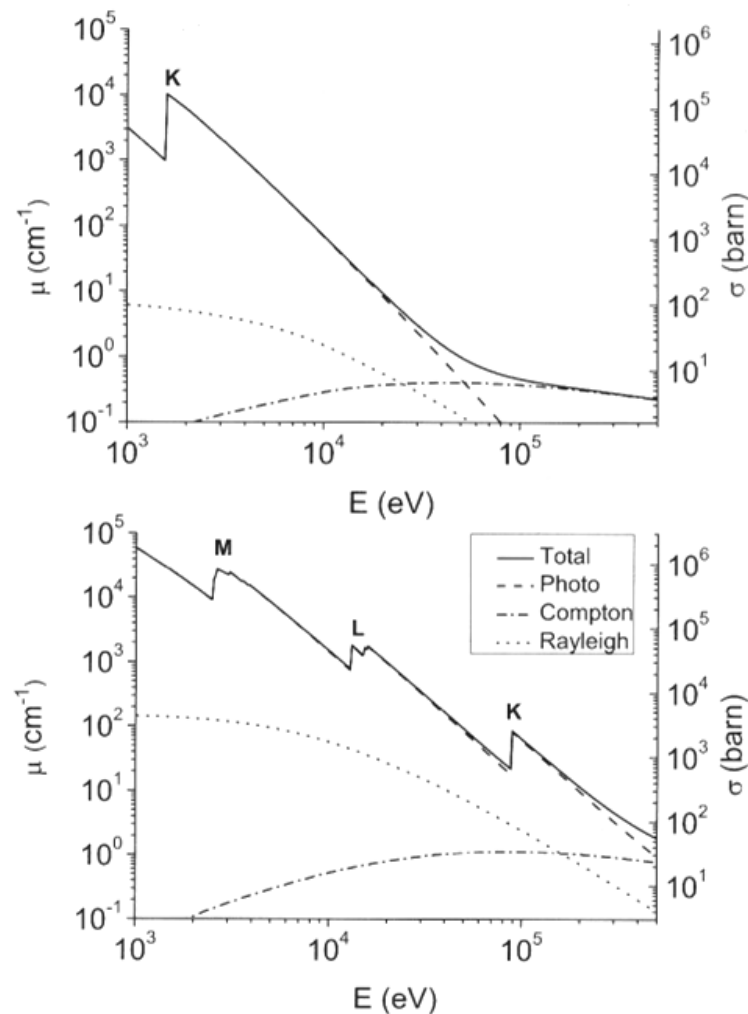


Abbildung 2.14: Darstellung der einzelnen Schwächungseffekte für Blei und Aluminium [Banhart2008]

Paarbildung

Darunter versteht man die Bildung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares (Elektron-Positron-Paar) aus einem energiereichen Röntgenquant (Photon). Dabei muss die Energie des Photons mindestens so groß sein, wie die Ruhemasse der beiden erzeugten Teilchen und ihrer dazugehörigen kinetischen Energie. Dies ist der Fall, wenn die Photonenenergie ($h * \nu$) den Wert von $1,0022 \text{ MeV}$ übersteigt, was in Abbildung 2.15 zu sehen ist.

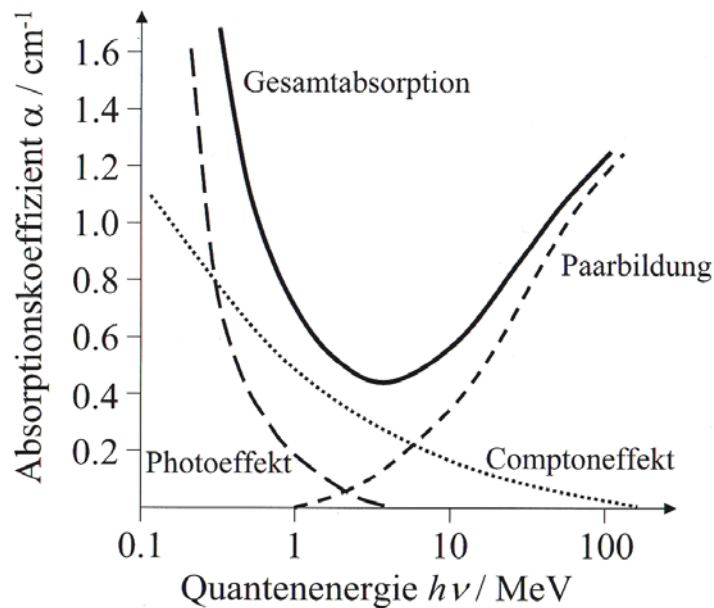


Abbildung 2.15: Gegenüberstellung der einzelnen Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit der jeweiligen Quantenenergien der verwendeten Strahlung für Blei [Buzug2004]

Die Energiebilanz der Paarbildung lautet:

$$E_{ph} = h * \nu \rightarrow e^- + e^+ + 2 * E_{kin} \quad (2.19)$$

wobei:

- E_{ph} = Energie des Photons [J]
- $h = 6,626 * 10^{-34} \text{ [J * s]}$ Plank'sches Wirkungsquantum
- ν = Geschwindigkeit [m/s]
- $e^- + e^+$ = Elektron-Positron-Paar
- E_{kin} = kinetische Energie des erzeugten Elektron-Positron-Paares [J]

Und die Einsteinsche Masse-Energie-Bilanz ist, wie in Formel (2.20) ersichtlich, erfüllt. Dabei wurde von der Energie-Masse-Äquivalenz ($E = m * c^2$), die einen Teil der Spe-

ziellen Relativitätstheorie darstellt und von *Albert Einstein* im Jahre 1905 in den „*Annalen der Physik*“ veröffentlicht wurde, Gebrauch gemacht.

$$E_{Ph} = h * v = 2 * m * c^2 + 2 * E_{kin} = 2 * E + 2 * E_{kin} \quad (2.20)$$

wobei:

- E_{Ph} = Energie des Photons [J]
- $h = 6,626 * 10^{-34}$ [J * s] Plank'sches Wirkungsquantum
- m = Elektronenmasse [kg]
- $c = 2,998 * 10^8$ [m/s] Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- v = Geschwindigkeit [m/s]
- $e^- + e^+$ = Elektron-Positron-Paar
- E = Energie des Elektron-Positron-Paares
- E_{kin} = kinetische Energie des erzeugten Elektron-Positron-Paares [J]

Nach der Paarbildung kann das Elektron im weiteren Verlauf, je nachdem mit welcher Strahlung es zusammenstößt, abermals eine elastische oder unelastische Streuung hervorrufen. Das Positron hingegen wird, sobald es auf ein Elektron trifft, unter Aussendung zweier Gammaquanten vollständig in Energie zerstrahlt. Dieser Vorgang läuft nach Formel (2.21) ab und ist in Abbildung 2.13 (rechtes Bild) ersichtlich.

$$e^- + e^+ \rightarrow 2 * h * v \quad (2.21)$$

Die Paarbildung stellt im strengen Sinne keine Ionisation dar. Jedoch ist sie (praktisch gesehen) damit gleichzusetzen, da bei dem Vorgang elektrische Ladungen frei werden. Außerdem können diese freigesetzten Elektronen ihrerseits wieder ionisieren.

2.1.3.3 Aufhärtung der Strahlung

Zu weiche Röntgenstrahlung (Strahlung mit großer Wellenlänge) dringt nicht tief genug in das Probenmaterial ein, wird daher völlig absorbiert und gelangt nicht oder nur teilweise zum Detektor. Im Gegensatz dazu wird zu harte Strahlung von der Probe nicht ausreichend absorbiert, wodurch sich bei der Bildrekonstruktion zu schwache Kontrastunterschiede ergeben und somit ebenfalls, wie bei zu weicher Strahlung, unzureichende Messungsergebnisse ergeben. In Abbildung 2.16 ist die Aufhärtung der

Röntgenstrahlung durch geeignete Vorfilter (meistens Kupfer und/oder Aluminium) dargestellt.

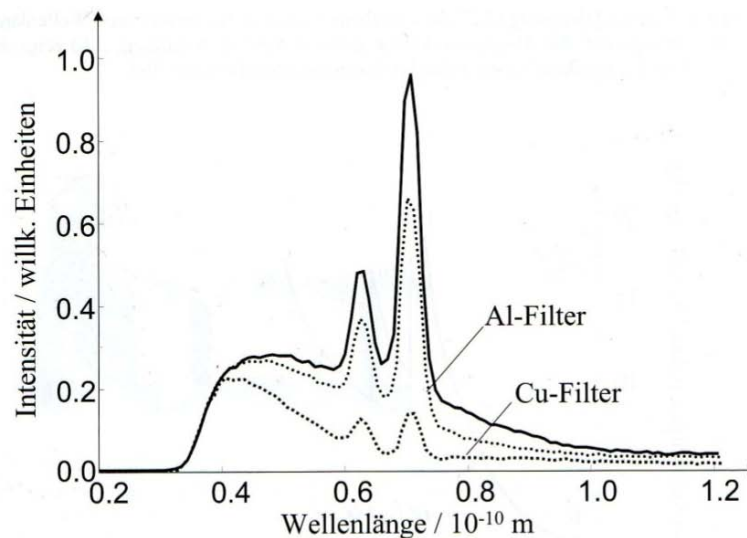


Abbildung 2.16: Aufhärtung der Strahlung mittels Kupfer- und Aluminiumfilter [Buzug2004]

Die unterschiedlichen Bereiche der Strahlung (Wellenlänge, Intensität) werden von dem zu durchstrahlenden Probenmaterial auch unterschiedlich stark absorbiert. Dieser Effekt ist auf jeden Fall zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass die „weichen“ Strahlen beim Auftreffen auf die Probe anfänglich überproportional absorbiert werden, wodurch die Probe in diesem Bereich dichter erscheint als es wirklich der Fall ist. Aus diesem Grund gibt es auch eigens dafür entwickelte Algorithmen, die eine Strahlen-Aufhärtungs-Korrektur vornehmen können.

2.1.3.4 Biologische Wirkung

Als die Röntgenstrahlung 1895 entdeckt wurde, war die schädigende Wirkung, die bei einer Überdosierung auftreten kann noch nicht bekannt. Daher wurde auch ohne jegliche Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen mit der neu entdeckten Strahlung experimentiert. Sogar Schuhgeschäfte verfügten als Attraktion über Röntgengeräte, um den Kunden vorzuführen, wie ihre Füße in die Schuhe passten.

Doch schon bald erkrankten erste Wissenschaftler an den Auswirkungen einer Strahlenüberdosis. Die Verletzungen reichten von Hautverletzungen wie Rötungen und Verbrennungen bis hin zu Wucherungen, Tumoren und Leukämie.

Daher entwickelte sich die Strahlenbiologie, welche sich mit der Wirkung energiereicher Strahlung auf Lebewesen beschäftigt. Die Geschichte der Strahlenbiologie ist also annähernd so alt wie die Entdeckung der Röntgenstrahlung. In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, wurden viele Arbeiten zur Erforschung der Auswirkungen energiereicher Strahlung auf die Erbmasse erstellt. Die weiteren Erkenntnisse sind somit eng mit dem Forschungsbereich der Genetik verknüpft. Abbildung 2.17 gibt einen Überblick über die Wirkungskette bei der Entstehung von strahlungsbedingten Mutationen.

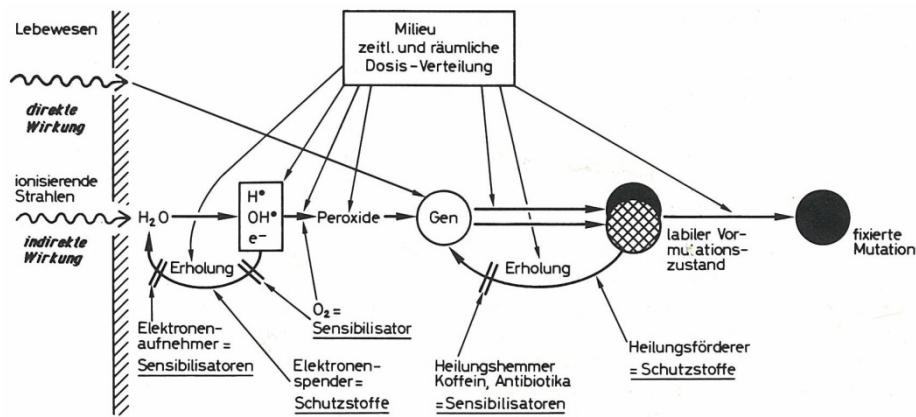


Abbildung 2.17: Strahlenbiologische Wirkungskette. Direkte und indirekte Wirkung auf ein Gen und die Möglichkeiten der Beeinflussung des Weges zur endgültigen Fixierung des Schadens. [Heuck1995]

Bei der Bestrahlung von Zellen gibt es eine Vielzahl von Reaktionsmöglichkeiten. Abgesehen von Ausnahmen (Lymphozyten), werden vor allem sehr lebhaftes Zellen (Vermehrung und Teilungsfähigkeit) von der Strahlung stark beeinflusst. Diese Gesetzmäßigkeit wird auch als *Bergonié-Tribondeausche-Gesetz* bezeichnet. Folgende Auswirkungen auf eine bestrahlte Zelle können auftreten, wobei die Reaktionen miteinander verknüpft sind:

- Membranstörungen
- Biochemische oder morphologische Änderungen
- Mutationen
- Inaktivierung der Zellteilung (Wachstumshemmung)
- Zelltod etc.

In Abbildung 2.18 sind die Wirkungen der Strahlung auf eine Zelle zusammengefasst.

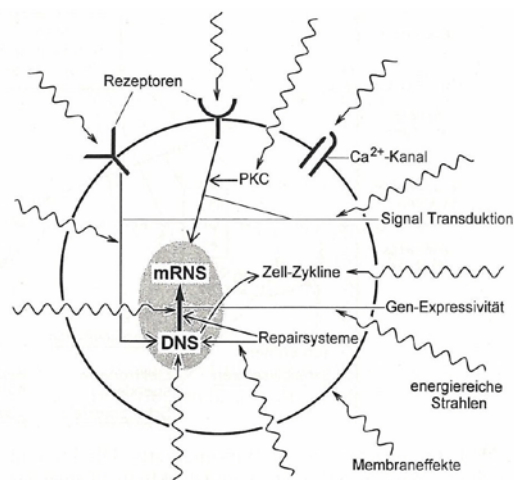


Abbildung 2.18: Strahlenwirkung auf die Zelle und biomolekulare Vorgänge (PKC: Proteinkinase C; DNS: Desoxyribonukleinsäure, Erbsubstanz; mRNS Botenribonukleinsäure) [Heuck1995]

Aus diesem Grund ist ein sorgfältiger Umgang bei der Anwendung der Computertomographie von größter Wichtigkeit, da trotz all dieser negativen Auswirkungen die Computertomographie in der Medizin zur Diagnose vielerlei Krankheiten und Verletzungen nicht mehr wegzudenken ist.

2.1.4 Hounsfield Einheit (CT-Wert)

Die sogenannte Hounsfield-Einheit, Hounsfield-Skala oder auch CT-Wert ist nach dem Briten *Sir Godfrey Newbold Hounsfield* benannt. *Hounsfield* ist als einer der Väter der heutigen Computertomographie anzusehen, da er als Elektronikingenieur der Firma *Electro Musical Industries* den ersten Transmissionscomputertomographen entwickelte. Für seine Leistungen wurde er 1979 gemeinsam mit *Allan M. Cormack* mit dem Nobelpreis für Medizin geehrt. Die Hounsfield-Einheit gibt einen Wert für die Schwächung der Röntgenstrahlung an, der unabhängig vom energieabhängigen linearen Schwächungskoeffizienten μ (auch als Dämpfungskonstante α' bezeichnet) ist und kann mit Formel (2.22) berechnet werden.

$$[CT - Wert](\mu_x) := \frac{\mu_x - \mu_{Wasser}}{\mu_{Wasser}} * 1000 \quad (2.22)$$

Tabelle 2.1: Auflistung einiger Materialien und der dazugehörigen Massenschwächungs-, Schwächungskoeffizienten und CT-Werte [Queisser1998]

Substanz	Massenschwächungskoeffizient ($\frac{\mu}{\rho}$), gemessen in [cm ³ /g]	Schwächungskoeffizient (μ), gemessen in [1]	CT-Wert, [HN]
Luft	0,135	0,135	-1000
Wasser	0,171	0,171 * 1 = 0,171	0
Kohlenstoff	0,153	0,153 * 2,20 = 0,337	971
Sandstein (22 Vol% Porosität)	0,169	0,169 * 1,98 = 0,335	960
Sandstein (10 Vol% Porosität)	0,169	0,169 * 2,38 = 0,403	1357
Beton	0,169	0,169 * 2,40 = 0,406	1372
Aluminium	0,169	0,169 * 2,69 = 0,550	1661
Al 203	0,162	0,162 * 3,97 = 0,645	2772
Stahl	0,370	0,370 * 7,86 = 2,908	16006
ZrO ₂	0,750	0,750 * 5,90 = 4,422	24860
Blei	5,460	5,460 * 11,30 = 61,920	361082

2.1.5 Detektoren und Bildrekonstruktion

Die Strahlungsintensität, die beim Durchstrahlen eines Objektes auftritt, trifft auf den sogenannten Detektor. Dieser Detektor kann mit einer Art Projektionsfläche oder Leinwand bei Dia- oder Filmprojektionen verglichen werden. Der Detektor misst die Strahlungsintensität der jeweiligen Projektion und erzeugt somit ein zweidimensionales Einzelbild. Detektoren können unterschieden werden nach:

- Art der Datenverarbeitung (analog oder digital)
- Aufbau (Zeilen- oder Flächendetektoren)
- Form (eben oder gewölbt)

Die Leistungsfähigkeit des verwendeten Detektors spielt eine große Rolle bei der erreichbaren Auflösung und Dauer einer Messung und der möglichen Probekörperabmessungen. Die Detektortechnik hat in den letzten Jahren sehr große Fortschritte gemacht. Bei den Herstellern von industriellen Computertomographen steht eine große Anzahl an unterschiedlichen Detektoren zur Verfügung, die für die jeweiligen Anwendungen und das gewünschte Gerät ausgewählt werden können. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass der Detektor einen wesentlichen Teil der Gerätekosten ausmacht. In Abbildung 2.19 ist ein „Flat panel detector“, der bei industriellen Computertomographen oft eingesetzt wird dargestellt.



Abbildung 2.19: Darstellung eines „Flat panel detector“ eines industriellen Computertomographen mit offenem Aufbau (aktive Detektoroberfläche: $410 \times 410 \text{ mm}^2$; $1024 \times 1024 \text{ Pixel}$).

Das Verfahren, mit dem anhand der einzelnen Projektionen am Detektorschirm ein räumliches Bild des durchstrahlten Objektes entsteht, ist sehr komplex und aufwendig. Die Grundidee dieser Bildrekonstruktion kann jedoch einfach anhand einiger Abbildung erläutert werden. Für das grundlegende Verständnis ist es völlig ausreichend auf den zweidimensionalen Fall zurückzugreifen.

In Abbildung 2.20 ist eine Draufsicht dargestellt. In der Mitte befinden sich zwei geometrische Formen (Kreis und Raute), deren Durchmesser bzw. Diagonalen gleich lang (eine Einheit) sind.

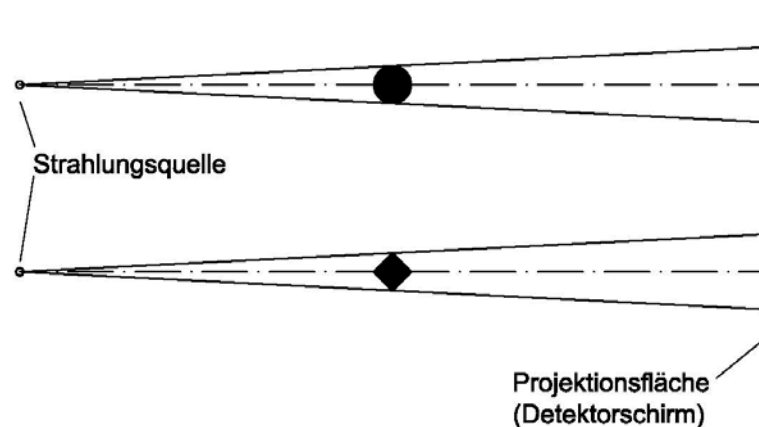


Abbildung 2.20: erste Projektion zweier Objekte

Auf der linken Seite befindet sich die Strahlungsquelle und auf der rechten Seite die jeweilige Abbildung am Projektionsschirm. Nun ist leicht zu erkennen, dass obwohl es sich um zwei unterschiedliche Objekte handelt, die Abbildungen auf der Projektionsfläche identisch sind.

Wenn die beiden Objekte jeweils um einen gewissen Winkel verdreht werden, werden sich die beiden Abbildungen auf der Projektionsfläche, wie in Abbildung 2.21 zu erkennen ist, voneinander unterscheiden.

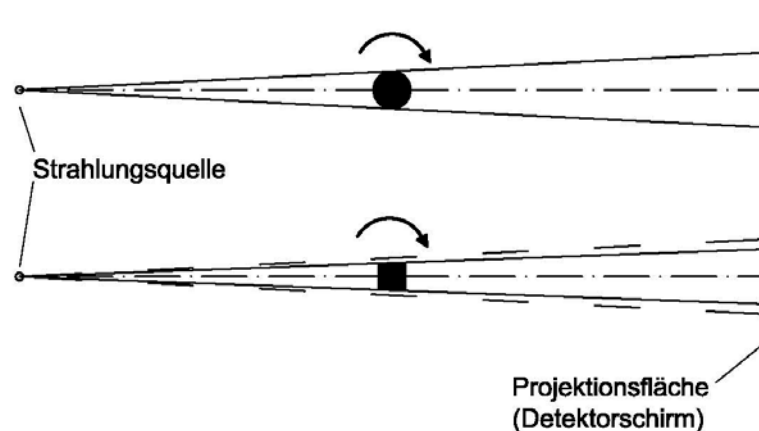


Abbildung 2.21: zweite Projektion zweier Objekte

Bei der industriellen Computertomographie werden die Objekte nur jeweils um einen kleinen Winkel pro Projektion weiter gedreht und somit mehrere Projektionen erzeugt,

bis eine komplette Objektdrehung (360°) erreicht wurde. Mit dieser Vielzahl von erhaltenen Bildern lässt sich nun mittels sehr aufwendiger Rekonstruktionsverfahren ein räumliches Abbild des vorhandenen Objektes erzeugen. Dieser Rückschluss von einzelnen Projektionen auf ein Gesamtbild wird auch als *inverses Problem* bezeichnet. Die mathematischen Grundlagen für diese Rekonstruktion wurden bereits Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts von *Johann Radon* geschaffen. Aber erst die Entwicklung von leistungsstarken Computern machte es möglich, den enormen Rechenaufwand, der bei der 3D-Computertomographie anfällt, zu bewältigen.

2.1.6 Artefakte

Artefakte sind fehlerhafte Abbildungen in den tomographischen Aufnahmen, die sich z.B. in Linien oder konzentrischen Kreisen (Ringartefakte) darstellen. Sie beeinträchtigen die Qualität der Abbildungen und haben daher störenden Einfluss auf die Interpretation der Messungsergebnisse.

In der folgenden Aufzählung sind einige Ursachen für Artefakte aufgelistet:

- Teil- oder Partialvolumenartefakte
- Aufhärungsartefakte
- Bewegungsartefakte
- Abtastartefakte
- Elektronische Artefakte
- Metallartefakte
- Streustrahlungsartefakte

In der Medizin lassen sich Artefakte leicht erkennen, da es sich dabei, wie schon erwähnt, um geometrische Formen (Kreise, Linien etc.) handelt und der menschliche Organismus kaum über derartige Strukturen verfügt. Bei der industriellen Computertomographie sieht das jedoch etwas anders aus, da die Probekörper in der Materialforschung oder bei Maschinen- oder Karosserieteilen meistens eine regelmäßige Geometrie aufweisen. Aus diesem Grund kann sich die Erkennung von Artefakten teilweise als schwierig herausstellen. Aber auch wenn die Artefakte eindeutig erkannt werden, können die Auswirkungen auf die tomographischen Bilder ein Problem darstellen. Jedoch gibt es Möglichkeiten dieses Problem zu minimieren oder gar ganz auszuschalten. Angefangen von der Wahl der Probekörpergeometrie bis hin zu aufwendigen Algorithmen, die bei der Bildrekonstruktion erfolgreich eingesetzt werden.

Teil 2 - Stand der Wissenschaft und Technik

3 Geschichtliche Entwicklung der Computertomographie

Zur Erstellung dieses Kapitels wurden folgende Werke verwendet:

[Banhart2008], [Dessauer1951], [Lossau1995],

Die Entdeckung der Röntgenstrahlung geht auf den deutschen Physiker *Wilhelm Conrad Röntgen* [Dessauer1951] im Jahre 1895 zurück. Er erhielt dafür 1901 den Nobelpreis für Physik. Er entdeckte diese „*neuartige Strahlung*“ zufällig bei einem Experiment, veröffentlichte mehrere Aufsätze zu diesem Thema und löste damit eine regelrechte Begeisterung in der Bevölkerung aus. Dies führte sogar zu so skurrilen Auswüchsen wie Röntgengeräten in Schuhgeschäften, die dazu dienten den Kunden die Passgenauigkeit Ihrer Schuhe zu demonstrieren. Damals hatte man auch noch keine Kenntnisse über die Gefahren einer Strahlenüberdosierung, was bei zahlreichen Wissenschaftlern, die mit Röntgenstrahlung experimentierten, zu gesundheitlichen Schäden führte. Bemerkenswert ist auch, dass *W. C. Röntgen* trotz lukrativem Angebot aus der Industrie seine Entdeckung exklusiv zu verkaufen, darauf verzichtete, da er davon überzeugt war, dass seine Entdeckung von großem Wert für die Allgemeinheit sei und daher nicht von einem kommerziellen Unternehmen monopolisiert werden sollte.

Im Jahre 1917 wurde ein weiterer Grundstein für die heutige Computertomographie durch *Johann Radon* (Radon-Transformation) gelegt, der sich mit dem mathematischen Problem der Bildrekonstruktion befasste. Er löste erstmals das inverse Problem. Diese Aufgabenstellung ist äußerst anspruchsvoll und die Lösung dieses Problems stellt eine wissenschaftliche Meisterleistung dar.

In den darauffolgenden Jahrzehnten beschäftigten sich viele Wissenschaftler mit und um das Thema Röntgenstrahlung und erarbeiteten weitere wichtige Beiträge.

Allan MacLeod Cormack lieferte 1963 die ersten mathematischen Ansätze zur Rekonstruktion von Tomographiebildern. Im Wesentlichen ging es darum, wie man anhand von zweidimensionaler Projektionen auf einen dreidimensionalen Körper zurückrechnen kann. Den ersten CT-Scanner mit radioaktiver Strahlungsquelle wurde von *Sir Geoffrey Hounsfield* im Jahre 1972 gebaut. Für Ihre Leistungen wurden *Allan MacLeod Cormack* und *Sir Geoffrey Hounsfield* 1979 mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet.

Um einen kurzen Überblick zu geben, sind die wesentlichsten Ereignisse und Arbeiten der jeweiligen Wissenschaftler zum Thema Röntgenstrahlung und Computertomographie in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Seitdem gab es vor allem im medizinischen Bereich ständige Weiterentwicklungen der Geräte und der unterschiedlichen Varianten und Anwendungen der Computer-

tomographie. Diese Weiterentwicklungen führten zu erheblichen Verbesserungen der Messungen, was unter anderem auch zu einer Reduktion der Kosten führte, wodurch die Computertomographie auch für industrielle Anwendungen interessant wurde.

Tabelle 3.1: Auflistung der wichtigsten Ereignisse aus der Sicht der Computertomographie

1895	Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt eine neue Art von Strahlung (X-Strahlung)
1901	Wilhelm Conrad Röntgen erhält für seine Entdeckung den 1. Nobelpreis für Physik
1906	H. Bockwinkel nutzt die von H. A. Lorentz angegebene Lösung der Rekonstruktion dreidimensionaler Funktionen aus Flächenintegralen
1913	J.C. Coolidge Jr. verbessert die von W. Crookes entwickelte Röntgenröhre (Crookes tube)
1914	M.v. Laue : Nobelpreis (Physik) für „Röntgen-Interferenzen an Kristallen“
1915	W.H. und W.L. Bragg : Nobelpreis (Physik) für „Röntgen-Beugung an Kristallen“
1917	Johann Radon veröffentlicht die grundlegende Arbeit zur Lösung des inversen Problems
1925	Ehnenfest erweitert die Lösung von H.A Lorentz mit Hilfe der Fouriertransformation
1936	Cramer und Wold lösen das Rekonstruktionsproblem in der Statistik für die Wahrscheinlichkeitserteilung aus den marginalen Verteilungen
1936	Edington löst das Rekonstruktionsproblem in der Astrophysik für die Verteilung der Geschwindigkeiten von Sternen aus den Verteilungen der gemessenen radialen Komponenten ihrer Geschwindigkeit
1936	P. Debye : Nobelpreis (Physik) für „Kristallpulvermethode (Reflexion an drehenden Ebenen)“
1956	Bracewell wendet die Fouriertechniken in der Radioastronomie zur Lösung des inversen Problems an
1958	Krenblyum entwirft einen Röntgenscanner und versucht mit analogen Rekonstruktionsverfahren dünne Körperschnitte zu ermitteln
1963	Allan MacLeod Cormack liefert erste mathematische Beiträge zur Rekonstruktion von Tomographiebildern
1969	Sir Geoffrey Hounsfield baut den ersten CT-Scanner mit radioaktiver Quelle bei den britischen EMI-Forschungslaboratorien
1972	Sir Geoffrey Hounsfield und Ambrose : erste klinische Untersuchungen mit dem EMI-Schädelscanner
1975	Erster Ganzkörpertomograph mit Fächerstrahlsystem
1979	Sir Geoffrey Hounsfield und Allan MacLeod Cormack : Nobelpreis für Medizin
1983	Elektronenstrahl-CT wird demonstriert
1989	Kalender : erste klinische Untersuchungen mit einem Spiral-CT
1991	Multiarray-CT wird demonstriert

Erst mit der Entwicklung leistungsfähiger Computer wurde es möglich, das ungeheure Datenvolumen, das bei der Computertomographie anfällt, zu bearbeiten. Somit konnte die Bildrekonstruktion der zweidimensionalen Bilder zu einem dreidimensionalen Körper bewältigt werden.

Die Vorreiter bei der nichtklinischen Anwendung der Computertomographie kamen aus der Luftfahrt und Automobilindustrie. Dabei wurden zum Beispiel Rotoren von Helikoptern aus Faserverbundwerkstoffen mit einem medizinischen CT gescannt, um den Schichtaufbau und die Faserverteilung zerstörungsfrei zu analysieren und damit Rückschlüsse auf die Fertigungstechnik zu erhalten und eine bessere Qualitätssicherung gewährleisten zu können. Die Automobilindustrie war vor allem an der Vermessung von Motoren- und Karosserieteilen interessiert.

Da die Strahlenstärke bei einem medizinischen CT aufgrund des Schutzes der Patienten vor einer Strahlenüberdosis und der damit einhergehenden gesundheitlichen Folgeschäden begrenzt ist, stieß man bald auf gewisse Grenzen der Anwendbarkeit. Vor allem bei größeren Probenabmessungen oder sehr dichtem Material wie z.B. Stahl oder Beton erhält man sehr schnell einen Absorptionsgrad, der keine sinnvolle Datenauswertung mehr erlaubt. Aus diesem Grund wurden spezielle Geräte für die industrielle Anwendung gebaut. Die Tatsache, dass die Ausrichtung eines Probekörpers leicht mittels eines drehbaren Probentisches bewerkstelligt werden konnte, erleichterte den Geräteaufbau. Hingegen ist diese Prozedur einem Patienten während einer Untersuchung nicht zumutbar, weshalb sich die Strahlenquelle und der Detektor bei einem medizinischen CT radial um den Patienten bewegt.

Für kleine Probenabmessungen wurden auch kompakte Geräte entwickelt, die den Vorteil besaßen, dass sie eine geschlossene Einheit ergaben und somit der unter Umständen aufwendige und teure Strahlenschutzraum entfiel.

Heute gibt es auf dem Markt mehrere Anbieter von Computertomographen, die Geräte speziell für die industrielle Anwendung herstellen. Die Produktpalette ist mittlerweile sehr vielfältig und wird von den Herstellern auf die Wünsche des Konsumenten sowie seinen jeweiligen Ansprüchen, Aufgaben und Anwendungsgebieten angepasst und individuell zusammengestellt. Somit hat jede Forschungseinrichtung die Möglichkeit ein Gerät zu erwerben, welches exakt auf ihre Bedürfnisse und ihr Budget abgestimmt ist.

4 Relevante Anwendungsmöglichkeiten der industriellen Computertomographie aus der Sicht des Bauingenieurwesens

Zur Erstellung dieses Kapitels wurden folgende wissenschaftliche Veröffentlichungen verwendet:

[Cornelis2005], [Degryse2001], [Dewitz2000], [Flisch2006], [Geier], [Goebbels2007], [Harrer2007], [Illerhaus2001], [Krieger2003], [Löffler2007], [Maas2003], [Maisl2000], [Mellmann1999], [Müller], [Niemz1997], [Pabel2007], [Pang1998], [Petutschnigg2002], [Queisser1998], [Recknagel2008], [Schinagl2007], [Standfest2008], [Weberbauer1998], [Weidemann2007], [Weise2007], [Wiberg1999]

In diesem Kapitel werden einige Arbeiten besprochen, die für das Fachgebiet des Bauingenieurs von Relevanz sind. Diese Zusammenfassung stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll dem interessierten Bauingenieur einen Überblick über die bisherigen Arbeiten und Möglichkeiten der industriellen Computertomographie im Bereich seiner Tätigkeiten bieten. Das bedeutet, dass sich diese Zusammenfassung mehr damit beschäftigt, bei welchen Materialien und Aufgabenstellungen die Computertomographie zum Einsatz kam und ob mit der Messung die gewünschten Daten erfassbar und quantifizierbar waren oder nicht. Es handelt sich also vorrangig um die Bewertung der Einsatzmöglichkeit der Computertomographie im Bauingenieurwesen. Bei Interesse der genauen Untersuchungsergebnisse wird auf die jeweiligen Autoren und Ihre Veröffentlichungen verwiesen.

4.1 Holz und Holzwerkstoffe

4.1.1 Rohdichtebestimmung von Holzwerkstoffen mittels Computertomographie [Standfest2008]

Autoren: G. Standfest – A. Petutschnigg – M. Dunky – B. Zimmer

4.1.1.1 Einleitung

Der Artikel befasst sich mit der Rohdichteerfassung von verschiedenen Holzprodukten. Dazu wurden drei unterschiedliche Holzzeugnisse (Spannplatten, MDF- und OSB-Platten) mit dem konventionellen Durchstrahlungsverfahren und mittels Computertomographie untersucht. Aufgrund des Herstellungsprozesses (Verdichtungszeit, Spannfeuchte, Partikelgeometrie, Pressvorgang etc.) gibt es senkrecht zur Plattenebene unterschiedliche Rohdichteprofile. Das bedeutet, dass es in der Deckschicht im Vergleich zur Mittelschicht mehr oder weniger ausgeprägte Dichtemaxima gibt.

4.1.1.2 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wurde jeweils eine Probe aus den drei unterschiedlichen Werkstoffen in quadratischer Form mit einer Seitenkantenlänge von 30 mm hergestellt.

1. Spanplatte: dreischichtig; P2-Platte nach EN 312 (2003) Plattendicke: 19 mm; Rohdichte: 643 kg/m³
2. MDF-Platte: nach EN 622-5 (2006); Plattendicke: 19 mm; Rohdichte: 784 kg/m³
3. OSB-Platte: OSB 3-Platte nach EN 300 (1997); Plattendicke: 18 mm; Rohdichte: 589 kg/m³

Die Messungen wurden an folgenden Einrichtungen durchgeführt:

- **FH Salzburg in Kuchl**: Durchstrahlungsverfahren; Beschleunigungsspannung: 33 kV; Auflösung: 10 µm/Messschritt
- **FH Wels**: Computertomographie; Beschleunigungsspannung: 225 kV (Mikrofokusröhre); Auflösung: ~50 µm

4.1.1.3 Ergebnisse

Ein Vergleich der Untersuchungen zeigt, dass, abgesehen von geringen Differenzen am Plattenrand, die auf gewisse Ungenauigkeiten bei der Probenpositionierung und etwaige Randeffekte zurückzuführen sind, die Messergebnisse der beiden angewendeten Verfahren (Durchstrahlungsmethode, CT) gut übereinstimmen. Damit wurde gezeigt, dass mittels CT-Analyse die Rohdichtebestimmung eines Holzwerkstoffes durch die Auswertung der Grauwerte möglich ist.

Falls nur die Rohdichte ermittelt werden soll, ist das Durchstrahlungsverfahren aufgrund der leichteren Handhabung und der geringeren Kosten im Vorteil. Sollten die Untersuchungsergebnisse jedoch mehr ermöglichen, als nur eine Aussage über die Rohdichteverteilung, stellt die Computertomographie eine innovative und zukunftsweisende Methode dar. Vor allem liefert die Computertomographie eine dreidimensionale Struktur, die die Grundlagen für eine dreidimensionale Dichteverteilung, weitere Simulationen oder mechanische Charakterisierungen liefern kann.

4.1.2 Anwendung der Computertomographie an Holz [Niemz1997]

Autoren: P. Niemz, L. J. Kucera, A. Flisch, E. Blaser

4.1.2.1 Einleitung

Es wurden die Möglichkeiten der Computertomographie, bestehende innere Struktur-
schäden zu erkennen, näher beleuchtet. Dazu wurden vier unterschiedliche Holzproben herangezogen, um sie auf eventuell vorhandene Risse, Äste und/oder Fäulnis zu untersuchen.

4.1.2.2 Versuchsaufbau

Probenmaterial:

1. Holzbrett mit einem Ast
2. Stammscheibe aus Kastanie mit Ringschäle
3. Stammscheibe aus Fichte mit Ringfäule
4. MDF-Platte mit Bohrungen verschiedenen Durchmessers

Untersuchungsgerät:

- Röntgenquelle: Philips MG 450 (150 kV, 6 mA)
- Detektor: 0,25 *0,75 mm
- Zählrate: 800 Hz
- Auflösung: 79 µm

4.1.2.3 Ergebnisse

Aufgrund der getätigten Aufnahmen mittels Computertomographie kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass innere Strukturfehler sehr gut erkennbar sind. Sogar die aufgrund der Fäule bestehende Dichteminderung war sehr gut erkennbar, was die Lokalisierung von Zonen mit Fäulnis ermöglicht. Ein Nachteil jedoch bleibt: die derzeit rein stationäre Anwendungsmöglichkeit der Computertomographie.

4.1.3 **Rotfäuleerkennung bei Fichte in CT-Bildern [Petutschnigg2002]**

Autoren: A. J. Petutschnigg, M. Flach, H. Katz

4.1.3.1 Einleitung

„Dieser Beitrag beschreibt die Erkennung von Rotfäule befallenem Holz mittels Computertomographie und Holzfeuchtemessung. Durch die Erkennung innerer Holzfehler sollte es möglich sein, die Wertausbeute beim Einschnitt durch Berücksichtigung der entstehenden Schnittholzqualitäten, zu erhöhen.“ [Petutschnigg2002]

Durch die fäulnisbedingte Holzersetzung ergibt sich eine Verringerung der Holzdichte und zufolge dessen auch eine Verringerung des Grauwertes in den Tomographiebildern. Eine ausgeprägte Holzfeuchtigkeit erhöht hingegen die Rohdichte. Jedes Material hat einen eigenen CT-Wert, die die Absorptionseigenschaften eines Materials widerspiegelt. Daher wurde für die Modellierung der Zusammenhänge zwischen CT-Wert, Holzfeuchtigkeit und Rotfäulebefall ein logistisches Regressionsmodell nach [Camp-

bell1989] verwendet, um anhand der CT-Bilder eine Aussage über den Holzzustand bezüglich Rotfäule zu treffen.

4.1.3.2 Versuchsaufbau

Ausgewählt wurde ein Bloch mit schlechter Holzqualität (Zopfdurchmesser: 30 cm, Qualität C*) und äußerlich erkennbarem Rotfäulebefall. Das Bloch wurde gescannt und anschließend aus der Mitte zehn Stammscheiben geschnitten. Daraus wurden insgesamt 151 (davon 77 befallene und 74 nicht befallene) quaderförmige Proben mit einer Seitenkantenlänge von 30 mm geschnitten.

Um auch die Einwirkungen der unterschiedlichen Holzfeuchtigkeit zu untersuchen, wurden ungefähr die Hälfte der Proben separat vorbereitet (klimatisiert).

1. 87 Probequader: normal gelagert
2. 32 Probequader (16 befallene, 16 nicht befallene): 10 % Holzfeuchtigkeit
3. 32 Probequader (16 befallene, 16 nicht befallene): 80 % Holzfeuchtigkeit

Für die Computertomographie wurde ein CT-Scanner (CTX-5000) der Firma *Invision-Technologies* verwendet.

4.1.3.3 Ergebnisse

„Es war aus der bildhaften Darstellung der Daten am Schirm nicht möglich, den Anteil des rotfaulen Holzes von jenem des gesunden Holzquerschnittes zu unterscheiden.“
[Petutschigg2002]

Es wurden in der Untersuchung ganz bewusst nur Proben aus demselben Bloch verwendet, um weitere Anomalien auszuschließen und die Aussagekraft der Computertomographie bezüglich der Holzqualität zu prüfen. Mit dem verwendeten Regressionsmodell nach [Campbell1989] war es möglich, mit einer Trefferquote von 80% gesundes von geschädigtem Holz zu unterscheiden. Dies bestätigte zwar die Möglichkeit mittels CT innere Holzschäden zu erkennen, ist aber noch nicht hinreichend genau. Daher ist für weiterführende Untersuchungen vor allem eine Quantifizierung der einzelnen Holzarten, die sich in unterschiedlichen Qualitätszuständen befinden, anzustreben.

4.1.4 Feuchteverteilung in einem Kiefern Brett während des Trocknens, geschätzt nach einem Modell und gemessen mittels Computertomographie [Pang1998]

Autoren: S. Pang, P. Wiberg

4.1.4.1 Einleitung

Es wurden während der Trocknung von Holzbrettern (Monterey-Kiefer) Aufnahmen mit einem medizinischen Computertomographen durchgeführt, um anhand der Dichtverteilung über die bekannte Rohdichte des Probenmaterials auf die vorhandene Feuchtigkeitsverteilung in der Probe zu schließen. Aufgrund der mittels Computertomographie erhaltenen Daten, war es dem Holzforschungsinstitut in Neuseeland möglich, ein zweidimensionales Modell, das Aussagen und Prognosen über den Trocknungsvorgang und den Feuchtigkeitstransport zulässt, zu verifizieren.

4.1.4.2 Versuchsaufbau

Die Probe wurde vom Holzforschungsinstitut in Neuseeland gefertigt. Als Probenmaterial wurde ein Kiefern Brett (Pinus radiata) mit den Abmessungen 100*40*1260 mm verwendet. Davon wurden an jedem Ende ein Querschnitt mit einer Länge von jeweils 30 mm abgeschnitten, um Basiskennwerte der Feuchtigkeit zu erhalten, sodass die Probe die endgültigen Abmessungen von 100*40*1200 mm hatte. Bei der Auswahl der Probe wurde sehr sorgfältig darauf geachtet, dass die Probe keinerlei Defekte beinhaltet.

Es wurde für die Messungen ein medizinischer CT verwendet, da bei diesem die Probe unbewegt bleibt und es somit möglich war, die Messungen durchzuführen während sich die Probe im Trocknungsapparat befindet.

Es wurden drei Messungen an der Luleå Universität (Schweden) durchgeführt:

1. Vor dem Trocknungsvorgang
2. Nach 9,6 Stunden
3. Nach 30,4 Stunden

Trocknungsparameter:

- Trockentemperatur: 90°C
- Feuchttemperatur: 62°C
- Luftgeschwindigkeit: 3 m/s

Daten des Computertomographen:

Human-CT der Firma Siemens (SOMATOM AR.T.)

Röntgenröhre: 110 kV; 150 mA

Detektor: 512*512 Pixel; Auflösung von ca. 1 mm

4.1.4.3 Ergebnisse

Das entwickelte mathematische Modell zur Simulation des Trocknungsprozesses enthält Angaben über:

- Die Dichteverteilung innerhalb der Jahresringe
- Die Anfangsfeuchtigkeit
- Die Durchlässigkeit des Holzes

Es ermöglicht ein besseres Verständnis bzw. liefert Aussagen über:

- Die durchschnittliche Holzfeuchtigkeit
- Die Feuchtegradienten innerhalb des Brettes, also über die Breite, die Dicke und innerhalb der Jahresringe
- *„Trocknungsfehler und ermöglicht die Entwicklung von Trocknungsfahrplänen.“*
[Pang1998]

„This work has demonstrated that CT scanning technology is a novel technique to detect wood moisture distribution and can be used to validate drying models.“
[Pang1998]

4.1.5 Feuchtebewegung während der Holz Trocknung oberhalb des FSP, gemessen mittels Computertomographie und digitaler Bildanalyse [Wiberg1999]

Autoren: P. Wiberg, T. J. Morén

4.1.5.1 Einleitung

In diesem Artikel wurde die Computertomographie zur Überwachung und Quantifizierung der Holz Trocknung über die veränderten Grauwerte und die damit zusammenhängenden Dichteverteilungen im Probenmaterial ermittelt. Dazu wurden drei unterschiedliche Hölzer und auch unterschiedliche Trocknungsfahrpläne verglichen, um Aufschlüsse über die Unterschiede der jeweiligen Trocknungstemperaturen, die bei allen drei Holzarten getestet wurden, zu erhalten.

4.1.5.2 Versuchsaufbau

Es wurden jeweils Bretter aus dem Splintholz der Holzart Kiefer (*Pinus sylvestris*), Fichte (*Picea abies*) und Birke (*Betula pubescens*) mit einer Länge von 550 mm angefertigt. Dabei wurden die Enden der Bretter mit Silikon abgedichtet, um eine longitudinale Trocknung zu unterbinden. Im Inneren der einzelnen Holzproben wurde für die Mes-

sung der Trocknung jeweils ein Probevolumen (1,6 cm³) alle 10 Minuten gescannt und die Daten ausgewertet. Die Trocknungszyklen dauerten je nach Holzart und Trocknungsfahrplan zwischen 17 und 24 Stunden.

Trocknungsfahrplan:

Plan 1: konstante Trockentemperatur von 50, 60, 70 und 80°C

Plan 2: konstante Feuchttemperatur von 50, 60, 70 und 80°C

Wobei jeder der beiden Trocknungsfahrpläne zusätzlich zwei unterschiedliche Perioden enthält (Periode A: 16 % EMC; Periode B: 8 % EMC)

Daten des verwendeten Computertomographen:

Human-CT der Firma Siemens (SOMATOM AR.T.)

Röntgenröhre: 110 kV; 100 mA

Detektor: 512*512 Pixel

4.1.5.3 Ergebnisse

Die Messungen ergaben, dass sich in Abhängigkeit von den jeweiligen Trocknungsfahrplänen, Trocknungsperioden und Holzarten auch ein unterschiedliches Trocknungsverhalten einstellte. Diese Daten können für die jeweilige Holzart optimiert werden. Die Computertomographie eignet sich sehr gut um die Dichteunterschiede und die damit verbundenen Feuchtigkeitsverteilungen zu erfassen.

4.1.6 Die Überprüfung des Eindringverhaltens ausgewählter Kunstharze bei insektengeschädigtem Holz mit Hilfe der Computertomographie [Krieger2003]

Autor: E. Krieger

4.1.6.1 Einleitung

Dieser Artikel ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Diplomarbeit des Autors Ebba Krieger aus dem Jahr 2001.

„Bislang konnten keine präzisen Angaben über die Eindringtiefe und damit über den Erfolg einer Holzfestigung an insektengeschädigtem Holz gemacht werden. Das Problem lag in der mangelnden Überprüfbarkeit des Festigungserfolges, weil es keine Möglichkeit gab, in das Holz hineinzusehen, ohne es dabei zu zerstören.“ [Krieger2003]

Die Computertomographie wurde verwendet, um die räumliche Verteilung und die Dichtezunahme aufgrund mehrerer Injektionsstoffe mit unterschiedlichen Konzentrationen innerhalb der, durch Insekten geschädigten Holzstruktur, mittels der erhaltenen Unterschiede in den Grauwerten der dreidimensionalen Aufnahmen zu quantifizieren.

Dafür wurden Aufnahmen vor und nach dem Einsatz der Festigungsmittel miteinander verglichen und ausgewertet.

4.1.6.2 Versuchsaufbau

*„Das für den Versuch verwendete Holz, Tannenholz (*Abies alba*), stammte aus einem ehemaligen Dachstuhl und war mit Fraßgängen durchzogen.“* [Krieger2003]

Daraus wurden Quader mit einer Kantenlänge von 50 mm Seitenlänge hergestellt. Um annähernd gleiche Voraussetzungen für die Proben zu erhalten, wurden 19 Würfel ohne Äste oder Holzfehler ausgewählt und bei einer Temperatur von 21°C und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Die Proben wurden vor sowie nach dem Einbringen der Festigungsmittel gescannt.

Die Computertomographie wurde bei der Arge Metallguss an der FH Aalen durchgeführt.

4.1.6.3 Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Konzentration des verwendeten Harzes und die damit verbundene Erhöhung der Dichte und der Festigkeit eine größere und die des Lösungsmittels eine geringere Rolle bei der Eindringtiefe und Verteilung, sowohl vertikal wie horizontal, in der räumlichen Holzstruktur spielen als bisher angenommen.

„Das Festigkeitsmittel war in allen Fällen auf den Aufnahmen gut zu erkennen.“ [Krieger2003]

„Da sich die Computertomographie sehr gut bewährt hat, möchte ich anregen, sie als Untersuchungs- und Dokumentationsmethode bei der Holzfestigung nach Möglichkeit immer anzuwenden.“ [Krieger2003]

4.1.7 Computertomographie bei Holz [Pabel2007]

Autoren: T. Pabel, M. Golser, A. Neumüller

4.1.7.1 Einleitung

Hier wurden die Möglichkeiten der Computertomographie zur Erkennung innerer Strukturfehler herangezogen, da die inneren Strukturanomalien, wie Risse, Fäulnis, Faserabweichung, Stauch- oder Wipfelbrüche die Qualität des gewachsenen Werkstoffes stark beeinflussen und daher die Kenntnis solcher Mängel dem Produzenten einen erheblichen Vorteil bringen könnte.

4.1.7.2 Versuchsaufbau

Es wurden einige Holzproben untersucht, wobei dabei auf unterschiedliche Details Augenmerk gelegt wurde.

1. Rundholz: Rindenverletzung, Harzgallen
2. Schnittholz: Risse
3. Keilverzinkung: Verleimung, Leimansammlungen
4. Brettsperrholz: Verleimung der stumpfen Stöße der dreischichtigen kreuzverleimten Platte

4.1.7.3 Ergebnisse

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass:

- *„Werkstoffbedingte Schwachstellen und produktionstechnische Fehler einwandfrei feststellbar sind“ [Pabel2007]*
- *„...die Visualisierung ein hohes didaktisches Potenzial ermöglicht, um fachfernen Entscheidungsträgern aus Industrie und Forschung einen intuitiven Zugang zu ermöglichen.“ [Pabel2007]*
- *„Im Bereich der Bauteildiagnostik und Gutachtenerstellung wird die CT zukünftig eine Schlüsselrolle bei der Beurteilung spielen.“ [Pabel2007]*
- *„Die CT einen herausragenden Beitrag, um einen Blick mit feinsten Auflösung ins Holzvolumen zur Deutung und Verifizierung von Messdaten und Modellen bietet.“ [Pabel2007]*

4.1.8 **State of the Art Report von Scanning-Technologien in Hinblick auf den Einsatz in der Holztechnologie [Müller]**

Autoren: U. Müller, A. Teischinger

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem derzeitigen Stand der Verwendung von Computertomographie und Magnetresonanztomographie in der Holzforschung. Es wird ein Überblick über grundlegende Fragestellungen und Arbeiten der letzten Jahrzehnte gegeben. Die Arbeit schließt mit einer Prognose für weitere Einsatzmöglichkeiten.

Beim Einsatz der Computertomographie im Sägewerk geht es im Wesentlichen darum, durch eine Erkennung der inneren Holzfehler und eventueller Wuchsanomalien die Holzausbeute durch eine optimierte Schnittführung um bis zu 10 % steigern zu können. Daher bringt die Computertomographie einen entscheidenden Vorteil für den Schnitthführer, da mit dem erhaltenen dreidimensionalen Modell der Stämme, Simulationen

der unterschiedlichen Schnittführungen und der damit verbundenen Holzausbeute möglich ist.

„Hodges et al. (1990) untersuchte die Wirtschaftlichkeit der Verwendung eines CT-Scanners im Sägewerk und ermittelte, im Wertholzbereich eine Rentabilitätsgrenze von 60000 fm/Jahr. Den sehr hohen Gerätekosten sind auch erhebliche Einsparungspotentiale im Sägewerksprozess entgegenzusetzen. Durch den Einsatz von Scannern (CT, MRT) können Rundholzvermessung, Splittererkennung und visuelle Sortierstation eingespart werden.“ [Müller]

„Der Einsatz der CT im Sägewerksbereich ist sicher nur eine Frage der Zeit.“

„Hinsichtlich der ‚Anwendung in der Holzforschung lassen beide Scanner-Technologien noch große Potentiale erkennen.“ [Müller]

4.2 Asphalt

4.2.1 Charakterisierung von offenporigem Asphalt mit Computertomographie [Goebbels2007]

Autoren: J. Goebbels, D. Meinel, J. Nötel, C. Recknagel

4.2.1.1 Einleitung

„In Ergänzung zu asphalttechnologischen Kennwerten soll mit Hilfe der Röntgencomputertomographie eine Vorstellung über die Art der Porenstruktur, den realen Hohlraumgehalt und die Hohlraumverteilung in derartigen Asphalten gewonnen werden.“ [Goebbels2007]

Mittels Bildanalyse sollen die einzelnen Asphaltbestandteile (Zuschläge, Bitumen-Füller-Matrix und Porenvolumen) quantifiziert werden. Da offenporiger Asphalt akustische Vorteile besitzt und aufgrund der zunehmenden Verschmutzung nach einigen Jahren seine lärmindernde Wirkung einbüßt, wurden auch Proben untersucht, die künstlich verschmutzt wurden.

4.2.1.2 Versuchsaufbau

Es wurden aus zwei Asphaltplatten (160*130*40 mm³) mit einer Körnung von 0/8 jeweils fünf Bohrkern (Ø= 50 mm, H= 40 mm) entnommen. Eine der Asphaltplatten wurde vor der Bohrkernentnahme künstlich verschmutzt, um eine praxisnahe Nutzung zu simulieren.

Durchgeführt wurden die Messungen an der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung (Berlin). Die Messungsparameter lauten:

- Mikrofokusröntgenröhre: 140 kV; 160 μm
- Vorfilter: 0,25 mm Cu und 0,5 mm Ag
- Flachdetektor: 2048*2048 Pixel
- Projektionen: 900 mit einer Integrationszeit von 6 sec./Projektion
- Auflösung: 52 μm

Die Messungen waren über mehrere Monate verteilt. Daher wurde, um personen- und verfahrensbedingte Mess- und Auswertungsfehler ausschließen zu können, jede einzelne Probe jeweils fünfmal von zwei verschiedenen Personen gemessen und ausgewertet.

4.2.1.3 Ergebnisse

Bei einer Berücksichtigung aller Ungenauigkeiten, die bei der Messung und Auswertung der einzelnen Probenbestandteile entstanden sind, wurde eine Unsicherheit bei der Hohlraumbestimmung von $\pm 1,5 \%$ ermittelt, was einen relativen Fehler von 6 % ergibt.

„Die röntgentechnischen Parameter der benutzten CT-Anlage sind auch über einen längeren Zeitraum konstant, so dass die verschiedenen Bestandteile aller untersuchten Proben die gleichen Absorptionseigenschaften aufweisen.“ [Goebbels2007]

„Mit CT können sowohl die Art der Hohlraumstruktur und deren quantitative und örtliche Verteilung aber auch die Gehalte der Phasenbestandteile von offenporigem Asphalt mit hoher Zuverlässigkeit und Genauigkeit bestimmt werden.“ [Goebbels2007]

4.2.2 Möglichkeiten der Strukturkennzeichnung von Asphalten mittels 3D-Computertomographie [Recknagel2008]

Autoren: C. Recknagel, J. Goebbels, D. Meinel

4.2.2.1 Einleitung

Dies ist eine sehr umfangreiche Arbeit, die sich generell mit den Anwendungen und Fragestellungen bezüglich Asphaltanalyse mittels Computertomographie auseinandersetzt. Dazu wurden verschiedene Probekörpergeometrien und Messungsparameter ausprobiert, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob auf die unterschiedlichen Problemstellungen eingegangen werden kann und damit die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Asphalttechnologie durch die Anwendung der Computertomographie ein praktikables und sinnvolles Untersuchungs- und Forschungsinstrumentarium erhält. Um dies zu erreichen, wurde auf folgende Problemkategorien eingegangen:

- Hohlraumkennzeichnung:

Dabei ging es nicht nur um eine Quanti- und Qualifizierung der Porenstruktur, sondern auch darum, ob die erfasste Hohlraumstruktur mittels CAD gestützter Software wieder reproduzierbar und somit weiterverwertbar ist, um z.B. die Oberflächengestaltung der Porenräume zu erfassen.

- Kennzeichnung des inneren stofflichen Aufbaus/Phasenkennzeichnung:

Vor allem die Quantifizierung der einzelnen Asphaltkomponenten und der stoffliche Aufbau sind von Interesse, aber auch die räumliche Verteilung der einzelnen Stoffphasen und auch Detailauflösungen des Korngerüstes und der Grenzschichten zwischen den einzelnen Bestandteilen.

- Kennzeichnung struktureller Artefakte infolge Beanspruchung:

Hierbei ging es um die Möglichkeit die nutzungsbedingten Einflüsse und Auswirkungen auf den Asphalt zu quantifizieren. Wie z.B. die Verdichtung des Korngefüges aufgrund der Belastung durch den Verkehr sowie die eventuellen Hohlraumverschlüsse, die durch Schmutzpartikel hervorgerufen werden.

4.2.2.2 Versuchsaufbau

Es wurden vier Messkonfigurationen adaptiert und erprobt, um für unterschiedliche Abmessungen und Geometrien der Probekörper, der gewünschten Auflösung und der jeweiligen Aufgabenstellung die optimalen Geräte- und Einstellungsparameter zu finden.

1. Für kleine Proben und Bohrkerne (bis \varnothing 150 mm)

- Mikro-CT 1: Mikrofokusröntgenröhre-225 kV; Flächendetektor-2048*2048 Pixel
- Mikro-CT 2: Mikrofokusröntgenröhre-320 kV; Flächendetektor-1024*1024 Pixel

2. Für plattenförmige Proben (Durchstrahllänge bis 1000 mm)

- Makro-CT 1: Röntgenröhre-450 kV; Flächendetektor-512*512 Pixel
- Makro-CT 2: Linearbeschleuniger-12 MeV; bis zu 20 Einzeldetektoren oder einem Flächendetektor-512*512 Pixel

4.2.2.3 Ergebnisse

Die erhaltenen Ergebnisse wurden mit Standarduntersuchungen verglichen, um die Fehlerrate und Messgenauigkeit auswerten zu können. Dabei kann festgehalten werden, dass sich die Computertomographie sehr gut eignet, um die angeführten Aufgabenstellungen zu lösen. Jedoch besteht noch einiges an Forschungsbedarf, vor allem

um die Stabilität der Messergebnisse sicherzustellen und eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messungen zu gewährleisten.

„Durch die dreidimensionale Erfassung der inneren Struktur kann nicht nur eine integrierte Erfassung des Gesamthohlraumgehaltes aus dem untersuchten Probenvolumen erfolgen, sondern vielmehr wird auch eine orts aufgelöste Auswertung und Beschreibung des Porenverlaufs ermöglicht. Insbesondere zur Beurteilung von technologischen Einflüssen (Verdichtung) aber auch beanspruchungsbedingten Effekten (z. B. Nachverdichtung unter Verkehr; Schmutzeintrag etc.) kann dies ein wirksames Hilfsmittel sein.“ [Recknagel2008]

„Es wird gezeigt, dass neben einer visualisierten qualitativen Darstellung von Hohlraum und Feststoffphasen auch quantitative Auswertungen unter Vermeidung präparatorisch bedingter Beeinträchtigungen an Proben mit praktisch relevanten Abmessungen möglich sind.“ [Recknagel2008]

„Darüber hinaus ermöglichen es die Mittel der modernen computergestützten Auswertung, die erfassten Strukturen digital zu reproduzieren und weiteren numerischen Simulationsanalysen (z. B. FEM) oder Auswertungen zu unterziehen.“ [Recknagel2008]

4.3 Natürliche Gesteine

4.3.1 Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natursandstein mittels Computer-Tomographie [Queisser1998]

Autor: A. Queisser

4.3.1.1 Einleitung

Der Autor zeigt die prinzipielle Anwendungsmöglichkeit der Computertomographie, um anhand der Messungen Erkenntnisse über Korngefüge und Porenverteilung zu erhalten. Zu diesem Zwecke wurden sechs verschiedene Natursandsteine im trockenen und im nassen Zustand untersucht, wobei gesteintechnische Kenngrößen wie Mineralbestand, Art der Kornbildung und Porengrößenverteilung ermittelt wurden. Des Weiteren wurden die rechnerisch ermittelbaren CT-Nummern der einzelnen Gesteinsproben mit den aufgrund der CT-Untersuchung erhaltenen Daten verglichen.

4.3.1.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurden sechs verschiedene Sandsteine, die ursprünglich aus dem Mainingebiet stammen, aus teilweise historisch bedeutenden Gebäuden entnommen.

1. Schilfsandstein (Sand a. M.)
2. Neubrunner
3. Burgsandstein (Burg b. Bamberg)

4. Bucher Rhätsandstein
5. Dogger Beta (Schloß Banz)
6. Roter Mainsandstein (Miltenberg)

Die Gesteinsproben wurden zu Quadern mit einer Seitenkantenlänge von 10 cm gefertigt und im trockenen sowie im nassen Zustand (24 Stunden in Wasser gelagert) gescannt. Die Scans wurden mit einem medizinischen CT der Firma Siemens (SOMATOM 2) sowie mit dem an der Bundesanstalt für Materialprüfung entwickelten BAM-Scanner 2 durchgeführt.

4.3.1.3 Ergebnisse

Die berechneten und die mit der Computertomographie ermittelten CT-Nummern stimmten gut überein. Auch die Dichteunterschiede der trocknen und der getränkten Proben waren an den CT-Bildern gut zu erkennen und auch quantitativ zu erfassen.

„Eine gleichmäßige Verschiebung des gesamten Grauwertspektrums deutet darauf hin, dass auch der fossile Gesteinsbereich durchfeuchtet ist.“ [Queisser1998]

„Besonders interessant erscheint ein Einsatz der CT-Methode für das Studium verfüllter Porenräume sowie von Transportphänomenen im porösen Medium. Es besteht die Möglichkeit, Entwicklungsphasen am selben Objekt zeitunabhängig zu dokumentieren und quantitativ zu erfassen. Außerdem lassen sich Dichteverteilungen ortsabhängig und zerstörungsfrei erfassen.“ [Queisser1998]

4.3.2 Ergebnisse experimenteller Untersuchungen des Feuchtetransportes in Baustoffen mittels Computer-Tomographie [Dewitz2000]

Autoren: K.-D. Dewitz, Materialprüfungsamt des Landes Brandenburg, Eberswalde

4.3.2.1 Einleitung

„Kenntnisse über den Ablauf des Prozesses der Leitung sowie über die Verteilung von Flüssigkeiten in Baustoffen sind sowohl für die Baupraxis als auch für die Entwicklung von Baustoffen und Bauten-Schutzmitteln von großer Bedeutung. Dies betrifft die Austrocknung von Bauwerken, die Aufnahme von Wasser oder Bauten-Schutzmitteln sowie die davon abhängenden Kennwerte der Wärmedämmung und der Dauerhaftigkeit der Materialien.“ [Dewitz2000]

So sind nicht nur die Eindringtiefe und Eindringdauer verschiedener Flüssigkeiten in unterschiedliche Baustoffe und der damit zusammenhängende Durchfeuchtungsgrad, sondern vor allem die sehr komplexen Prozesse des Feuchtetransportes im Inneren der Proben und die Vorgänge an der Materialoberfläche von Interesse. Die bisherigen Möglichkeiten bestanden meistens in der zerstörenden Prüfung einer teilweise beein-

flussten (gestörten) Probe, wodurch die Ergebnisse verfälscht wurden. Es ist auch möglich die aufgenommene Flüssigkeitsmenge gravimetrisch zu bestimmen. Bei dieser Methode ist es jedoch nicht möglich, die räumliche Verteilung der Flüssigkeit zu erfassen. Dadurch handelt es sich bei dieser Erfassung der Ergebnisse eher um eine statistische Auswertung und somit um eine allgemeine und nicht sehr differenzierte Aussage.

4.3.2.2 Versuchsaufbau

Im Wesentlichen wurden folgende drei Thematiken durch Versuche und anschließende computertomographisch gestützte Auswertung begutachtet.

1. Feuchteaufnahme: Dazu wurden die Materialproben (Kalksandstein-, Beton- und Porenbetonquader) in ein dünnes „Wasserbad“ gelegt um die kapillare Saugfähigkeit nach einigen Stunden, Tagen und Wochen mittels Computertomographie zu dokumentieren und auszuwerten.
2. Trocknung: Die Proben wurden bis auf eine Seitenfläche mit einer Diffusionsperre versehen, um die Feuchteabgabe und den Feuchtigkeitstransport im Inneren der Proben zu analysieren.
3. Abdichtung: Hierbei wurden zwei unterschiedliche Versuche durchgeführt. Beim ersten wurden in einen Probekörper mehrere gleich tiefe Löcher gebohrt und mittels eines Trichters verschiedene flüssige Substanzen eingebracht und mit der Computertomographie die Aufnahme und räumliche Verteilung der Injektionsmittel verglichen. Beim anderen Versuch wurden mittels Injektionen Dichtungsmittel eingebracht und in einem anschließenden Befeuchtungsversuch die Wirksamkeit der eingebrachten Feuchtigkeitssperre mittels CT-Scans überprüft.

4.3.2.3 Ergebnisse

Der Autor zieht aus den durchgeführten Untersuchungen folgende Schlüsse:

- *„Der Transport von Flüssigkeiten in Festkörpern wird dabei zugleich zeitlich qualitativ visualisiert und auch quantitativ erfasst.“ [Dewitz2000]*
- *„Durch die Wiederholung der Messungen können Erkenntnisse über Zeitablauf und Einfluss bestimmter Versuchsbedingungen gewonnen werden.“ [Dewitz2000]*
- *„Selbst wenn eine Massenänderung durch Wägung kaum feststellbar ist bzw. sich nur eine im Fehlerbereich der gravimetrischen Messung liegende minimale Änderung des daraus zu errechnenden mittleren Feuchtesatzes ergibt, ist eine solch geringe Feuchteaufnahme im CT-Bild erkennbar.“ [Dewitz2000]*

4.3.3 Computertomographische Untersuchungen an einem Sandstein-Kleinkern [Schinagl2007]

Autoren: W. Schinagl, G. Geier, S. Schider, W. Voritsch

4.3.3.1 Einleitung

Diese Arbeit behandelt die Anwendung der Computertomographie, um auf Basiskenntwerte von Gesteinsproben, wie z. B. Dichteunterschiede bei mehrphasigem Objektaufbau, die innere Geometrie sowie Poren und deren Vernetzungen, zu schließen. Die Erkennung vorhandener Porenetzwerke und die Größe der einzelnen Poren und deren räumliche Verteilung sind vor allem bei der Auffindung und Bewertung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten von Bedeutung. Dazu wurden zusätzliche Standarduntersuchungen wie Polarisationsmikroskopie, Kathodolumineszenz-mikroskopie, Röntgendiffraktometrie, CO₂-Volumetrie und Rasterelektronen-mikroskopie durchgeführt, um die Ergebnisse der Computertomographie zu bestätigen.

4.3.3.2 Versuchsaufbau

Die Probe hatte einen Durchmesser und eine ungefähre Höhe von 30 mm. Die Computertomographie wurde am österreichischen Gießerei-Institut der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Dafür wurde ein Gerät der Firma *Phoenix|x-ray (v|tome|x c)* verwendet. Die Geräte- und Rekonstruktionsparameter lauten:

- Mikrofokusröntgenröhre mit 240 kV
- Brennfleckgröße je nach verwendeter Röhrenspannung von 4 bis 20 µm
- Detektion: digitaler 512*512-Pixel-Flächendetektor mit 16-bit-Dynamik
- Messbereichserweiterung: 1024*512 Pixel und einer Auflösung von 35 µm
- Algorithmus zur Strahlenaufhärtungskorrektur der Firma *Phoenix|x-ray*

4.3.3.3 Ergebnisse

„Es konnte gezeigt werden, dass diese Methode einen neuartigen Einblick in die Verteilung der Gesteinseigenschaften ermöglicht und zum Gesamtverständnis einer Probe sehr hilfreich ist.“ [Schinagl2007]

„Die mit Hilfe von Tomogrammen gewonnenen Erkenntnisse über das untersuchte Gestein können mit anderen Untersuchungsmethoden kaum erreicht werden.“ [Schinagl2007]

4.4 Beton und andere mineralische Baustoffe

4.4.1 Computertomographie – dreidimensionale, zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Werkstoffen [Geier]

Autoren: G. Geier

Diese Arbeit liefert keine gezielten Versuchungsergebnisse, sondern stellt eine kurze Zusammenfassung der Möglichkeiten der Computertomographie, betreffend der Untersuchung mineralischer Baustoffe dar.

„Aber auch Poren und Porennetzwerke können so sichtbar gemacht werden. Des Weiteren können Dichteunterschiede, zum Beispiel Einschlüsse oder ein mehrphasiger Objektaufbau, erkannt werden.“ [Geier]

„So können an Betonproben die Verteilung der einzelnen Beton-Bestandteile, die Anreicherung von Hohlräumen in verschiedenen Bereichen, die Lagerung der eventuell eingebetteten Stahlfasern oder schlaffer Bewehrung und der Verbundbereich zwischen Bewehrung und Beton klar erkannt und bewertet werden.“ [Geier]

4.4.2 Computertomographie für Industrieböden aus Stahlfaserbeton [Mellmann1999]

Autoren: G. Mellmann, J. Goebbels

4.4.2.1 Einleitung

„In zunehmendem Maße kommen für hochbelastete Industrieböden Stahlfaserbetone zur Anwendung.“ [Mellmann1999]

Aus diesem Grund ist es von großem Interesse, die Orientierung und den Gehalt der Stahlfasern zu ermitteln. Es macht einen erheblichen Unterschied aus, ob sich die Fasern in zweidimensionalen Ebenen orientieren oder räumlich gesehen beliebig verteilt sind und somit auch ein wesentlich besseres Materialverhalten aufweisen. Auch eine gleichmäßige Verteilung der Fasern und eine Vermeidung von sog. Fasernestern wird bei der Herstellung von Faserbeton angestrebt, da eine unregelmäßige Faserverteilung die Eigenschaften des Gefüges zonenweise schwächen und somit zu einer geringeren Qualität führen kann

4.4.2.2 Versuchsaufbau

Für die Messungen wurde ein Universal-Tomograph der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung (Berlin) verwendet, der über unterschiedliche Strahlungsquellen verfügt und Objekte bis zu einem Gewicht von 1000 kg und 1 m Durchmesser durchstrahlen kann.

Es wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser und einer Höhe von jeweils 100 mm untersucht, wobei die verwendeten Stahlfasern einen Durchmesser von 0,6 mm und eine Länge von 50 mm aufwiesen. Die Messungsparameter lauten:

- Röntgenröhre (420 kV): 400 kV; 4 mA
- Vorfilter: 3 mm Cu + 2 Al
- Detektor: 221*221 Pixel
- Auflösung (Voxelgröße): 0,5*0,5*1,5 mm; 40 Einzelschnitte/Probe

4.4.2.3 Ergebnisse

Bei der Bildauswertung wurde von der Schwellwertbildung der einzelnen Grauwerte Gebrauch gemacht. Durch die relativ großen Grauwertunterschiede (Stahlfasern: 182; Beton: 116) stellte dies keine Schwierigkeit dar. Die Orientierung der einzelnen Stahlfasern ist sehr gut erkennbar. Auch der Fasergehalt ist sehr gut erfassbar, jedoch war für die qualitative Auswertung des Stahlfasergehalts, bedingt durch die vorhandene Auflösung der Messung, eine Kalibrierung erforderlich. Dazu wurden die einzelnen Bohrkerne nach der Messung zerstört, um den Stahlfasergehalt gravimetrisch zu bestimmen.

4.4.3 Untersuchung von faserverstärktem Porenbeton mit Computertomographie [Weidemann2007]

Autoren: G. Weidemann, J. Goebbels, R. Stadie, B. Hillemeier, A. Haibel

4.4.3.1 Einleitung

Porenbeton weist einige günstige Eigenschaften auf, die den Baustoff für ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten praktikabel macht. So sind z.B. die relativ hohe Festigkeit bei einer geringen Rohdichte und der damit verbundenen Wärmedämmeigenschaft, die Verarbeitbarkeit und der Brandwiderstand von Vorteil. Das Versagen des Porenbetons bei der Einwirkung von Zugkräften ist allerdings ein Nachteil, dem mit der Beigabe von Fasern Abhilfe geschafft werden soll. Dabei spielt die Orientierung der eingebrachten Fasern eine wesentliche Rolle. Daher ist es wichtig die räumliche Verteilung der Fasern bestimmen zu können, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Faserorientierung und Faserkonzentration auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften zu erhalten. Dieser Fragestellung wurde in dieser Arbeit mittels einer ganzen Versuchsreihe Rechnung getragen.

4.4.3.2 Versuchsaufbau

Es wurden folgende Punkte untersucht:

1. Die Entstehung der Faserorientierung während des Treibens im Herstellungsprozess des Porenbetons mittels Radiographie.
2. Die Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften unter Biegezugbeanspruchung mittels Synchrotron-CT.
3. Die Bestimmung der Faserorientierung und Faserverteilung in der fertigen Porenbetonprobe im Zusammenhang mit den Festigkeits- und Verformungseigenschaften unter Biegezugbeanspruchung.

Die verwendeten Messungs- und Geräteparameter lauten:

- Synchrotron-CT:
 - Monochromatische Strahlung mit 20 keV
 - Projektion auf einen Szintillatorschirm; über gekühlte CCD-Kamera mit 2048*2048 Pixel
 - Auflösung: 3,6 µm

Für die Radiographie wurde dasselbe Gerät wie für die Computertomographie (Labor) verwendet. Bei der CT als auch bei der Radiographie wurden zur Verbesserung des „Signal-zu-Rausch-Verhältnisses“ jeweils 2*2 Detektorpixel zu einem zusammengefasst, wobei die Integrationszeit 2 s betrug.

- CT-Messung (Labor):
 - Mikrofokusröntgenröhre (225 kV): 60 kV; 130 µA
 - Vorfilter: 0,25 mm Cu
 - Projektionen: 900/360 Grad
 - Detektor: Flachdetektor mit CsI-Szintillator mit 2048*2048 Pixel und 0,2 mm Pixelgröße
 - Auflösung: 87 µm
- Radiographie:
 - Mikrofokusröntgenröhre (225 kV): 40 kV; 130 µA
 - Kein Vorfilter

4.4.3.3 Ergebnisse

„Die Beobachtungen einer starken Streuung der Faserorientierung zeigt, dass die Ausgangsorientierung noch nicht in ausreichendem Maße kontrolliert werden kann. Für weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Faserverstärkung auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten muss es entweder besser gelingen, starke Ausgangsorientierungen zu verhindern oder gezielt definiert einzubringen.“ [Weidemann2007]

„Alle Proben zeigen eine deutliche Vorzugsorientierung der Fasern.“ [Weidemann2007]

„Die Verbesserung gegenüber einem Porenbeton gleicher Porosierung ohne Faserverstärkung ist beträchtlich.“ [Weidemann2007]

„Eine Variation der Fasern führte zu der Erkenntnis, dass das Ausmaß der Faserausrichtung nur schwach von der Faserlänge abhängt (Länge 6 und 12 mm). Stärker geht der Faserdurchmesser ein.“ [Weidemann2007]

„Computertomographie ermöglicht die Untersuchung von faserverstärktem Porenbeton auf verschiedenen Größenskalen.“ [Weidemann2007]

4.4.4 Analyse des Gefüge- und Feuchtezustandes in mineralischen Baustoffen mit der Mikro-Röntgen-3D-Computertomographie [Weise2007]

Autoren: F. Weise, Y. Onel, J. Goebbels

4.4.4.1 Einleitung

Diese Arbeit beleuchtet die Anwendbarkeit der Computertomographie zur Bestimmung des Gefüges und der räumlichen Verteilung der vorhandenen Feuchtigkeit und der Erfassbarkeit des Feuchtetransportes. Dazu wurden zwei Machbarkeitsstudien durchgeführt, um die Vorteile und die Möglichkeiten der Computertomographie zu verifizieren.

1. Frostgeschädigter Betonbohrkern (Sichtbetonqualität): Dabei wurde die räumliche Verteilung der Gesteinskörnung, der Zementsteinmatrix, der Risse und der Feuchtigkeit untersucht. Besonders die Riss- und Feuchteverteilung und die damit verbundenen frostinduzierten Schädigungsmechanismen sind noch nicht hinreichend bekannt und daher von großem Interesse.
2. Ettringer Tuffstein: Die Tuffsteinproben wurden aus einer Säule des Charlottenburger Tors entnommen und sollten auf die räumliche und zeitliche Feuchteverteilung während eines kapillaren Aufsaugversuchs getestet werden.

4.4.4.2 Versuchsaufbau

Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen der Probekörper, wurden für die beiden Machbarkeitsstudien verschiedene Geräte eingesetzt. Die Messungen wurden im ersten Fall (Beton) durch die erzielbare Auflösung und im zweiten Fall (Tuffstein) durch die Messzeit limitiert.

1. Frostgeschädigter Betonbohrkern (Sichtbetonqualität): Die Proben wurden im Rahmen eines Schadensgutachtens von einer Sichtbetonfassade entnommen. Anschließend wurden an den Proben 56 Frost-Tauwechseln (CIF-Verfahren) durchgeführt und die Abwitterung festgestellt. Danach wurden die Bohrkerne im trockenen und im wassergesättigten Zustand mit dem Computertomographen aufgenommen. Die verwendeten Messungsparameter lauten:

- Probenabmessungen: Ø 100 mm; Höhe 70 mm
 - Mikrofokusröntgenröhre: 320 kV, 2 mA
 - Dauer einer Messung: max. 2 Stunden
 - Auflösung: Doppelprojektion mit 65 µm
2. Ettringer Tuffstein: Es wurden zwei Bohrkerne entnommen, wobei einer der beiden von einer Stelle stammt, deren Oberfläche hydrophobiert war. Eine Messung wurde im Trockenen und eine weitere während eines Befeuchtungsvorganges aufgenommen. Die Befeuchtung wurde durch ein Wasserbad, in dem die Probe eine konstante Eindringtiefe von 5 mm aufwies, vorgenommen. Um einen streng eindimensionalen Feuchtetransport zu gewährleisten, wurden die Mantelflächen der Bohrkerne mit Latex beschichtet und zur besseren Orientierung Zirkonkugeln aufgebracht.
- Probenabmessungen: Ø 46 mm; Höhe 120 mm
 - Mikrofokusröntgenröhre: 220 kV, 150 µA
 - Flächendetektor: 2048*2048 Pixel
 - Projektionen: 900/360 Grad
 - Belichtungszeit: 5 s (Trocken); 2 s (Befeuchtet)
 - Dauer einer Messung: 75 min (Trocken); 30 min (Befeuchtet)
 - Auflösung: 30 µm (Trocken); 60 µm (Befeuchtet)

4.4.4.3 Ergebnisse

„Beide Machbarkeitsstudien dokumentieren, dass die 3D-CT ein wirkungsvolles Instrument zur räumlichen Visualisierung des Mikrogefüges und der Feuchteverteilung in mineralischen Baustoffen darstellt.“ [Weise2007]

„So zeigen beispielsweise die Untersuchungen an der frostgeschädigten Betonprobe, dass mit der 3D-CT die räumliche Verteilung und die Kapillaraktivität der Risse im Betongefüge visualisiert werden können.“ [Weise2007]

„Damit ist es perspektivisch möglich, die Interaktion zwischen den frostinduzierten Rissen und der Feuchteverteilung ohne zerstörenden Eingriff zu ermöglichen.“ [Weise2007]

„Insgesamt kann festgehalten werden, dass mit der 3D-CT die innere Mikrostruktur und der instationäre Prozess der Wasseraufnahme in der Tuffsteinprobe gut abgebildet wird.“ [Weise2007]

4.4.5 Microfocus Computer Tomographie zur Ermittlung von Frostschäden in modernen Reparaturmörteln [Degryse2001]

Autoren: P. Degryse, M. Van Geet, M. Waelkens, R. Swennen, M Wevers, W. Viaene

4.4.5.1 Einleitung

„Ergänzend zu den früheren Untersuchungen an römischem Mörtel von Salagassos (Türkei) sind experimentelle Mischungen von Reparaturmörteln auf Frostbeständigkeit und Festigkeit geprüft worden. Gleiche oder ähnliche Rohstoffe wie im Altertum wurden verwendet. Die klassische zerstörende Prüfung in einem Klima-Prüfraum wurde mit Beobachtungen mit Hilfe der zerstörungsfreien Mikrofokus-Computertomographie verglichen. Unsere Studie zeigt die Anwendung der letztgenannten Technik als neue leistungsfähige Prüfungsmethode für die Charakterisierung der Frostbeständigkeit von Mörtel.“ [Degryse2001]

4.4.5.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurden Bohrkerne aus Probekörpern entnommen, die aus zwei unterschiedlichen Mörtelrezepturen hergestellt wurden. Danach wurden die Proben einer konventionellen Frost-Tauwechsel-Belastung in einem Klimaschrank unterzogen und zwischen jedem Zyklus mit dem Mikro-Computertomographen gescannt.

- Probenabmessungen: \varnothing 8 mm; Höhe 10 mm
- Gerät: Skyscan 1072-Mikrofokus-Röntgen-Mikrotomograph
- Mikrofokusröntgenröhre: 130 kV, 300 μ A
- Vorfilter: 0,8 mm Aluminium
- Dauer einer Messung: 3 Stunden
- Dauer der Rekonstruktion: 1,5 Stunden
- Auflösung: 22 μ m

4.4.5.3 Ergebnisse

Die Autoren kommen zu dem Resultat, dass sich die Mikro-Computertomographie als sehr praktikabel erweist, um den inneren Zustand (Poren, Risse) und die einzelnen Bestandteile (Kalk, vulkanisches Gestein,...) von Mörteln zu bestimmen und durch Frost-Tauwechsel herbeigeführte Strukturveränderungen und Schäden des Gefüges erfassen zu können.

„It might prove an excellent instrument in the development of weather adapted frost resistant conservation mortars.“ [Degryse2001]

4.5 Metalle

4.5.1 *Anwendungen der industriellen 3D-Computertomographie* [Maisl2000]

Autoren: M. Maisl, H. Reiter, M. Purschke, R. Seifert, E. Zabler, M. Rosenberger-Koch, R. Bosch

4.5.1.1 Einleitung

Dieser Artikel beschäftigt sich vorrangig mit den Möglichkeiten der Vermessung und Überprüfung von Einzelteilen, die in der Automobilindustrie Verwendung finden.

4.5.1.2 Versuchsaufbau

Aluminiumguss

- Probenabmessung: \varnothing 15 cm
- Dauer einer Messung: 5 min
- Auflösung: $(0,3 \text{ mm})^3$
- Erkennung: 0,4 mm große Poren konnten detektiert werden

Elektronikkomponente

- Probenabmessung: \varnothing 5 mm
- Mikrofokusröntgenröhre
- Auflösung: $(25 \text{ }\mu\text{m})^3$
- Erkennung: 50 μm große Poren waren erkennbar

Zylinderkopf

- Probenabmessung: Höhe= 17 cm
- Mikrofokusröntgenröhre: 450 kV
- Dauer einer Messung: 30 min
- Auflösung: $(0,35 \text{ mm})^3$

4.5.1.3 Ergebnisse

„Die CT bietet die Möglichkeit CAD-Daten auch von verdeckten Strukturen zu gewinnen.“ [Maisl2000]

„Die 3D-CT ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Optimierung des Gießprozesses bei Gussbauteilen aus Leichtmetall.“ [Maisl2000]

4.5.2 Messungen von Eigenschaften poröser Materialien in 3D mittels Mikro-Computertomographie [Illerhaus2001]

Autoren: B. Illerhaus, E. Jasiuniene, J. Goebbels

In diesem Artikel wird die Untersuchung von metallischen Schäumen mittels Computertomographie vorgestellt und etwas näher beleuchtet. Bei der Bestimmung der Qualität von Aluminiumschäumen ist vor allem die Größe und Verteilung der vorhandenen Poren und die räumliche Dichteverteilung von großer Bedeutung. Auch die Porenstruktur und die Erkennung von Knoten- und Wandbereichen spielt vor allem bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften eine wesentliche Rolle. Vor allem die Tatsache, dass es zur Zeit noch nicht möglich ist, Aluminiumschäume von gleichbleibender Qualität herzustellen, macht eine zerstörungsfreie Charakterisierung des Materials notwendig. Eine weitere Aufgabenstellung ist die Quantifizierung der Verformungseigenschaften, also das Materialverhalten unter einer aufgetragenen Belastung.

„Hochauflösende 3D Computertomographie ermöglicht die Strukturaufklärung von zellularen metallischen Werkstücken.“ [Illerhaus2001]

„Auch sind vereinzelte große Poren mit normaler Radiographie durch die chaotische Struktur des Schaums nicht zu finden.“ [Illerhaus2001]

„Mit der CT lässt sich auch der Versagensmechanismus in Schaumproben darstellen, indem die zerstörende Prüfung in mehreren Schritten und dazwischen immer eine tomographische Aufnahme durchgeführt wird.“ [Illerhaus2001]

4.5.3 Industrielle Computertomographie zur 3D-Volumenerfassung und Defektanalyse [Flisch2006]

Autor: A. Flisch

Der Autor gibt im Wesentlichen vier Hauptaufgaben und Einsatzmöglichkeiten der industriellen Computertomographie wieder.

- **Erstmusterprüfung:** Der Vergleich von Soll- zu Ist-Zustand
- **Reverse Engineering:** Erstellung eines CAD-Modells anhand der Messdaten
- **Wandstärkenanalyse:** Quantifizierung von Abmessungen
- **Defektanalyse:** Erkennung innerer Fehler und von Strukturfehlern

„Mit den heute verfügbaren leistungsfähigen Rechnern und Möglichkeiten der 3D-Visualisierung von CT-Daten bieten sich nun viele interessante Anwendungen. Insbesondere für Gussprodukte, welche in der Regel komplexe Formen mit Hohlräumen aufweisen, ist die industrielle CT sowohl für Messaufgaben als auch für die Detektion von Fehlern hervorragend geeignet.“ [Flisch2006]

4.5.4 Röntgen-Computertomographie zur Charakterisierung von Inhomogenitäten in Gussgefügen von Aluminium und Stahl [Harrer2007]

Autoren: B. Harrer, W. Winkler, E. Pissenberger, J. Kastner, H. P. Degischer

4.5.4.1 Einleitung

Im Metallbau (Automobile, konstruktiver Ingenieurbau) ist die Qualität der Ausgangsprodukte (Rohstoffe) von entscheidender Bedeutung für die gewünschten und geforderten Ansprüche des Endproduktes. Da die Überprüfung von Materialfehlern mit herkömmlichen Methoden auf zweidimensionale Verfahren zurückgreift, kann diese Qualitätskontrolle einerseits sehr aufwendig ausfallen oder gerade bei sehr komplexen Strukturen wie z.B. Aluminiumschäumen gewisse Anomalien und Unregelmäßigkeiten nicht immer vollständig aufdecken. Aus diesem Grund werden in diesem Bericht die Möglichkeiten der Strukturanalyse und der Weiterverarbeitung der, mittels Computertomographie (μ XCT) erfassten, räumlichen Daten erläutert. Daher wurden folgende Aufgabenstellungen untersucht:

- Entmischung in einer Aluminium-Kupfer-Legierung (Probe A)
- Gasporen in Stahl (Probe B, C)
- Erstarrungslunker in Stahl (Probe D)
- Nichtmetallische Einschlüsse in Stahl (Probe E)

Die Proben wurden jeweils aus Barren und Bramen entnommen und die Auswertung der Daten der Computertomographie mit herkömmlichen Verfahren verglichen, um die Aussagekraft und die Genauigkeit der CT-Messung zu überprüfen.

4.5.4.2 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden an der FH Wels durchgeführt. Dabei wurde ein Gerät der Firma Wälischmiller (heute Rayscan) eingesetzt. Das Gerät verfügt über folgende Komponenten:

- Gerät: Rayscan 250 XE
- Mikrofokusröntgenröhre: 225 kV
- Brennfleck: min. 5 μm
- Detektor: Flachdetektor mit 410*410 mm², 1024*1024 Pixel und einer 16 bit Grauwert-Digitalisierung

Die für die Messungen verwendeten Probengrößen, Geräteparameter und die jeweils erzielten Auflösungen sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter [Harrer2007]

	Probenquerschnitt [mm ²]	Röhrenspannung	Röhrenstrom	Integrationszeit	Projektionsanzahl	Filterung	Auflösung (Voxelsize)
Probe A	3,5*5,0	107 kV	69 μm	4 s	900	Ohne Filter	(6,7 μm) ³
Probe B	4,1*4,6	196 kV	41 μm	4 s	900	0,15 mm Cu	(6,8 μm) ³
Probe C	10,0*10,4	190 kV	90 μm	4 s	900	0,9 mm Cu	(17,2 μm) ³
Probe D	13,5*13,9	225 kV	53 μm	4 s	720	0,5 mm Cu	(21,4 μm) ³
Probe E	3,9*3,9	169 kV	35 μm	4 s	900	Ohne Filter	(6,1 μm) ³

4.5.4.3 Ergebnisse

„Mittels μXCT kann aufgrund der Form von interdendritischen Eutektika in Al-Stranggussbarren, sowie aus der geometrischen Form und Anordnung von Lunkern in Stahlbrammen die dendritische Erstarrung beschrieben werden.“ [Harrer2007]

„Poren und Einschlüsse können von Erstarrungslunkern anhand der dreidimensionalen Form klar unterschieden werden.“ [Harrer2007]

„Bei der Messung der Probe A konnten eindeutige Bereiche erhöhter Absorption identifiziert werden.“ [Harrer2007]

„Die Pore in Probe C wurde zielpräpariert und der Schliff zeigt eine sehr gute Übereinstimmung in der Form und Größe mit den CT-Daten.“ [Harrer2007]

4.5.5 3D-Computertomographie und Materialographie – Potential für angewandte Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse [Löffler2007]

Autoren: R. Löffler, T. Bernthaler, A. Nagel, G. Schneider

4.5.5.1 Einleitung

Die Computertomographie stellt eine innovative und leistungsstarke Untersuchungsmethode dar, um bei der Werkstoffentwicklung und Materialprüfung Aussagen über innere Fehler, Strukturen und räumliche Dichteverteilungen treffen zu können. Daher werden in diesem Artikel anhand von drei verschiedenen Proben die Machbarkeit und die Grenzen der dreidimensionalen industriellen Computertomographie vorgeführt.

4.5.5.2 Versuchsaufbau

Die in nachstehender Tabelle angeführte Probe 1 wurde mit unterschiedlichen Geräten durchleuchtet und die einzelnen Messergebnisse gegenübergestellt.

- Phoenix|x-ray (Nanofokus): Nanofokus™-Röntgenröhre mit 160 kV
- Wälischmiller: Mikrofokusröntgenröhre mit 225 kV
- Skyscan: Mikrofokusröntgenröhre mit 100 kV
- Die Probe 2 wurde mit der Nanofokus™-Röntgenröhre (160 kV) und die Probe 3 mit der Mikrofokusröntgenröhre tomographiert.

Tabelle 4.2: Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter [Löffler2007]

Nr.	Probe	Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	Größe [mm]	Untersuchungsziel	Programm
1	Schweißung Lambdasondengehäuse	Inconel-Stahl	7,8	4*5*2	Poren in der Schweißung	μCT
2	Fragment Doppelring-Biegebruchprobe	ZrO ₂ -Keramik mit Al ₂ O ₃ -Partikel	6,0	4*2*0,3	Material- und Gefügeinhomogenitäten	μCT, LiMi, REM, EDX
3	Grünteil Isolatorbauteil	Al ₂ O ₃ -Keramik-Granulat	3,9	Ø 5	Material- und Gefügeinhomogenitäten	μCT, LiMi, REM, EDX

4.5.5.3 Ergebnisse

„Die Röntgen-Computertomographie (Röntgen-CT) ist eine attraktive zerstörungsfreie Prüfmethode mit welcher sich Strukturen von Bauteilen und Werkstoffen räumlich analysieren und darstellen lassen.“ [Löffler2007]

„Hohen Nutzen und Effizienz bringen die hochaufgelöste 3D-CT-Analyse und die Verknüpfung mit den klassischen Materialographiemethoden im Bereich der Werkstoff- und Prozessentwicklung, der Qualitätssicherung und vor allem der Schadensanalytik.“ [Löffler2007]

4.6 Sonstige Materialien

4.6.1 Charakterisierung kohlenstofffaserverstärkter Metalle und Polymere mittels Röntgen-Computertomographie [Cornelis2005]

Autoren: E. Cornelis, A. Kottar, H. P. Degischer

4.6.1.1 Einleitung

In diesem Bericht wurde die Anwendbarkeit, die Genauigkeit und die Auflösungs- und damit Anwendungsgrenzen der Computertomographie bei der Überprüfung und Qualifizierung von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen getestet. Zum Vergleich wurden die anhand der Computertomographie ermittelten Werte mittels Schlifffbildern und Rasterelektronenmikroskopie verglichen.

„Anhand einiger Aufnahmen endlosfaserverstärkter Materialien mittels hochauflösender Mikrotomographie (μ XCT) wird die Erkennbarkeit von Inhomogenitäten wie Porositäten, Risse oder Matrixagglomerationen gezeigt und die quantitative Erfassung der Qualität der Faserverteilung dargestellt.“ [Cornelis2005]

4.6.1.2 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen kam ein Gerät der Firma *SkyScan* zum Einsatz, wobei folgende Geräte- und Messungsparameter verwendet wurden.

- Gerät: 3D Desktop-Tomograph (SkyScan 1072)
- Mikrofokusröntgenröhre (80 kV): 50 kV, 100 μ A
- Vorfilter: 0,8 mm Aluminium
- Detektor: Szintillationsdetektor mit 1024*1024 Pixel
- Auflösung: 8 μ m

Es wurden folgende Materialien untersucht:

- Kohlenstofffaserverstärktes Epoxid
- Endlosfaserverstärkte Leichtmetalle (CFRM)

Wobei die untersuchten CFRM-Proben vom Leichtmetall-Kompetenzzentrum Ranshofen (LKR) sowie vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden (ILK) gefertigt wurden und in folgender Tabelle aufgelistete Materialparameter aufweisen.

Tabelle 4.3: Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter [Cornelis2005]

Akronym	Matrix	C-Faser	Anordnung	V _r [%]	Abmessungen
Al/M40/UD	Al(99,85)	M40B	Unidirektional	74±3	150*65*2 mm ³
Mg/M40/UD	MgAl 0,6	M40	Unidirektional	70±1	150*65*2 mm ³
Al/M40/st0/±60°	Al(99,85)	M40B	[0,60,2(- 60), 60,0°] Stapel	64±4	150*65*2 mm ³
Mg/T300/w0/90°	MgAl 0,2	T300J	0/90° Gewebe (50%/50%)	55±3	15*5*2 mm ³

4.6.1.3 Ergebnisse

„Mikrotomographie erlaubt die Visualisierung der räumlichen Anordnung von C-Faserbündeln in Leichtmetall- und Epoxidmatrix Verbundwerkstoffen. Mit der erzielten Auflösung von ca. 10 µm sind einzelne Fasern nicht auflösbar, aber es können Matrix-agglomerationen, Risse und Dichteinhomogenitäten erfasst werden. Packungsdichten von Fasern können in Bezug auf ein Referenzmaterial quantifiziert werden und damit als Qualitätskriterium dienen.“ [Cornelis2005]

4.6.2 Photogrammetrische und computertomographische Erfassung von Deformationen, Rissentwicklungen und Strukturveränderungen bei Belastungsversuchen von textilverstärkten Probekörpern [Maas2003]

Autoren: H.-G. Maas, U. Hampel, M. Schulze

In dieser Arbeit wurden Proben aus Beton und Holz, die jeweils mit Textilfasern verstärkt wurden, bezüglich des Belastungs- und Schädigungsverhaltens mittels Photogrammetrie und Computertomographie untersucht. Darüber hinaus wird die Einsatzmöglichkeit der Computertomographie gezeigt, um Rissverteilungen und das Grenzschichtverhalten bei Betonprobekörpern zu analysieren.

„Bei baumechanischen Untersuchungen lassen sich mittels CT zerstörungsfrei Objektvolumen zeitaufgelöst erfassen.“ [Maas2003]

„Bruchvorgänge und die Bildung von Rissen können mittels CT somit nicht unmittelbar, sondern nur die Situation vor und nach einem dynamischen Ereignis dargestellt werden.“ [Maas2003]

„ ... können mit der CT direkt die Dichteverteilungen und deren Veränderung aufgenommen werden. Darüber hinaus ist die Lokalisierung und Quantifizierung von Fehlstellen und Rissen, sowie deren Verfolgung im Objekt möglich.“ [Maas2003]

4.6.3 Computertomographie – Ein innovatives Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffentwicklung [Weberbauer1998]

Autoren: T. Weberbauer, F. Eidmann, H. Zayer, R. W. Kenn, S. Popp, H. Möhler, G. Schönefeld

4.6.3.1 Einleitung

Bei der Herstellung von Kunststoffbauteilen werden sehr hohe Qualitätsanforderungen gestellt, wodurch die zerstörungsfreie Überprüfung der gefertigten Produkte von hohem Interesse für die Industrie ist. In dieser Arbeit wurde die Computertomographie eingesetzt, um die Güte ultraschallverschweißter Sensorgehäuse aus glasfaserverstärktem Polybutylenterephthalat (PBT) zu untersuchen.

4.6.3.2 Versuchsaufbau

Für die Messungen wurde ein medizinischer CT (PQ-CT) der Firma Picker verwendet. Über die Probenabmessungen sowie die verwendeten Messungsparameter sind keine weiteren Angaben vorhanden.

Durch Belastungstests, die nach den Messungen an der jeweiligen Schweißnaht durchgeführt wurden, konnten die Ergebnisse der Computertomographie bestätigt werden. Des Weiteren wurden die CT-Ergebnisse mittels Lichtmikroskopie überprüft und ebenfalls bestätigt.

4.6.3.3 Ergebnisse

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sich die Computertomographie prinzipiell sehr gut für die Qualitätskontrolle von Kunststoffteilen eignet, jedoch gibt es auflösungsbedingte Grenzen in der Erkennung von herstellungsbedingten Anomalien.

„Klar definierbare Fehlstellen sind in dieser Positionierung des verschweißten Sensorgehäuses mit dem Detektor nicht erkennbar. Sehr gut nachweisbar sind Lufteinschlüsse, die sich während des Schweißvorganges gebildet haben.“ [Weberbauer1998]

„Mittels Computertomographie lassen sich interne Strukturen in Bauteilen sichtbar machen,...“ [Weberbauer1998]

5 Anschaffung und Betrieb eines Computertomographen

Zur Erstellung dieses Kapitels wurden folgende Publikationen verwendet:

[Dimitrijevic1972], [DIN1996], [Renger2007], [Tagung2008] sowie die Unterlagen angeführter Gerätehersteller;

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik gegeben. Anhand der ausgewerteten Gespräche mit den einzelnen Instituten (siehe Kapitel 6), die an der Anschaffung und Mitbenutzung eines industriellen Computertomographen interessiert wären, wurden die gewünschten Anforderungen ermittelt. Aufbauend auf diese Auswertung wurde eine exemplarische Geräteauswahl getroffen und die damit verbundenen Kosten und Rahmenbedingungen näher betrachtet und angeführt.

Die Grundlage dieser fiktiven Gerätebestellung bilden die Ansprüche und Wünsche der einzelnen, befragten Institute und die derzeit verfügbaren Geräte laut Hersteller.

Ein Gerät, das mehrere Forschungsgebiete und unterschiedlichste Anforderungen erfüllen soll, kann nur ein Kompromiss sein, der so gut wie möglich sein muss, da die Anschaffungskosten für einen Computertomographen und alle weiteren damit verbundenen Kosten enorm sind.

5.1 Gerätetechnik (Geräte und Einsatzgebiet)

Es gibt viele verschiedene Gerätetypen, die ganz unterschiedliche Vorzüge und dementsprechende Einsatzgebiete aufweisen. Je nach Material, Probengröße und gewünschter Auflösung gibt es geeignete Geräte. Im Wesentlichen kann man die Geräte in zwei Typen einteilen. Geräte mit einem **offenen** oder einem **geschlossenen Aufbau**.

Bei den meisten Anbietern gibt es eine breite Palette an Geräten sowie maßgeschneiderte Sonderanfertigungen mit den gewünschten Komponenten und Leistungsmöglichkeiten, daher wird im Folgenden nur ein exemplarischer Überblick zur groben Differenzierung (offener, geschlossener Aufbau) gegeben.

5.1.1 Geräte mit geschlossenem Aufbau

Der Unterschied der einzelnen Geräte liegt meistens bei den unterschiedlichen Messbereichen. Vereinfacht kann man sagen, dass je kompakter der Geräteaufbau ist desto kleiner sind die möglichen Probenabmessungen. Daher ist die erreichbare Auflösung auch erheblich höher als bei Geräten mit offenem Aufbau, die eher für große und sehr dichte Materialproben geeignet sind. Aus diesem Grund sind die Geräte auch kompakter, wodurch der Strahlenschutz meistens schon in der Gerätehülle integriert ist, was die Anforderungen an den Aufstellungsort des Gerätes erheblich reduziert.

CT-COMPACT



Hersteller: *Procon X-Ray, CT-Compact*
(Abbildung lt. Hersteller)

Röhrenspannung: 130 kV

Flat panel detector: 1 k*1 k; 12 bit

Messungsdauer: 4 bis 20 min

Probenabmessung: 70 mm

Probengewicht: 5 kg

Voxelsize: 5 μ m

Hersteller: *Macro Science Technology, MSX CT-500*
(Abbildung lt. Hersteller)

Röhrenspannung: 160 oder 225 kV

Flat panel detector: 4 k*4 k; 16 bit



Hersteller: *Werth, Tomo Scope HV 500*
(Abbildung lt. Hersteller)

Röhrenspannung: 225 kV

Auflösung: 2000*2000 Pixel

Probenabmessungen:

- Durchmesser 350 mm
- Länge 350 mm

5.1.2 Geräte mit offenem Aufbau

Geräte mit offenem Aufbau erreichen in der Regel nicht die Auflösung und Messgenauigkeit von Geräten mit geschlossenem Aufbau. Der Aufgabenbereich der Geräte mit offenem Aufbau liegt im Wesentlichen bei sehr dichten Materialien und Proben mit erheblich größeren Abmessungen als es Geräte mit geschlossenem Aufbau zulassen. Daher muss für nahezu jedes Gerät mit offenem Aufbau der geforderte Strahlenschutz

mittels eines speziell dafür vorgesehenen Messraumes sicher gestellt werden. Die Anforderungen an den Messraum sind in Kapitel 6.2 näher erörtert.



Hersteller: *Wälischmiller, RayScan 200 XE*
(Abbildung lt. Hersteller)

Röntgenquelle: Mikrofokus 10 bis 250 kV

Brennfleck: 3 bis 250 μm

Objektabmessungen (\emptyset /H): 1 bis 2000 mm/1 bis 5200 mm

Max. Objektgewicht: 250 kg

Detektor: 410*410 mm, 1024*1024 Pixel

Digitalisierung: 16 bit

Messzeit: 2 bis 30 Min.

Detailerkennbarkeit: 1 μm

Hersteller: *phoenix|x-ray, v|tome|x|450*
(Abbildung lt. Hersteller)

Röntgenquelle: 240 kV (Mikrofokus) und 450 kV (Minifokus)

Max. Probengröße: 1000*800 mm

Max. Probengewicht: 100 kg

Max. Voxel-Auflösung: < 2 μm



Hersteller: *YXLON, Y.CT Universal* (Abbildung lt. Hersteller)

Röntgenquelle: 60 bis 450 keV

Röhrenstrom: 2,0 bis 9,0 mA

Objektabmessungen (\emptyset /H): 505/1200 mm

Objektgewicht: 75 kg

Detektor: Zeilendetektor oder Flächendetektor (optional)

Ortsauflösung: 73 bis 195 μm

5.2 Messraum und Strahlenschutz

Da die bei der Computertomographie verwendete Röntgenstrahlung bei einer Überdosierung gesundheitliche Folgen für den menschlichen Organismus bewirkt, muss der notwendige Strahlenschutz für das Personal, das den Computertomographen bedient, gewährleistet sein. Aus diesem Grund wird bei jedem Gerät mit vorhandener Strahlungsquelle ein Strahlenschutzbeauftragter benötigt. Dieser ist für den sachgemäßen Umgang mit der vorhandenen Strahlung verantwortlich.

Bei Geräten mit geschlossenem Aufbau ist der Strahlenschutz bereits in der Gerätehülle integriert, was die Handhabung mit diesen Gerätetypen erleichtert. Gegebenenfalls ist das Gewicht des Geräts zu berücksichtigen.

Bei Geräten mit offenem Aufbau ist aufgrund der Größe des Gerätes meistens keine, die Strahlung abschirmende Hülle vorhanden. Es gibt zwar auch offene Aufbauten, die über eine zusätzliche Kabine zum Zwecke des Strahlenschutzes verfügen, dies ist jedoch eher die Ausnahme. Im Regelfall muss bei Geräten mit offenem Aufbau ein Strahlenschutzraum vorhanden sein, in dem das Gerät aufgestellt und betrieben werden kann.

Die Dimensionen des Strahlenschutzraumes richten sich im Wesentlichen nach den Geräteabmessungen. Dabei ist vor allem auf das Gewicht des Gerätes zu achten, dass bei Geräten mit offenem Aufbau mehrere Tonnen (**~2 bis 4 t**) erreichen kann und man bei der Aufstellung des Gerätes im untersten Geschoss ein verstärktes Fundament benötigt, das auch imstande sein muss, auftretende Schwingungen, die die Messung beeinflussen könnten, zu absorbieren. Vor allem bei Geräten, die nicht direkt über Fundamenten, sondern direkt auf einer Zwischendecke aufgestellt sind, ist besondere Aufmerksamkeit auf die erhöhten statischen Anforderungen zu legen.

Die Wände des Strahlenschutzraumes haben die Aufgabe, die bei der Messung anfallende Röntgenstrahlung zu absorbieren. Jedes Material hat andere Absorptionseigenschaften, die hauptsächlich von der Materialdichte, also der jeweiligen atomaren Ordnungszahl abhängen, wie im Kapitel 2.1.3.2 (ABSORPTION) näher erläutert wurde. Aus diesem Grund wird auch oft Blei verwendet, um die Strahlung abzuschirmen. Eine günstigere Variante ist es, stattdessen ausreichend dicke Betonschichten zu verwenden. Dabei gibt es verschiedenen Komponenten die dem Beton beigemischt werden können, um seine Absorptionsfähigkeit zu erhöhen. Bei Neuerrichtung ist der Variante der Abschirmung mittels Beton der Vorzug zu geben. Es ergeben sich zwar Bauteilstärken, je nach Stärke der Strahlungsquelle, von ungefähr 50 bis 70 cm, aber die Materialkosten sind bei Beton erheblich geringer als bei Blei. Bei einer nachträglichen Aufrüstung (Adaption) eines bereits bestehenden Raumes sind die bei den unterschiedlichen Varianten entstehenden Kosten gegenüberzustellen.

Die oberen und unteren Raumbegrenzungen sind natürlich auch zu berücksichtigen. Falls das Gerät im untersten Geschoss aufgestellt wird, könnte eventuell die Fundamentplatte den erforderlichen Strahlenschutz ohne weitere Maßnahmen bewerkstelligen.

Die Öffnungen, wie z. B. Türöffnungen, müssen den nötigen Strahlenschutz sicherstellen und mit einer geeigneten Verschluss-Automatik gesichert werden, damit sichergestellt wird, dass sämtliche Zugänge während der Messung geschlossen sind. Außerdem ist auf etwaige Mauer- und Deckenöffnungen für benötigte Installationen (Strom, Luft etc.) Rücksicht zu nehmen und für eine geeignete Abschottung zu sorgen.

5.3 Betrieb

Für den Betrieb eines Gerätes mit Strahlungsquelle wird auf jeden Fall ein Strahlenschutzbeauftragter benötigt, der für die Sicherheit des Personals Sorge trägt.

Für einen reibungslosen Ablauf des Betriebes empfiehlt es sich mindestens zwei Mitarbeiter dafür vorzusehen. Das benötigte Bedienungspersonal richtet sich hauptsächlich nach der Auslastung des Gerätes. Des Weiteren hängt der Bedarf an Mitarbeitern von den eventuell geforderten Nachbearbeitungen (Geometrievermessungen, etc.) ab.

Die Wartung des Gerätes kann nicht vom bedienenden Personal selbst durchgeführt werden und ist bei externen zertifizierten Firmen in Auftrag zu geben. Daher empfiehlt es sich, bereits beim Kauf des Gerätes einen längerfristigen Wartungsvertrag abzuschließen. Einige Hersteller bieten beim Kauf eines ihrer Produkte gleich eine Abnahme, Einschulung und Wartung des Gerätes für ein bis zwei Jahre an.

5.4 Kosten

Die verschiedenen Hersteller bieten fertige Geräte und Aufbauten an. Vor allem bei den größeren Geräten, die meistens einen offenen Aufbau aufweisen, ist es üblich, dass der Geräteaufbau und die einzelnen Komponenten individuell auf die jeweiligen Bedürfnisse und Anforderungen des Kunden (Forschungseinrichtung) angepasst werden. Das bedeutet, dass bei der Auswahl der Gerätekomponenten und der damit verbundenen Kosten eine Fülle von Möglichkeiten zur Verfügung steht.

Daher kann hier kein Kostenvergleich der einzelnen Hersteller vorgenommen werden, da es eine Vielzahl an Kombinationen gibt, die teilweise stark variieren und keine sinnvolle Gegenüberstellung zulassen. Es soll aber ein gewisser Kostenrahmen aufgezeigt werden, damit der interessierte Leser eine ungefähre Vorstellung erhält, in welcher Größenordnung sich die Kosten der industriellen Computertomographie bewegen.

Neben den reinen Gerätekosten gibt es noch eine Vielzahl an Kostenpunkten, die vor der Anschaffung eines Gerätes bedacht werden müssen, um einen effizienten und wenn möglich kostendeckenden Betrieb zu gewährleisten.

5.4.1 Gerätekosten

Die Kosten des Gerätes werden in zwei Hauptkategorien unterteilt.

- **Anschaffungskosten:** Alle in Verbindung mit dem Gerät entstehenden Kosten von der Bestellung bis zur ersten möglichen Messung.
- **Betriebskosten:** Folgekosten, die den reibungslosen Betrieb des Gerätes gewährleisten sollen.

5.4.1.1 Anschaffungskosten

Die Kostenangaben beziehen sich hauptsächlich auf Geräte mit offenem Aufbau, da anhand der Abmessungen und des enormen Gewichtes weitaus größere Kosten bei Transport, Montage, Wartung etc. anfallen. Die Kosten für den benötigten Hochleistungs-Rechner und für die Lizenzen hängen im Wesentlichen von der zum Einsatz kommenden Software ab.

- **Gerätekosten:**
 - Bei kleineren Geräten mit geschlossenem Aufbau: 120.000,- bis 500.000,- €
 - Bei größeren Geräten mit offenem Aufbau: 500.000,- bis 1.100.000,- €
- Verpackung und Transport: 5.000,- bis 10 000,- €
- Montage und Abnahme: 20.000,- bis 35.000,- €
- IT-Arbeitsplatz: 20.000,- bis 35.000,- €
- Zusätzliche Software: 20.000,- bis 30.000,- €

5.4.1.2 Betriebskosten

- **Wartung:** 20.000,- bis 30.000,- € / Jahr
- **Fogelizenzen für Software:** 15.000,- bis 25.000,- € / Jahr
- **Schulungen:** Werden teilweise beim Kauf kostenlos zur Verfügung gestellt. Jedoch können beim Einsatz von zusätzlicher Auswertungssoftware noch weitere Kosten entstehen.

5.4.2 Personalkosten

Bei den Personalkosten können keine genaueren Angaben gemacht werden, da diese sehr stark vom eingesetzten Gerät und den gewünschten Untersuchungen bzw. Auswertungen und der Weiterverarbeitung der Messdaten abhängen.

Es empfiehlt sich jedoch mindestens zwei, besser sogar drei Mitarbeiter zur Verfügung zu stellen, um einen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten zu können.

Vor allem die Kosten des benötigten Strahlenschutzbeauftragten (Aus- und Weiterbildung) sind zu berücksichtigen.

5.4.3 Kosten einer Messung

Die Kosten einer Messung können sehr unterschiedlich sein. Zum Einen kommt es auf das verwendete Messgerät und aller damit verbundenen Anschaffungs- und Betriebskosten, zum Anderen auf das zu messende Objekt (Abmessungen, Gewicht, etc.) an. Die Kosten spiegeln sich dabei nicht nur in den reinen Anschaffungs- und Betriebskosten wieder, sondern vor allem in den je nach Gerätetyp sehr unterschiedlichen Messzeiten. So kann z.B. eine Messung bei einem Gerät mit offenem Aufbau in ca. 20 – 40 min. pro Messung erledigt sein, wohingegen eine einzelne Messung bei Geräten mit geschlossenem Aufbau mehrere Stunden dauern kann. Hinzu kommen noch die unterschiedliche Handhabung des Probekörpers und die eventuelle Probenaufbereitung. Es macht natürlich einen Unterschied, ob es sich um Proben mit Abmessungen im mm-Bereich oder ganze Karosserieteile handelt.

Ein weiterer Kostenaspekt ist die vom Kunden beauftragte Datenauswertung, Betreuung bei der Datenanalyse und mögliche Weiterverarbeitung, wie z.B. eine CAD gestützte Geometrieauswertung und Oberflächenerfassung. Das bedeutet, dass vor allem die Wünsche und die Erwartungen des Kunden bezüglich der Ergebnisse die Kosten stark beeinflussen. Dabei geht es nicht nur um eine ausreichende Beratung, sondern vor allem um die Messziele (erwartete Auflösung der Messung, etc.). So kann z.B. bei ein und demselben Probekörper eine geringe Auflösung in relativ kurzer Messzeit erreicht werden, wohingegen je nach Beeinflussung der Messparameter eine höhere Auflösung erzielt werden kann, womit aber auch die Dauer und die Kosten einer Messung erhöht werden. Des Weiteren ist es auch möglich die Auflösung zu erhöhen, indem der Probekörper in mehrere Messbereiche unterteilt wird, wodurch sich die Anzahl der Messungen je nach Anzahl der Bereiche vervielfacht.

Nicht unwesentlich ist auch die Frage, wer die Messung und zu welchem Zwecke durchführt. Von einer Forschungseinrichtung die reine Grundlagenforschung betreibt bis hin zu einem kommerziellen Unternehmen, welches seine Leistungen auf dem freien Markt der Industrie anbietet, sind natürlich sämtliche Zwischenlösungen denkbar. In der Praxis zeigt sich, dass es sich oft um eine Mischform handelt. So gibt es einige Forschungseinrichtungen, die mit Grundlagenforschung angefangen haben und sich im Laufe der Zeit auch einen Ruf und Kundenstamm unter den Gewerbetreibenden erarbeitet haben und dadurch mittlerweile auch reine Dienstleistungen anbieten. Diese Variante stellt sich als sehr zielführend dar, da es möglich ist, mit Forschungsprojekten die Anschaffung eines Computertomographen zu bewerkstelligen und mittels kommerziellen Aufträgen eine gute Auslastung des Gerätes zu erreichen und somit den laufenden Betrieb zu gewährleisten und zu finanzieren.

Im Wesentlichen beeinflussen folgende Parameter die Kosten einer Messung:

- Probekörper (Abmessung, Gewicht, Material,...)
- Probenauf- oder Probenvorbereitung
- Zusatzaufbauten bei der Messung (Belastung der Probe, besonderes Klima,...)
- Verwendetes Gerät
- Gewünschte Auflösung (Integrationszeiten, Messbereiche,...)
- Auswertung und Nachbearbeitung der Messdaten (Geometrieerfassungen, etc.)
- Sonstige Kundenanforderungen

Die Kosten einer Messung können zwischen **250 bis 2000 Euro je Messstunde** liegen.

Teil 3 – Gerätewahl und durchgeführte Untersuchungen

6 Auswertung der Anforderungsparameter eines industriellen Computertomographen aus der Sicht der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden einige Gespräche mit den an Untersuchungen mittels industrieller Computertomographie interessierten Fachbereichen und den jeweiligen dafür zuständigen Mitarbeitern geführt.

Dieses Kapitel gibt eine Aufzählung der Institute und der jeweiligen gewünschten Untersuchungen sowie deren grundlegende Erwartung und Zielsetzungen bezüglich des Einsatzes der computertomographischen Untersuchung wieder. Bei den Gesprächen wurde vor allem auf die zu untersuchenden Materialien, Abmessungen und die angestrebte Auflösung, also die erwartete Genauigkeit der Messungsergebnisse eingegangen.

Im Vordergrund stand die Fakultät für Bauingenieurwesen, jedoch wurden auch Gespräche mit anderen Instituten und Forschungseinrichtungen, die bereits derartige Untersuchungen durchführen oder ein potenzielles Interesse an einem Computertomographen haben könnten, geführt.

Dadurch soll eine höhere Geräteauslastung und vor allem ein breiteres wissenschaftliches Spektrum abgedeckt werden. Außerdem war es dadurch leichter, einen gewissen Einblick in die Tätigkeitsbereiche und Aufgabenstellungen anderer Forschungsfelder zu erhalten, deren Problemstellungen zu verstehen, um somit die Grundlagen für eine optimale Geräteauswahl treffen zu können.

6.1 Fakultät für Bauingenieurwesen

6.1.1 Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen – E202

Arbeitsgruppe Holz

Gesprächspartner:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Karin Hofstetter

Materialien:

Holz (vorwiegend Fichte, aber auch andere Hölzer)

Probengrößen:

Breite: 80 mm, Höhe: 40 mm, Länge: 500 bis 1000 mm

Probengewicht:

< 5 kg

Auflösung:

< 100 µm

Forschungsziele:

Erkennung von Ästen, Jahresringen, Strukturschäden, Harztaschen, etc.

Arbeitsgruppe Brand

Gesprächspartner:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Lackner

Materialien:

Asphalt und Beton

Probengrößen:

Bohrkerne bis Ø 150 mm

Höhen bis 300 mm

Probengewicht:

< 15 kg

Auflösung:

<100 µm

Forschungsziele:

- Schäden, Risse, Ermüdungsverhalten
- Verteilung der Kunststofffasern im Beton
- Porenraumbestimmung

Arbeitsgruppe Mikro- und Biomechanik

Gesprächspartner:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hellmich

Materialien:

Knochen

Probengrößen:

Maximale Abmessungen ca. 300*300*300 mm

Probengewicht:

< 10 kg

Auflösung:

< 100 µm

Forschungsziele:

Analyse der Strukturen und des Knochenaufbaues

6.1.2 Institut für Hochbau und Technologie – E206

Gesprächspartner:

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

Materialien:

Beton, Ziegel, Holz und eventuell Verbundmaterialien

Probengrößen:

Sehr variabel und abhängig von der Aufgabenstellung

Bohrkerne bis \varnothing 150 mm

Höhen bis 300 mm

Probengewicht:

Bis zu 20 kg

Auflösung:

50 – 100 μ m

Forschungsziele:

- Untersuchung der einzelnen Elemente (Tragwirkung und Verbundeigenschaften) von Fassadenelementen
- Untersuchungen von Holz-Beton-Verbunddecken
- Holzverbindungen im konstruktiven Hochbau, auf dem Gebiet der Bauwerkserhaltung und der Denkmalpflege
- Mauerwerksuntersuchungen und Begutachtung historischer Mörtel und Putze
- Schadensanalysen von im Hochbau gebräuchlichen Stahlbetonkonstruktionen

6.1.3 Institut für Geotechnik – E220

Gesprächspartner:

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Andreas Rohatsch

Materialien:

Naturstein (Sandstein, Granit, Kalkstein, Marmor,...)

Probengrößen:

Bohrkerne mit \varnothing 50 bis 70 mm und einer Höhe von 100 bis 150 mm

Steinbrocken mit ungefähr 300*300*300 mm

Probengewicht:

Bohrkerne: je nach Abmessungen, ungefähr 1 bis 2 kg

Steinbrocken: bis zu 80 kg

Auflösung:

20 bis 100 μm

Forschungsziele:

- Grundlagenforschung (Porenradienverteilungen, Micro- und Macrostrukturen,...)
- Verwitterungsprofile von Fassaden und Figuren (Oberflächenbestimmungen, Risse und andere Schäden,...)
- Denkmalpflege (Steinfestiger, Risse, Klammerungen, Diplomarbeiten für Restauratoren)

6.2 Fakultät für Maschinenbau

6.2.1 Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie – E308

Gesprächspartner:

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans-Peter Degischer

Materialien:

- Faserverstärkte Kunststoffe, Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (Al, Cu, Ti, Fe-Matrices)
- Gusslegierungen (Al-, Fe-Legierungssystem), Stahl und Titanlegierungen
- Zellulare Metalle

Probengrößen:

Durchmesser < 50 mm (vorzüglich < 10 mm)

Höhe < 500 mm (i.a. < 150 mm)

Probengewicht:

< 1 kg

Auflösung:

Räumliche Auflösung > 5 μm

Forschungsziele:

- Innere Architektur heterogener Werkstoffe zu untersuchen und zu quantifizieren (z.B. Verteilung von Fasern und Partikeln, Einschlüsse, erfassen eutektischer Bereiche, Poren, Lunker, Risse etc.)
- Insitu Zug- und Druckversuche, thermische Zyklisierung
- Multi-Skalare Tomographie (Voruntersuchungen zu Synchrotron Tomografien)

6.2.2 Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik - E317

Gesprächspartner:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Philippe Kurt Zysset

Materialien:

Mineralisiertes Gewebe (Knochen)

Probengrößen:

Ø 6 bis 38 mm, Höhe: 6 bis 80 mm

Probengewicht:

< 5 kg, jedoch mit Zusatzaufbau bis zu 25 kg

Auflösung:

6 bis 50 µm (bei Strukturmessungen)

< 80 µm (bei quantitativen Messungen)

Forschungsziele:

Analyse der Strukturen und Quantifizierung der Mineralverteilung.

6.3 TVFA GmbH

Gesprächspartner:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan L. Burtscher

Materialien:

- Beton (Porenbeton, Faserbeton)
- Stahlbauteile
- Kohlefaserlamellen

Probengrößen:

Bohrkerne mit Ø 50 bis 100 mm, Höhe: 100 bis 200 mm (Beton)

Ansonsten können sich unterschiedliche Abmessungen je nach Material und Prüfkörper ergeben. So kann sich z.B. die Probengröße von Kohlefaserlamellen im Bereich von $B=40$ bis 60 ; $H=1.2$ bis 5 ; $L=10$ bis 300 mm bewegen. Die Abmessungen von Prüfkörpern aus metallischen Werkstoffen können nur schwer abgeschätzt werden. Sie sollen jedoch wesentlich kleiner sein als bei den Betonkernen.

Probengewicht:

Bis ca. 30 kg

Auflösung:

6 bis 50 μm (bei Strukturmessungen)

< 80 μm (bei quantitativen Messungen)

Forschungsziele:

Da es sich bei der TVFA GmbH um eine akkreditierte Prüfanstalt handelt, wird sich das Interesse an der eigentlichen Grundlagenforschung in Grenzen halten. Viel sinnvoller erscheint, aus der Sicht der TVFA GmbH, der Einsatz der Computertomographie auf dem Gebiet der Schadensanalyse, Begutachtung und eventuell zur Prototypenbewertung. Der Einsatz der Computertomographie hängt natürlich im Wesentlichen von den Kosten und der damit erzielbaren Ergebnissen ab.

- Porengeometrie (Vermessung, Verteilung, etc.)
- Faserverteilung bei Faserbeton
- Kohlefaserlamellen: Verteilung der Fasern, Erkennung von Matrixfehlern
- Ermüdungserscheinungen bei Schweißnähten

6.4 Zusammenfassung der gewünschten Material- und Untersuchungsparameter

Die Auswertung der durchgeführten Interviews ist anhand der Auflistung in Tabelle 6.1 ersichtlich. Eine Geräteauswahl anhand der gewünschten Untersuchungen und Materialparameter wird im Kapitel 7 vorgenommen. Des Weiteren wird auch auf die daraus bedingten Aufwendungen und die erforderlichen Rahmenbedingungen genauer eingegangen. Aber schon an dieser Stelle kann festgehalten werden, dass es mit den derzeit auf dem Markt erhältlichen Geräten nicht möglich sein wird, alle gewünschten Materialien und Probenabmessungen mit den dazu geforderten Auflösungen abdecken zu können.

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Anforderungsparameter für die Anschaffung eines Computertomographen

CT-Anforderungen				
Material	~ Abmessungen [mm]	~Gewicht [kg]	Auflösung [μm]	Aufgabenstellungen
Holz	l=80; b=80; h=500-1000	5	80	Äste, Jahresringe, Strukturschäden, Harztaschen
Kohlefaserverbundstoffe	l=30; b=100; h=300	0,2	(20-30)	Faserorientierung, Lunkerverteilung
mineralisiertes Gewebe (Knochen)	300*300*300	30	30-45	Mineralienverteilung, Geometriebestimmung
Keramik	l=200; b=200; d=30	2	40	Porenverteilung, Einschlüsse
Asphalt	\emptyset 100-300, h=200-300	15 bis 45	< 100	Porenverteilung, Einschlüsse
Natursteine (Sandstein,...)	300*300*500	80-100	20-100	Eindringung von Injektionen, Feuchtigkeitsverteilung
Natursteine (Sandstein,...)	\emptyset 50-70, h=200-300	5-10	20-100	Oberflächenschnitte, Verwitterung, Poren
Beton (Porenbeton, Faserbeton,...)	\emptyset 50-150, h=200-300	10-20	30-80	Faserorientierung, Porenradienverteilung
Stahlbeton	\emptyset 50-150, h=200-300	10-20	30-50	Stahlkorrosion, Poren
Metalle (Gusslegierungen)	\emptyset 50-150, h=200-300	< 1	> 5	Innere Strukturen (Faserverteilungen, Risse, Poren etc.), In situ Zug- und Druckversuche, thermische Zyklisierung

7 Konkrete Gerätewahl am Beispiel der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien

Hier wird anhand des Beispiels der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien die Anschaffung eines Computertomographen theoretisch durchgeplant. Es werden auf den nächsten Seiten die wesentlichen Planungsschritte und alle zu berücksichtigenden Aspekte erläutert, die bei einer solchen Anschaffung eine bedeutende Rolle spielen.

7.1 Grundlagen der Entscheidungsfindung (Voraussetzungen)

Grundlage für die Entscheidung bildet die Auswertung der Gespräche mit den einzelnen an dem Gerät interessierten Institute, der Stand der Technik (Gerätetechnik, derzeit gültige Normen, wissenschaftliche Berichte und Referenzprojekte), die Planung des neuen Laborkomplexes (Science-Center) der Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien sowie die eigenen Erfahrungen aufgrund der durchgeführten Untersuchungen, auf die in Kapitel 9 näher eingegangen wird.

7.2 Planungsschritte

- **Zielsetzung:** was soll mit dem Gerät erreicht werden; Definition der Forschungsbereiche und Einsatzgebiete; Überprüfung eventueller Synergien mit anderen Forschungseinrichtungen.
- **Eignung:** überprüfen, ob die Computertomographie überhaupt die geeignete Untersuchungsmethode ist, um die gewünschten Forschungen durchführen zu können. Darüber hinaus sollten Informationen über Referenzprojekte eingeholt werden und wenn möglich der Kontakt zu bereits bestehenden Forschungseinrichtungen, die mit der 3D-Computertomographie arbeiten, forciert werden.
- **Informationen der Hersteller:** Kontakt mit den Geräteherstellern aufnehmen, um die nötigen Informationen über den derzeitigen Stand der Technik zu erhalten.
- **Randbedingungen und Betrieb:** Überlegungen zum Aufstellungsort (Strahlenschutz, Statik,...) und zum laufenden Betrieb (Personal, Software etc.)
- **Finanzierung:** Da nicht nur die Anschaffung, sondern auch der Betrieb eines Computertomographen relativ hohe Kosten verursacht, sollte sichergestellt werden, dass die Finanzierung über einen längeren Zeitraum gewährleistet ist.
- **Erfolgskontrolle:** Durchführung eines begleitenden Monitorings.

Planungsschritte

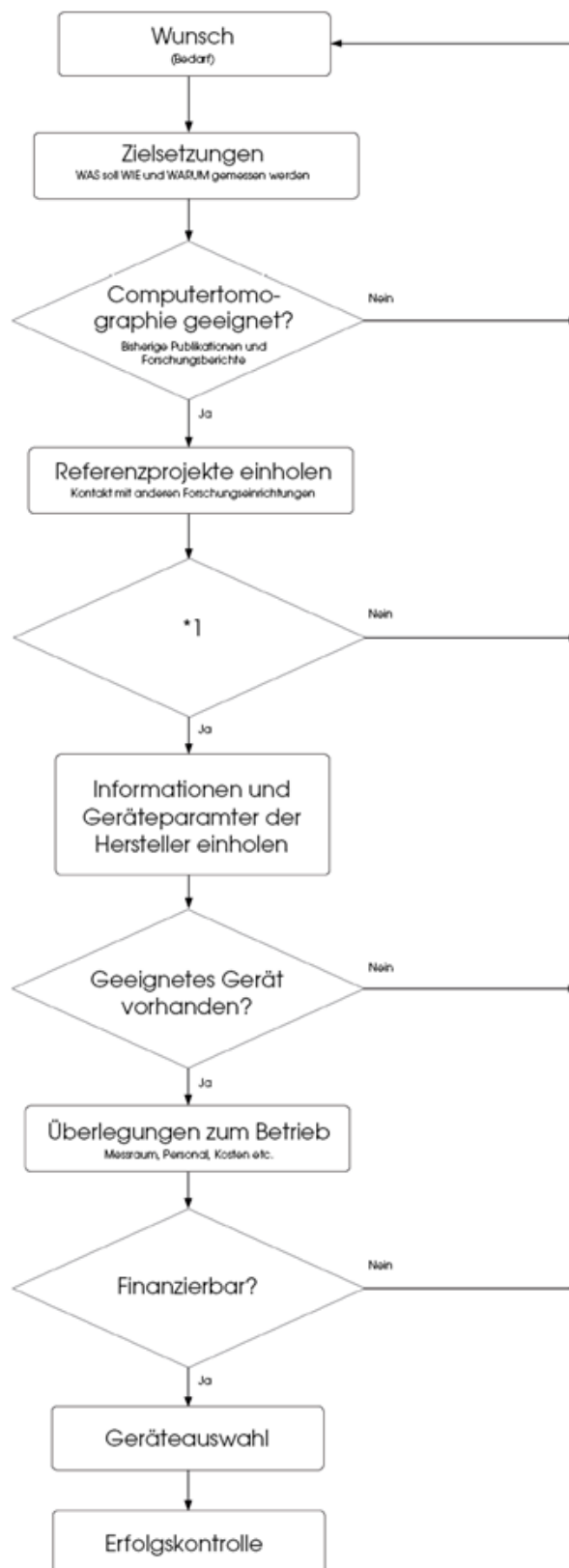


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Planungsschritte bei der Anschaffung eines CT

7.3 Auswahl eines Gerätes

Folgende Gerätehersteller wurden bezüglich Ihrer angebotenen Geräte und der damit verbundenen Kosten kontaktiert:

- *Macro-Science-GmbH*
- *Phoenix-X-Ray*
- *ProCon X-Ray*
- *Wälischmiller (RayScan)*
- *Werth*
- *YXLON*

Dabei bieten die beiden Hersteller **ProCon X-Ray** und **Werth** eher „kleinere“ Geräte mit geschlossenem Aufbau an. Daher sind diese beiden Anbieter von vornherein **nicht zu berücksichtigen**, da Ihre Geräte dem Anforderungsprofil nicht entsprechen.

Da die restlichen Hersteller sehr detaillierte bis gar keine Preisangaben zu Ihren Geräten abgegeben haben, besteht die Möglichkeit, dass die in dieser Diplomarbeit vorgenommene Gerätewahl nicht dem günstigsten Gerät entspricht. Da es sich aber um eine Diplomarbeit handelt, die diese Geräteauswahl nur theoretisch durchführt, spielt dieser Aspekt nur eine untergeordnete Rolle. Außerdem müsste bei der Anschaffung eines derart teuren Gerätes, eine europaweite Ausschreibung durchgeführt werden.

Ausgewählt wurde ein Gerät der Firma Rayscan (früher Wälischmiller): Rayscan 250



Abbildung 7.2: Seitenansicht des ausgewählten Gerätes

Geräteparameter:

- Röntgenquelle: Mikrofokus (10 bis 250 kV) und Makrofokus (50 bis 450 kV)
- Brennfleck: 3 μm bis 250 μm und 0,4 mm
- Objektmessungen \varnothing /H: 1 bis 600 mm / 1 1500 mm
- Max. Objektgewicht: 80 kg
- Aktive Detektorfläche: 410 * 410 mm²
- Anzahl der Detektorpixel (optional): 1024 *1024 (2048 *2048)
- Digitalisierung: 16 bit
- Messzeit inkl. Rekonstruktionszeit: 2 bis 30 min
- Detailerkennbarkeit: 1 μm und 0,1 bis 0,3 mm
- Kontrast: < 1 %
- Betriebsmodi: 3D-CT und Radioskopie
- Betriebsmodus optional: Ausschnitt-CT

Kosten:

- Gerätekosten: 650.000,- bis 800.000,- €
- Verpackung und Transport: ca. 7000,- €
- Montagekosten: 29.500,- €
- Wartungskosten: ca. 28.000 €/Jahr

Das ausgewählte Gerät eignet sich sehr gut für die Prüfung von großen und auch schweren Probekörpern. Aufgrund der zwei Röntgenröhren (Mikro- und Makrofokus-röntgenröhre) lassen sich auch sehr unterschiedlich dichte Materialien mit einer relativ guten Auflösung durchleuchten. Das bedeutet, dass auch kleinere Proben noch sinnvoll bearbeitet werden können. Lediglich den unteren Bereich (Probekörperabmessungen im mm-Bereich und Auflösungen im einstelligen μm -Bereich) vermag das Gerät nicht abzudecken. Da es derzeit kein Gerät auf dem Markt gibt, welches alle gestellten Anforderungen (Auswertung der Interviews mit den einzelnen Instituten) erfüllen kann, stellt dieses Gerät einen guten Kompromiss dar und deckt einen Großteil der gestellten Anforderungen ab.

Das Gerät verfügt über einen offenen Aufbau und benötigt daher einen Strahlenschutzraum, in dem das Gerät aufgestellt wird. Da sich die neuen Labors der Fakultät für Bauingenieurwesen gerade in Planung befinden, bietet es sich natürlich an, einen geeigneten Strahlenschutzraum für die eventuelle Anschaffung eines Computertomographen vorzusehen.

8 Anwendung der Computertomographie zur Erkennung von chloridbedingter Spannstahlkorrosion

8.1 Einleitung

Zur Erstellung dieses Kapitels wurden folgende Werke verwendet:

[Bertolini2004], [Breit2001], [Kolbitsch2004]

Diese Diplomarbeit beinhaltet auch einen experimentellen Teil, der sich vor allem mit dem Einsatz der Computertomographie zur Erkennung von chloridbedingter Korrosion (Lochfrass) bei Spannstahl auseinandersetzt.

Im Zuge eines Gutachtens wurden Untersuchungen an einem schadhafte Gebäude durchgeführt. Bei dem Objekt handelt es sich um ein Parkhaus in Niederösterreich.

Ziel des Gutachtens war es, den Grad der Schädigungen an den jeweiligen Bauteilen festzustellen, die Auswirkungen und Folgen der Mängel zu beurteilen und etwaige Sanierungs- und Überwachungsmaßnahmen festzulegen, um eine sichere Nutzung des Gebäudes gewährleisten zu können.

In diesem Teil der Diplomarbeit geht es vorwiegend um die Möglichkeiten der Computertomographie bei der praxisnahen Anwendung zur Schadensdetektion (Korrosion). Dazu wurden die Ergebnisse der Untersuchungen des Gutachtens herangezogen, um geeignete Stellen zur Probekörperentnahme, die mittels Computertomographie untersucht wurden, auszuwählen. Daher wird in den nächsten Kapiteln kurz auf die begutachtete Konstruktion und die getätigten Voruntersuchungen eingegangen, bevor die anschließend durchgeführte Computertomographie und deren Ergebnisse erläutert werden.

8.2 Konstruktion

Das Parkhaus wurde in Skelettbauweise aus Stahlbetonstützen und vorgespannten Stahlbeton-Verbunddecken hergestellt.

Die Verbunddecken bestehen aus Stahlträgern (Deltaträger) zwischen denen vorgespannte Hohldielelemente liegen. Diese Deckenkonstruktion wird auch als sogenannte Slim-Floor-Decke (siehe Abbildung 8.1) bezeichnet, da das Primär- (Deltaträger) und das Sekundärtragsystem (Hohldielen) in ein und derselben Ebene liegen. Abbildung 8.2 und 8.3 zeigen die einzelnen Elemente einer Slim-Floor-Decke.

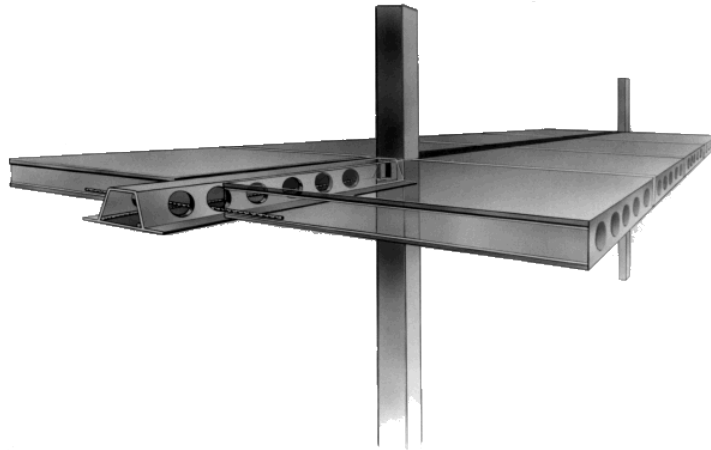


Abbildung 8.1: Systemskizze einer Slim-Floor-Decke [Kolbitsch2004]



Abbildung 8.2: Ansicht der einzelnen Elemente; Deltaträger (links), Hohldiele (rechts)

Die Spannweite der Deltaträger beträgt zwischen 9 und 11 m und die der Hohldielen rund 10 m. Die genauen Abmessungen der Querschnitte sind in Abbildung 8.3 dargestellt.

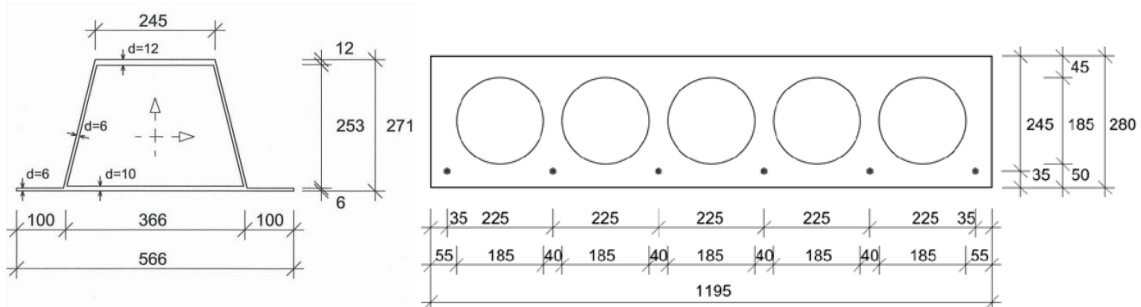


Abbildung 8.3: Schematische Querschnittsdarstellung der einzelnen Komponenten einer Slim-Floor-Decke, Delträger (links) und Vorgespannte Hohldiele (rechts), Abmessungen in [mm]

Drei Hohldielen wurden entnommen, davon zwei mit einer Breite von 1,20 m und eine weitere mit einer Breite von ca. 0,70 m.

Danach wurden die ca. 10 m langen Hohldielen-Elemente in drei ungefähr gleichgroße Stücke geteilt und zu weiteren Untersuchungen in die Versuchswerkstätten des Institutes für Hochbau und Technologie gebracht.

8.3 Problemstellung

An den vorhandenen Stahlträgern (Deltaträger) wurden an einigen Stellen, für das Alter der Konstruktion relativ starke, Korrosionserscheinungen festgestellt. Auch in früheren Gutachten konnte an mehreren Stellen erhöhte Chloridwerte in den Betonbauteilen (Hohldielen) nachgewiesen werden, die die zulässigen Konzentrationen übersteigen.

Daher stellt sich die Frage, inwieweit die vorhandenen Chloride im Beton den Spannstahl in den Hohldielen angreifen und im schlimmsten Fall zu einem abrupten Bauteilversagen führen können.

Eine mögliche Ursache für das vorhandene Schadensbild wäre eine fehlerhafte Fahrbahnabdichtung, wodurch es im Zuge des winterlichen Streudienstes zu einer erhöhten Belastung mit Chloriden käme.

8.4 Voruntersuchungen

8.4.1 Korrosion

Im Wesentlichen gibt es zwei unterschiedliche Arten von Bewehrungskorrosion. Bei der einen findet aufgrund der Karbonatisierung des Betons eine flächige Korrosion der Bewehrung statt. Durch Umwandlungsprozess wird das Volumen des korrodierten Stahls vergrößert, und dies führt meistens zu Betonabplatzungen, Oberflächenrissen und zu markanten Rostfahnen, weshalb diese Art von Korrosion relativ einfach erkennbar ist.

Der andere Fall ist die sogenannte Lochfrass-Korrosion, bei der die Oxidations- und die Reduktionszone räumlich getrennt sind und es zu einer Auflösung des Eisens ohne Vergrößerung des Volumens kommt. Dieser chemische Prozess ist in Abbildung 8.4 dargestellt.

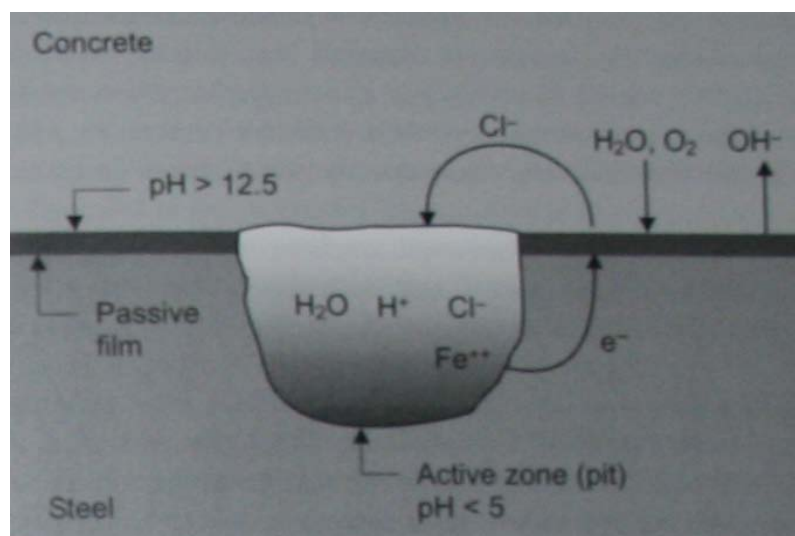


Abbildung 8.4: Schematische Darstellung der Lochfrass-Korrosion (pitting corrosion)
[Bertolini2004]

Diese Art der Korrosion ist die weitaus gefährlichere, da sie den Bewehrungsquerschnitt punktuell schwächt, was zu einer erheblichen Verringerung des Querschnittes und noch zusätzlich zu einer Kerbwirkung führen kann. Außerdem ist Lochfrass-Korrosion von außen nicht ersichtlich und nur schwierig zu detektieren. Hervorgerufen wird diese Korrosion von Chloriden, die in den Beton eingebracht werden (siehe Abbildung 8.4). Daher ist Lochfrass-Korrosion stark von den Umgebungsbedingungen abhängig, was zu sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten bei der Fortschreitung der Korrosion führen kann, weshalb es schwierig ist, Prognosen über den weiteren Verlauf der Korrosion abzugeben.

8.4.2 Potentialfeldmessungen

Die Potentialfeldmessung ist eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur Detektion von korrosionsgefährdeten Stahlbetonbauteilen. Sie kann punktuell, aber vor allem auch großflächig eingesetzt werden, was vor allem bei Industriebauten, Brücken sowie Park- und Tiefgaragen von Vorteil ist. Dadurch können die entsprechenden Objekte mit dieser Methode untersucht werden es kann und eine Einteilung der Gebäudeabschnitte, je nach Gefährdungspotential erfolgen, bevor weitere Maßnahmen ergriffen werden.

Die **Methodik** dieser Untersuchung ist relativ einfach und dennoch sehr aussagekräftig. Sobald der vorhandene Stahl im Beton korrodiert (elektrochemischer Vorgang), fließt eine kleine Spannung im Millivoltbereich. Je stärker die Korrosion ist, desto höher ist auch die vorhandene Spannung (Potential). Dieses Potential ist nun messbar. Dazu benötigt man eine Kupfersulfatelektrode und ein Millivoltmessgerät. Das bedeutet, dass bei der Potentialfeldmessung die elektrische Spannung (Potential) zwischen dem Stahl und der Kupfersulfatelektrode über die Bildung einer galvanischen Halbzelle gemessen werden kann. Dieser Vorgang ist auch in Abbildung 8.5 schematisch dargestellt.

Bei Bereichen mit anodischem Potential korrodiert der vorhandene Stahl oder ist zumindest stark korrosionsgefährdet. Somit können mit der Potentialfeldmessung potentielle Korrosionsherde ermittelt werden, wodurch eine statistische und örtliche Aussage über die Korrosion der Bewehrung getroffen werden kann.

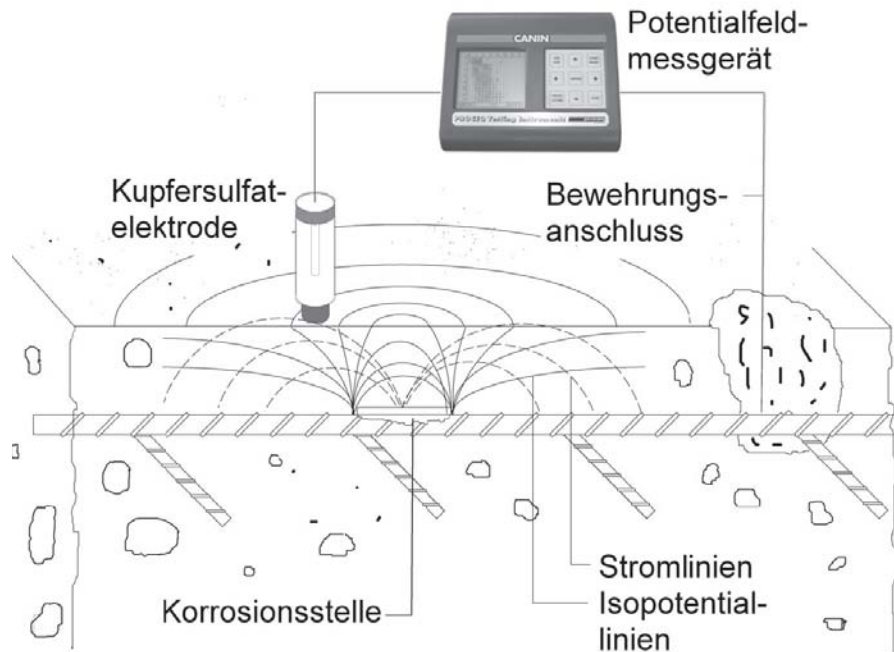


Abbildung 8.5: Schematische Darstellung der Potentialfeldmessung (Abbildung von der Firma: MT-Qualitest GmbH)

Die ACI-Richtlinie 222R-89 gibt folgende Angaben über die Korrosionsgefahr von Bauteilen, die der Luft ausgesetzt sind vor:

- Bei Potentialen unter Minus 0,35 V ist die Korrosionswahrscheinlichkeit sehr hoch.
- Bei Potentialen über Minus 0,20 V ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass keine Korrosion auftritt.
- Bei Potentialen zwischen Minus 0,20 V und Minus 0,35 V kann keine sichere Aussage getroffen werden, ob Korrosion auftritt oder nicht.

Die Potentialfeldmessungen wurden unter der Leitung von Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Deix durch die TVFA GmbH der TU Wien durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den nachstehenden Abbildungen exemplarisch für zwei Teilstücke der Hohlziele (D 1/1 und D 2/1) dargestellt.

Die Buchstaben A bis E (senkrechte Achse) geben die Stellen an, an denen Spannkabel (rote Linien) verlaufen. Die Nummerierung 1 bis 16 gibt die Stellen an, an denen Potentialmessungen durchgeführt wurden. Die gelben Punkte (Linien) geben das jeweilige Potential bei dem betreffenden Messpunkt an. Da es sich um ein anodisches (negatives) Potential handelt, sind die Stellen am gefährdetsten bezüglich Korrosion, bei denen die gelbe Messlinie einen starken Ausschlag nach unten aufweist. Die genauen Werte der einzelnen Messpunkte und deren Potentiale sind im Anhang (Abbildung 11.1 bis 11.9) genau ersichtlich. Die schwarzen Kreise geben die Stellen an, an denen Bohrkern für die Computertomographie entnommen wurden und die daneben stehenden Zahlen die jeweiligen gemessenen Potentiale.

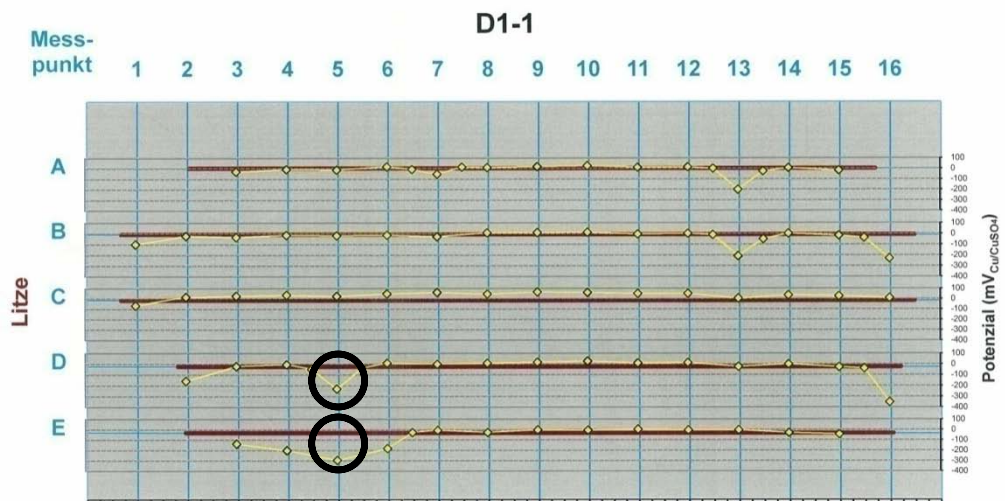


Abbildung 8.6: Auswertung der Potentialfeldmessung des Hohldielen-Elements D1-1

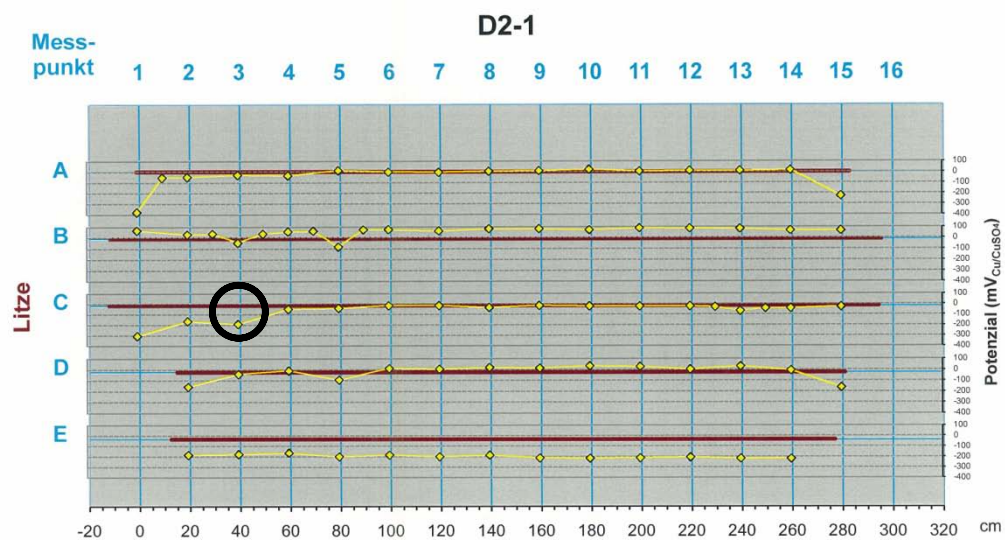


Abbildung 8.7: Auswertung der Potentialfeldmessung des Hohldielen-Elements D2-1

Auf die Entnahme von Bohrkernen aus dem Randbereich (horizontale Achse 1, 2 bzw. 15, 16) wurde trotz teilweise hoher Potentiale verzichtet, denn es konnte nicht ausgeschlossen werden, dass die Hohldielen bei der Entnahme oder dem Transport gewissen Einflüssen oder Störungen ausgesetzt waren, wodurch die gemessenen Werte eventuell verfälscht worden waren und somit nicht repräsentativ gewesen wären.

8.4.3 Bestimmung der Salzkonzentrationen (Chloride)

Nach den Potentialfeldmessungen wurden noch weitere Tests zur Bestimmung der im Beton vorhandenen Salze durchgeführt, um weitere Informationen über die Korrosionsgefährdung des Spannstahls zu erhalten.

Die Untersuchungen wurden in den Labors des Institutes für Hochbau und Technologie in Zusammenarbeit mit Frau Ing. Karin Fussenegger durchgeführt. Dazu wurden von

allen Hohldielen an geeigneten Stellen Bohrmehlproben entnommen und im Labor mittels photometrischer Untersuchung bestimmt.

Die laut **Norm** (EN 206-1:2000(D)) und nach [Breit2001] zulässigen Grenzwerte für die Chloridbelastung von Beton zur Verhinderung von Stahlkorrosion sind:

- 0,4 m-% Chloridgehalt im Zementstein (Stahlbetonbauteile)
- 0,2 m-% Chloridgehalt im Zementstein (Spannbetonbauteile)

Es wurden aber auch schon höhere Konzentrationen von Chloriden festgestellt, ohne dass es zu Korrosionserscheinungen der im Beton eingebauten Stahlteile gekommen ist. Dabei handelte es sich aber immer um Bauteile aus hochwertigem Beton.

8.4.3.1 Entnahme der Proben

Insgesamt wurden 72 Proben entnommen und untersucht. Die Probenentnahme wurden die nachstehend aufgelisteten Holdielenteile und Achsen ausgewählt:

- D1-1 (24 Proben), Achsen: B2, B6, B10, B14, C2, D2
- D2-2 (24 Proben), Achsen: A1, C1, E2, E6, E10, E14
- D3-1 (24 Proben), Achsen: A3, A6, A9, A11, A14, B3, B6, B9, B11, B14

Das Bohrmehl wurde aus folgenden Tiefen entnommen:

- 0,0 – 1,5 cm
- 3,0 – 3,5 cm
- 13,0 – 15,0 cm
- 26,0 – 28,0 cm

Eine genauere Darstellung der Stellen der Probenentnahme ist im Anhang (Tabelle 11.1 bis 11.3) ersichtlich.

8.4.3.2 Methode

Photometrische Bestimmung mit Quecksilber (II) – thiocyanat / Eisen (III) nach Extraktion mit Salpetersäure.

Probenvorbereitung:

Von den einzelnen Proben werden jeweils 1000 mg mit einer Korngröße von < 100µm benötigt. Die Betonprobe wird falls nötig zerkleinert, gesiebt und gewogen. Danach wird die Probe 10 Minuten lang mit 20 ml Salpetersäure (18%) gerührt und anschlie-

ßend etwa 5 Minuten zum schwachen Sieden erhitzt. Das Kochen der Mischung ist vor allem bei sulfidhaltigem Material zur Austreibung von sich bildendem Schwefelwasserstoff sehr wichtig. Die abgekühlte Lösung wird mit einem Membranfilter gefiltert.

Die aufbereitete Probe wird mittels photometrischer Analyse untersucht und die daraus erhaltenen Untersuchungswerte mittels Formel (8.1) in den gesuchten Chloridgehalt umgerechnet.

$$\text{Chloridgehalt in \%} = \frac{\text{Analysewert in } \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 2}{\text{Einwaage in mg}} \quad (8.1)$$

Der somit erhaltene %-Wert gibt den Chlorid-Gehalt in m-% im untersuchten Beton an. Falls der genaue Zement-Gehalt im Beton bekannt ist, kann der Chlorid-Gehalt im Zementstein ermittelt werden. Wenn die genaue Zusammensetzung des Betons jedoch nicht bekannt ist und auch nicht näher bestimmt wurde, kann vereinfachend der Chloridgehalt im Zement errechnet werden, indem der laut Formel (9.1) ermittelte Wert mit 10 multipliziert wird. Diese Berechnung mit dem Faktor 10 stellt eine Näherung auf der sicheren Seite dar. Daher kann es sich bei geringen Überschreitungen der zulässigen Grenzwerte als sinnvoll erweisen, die genaue Betonrezeptur zu ermitteln.

8.4.3.3 Untersuchungsergebnisse

Die Konzentrationen der im Beton vorhandenen Chloride liegen ungefähr zwischen 0,4 und 5,0 m-% und überschreiten somit die laut Norm zulässigen Grenzwerte, von 0,2 m-% Chloridgehalt im Zementstein (Spannbetonbauteile) um ein Vielfaches. Bei einer der untersuchten Hohldielen (D 2/2) waren in der Nähe der Oberfläche, also in einer Tiefe von 0,0 – 1,5 cm sogar weitaus höhere Konzentrationen nachweisbar. Sie waren ungefähr 20-mal so hoch wie erlaubt, um den Korrosionsschutz des Spannstahls zu gewährleisten.

Die genaue Auflistung der Ergebnisse der photometrischen Untersuchung zur Bestimmung des Chloridgehaltes in den einzelnen Bauteilen ist im Anhang (Tabelle 11.1 bis 11.3) ersichtlich.

8.5 Computertomographie

8.5.1 Einleitung

Mit einem Computertomographen soll die chloridbedingte Lochfrasskorrosion des Spannstahls eindeutig nachgewiesen werden. Die Motivation zur Anwendung dieser innovativen Untersuchungsmethode liegt vor allem darin, ein weiteres Verfahren neben den bereits etablierten Methoden zu testen und eine Aussage darüber zu tref-

fen, wie praktikabel dieses Verfahren ist und ob der zukünftige Einsatz der industriellen Computertomographie im Bauingenieurwesen sinnvoll erscheint.

Die durchgeführten Voruntersuchungen (Potentialfeldmessung und Bestimmung der Chloridbelastungen) geben zwar Auskunft über mögliche Korrosionsherde oder (bei einer statistischen Auswertung der Messergebnisse) über das vorhandene Korrosionsrisiko, liefern jedoch keine exakte Aussage darüber, ob Korrosion an den jeweiligen Messstellen vorherrscht. Somit kann also nicht mit völliger Sicherheit festgestellt werden, ob und in welchem Ausmaß Lochfrasskorrosion vorhanden ist. Das bedeutet vor allem, dass die einzelnen Korrosionsstellen nicht quantifiziert werden können. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, die maximale Querschnittsabminderung der Spannkabel und die damit verbundene Verringerung der Tragfähigkeit des gesamten Bauteils zu ermitteln. Daher müssen die betroffenen Spannkabel üblicherweise weiteren Tests unterzogen werden. Die herkömmliche Vorgehensweise besteht darin, die einzelnen Spannkabeln aus den Hohldielen zu entnehmen, unter einem Mikroskop bezüglich vorhandener Korrosion zu untersuchen und mittels Belastungstests (Zug- und Dauerschwingversuche) die Resttragfähigkeit zu überprüfen.

Die Entnahme der Spannkabeln hat den Nachteil, dass sie relativ aufwendig ist, aber vor allem zerstörenden Charakter hat und somit die Proben nicht mehr ungestört sind und eventuell die Messungen und Auswertungen verfälschen können. Auch die mikroskopische Detektion der Korrosion ist einigermaßen zeitraubend und die räumliche Quantifizierung der Lochfrasskorrosion stellt eine weitere Schwierigkeit dar. In Abbildung 8.8 ist eine zerstörende Entnahme der Spannkabeln mittels eines Schlagbohrhammers dargestellt.



Abbildung 8.8: Ausbau der Spannkabeln mittels Schlagbohrhammer zur mikroskopischen Untersuchung und zur Durchführung weiterer Belastungstests

Aus diesem Grund soll diese Diplomarbeit die Anwendungsmöglichkeiten und das Forschungs- und Untersuchungspotential der industriellen Computertomographie aufzeigen, um eine Alternative zu den bereits bestehenden Verfahren zu liefern und den Einsatz auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens zu forcieren.

8.5.2 Probenentnahme

Anhand der Voruntersuchungen wurden geeignete Stellen zur Entnahme von Proben für die Computertomographie ausgesucht, bei denen Korrosion mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu erwarten war. Danach wurden, wie in Abbildung 8.9 dargestellt, drei Probekörper mittels Kernbohrung (\varnothing 150 mm, H: 130 mm) entnommen.



Abbildung 8.9: Probenentnahme für die Computertomographie mittels Kernbohrung (\varnothing 150 mm)

Anschließend wurden die Proben der Höhe nach halbiert, da nur auf der Unterseite der Probekörper Spannkabeln vorhanden waren.

Die drei entnommenen Proben haben die Bezeichnung:

1. **D1-1/D-5**
2. **D1-1/E-5**
3. **D2-1/C-3**

Dabei bedeutet die Kennzeichnung D2-1/C-3:

- D2 = die zweite Hohldiele
- -1 = das erste Teilstück der Hohldiele (jede Hohldiele wurde in drei annähernd gleich große Stücke geteilt)
- C = Bezeichnung der Längsachse (welches Spannkabel)
- 3 = Bezeichnung der Querachse (welche Stelle des Spannkabels)

Die genauen Stellen der Probenentnahme und die dazugehörigen Messwerte der Voruntersuchungen sind in Abbildung 8.6 und 8.7 dargestellt.

Da sich bei den ersten computertomographischen Aufnahmen der gefertigten Probekörper herausstellte, dass die Abmessungen und die Form keine optimalen Messungen

ermöglichten (Näheres in 8.5.4), wurden aus den vorhandenen Probekörpern abermals Bohrkerne entnommen. Somit haben die neu gefertigten Probekörper eine Höhe von 150 mm und einen Durchmesser von 50 mm, wie in Abbildung 8.10 und 8.11 ersichtlich ist.



Abbildung 8.10: Entnahme der „kleinen“ Bohrkerne (H: 150 mm, Ø 50 mm)



Abbildung 8.11: Bohrkerne (H: 150 mm, Ø 50 mm) mit Spannkabel in der Mitte

8.5.3 Versuchsaufbau (verwendetes Gerät)

Die Computertomographie wurde an der FH Wels in Zusammenarbeit mit Herrn. Dipl.-Ing (FH) Erwin Schlotthauer durchgeführt. Für die Messungen wurde ein Gerät der Firma Wälischmiller (Heute Rayscan) verwendet. Wie in Abbildung 8.12 zu sehen ist, handelt es sich bei dem eingesetzten Gerät um einen industriellen Computertomographen mit einem offenen Aufbau, wodurch für den Betrieb des Gerätes ein Strahlenschutzraum benötigt wird.

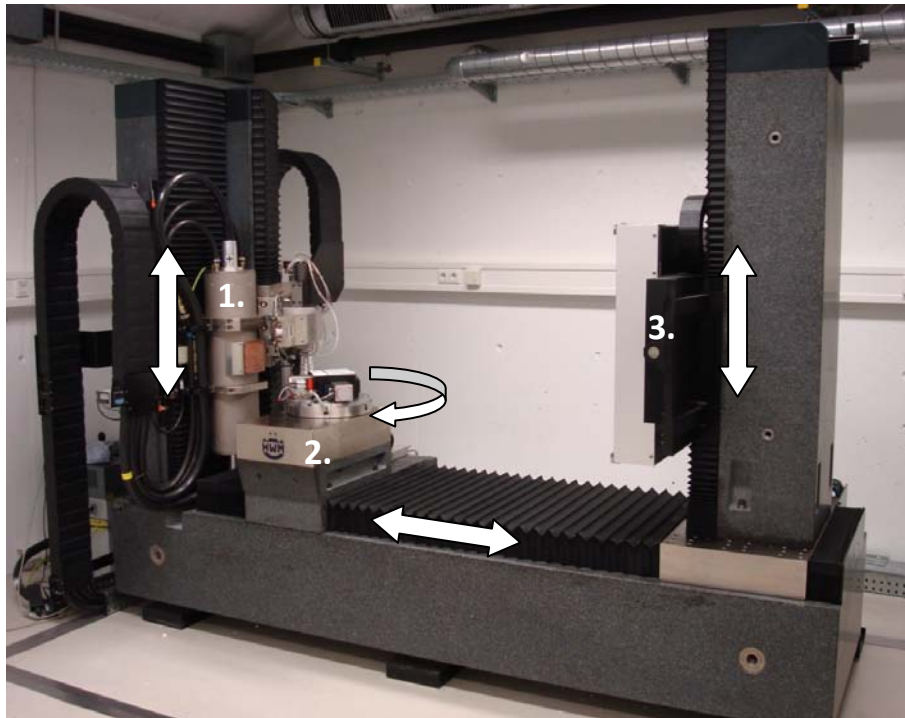


Abbildung 8.12: Computertomograph der FH Wels (RayScan 250)

Die in Abbildung 8.12 eingefügten Nummerierungen bezeichnen folgende Gerätebauteile:

1. Röntgenröhre, vertikal justierbar
2. Probentisch, horizontal justierbar und drehbar
3. Detektor, vertikal justierbar

Der eingesetzte Computertomograph verfügt über folgende Geräteparameter:

- Hersteller: *Wälischmiller (Rayscan), RayScan 250* (offener Geräteaufbau)
- Röntgenröhre: Mikrofokus- (10 bis 250 kV) und Makrofokusröntgenröhre (50 bis 450 kV)
- Brennfleck: 3 bis 250 μm (Mikrofokus) und 0,4 mm (Makrofokus)
- Objektmessungen (\emptyset /H): 1 bis 600 mm / 1 bis 1500 mm
- Max. Objektgewicht: 80 kg
- Aktive Detektorfläche: 410*410 mm² mit 1024*1024 Pixel
- Digitalisierung: 16 bit
- Messzeit inkl. Rekonstruktionszeit: 2 bis 30 Min
- Detailerkennbarkeit: 1 μm (Mikrofokus) und 0,1 bis 0,3 mm (Makrofokus)

8.5.4 Messungen und Ergebnisse

Die ersten Messungen wurden mit den „großen“ Proben (\varnothing 150 mm) durchgeführt. Um die Proben am Proben­tisch zu fixieren, wurde Styropor verwendet, wie in Abbildung 9.13 zu sehen ist, da die Dichte von Styropor sehr gering ist, und die Messungen daher so gut wie unbeeinflusst bleiben.



Abbildung 8.13: Probenfixierung (links) und Probenpositionierung (rechts)

Nach dem Befestigen der Probe auf dem Proben­tisch wurden die einzelnen Geräteteile (Röntgenröhre, Proben­tisch und Detektor) so positioniert, dass die gesamte Probe durch die Röntgenstrahlen, die sich von der Röntgenröhre kegelförmig ausbreiten, vollständig erfasst und auf den Detektorschirm projiziert werden konnte. Der Probekörper wurde liegend und nicht stehend am Objekt­tisch befestigt, so dass der Spannstahl senkrecht verläuft. Dadurch ändert sich der zu durchstrahlende Stahlquerschnitt nicht. Andernfalls wäre die zu durchstrahlende Länge des Spannstahls variabel zwischen der kleinsten Länge (\varnothing 16 mm) und der größten (Länge 150 mm = Bohrkern­durchmesser), wodurch die Strahlungsstärke wesentlich höher sein muss, um die Stahllänge von 150 mm durchstrahlen zu können. Eine Erhöhung der Strahlenstärke würde aber auch eine Vergrößerung des Brennflecks und damit eine geringere Auflösung mit sich bringen. Daher wurde die erste Probe auch liegend durchstrahlt, um die nötige Strahlungsstärke niedrig zu halten. Jedoch ist die zu durchstrahlende Länge der gesamten Probe (Beton und Stahl) nicht mehr konstant, wie das bei einem aufrecht stehenden Bohrkern der Fall wäre. Aus diesem Grund entstehen an den Randflächen und Kanten der Probe, wie in Abbildung 8.14 ersichtlich ist, für eine unregelmäßige Objektgeometrie typische Artefakte, die die Messergebnisse beeinflussen können. Bei der ersten Messung wurden folgende Versuchsparameter verwendet.

- Röntgenröhre: Mikrofokusröntgenröhre (225 kV) 220 kV; 650 μ A
- Vorfilter: 0,5 Cu + 1 Al
- Projektionen: 720 mit je 2 sec. Projektionszeit
- Messdauer: 47 min.
- Auflösung: 194,6 μ m

Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 8.14 dargestellt. Dabei sind auf dem Schnittbild (linkes Bild), die bei der Messung aufgrund der Geometrie des Probekörpers aufgetretenen Artefakte gut zu sehen. Diese Artefakte entstehen vor allem bei Probekörpern die nicht zylinderförmig sind. In diesem Fall war der Probekörper zumindest teilweise zylinderförmig, wurde jedoch nicht dementsprechend positioniert. Um das Spannkabel senkrecht auszurichten wurde der Bohrkern liegend und nicht stehend am Probenstisch befestigt.

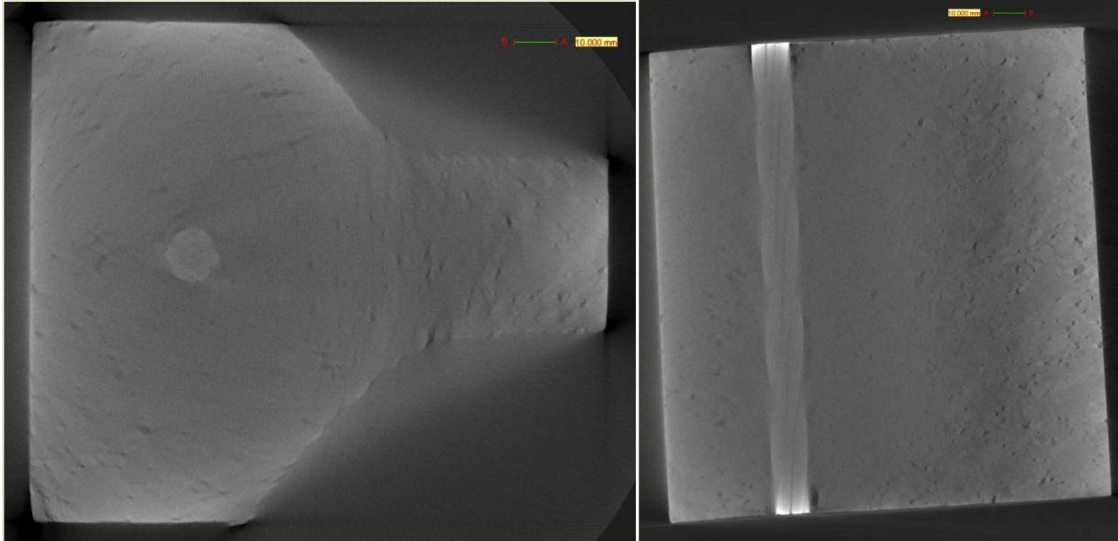


Abbildung 8.14: Schnittbild von Oben (links) und von der Seite (rechts) der Probe D1-1/D5 („groß“)

In Abbildung 8.14 ist auch gut zu sehen, wie sich die vorhandenen Artefakte teilweise wie ein Schleier (Schlieren an den Kanten des Probekörpers) über die Grauwertabbildungen der Probe legen und somit die Klarheit und die Auflösung der tomographischen Aufnahmen deutlich verschlechtern.

Die erzielte Auflösung liegt ungefähr bei 0,2 mm und reicht nicht aus, um die einzelnen Bestandteile des Betons (Zuschläge, Poren und Zementmatrix) zu erkennen. Der Spannstahl ist zwar gut vom umgebenden Beton unterscheidbar, aber eine Erkennung von weiteren Details ist nicht möglich. Des Weiteren ist in Abbildung 8.14 keine Korrosion des vorhandenen Spannstahls detektierbar.

Dafür gibt es drei mögliche Ursachen:

- Bei der verwendeten Probe (D1-1/D5) ist keine Korrosion vorhanden.
- Die erzielte Auflösung (0,195 mm) reicht nicht aus um eventuell vorhandene Korrosion zu lokalisieren.
- Die geometrisch bedingten Artefakte verhindern eine eindeutige Detektion der Korrosion.

Aus diesem Grund wurde entschieden, aus den vorhandenen Probekörpern (Höhe: 130 mm, \varnothing 150 mm) abermals Bohrkerne (Höhe: 150 mm, \varnothing 50 mm) zu entnehmen.

Diese Proben mit denen die weiteren computertomographischen Untersuchungen durchgeführt wurden, sind in Abbildung 8.10 und 8.11 ersichtlich.

Die so erhaltenen Proben haben gegenüber den ursprünglichen Proben zwei wesentliche Vorteile:

1. Der Bohrkern kann senkrecht (stehend) untersucht werden.
2. Die zylindrische Probenform verhindert geometriebedingte Artefakte.
3. Der Probendurchmesser (50 mm) ist erheblich geringer, wodurch die benötigte Strahlungsstärke wesentlich kleiner ist und somit die Auflösung verbessert wird.

In der Abbildung 8.15 ist die Befestigung und die Positionierung des neuen (kleinen) Probekörpers dargestellt. Gut zu sehen ist auch, dass sich die Probe im Vergleich zur Abbildung 8.13 (große Probe) viel weiter bei der Röntgenquelle befindet.

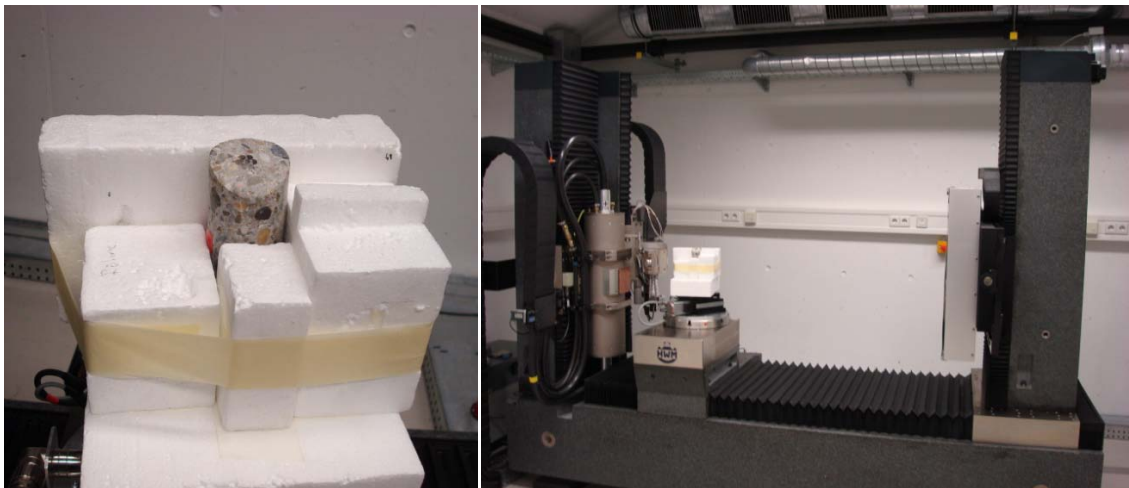


Abbildung 8.15: Positionierung einer „kleinen“ Probe auf dem Objektisch. Wie im Vergleich zu Abbildung 8.13 zu sehen ist konnte die Probe aufgrund des kleineren Messbereiches erheblich näher an der Röntgenröhre positioniert werden, wodurch die Auflösung verbessert wurde

Die drei Bohrkerne wurden mit verschiedenen Geräteparametern untersucht, um die unterschiedlichen Ergebnisse und Auflösungen miteinander vergleichen zu können. Außerdem wurde eine der Proben (D2-1/C3) als Ganzes untersucht und die beiden anderen Proben bei der Messung in zwei (D1-1/D5) bzw. drei Bereiche (D1-1/E5) unterteilt. Durch die Unterteilung in mehrere Bereiche kann die Probe näher bei der Röntgenröhre positioniert werden. Da die Röntgenstrahlen aus der Röntgenröhre kegelförmig austreten und das zu durchstrahlende Objekt auf den Detektorschirm projiziert wird, kann durch eine größere Entfernung der Probe zum Detektorschirm die erzielbare Auflösung beeinflusst werden. Beim Vergleich der beiden Abbildungen 8.13 und 8.15 ist gut zu erkennen, wie die beiden Proben unterschiedlich zwischen der Röntgenröhre und dem Detektorschirm positioniert sind. Das bedeutet, dass bei einem

größeren Abstand zwischen der Probe und dem Detektor die durchstrahlte Probe (Bereich) eine größere Projektionsfläche auf dem Detektorschirm einnimmt und dadurch die Auflösung der einzelnen Abbildungen verbessert wird.

Es ist also möglich, jede Probe so nahe wie es der Geräteaufbau zulässt bei der Röntgenröhre zu positionieren, um eine bessere Auflösung zu erhalten. Jedoch ist zu beachten, dass, wenn die Probe in zwei Bereiche unterteilt wird, es auch nötig ist zwei Messungen durchzuführen, wodurch die Messzeit verdoppelt wird und auch die Kosten der Messung steigen. Vor allem bei großen Proben ist es zwar möglich, aber sehr unpraktisch und vor allem unwirtschaftlich die Probe in allzu viele Bereiche zu unterteilen. Daher sollte schon vor jeder Messung überlegt werden, welche Auflösung erzielt werden soll und ob es nötig ist, die gesamte Probe zu durchleuchten oder ob es sich nur um interessante Teilbereiche der Probe handelt, die von Interesse sind und untersucht werden sollen. Die verwendeten Untersuchungsparameter und die dadurch erzielten Auflösungen sind in nachstehender Tabelle angeführt.

Tabelle 8.1: Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter

Probe	Spannung [keV]	Strom [μA]	Tint [ms]	Projek- tionen	Filter [mm]	Zeitdauer [min]	Voxelsize [mm]
D1-1/D5 (\varnothing 150mm)	220	650	2000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	47	0,1946
D2-1/C3	215	280	1000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	35	0,1664
D1-1/D5- oben	215	280	1000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	35	0,0908
D1-1/D5- unten	215	280	1000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	35	0,0908
D1-1/E5- oben	210	200	4000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	72	0,0584
D1-1/E5- mitte	210	200	4000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	72	0,0584
D1-1/E5- unten	210	200	4000	720	0,5 Cu + 1 Al-Post	72	0,0584

Anhand der Tabelle ist gut zu sehen, wie sich die erzielten Auflösungen schrittweise verbesserten (von 0,1946 bis 0,0584 mm). Die erste Zeile zeigt die verwendeten Parameter bei einem „großen“ Bohrkern (\varnothing 150 mm) und alle weiteren Zeilen beziehen sich auf die „kleinen“ Bohrkern (\varnothing 50 mm). Es wurde immer dieselbe Anzahl von Projektionen (5.Spalte) verwendet, also 1 Projektion/0,5°. Die weiteren Parameter wurden variiert.

Bereits von der ersten zur zweiten Zeile ist eine Verbesserung der Auflösung zu sehen. Die Verbesserung ist aber verhältnismäßig gering, obwohl der Probendurchmesser bei der zweiten Messung erheblich geringer war, da bei der ersten Messung die Integrationszeit (4. Spalte-Tint) doppelt so groß war, wie bei der zweiten Messung.

Beim Vergleich der ersten, der zweiten und der fünften Zeile ist gut zu erkennen, wie stark die unterschiedliche Integrationszeit (4. Spalte) die Messzeit (7. Spalte) beeinflusst.

Die Auflösung konnte von der zweiten Zeile (ein Bereich) im Vergleich zur dritten (und vierten) Zeile ungefähr um den Faktor zwei (1,83) verbessert werden, was damit zusammenhängt, dass zwar dieselben Messungsparameter verwendet wurden, jedoch bei D2-1/C3 ein Bereich und bei D1-1/D5 zwei Bereiche verwendet wurden. Das bedeutet, dass die Unterteilung der Proben in mehrere zu messende Bereiche auch eine dementsprechende Verbesserung der Auflösung mit sich bringt. Nicht so großen Einfluss auf die Auflösung hat jedoch die Integrationszeit. Wenn die beiden Proben D2-1/C3 (2. Zeile) und D1-1/E5 (5., 6. und 7. Zeile) verglichen werden, ist eine Verbesserung der Auflösung um den Faktor drei (2,85) zu sehen, da auch drei Bereiche verwendet wurden. Die erhöhte Integrationszeit (4000 anstatt 1000 ms) verbesserte die Auflösung zusätzlich (vergleiche Faktor: $1,83/2 \Rightarrow 0,92$ und $2,85/3 \Rightarrow 0,95$). Eine längere Integrationszeit bewirkt aber auch, dass die Dauer der Messung verlängert wird, wie beim Vergleich der Zeilen zwei und fünf deutlich wird (35 min und 72 min).

Daher ist zu überlegen, ob die eine Erhöhung der Integrationszeit auch die gewünschte Verbesserung der Auflösung bewirkt, vor allem wenn die damit verbundene erheblich längere Dauer einer einzelnen Messung berücksichtigt wird.

8.5.5 Ergebnisse

Es gibt einige Faktoren, die die Messungen und die damit verbundenen Ergebnisse beeinflussen können. Vorweg kann gesagt werden, dass:

- die gewünschte Detektion der Lochfrass-Korrosion des Spannkabels gelungen ist,
- die unterschiedlichen Probekörper und Untersuchungsparameter, die verwendet wurden, Aufschluss über den Einfluss auf die Messungen gaben,
- exemplarisch die Tiefe der Lochfrass-Korrosion an einigen Stellen gemessen werden konnte,
- die Untersuchungsergebnisse der Computertomographie mit den Voruntersuchungen gut übereinstimmen,
- es möglich ist, eine räumliche Vermessung aller Korrosionsstellen (Größe und Position) vorzunehmen und eine statistische Auswertung der vorhandenen Korrosion und der damit verbundenen Folgen vorzunehmen (Darauf wurde aber aus Zeit- und Kostengründen verzichtet).

Anhand der nachfolgenden Abbildungen sollen die erzielten Messergebnisse präsentiert werden, um die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten dieser Untersuchungsmethode zu verdeutlichen.

Abbildung 8.16 zeigt die 3D-Rekonstruktion eines Bohrkernes mit \varnothing 150 mm (D1-1/D5). Aufgrund des relativ großen Durchmessers musste die Strahlungsintensität

erhöht werden, was zu einer Verschlechterung der Auflösung führte. Dadurch ist die Darstellung zwar recht anschaulich, lässt aber nur eine sehr geringe Detailerkennbarkeit zu.

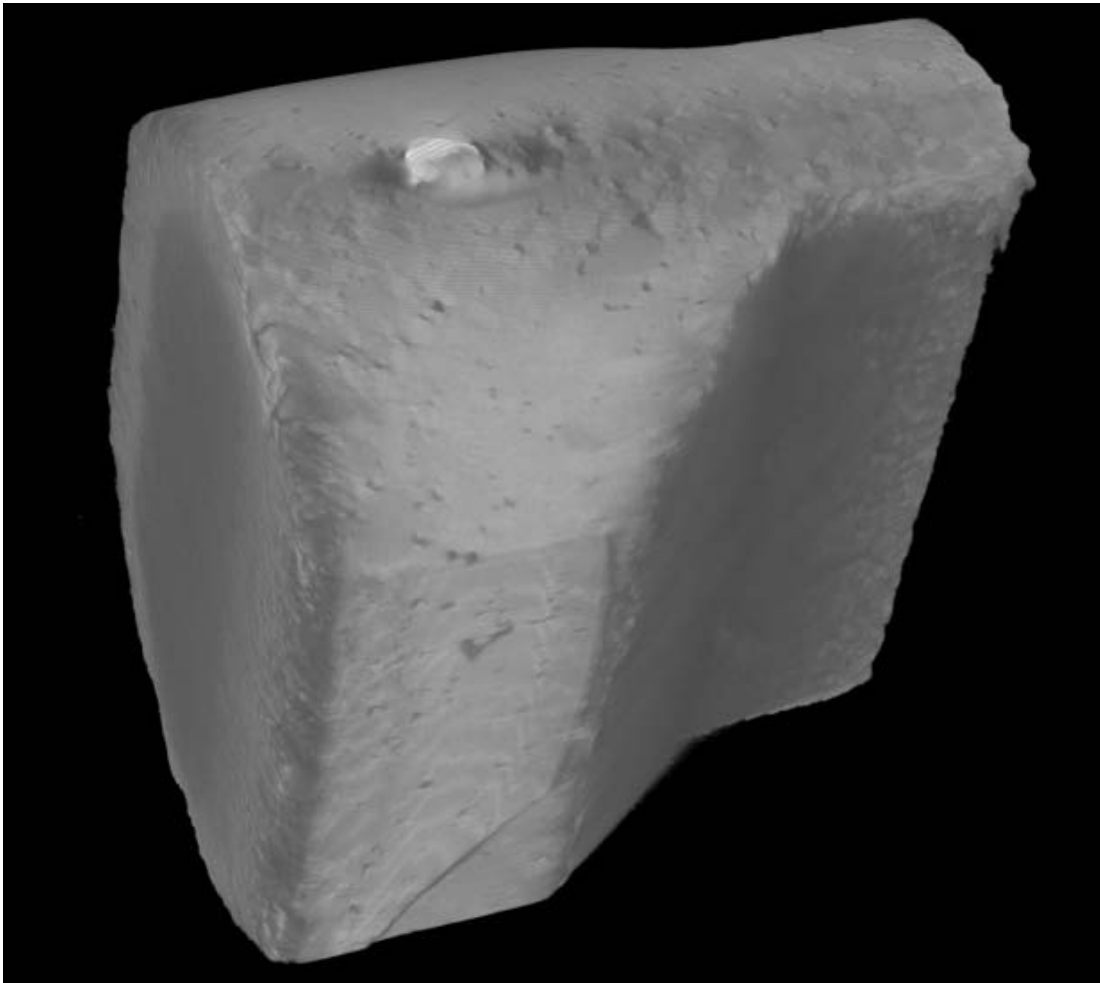


Abbildung 8.16: 3D-Darstellung eines „großen“ (\varnothing 150 mm) Probekörpers

Abbildung 8.17 zeigt die tomographischen Aufnahmen der Probe D1-1/E5 (\varnothing 50 mm). Hierbei sind die für eine bestimmte Position (Korrosionsstelle) dazugehörigen Schnittbilder dargestellt. Die einzelnen Schnittbilderreihen (von oben, von vorne und von der Seite) ermöglichen es den gescannten Probekörper gezielt nach Korrosionsstellen abzusuchen und aufgrund des jeweiligen Schnittbildes räumlich einwandfrei zu lokalisieren. In den einzelnen Schnittbildern sind auch sehr gut die vorhandenen Luftporen (schwarz) erkennbar. Bei Variation der Grauwerte wäre es auch möglich, die restlichen Komponenten (Zementleim und Zuschlagskörner) der Betonmatrix genauer zu erkennen und gegebenenfalls zu quantifizieren. Da es sich bei der Aufgabenstellung aber um die Detektion der Lochfraß-Korrosion des Spannstahls handelte, wurde darauf kein weiteres Augenmerk gelegt. Der im Schnittbild „von vorne“ (rechts oben) gut erkennbare weiße Punkt im linken unteren Bereich der Abbildung, kommt von einem kleinen Metallstift, der an der Probe angebracht wurde um einen räumlichen Fixpunkt zu erhalten, da die Probe in mehrere Messbereiche eingeteilt wurde. Nach den einzelnen Messungen war es aufgrund der Markierung leichter möglich die jeweiligen Probentei-

le wieder zusammenzufügen. Dieser Metallstift wurde mit rotem Klebeband befestigt und ist auch auf Abbildung 8.10 zu sehen.

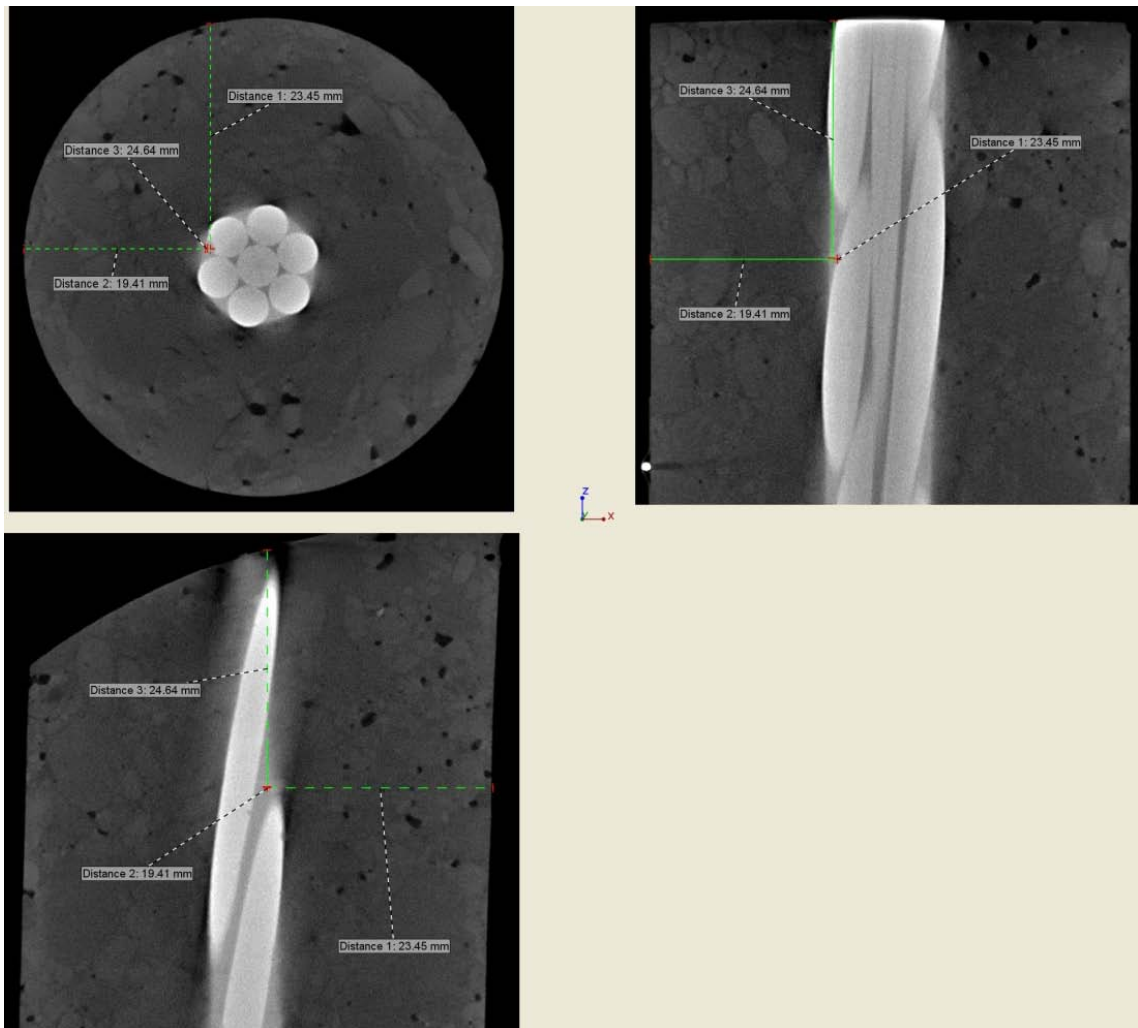


Abbildung 8.17: Schnittbilder der Probe D1-1/E5; „von oben“ (links oben), „von vorne“ (rechts oben) und „von der Seite“ (links unten) mit Angaben der Position einer Korrosionsstelle

Die verwendete Computersoftware ermöglicht eine genaue Vermessung der gewünschten Stellen. Das bedeutet, dass nicht nur die jeweilige Lage gemessen und dargestellt werden kann, wie in Abbildung 8.17 zu sehen ist, sondern auch eine Vermessung der jeweiligen Korrosionsstelle möglich ist, wie in Abbildung 8.18 und 8.19 zu sehen ist.

In Abbildung 8.18 und 8.19 ist exemplarisch eine detektierte Korrosionsstelle dargestellt. Abbildung 8.18 zeigt das Schnittbild „von der Seite“ und Abbildung 8.19 das dazugehörige Schnittbild „von oben“.



*Abbildung 8.18: Schnittbild „von der Seite“ einer Korrosionsstelle der Probe D1-1/E5, mit Ausmaßen von 0,89*1,49 mm*

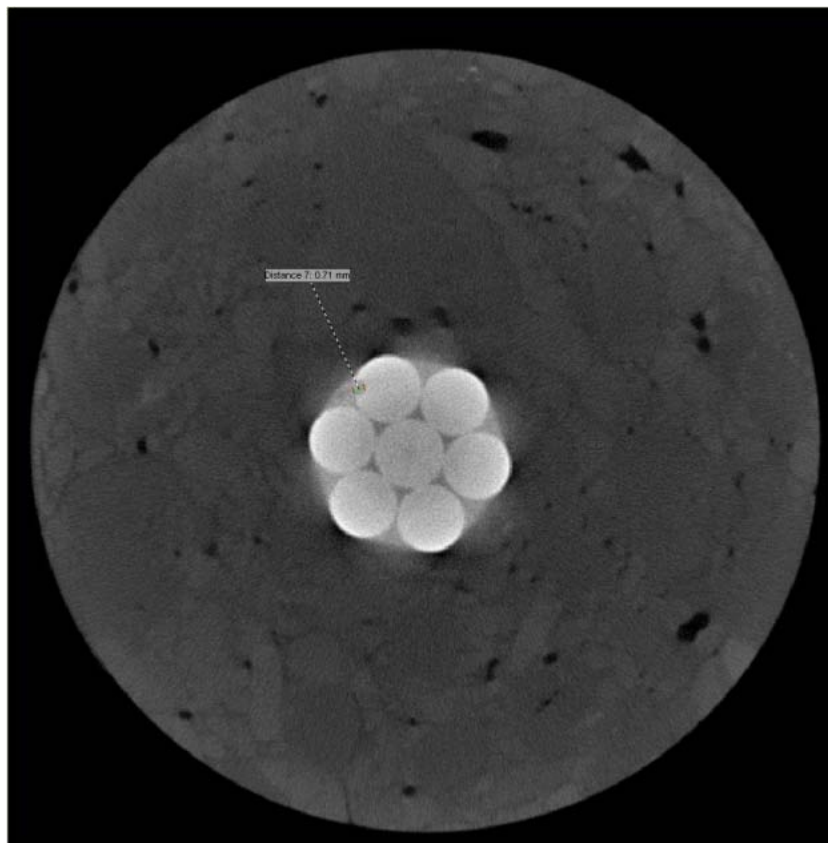


Abbildung 8.19: Schnittbild „von oben“ einer Korrosionsstelle der Probe D1-1/E5, mit einer Tiefe von 0,71 mm

Abbildung 8.20 zeigt dieselben Aufnahmen einer Korrosionsstelle wie Abbildung 8.18 und 8.19, jedoch mit einer Variation der Grauwerte. Dies bedeutet, dass es möglich ist die vorhandenen Grauwerte derart zu beeinflussen, dass der Beton völlig verschwindet, da er erheblich weniger Strahlung absorbiert als der Spannstahl. Daher lassen sich, wie in Abbildung 8.21 gut ersichtlich ist, die einzelnen Materialien separiert darstellen, solange der Dichteunterschied der jeweiligen Materialien nicht zu gering ist.

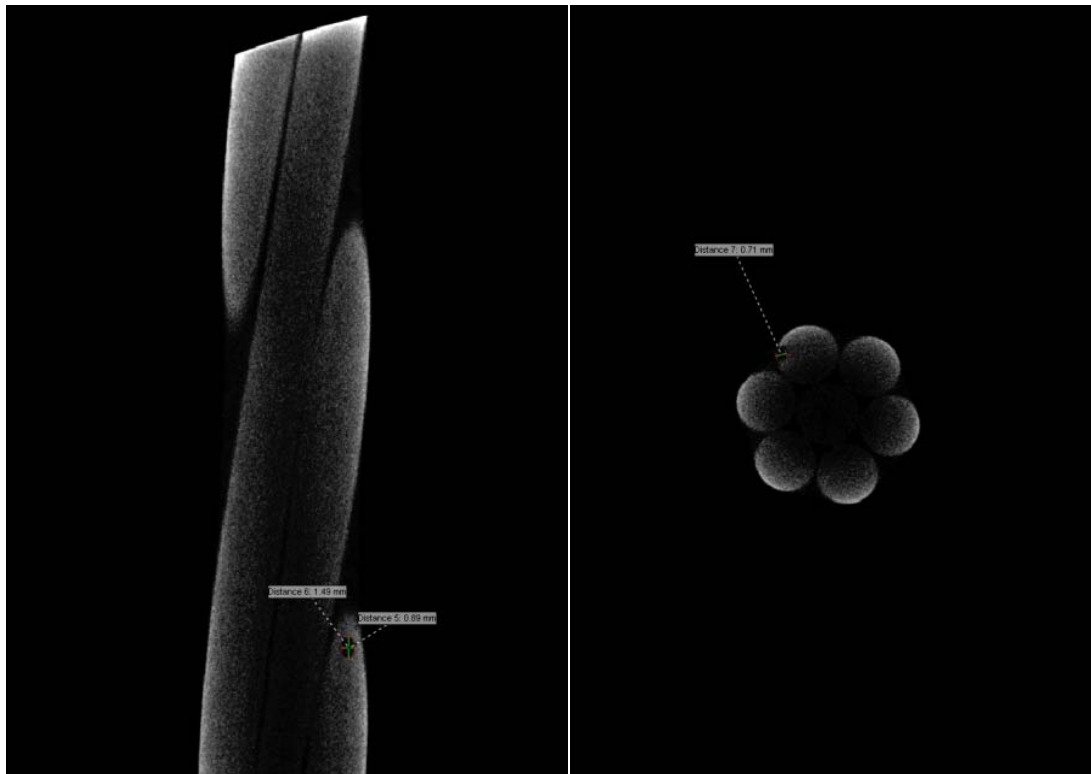


Abbildung 8.20: Selbe Stelle wie Abbildung 9.18 und 9.19, aber mit veränderten Grauwerte



Abbildung 8.21: 3D-Darstellung der Probe D1-1/E5 nach dem Zusammenfügen der einzelnen Messbereiche; gesamte Probe (links) und Separation des Spannstahls (rechts), die dunklen Punkte am Spannstahl (rechts) sind einzelne Korrosionsstellen

In Abbildung 8.22 ist die nachträgliche Zusammenfügung der einzelnen Messbereiche (bei dieser Probe gab es drei Messbereiche) dargestellt. Das rechte Bild zeigt einen einzelnen Messbereich mit dem gut erkennbaren Metallstift (Markierung) im unteren Bildbereich. Am linken Bild ist ein leichter Unterschied der Grauwerte des oberen und der beiden anderen (mittlerer und unterer Messbereich) zu sehen. Der vorhandene Riss im Beton dürfte bereits bei der Herstellung der Hohlziele entstanden sein.

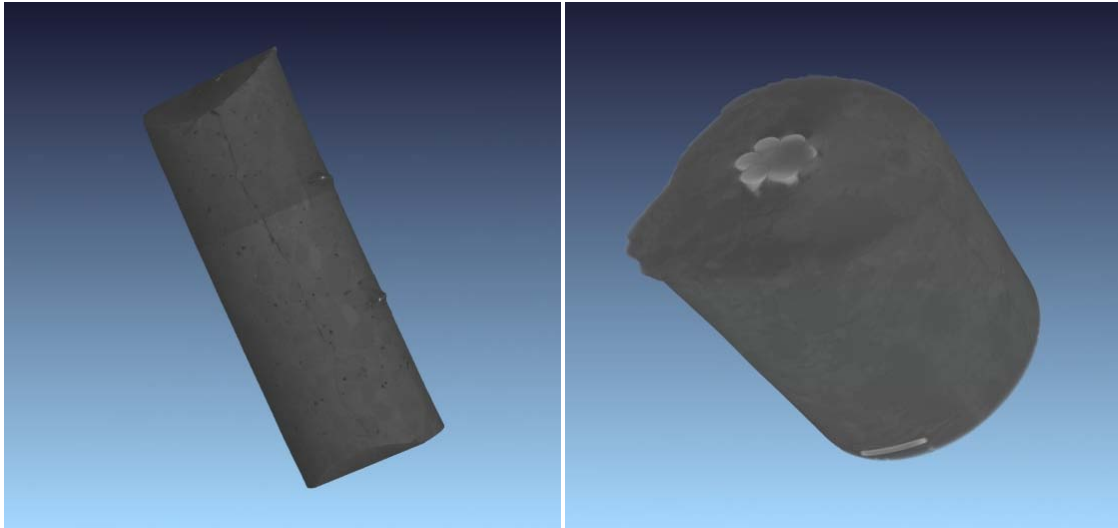


Abbildung 8.22: 3D-Abbildung einer Probe (D1-1/E5) nach Zusammenfügung der einzelnen Messbereiche (linkes Bild) und Darstellung eines einzelnen Messbereiches (rechtes Bild)

Abbildung 8.23 zeigt, dass es nicht nur möglich ist die verschiedenen Materialien zu separieren (rechtes Bild), sondern auch an beliebigen Stellen Schnitte durch den gescannten Probekörper zu legen. Im rechten Bild ist im unteren Bereich auch wieder der Metallstift (Markierung) zu erkennen, der bei einer reinen Separation der Materialien nicht wegfällt, da er dieselbe Dichte wie der Spannstahl aufweist. Es wäre kein Problem den Metallstift, mittels eines Schnittes, aus der Abbildung zu entfernen, jedoch wurde darauf verzichtet, damit die beiden Bilder besser vergleichbar sind.

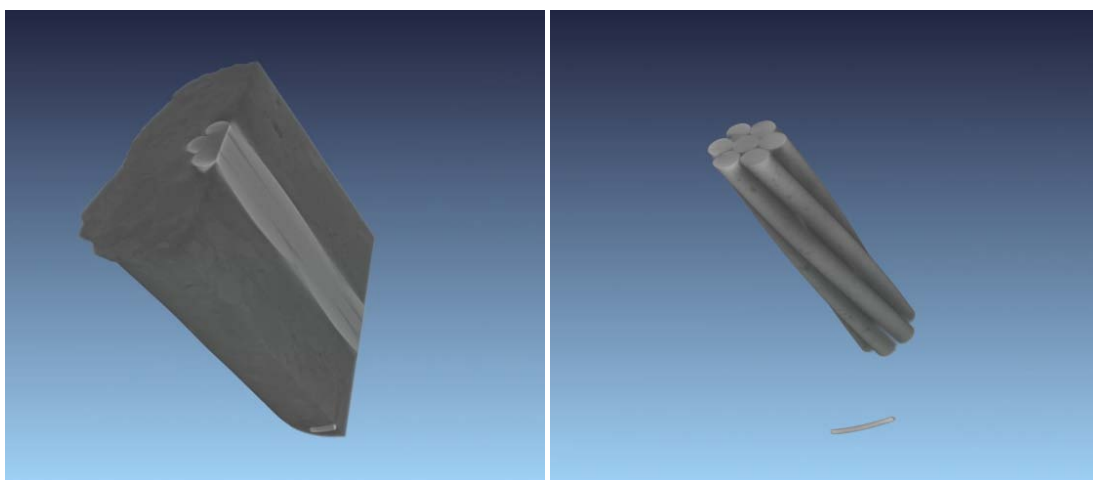


Abbildung 8.23: Schnittführung durch den 3D-Volumenkörper (links) und Separation des Spannstahls (rechts)

Abbildung 8.24 zeigt den separierten Spannstahl der Probe D1-1/E5. Auf dem linken Bild ist die Unterseite und auf dem rechten Bild die Oberseite des Spannstahls zu sehen. Deutlich erkennbar sind auf dem rechten Bild die einzelnen Korrosionsstellen (dunkle Punkte) des Spannstahls, die durch die vorhandenen Chloride im Beton verursacht wurden.

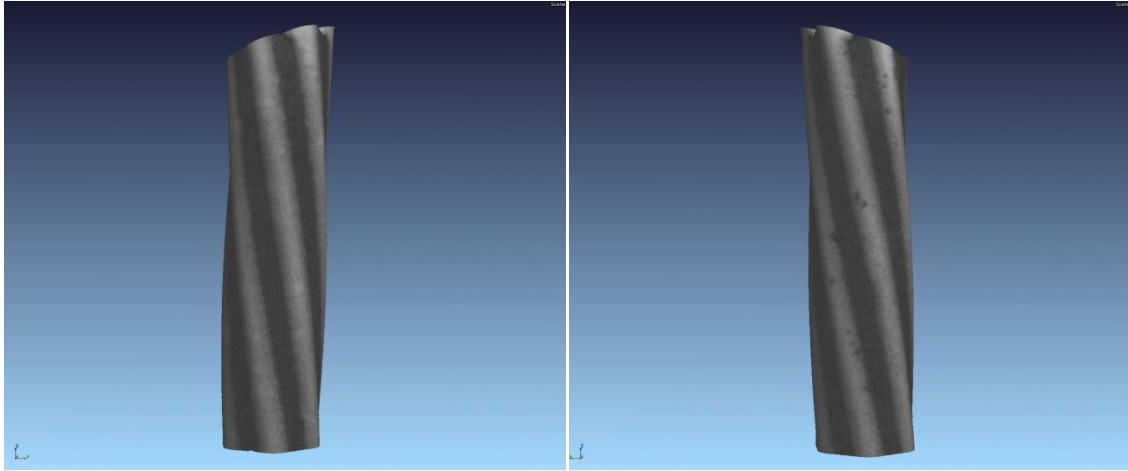


Abbildung 8.24: D1-1/E5-unten: korrosionsfreie Unterseite des Spannstahls (links) und Lochfrass-Korrosion (dunkle Punkte) der Oberseite des Spannstahls (rechts)

8.5.6 Diskussion

Die Untersuchungen machen deutlich, wie stark die erzielbaren Auflösungen der tomographischen Aufnahmen vom durchstrahlten Material, den Abmessungen und der Geometrie der untersuchten Probekörper, aber vor allem auch vom verwendeten Computertomographen und den einzelnen Geräteparametern abhängen.

Bei geeigneter Probenauswahl, die auf die gewünschten Untersuchungsziele und das zur Verfügung stehende Gerät (CT) abgestimmt sind, lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Damit ist die Computertomographie im klaren Vorteil zu vielen herkömmlichen (teilweise zerstörenden) Untersuchungsmethoden. Die sehr plakativen Abbildungen und Darstellungsmöglichkeiten des Untersuchungsobjektes können vor allem bei Präsentationen und Diskussionen mit den Auftraggebern von Vorteil sein, da damit relativ anschaulich die Problematik oder die durchgeführten Untersuchungen und ermittelten Ergebnisse erläutert werden können.

9 Zusammenfassung

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren, welches aus mehreren 2D-Abbildungen ein räumliches 3D-Bild (Körper) rekonstruiert. Dazu wird Röntgenstrahlung (Entdeckt durch *C. W. Röntgen* 1895) verwendet. Bei anderen tomographischen Verfahren werden teilweise ganz unterschiedliche Medien und Techniken eingesetzt (Ultraschall, elektrische oder magnetische Felder, Gammastrahlen,...). Um vom durchstrahlten Objekt genügend 2D-Abbildungen zu erhalten, werden nach jeder Aufnahme entweder die Strahlungsquelle und der Detektor (Projektionsfläche für die 2D-Abbildung) um das abzubildende Objekt im Kreis herumbewegt (medizinischer CT) oder die Strahlungsquelle und der Detektor bleiben unbewegt und das Objekt wird nach jeder Projektion automatisch ein Stück weitergedreht (industrieller CT). In der nächsten Abbildung ist das Schema der industriellen Computertomographie abgebildet.

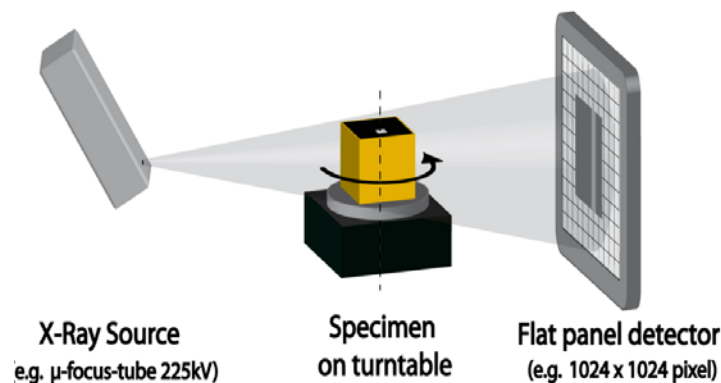


Abbildung 9.1: Schematische Darstellung der Computertomographie (Abbildung aus der Dissertation von Dr. B. Harrer, TU-Wien & FH-Wels)

Es wird eine Vielzahl von 2D-Abbildungen (Projektionen) erzeugt, welche danach rückwirkend zu einem 3D-Gesamtbild zusammengefügt werden. Dieser Vorgang wird auch als „inverses Problem“ bezeichnet, dessen Lösung von *J. Radon* bereits am Anfang des 19. Jhdt. erarbeitet wurde. Aber erst durch die Entwicklung leistungsfähiger Computer wurde es möglich, den enormen Speicher- und Rechenaufwand, der bei der Computertomographie anfällt zu bewältigen.

Die Auflösung der Messung, also die erzielbare Genauigkeit oder Feinheit hängt von einigen Faktoren ab. Im Wesentlichen gibt es folgende Zusammenhänge:

- Umso höher die erzielte Genauigkeit sein soll, desto kleiner müssen die Probenabmessungen sein.
- Ungefähr 1/1000 der durchstrahlten Probenlänge ist als Auflösung erreichbar.
- Je dichter das Probenmaterial ist, desto stärker muss die Strahlung sein, wodurch sich der Brennfleck vergrößert, der die kleinstmöglich erzielbar Auflösung vorgibt.

Es gibt eine Vielzahl an Veröffentlichungen, die sich mit dem Thema Computertomographie beschäftigen. Einige Einsatzbereiche der industriellen Computertomographie, die für das Gebiet des Bauingenieurs von Bedeutung sind, seien an dieser Stelle nur kurz erwähnt:

- Holz (Verteilung von Feuchtigkeit und Kunstharzen, Strukturschäden nach mechanischen Belastungen,...)
- Beton (Faserverteilung, Porenstruktur, Risse,...)
- Natursteine (Porenradien, Porenstruktur, Strukturschäden durch Verwitterung, Effizienz von Injektionen,...)
- Asphalt (Verteilung der einzelnen Komponenten, Porenräume,...)
- Metalle (Fehlererkennung bei Legierungen, Porenverteilung bei Aluminiumschäumen,...)
- Verbundwerkstoffe (Verbund der einzelnen Komponenten, Faserverteilungen, Erkennung von Strukturfehlern,...)

Des Weiteren wurde die industrielle Computertomographie in dieser Diplomarbeit erfolgreich eingesetzt. Hierbei wurde die chloridbedingte Lochfraß-Korrosion am Spannstahl von vorgespannten Hohldielen-Elementen (Deckenelemente aus Spannbeton) detektiert.

Neben den bereits erwähnten Anwendungsmöglichkeiten sind noch viele weitere denkbar. Der Aufwand für den Erwerb und den Betrieb eines industriellen Computertomographen sind derzeit noch enorm. Ob sich die Kosten dieser relativ neuen Untersuchungsmethode durch Weiterentwicklungen und ein breiteres Anwendungsgebiet weiter (erheblich) senken lassen, ist nur schwer abschätzbar. Aber abgesehen von den Kosten weist die industrielle Computertomographie ein enormes Potential auf und liefert Untersuchungsergebnisse, die mit anderen bereits erprobten Methoden gar nicht oder nur schwer erreicht werden können. So wird es nur eine Frage der Zeit sein, bis sich diese sehr aufwendige, jedoch ohne Zweifel innovative und vielversprechende Technik auf dem Gebiet der Material- und Ingenieurwissenschaften etablieren wird.

10 Literaturverzeichnis

- [Bertolini2004] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, 2004, Corrosion of Steel in Concrete, Wiley-VCH Verlag
- [Banhart2008] Johann Banhart, 2008, Advanced Tomographic Methods in Material Research and Engineering, 1. Auflage, Oxford University Press
- [Baruchel2000] J. Baruchel, J.-Y. Buffière, E. Maire, P. Merle, G. Peix, 2000, X-Ray Tomography in Material Science, Hermes Science Publications
- [Berg1999] H. Berg, H. Metzner, 1999, Strahlen und Wellen, 1. Auflage, S. Hirzel Verlag
- [Breit2001] W. Breit, 2001, Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Sachstand und neuere Untersuchungen, Betontechnische Berichte 1998-2000 (S.145-167), VBT Verlag Bau u. Technik
- [Buck1995] J. Buck, M. Maisl, H. Reiter, 1995, Entwicklung eines schnellen Rekonstruktionsverfahrens für die 3D-Röntgen-Computertomographie, DGZfP-Berichtsband, Band 47 (1995), S. 463-470
- [Buzug2004] Thorsten M. Buzug, 2004, Einführung in die Computertomographie, 1. Auflage, Springer-Verlag
- [Campbell1989] Campbell RC, 1989, Statistik for Biologists, Cambridge University Press, Cambridge New York Port Chester Melbourne Sydney
- [Cornelis2005] E. Cornelis, A. Kottar, H. P. Degischer, 2005, Charakterisierung kohlenstofffaserverstärkter Metalle und Polymere mittels Röntgen-Computertomographie, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Nr. 15 (2005), S. 415-420
- [Degryse2001] P. Degryse, M. Van Geet, M. Waelkens, R. Swennen, M. Wevers, W. Viaene, 2001, Microfocus Computer-Tomography as a qualitative approach to frost damage in modern restoration mortars, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzung und Baudenkmalpflege, Jg. 7 (2001), Nr. 1, S. 47-62
- [Dessauer1951] Friedrich Dessauer, 1951, W. C. Röntgen, 2. Auflage, Josef Knecht-Carolusdruckerei
- [Dewitz1999] K.-D. Dewitz, 1999, Zerstörungsfreie Baustoffprüfung mittels Computer-Tomographie, DGZfP-Berichtsband, Band 66 CD (1999), S. 359-363
- [Dewitz2000] K.-D. Dewitz, 2000, Ergebnisse experimenteller Untersuchungen des Feuchtetransportes in Baustoffen mittels Computer-Tomographie, DGZfP-Berichtsband, Band 66 CD (1999), S. 951-958

- [Dimitrijevic1972] Cedomir Dimitrijevic, 1972, Praktische Berechnung der Abschirmung von radioaktiver und Röntgen Strahlung, Verlag Chemie
- [DIN1996] DIN-Taschenbuch 159, 1996, Strahlenschutz-Grundlagen, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH
- [Flisch2006] A. Flisch, 2006, Industrielle Computertomographie zur 3D-Volumenerfassung und Defektanalyse, Giesserei-Rundschau, Band 53 (2006), Heft 5/6, S. 86-88
- [Geier] G. Geier, Computertomographie-dreidimensionale, zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Werkstoffen, Zement-Beton, S.16
- [Goebbels2007] J. Goebbels, D. Meinel, J. Nötel, C. Recknagel, 2007, Charakterisierung von offenporigem Asphalt mit Computertomographie, DGZfP-Berichtsband, Band BB 104 CD (2007), S. 1-6, P23-Computertomographie
- [Harrer2007] B. Harrer, W. Winkler, E. Pissenberger, J. Kastner, H. P. Degischer, 2007, Röntgen-Computertomographie zur Charakterisierung von Inhomogenitäten in Gussgefügen von Aluminium und Stahl, Praktische Metallographie Sonderband 39 (2007), S. 131-136
- [Heuck1995] Friedrich H. W. Heuck, Eckard Mauerauch, 1995, Forschung mit Röntgenstrahlung, 1. Auflage, Springer-Verlag
- [Illerhaus2001] B. Illerhaus, E. Jasiuniene, J. Goebbels, 2001, Messungen von Eigenschaften poröser Materialien in3D mittels Mikro-Computertomographie, DGZfP-Berichtsband, Band 75 (2001), S. 1-5
- [Jackson1975] J.D. Jackson, 1975, Classical electrodynamics, John Wiley, New York
- [Jackson1981] D.F. Jackson, D.J. Hawkes, 1981, X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures, Physics Reports, Band 70, S. 169
- [Kolbitsch2004] A. Kolbitsch, B. Ecker, I. Merta, A. Tsukalas, M. Walter, 2004, Hochbau BI – Band 1, Schriftenreihe des Ordinariats für Hochbau
- [Krieger2003] E. Krieger, 2003, Die Überprüfung des Eindringverhaltens ausgewählter Kunstharze bei Insektengeschädigtem Holz mit Hilfe der Computertomographie, ZKK-Zeitschrift für Kunst und Konservierung Jg. 17 (2003), Nr. 2, S.265-275
- [Löffler2007] R. Löffler, T. Bernthaler, A. Nagel, G. Schneider, 2007, 3D-Computertomographie und Materialographie- Potential für angewandte Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse, Praktische Metallographie Sonderband 39 (2007), S. 219-224
- [Lossau1995] Norbert Lossau, 1995, Röntgen, 1. Auflage, Motovun Verlagsges. AG

- [Maas2003] H.-G. Maas, U. Hampel, M. Schulze, 2003, Photogrammetrische und computertomographische Erfassung von Deformationen, Rissentwicklungen und Strukturveränderungen bei Belastungsversuchen von textilverstärkten Probekörpern, 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2-2003), S. 187-199
- [Maisl2000] M. Maisl, H. Reiter, M. Purschke, R. Seifert, E. Zabler, M. Rosenberger-Koch, R. Bosch, 2000, Anwendungen der industriellen 3D-Computertomographie, DGZfP-Berichtsband, Band 73 (2000), S. 191-199
- [Mellmann1999] G. Mellmann, J. Goebbels, 1999, Computertomographie für Industrieböden aus Stahlfaserbeton, Industrieböden (internationales Kolloquium), Nr. 4, Esslingen (Deutschland), 12-14 Januar 1999
- [Müller] U. Müller, A. Teischinger, State of the Art Report von Scanning-Technologien in Hinblick auf den Einsatz in der Holztechnologie
- [Münker1998] M. Münker, 1998, Computertomograph bewährt sich in der Industrie, Industrieanzeiger, Band 120 (1998), Heft 36, S. 46-48
- [Nielsen2001] J. Als-Nielsen, 2001, Elements of modern X-ray Physics, John Wiley & Sons, Ltd
- [Niemz1997] P. Niemz, L. J. Kucera, A. Flisch, E. Blaser, 1997, Anwendung der Computertomographie an Holz, Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997) 279-280, Springer-Verlag
- [Pabel2007] T. Pabel, M. Gloser, A. Neumüller, 2007, Computertomographie bei Holz, Holzforschung Austria, Jg. 5, Nr. 1, S. 8-9
- [Pang1998] S. Pang, P. Wiberg, 1998, Model predicted and CT scanned moisture distribution in a Pinus radiata board during drying, Holz als Roh- und Werkstoff 56 (1998) 9-14, Springer-Verlag
- [Petutschnigg2002] A. J. Petutschnigg, M. Flach, H. Katz, 2002, Rotfäuleerkennung bei Fichte in CT-Bildern, Holz als Roh- und Werkstoff 60 (2002), S. 219-223, Springer-Verlag
- [Queisser1998] A. Queisser, 1998, Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natur-sandstein mittels Computer-Tomographie, Bautenschutz und Bausanierung, Jg. 11 (1988), Nr. 2, S. 54-60
- [Recknagel2008] C. Recknagel, J. Goebbels, D. Meinel, 2008, Möglichkeiten der Strukturkennzeichnung von Asphalten mittels 3D-Computertomographie, Straße und Autobahn, Nr.2 (2008), S. 65-74
- [Renger2007] B. Renger, 2007, Strahlenschutz in der Computertomographie, Strahlenschutz-Praxis, Band13 (2007), Heft 4, S. 8-15

- [Riegler1967] F. Riegler, 1967, Einführung in die Physik der Röntgen- und Gammastrahlen, Verlag Karl Thiemig KG - München
- [Schinagl2007] W. Schinagl, G. Geier, S. Schider, W. Voritsch, 2007, Computertomographische Untersuchungen an einem Sandstein-Kleinkern, Erdöl-Erdgas-Kohle, Band 123 (2007), Nr. 4, S. 155-158
- [Schmidt1999] N. Schmidt, 1999, 3D-Scannen und Digitalisieren für CAD, CAE und Qualitätsprüfung, VDI-Zeitschrift Spezial (1999), Heft 7, S. 58-59
- [Standfest2008] Gernot Standfest, Alexander Petutschnigg, Manfred Dunky, Bernhard Zimmer, 2008, Rohdichtebestimmung von Holzwerkstoffen mittels Computertomographie, Holz als Roh- und Werkstoff (published online), Springer-Verlag
- [Steeb1993] S. Steeb, G. Basler, V. Deutsch, G. Gauss, G. Griese, T. Güttinger, K. Kolb, M. Schaefer, F. Schur, W. Staib, W. Stein, M. Vogt, H. Wezel, 1993, Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung, 2. Auflage, expert verlag
- [Tagung2008] Industrielle Computertomographie-Fachtagung, 2008, 1. Auflage
- [Weberbauer1998] T. Weberbauer, F. Eidmann, H. Zayer, R. W. Kenn, S. Popp, H. Möhler, G. Schönefeld, 1998, Computertomographie-Ein innovatives Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, Kunststoffe, Band 88 (1998), Heft 4, S.551-554, Carl Hanser-Verlag
- [Weidemann2007] G. Weidemann, J. Goebbels, R. Stadie, B. Hillemeier, A. Haibel, 2007, Untersuchung von faserverstärktem Porenbeton mit Computertomographie, DGZfP-Berichtsband, Band BB 104 CD (2007), S. 1-13, P22-Computertomographie
- [Weise2007] F. Weise, Y. Onel, J. Goebbels, 2007, Analyse des Gefüge- und Feuchtezustandes in mineralischen Baustoffen mit der Mikro-Röntgen-3D-Computertomographie, Bauphysik 29 (2007), Nr. 3, S. 194-201, Ernst & Sohn-Verlag
- [Wiberg1999] P. Wiberg, T. J. Morén, 1999, Moisture flux determination in wood during drying above fibre saturation point using CT-scanning and digital image processing, Holz als Roh- und Werkstoff 57 (1999) 137-144, Springer-Verlag

11 Abbildungsverzeichnis

Die Quellenangaben der einzelnen Abbildungen sind auf den jeweiligen Seiten ersichtlich. Abbildungen ohne Quellenangabe sind vom Autor selbst erstellt worden.

Abbildung 2.1	Übersicht einiger vorhandener Tomographieverfahren und deren Messbereiche	Seite 4
Abbildung 2.2	Darstellung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche	Seite 6
Abbildung 2.3	Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre	Seite 7
Abbildung 2.4	Schematischer Verlauf eines Bremspektrums	Seite 10
Abbildung 2.5	Unterschiedliche Bremspektren in Abhängigkeit der Röhrenspannung einer Wolframanode	Seite 11
Abbildung 2.6	Darstellung der Bremsstrahlung sowie des charakteristischen Linienspektrums einer Molybdänanode bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 30 \text{ kV}$	Seite 13
Abbildung 2.7	Strahlungsdurchgang durch eine homogene Materialschicht	Seite 16
Abbildung 2.8	Zusammenfassung der Schwächungseffekte	Seite 17
Abbildung 2.9	Brechung einer Welle am atomaren Kristallgitter	Seite 19
Abbildung 2.10	Schematische Darstellung der Rayleigh-Streuung	Seite 20
Abbildung 2.11	Schematische Darstellung der Compton-Streuung	Seite 22
Abbildung 2.12	Zusammenfassung der Einflüsse auf das Absorptionsverhalten	Seite 23
Abbildung 2.13	Gegenüberstellung der Absorptionsmechanismen	Seite 24
Abbildung 2.14	Darstellung der einzelnen Schwächungseffekte für Blei und Aluminium	Seite 25
Abbildung 2.15	Gegenüberstellung der einzelnen Absorptionskoeffizienten für Blei	Seite 27
Abbildung 2.16	Aufhärtung der Strahlung mittels Kupfer- und Aluminiumfilter	Seite 28
Abbildung 2.17	Strahlenbiologische Wirkungskette. Direkte und indirekte Wirkung auf ein Gen und die Möglichkeiten der Beeinflussung des Weges zur endgültigen Fixierung des Schadens	Seite 28
Abbildung 2.18	Strahlenwirkung auf die Zelle und biomolekulare Vorgänge (PKC: Proteinkinase C; DNS: Desoxyribonukleinsäure, Erbsubstanz; mRNS Botenribonukleinsäure)	Seite 30

Abbildung 2.19	Darstellung eines „Flat panel detector“ eines industriellen Computertomographen mit offenem Aufbau (aktive Detektoroberfläche: 410*410 mm ² ; 1024*1024 Pixel)	Seite 31
Abbildung 2.20	Erste Projektion zweier Objekte	Seite 31
Abbildung 2.21	Zweite Projektion zweier Objekte	Seite 31
Abbildung 7.1	Schematische Darstellung der Planungsschritte bei der Anschaffung eines CT	Seite 84
Abbildung 7.2	Seitenansicht des ausgewählten Gerätes	Seite 85
Abbildung 8.1	Systemskizze einer Slim-Floor-Decke	Seite 89
Abbildung 8.2	Ansicht der einzelnen Elemente; Deltaträger (links), Hohldiele (rechts)	Seite 89
Abbildung 8.3	Schematische Querschnittsdarstellung der einzelnen Komponenten einer Slim-Floor-Decke, Delträger (links) und Vorgespannte Hohldiele (rechts), Abmessungen in [mm]	Seite 89
Abbildung 8.4	Schematische Darstellung der Lochfrass-Korrosion (pitting corrosion)	Seite 90
Abbildung 8.5	Schematische Darstellung der Potentialfeldmessung	Seite 92
Abbildung 8.6	Auswertung der Potentialfeldmessung des Hohldielen-Elements D1-1	Seite 93
Abbildung 8.7	Auswertung der Potentialfeldmessung des Hohldielen-Elements D2-1	Seite 93
Abbildung 8.8	Ausbau der Spannkabel mittels Schlagbohrhammer zur mikroskopischen Untersuchung und zur Durchführung weiterer Belastungstests	Seite 96
Abbildung 8.9	Probenentnahme für die Computertomographie mittels Kernbohrung (Ø 150 mm)	Seite 97
Abbildung 8.10	Entnahme der „kleinen“ Bohrkerne (H: 150 mm, Ø 50 mm)	Seite 98
Abbildung 8.11	Bohrkerne (H: 150 mm, Ø 50 mm) mit Spannkabel in der Mitte	Seite 98
Abbildung 8.12	Computertomograph der FH Wels (Rayscan 250)	Seite 99
Abbildung 8.13	Probenfixierung (links) und Probenpositionierung (rechts)	Seite 100
Abbildung 8.14	Schnittbild von Oben (links) und von der Seite (rechts)der Probe D1-1/D5 („groß“)	Seite 101

Abbildung 8.15	Positionierung einer „kleinen“ Probe auf dem Objektisch. Wie im Vergleich zu Abbildung 8.13 zu sehen ist konnte die Probe aufgrund des kleineren Messbereiches erheblich näher an der Röntgenröhre positioniert werden, wodurch die Auflösung verbessert wurde	Seite 102
Abbildung 8.16	3D-Darstellung eines „großen“ (\varnothing 150 mm) Probekörpers	Seite 105
Abbildung 8.17	Schnittbilder der Probe D1-1/E5; „von oben“ (links oben), „von vorne“ (rechts oben) und „von der Seite“ (links unten) mit Angaben der Position einer Korrosionsstelle	Seite 106
Abbildung 8.18	Schnittbild „von der Seite“ einer Korrosionsstelle der Probe D1-1/E5, mit Ausmaßen von 0,89*1,49 mm	Seite 107
Abbildung 8.19	Schnittbild „von oben“ einer Korrosionsstelle der Probe D1-1/E5, mit einer Tiefe von 0,71 mm	Seite 107
Abbildung 8.20	Selbe Stelle wie Abbildung 9.18 und 9.19, aber mit veränderten Grauwerte	Seite 108
Abbildung 8.21	3D-Darstellung der Probe D1-1/E5 nach dem Zusammenfügen der einzelnen Messbereiche; gesamte Probe (links) und Separation des Spannstahls (rechts), die dunklen Punkte am Spannstahl (rechts) sind einzelne Korrosionsstellen	Seite 108
Abbildung 8.22	3D-Abbildung einer Probe (D1-1/E5) nach Zusammenfügung der einzelnen Messbereiche (linkes Bild) und Darstellung eines einzelnen Messbereiches (rechtes Bild)	Seite 109
Abbildung 8.23	Schnittführung durch den 3D-Volumenkörper (links) und Separation des Spannstahls (rechts)	Seite 109
Abbildung 8.24	D1-1/E5-unten: korrosionsfreie Unterseite des Spannstahls (links) und Lochfrass-Korrosion (dunkle Punkte) der Oberseite des Spannstahls (rechts)	Seite 110
Abbildung 9.1	Schematische Darstellung der Computertomographie	Seite 111
Abbildung 13.1	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelteils D1-1	Seite 122
Abbildung 13.2	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelteils D1-2	Seite 123
Abbildung 13.3	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelteils D1-3	Seite 124
Abbildung 13.4	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelteils D2-1	Seite 125
Abbildung 13.5	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelteils D2-2	Seite 126

Abbildung 13.6	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielenteils D2-3	Seite 127
Abbildung 13.7	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielenteils D3-1	Seite 128
Abbildung 13.8	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielenteils D3-2	Seite 129
Abbildung 13.9	Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielenteils D3-3	Seite 130

12 Tabellenverzeichnis

Die Quellenangaben der einzelnen Tabellen sind auf den jeweiligen Seiten ersichtlich. Tabellen ohne Quellenangabe sind vom Autor selbst erstellt worden.

Tabelle 2.1	Auflistung einiger Materialien und der dazugehörigen Massenschwächungs-, Schwächungskoeffizienten und CT-Werte	Seite 29
Tabelle 3.1	Auflistung der wichtigsten Ereignisse aus der Sicht der Computertomographie	Seite 35
Tabelle 4.1	Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter	Seite 62
Tabelle 4.2	Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter	Seite 63
Tabelle 4.3	Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter	Seite 65
Tabelle 6.1	Zusammenfassung der Anforderungsparameter für die Anschaffung eines Computertomographen	Seite 82
Tabelle 8.1	Auflistung der Proben- und Untersuchungsparameter	Seite 103
Tabelle 13.1	Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielelteils D1-1	Seite 131
Tabelle 13.2	Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielelteils D2-2	Seite 132
Tabelle 13.3	Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielelteils D3-1	Seite 133

13 Anhang

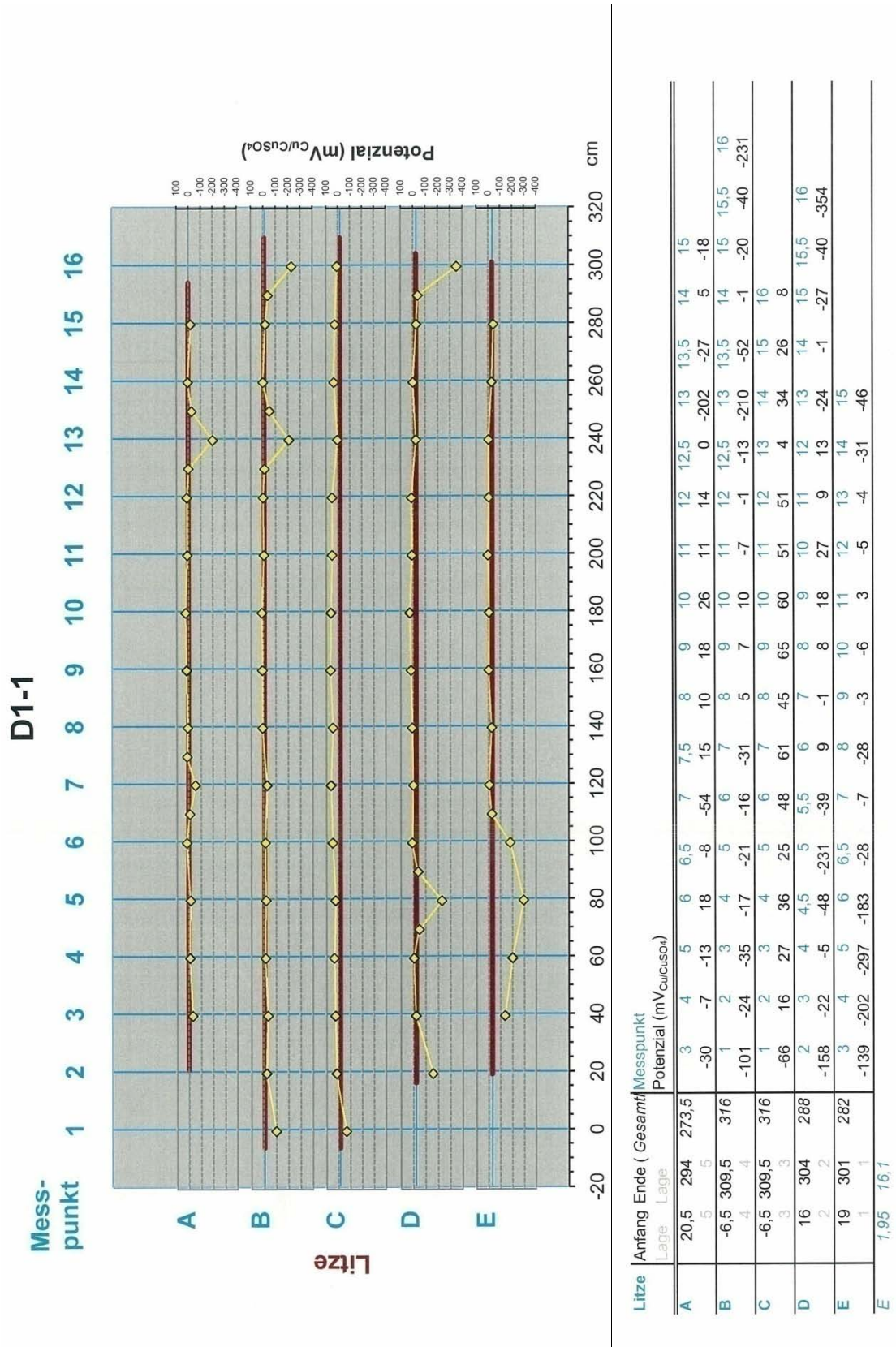


Abbildung 13.1: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielenteils D1-1

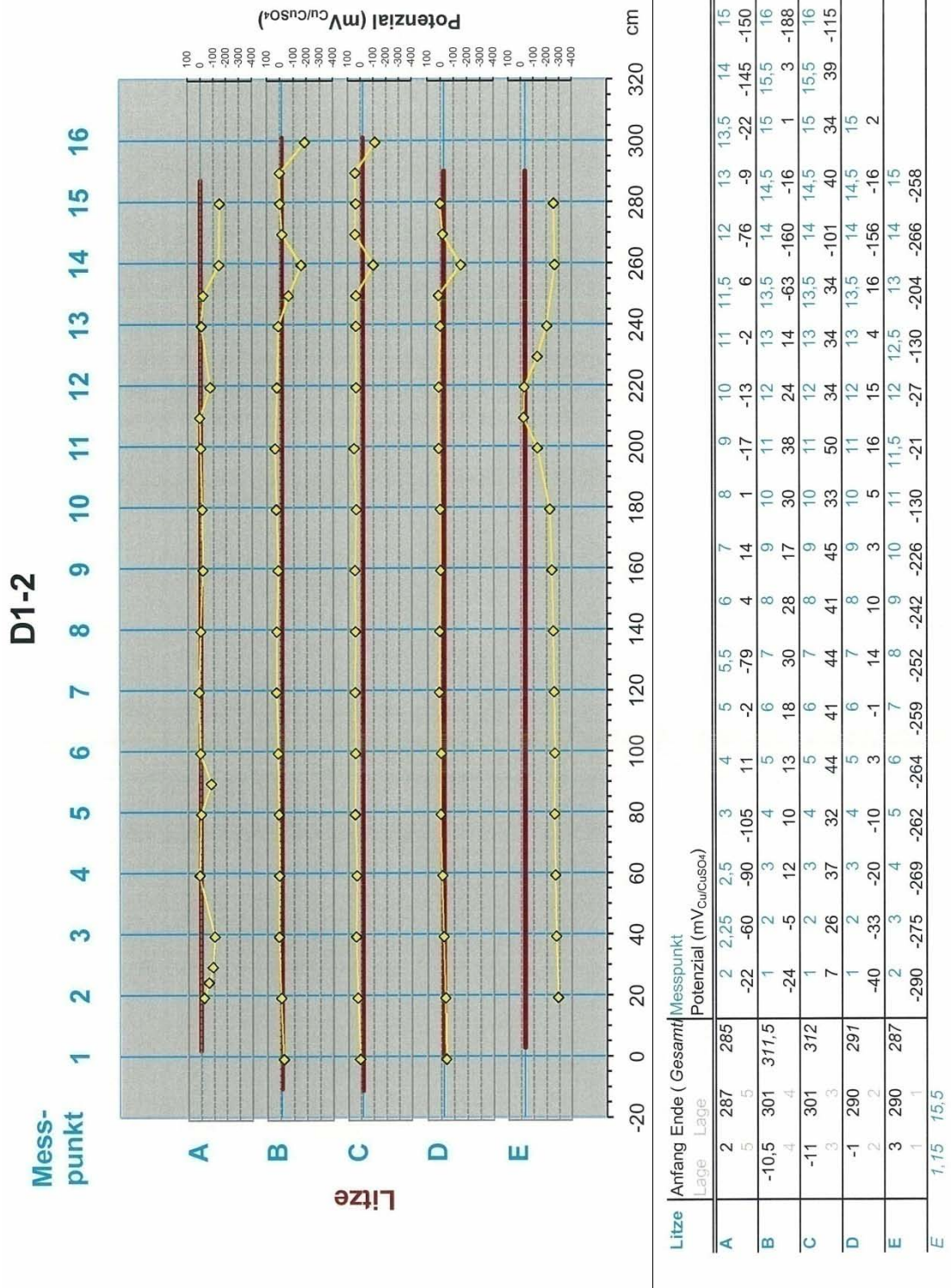
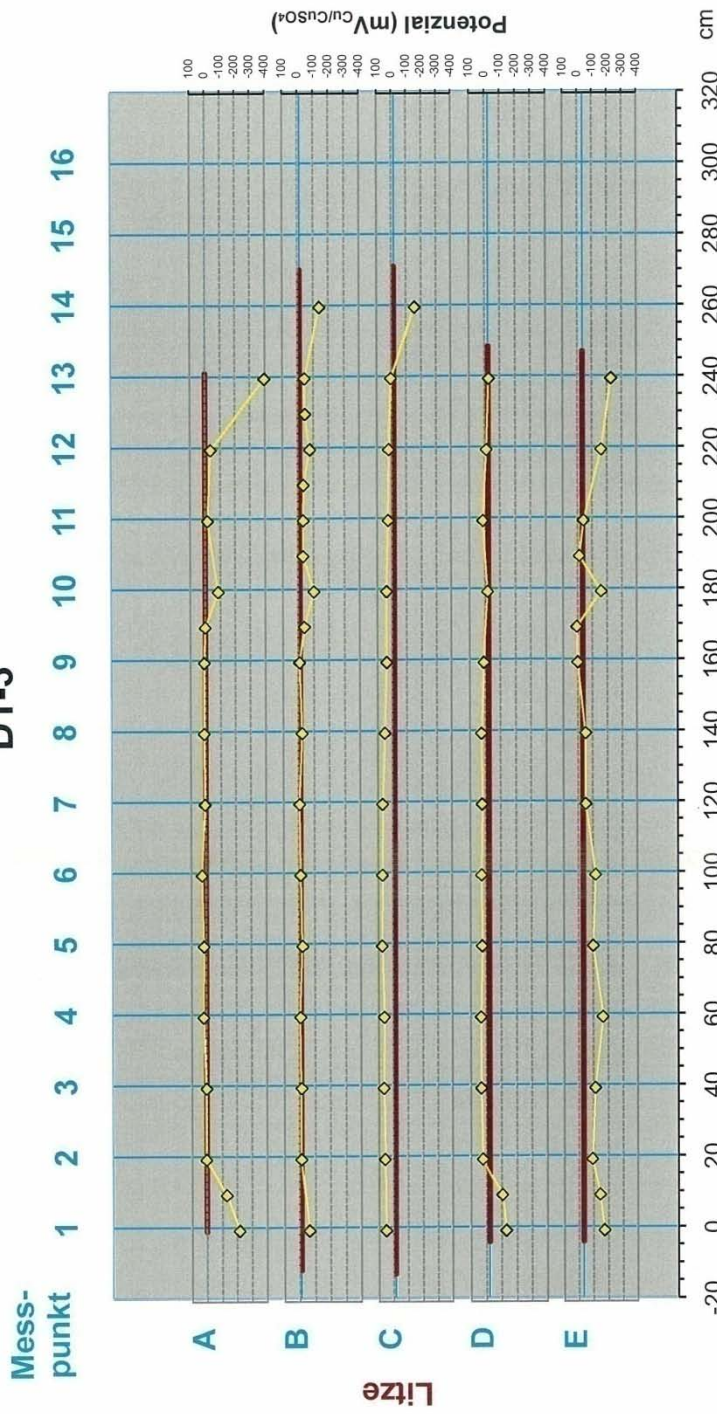


Abbildung 13.2: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D1-2

D1-3



Litze	Anfang Ende (Gesamt)		Messpunkt		Potential (mV _{Cu/CuSO4})																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	10	11	12	13	14																								
A	-1	241	242	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	10	11	12	13	-215	-129	5	3	21	17	29	7	11	9	2	-85	-16	-37	-395						
B	-12	270	282	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	14	-62	-10	-12	-6	-22	-10	-5	-23	-8	-40	-102	-32	-34	-36	-78	-47	-45	-142
C	-13	271	284	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	50	58	65	62	74	72	69	51	37	37	25	20	4	-158				
D	-4	248,5	252,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	-131	-106	23	32	33	24	28	22	25	7	-19	12	-13	-29				
E	-4	247	251	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	10	10,5	11	12	13	14	15	-171	-142	-89	-110	-163	-98	-115	-49	-50	3	9	-158	-10	-38	-160	-228		
E	0,8	13,4																																					

Abbildung 13.3: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D1-3

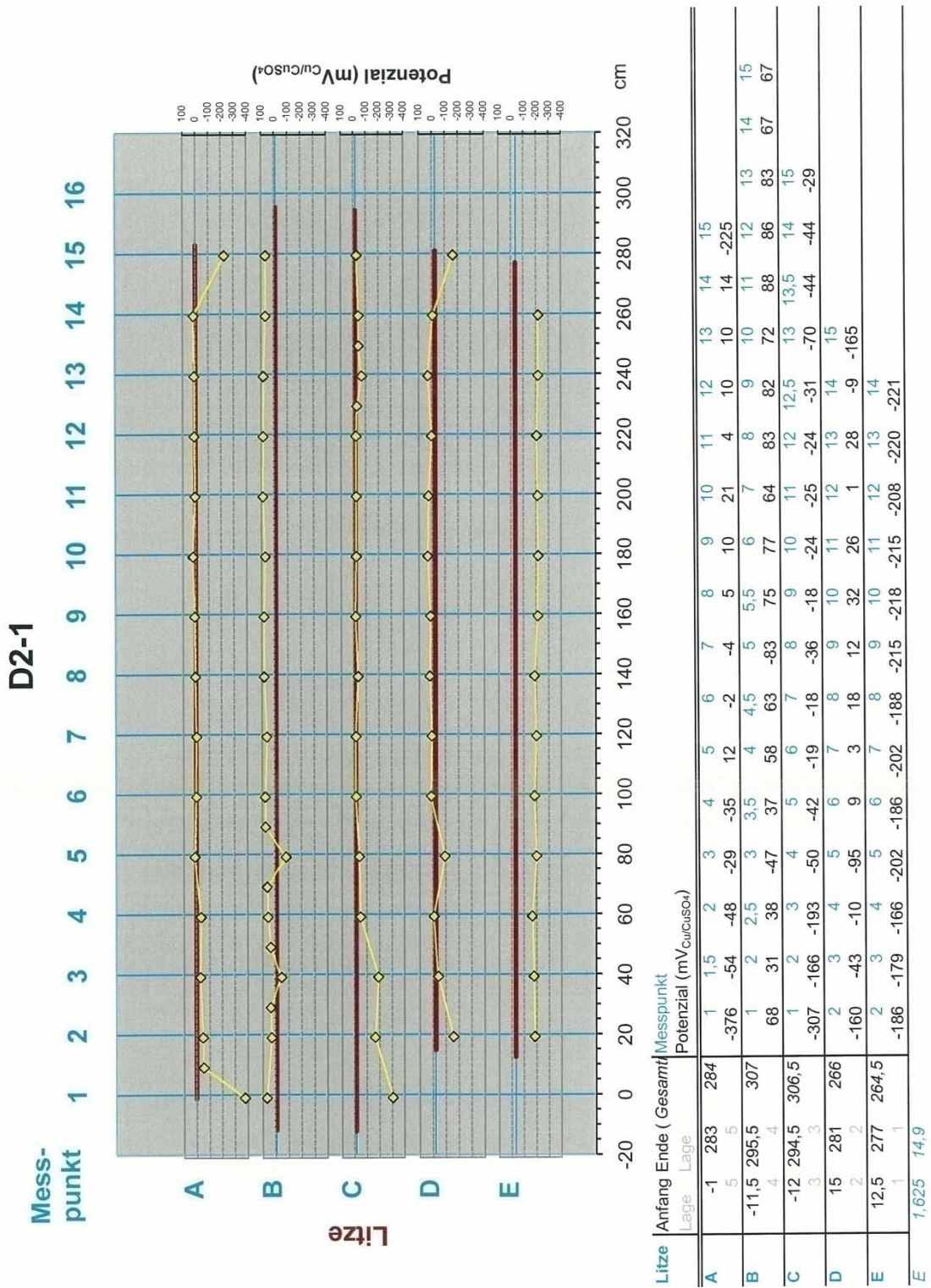


Abbildung 13.4: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D2-1

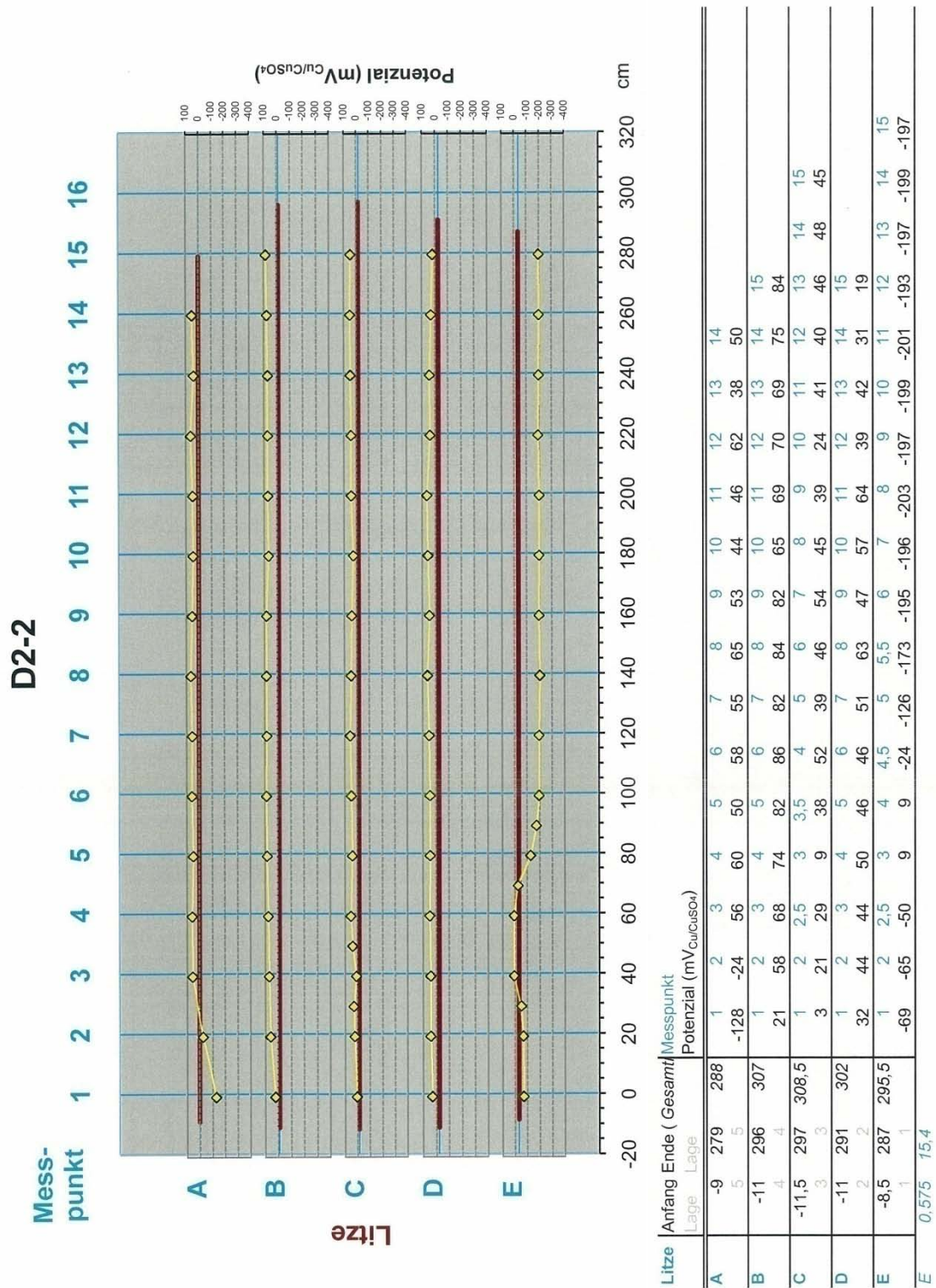


Abbildung 13.5: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D2-2

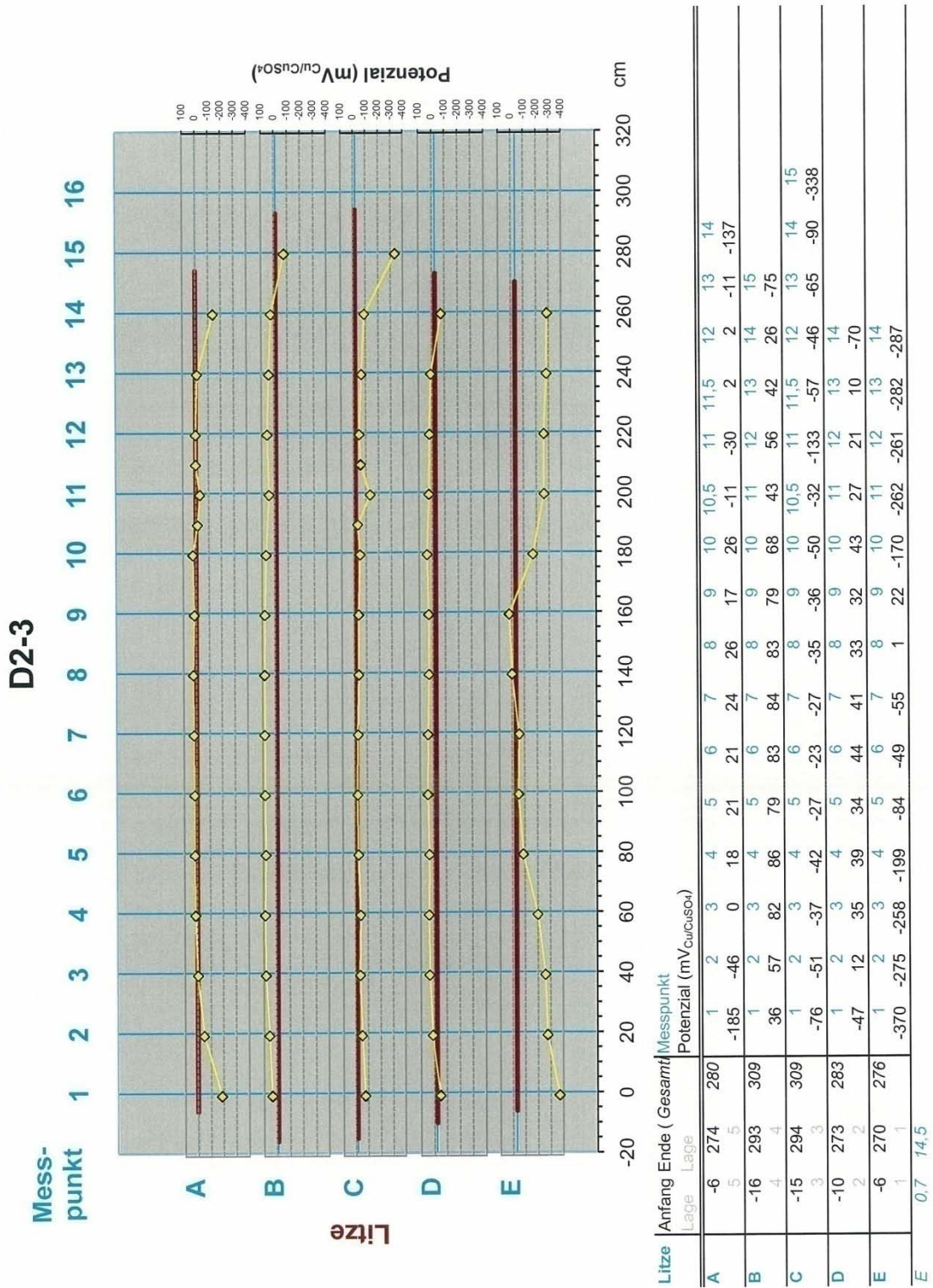
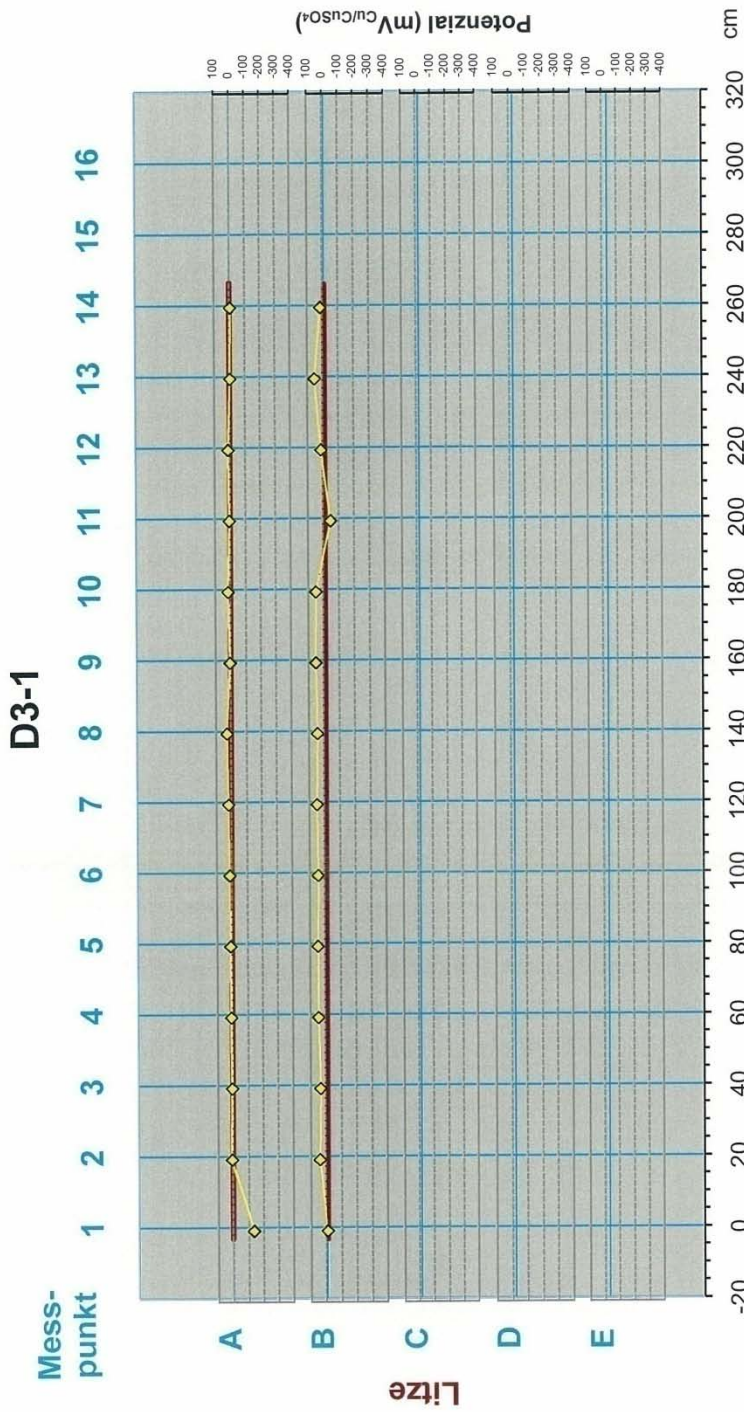


Abbildung 13.6: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D2-3



Litze	Anfang Lage	Ende Lage	Gesamt Lage	Messpunkt	Potenzial (mV _{Cu/CuSO₄})
A	-3	266,5	269,5	1	135
	5	5		2	3
	4	8	10	3	4
	4	10	13	4	5
	4	13	19	5	6
B	-3	266	269	1	10
	4	4	5	2	3
	4	5	6	3	4
	4	6	7	4	5
	4	7	8	5	6
C	-10	40	35	1	46
	4	46	47	2	44
	4	44	48	3	43
	4	48	51	4	49
	4	51	52	5	48
D	3	3	0		
	2	2	0		
E	1	1	0		
	-1	-1	-1		

Abbildung 13.7: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D3-1

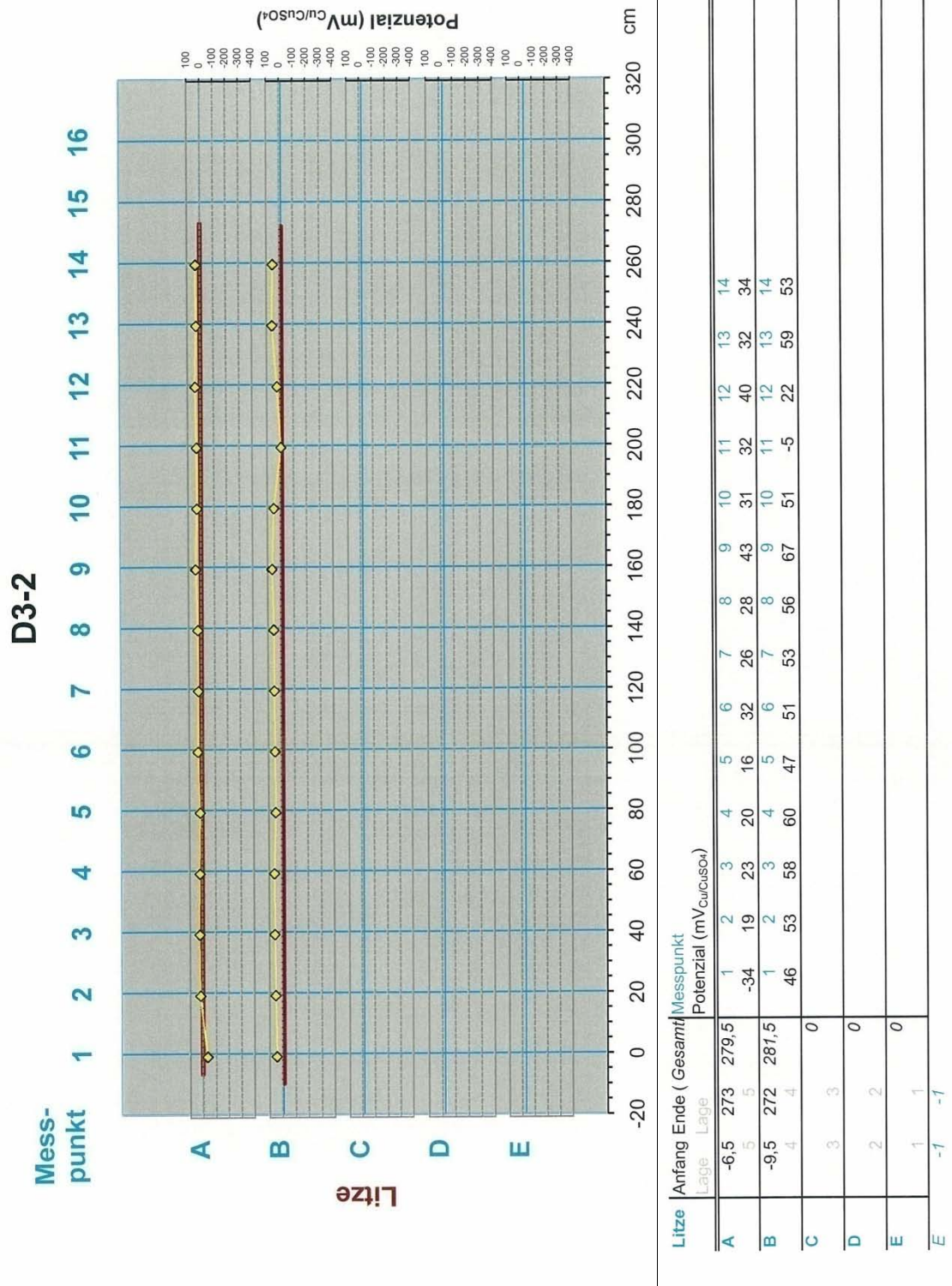


Abbildung 13.8: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D3-2

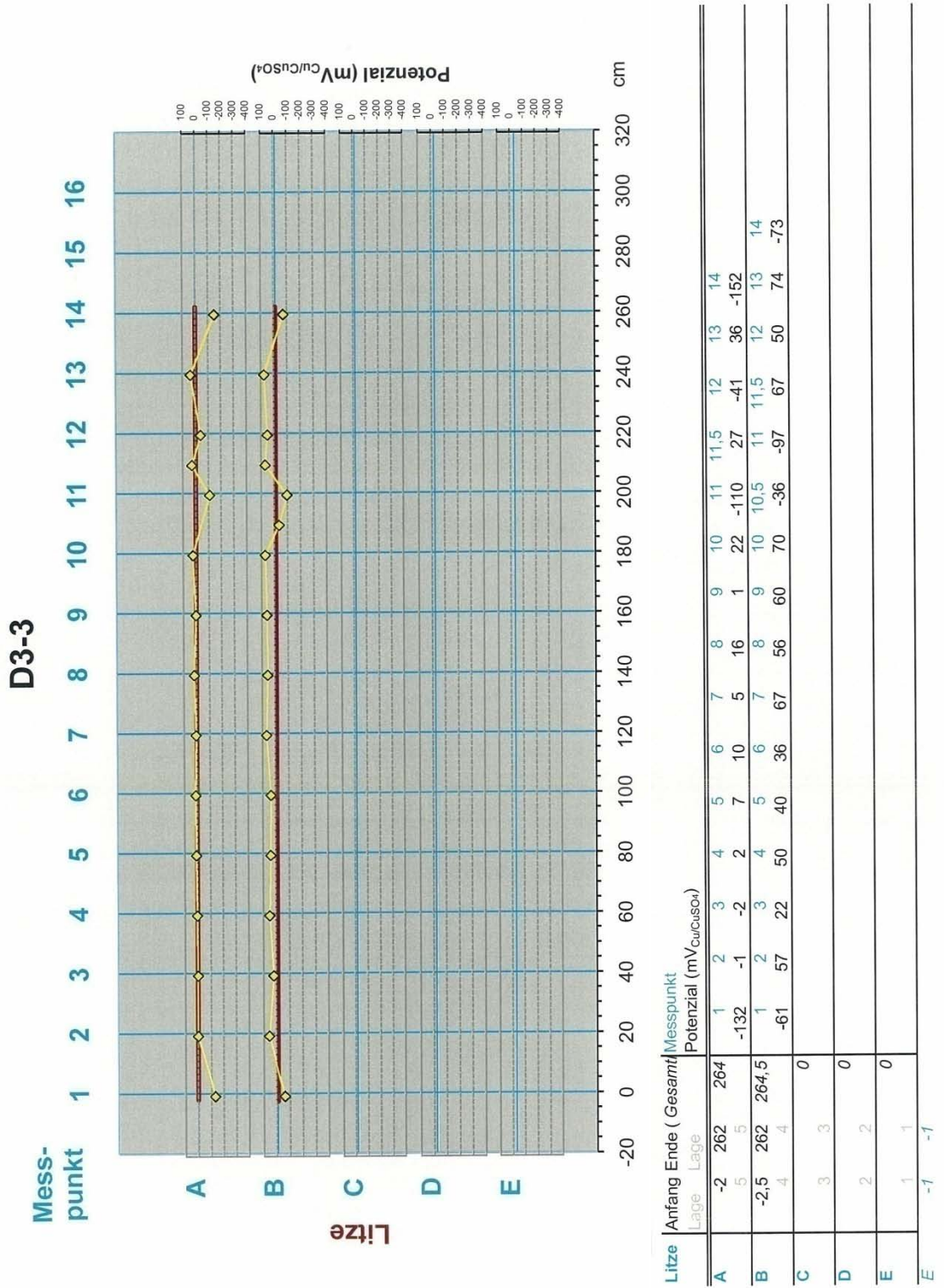


Abbildung 13.9: Auswertung der Potentialfeldmessung des Dielelenteils D3-3

Tabelle 13.1: Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielenteils D1-1

Diele	Position	Tiefe [cm]	Messwert [mg/l]	Zul. Chloridgehalt lt. Norm [M-%]	Chloridgehalt im Zement [M-%]	Chloridgehalt im Bauteil [%]
D1/1	B-2	0,0 - 1,5	21,7	0,200	0,434	217
D1/1	B-2	3,0 - 3,5	23,7	0,200	0,474	237
D1/1	B-2	13,0 - 15,0	23,3	0,200	0,466	233
D1/1	B-2	26,0 - 28,0	28,1	0,200	0,562	281
D1/1	B-6	0,0 - 1,5	20,9	0,200	0,418	209
D1/1	B-6	3,0 - 3,5	21,9	0,200	0,438	219
D1/1	B-6	13,0 - 15,0	24,6	0,200	0,492	246
D1/1	B-6	26,0 - 28,0	23,6	0,200	0,472	236
D1/1	B-10	0,0 - 1,5	22,3	0,200	0,446	223
D1/1	B-10	3,0 - 3,5	24,4	0,200	0,488	244
D1/1	B-10	13,0 - 15,0	23,9	0,200	0,478	239
D1/1	B-10	26,0 - 28,0	22,3	0,200	0,446	223
D1/1	B-14	0,0 - 1,5	22,2	0,200	0,444	222
D1/1	B-14	3,0 - 3,5	23,1	0,200	0,462	231
D1/1	B-14	13,0 - 15,0	22,0	0,200	0,440	220
D1/1	B-14	26,0 - 28,0	22,7	0,200	0,454	227
D1/1	C-2	0,0 - 1,5	21,8	0,200	0,436	218
D1/1	C-2	3,0 - 3,5	21,7	0,200	0,434	217
D1/1	C-2	13,0 - 15,0	20,5	0,200	0,410	205
D1/1	C-2	26,0 - 28,0	33,8	0,200	0,676	338
D1/1	D-2	0,0 - 1,5	22,5	0,200	0,450	225
D1/1	D-2	3,0 - 3,5	27,7	0,200	0,554	277
D1/1	D-2	13,0 - 15,0	20,9	0,200	0,418	209
D1/1	D-2	26,0 - 28,0	21,9	0,200	0,438	219

Tabelle 13.2: Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielenteils D2-2

Diele	Position	Tiefe [cm]	Messwert [mg/l]	Zul. Chloridgehalt lt. Norm [M-%]	Chloridgehalt im Zement [M-%]	Chloridgehalt im Bauteil [%]
D2/2	A-1	0,0 - 1,5	20,9	0,200	0,418	209
D2/2	A-1	3,0 - 3,5	24,8	0,200	0,496	248
D2/2	A-1	13,0 - 15,0	21,4	0,200	0,428	214
D2/2	A-1	26,0 - 28,0	22,6	0,200	0,452	226
D2/2	C-1	0,0 - 1,5	21,0	0,200	0,420	210
D2/2	C-1	3,0 - 3,5	23,2	0,200	0,464	232
D2/2	C-1	13,0 - 15,0	21,2	0,200	0,424	212
D2/2	C-1	26,0 - 28,0	22,1	0,200	0,442	221
D2/2	E-2	0,0 - 1,5	29,0	0,200	0,580	290
D2/2	E-2	3,0 - 3,5	23,9	0,200	0,478	239
D2/2	E-2	13,0 - 15,0	23,5	0,200	0,470	235
D2/2	E-2	26,0 - 28,0	22,1	0,200	0,442	221
D2/2	E-6	0,0 - 1,5	224,0	0,200	4,480	2240
D2/2	E-6	3,0 - 3,5	38,4	0,200	0,768	384
D2/2	E-6	13,0 - 15,0	23,3	0,200	0,466	233
D2/2	E-6	26,0 - 28,0	39,4	0,200	0,788	394
D2/2	E-10	0,0 - 1,5	168,0	0,200	3,360	1680
D2/2	E-10	3,0 - 3,5	80,0	0,200	1,600	800
D2/2	E-10	13,0 - 15,0	21,6	0,200	0,432	216
D2/2	E-10	26,0 - 28,0	23,6	0,200	0,472	236
D2/2	E-14	0,0 - 1,5	250,0	0,200	5,000	2500
D2/2	E-14	3,0 - 3,5	39,2	0,200	0,784	392
D2/2	E-14	13,0 - 15,0	22,0	0,200	0,440	220
D2/2	E-14	26,0 - 28,0	22,0	0,200	0,440	220

Tabelle 13.3: Auswertung der Salzkonzentrationen (Chloride) des Dielenteils D3-1

Diele	Position	Tiefe [cm]	Messwert [mg/l]	Zul. Chloridgehalt lt. Norm [M-%]	Chloridgehalt im Zement [M-%]	Chloridgehalt im Bauteil [%]
D3/1	A-3	0,0 - 1,5	23,4	0,200	0,468	234
D3/1	A-3	3,0 - 3,5	24,5	0,200	0,490	245
D3/1	A-3	13,0 - 15,0	22,7	0,200	0,454	227
D3/1	A-3	26,0 - 28,0	24,6	0,200	0,492	246
D3/1	A-6	13,0 - 15,0	22,8	0,200	0,456	228
D3/1	A-6	26,0 - 28,0	17,5	0,200	0,350	175
D3/1	A-9	13,0 - 15,0	21,1	0,200	0,422	211
D3/1	A-9	26,0 - 28,0	21,5	0,200	0,430	215
D3/1	A-11	0,0 - 1,5	17,3	0,200	0,346	173
D3/1	A-11	3,0 - 3,5	26,5	0,200	0,530	265
D3/1	A-14	13,0 - 15,0	23,3	0,200	0,466	233
D3/1	A-14	26,0 - 28,0	25,1	0,200	0,502	251
D3/1	B-3	0,0 - 1,5	21,1	0,200	0,422	211
D3/1	B-3	3,0 - 3,5	21	0,200	0,420	210
D3/1	B-3	13,0 - 15,0	20,3	0,200	0,406	203
D3/1	B-3	26,0 - 28,0	22,3	0,200	0,446	223
D3/1	B-6	0,0 - 1,5	22,5	0,200	0,450	225
D3/1	B-6	3,0 - 3,5	22	0,200	0,440	220
D3/1	B-9	0,0 - 1,5	21,3	0,200	0,426	213
D3/1	B-9	3,0 - 3,5	22,3	0,200	0,446	223
D3/1	B-11	0,0 - 1,5	22,6	0,200	0,452	226
D3/1	B-11	3,0 - 3,5	25,6	0,200	0,512	256
D3/1	B-14	0,0 - 1,5	22,3	0,200	0,446	223
D3/1	B-14	3,0 - 3,5	22,6	0,200	0,452	226