

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences Vienna



Department für Materialwissenschaften und
Prozesstechnik



Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe
Vorstand: Univ.Prof. Dr.nat.techn. Wolfgang Gindl-Altmutter

Betreuer: Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller

Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Dr. Christian Hansmann

Untersuchung der Rissbildung bei thermisch modifiziertem Eschenholz

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von: Markus Datler

Mai 2014

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit wurde in Kooperation mit dem Unternehmen Mitteramskogler GmbH und mit Unterstützung der Kompetenzzentrum Holz GmbH durchgeführt und entstand am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe der Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung und Umsetzung dieser Arbeit unterstützt haben. Im Besonderen geht dabei mein Dank an:

Betreut wurde die Arbeit von:

Priv.-Doz. Dr. Ulrich Müller (BOKU)

Mitbetreut wurde die Arbeit von:

Dipl.-Ing. Dr. Christian Hansmann (Kompetenzzentrum Holz GmbH)

Ansprechpersonen beim Unternehmen Mitteramskogler GmbH:

MSc. Malte Pries

Klemens Hanslik

Bereitstellung des Probematerials:

Mitteramskogler GmbH

Herstellung der Probekörper:

Klemens Hanslik (Mitteramskogler GmbH)

Johannes Wallisch (BOKU)

Veronika Knoblich (BOKU)

Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen:

Mag. Dr. Monika Bolka (BOKU)

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Konnerth (BOKU)

Ing. Robert Stingl (BOKU)

Gerhard Emsenhuber (BOKU)

Fachliche Beratung:

Dipl.-Ing.(FH) Dr. Hermann Pleschberger (Kompetenzzentrum Holz GmbH)

Mag. Georg Datler (Universität Zürich)

Herzlichen Dank auch an meine Eltern, die mich bei vielen Entscheidungen unterstützen und mir mein Studium ermöglicht haben.

Margarethe & Gerhard Datler

Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich inhaltlich mit den Materialeigenschaften von thermisch modifiziertem Eschenholz. Ausgangspunkt dieser Arbeit war das Anliegen eines Thermoholzproduzenten (Mitteramskogler GmbH) die Qualität der vom Unternehmen produzierten Terrassenbretter aus thermisch modifiziertem Eschenholz zu untersuchen bzw. Ansatzpunkte zur Qualitätsverbesserung zu identifizieren. Die thermische Modifikation stellt eine effektive Methode dar, um die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität von Holz bei Bewitterung und Verwendung im Außenbereich zu verbessern. Jedoch kommt es durch eine thermische Modifikation des Holzes zu einer unerwünschten Abnahme der Festigkeiten und zu einer Versprödung des Materials, wodurch eine verstärkte Neigung zur Rissbildung besteht. Die in dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchungen wurden weitgehend aus den Fragestellungen des Unternehmens abgeleitet bzw. an diese angepasst. Das Anliegen des Unternehmens war, die Einflüsse (1) der Abkühlungsgeschwindigkeit des Holzes nach der thermischen Modifikation, (2) der thermischen Behandlungsintensität und (3) verschiedener Brett- bzw. Holzmerkmale auf die Festigkeit des Holzes und die Rissbildung bei Bewitterung zu untersuchen. Um die Festigkeitseigenschaften des modifizierten Holzes zu untersuchen wurden Bruchenergieprüfungen in RL- und TL-Rissausbreitung durchgeführt. Da es aus zeitlichen Gründen nicht möglich ist, das Verhalten des Materials bei realer Bewitterung zu untersuchen, wurde das Verhalten in einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 untersucht. In ÖNORM EN 321 ist ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeitsbeständigkeit von Holzwerkstoffen durch einen Zyklustest definiert. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit geht hervor, dass die Abkühlungsgeschwindigkeit nach der thermischen Modifikation des Holzes keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchenergie und die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung zeigt. Es wurde festgestellt, dass mit steigender Darrdichte die Bruchenergie von unbewitterten Probekörpern steigt, jedoch auch die Rissbildung, die durch eine Zyklusbehandlung hervorgerufen wird. Durch eine steigende Behandlungsintensität kommt es zu einer Abnahme der Bruchenergie und zu einer Zunahme der Rissbildung in einer Zyklusbehandlung. Die Jahrringlage in den Brettern zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchenergie bei unbewitterten Probekörpern, jedoch konnte ein signifikanter Einfluss auf die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung festgestellt werden.

Keywords: Bruchenergie, Rissbildung, thermisch modifiziertes Holz

Abstract

This master thesis examines the material properties of thermally modified ash timber. The starting point of this project was the request of a producer of thermally modified timber products (Mitteramskogler GmbH) to examine the quality of their terrace boards made from thermally modified ash timber and to identify any aspects to improve product quality. Thermal treatment represents an effective method in order to improve the durability and dimensional stability of timber exposed to weathering and its outdoor usage. However, the thermal treatment induces an undesirable reduction in the strength and leads to an embrittlement of the timber, thus increasing the likelihood of crack formation. The experiments conducted during this project were designed and adapted according to the requests and ideas of the company. The company's aim was to examine the impact of (1) the speed of the cooling down of the timber following the thermal treatment, (2) the intensity of the thermal treatment, and (3) some wood and board characteristics on the strength and the formation of cracks during weathering. In order to examine the strength of the thermally modified timber, fracture energy tests for RL- and TL- crack propagation were conducted. As time constraints do not allow for the examination of the material under real time outdoor weathering, the performance of the material was assessed during a cyclic treatment according to ÖNORM EN 321. ÖNORM 321 defines a standardized procedure for the determination of the resistance of wood products against humidity using a cyclic treatment. The results of this study show that the speed of cooling down following the thermal modification of the timber has no significant impact on the fracture energy and the formation of cracks induced by cyclic treatment. Furthermore, it could be shown that an increase in wood density corresponds to an increase in fracture energy of unweathered test samples; however, this also corresponds to an increase in crack formation induced by the cyclic treatment. An increased thermal treatment intensity results in a decrease in fracture energy and an increase in crack formation during cyclic treatment. The positioning of the annual growth rings in the boards did not impact significantly on the fracture energy of unweathered test samples. However, the positioning of the annual growth rings in the boards had a significant impact on the formation of cracks during cyclic treatment.

Keywords: fracture energy, crack formation, thermally modified timber

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	8
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	15
Formelverzeichnis.....	16
1 Einleitung	17
2 Fragestellungen	17
3 Der Werkstoff Holz	18
3.1 Dimensionsstabilität und natürliche Dauerhaftigkeit von Holz	18
3.2 Vollholzprodukte und die Verwendung im bewitterten Außenbereich	19
3.3 Vor- und Nachteile von Vollholzprodukten, die für die Verwendung im Außenbereich geeignet sind	20
4 Übersicht - Holzmodifikation.....	21
4.1 Modifikation des Holzes durch Ausfüllen der Zelllumen.....	22
4.2 Modifikation des Holzes durch Imprägnieren der Zellwand	23
4.3 Chemisch modifiziertes Holz	23
4.4 Thermisch modifiziertes Holz	24
4.4.1 Thermoholz nach ÖNORM CEN/TS 15679	24
4.4.2 Verfahren zur Herstellung von thermisch modifiziertem Holz.....	25
4.4.3 Farbveränderung durch die thermische Modifikation.....	25
4.4.4 Masseverlust durch die thermische Modifikation	26
4.4.5 Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation	26
4.4.6 Dichte von thermisch modifiziertem Holz.....	28
4.4.7 Holzausgleichsfeuchtigkeit und Sorptionsverhalten	28
4.4.8 Chemische Zusammensetzung von thermisch modifiziertem Holz.....	29
4.4.9 pH-Wert von thermisch modifiziertem Holz	32
4.4.10 Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz gegenüber holzerstörenden Pilzen	32
4.4.11 Witterungsbeständigkeit von thermisch modifiziertem Holz	33
4.4.12 Dimensionsstabilität von thermisch modifiziertem Holz.....	33
4.4.13 Festigkeiten von thermisch modifiziertem Holz	33
4.4.14 Verklebung von thermisch modifiziertem Holz.....	34
4.4.15 Bearbeitbarkeit von thermisch modifiziertem Holz.....	34
4.4.16 Thermisch modifiziertes Holz: Potenziale, Herausforderungen und Grenzen.....	34
5 Thermoholzproduktion des Unternehmens Mitteramskogler GmbH.....	36
6 Aufgabenstellungen	38
7 Hypothesenplan.....	39
7.1 Testhypothesen	39
7.2 Hintergrundhypothesen	42
8 Material	43
8.1 Untersuchtes Probenmaterial	43
8.2 Unterschiedliche Abkühlungsbedingungen	44
8.3 Erklärung der Probenbezeichnung bzw. Gruppenbezeichnung	45
8.4 Thermoholz Produktdatenblatt des Herstellers	46

9	Methode	47
9.1	Stichprobengröße	47
9.2	Untersuchung des derzeit angewendeten Abkühlungsprozesses	48
9.2.1	Theoretische Betrachtung des derzeitigen Abkühlungsprozesses	48
9.2.2	Beschreibung der Untersuchung des Abkühlungsprozesses.....	50
9.2.3	Beschreibung der durchgeführten Messungen	51
9.3	Untersuchung des Einflusses von Holz-, Brett- und Prozessmerkmalen auf die Bruchenergie und die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung	54
9.3.1	Erhebung der Darrdichte	55
9.3.2	Erhebung des Frühholzanteils.....	55
9.3.3	Erhebung der durchschnittlichen Jahringbreite.....	56
9.3.4	Erhebung der durchschnittlichen Jahringlage	56
9.3.5	Bruchenergieprüfung	57
9.3.6	Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung	61
9.4	Verwendete Software	66
9.5	Box-Plots als Darstellungsform - eine Einführung.....	66
9.6	Multiple Regressionsanalyse - eine Einführung	68
10	Ergebnisse	71
10.1	Untersuchung des derzeitigen Abkühlungsprozesses	71
10.1.1	Holzfeuchtigkeit der Bretter während der Abkühlung im Freien.....	71
10.1.2	Holzfeuchtigkeitsprofile.....	74
10.1.2.1	Holzfeuchtigkeitsprofile - Brettbreite.....	75
10.1.2.2	Holzfeuchtigkeitsprofile - Brettdicke	77
10.1.3	Oberflächentemperatur.....	79
10.1.4	Messen der Verschalung - Mittelschnitttest.....	79
10.1.5	Diskussion - Untersuchung des Abkühlungsprozesses	80
10.2	Auswertung der erhobenen Brettmerkmale.....	81
10.2.1	Dichte.....	81
10.2.2	Jahringlage	83
10.2.3	Frühholzanteil	84
10.2.4	Durchschnittliche Jahringbreite	85
10.2.5	Korrelationsanalyse	86
10.2.6	Diskussion - Aufnahme und Auswertung der erhobenen Brettmerkmale	86
10.3	Bruchenergieprüfung	87
10.3.1	Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung	87
10.3.1.1	Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung F_{max}	87
10.3.1.2	Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung W bis F_{max}	88
10.3.1.3	Regressionsanalyse - Spezifische Bruchenergie G_f	89
10.3.2	Genauere Untersuchung der Merkmale Abkühlungsbedingung, Behandlungsintensität und Prüfrichtung.....	89
10.3.2.1	T-Test für Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen	90
10.3.2.2	T-Test für Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung	93
10.3.2.3	T-Test für Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen	97
10.3.2.4	T-Test für Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung.....	100
10.3.2.5	T-Test für die spezifische Bruchenergie G_f bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen	104
10.3.2.6	T-Test für die spezifische Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung.....	107
10.3.3	Zusammenfassung der Materialkennwerte aus der Bruchenergieprüfung	111
10.3.4	Diskussion - Bruchenergieprüfung	111
10.3.5	Bewertung der Hypothesen - Bruchenergieprüfung	112

10.4	Rissbildung nach einer Zyklusbehandlung	113
10.4.1	Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen	119
10.4.2	Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen	125
10.4.3	Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen	130
10.4.4	Diskussion - Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung	135
10.4.5	Bewertung der Hypothesen - Rissbildung nach einer Zyklusbehandlung	136
11	Schlussfolgerungen	138
12	Literaturverzeichnis	139
13	Anhang	144
13.1	Holzfeuchtigkeitsprofile	144
13.1.1	Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite	144
13.1.2	Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettdicke	146
13.2	Regressionsanalysen zur Rissbildung nach 1. und 2. Zyklusbehandlung	149
13.3	Brettmerkmale - Einzelwerte	152
13.4	Bruchenergieprüfung - Einzelwerte	156
13.5	Risslängen - Einzelwerte	164

Abkürzungsverzeichnis

Bedeutung der Buchstaben, die zur Probenbezeichnung verwendet werden

F	.....	Behandlungsintensität forte
M	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior
R	.....	Abkühlung rasch
S	.....	Abkühlung schonend
N	.....	Abkühlung normal
r	.....	RL-Rissausbreitung (Bruchenergie)
t	.....	TL-Rissausbreitung (Bruchenergie)

Bedeutung der Gruppenbezeichnungen:

FR	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch
FS	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend
FN	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung normal
FSr	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
FSt	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
FRr	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
FRT	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
Fr	.....	Behandlungsintensität forte, RL-Rissausbreitung
Ft	.....	Behandlungsintensität forte, TL-Rissausbreitung
MR	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch
MS	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend
MN	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung normal
MRr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
MRt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
MSr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
MSt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
Mr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung
Mt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung

Sonstige Abkürzungen:

u	.....	Holzfeuchtigkeit
t	.....	Zeit
ρ	.....	Dichte
F	.....	Kraft
F_{\max}	.....	maximale Prüfkraft - Bruchenergieprüfung
W	.....	Bruchenergie/Brucharbeit
W_{Gesamt}}	.....	Gesamtbruchenergie
G_f	.....	spezifische Bruchenergie

Z	.....	Zyklus
\bar{x}	.....	Mittelwert einer Stichprobe
s	.....	Standardabweichung einer Stichprobe
VarK	.....	Variationskoeffizient
n	.....	Stichprobengröße
VIF	.....	Varianzinflationsfaktor
HF	.....	Holzfeuchtigkeit

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipien der Holzmodifikation - schematische Darstellung (in Anlehnung an Homan et al. 2013).....	22
Abbildung 2: Masseverlust durch die thermische Modifikation für Kiefer in Abhängigkeit von Behandlungszeit und Behandlungstemperatur (Esteves et al. 2008b) ...	26
Abbildung 3: Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation für Buche, Kiefer und Fichte in radialer und tangentialer Richtung (González-Peña et al. 2009b)...	27
Abbildung 4: Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation für Buche, Kiefer und Fichte in longitudinaler Richtung im Vergleich zum darrtrockenen Zustand (González-Peña et al. 2009b).....	27
Abbildung 5: Sorptionsisothermen von thermisch modifiziertem Buchenholz bei 24°C (Olek et al. 2013).....	29
Abbildung 6: Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Buche durch thermische Modifikation (González-Peña et al. 2009b).....	31
Abbildung 7: Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Fichte durch thermische Modifikation (González-Peña et al. 2009b).....	31
Abbildung 8: Skizze einer Behandlungskammer zur thermischen Holzmodifikation.....	36
Abbildung 9: Schematischer Prozessablauf der thermischen Modifikation von Holz, der vom Unternehmen Mitteramskogler GmbH angewendet wird	37
Abbildung 10: Temperaturkurve der Abkühlungsbedingung "schonend".....	44
Abbildung 11: Brettstapel in der Behandlungskammer des Unternehmens Mitteramskogler GmbH, die für die Untersuchung des derzeitigen Abkühlungsprozesses herangezogen wurden	51
Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Brettstapels und Kennzeichnung der Bretter, die für die Probenentnahmen und Messungen herangezogen wurden	51
Abbildung 13: Stellen der Probenentnahmen an den Brettern für die Bestimmung der Brettfeuchtigkeiten.....	52
Abbildung 14: Stellen der Probenentnahmen an den Brettern für die Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile.....	53
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettdicke	53
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite.....	53
Abbildung 17: Stellen der Probenentnahme an den Brettern für den Mittelschnitttest.....	54
Abbildung 18: Stellen der Probenentnahmen für Holzmerkmale, Rissbildung und Bruchenergie	55
Abbildung 19: Erhebung des Frühholzanteils unter dem Mikroskop	55
Abbildung 20: Messen der durchschnittlichen Jahrringlage im Brett.....	57
Abbildung 21: Geometrie der Bruchenergieproben (Abmessungen in mm)	58
Abbildung 22: Anpassung der Probenentnahme an die Jahrringlage im Brett	58
Abbildung 23: Anatomische Holzrichtungen (L längs, R radial, T tangential) und untersuchte Rissausbreitungen (RL radial/längs, TL tangential/längs) (Pleschberger et al. 2013a).....	59
Abbildung 24: Probekörper in der Prüfmaschine vor der Prüfung	59
Abbildung 25: Probekörper in der Prüfmaschine während der Prüfung	60
Abbildung 26: Probekörper in der Prüfmaschine nach der Prüfung	60

Abbildung 27: Kraft-Weg Diagramm einer Bruchenergieprüfung (y-Achse Kraft [N], x-Achse Weg [mm])	60
Abbildung 28: Wasserlagerung der Probekörper	62
Abbildung 29: Probekörper im Darrschrank	62
Abbildung 30: Rissbildung an einem Querschnitt	63
Abbildung 31: Vermessung der radialen und tangentialen Risse an den Querschnitten	63
Abbildung 32: Rissbildung an einer Längsfläche	64
Abbildung 33: Vermessung der axialen Risse an den Längsflächen.....	64
Abbildung 34: Erklärung Box-Plot.....	67
Abbildung 35: Abkühlungsbedingungen während der Abkühlung im Freien	71
Abbildung 36: Bretter für Holzfeuchtigkeitsmessung in Brettmitte und am Bretttrand.....	72
Abbildung 37: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Brettrand zum Zeitpunkt t=0 der Abkühlungsphase im Freien	72
Abbildung 38: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Brettrand zum Zeitpunkt t=5 der Abkühlungsphase im Freien	73
Abbildung 39: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Brettrand zum Zeitpunkt t=24 der Abkühlungsphase im Freien	73
Abbildung 40: Holzfeuchtigkeiten in der Mitte und am Rand der Bretter während der Abkühlungsphase	74
Abbildung 41: Bretter für Holzfeuchtigkeitsprofilmessungen, Probenentnahme in Brettmitte	75
Abbildung 42: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0	76
Abbildung 43: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5	76
Abbildung 44: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24	76
Abbildung 45: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0	77
Abbildung 46: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5	77
Abbildung 47: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24	77
Abbildung 48: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0	78
Abbildung 49: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5	78
Abbildung 50: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24	78
Abbildung 51: Bretter für Mittelschnitttest	80
Abbildung 52: Messvorrichtung zur Ermittlung der Verschalung mittels Mittelschnitttest ...	80
Abbildung 53: Dichteverteilung in den gebildeten Gruppen	82
Abbildung 54: Vergleich der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität	83
Abbildung 55: Verteilung der Jahrringlage in den Gruppen	84
Abbildung 56: Verteilung des Frühholzanteils in den Probengruppen.....	85
Abbildung 57: Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite der Vergleichsgruppen	86
Abbildung 58: F_{max} bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL -Rissausbreitung.....	91

Abbildung 59: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL- Rissausbreitung)	91
Abbildung 60: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung).....	92
Abbildung 61: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung).....	92
Abbildung 62: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)	93
Abbildung 63: F_{\max} bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung.....	94
Abbildung 64: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung	95
Abbildung 65: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung.....	95
Abbildung 66: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)...	96
Abbildung 67: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)	96
Abbildung 68: W bis F_{\max} bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung	98
Abbildung 69: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL-Rissausbreitung)	98
Abbildung 70: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung).....	99
Abbildung 71: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung).....	99
Abbildung 72: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)	100
Abbildung 73: W die F_{\max} bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung.	101
Abbildung 74: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung	102
Abbildung 75: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung.....	102
Abbildung 76: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte).....	103
Abbildung 77: W bis F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)	103
Abbildung 78: G_f bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung.....	105
Abbildung 79: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL-Rissausbreitung)	105
Abbildung 80: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung).....	106
Abbildung 81: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung).....	106
Abbildung 82: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)	107
Abbildung 83: G_f bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung.....	108
Abbildung 84: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung	109
Abbildung 85: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung.....	109
Abbildung 86: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)....	110

Abbildung 87: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)	110
Abbildung 88: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von FN Probekörpern während der 1. Zyklusbehandlung	115
Abbildung 89: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von FN Probekörpern während der 2. Zyklusbehandlung	115
Abbildung 90: Absolute Wasseraufnahme von FN Probekörpern während der 1. und 2. Wasserlagerung.....	116
Abbildung 91: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von MN Probekörpern während der 1. Zyklusbehandlung	116
Abbildung 92: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von MN Probekörpern während der 2. Zyklusbehandlung	117
Abbildung 93: Absolute Wasseraufnahme von MN Probekörpern während der 1. und 2. Wasserlagerung.....	117
Abbildung 94: Radiale Risslänge in Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Wasserlagerung	118
Abbildung 95: Axiale Risslänge in Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Wasserlagerung	118
Abbildung 96: Vergleich der gemessenen axialen Risslänge und der durch das Modell berechneten axialen Risslänge.....	121
Abbildung 97: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior	122
Abbildung 98: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (forte).....	123
Abbildung 99: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (mezzo-exterior)	123
Abbildung 100: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte)	124
Abbildung 101: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior).....	124
Abbildung 102: Vergleich der gemessenen radialen Risslängen und der durch das Modell berechneten radialen Risslängen.....	127
Abbildung 103: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior	128
Abbildung 104: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (forte)	128
Abbildung 105: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (mezzo-exterior)	129
Abbildung 106: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte)	129
Abbildung 107: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior).....	130
Abbildung 108: Vergleich der gemessenen tangentialen Risslängen und der durch das Modell berechneten tangentialen Risslängen.....	132
Abbildung 109: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior	133
Abbildung 110: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit der durchschnittlichen Jahrringbreite für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior.....	133

Abbildung 111: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit des Frühholzanteils für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior	134
Abbildung 112: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0	144
Abbildung 113: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5	144
Abbildung 114: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24	144
Abbildung 115: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0	145
Abbildung 116: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5	145
Abbildung 117: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24	145
Abbildung 118: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=0	146
Abbildung 119: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5	146
Abbildung 120: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24	146
Abbildung 121: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5	147
Abbildung 122: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24	147
Abbildung 123: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=0	148
Abbildung 124: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5	148
Abbildung 125: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24	148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Verfahrenstypen der thermischen Modifikation und Hersteller (Institut für Holztechnologie Dresden 2013b)	25
Tabelle 2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Holz (Auffhammer & Scholz 2012).....	30
Tabelle 3: Veränderung der Anteile der Zellwandkomponenten bei Buche durch thermische Behandlung (Yildiz et al. 2005)	30
Tabelle 4: Übersicht Probenmaterial.....	43
Tabelle 5: Materialkennwerte für Thermoholz von Mitteramskogler GmbH	46
Tabelle 6: Berechnung der optimalen Stichprobengröße - angenommene und in der Kalkulation verwendete Werte.....	47
Tabelle 7: Materialeigenschaften, die für die Berechnungen verwendet wurden.....	49
Tabelle 8: Berechnung der Längenänderung bzw. der entstehenden Spannung bei Veränderung der Holzfeuchtigkeit um 1% in Längs-, Radial- und Tangentialrichtung	49
Tabelle 9: Berechnung der Längenänderung bzw. der entstehenden Spannung bei Veränderung der Temperatur um 100°C in Längs-, Radial- und Tangentialrichtung	49
Tabelle 10: Beispiel für das Ergebnis der Risslängenmessungen einer Probe	65
Tabelle 11: Übersicht der Kennwerte eines Box-Plot.....	67
Tabelle 12: Übersicht über die Verteilung der Holzfeuchtigkeit während der Abkühlung....	74
Tabelle 13: Temperaturentwicklung an den Brettern während der Abkühlung	79
Tabelle 14: Übersicht über die Dichteverteilungen in den gebildeten Probengruppen	81
Tabelle 15: Vergleich der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität.....	82
Tabelle 16: Übersicht der Probenanzahl pro Jahrringlagengruppe	83
Tabelle 17: Übersicht über die Verteilung des Frühholzanteils in den Probengruppen	84
Tabelle 18: Übersicht über die Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite der Gruppen.....	85
Tabelle 19: Korrelationsmatrix der Holzmerkmale	86
Tabelle 20: Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung F_{max}	88
Tabelle 21: Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung W bis F_{max}	88
Tabelle 22: Regressionsanalyse - spezifische Bruchenergie G_f	89
Tabelle 23: Vergleich der Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung.....	90
Tabelle 24: Vergleich der Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung	94
Tabelle 25: Vergleich der Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL- Rissausbreitung	97
Tabelle 26: Vergleich der Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung	101
Tabelle 27: Vergleich der spezifischen Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung	104
Tabelle 28: Vergleich der spezifischen Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung	108
Tabelle 29: Zusammenfassung der Materialkennwerte aus der Bruchenergieprüfung	111
Tabelle 30: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten in der Zyklusbehandlung - Mittelwerte ...	114
Tabelle 31: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung	119

Tabelle 32: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung (1)	120
Tabelle 33: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung	125
Tabelle 34: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung (1)	126
Tabelle 35: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung	131
Tabelle 36: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung	131
Tabelle 37: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung	149
Tabelle 38: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung	149
Tabelle 39: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung	150
Tabelle 40: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung	150
Tabelle 41: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung	151
Tabelle 42: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung	151
Tabelle 43: Brettmerkmale	152
Tabelle 44: Werttabelle Bruchenergieprüfung	156
Tabelle 45: Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)	164
Tabelle 46: Risslängen nach 1. Zyklusbehandlung (Z1) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)	168
Tabelle 47: Risslängen nach 2. Zyklusbehandlung (Z2) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)	172
Tabelle 48: Risslängen nach 3. Zyklusbehandlung (Z3) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)	176

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Darrdichte	55
Formel 2: Berechnung des Frühholzanteils	56
Formel 3: Berechnung der durchschnittlichen Jahrringbreite	56
Formel 4: Berechnung der spezifischen Bruchenergie	59
Formel 5: Berechnung der axialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale	120
Formel 6: Berechnung der radialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale	126
Formel 7: Berechnung der tangentialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale	132

1 Einleitung

In der vorliegenden Masterarbeit wird der Einfluss verschiedener Prozess-, Holz- und Brettmerkmale auf ausgewählte Qualitätseigenschaften von thermisch modifiziertem Eschenholz untersucht. Angeregt wurden die behandelten Fragestellungen vom Unternehmen Mitteramskogler GmbH, das als Kooperationspartner dieser Arbeit auftritt. Im Anschluss folgt eine Einführung in das bearbeitete Themengebiet, die Herleitung der untersuchten Fragestellungen und die Darstellung der Hypothesen, die in dieser Masterarbeit auf ihre Gültigkeit untersucht werden. Danach werden das untersuchte Probenmaterial und die Methoden, die zur Untersuchung der aufgestellten Hypothesen verwendet werden, näher erklärt. In weiterer Folge sind die Ergebnisse und die Schlussfolgerungen, die aus den Ergebnissen gezogen werden können, dargestellt.

2 Fragestellungen

Ausgangspunkt dieser Masterarbeit war das Anliegen eines Thermoholzproduzenten (Mitteramskogler GmbH), Ansatzpunkte und Möglichkeiten für eine Qualitätsverbesserung eines vom Unternehmen produzierten Produktes zu finden. Nach Kontaktaufnahme mit dem Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe erfolgte im Jänner 2013 die erste Besprechung mit einem Vertreter des Unternehmens, um die Interessen des Unternehmens abzuklären bzw. den Inhalt der Masterarbeit weitgehend darauf abzustimmen. Das Unternehmen ist in Gaflenz (Oberösterreich) angesiedelt, seit Mai 2012 Teil der häussermann-Gruppe und beschäftigt sich schon seit mehr als 10 Jahren mit der thermischen Modifikation von Laub- und Nadelholz. Bei dem Produkt, dessen Produktionsprozess bzw. Produkteigenschaften im Rahmen der Masterarbeit untersucht werden, handelt es sich um thermisch modifiziertes Eschenholz, das hauptsächlich für Terrassenbretter im Außenbereich eingesetzt wird. Die thermische Modifikation wird hier genutzt, um die Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen und die Dimensionsstabilität des Holzes zu erhöhen. Diese Materialeigenschaften sind vor allem bei Anwendungen im Außenbereich von großer Bedeutung. Eschenholz besitzt von Natur aus eine geringe Dauerhaftigkeit und kann daher nur durch eine Modifikation des Holzes bzw. durch chemischen Holzschutz im bewitterten Außenbereich verwendet werden. Wie der Titel der Masterarbeit zeigt, wurden Untersuchungen zur Rissbildung bzw. der Festigkeit von thermisch modifiziertem Eschenholz durchgeführt. Die Ausrichtung der Untersuchung orientiert sich an den Fragestellungen des Unternehmens Mitteramskogler GmbH.

1. Fragestellung

Der Vertreter des Unternehmens berichtete von häufig auftretenden Kundenreklamationen aufgrund starker Rissbildungen an einigen bereits beim Endkunden verlegten Terrassenbrettern aus thermisch modifiziertem Eschenholz nach kurzer Bewitterungsdauer. Da nicht alle Bretter starke Rissbildungen bei gleichen Bewitterungsbedingungen zeigen, ist hier der Einfluss von ausgewählten Produktionsschritten, sowie Brett- und Holzeigenschaften auf die Rissbildung bei Bewitterung für das Unternehmen von Interesse.

2. Fragestellung

Nach der thermischen Modifikation der Bretter werden diese in einer 1. Abkühlungsphase in der Behandlungskammer auf ca. 105°C abgekühlt. In einer 2. Abkühlungsphase erfolgt die Abkühlung auf Umgebungstemperatur durch Öffnen der Behandlungskammer und unkontrollierte Abkühlung im Freien bei Umgebungsbedingungen. Vor allem in der kälteren Jahreszeit erfolgt die Abkühlung im Freien sehr rasch und kurz nach Kammeröffnung sind knackende Geräusche zu hören, die darauf hindeuten, dass es während der Abkühlungsphase zu Mikrobrüchen im Holz kommt. Hier setzt die Fragestellung des

Unternehmens an, ob es durch die sehr rasche Abkühlung zu einer Schädigung der Holzstruktur kommen kann, ob die mögliche Schädigung der Holzstruktur während der Abkühlung Auswirkungen auf die Rissbildung bei Bewitterung hat und ob dies durch eine langsamere Abkühlung verhindert werden könnte.

3 Der Werkstoff Holz

Holz ist ein nachwachsender und natürlicher Werkstoff und besitzt daher von Natur aus mechanische, physikalische, chemische und biologische Eigenschaften, die bei der Verwendung des Materials berücksichtigt werden müssen. Beispiele hierfür sind Dichte, anatomische Holzrichtung, Quell- und Schwindmaße, Festigkeiten und natürliche Dauerhaftigkeit. Ebenfalls zu beachten ist die starke Variation mancher dieser Eigenschaften zwischen den verschiedenen Holzarten. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass auch innerhalb der gleichen Holzart und ebenso im selben Stamm erhebliche Eigenschaftsunterschiede auftreten können. Diese werden z.B. durch Standort, Klima, Alter und Wuchsbedingungen hervorgerufen (Zobel & Buijtenen 1989). Für eine optimale Verarbeitung von Holz und die Verwendung von Holzprodukten ist ein möglichst homogenes Material mit definierten Eigenschaften von Vorteil. Aus diesem Grund werden Stämme, Bretter, Halberzeugnisse und Produkte häufig nach vorgegebenen Kriterien sortiert bzw. vorsortiert (Auffr & Scholz 2012). Durch ein gut sortiertes Ausgangsmaterial kann der Produktionsprozess hinsichtlich bestimmter Prozessbedingungen optimiert werden, was zudem auch eine Steigerung der resultierenden Produktqualität bedeutet (Zobel & Buijtenen 1989). Bei der Verwendung von Holzprodukten kann erst durch eine Verringerung der Variation der Produkteigenschaften eine exaktere und auch wirtschaftliche Berechnung erfolgen, was die Konkurrenzfähigkeit des Werkstoffes Holz erhöht. Die Sortierung des an sich sehr heterogenen Ausgangsmaterials ist daher in der Holzverarbeitung einer der entscheidendsten Produktionsschritte im Produktionsprozess hinsichtlich definierter Qualität, Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit (Zobel & Buijtenen 1989). Die Variation der verschiedenen Holzeigenschaften kann allgemein sowohl als Vorteil gewertet werden, da sich daraus ein breiteres Spektrum an Verwendungsmöglichkeiten für den Rohstoff Holz ergibt, als auch als Nachteil, da dadurch die Holzart und die oft aufwendige Sortierung eine entscheidende Rolle bei der Produktqualität, aber auch bei den Verwendungsmöglichkeiten spielt. Dem ökologischen Vorteil von Holz als natürlicher und nachwachsender Rohstoff (Frühwald 2000), stehen bei bestimmten Anwendungen gewisse materialbedingte Grenzen gegenüber. Hier sind vor allem die geringe Dimensionsstabilität unter wechselnden Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen (Kollmann 1936) sowie die Anfälligkeit für einen biologischen Abbau durch holzerstörende Pilze und Insekten (ÖNORM EN 350-2) von Bedeutung. Vor allem wenn Holz im Außenbereich eingesetzt wird, muss dies besonders berücksichtigt werden bzw. müssen präventive Holzschutzmaßnahmen getroffen werden.

3.1 Dimensionsstabilität und natürliche Dauerhaftigkeit von Holz

Die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des Holzes spielen eine entscheidende Rolle, wenn Holz im Außenbereich verwendet wird und der Witterung ausgesetzt ist. Hier kommt es zu häufigen Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen und es können günstige Lebensbedingungen für holzerstörende Mikroorganismen vorliegen. Da Holz ein hygroskopisches Material ist, d. h. bei Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderungen des Umgebungsklimas, Feuchtigkeit aufnimmt bzw. abgibt und damit unterhalb des Fasersättigungspunktes eine Dimensionsänderung einhergeht, hat Holz von Natur aus eine geringe Dimensionsstabilität. Des Weiteren muss das anisotrope Verhalten in tangentialer

radialer, und axialer Holzrichtung bei der Verwendung beachtet werden (Kollmann 1936). Holzstörende Pilze benötigen vor allem eine Holzfeuchtigkeit von über 20% über einen längeren Zeitraum. Trockenholzinsekten können hingegen alleine durch das Vermeiden von Feuchtigkeitsanreicherungen nicht am Befall gehindert werden (Notburga 2006). In Mitteleuropa ist jedoch der Befall durch holzerstörende Pilze weit häufiger als der Befall durch holzerstörende Insekten (Augusta 2007). Die natürliche Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten ist in ÖNORM EN 350-2 angeführt. Die verschiedenen Holzarten sind in dieser Norm in Dauerhaftigkeitsklassen gegenüber holzerstörenden Pilzen von 1 (sehr dauerhaft) bis 5 (nicht dauerhaft) eingeteilt. Die natürliche Dauerhaftigkeit der in Europa heimischen Holzarten ist durchwegs eher gering. Heimische Holzarten mit hoher bis mittlerer natürlicher Dauerhaftigkeit sind Robinie (Resistenzklasse 1-2), Eiche (Resistenzklasse 2) und Lärche (Resistenzklasse 3-4). Naturbelassenes Eschenholz wird laut dieser Norm in Resistenzklasse 5 eingestuft und ist somit ohne weitere Behandlungen nicht für den Außenbereich bei Bewitterung geeignet. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von heimischem Holz mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit muss häufig bei Anwendungen im Außenbereich auf Tropenholz wie Teak, Ipe, Cumaru (Resistenzklasse 1) zurückgegriffen werden. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Holzes durch chemischen Holzschutz oder Modifikationsverfahren, die zu einer erhöhten Dauerhaftigkeit führen (Notburga 2006).

3.2 Vollholzprodukte und die Verwendung im bewitterten Außenbereich

Um die Funktionstüchtigkeit von Holzbauteilen im Außenbereich über einen längeren Zeitraum gewährleisten zu können, müssen aufgrund der Gefahr des Befalls durch Mikroorganismen bzw. der geringen Dimensionsstabilität bei Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen präventive Maßnahmen getroffen werden. An erster Stelle steht hier der konstruktive Holzschutz. Durch konstruktiven Holzschutz kann das Material weitgehend vor Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderungen geschützt und somit günstige Lebensbedingungen für holzerstörende Mikroorganismen und Dimensionsveränderungen vermieden werden. Ist der konstruktive Holzschutz aus technischen Gründen nicht möglich oder aus optischen Gründen unerwünscht, müssen andere Maßnahmen getroffen werden. Die Verwendung einer Holzart, die eine hohe natürliche Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Mikroorganismen besitzt, stellt eine mögliche Maßnahme dar, um dem Befall durch holzerstörende Mikroorganismen entgegenzuwirken (Koch 2011). Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von heimischem Holz mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit und der aus ökologischer Sicht bedenklichen Aspekte von Tropenholz wird oft der Ansatz gewählt, das Holz zu schützen bzw. die natürlichen Eigenschaften zu verändern. Eine häufig angewendete Vorgangsweise und Möglichkeit, um die natürlichen Eigenschaften des Holzes im Hinblick auf den geplanten Verwendungszweck zu verbessern, sind daher verschiedene Behandlungsverfahren. Hier unterscheidet man Verfahren, in denen die Holzstruktur gezielt vor chemischen, biologischen, physikalischen oder mechanischen Einwirkungen geschützt wird (Holzschutz) (Grüll 2006) und Verfahren, in denen die Holzzusammensetzung/Holzstruktur gezielt im Hinblick auf den geplanten Einsatzbereich verändert wird (Holzmodifikation) (Hill 2007). Klassische Beispiele für Holzschutz sind Oberflächenbeschichtungen (Abrieb, Härte, UV-Beständigkeit, Feuchtigkeit, Brandschutz, usw.) und chemische Holzschutzmaßnahmen gegen Mikroorganismen (Andritschke et al. 2012). Beispiele für Holzmodifikationen sind das Einbringen von Chemikalien, die mit bestimmten Holzbestandteilen reagieren und thermisch-physikalische Modifikationsverfahren, die zum Abbau bzw. Umbau von Zellwandbestandteilen führen. Sowohl chemische aber auch thermisch-physikalische Modifikationsverfahren führen zu veränderten Materialeigenschaften des Holzes. Von Bedeutung ist hier, in welchem Ausmaß welche Holzeigenschaften sowohl positiv als auch negativ durch das jeweilige Modifikationsverfahren beeinflusst werden. Häufig kann durch eine Modifikation des Holzes eine erhöhte Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen, geringere

Feuchtigkeitsaufnahmen und eine damit verbundene, erhöhte Dimensionsstabilität erreicht werden, was Modifikationsverfahren interessant macht für Holzprodukte, die im bewitterten Außenbereich eingesetzt werden (Stefke & Teischinger 2002).

3.3 Vor- und Nachteile von Vollholzprodukten, die für die Verwendung im Außenbereich geeignet sind

Die Verwendung von heimischen Holzarten mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit hat den Vorteil der kurzen Transportwege und der Herkunft aus weitgehend nachhaltiger Waldbewirtschaftung aufgrund der gesetzlichen Lage und Kontrolle in Europa. Nachteil bei der Verwendung von heimischen Holzarten mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit ist die sehr begrenzte Verfügbarkeit. Wird auf Tropenhölzer zurückgegriffen, kann eine sehr hohe natürliche Dauerhaftigkeit erreicht werden. Das Bewusstsein über die Bedeutung tropischer Wälder für das globale Klima, nicht nachhaltige Bewirtschaftungsformen, illegaler Holzeinschlag und lange Transportwege haben das Angebot von und auch die Nachfrage nach tropischen Hölzern in den letzten Jahren jedoch stetig sinken lassen (Patzelt & Stingl 2002). Neben konstruktiven Holzschutzmaßnahmen wird in der Praxis häufig auf chemische Holzschutzmittel zurückgegriffen, die eine rentable Lebenszeit der Holzprodukte durch Schutz vor Pilzen und Insekten garantieren sollen. Allerdings bringt ihr Einsatz problematische Aspekte mit sich und führte in der Vergangenheit zu intensiven Diskussionen. Chemische Holzschutzmittel können aufgrund ihrer Inhaltsstoffe eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Sie enthalten toxische Bestandteile wie Chrom, Kupfer, Arsen oder Teeröl, um gegen eine Vielzahl von holzabbauenden Pilzen und sonstigen Organismen wirksam zu sein. Ihre Verwendung ist daher aus ökologischer Sicht bedenklich. Des Weiteren ist auch die Entsorgung bzw. Wiederverwertung chemisch imprägnierter Altholzsortimente problematisch (Welzbacher 2007). Eine sehr interessante Möglichkeit, um die Dauerhaftigkeit von Vollholz im bewitterten Außenbereich zu gewährleisten, besteht in der thermisch-physikalischen oder chemischen Modifizierung des Holzes. Durch eine Modifizierung des Holzes können je nach Modifizierungsverfahren ebenfalls Vollholzprodukte erzeugt werden, die der Dauerhaftigkeitsklasse 1 nach ÖNORM EN 350-2 entsprechen (Institut für Holztechnologie Dresden 2013a). Da weder bei der chemischen noch bei der thermisch-physikalischen Modifikation Biozide in das Holz eingebracht werden, sondern die chemische Struktur der Holzbestandteile dauerhaft verändert wird, treten grundsätzlich keine Umwelt- und Entsorgungsprobleme auf (Hill 2007). Von Vorteil ist die Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität von einheimischen Holzarten mit geringer natürlicher Dauerhaftigkeit. Als Nachteil kann der oft aufwendige Herstellungsprozess angesehen werden und die je nach Modifikationsverfahren unerwünschten Veränderungen von Holzeigenschaften wie Farbe und Festigkeit. Besonders der Einsatz für tragende Zwecke im statischen Bereich ist daher bei modifiziertem Holz bis heute stark eingeschränkt (Schindler 2011).

4 Übersicht - Holzmodifikation

Da sich diese Masterarbeit mit modifiziertem Holz beschäftigt, wird im folgenden Abschnitt ein kurzer Überblick über die Verfahren der Holzmodifikation gegeben. Das Hauptaugenmerk wird hier jedoch auf die thermische Modifikation von Holz gelegt. Als Holzmodifikation werden Verfahren bezeichnet, die zu einer gezielten und dauerhaften Veränderung der natürlichen Holzeigenschaften im Hinblick auf deren Verwendungszweck führen. Eine Modifizierung des Holzes kann durch das Einbringen von Chemikalien in das Holz, aber auch durch thermisch-physikalische Verfahren erreicht werden. Bei der chemischen Holzmodifizierung werden Chemikalien in das Holz eingebracht, die mit reaktiven Gruppen der Zellwandbestandteile (vorwiegend OH-Gruppen) reagieren. Dadurch kommt es entweder zu einer Vernetzung dieser Gruppen, wobei die eingebrachten Chemikalien als Verbindungsmolekül dienen oder zu einem "Aufpfropfen" von Molekülen auf reaktive Gruppen der Zellwandbestandteile. Durch thermisch-physikalische Verfahren werden Zellwandbestandteile abgebaut oder umgebaut, sodass sich bestimmte Materialeigenschaften verändern. Sowohl durch die chemische als auch die thermisch-physikalische Holzmodifizierung kommt es zu einer Veränderung der Zellwandbestandteile und zu einer Veränderung der mechanischen, physikalischen, chemischen und biologischen Holzeigenschaften. Häufig werden auch Verfahren, die nur zu einer Imprägnierung der Zellwände bzw. zu einer teilweisen oder vollständigen Ausfüllung der Zelllumen führen, der Holzmodifikation zugerechnet. Bei diesen Verfahren kommt es zu keinen chemischen Reaktionen zwischen eingebrachten Stoffen und Zellwandbestandteilen und daher zu keiner Veränderung der Zellwandbestandteile. Bei diesen Verfahren werden die Zellwandbestandteile abgeschirmt und sind somit nur erschwert für physikalische Reaktionen, chemische Reaktionen und biologischen Abbau zugänglich. In Abbildung 1 sind die wichtigsten Prinzipien, nach denen bei der Holzmodifikation gearbeitet wird, schematisch dargestellt. Häufig angestrebte Ziele der Holzmodifikation sind Verbesserung der Dimensionsstabilität und der Dauerhaftigkeit des Holzes gegenüber Mikroorganismen (Pilze, Insekten) (Hill 2007). Im Folgenden werden die bekanntesten Holzmodifikationsverfahren beschrieben, wobei hier kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt wird.

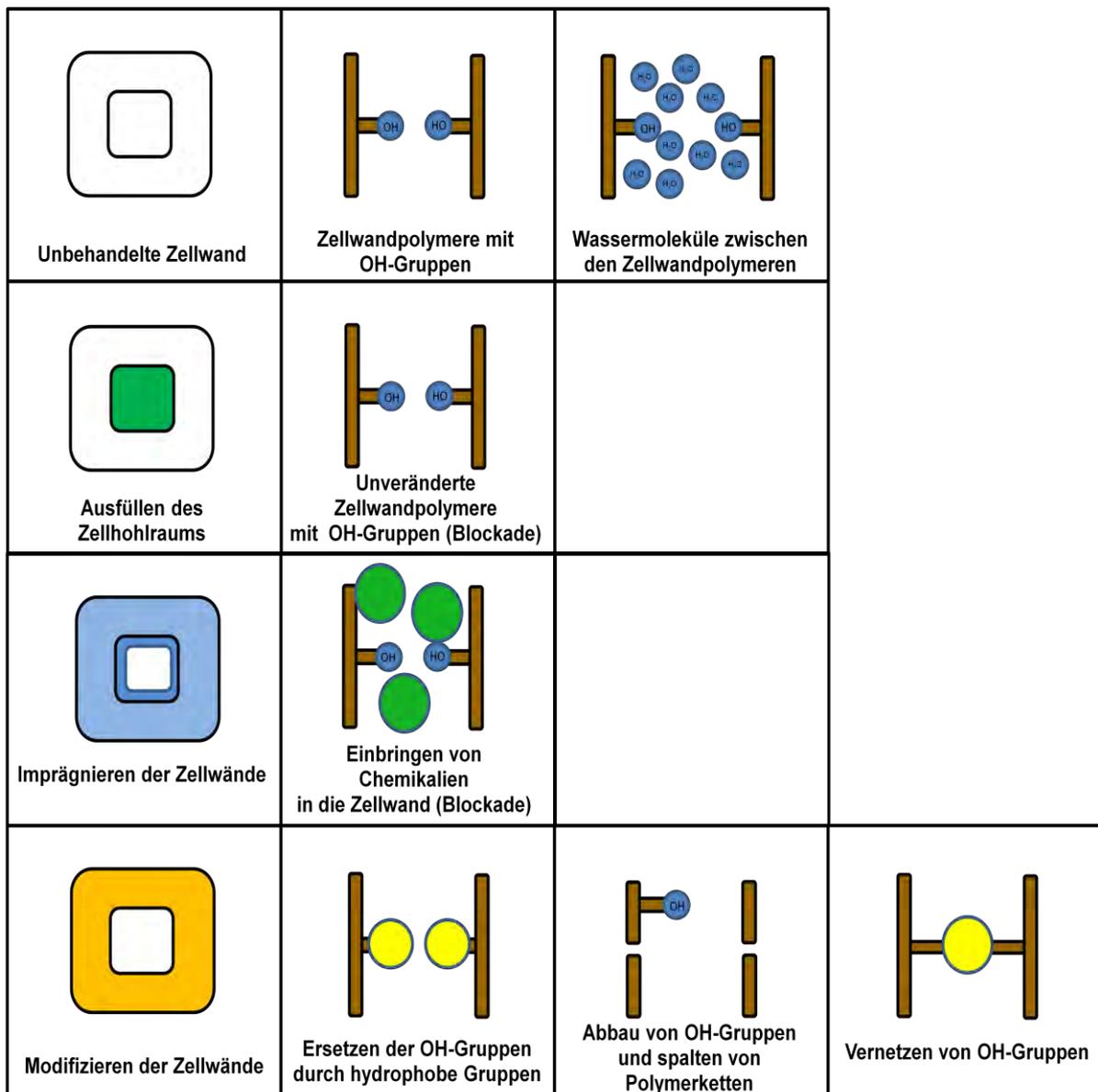


Abbildung 1: Prinzipien der Holzmodifikation - schematische Darstellung (in Anlehnung an Homan et al. 2013)

4.1 Modifikation des Holzes durch Ausfüllen der Zelllumen

Bei dieser Art der Holzmodifikation werden Chemikalien/Stoffe überwiegend in die Lumen der Holzzellen eingebracht, da die eingebrachten Stoffe aufgrund ihrer molekularen Größe und Polarität nicht in der Lage sind, in die Zellwand einzudringen. Zwei unterschiedliche Verfahren können diesem Wirkprinzip zugeordnet werden. Erstens, die Behandlung mit Stoffen, die das Holz wasserabweisend machen (Hydrophobierungsmittel) z.B. auf Basis von Ölen, Paraffinen oder Wachsen. Zweitens, das Einbringen von Kunststoffen (z.B. Methylmethacrylat, Styrol) in die Lumen der Holzzellen die dort vernetzt bzw. ausgehärtet werden und somit als Blockade wirken. Bei dieser Art der Holzmodifizierung kommt es zu keinen chemischen Reaktionen der eingebrachten Stoffe mit den Zellwandbestandteilen. Ein Problem stellt hier das ausreichende Einbringen der Stoffe in das Holz dar und die gleichmäßige und vollständige Behandlung des Querschnittes. Hier bestehen auch wesentliche Unterschiede betreffend des eingebrachten Stoffes und der verschiedenen Holzarten. In ÖNORM EN 350-2 ist die Tränkbarkeit verschiedener Holzarten angeführt. Durch die Einlagerung von wasserabstoßend wirkenden Stoffen in die Zelllumen kann die

Feuchtigkeit von Bauteilen weitgehend fern gehalten werden. Flüssiges Wasser dringt deutlich langsamer in die Poren des Holzes ein als bei unbehandeltem Holz. Auch die Aufnahme von gasförmigem Wasser aus der Luft bzw. auch die Abgabe von Feuchtigkeit an die Umgebungsluft wird deutlich herabgesetzt. Dadurch können Feuchtigkeitsschwankungen, Dimensionsänderungen und Rissbildungen bei Bewitterung im Freien stark herabgesetzt sein. Diese Verfahren der Holzmodifikation können die Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen verbessern, reichen jedoch nicht aus, um einen wirksamen Schutz gegenüber holzerstörenden Pilzen zu gewährleisten. Die Festigkeitseigenschaften werden durch diese Verfahren nur unwesentlich beeinträchtigt. Wichtig ist hier, dass die eingebrachten Stoffe nicht oder nur zu einem geringen Anteil durch Wasser ausgewaschen werden und im Vergleich zu chemischen Holzschutzmitteln keine toxischen Bestandteile enthalten (Wagenf h r & Scholz 2012).

4.2 Modifikation des Holzes durch Imprägnieren der Zellwand

Bei diesen Verfahren der Holzmodifikation werden Stoffe/Chemikalien in die Zelllumen, aber auch in die Zellwände eingebracht, da die eingebrachten Stoffe aufgrund ihrer molekularen Größe und Polarität in der Lage sind, in die Zellwand einzudringen. Man spricht daher von einer Imprägnierung der Zellwände, die zu einer Quellung der Zellwand führt. Der eingebrachte Stoff reagiert jedoch nicht chemisch mit den Holzbestandteilen. Bei diesen Verfahren werden hauptsächlich Harze in wässriger Lösung in die Zellwände und Zelllumen eingebracht und dort ausgehärtet. Dadurch wird die Zellwand im teilweise gequollenem Zustand fixiert und die Zelllumen werden teilweise oder vollständig ausgefüllt (a e n f h r & Scholz 2012). Beispiele für diese Art der Holzmodifikation sind die Imprägnierung des Holzes mit Furfurylalkohol oder niedermolekularen MF- und PF-Harzen. Die am Markt erhältlichen Produkte tragen die Namen "Kebony" und "Keywood" für Holz, das mit Furfurylalkohol behandelt wurde (Hill 2011) und "Compreg" und "Impreg" für Holz, das mit MF- oder PF-Harzen imprägniert wurde (Furuno et al. 2004). Die Zellwandbestandteile werden durch diese Art der Modifikation abgeschirmt und sind somit nur mehr erschwert für chemische Reaktionen, physikalische Reaktionen und biologischen Abbau zugänglich. Die Eigenschaften des furfurylierten Holzes sind vor allem von der Einbringmenge an Furfurylalkohol abhängig. Die Einbringmenge stellt daher ein wichtiges Kriterium des Verfahrens dar. Grundsätzlich sind sehr hohe Aufnahmemengen möglich. Insbesondere bei hohen Einbringmengen werden Holzeigenschaften wie Härte, Resistenz gegen Pilze und Insekten, Chemikalienbeständigkeit, mechanische Eigenschaften, Feuchtigkeitsaufnahme und Dimensionsstabilität deutlich verbessert. Jedoch kommt es auch zu einer deutlichen Farbänderung (Esteves et al. 2011). Durch die Imprägnierung mit PF- oder MF- Harzen ist eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit, Dimensionsstabilität und der mechanischen Eigenschaften möglich. Wie eine Untersuchung von Furuno et al. (2004) zeigt ist die Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität wesentlich von der Molekülmasse des eingebrachten Harzes, und damit der Fähigkeit in die Zellwand zu diffundieren, abhängig.

4.3 Chemisch modifiziertes Holz

Diese Modifikationsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass es zwischen den in das Holz eingebrachten Stoffen/Chemikalien und den Zellwandbestandteilen zu einer chemischen Reaktion kommt. Bei der chemischen Modifizierung werden zwei Arten unterschieden. Erstens, das Einbringen von Chemikalien, die die Hydroxylgruppen der Zellwandbestandteile durch andere funktionelle Gruppen ersetzen (Aufpfropfen). Zweitens, das Einbringen von Chemikalien, die zu einer Vernetzung der OH-Gruppen führen und als Verbindungsmolekül dienen (a e n f h r & Scholz 2012). Beispiele hierfür sind die Modifizierung des Holzes mit Essigsäureanhydrid (Acetylierung) und mit DMDHEU-

Derivaten (Belmadur-Verfahren) (Hill 2011). Bei der Acetylierung werden die OH-Gruppen der Holzbestandteile durch hydrophobe Acetylgruppen ersetzt. Die Acetylgruppen sind sowohl in räumlicher Hinsicht als auch im Sinne des Molekulargewichts größer als die OH-Gruppen. Die Zellwand wird bei der Acetylierung nahezu auf das Maximum aufgequollen. Durch den Verlust der OH-Gruppen wird die Anlagerung von Wasser erschwert, da an diesen Stellen keine Wasserstoffbrückenbindungen mehr ausgebildet werden können. Bei acetyliertem Holz ist mit geringen Rückständen von freier Essigsäure im Holz zu rechnen, welche als Geruch wahrnehmbar ist. Detaillierte Informationen über bereits durchgeführte Untersuchungen findet man in Stefke & Hinterstoisser (2002) und Hill (2007). Am Markt erhältliche Produkte tragen die Namen "Accoya" und "Titanwood" (Hill 2011). Bei der Modifikation mit DMDHEU-Derivaten werden die OH-Gruppen der Holzbestandteile miteinander vernetzt. Auch hier kommt es zu einer dauerhaften Quellung der Zellwände. Durch chemische Modifikationsverfahren kann die Dauerhaftigkeit und die Dimensionsstabilität des Holzes wesentlich erhöht werden (Xie et al. 2013). Nach Herstellerangaben sind durch diese Modifikationsverfahren Dauerhaftigkeiten der Dauerhaftigkeitsklasse 1 nach ÖNORM EN 350-2 zu erreichen (Accsys Technologies 2013), (Münchinger Holz GmbH 2013).

4.4 Thermisch modifiziertes Holz

Da das in dieser Masterarbeit untersuchte Probenmaterial thermisch modifiziert wurde, wird im folgenden Abschnitt eine Übersicht über thermisch modifiziertes Holz, thermische Modifikationsverfahren und die Veränderung der Eigenschaften des Holzes gegeben. Grundsätzlich kann durch eine thermische Modifikation je nach Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität (Zeit, Temperatur) von einer Steigerung der Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörender Pilze, einer gesenkten Holztauglichkeitsfeuchtigkeit und einer gesteigerten Dimensionsstabilität ausgegangen werden. Unerwünschte Nebeneffekte sind häufig die dunkle Verfärbung, die Abnahme der Festigkeiten und die Versprödung des Materials, was den Einsatz für tragende Zwecke im statisch Bereich erheblich einschränkt (Xie et al. 2013).

4.4.1 Thermoholz nach ÖNORM CEN/TS 15679

In ÖNORM CEN/TS 15679 ist thermisch modifiziertes Holz (TMT: Termally Modified Timber) wie folgt definiert: Holz, bei dem der Zellwandaufbau des Werkstoffes und dessen physikalische Eigenschaften unter der Einwirkung von Temperaturen über 160 °C und Bedingungen mit verringerter Sauerstoffzufuhr verändert werden. Das Holz wird so verändert, dass zumindest einige Eigenschaften des Holzes dauerhaft über den gesamten Querschnitt beeinflusst sind.

Veränderungen durch die thermische Modifikation im Vergleich zu unbehandeltem Holz (ÖNORM CEN/TS 15679)

- Verbesserte Maßhaltigkeit
- Erhöhte Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen
- Veränderung der Farbe
- Veränderung der Festigkeitseigenschaften
- Verändertes Brandverhalten
- Veränderung der akustischen Eigenschaften
- Gesenkte Holztauglichkeitsfeuchtigkeit

Die Eigenschaften von thermisch modifiziertem Holz und das Ausmaß der Eigenschaftsänderung sind abhängig von der Holzart, der Art der Technologie und den Verfahrensparametern, insbesondere der Höhe der Behandlungstemperatur. Die Technologien bei der Herstellung von thermisch modifiziertem Holz werden hauptsächlich durch die Art der Verringerung der Sauerstoffkonzentration charakterisiert. Bei den derzeit in der Industrie angewendeten Verfahren werden Atmosphären von Heißluft und/oder heißem Dampf oder heißem Stickstoff oder ein Bad mit heißem Öl eingesetzt (ÖNORM CEN/TS 15679).

4.4.2 Verfahren zur Herstellung von thermisch modifiziertem Holz

Das gemeinsame Grundprinzip aller Verfahren der thermischen Modifikation ist die Einwirkung erhöhter Temperaturen zwischen 160°C und 250°C (meist 180-230°C) unter sauerstoffarmen Bedingungen. Die Verfahrenstypen unterscheiden sich vor allem durch die Art und Weise, in der diese Bedingungen („Inert-Atmosphäre“) erzeugt werden. Eine Übersicht zu den derzeit angewendeten Verfahren gibt Tabelle 1. Die größte Verbreitung hat nach wie vor die thermische Modifizierung in einer Atmosphäre aus Wasserdampf und Holzgasen bei Normaldruck. Die meisten der bestehenden und auch neuen Anlagen basieren auf diesem Verfahrensprinzip, das heute zahlreiche Ausgestaltung und Optimierung hinsichtlich der Kammertechnik und des Prozessablaufes erfahren hat. Die technischen Details, in denen sich die Verfahren bzw. Anlagen im Einzelnen unterscheiden, sind das Know-how der Hersteller und damit leider nicht bekannt (Institut für Holztechnologie Dresden 2013b).

Tabelle 1: Übersicht über Verfahrenstypen der thermischen Modifikation und Hersteller (Institut für Holztechnologie Dresden 2013b)

	Spezielle Prozessbedingungen	Anlagenhersteller
a	Holzgase + Dampf + Normaldruck	www.tekmaheat.com www.mahild.de www.stellac.fi www.valutec.fi
b	Holzgase + Dampf + erhöhter Druck	www.wtt.dk www.moldrupsystems.com
c	Holzgase + Normaldruck	www.muehlboeck.com
d	Vakuum (+ Holzgase)	www.opel-therm.de
e	wie a) + zusätzlicher Hochtemperaturschritt	www.platowood.nl
f	Holzgase + Stickstoffatmosphäre	www.balz-maschinen.ch
g	Pflanzenölbad	www.scholz-maschinenbau.de

4.4.3 Farbveränderung durch die thermische Modifikation

Alle thermischen Modifikationsverfahren verursachen eine Farbveränderung des Holzes, wobei bei den meisten Holzarten ein dunklerer Farbton im Vergleich zu unbehandeltem Holz auftritt. Die Farbveränderung ist abhängig von der verwendeten Holzart, dem Modifikationsverfahren und der Behandlungsintensität. Unter Behandlungsintensität werden hauptsächlich Behandlungszeit und Behandlungstemperatur verstanden. Die natürliche Farbe von unbehandeltem Holz ist von den Holzbestandteilen Lignin, Zellulose, Hemizellulose und verschiedenen Extraktstoffen abhängig. Da durch eine thermische Modifikation des Holzes die Zusammensetzung dieser Bestandteile wesentlich verändert wird, kommt es auch zu einer Farbveränderung des Holzes, die über den gesamten Querschnitt auftritt. Verantwortlich für die Farbveränderung ist einerseits der Abbau von Hemizellulosen und Zellulose durch die Modifikation, der dadurch gesteigerte Ligninanteil,

die teilweise chemische Veränderung des Lignins, verschiedene Abbauprodukte, die während der Modifikation entstehen und der Abbau verschiedener Extraktstoffe. Die chromophoren Gruppen, die bei der thermischen Modifikation gebildet werden und dem Holz eine braune bis dunkelbraune Farbe verleihen, sind jedoch nicht UV-stabil und werden bei natürlicher Bewitterung durch UV-Strahlung abgebaut und durch Wasser ausgewaschen. Dadurch vergraut thermisch modifiziertes Holz im gleichen Ausmaß wie unbehandeltes Holz. Vergleiche dazu Untersuchungen von Bekhta & Niemz (2003), Junghans & Niemz (2005), Kačiko á et al. (2013), González-Peña et al. (2009a), Esteves et al. (2008a), Sundqvist & Morén (2002) und Gunduz & Aydemir (2009).

4.4.4 Masseverlust durch die thermische Modifikation

Durch eine thermische Modifikation kommt es zu einem Masseverlust, da Holzbestandteile abgebaut werden. Das Ausmaß ist von Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität abhängig. Einen guten Überblick über die zahlreichen durchgeführten Untersuchungen gibt die Literaturstudie von Esteves & Pereira (2009). Um einen Eindruck über den Einfluss von Behandlungszeit und Behandlungstemperatur zu bekommen, ist in Abbildung 2 der Masseverlust während der thermischen Modifikation von Kiefer aus einer Untersuchung von Esteves et al. (2008b) in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit dargestellt. Man erkennt, dass der Einfluss der Temperatur wesentlich höher ist als der Einfluss der Zeit.

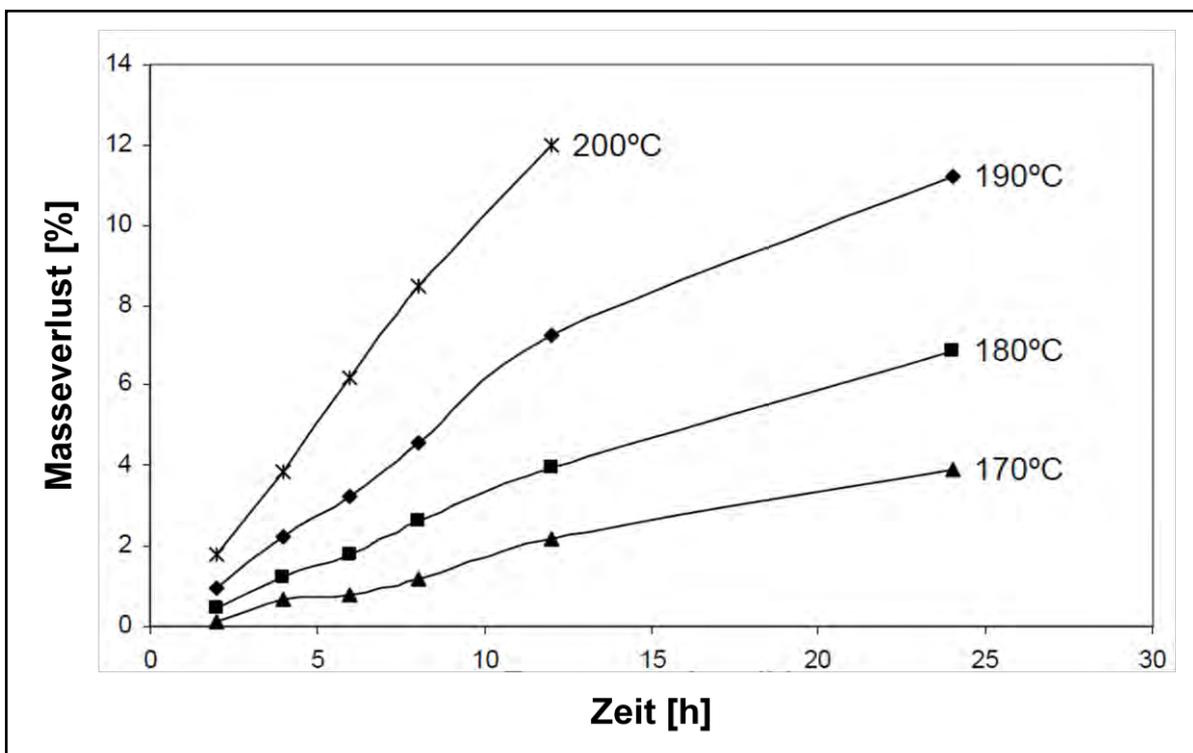


Abbildung 2: Masseverlust durch die thermische Modifikation für Kiefer in Abhängigkeit von Behandlungszeit und Behandlungstemperatur (Esteves et al. 2008b)

4.4.5 Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation

Während der thermischen Modifikation kommt es zu einer Dimensionsänderung, die dem Schwinden des Holzes von Fasersättigung bis Darrzustand ähnlich ist, jedoch durch den Abbau von Zellwandbestandteilen hervorgerufen wird. Als Beispiel sind hier die Ergebnisse

einer Untersuchung von González-Peña et al. (2009b) angeführt. In Abbildung 3 und Abbildung 4 ist die Dimensionsänderung in Prozent, bezogen auf die Länge im Darrzustand, in Abhängigkeit des Masseverlustes, für Buche, Kiefer und Fichte, dargestellt. Man erkennt, dass die Dimensionsabnahme in tangentialer Holzrichtung ca. doppelt so hoch ist wie in radialer Holzrichtung. Im Gegensatz zur Dimensionsabnahme in radialer und tangentialer Holzrichtung wurde in axialer Holzrichtung eine sehr geringe Längenzunahme bis zu einem Masseverlust von ca. 20% festgestellt.

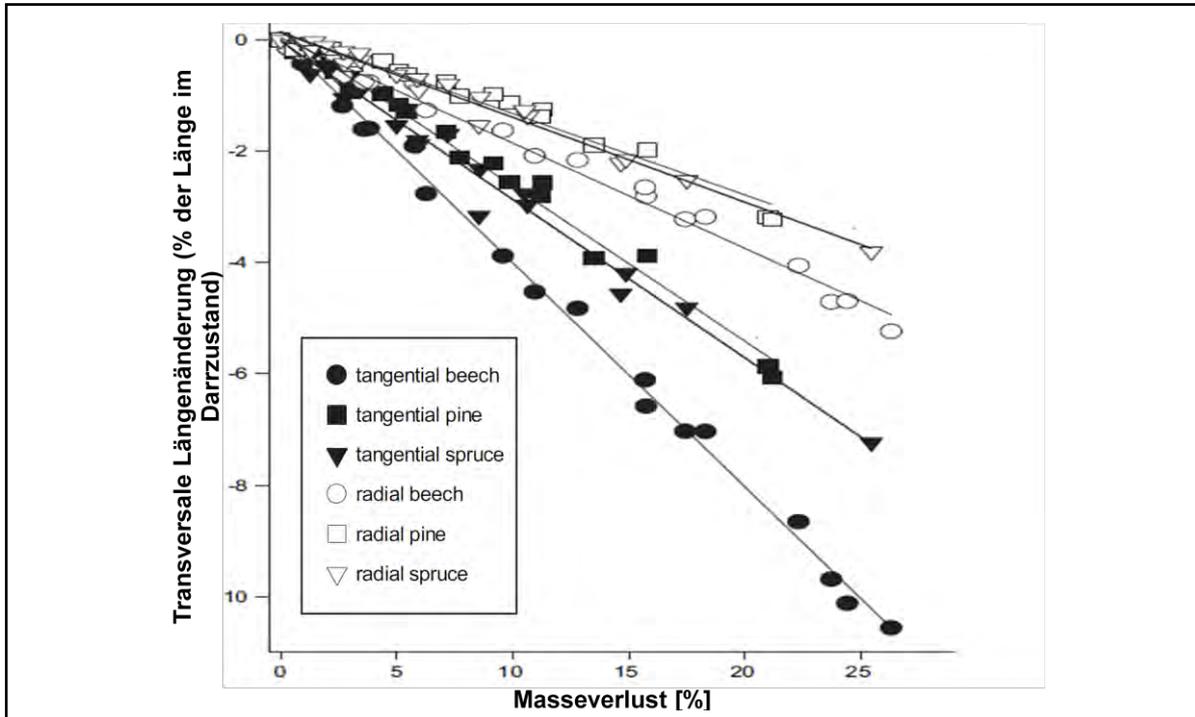


Abbildung 3: Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation für Buche, Kiefer und Fichte in radialer und tangentialer Richtung (González-Peña et al. 2009b)

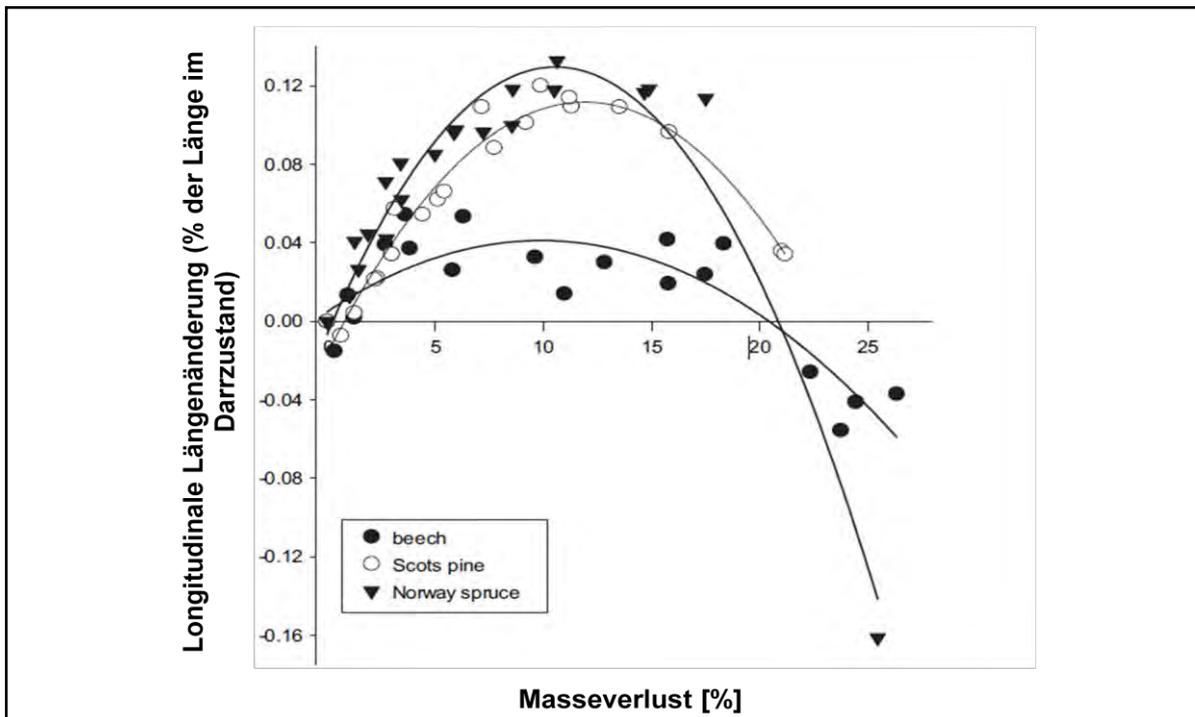


Abbildung 4: Dimensionsänderung durch die thermische Modifikation für Buche, Kiefer und Fichte in longitudinaler Richtung im Vergleich zum darrtrockenen Zustand (González-Peña et al. 2009b)

4.4.6 Dichte von thermisch modifiziertem Holz

Durch eine thermische Modifikation kommt es zu einer Abnahme der Dichte. Beachtet werden muss, dass die Dichte nicht im selben Ausmaß abnimmt wie die Masse, die durch die thermische Modifikation abgebaut wird, da das Holz während der Modifikation auch schwindet. Das Ausmaß ist von Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität abhängig. Wobei hier die Behandlungstemperatur den größten Einfluss aufweist. Untersuchungen zur Dichteabnahme durch thermische Modifikation wurden z.B. von Boonstra & Acker (2007) und Gündüz et al. (2008) durchgeführt. Die Untersuchung von Boonstra & Acker (2007) hat für eine Behandlungsintensität von 6 Stunden bei 180°C für Kiefer eine Abnahme der Darrdichte um 13% und für Fichte eine Abnahme der Darrdichte um 8,5% ergeben. Eine Literaturstudie von Esteves & Pereira (2009) zeigt, dass bisherige Untersuchungen Dichteabnahmen zwischen 1% und 20% ergaben.

4.4.7 Holzgleichsfeuchtigkeit und Sorptionsverhalten

Da es durch die thermische Modifikation zu einer Veränderung der chemischen Zusammensetzung kommt, wird auch das Sorptionsverhalten wesentlich verändert. Unter Sorptionsverhalten versteht man die Eigenschaft von Holz, Feuchtigkeit aus dem Umgebungsklima aufzunehmen (Adsorption) bzw. Feuchtigkeit an das Umgebungsklima abzugeben (Desorption). Die Holzfeuchtigkeit, die sich im jeweiligen Umgebungsklima einstellt, wird als Holzgleichsfeuchtigkeit bezeichnet. In welchem Ausmaß das Sorptionsverhalten durch die thermische Modifikation verändert wird, ist von Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität abhängig. Grundsätzlich kommt es durch die thermische Modifikation zu einer Abnahme der Holzgleichsfeuchtigkeit. Gründe für die gesenkte Holzgleichsfeuchtigkeit sind der Abbau der sehr hygroskopischen Hemizellulosen und freier OH-Gruppen der Zellwandbestandteile. Als Beispiel sind in Abbildung 5 die Sorptionsisothermen für Buche bei 24°C aus einer Untersuchung von Olek et al. (2013) dargestellt. Man kann erkennen, dass mit steigender Behandlungstemperatur eine Absenkung der Holzgleichsfeuchtigkeit einhergeht. Die Sorptionsisotherme besteht aus einer Adsorptionskurve und einer Desorptionskurve, je nachdem ob Holz Feuchtigkeit aufnimmt oder abgibt. Dieses Verhalten, das auch eine unterschiedliche Holzgleichsfeuchtigkeit bei gleichem Umgebungsklima bewirken kann, wird als Sorptionshysterese bezeichnet. In der Untersuchung von Olek et al. (2013) wurde eine signifikante Zunahme der Hysterese zwischen Adsorption und Desorption mit steigender Behandlungstemperatur festgestellt. Weitere Untersuchungen zur Holzgleichsfeuchtigkeit von thermisch modifiziertem Holz wurden z. B. von Kaygin et al. (2009), Gündüz et al. (2008) und Esteves et al. (2007) durchgeführt. Einen guten Überblick über durchgeführte Untersuchungen gibt auch die Literaturstudie von Esteves & Pereira (2009).

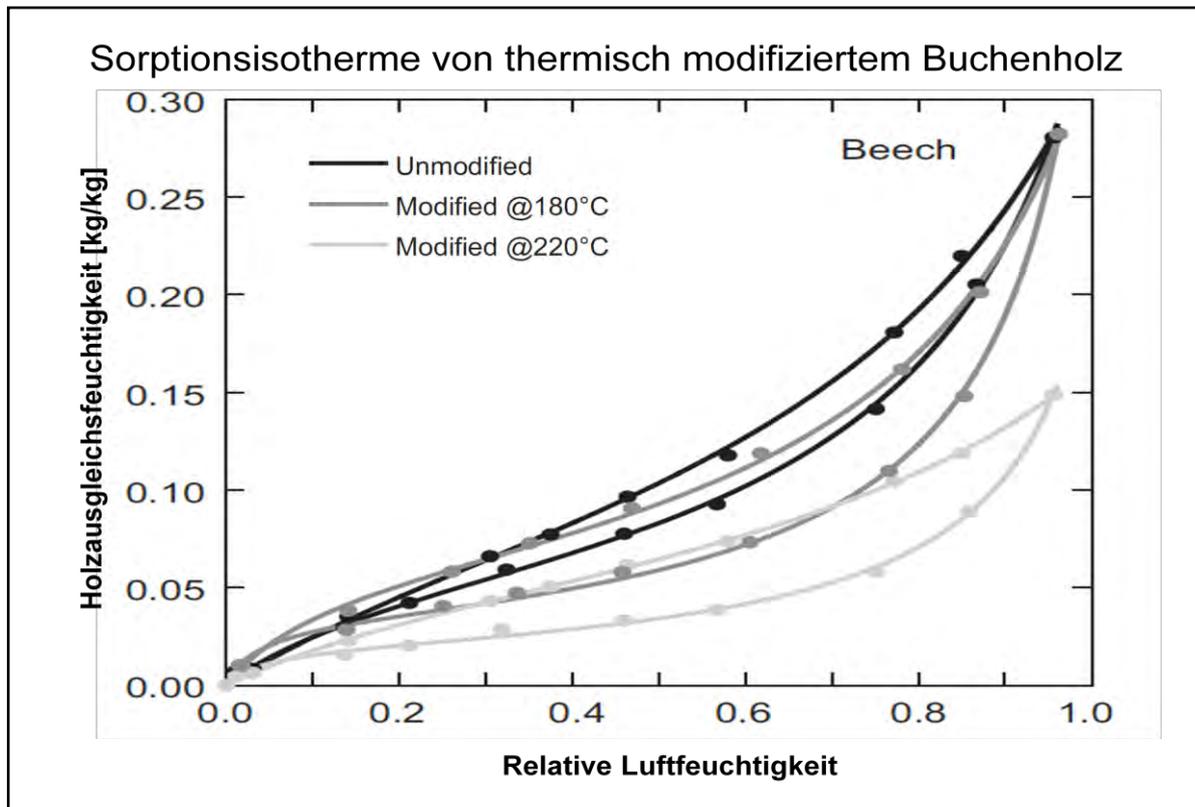


Abbildung 5: Sorptionsisothermen von thermisch modifiziertem Buchenholz bei 24°C (Olek et al. 2013)

4.4.8 Chemische Zusammensetzung von thermisch modifiziertem Holz

Durch die thermische Modifikation wird die chemische Zusammensetzung des Holzes durch den Abbau/Umbau von Zellwandkomponenten (Zellulose, Hemizellulosen und Lignin) und Extraktstoffen wesentlich verändert. Hemizellulosen bilden dabei den Anteil der Zellwand, der durch die thermische Behandlung am stärksten beeinflusst wird, da Hemizellulosen aufgrund der amorphen Struktur eine geringe Hitzestabilität aufweisen. Zellulose wird durch die thermische Behandlung nur gering abgebaut bzw. verändert. Hier wird vor allem der amorphe Anteil der Zellulose stärker als der kristalline Anteil abgebaut. Lignin stellt die hitzebeständigste Komponente der Zellwand dar. Welche Komponenten in welchem Ausmaß abgebaut bzw. verändert werden hängt stark von Holzart, Modifikationsverfahren und der Behandlungsintensität ab. Da nicht alle Komponenten im gleichen Ausmaß abgebaut werden, kommt es zu einer Veränderung der relativen Anteile der Zellwandkomponenten im Holz. Die durchschnittliche Zusammensetzung von unbehandeltem Holz ist in Tabelle 2 angeführt. Je nach Behandlungsintensität sinkt daher der relative Anteil der nicht hitzestabilen Hemizellulosen stark und der relative Anteil des hitzebeständigen Lignins erhöht sich dadurch. In Tabelle 3 ist das Ergebnis aus einer Untersuchung von Yildiz et al. (2005) für Buchenholz angeführt. Im unbehandelten Zustand wurde ein Anteil von 24,66% an Hemizellulosen festgestellt. Durch eine thermische Behandlung bei 180°C über 10 Stunden bzw. 200°C über 10 Stunden wurde der Anteil an Hemizellulosen auf 6,51% bzw. 1,71% gesenkt. Im Gegensatz dazu wurde ein Anteil an Lignin von 22,25% bei unbehandelten Proben festgestellt, der sich durch die thermische Behandlung bei 180°C über 10 Stunden bzw. 200°C über 10 Stunden auf 33,44% bzw. 42,02% erhöhte. Der Anteil an Zellulose veränderte sich in dieser Untersuchung nur gering. Die Erhöhung des gemessenen Ligninanteils ist aber auch auf Repolymerisationsreaktionen von Abbauprodukten auf Ligninmolekülen zurückzuführen. Weiterführende Literatur und detailliertere Angaben zur chemischen Zusammensetzung von verschiedenen thermisch

modifizierten Holzarten siehe: Boonstra & Tjeerdsma (2006a), Esteves et al. (2011), Weiland et al. (2003), Windeisen et al. (2007) und González-Peña et al. (2009b).

Tabelle 2: Durchschnittliche Zusammensetzung von Holz (a en f h r & Scholz 2012)

Bestandteile	Nadelholz	Laubholz
Zellulose¹ [%]	42-49	42-51
Hemizellulose¹ [%]	24-30	27-40
Lignin¹ [%]	25-30	18-24
Extraktstoffe² [%]	2-10	1-10
Asche² [%]	0,2-0,8	0,2-0,8
¹ bezogen auf darrtrockenes extraktstofffreies Holz		
² bezogen auf gesamtes darrtrockenes Holz		

Tabelle 3: Veränderung der Anteile der Zellwandkomponenten bei Buche durch thermische Behandlung (Yildiz et al. 2005)

Bestandteile	unbehandelt	10h, 180°C	10h, 200°C
Zellulose [%]	53,09	60,05	56,27
Hemizellulose [%]	24,66	6,51	1,71
Lignin [%]	22,25	33,44	42,02

In einer Untersuchung von González-Peña et al. (2009b) wird die chemische Zusammensetzung von Buche und Fichte, in Abhängigkeit des Masseverlustes, der durch die thermische Modifikation stattfindet, untersucht. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen ausgewählte Ergebnisse aus dieser Untersuchung. In den Abbildungen ist die Veränderung der Zusammensetzung des Holzes durch die thermische Modifikation für die Holzbestandteile Lignin, Zellulose, Hemizellulose, Glucomannan, Glucoxytan und Holozellulosen, in Abhängigkeit des Masseverlustes, dargestellt. Hierbei stellen die Holozellulosen im Wesentlichen Zellulose plus Hemizellulosen dar. Glucomannan und Glucoxytan sind die zwei Hauptbestandteile der Hemizellulosen. Auf der x-Achse ist der durch die thermische Modifikation resultierende Masseverlust in Prozent aufgetragen. Auf der y-Achse sind die Massen im Vergleich zu unbehandelten Referenzproben aufgetragen. Wobei hier der Wert "1" keine Veränderung im Vergleich zur Referenzprobe bedeutet. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass der Ligningehalt durch die thermische Modifikation steigt. Es wird vermutet, dass dies auf eine Kondensationsreaktion von Polysaccharidprodukten mit Lignin zurückzuführen ist und dadurch der gemessene Ligningehalt steigt. Hemizellulosen werden wesentlich rascher durch Hitze abgebaut als Zellulose. Dies ist auf die amorphe Struktur und das geringere Molekulargewicht von Hemizellulosen im Vergleich zu Zellulose zurückzuführen.

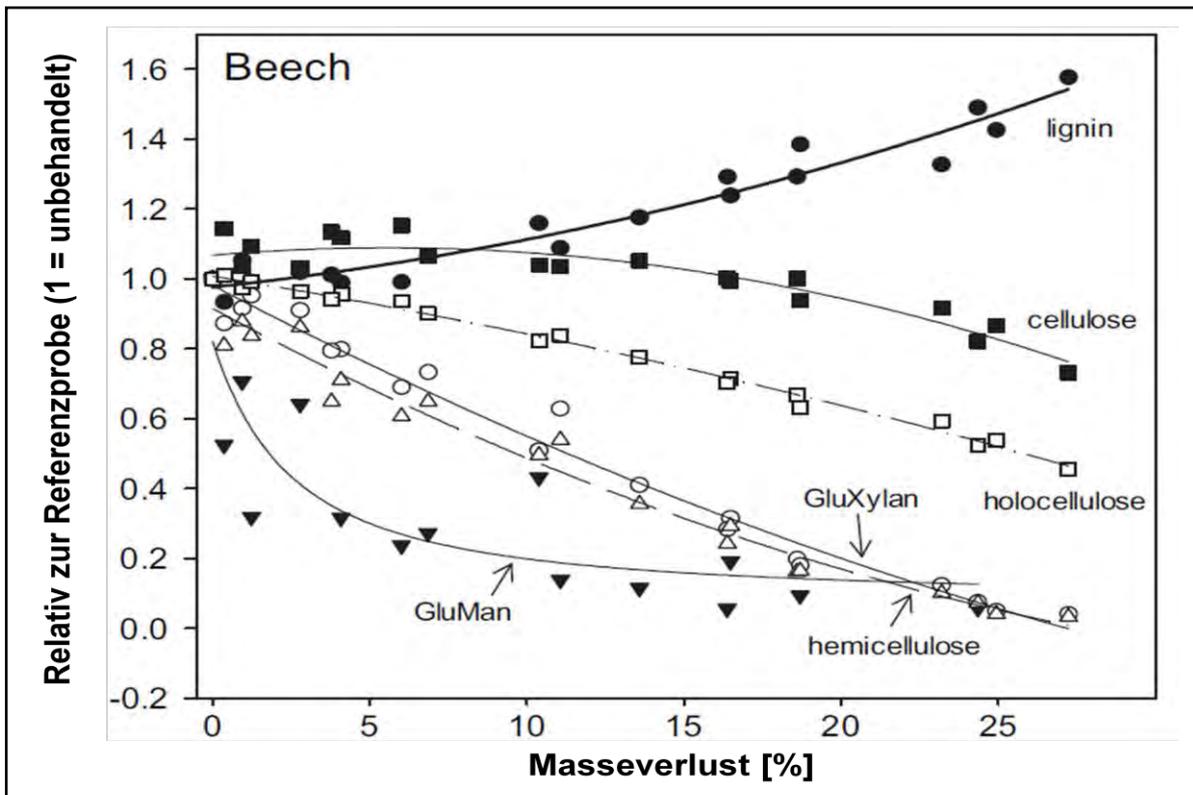


Abbildung 6: Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Buche durch thermische Modifikation (González-Peña et al. 2009b)

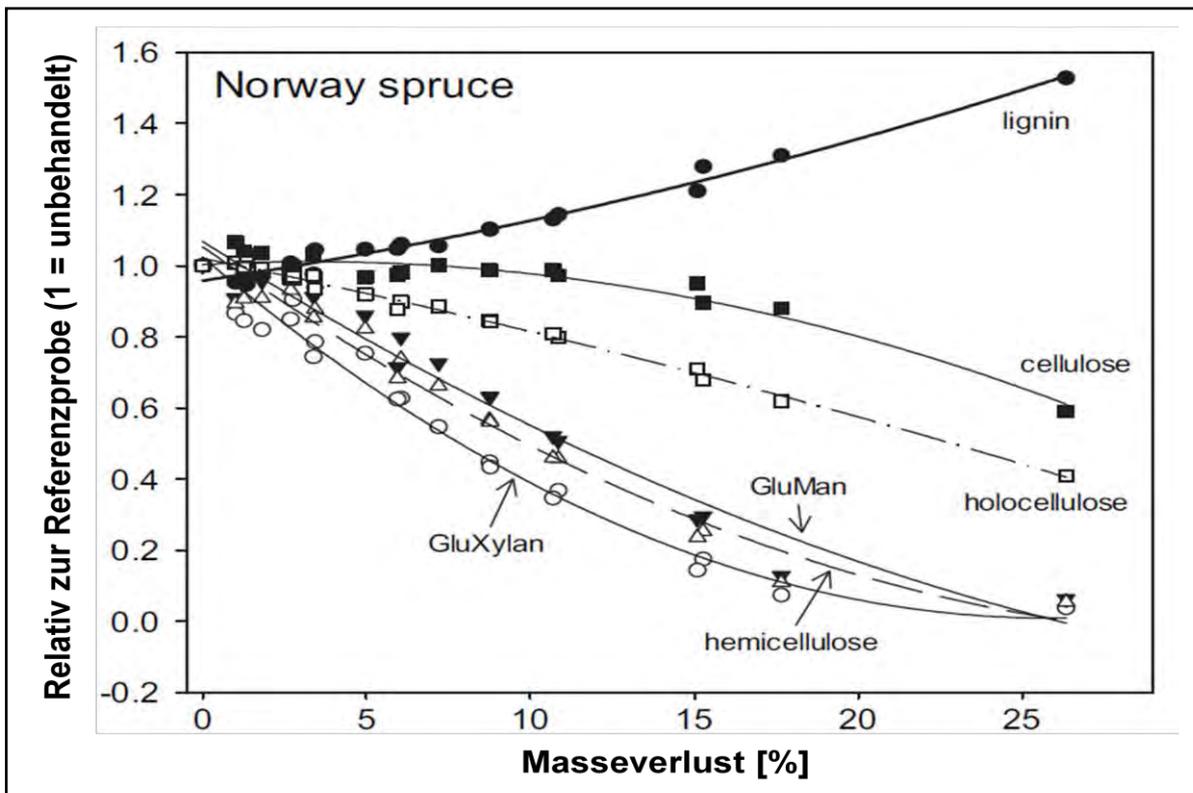


Abbildung 7: Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Fichte durch thermische Modifikation (González-Peña et al. 2009b)

4.4.9 pH-Wert von thermisch modifiziertem Holz

Durch die thermische Modifikation von Holz kann es zu einer Veränderung des pH-Wertes kommen. Die Veränderung ist abhängig von Holzart, Behandlungsintensität und Modifikationsverfahren. Vor allem die Bildung von Essigsäure und Ameisensäure, die als Abbauprodukte während der Modifikation entstehen, führen zu einem Absinken des pH-Wertes. Untersuchungen die einen gesenkten pH-Wert nach einer thermischen Modifikation feststellten: Patzelt et al. (2002), Boonstra et al. (2006b), Alén et al. (2002) und Sundqvist et al. (2006). Der veränderte pH-Wert muss vor allem bei der Verklebung und Beschichtung von thermisch modifiziertem Holz beachtet werden. Auch im Kontakt mit anderen Materialien können Probleme auftreten, die bei unbehandeltem Holz nicht auftreten.

4.4.10 Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz gegenüber holzerstörenden Pilzen

Die thermische Modifikation wird häufig mit dem Ziel angewendet, die Dauerhaftigkeit des Holzes gegenüber holzerstörenden Pilzen zu erhöhen. Für Baumaterialien ist die Dauerhaftigkeit gegenüber biologischem Abbau neben der Festigkeit eine der wichtigsten Eigenschaften. Durch die thermische Modifikation kann eine wesentliche Erhöhung der Dauerhaftigkeit erreicht werden. Eine entscheidende Rolle spielen die Holzart, das Modifikationsverfahren und die Behandlungsintensität. Die Erhöhung der Dauerhaftigkeit beruht hauptsächlich auf dem Abbau von Holzbestandteilen, vor allem Hemizellulosen, und einer niedrigeren Holztauglichkeitsfeuchtigkeit. Dadurch wird vor allem holzerstörenden Pilzen einerseits der leicht zugängliche Nährboden entzogen und andererseits auch die notwendige Feuchtigkeit. Auch Abbauprodukte, die sich nach der thermischen Modifikation im Holz befinden und der veränderte pH-Wert können eine gewisse fungizide Wirkung haben. Des Weiteren können Vernetzungsreaktionen und chemische Strukturveränderungen an den Holzbestandteilen dazu führen, dass die Enzyme der holzabbauenden Pilze unwirksam werden (Calonego et al. 2010), (Welzbacher 2007), (Weiland & Guyonnet 2003), (Kamdem et al. 2002), (Tjeerdsma et al. 1998), (Hakkou et al. 2006). Eine Steigerung der Dauerhaftigkeit ist grundsätzlich bei allen Holzarten möglich, jedoch besonders interessant für Holzarten, die im unbehandelten Zustand geringe Dauerhaftigkeiten aufweisen. Beispiele für in Europa heimische Holzarten mit geringer natürlicher Dauerhaftigkeit, die in thermisch modifizierter Form am Markt erhältlich sind, sind Esche, Rotbuche, Erle, Birke, Ahorn, Kiefer und Fichte. ÖNORM EN 350-2 enthält Angaben zur natürlichen Dauerhaftigkeit von Holzarten mit besonderer Bedeutung für Europa. Modifizierte oder anderweitig behandelte Hölzer sind in dieser Norm nicht angeführt. Bisher beruhen Dauerhaftigkeitsangaben zu thermisch modifiziertem Holz meist auf Laborprüfungen. Die in Laborprüfungen ermittelten erhöhten Dauerhaftigkeiten konnten zum Teil in Freilandprüfungen bestätigt werden, wie zum Beispiel die Untersuchungen von Yildiz et al. (2011) für thermisch modifiziertes Erlenholz zeigen. Auch Welzbacher (2007) konnte in einer Freilandprüfung eine signifikante Erhöhung der Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz feststellen, jedoch nur eine geringe Erhöhung der Dauerhaftigkeit im Freiland bei Erdkontakt. Je nach Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität können durch eine thermische Modifikation verschiedene Dauerhaftigkeitsklassen erzielt werden. Bei gleicher Behandlungsintensität werden bei Laubhölzern höhere Dauerhaftigkeiten als bei Nadelhölzern erreicht. Thermisch modifizierte Laubhölzer finden sich meist in den Resistenzklassen 1 und 2, thermisch modifizierte Nadelhölzer in den Resistenzklassen 2 und 3 (Institut für Holztechnologie Dresden 2013a). Hinsichtlich der Qualitätskontrolle der Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz konnte Welzbacher (2007) zeigen, dass eine sehr gute Korrelation zwischen der Masseabnahme durch die thermische Modifikation und der Dauerhaftigkeit besteht. Des Weiteren wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass zwischen der Masseabnahme und Farbmessungen im L*a*b*- Farbsystem eine sehr gute Korrelation besteht. Daher geht Welzbacher (2007) davon aus, dass die Farbwertbestimmung eine geeignete Methode ist,

um die Qualität von thermisch modifiziertem Holz hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zu charakterisieren. Wobei beachtet werden muss, dass die festgestellten Korrelationen eine Abhängigkeit von der maximalen Behandlungstemperatur zeigen und somit die genaue Kenntnis über die Behandlungstemperatur Voraussetzung für eine genaue Einschätzung der Vergütungsqualität ist. Je höher die Behandlungstemperatur desto geringer ist der Masseverlust, der notwendig ist, um eine definierte Dauerhaftigkeitserhöhung zu erreichen.

4.4.11 Witterungsbeständigkeit von thermisch modifiziertem Holz

Unter Witterungsbeständigkeit versteht man das Verhalten des Materials, wenn es der Witterung im Freien ausgesetzt ist. Hierunter werden vor allem Schäden durch UV-Strahlung, Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel verstanden. Wie auch bei unbehandeltem Holz kommt es bei thermisch modifiziertem Holz zu einer Farbveränderung an der Holzoberfläche, die allgemein als "Vergauung" bezeichnet wird. Die chromophoren Gruppen, die bei der thermischen Modifikation gebildet werden und das Lignin, die dem Holz eine braune bis dunkelbraune Farbe verleihen, sind nicht UV-stabil und werden bei natürlicher Bewitterung abgebaut und durch Regen ausgewaschen. Die an sich weiße Zellulose wird an der Oberfläche sichtbar. Durch Verschmutzungen der Zellulose und Besiedelung durch Mikroorganismen kommt es zu einer grauen Farbgebung. Daher vergraut thermisch modifiziertes Holz im gleichen Ausmaß wie unbehandeltes Holz (Patzelt et al. 2002), (Welzbacher 2007). Trotz der geringeren Feuchtigkeitsaufnahme und einer besseren Dimensionsstabilität wurde in einer Untersuchung von Altgen et al. (2012) eine gesteigerte Rissbildung bei thermisch modifiziertem Holz bei Bewitterung im Vergleich zu unbehandeltem Holz festgestellt. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf die Festigkeitsabnahme und die Bildung von Mikrorissen während der thermischen Modifikation, die als Ausgangspunkt der makroskopischen Rissentstehung wirken.

4.4.12 Dimensionsstabilität von thermisch modifiziertem Holz

Durch eine thermische Modifikation kommt es zu einer wesentlichen Verminderung des Quell- und Schwindverhalten. Dies wird einerseits durch das verminderte Sorptionsverhalten und andererseits auch durch eine gesenkte maximale Quellung bewirkt. Das Ausmaß der Dimensionsstabilisierung ist von Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität abhängig (Bekhta & Niemz 2003), (Esteves et al. 2007), (Welzbacher 2007).

4.4.13 Festigkeiten von thermisch modifiziertem Holz

Ein unerwünschter Nebeneffekt, der durch die thermische Modifikation des Holzes auftritt und als einschränkendes Qualitätsmerkmal zu sehen ist, ist die Tatsache, dass die Festigkeit des Holzes durch die thermische Behandlung beeinträchtigt wird. Die Größenordnung der Abnahme ist von Holzart, Modifikationsverfahren und Behandlungsintensität abhängig. Aufgrund der hohen Anzahl an entwickelten Modifikationsverfahren, die sich hinsichtlich der verwendeten Technologie, Behandlungsatmosphäre, Temperatur, Druck, Dauer und Abfolge der Prozessschritte wesentlich unterscheiden, ist es unmöglich eine allgemeine Aussage über das Verhalten bezüglich der Festigkeit von thermisch modifiziertem Holz zu treffen. Dies ist auch der Hauptgrund, warum thermisch modifiziertes Holz bis heute bevorzugt für statisch unbelastete Anwendungen Verwendung findet, z.B. für Fassaden, Terrassen und im Garten- und Landschaftsbau (Welzbacher 2007). Grundsätzlich nehmen Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Biegefestigkeit mit der Behandlungsintensität ab. Der Biegeelastizitätsmodul wird durch die thermische Modifikation im Vergleich zur Abnahme der

Festigkeiten geringer beeinflusst und steigt für geringe Behandlungsintensitäten sogar leicht an. Untersuchungen zur Festigkeit von thermisch modifiziertem Holz im Zusammenhang mit der thermischen Behandlungsintensität wurden z. B. durchgeführt von: Welzbacher (2007), Bekhta & Niemz (2003), Sundqvist et al. (2006), Yildiz et al. (2005), Boonstra & Acker (2007), Unsal & Ayrilmis (2005), Kubojima et al. (2000), Esteves et al. (2008b), Esteves et al. (2007), Majano-Majano et al. (2012), Beikircher (2009) und Pleschberger et al. (2014).

4.4.14 Verklebung von thermisch modifiziertem Holz

Grundsätzlich ist eine Verklebung von thermisch modifiziertem Holz mit Klebstoffen, die für unbehandeltes Holz verwendet werden, möglich. Zu beachten ist jedoch der durch die thermische Modifikation gesenkte pH-Wert, der zu einer Verzögerung bzw. Beschleunigung der Aushärtung des Bindemittels führen kann. Dies ist bei Klebstoffen zu beachten, bei welchen der pH-Wert bei der Aushärtung eine Rolle spielt (z.B. UF-Harze). Des Weiteren wird die Oberflächenspannung durch die thermische Modifikation von Holz verringert, was häufig zu einer schlechteren Benetzbarkeit der Holzoberfläche bzw. Penetration des Klebstoffes in die Holzoberfläche führt. Die wesentlich geringere Holzgleichsfeuchtigkeit von thermisch modifiziertem Holz kann sich ebenfalls negativ auf die Verklebbarkeit auswirken. Bei Klebstoffen, die zur Aushärtung Wasser benötigen (z.B. PUR) kann dies zu einer Verzögerung der Aushärtungsreaktion führen. Da thermisch modifiziertes Holz wesentlich hydrophober ist als unbehandeltes Holz, wird auch die Wasseraufnahme bei wasserbasierenden Klebstoffen verringert, was ebenfalls zu einer Verzögerung der Aushärtung führen kann (z.B. bei PVAc). Zur Verklebungstheorie von Holz und dabei wichtigen Einflussgrößen siehe Dunky & Niemz (2002). Dass es durch die thermische Modifikation des Holzes zu einer Veränderung der Verklebungseigenschaften kommt, jedoch eine Verklebung mit herkömmlichen Klebstoffen möglich ist, zeigt auch die Untersuchung von Sernek et al. (2007). Laut der Angabe von Klebstoffherstellern ist eine Verklebung von Thermoholz mit herkömmlichen Klebstoffen für Holz möglich. Häufig muss jedoch aufgrund der oben kurz beschriebenen Einflussfaktoren die Presszeit erhöht werden. Siehe dazu Herstellerangaben z.B. von Geistlich Ligamenta AG (2013).

4.4.15 Bearbeitbarkeit von thermisch modifiziertem Holz

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch eine thermische Modifikation des Holzes aufgrund der Festigkeitsabnahme und der erhöhten Sprödigkeit die Bearbeitung schwieriger wird. Laut Herstellerangaben z. B. von Mitteramskogler GmbH (2013) und Firstwood GmbH (2013) sind sämtliche Bearbeitungsvarianten Sägen, Hobeln, Fräsen, Bohren, Drehen, Schleifen mit den herkömmlichen Werkzeugen möglich. Eine erhöhte Splitterbildung kann jedoch aufgrund der erhöhten Sprödigkeit von thermisch modifiziertem Holz festgestellt werden. Durch die erhöhte Sprödigkeit von Thermoholz sollten scharfe Kanten vermieden bzw. durch Fasen oder Rundungen ersetzt werden. Thermoholz lässt sich sehr gut schleifen und bürsten. Durch die feine Staubbildung bei der Bearbeitung wird eine Absauganlage oder ein geeigneter Atemschutz empfohlen.

4.4.16 Thermisch modifiziertes Holz: Potenziale, Herausforderungen und Grenzen

Von allen Modifikationsverfahren ist die thermische Modifikation von Holz das am weitesten entwickelte und in verschiedenen Prozessausgestaltungen industriell umgesetzte Modifikationsverfahren. Aufgrund der unzureichenden Verfügbarkeit von einheimischen Holzarten mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit und der aus ökologischer Sicht bedenklichen Aspekte von Tropenholz und chemischen Holzschutzmitteln kann der thermischen Modifikation ein hohes Potenzial zugesprochen werden, was sich auch in

ständig steigenden Produktionsmengen zeigt. Die Herausforderung besteht einerseits darin, die negativen Effekte der thermischen Modifikation zu minimieren und andererseits die resultierenden Materialeigenschaften genau zu definieren. Dies ist insofern schwierig, da eine Vielzahl von Verfahren und Prozessausgestaltungen zur thermischen Modifizierung angewendet werden und dadurch eine allgemeine Aussage über Materialeigenschaften unzulässig wird. Hier steht man vor allem vor dem Problem, dass keine ausreichenden, gesicherten und einfach anzuwendenden Methoden zur Verfügung stehen, um die Qualität von thermisch modifiziertem Holz zu überprüfen, was den Einsatz im statischen Bereich derzeit noch stark einschränkt (Welzbacher 2007). In der Arbeit von Welzbacher (2007) wurden Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung von thermisch modifiziertem Holz untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass gute Korrelationen zwischen Farbmessungen im L*a*b*-Farbsystem, dem Masseverlust durch die thermische Modifikation, der Abnahme der Festigkeit und der Erhöhung der Dauerhaftigkeit bestehen. Jedoch sind diese Korrelationen stark von der Behandlungstemperatur abhängig und somit ist die genaue Kenntnis der Behandlungstemperatur für eine Qualitätskontrolle erforderlich. Je höher die Behandlungstemperatur, desto geringer ist der Masseverlust, der für eine definierte Festigkeitsabnahme bzw. Dauerhaftigkeitserhöhung erforderlich ist. Zum Beispiel kann die gleiche Erhöhung der Dimensionsstabilisierung durch eine Behandlung bei 150°C für 6 Tage, aber auch durch eine Behandlung für 3 Minuten bei 250°C erreicht werden. Dies soll hier nur den Einfluss der Behandlungstemperatur verdeutlichen (Hill 2007). Welzbacher (2007) merkte daher auch an, dass es notwendig ist, den Modifikationsprozess möglichst genau zu steuern bzw. zu dokumentieren, um eine möglichst homogene Behandlungsintensität zu erreichen bzw. eine Qualitätskontrolle mittels Farbmessung zu ermöglichen. Ein Problem stellt hier jedoch der oft heterogene Charakter der Bretter dar, die in einer Charge bei der industriellen Herstellung modifiziert werden. So unterscheiden sich Bretter z. B. hinsichtlich Dichte und Holzfeuchtigkeit. Auch die Lage der Messpunkte (Messung der Holzinnentemperatur), durch die der Prozess gesteuert wird, die Stapelanordnung, die Lage des Brettes im Stapel und die Holzfeuchtigkeit während der thermischen Modifikation sind von Bedeutung. All diese Faktoren können zu einer unterschiedlichen Behandlungsintensität führen und erhöhen somit die Streuung der angestrebten Zieleigenschaften wie Dauerhaftigkeit und Festigkeit, obwohl der Behandlungsprozess einem standardisierten Ablauf folgt.

5 Thermoholzproduktion des Unternehmens Mitteramkogler GmbH

Wie im Abschnitt 4.4.2 angeführt gibt es verschiedene Verfahren, um Holz thermisch zu modifizieren. Das Unternehmen Mitteramkogler GmbH, das auch das in dieser Masterarbeit untersuchte Probenmaterial zur Verfügung stellt, produziert Thermoholz in einer Wasserdampf-Holzgasatmosphäre unter Normaldruck. Die Behandlungskammern sind ähnlich wie Holztrochungskammern (Frischluft-Abluft-Trocknung) aufgebaut. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau einer Behandlungskammer des Unternehmens. Im Wesentlichen besteht die Kammer aus einem Rollwagen, mit dem der Brettstapel in die Behandlungskammer geschoben bzw. aus der Behandlungskammer gezogen werden kann, einem Gebläse, das für ein homogenes Kammerklima sorgt, einem Wärmetauscher, mithilfe dessen die Wärmeenergie in die Behandlungskammer eingebracht wird und einer seitlich angebrachten Wassersprüheinrichtung, mit der Wasser in die Kammer gesprüht werden kann. Mit Hilfe der Sprüheinrichtung kann die während der thermischen Modifikation notwendige Wasserdampf-atmosphäre hergestellt werden. Zusätzlich dient die Sprüheinrichtung zur Einstellung des Kammerklimas während des gesamten Prozesses und zur Abkühlung der Behandlungskammer nach der thermischen Modifikation. Die Behandlungskammer steht unter leichtem Überdruck, damit ein Sauerstoffeintritt aus der Umgebung während der Behandlung verhindert wird. Die Holzgase, die während der Modifikation entstehen, werden über eine Gasleitung einer Verbrennungsanlage zugeführt. In Abbildung 9 ist der schematische Prozessablauf der thermischen Modifikationen, den das Unternehmen anwendet, dargestellt.

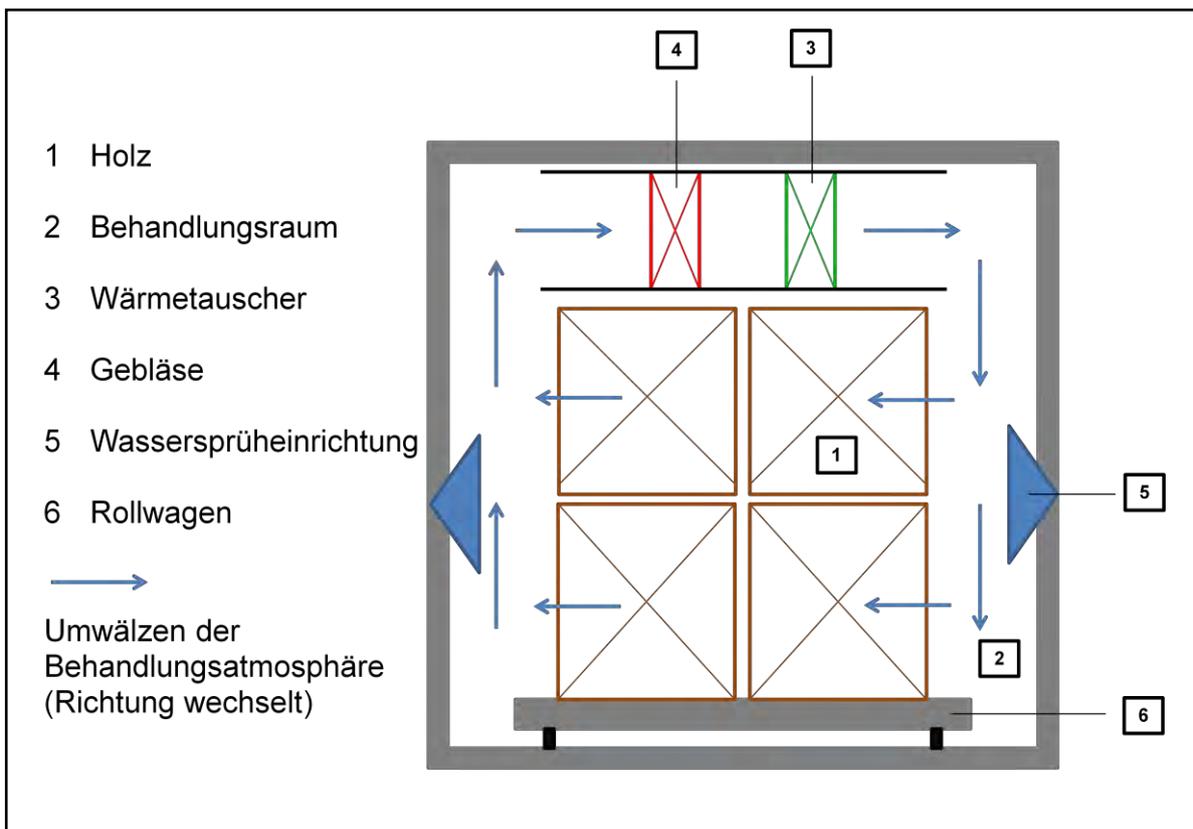


Abbildung 8: Skizze einer Behandlungskammer zur thermischen Holzmodifikation

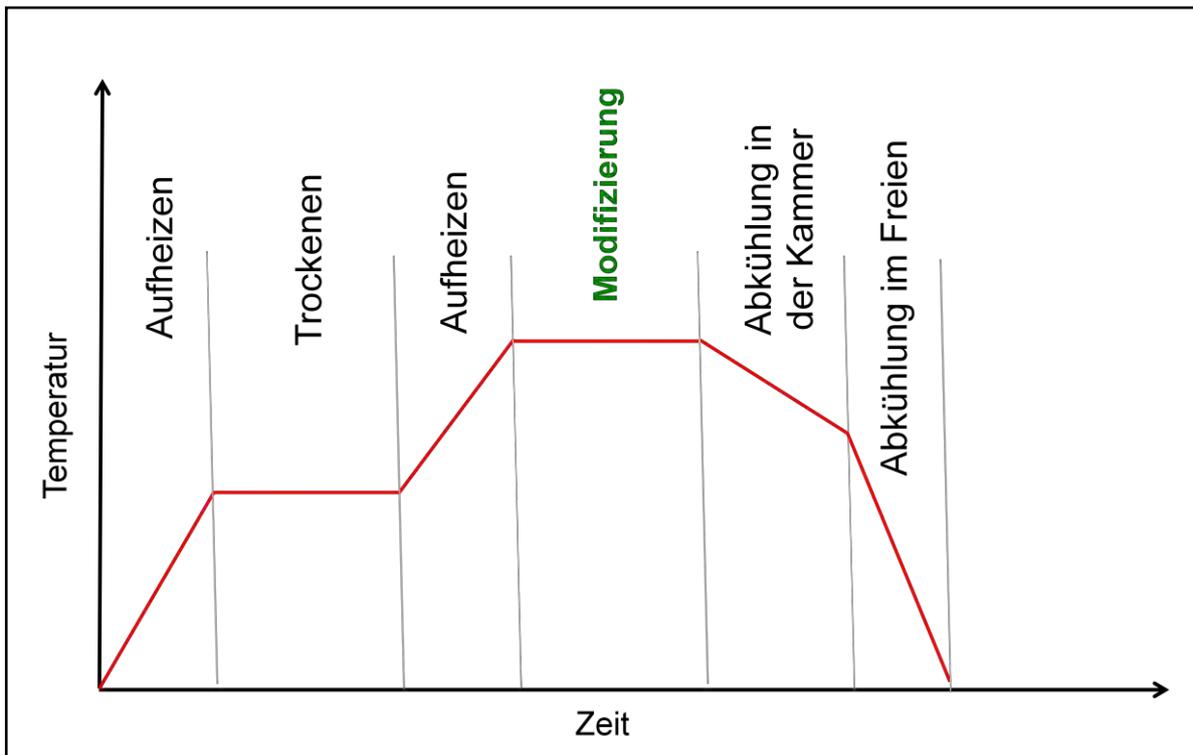


Abbildung 9: Schematischer Prozessablauf der thermischen Modifikation von Holz, der vom Unternehmen Mitteramkogler GmbH angewendet wird

Prozessabfolge:

Aufheizen: Das kammertrockene Schnittholz ($u = 8-10\%$) wird auf ca. 110°C aufgeheizt.

Trocknen: Das Schnittholz wird bei konstanter Temperatur bis auf eine minimale Restfeuchtigkeit getrocknet.

Aufheizen: Nach der Trocknung wird das Schnittholz auf die Behandlungstemperatur aufgeheizt. Diese liegt je nach Behandlungsintensität zwischen 160°C und 220°C .

Modifikation: Hier erfolgt die thermische Modifikation in einer Wasserdampfatmosfera.

Abkühlung in der Kammer: Die Abkühlung von Modifikationstemperatur bis ca. 105°C erfolgt durch Einsprühen von Wasser in die Behandlungskammer. Durch die Wasserverdampfung wird dem Holz und der Behandlungskammer die Wärmeenergie entzogen.

Abkühlung im Freien: Ab ca. 105°C erfolgt die Abkühlung "unkontrolliert" im Freien unter Umgebungsbedingungen.

Der gesamte Behandlungsprozess in der Kammer benötigt ca. 72 Stunden.

6 Aufgabenstellungen

Da diese Masterarbeit in Kooperation mit dem Unternehmen Mitteramskogler GmbH durchgeführt wurde, ist die Aufgabenstellung der Masterarbeit eng mit den Interessen des Unternehmens verknüpft bzw. wurden die Untersuchungen auf die Fragestellungen des Unternehmens abgestimmt (siehe Abschnitt 2). Folgende Aufgabenstellungen wurden gemeinsam mit dem Unternehmen erarbeitet:

1. Aufgabenstellung: Untersuchung des derzeit vom Unternehmen Mitteramskogler GmbH angewendeten Abkühlungsprozesses der Bretter nach der thermischen Modifikation.

Untersucht wird die Abkühlungsphase im Freien nach Kammeröffnung von ca. 105°C auf Umgebungsbedingungen (Prozessschritt siehe Abbildung 9). Hier werden vor allem Temperatur- und Holzfeuchtigkeitsgradienten im Brettquerschnitt und die Verschalung untersucht, um einen Eindruck über das Potenzial für mögliche Holzstrukturschädigungen durch diesen Prozessschritt zu erhalten.

2. Aufgabenstellung: Gezielte Veränderung der Abkühlungsbedingungen, um deren Auswirkung auf ausgewählte Material- und Produkteigenschaften prüfen zu können.

Hier werden Bretter unterschiedlich abgekühlt und im Anschluss Materialprüfungen durchgeführt. Um eine Aussage über Festigkeitsunterschiede aufgrund von unterschiedlicher Abkühlung treffen zu können, werden Bruchenergieprüfungen unter Modus I Belastung in RL- und TL- Rissausbreitung, an unterschiedlich abgekühlten Probekörpern, durchgeführt. Um Aussagen über die Auswirkung von unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen auf das Verhalten des thermisch modifizierten Holzes bei Bewitterung (Produktverwendung) treffen zu können, werden Probekörper unterschiedlich abgekühlt, einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 ausgesetzt und danach die Rissbildung untersucht.

3. Aufgabenstellung: Untersuchung des Einflusses ausgewählter Prozess-, Brett- und Holzmerkmale auf die Rissbildung bei Bewitterung.

Um Aussagen über den Einfluss der thermischen Behandlungsintensität, der Darrdichte, der Jahrringlage im Brett, der Jahrringbreite und des Frühholzanteils auf die Rissbildung bei Bewitterung treffen zu können, werden die Prozess-, Brett- und Holzmerkmale der Probekörper festgehalten bzw. gemessen. Im Anschluss daran werden die Probekörper einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 ausgesetzt und danach die Rissbildung untersucht.

7 Hypothesenplan

Im folgenden Abschnitt sind die Hypothesen angeführt, die sich aus den Aufgabenstellungen ableiten und im Rahmen dieser Masterarbeit auf ihre Gültigkeit überprüft werden (Testhypothesen) und jene Hypothesen, deren Gültigkeit angenommen, aber in dieser Masterarbeit nicht überprüft werden (Hintergrundhypothesen).

7.1 Testhypothesen

Hypothese 1

Je rascher die Bretter nach der thermischen Behandlung abgekühlt werden, desto geringer ist die Bruchenergie.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an unterschiedlich rasch abgekühlten Probekörpern.

Hypothesenherleitung: Durch eine rasche Abkühlung kommt es zwangsläufig zu Temperaturdifferenzen und möglicherweise Feuchtigkeitsdifferenzen im Querschnitt des Brettes. Da sich Holz bei Erwärmung ausdehnt bzw. beim Abkühlen zusammenzieht und bei Feuchtigkeitsaufnahme quillt bzw. bei Feuchtigkeitsabgabe schwindet, treten aufgrund von Temperaturgradienten und Feuchtigkeitsgradienten innere Spannungen auf (a e n f h r & Scholz 2012). Je rascher die Abkühlung desto höher sind diese Gradienten bzw. die auftretenden inneren Spannungen. Durch zu rasche Abkühlung kommt es zu inneren Spannungen im Querschnitt des Brettes, die die Festigkeit des Holzes übersteigen und daher zu einer Schädigung der Holzstruktur bzw. als Folge davon zu einer Abnahme der Festigkeit führen.

Hypothese 2

Je höher die thermische Behandlungsintensität, desto niedriger ist die Bruchenergie des Holzes.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern unterschiedlicher Behandlungsintensität.

Hypothesenherleitung: Durch eine thermische Behandlung wird die Festigkeit des Holzes herabgesetzt. Dass die Festigkeiten mit steigender thermischer Behandlungsintensität sinken, wurde schon durch mehrere Untersuchungen zu diesem Thema festgestellt. Vergleiche dazu Arbeiten von Boonstra & Acker (2007), Esteves et al. (2007) und Bekhta & Niemz (2003). Auch eine Abnahme der Bruchenergie mit steigender Behandlungsintensität wurde schon von Majano-Majano et al. (2012) und Pleschberger et al. (2014) dokumentiert.

Hypothese 3

Je höher die Darrdichte des thermisch modifizierten Holzes, desto höher ist die Bruchenergie des Holzes.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern mit unterschiedlicher Dichte.

Hypothesenherleitung: Mit steigender Dichte steigen im Allgemeinen auch die Festigkeiten des Holzes (a e n f h r & Scholz 2012). Dieser Zusammenhang besteht auch noch nach der thermischen Modifikation des Holzes. Eine steigende Bruchenergie mit steigender Dichte wurde auch schon von Reiterer et al. (2002b) dokumentiert.

Hypothese 4

Liegende Jahrringlagen im Brett führen zu einer Abnahme der Bruchenergie.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern, die aus Brettern mit unterschiedlicher Jahrringlage hergestellt wurden.

Hypothesenherleitung: Durch das unterschiedliche Quell- und Schwindmaß von Holz in radialer, tangentialer und axialer Holzrichtung kommt es zu inneren Spannungen im Brettquerschnitt während der Holz Trocknung, der thermischen Modifikation, aber auch bei Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt. Übersteigen die dadurch entstehenden inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, kommt es zur plastischen Deformation (Bruch, Rissbildung) (Lohmann 1990). In Brettern mit liegenden Jahrringen kommt es aufgrund der Brettgeometrie zu höheren inneren Spannungen während des Prozesses und daher häufiger zur Schädigung der Holzstruktur und einer damit einhergehenden Festigkeitsabnahme.

Hypothese 5

Liegende Jahrringlagen im Brett führen zu einer Zunahme der Risse, die durch Bewitterung an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen der Bretter entstehen.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 an Probekörpern mit unterschiedlichen Jahrringlagen.

Hypothesenherleitung: Durch die Bewitterung kommt es zwangsläufig zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brett. Da dies bei Holz mit einer Längenänderung verbunden ist, führen Differenzen zu inneren Spannungen. Übersteigen diese inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, so kommt es zur Schädigung der Holzstruktur bzw. zur Rissbildung (a e n f h r & Scholz 2012). Liegende Jahrringlagen im Brett führen aufgrund der Brettgeometrie zu einer verstärkten inneren Spannungsbildung bei Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen und daher kommt es bei Brettern mit liegenden Jahrringlagen zu verstärkter Rissbildung. Des Weiteren zeigen Untersuchungen von Sandberg & Söderström (2006) und Sandberg (1999), dass tangentiale Flächen von unbehandelten Probekörpern stärkere Rissbildung bei Bewitterung zeigen als radiale Flächen. Auch Altgen et al. (2012) stellt eine höhere Rissbildung an tangentialen Holzoberflächen bei thermisch behandeltem Holz fest. Durch liegende Jahrringlage im Brett wird die tangentiale Oberfläche am Brett erhöht und dadurch auch die Rissbildung.

Hypothese 6

Je höher die Darrdichte des Brettes, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 an Probekörpern mit unterschiedlicher Dichte.

Hypothesenherleitung: Durch die Bewitterung kommt es zwangsläufig zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brett. Da dies bei Holz mit einer Längenänderung verbunden ist, führen Differenzen zu inneren Spannungen. Übersteigen diese inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, so kommt es zur Schädigung der Holzstruktur bzw. zur Rissbildung. Das Quell- und Schwindmaß und die dadurch auftretenden inneren Spannungen steigen grundsätzlich mit steigender Dichte (a e n f h r & Scholz 2012). Dadurch steigt auch die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung mit steigender Dichte.

Hypothese 7

Je höher die durchschnittliche Jahrringbreite im Brett, desto weniger Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern mit unterschiedlicher Jahrringbreite nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321.

Hypothesenherleitung: Durch die Bewitterung kommt es zwangsläufig zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brett. Da dies bei Holz mit einer Längenänderung verbunden ist, führen Differenzen zu inneren Spannungen. Übersteigen diese inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, so kommt es zur Schädigung der Holzstruktur bzw. zur Rissbildung. (a e n f h r & Scholz 2012). Da der Dichteunterschied an den Jahrringgrenzen maximal ist, entstehen vermehrt Risse an den Jahrringgrenzen. Daraus folgt, dass mit steigender durchschnittlicher Jahrringbreite die Anzahl der Jahrringgrenzen sinkt und folglich die Rissbildung abnimmt.

Hypothese 8

Je stärker die thermische Behandlungsintensität, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern unterschiedlicher Behandlungsintensität nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321.

Hypothesenherleitung: Durch die Bewitterung kommt es zwangsläufig zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brett. Da dies bei Holz mit einer Längenänderung verbunden ist, führen Differenzen zu inneren Spannungen. Übersteigen diese inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, so kommt es zur Schädigung der Holzstruktur bzw. zur Rissbildung. (a e n f h r & Scholz 2012). Durch eine höhere Behandlungsintensität kommt es im Allgemeinen auch zu einer verstärkten Festigkeitsabnahme (u. a. Esteves & Pereira 2008). Eine Untersuchung von Altgen et al. (2012) zeigt auch, dass es durch eine thermische Modifikation zu einer steigenden Rissbildung bei Bewitterung kommt.

Hypothese 9

Je rascher die Bretter nach der thermischen Behandlung abgekühlt werden, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern, die unterschiedlich rasch abgekühlt werden und danach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 ausgesetzt werden.

Hypothesenherleitung: Durch die Bewitterung kommt es zwangsläufig zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brett. Da dies bei Holz mit einer Längenänderung verbunden ist, führen Differenzen zu inneren Spannungen. Übersteigen diese inneren Spannungen die Festigkeit des Holzes, so kommt es zur Schädigung der Holzstruktur bzw. zur Rissbildung (a e n f h r & Scholz 2012). Wird die Holzstruktur durch eine zu rasche Abkühlung geschädigt bzw. entstehen mikroskopische Risse, kommt es bei Bewitterung zu einer verstärkten makroskopischen Rissbildung.

7.2 Hintergrundhypothesen

Hypothese 1

Die Zyklusbehandlung nach ÖNORM EN 321 führt zu annähernd der gleichen Belastung des Holzes wie eine natürliche Bewitterung. Die Ergebnisse aus dem Zyklustest können daher annähernd auf das Verhalten der Bretter bei Bewitterung umgelegt werden.

Hypothese 2

Das vom Unternehmen Mitteramkogler GmbH bereitgestellte Material, das für die Probenherstellung verwendet wurde, entspricht repräsentativen Stichproben aus der Produktion.

8 Material

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit wurden thermisch modifizierte Bretter, der Holzart Esche (*Fraxinus excelsior L.*) in zwei unterschiedlichen thermischen Behandlungsintensitäten verwendet. Das gesamte Probenmaterial wurde vom Unternehmen Mitteramskogler GmbH zur Verfügung gestellt.

8.1 Untersuchtes Probenmaterial

Für die Untersuchungen wurden repräsentative Bretterstapel aus dem normalen Produktionsprozess des Unternehmens ausgewählt. Der Querschnitt der untersuchten Bretter beträgt circa 115mm x 32mm und entspricht dem Produktionsmaß für Terrassenbretter. Die untersuchten Behandlungsintensitäten unterscheiden sich im Wesentlichen in der maximalen Behandlungstemperatur (T_{\max} [°C]) und der Dauer der thermischen Behandlung. Die interne Firmenbezeichnung der Behandlungsintensitäten lautet "mezzo-exterior" für die geringere Behandlungsintensität ($T_{\max} = 180^{\circ}\text{C}$) und "forte" für die höhere Behandlungsintensität ($T_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$). Die genauen Schritte der thermischen Modifikation wurden vom Unternehmen nicht bekannt gegeben. Der schematische und vereinfachte Prozessablauf ist im Abschnitt 5 beschrieben. Für die Untersuchung des derzeit angewendeten Abkühlungsprozesses wurden Bretter der Behandlungsintensität "forte" verwendet. Um den Einfluss von Prozess-, Holz- und Brettmerkmalen auf die Bruchenergie bzw. die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung zu untersuchen, wurden Bretter von beiden Behandlungsintensitäten herangezogen. Die Brettanzahl pro Behandlungsintensität und Abkühlungsbedingung wurde bewusst ausgewählt. Andere Holz- und Brettmerkmale wie Dichte, Jahrringlage und Jahrringbreite wurden nicht bewusst gesteuert und sind daher "zufällig" verteilt. Das untersuchte Probenmaterial mit der Anzahl der Bretter ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht Probenmaterial

Für die Untersuchung des derzeitigen Abkühlungsprozesses			
Holzart	Behandlungsintensität	Brettanzahl	Untersuchungen
Esche	forte	15	Holzfeuchtigkeit, Temperatur, Verschalung, Zeitpunkt t=0
Esche	forte	15	Holzfeuchtigkeit, Temperatur, Verschalung, Zeitpunkt t=5
Esche	forte	15	Holzfeuchtigkeit, Temperatur, Verschalung, Zeitpunkt t=24
Für die Untersuchung des Einflusses von Holz-, Brett- und Prozessmerkmalen auf ausgewählte Materialeigenschaften			
Holzart	Behandlungsintensität	Brettanzahl	Untersuchungen
Esche	forte	27	Abkühlung "rasch", Holzmerkmale, Bruchenergie, Rissbildung
Esche	forte	27	Abkühlung "schonend", Holzmerkmale, Bruchenergie, Rissbildung
Esche	forte	45	Abkühlung "normal", Holzmerkmale, Rissbildung
Esche	mezzo-exterior	27	Abkühlung "rasch", Holzmerkmale, Bruchenergie, Rissbildung
Esche	mezzo-exterior	27	Abkühlung "schonend", Holzmerkmale, Bruchenergie, Rissbildung
Esche	mezzo-exterior	45	Abkühlung "normal", Holzmerkmale, Rissbildung

8.2 Unterschiedliche Abkühlungsbedingungen

Um den Einfluss der Abkühlungsbedingungen auf ausgewählte Materialeigenschaften zu untersuchen, wurden Bretter unterschiedlich abgekühlt. Im Folgenden werden die Abkühlungsbedingungen genauer erklärt. Anzumerken ist hier, dass bei den unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen nur die Abkühlungstemperatur bzw. Abkühlungsgeschwindigkeit bewusst verändert werden konnte, jedoch nicht die während der Abkühlung herrschende Luftfeuchtigkeit.

Abkühlung "normal"

Die Abkühlungsbedingung "normal" entspricht der Abkühlung, die derzeit vom Unternehmen angewendet wird. Dabei wird der modifizierte Bretterstapel bei ca. 105° C aus der Behandlungskammer gezogen und bei Umgebungsbedingungen abgekühlt. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde eine Außentemperatur von ca. 10° C gemessen.

Abkühlung "rasch"

Die Abkühlungsbedingung "rasch" bedeutet, dass die Bretter bei 105° C aus der Behandlungskammer entnommen wurden und im Gegensatz zur Abkühlungsbedingung "normal" nicht im Stapel abgekühlt wurden, sondern einzeln nebeneinander. Dadurch wird eine noch höhere Abkühlungsgeschwindigkeit erreicht. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde eine Außentemperatur von ca. 10° C gemessen.

Abkühlung "schonend"

Die Abkühlungsbedingung "schonend" bedeutet, dass der Brettstapel zur Abkühlung unterhalb von 105° C nicht aus der Behandlungskammer gezogen wurde, sondern das Tor der Behandlungskammer leicht geöffnet wurde. Um eine gleichmäßige Abkühlung zu erreichen, wurden die Ventilatoren während der gesamten Abkühlung eingeschaltet. Abbildung 10 zeigt die Temperaturkurve der Abkühlung "schonend" anhand von 7 in der Behandlungskammer verteilten Temperaturfühlern. Man erkennt, dass eine sehr gleichmäßige und langsame Abkühlung über eine Zeitspanne von ca. 35 Stunden erfolgte.

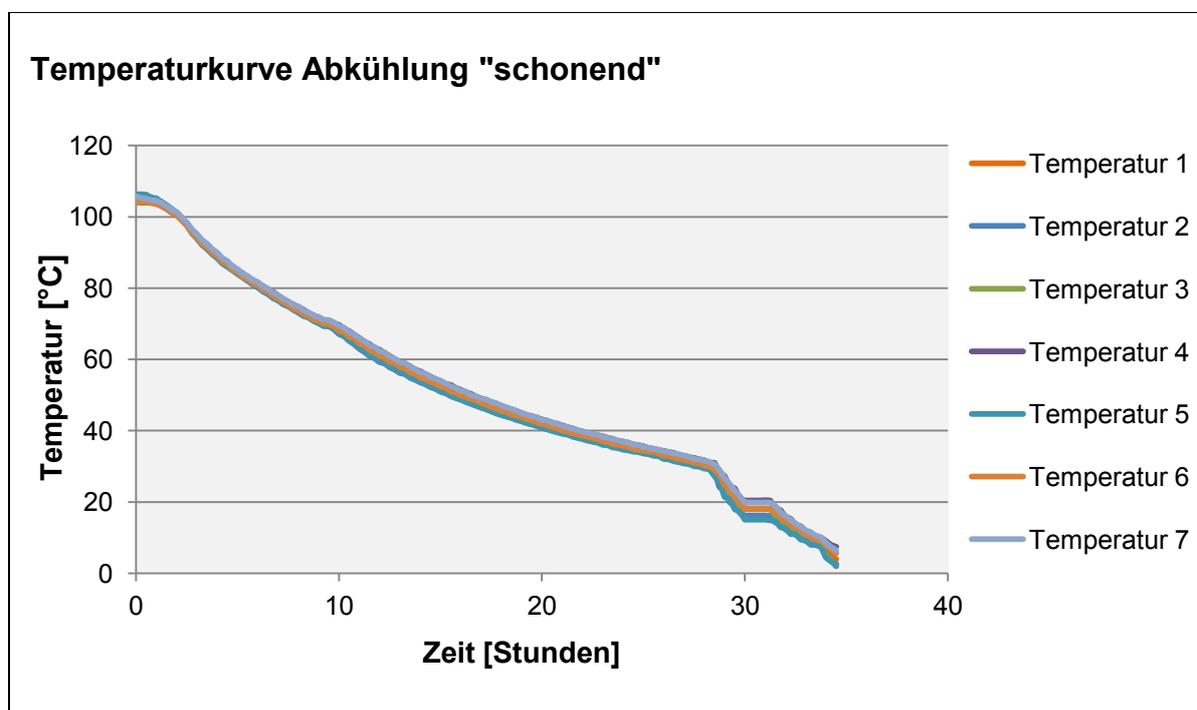


Abbildung 10: Temperaturkurve der Abkühlungsbedingung "schonend"

8.3 Erklärung der Probenbezeichnung bzw. Gruppenbezeichnung

Da in weiterer Folge zur Proben- und Gruppenbezeichnung Abkürzungen verwendet werden, sind diese hier im Detail angeführt und erklärt.

Bedeutung der einzelnen Abkürzungen:

F	.....	Behandlungsintensität forte
M	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior
R	.....	Abkühlung rasch
S	.....	Abkühlung schonend
N	.....	Abkühlung normal
r	.....	RL-Rissausbreitung (Bruchenergie)
t	.....	TL-Rissausbreitung (Bruchenergie)

Bedeutung der Gruppenbezeichnungen:

FR	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch
FS	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend
FN	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung normal
FSr	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
FSt	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
FRr	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
FRt	.....	Behandlungsintensität forte, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
Fr	.....	Behandlungsintensität forte, RL-Rissausbreitung
Ft	.....	Behandlungsintensität forte, TL-Rissausbreitung
MR	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch
MS	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend
MN	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung normal
MRr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
MRt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
MSr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
MSt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
Mr	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung
Mt	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung

8.4 Thermoholz Produktdatenblatt des Herstellers

In Tabelle 5 sind die vom Unternehmen bekannten Materialkennwerte für Thermoholz der Behandlungsintensitäten "forte" und "mezzo-exterior" angeführt.

Tabelle 5: Materialkennwerte für Thermoholz von Mitteramskogler GmbH

Eigenschaft	Einheit	Esche unbehandelt	im Vergleich zu Esche unbehandelt	
			forte (200°C)	mezzo-exterior (180°C)
Darrdichte	g/cm ³	0,710	-15,5 %	-9,6 %
Holzausgleichsfeuchte 20°C/65%	%	10,75	-59,8 %	-53,5 %
Diff. Quellung tangential	%/%	0,47	-6,4 %	-4,2 %
Diff. Quellung radial	%/%	0,24	-4,2 %	-8 %
Biege E-Modul	N/mm ²	14290	-6,8 %	+0 %
Biegefestigkeit	N/mm ²	128	-35,0 %	-22,1 %
Durchbiegung bei Bruch	mm	11,19	-54,2 %	-48,6 %
Brinellhärte	N/mm ²	43,5	-33,3 %	-24,6 %
Dauerhaftigkeit nach EN 350-1		5	1	1-2
VOC- Emissionen	µg/m ³	-	33,8	53,2
SVOC- Emissionen	µg/m ³	-	<1	<1
Furfural- Emissionen	µg/m ³	-	4	4
Formaldehyd- Emissionen	µg/m ³	-	0,03	0,03

9 Methode

9.1 Stichprobengröße

Für die Untersuchung des derzeit angewendeten Abkühlungsprozesses im Freien (Abkühlungsbedingung "normal"), der nach der thermischen Modifizierung stattfindet, wurde eine Brettanzahl von 15 Brettern pro Stapel gewählt (siehe Tabelle 4). Hier wurde eine Stichprobengröße von 15 Brettern gewählt, da dadurch ein guter Überblick über den Stapel gewonnen werden kann (siehe Abbildung 12). Für die Untersuchung der Einflüsse von verschiedenen Holz- und Brettmerkmalen, unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen und Behandlungsintensitäten wurden Bruchenergieprüfungen in RL- und TL-Rissausbreitung und Risslängenmessungen nach einer Zyklusbehandlung durchgeführt. Das gesetzte Ziel bezüglich der Stichprobengröße der Bruchenergieprüfungen war, ein signifikantes Ergebnis ($\alpha=0.05$) in einem zweiseitigen T-Test für unabhängige Stichproben ab einer Mittelwertdifferenz von 15% der Probengruppen zu erhalten. Aus bereits durchgeführten Untersuchungen am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe ist bekannt, dass mit einem Variationskoeffizienten der Messwerte von 20% gerechnet werden muss (Hansmann 2013). Mit Hilfe dieser Zielsetzung und des erwarteten Variationskoeffizienten wurde die optimale Stichprobengröße mit einem Stichprobenkalkulator, der online verfügbar ist, berechnet (University of British Columbia 2013). Die berechnete optimale Stichprobengröße pro Gruppe (gleiche Behandlungsintensität und Abkühlung) beträgt für diese Untersuchung 27 Proben. Die eingegebenen Werte und das Ergebnis der Kalkulation sind in Tabelle 6 im Überblick dargestellt. Für die Rissbildungsuntersuchungen nach einer Zyklusbehandlung war es schwer eine optimale Stichprobengröße zu kalkulieren. Anforderung war hier eine Stichprobengröße, die groß genug ist, um den Einfluss verschiedener Kombinationen von Merkmalen untersuchen zu können bzw. eine multiple lineare Regressionsanalyse durchführen zu können. Um diese Anforderung möglichst zu erfüllen, jedoch den zusätzlichen Materialbedarf gering zu halten, wurden Proben von allen Brettern entnommen, die bereits aus anderen Untersuchungen vorhanden waren. Daraus ergibt sich für die Rissbildungsuntersuchungen eine Gesamtprobenanzahl/Gesamt Brettanzahl von 198 Proben/Brettern (Details siehe Tabelle 4).

Tabelle 6: Berechnung der optimalen Stichprobengröße - angenommene und in der Kalkulation verwendete Werte

Mittelwerte	
$\bar{x}_1 = 180$	Entspricht einer Mittelwertdifferenz von 15%
$\bar{x}_2 = 207$	
Variationskoeffizient/Standardabweichung	
s = 36	Entspricht einem Variationskoeffizienten von 20% ausgehend von einem Mittelwert von 180
Irrtumswahrscheinlichkeit / Teststärke	
$\alpha = 5\%$	Wahrscheinlichkeit α für den Fehler 1. Art
$1-\beta = 80\%$	Wahrscheinlichkeit β für den Fehler 2. Art
Ergebnis	
Optimale Stichprobengröße = 27 Proben	

9.2 Untersuchung des derzeit angewendeten Abkühlungsprozesses

Aufgabenstellung war hier, den derzeit vom Unternehmen Mitteramskogler GmbH angewendeten Abkühlungsprozess des bereits thermisch modifizierten Holzes im Freien nach Kammeröffnung zu untersuchen. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Temperatur- und Holzfeuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt gelegt, da Differenzen über den Brettquerschnitt zu Holzstrukturschädigungen führen können. Grund dafür sind einerseits der Wärmeausdehnungskoeffizient von Holz und andererseits die Eigenschaft von Holz, bei Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Feuchtigkeitsabgabe zu quellen bzw. zu schwinden. Beide Effekte können zu inneren Spannungen, Verformungen oder Schädigungen der Holzstruktur führen. Im Falle geringer Temperatur- und Holzfeuchtigkeitsdifferenzen kommt es während der Abkühlung hauptsächlich zu elastischen Verformungen, die zu keiner weiteren Schädigung der Holzstruktur führen. Treten jedoch höhere Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen auf, die zu inneren Spannungen führen, die an einem Punkt der Holzstruktur die Festigkeit übersteigen, kommt es zur plastischen Deformation bzw. zu Rissen, die eine Schädigung der Holzstruktur bewirken. Ziel der Untersuchung war es, auftretende Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt während der Abkühlung abzubilden bzw. deren Potenzial für eine Holzstrukturschädigung abzuschätzen.

9.2.1 Theoretische Betrachtung des derzeitigen Abkühlungsprozesses

Der Abkühlungsprozess im Freien stellt einen sehr dynamischen Prozess dar. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist stark von der Witterung (Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit) und der Lage des Brettes im Stapel abhängig. Daher ist eine genaue Beschreibung dieses Prozessschrittes nicht möglich. Die Temperatur des Holzes beträgt bei Kammeröffnung ca. 105°C. Vor allem in der kälteren Jahreszeit ist daher ein Temperaturunterschied zwischen Behandlungskammer und Umgebungsbedingungen von mehr als 100°C vorhanden. Des Weiteren ist es nur schwer möglich die dabei im Holz ablaufenden physikalischen Prozesse exakt zu beschreiben. Es steht jedoch fest, dass ein rascher Klimawechsel von Behandlungskammer zu Umgebungsbedingungen erfolgt und es dadurch zu Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt kommt. Entstehende Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen werden auch als jene Parameter angesehen, die in diesem Prozessschritt das größte Potenzial haben, die Holzstruktur zu beschädigen. Um das Potenzial aus theoretischer Sicht abzuschätzen, werden nachstehend einige vereinfachte Berechnungen durchgeführt. Da keine exakten Materialkennwerte des thermisch modifizierten Holzes vorliegen, werden typische Werte für Holz bei diesen Berechnung verwendet. Die Ergebnisse können daher nur zu einer sehr groben Einschätzung herangezogen werden.

Wärmeausdehnung von Holz

Die Wärmeausdehnung (α) von Holz ist im Vergleich zur Ausdehnung durch Holzfeuchtigkeitsänderungen gering. Sie beträgt bei Vollholz in Abhängigkeit der Holzart in Faserrichtung $3,15 - 4 \cdot 10^{-6}$ [m/(m*K)] und senkrecht zur Faserrichtung $16 - 40 \cdot 10^{-6}$ [m/(m*K)]. Sie ist in tangentialer Richtung etwas höher als in radialer Richtung (a e n f h r & Scholz 2012).

Dimensionsänderung von Holz aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Feuchtigkeitsabgabe

Unterhalb des Fasersättigungspunktes kommt es bei Holz zur Quellung bzw. Schwindung bei Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Feuchtigkeitsabgabe. Das differentielle Schwundmaß (β) gibt die Längenänderung in Prozent an, wenn die Holzfeuchtigkeit im Bereich zwischen Fasersättigung und darrtrockenem Zustand um ein Prozent abnimmt. Das differentielle

Schwindmaß beträgt für unbehandeltes Eschenholz: In axialer Richtung 0,013 [%/‰], in radialer Richtung 0,21 [%/‰] und in tangentialer Richtung 0,38 [%/‰] (Lohmann 1990).

Materialeigenschaften:

Da genaue Materialeigenschaften des thermisch modifizierten Eschenholzes nicht vorliegen, sind in Tabelle 7 die für die Berechnungen verwendeten Materialeigenschaften angeführt. In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die theoretischen Berechnungen der Längenänderungen angeführt bzw. auch die entstehenden Spannungen, wenn diese Längenänderungen unterdrückt werden.

Tabelle 7: Materialeigenschaften, die für die Berechnungen verwendet wurden

	Zugfestigkeit (σ_z)	Druckfestigkeit (σ_D)	E-Modul (E)	differenzielles Schwindmaß (β)	Wärmeausdehnung (α)
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%/‰]	[m/(m*K)]
Längs (L)	130	50	10000	0,013	$4 * 10^{-6}$
Radial (R)	3	6	800	0,21	$30 * 10^{-6}$
Tangential (T)	3	6	450	0,38	$40 * 10^{-6}$

Annahmen zur Berechnung:

- Holz mit einer Länge von 100mm
- 1% Holzfeuchtigkeitsveränderung
- 100°C Temperaturveränderung

Tabelle 8: Berechnung der Längenänderung bzw. der entstehenden Spannung bei Veränderung der Holzfeuchtigkeit um 1% in Längs-, Radial- und Tangentialrichtung

	Längenänderung			Spannung bei Unterdrückung		
			[mm]			[N/mm ²]
Längs	$\Delta L = L_0 * \beta_L$	$\Delta L = 100 * 0,00013$	0,013	$\sigma = E_L * \epsilon$	$\sigma = 10000 * 0,00013$	1,3
Radial	$\Delta L = L_0 * \beta_R$	$\Delta L = 100 * 0,0021$	0,21	$\sigma = E_R * \epsilon$	$\sigma = 800 * 0,0021$	1,68
Tangential	$\Delta L = L_0 * \beta_T$	$\Delta L = 100 * 0,0038$	0,38	$\sigma = E_T * \epsilon$	$\sigma = 450 * 0,0038$	1,71

Tabelle 9: Berechnung der Längenänderung bzw. der entstehenden Spannung bei Veränderung der Temperatur um 100°C in Längs-, Radial- und Tangentialrichtung

	Längenänderung			Spannung bei Unterdrückung		
			[mm]			[N/mm ²]
Längs	$\Delta L = L_0 * \alpha_L * \Delta T$	$\Delta L = 100 * 4 * 10^{-6} * 100$	0,04	$\sigma = E_L * \epsilon$	$\sigma = 10000 * 0,0004$	4
Radial	$\Delta L = L_0 * \alpha_R * \Delta T$	$\Delta L = 100 * 30 * 10^{-6} * 100$	0,3	$\sigma = E_R * \epsilon$	$\sigma = 800 * 0,003$	2,4
Tangential	$\Delta L = L_0 * \alpha_T * \Delta T$	$\Delta L = 100 * 40 * 10^{-6} * 100$	0,4	$\sigma = E_T * \epsilon$	$\sigma = 450 * 0,004$	1,8

Die Ergebnisse der Berechnungen entsprechen natürlich nicht dem realen Spannungszustand, können aber zu einer Einschätzung der Einflüsse von Temperatur- und Feuchtigkeitsdifferenzen herangezogen werden. Wie in Tabelle 8 zu erkennen ist, führt bereits eine Feuchtigkeitsdifferenz von 1% Holzfeuchtigkeit zu erheblichen Spannungen. Im Vergleich dazu führen Temperaturunterschiede erst ab einer Temperaturdifferenz von 100°C zu vergleichbaren Spannungen (siehe Tabelle 9). Aus den Ergebnissen der Berechnungen kann man darauf schließen, dass Feuchtigkeitsdifferenzen sehr rasch zu einer Schädigung der Holzstruktur führen können. Vor allem in radialer und tangentialer Holzrichtung sind die Zugfestigkeiten sehr gering. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die Festigkeit und die Bruchdehnung des Holzes durch die thermische

Modifikation abnehmen. Auch die Holzfeuchtigkeit und die Temperatur beeinflussen die Festigkeit und die Bruchdehnung des Holzes (elastische + plastische Verformung vor Bruch). Mit steigender Temperatur und Holzfeuchtigkeit sinken im Allgemeinen die Festigkeiten des Holzes. Mit steigender Holzfeuchtigkeit steigt die Bruchdehnung, wobei dieser Effekt bei hohen Temperaturen durch das Erweichen des Lignins noch verstärkt wird ("duktiler" Bruchverhalten). Bei einer Temperatur von 100°C kommt es zu einer Abnahme der Druckfestigkeit von ca. 50% und einer Abnahme der Zugfestigkeit von ca. 90% im Vergleich zur Druck- und Zugfestigkeit bei 20°C. Betreffend der Holzfeuchtigkeit kommt es im Bereich zwischen 8 - 18% zu einer Abnahme der Druckfestigkeit um ca. 6% und einer Abnahme der Zugfestigkeit um ca. 3% je 1% Holzfeuchtigkeitszunahme (Niemz 1993). Bei hoher Temperatur und niedriger Holzfeuchtigkeit, die bei Kammeröffnung nach der thermischen Modifikation des Holzes vorliegen, kann daher aufgrund der thermischen Modifikation, der hohen Temperatur und der geringen Holzfeuchtigkeit von einer geringen Festigkeit und einer geringen Bruchdehnung (sprödes Bruchverhalten) des Holzes ausgegangen werden. Im ungünstigsten Fall, wenn sich Spannungen aufgrund von Holzfeuchtigkeitsdifferenzen und Spannungen aufgrund von Temperaturdifferenzen überlagern und das selbe "Vorzeichen" haben, ist eine Schädigung der Holzstruktur durch zu rasches Abkühlen bzw. durch zu rasche Änderung der Holzfeuchtigkeit vor allem in radialer und tangentialer Holzrichtung aus theoretischer Sicht durchaus möglich.

9.2.2 Beschreibung der Untersuchung des Abkühlungsprozesses

Nach einer Konditionierungsphase des bereits thermisch behandelten Holzes in der Behandlungskammer über mehrere Stunden bei ca. 105°C in Sattendampf-atmosphäre wird die Behandlungskammer geöffnet und die weitere Abkühlung des Holzes findet unkontrolliert im Freien unter Umgebungsbedingungen statt. Untersucht wurde der Teilprozess der Abkühlung, welcher im Freien nach Kammeröffnung stattfindet. Für diese Untersuchung wurde eine Charge der Behandlungsintensität "forte" herangezogen. Um die Entwicklung von Temperatur und Feuchtigkeit der Bretter während der Abkühlung festzustellen, wurden Messungen sofort nach Kammeröffnung (im Weiteren als $t=0$ bezeichnet), 5 Stunden nach Kammeröffnung (im Weiteren als $t=5$ bezeichnet) und 24 Stunden nach Kammeröffnung (im Weiteren als $t=24$ bezeichnet) durchgeführt. Da die Feuchtigkeitsmessungen durch Probenentnahmen und Ermitteln der Holzfeuchtigkeiten mittels Darmmethode erfolgte, konnten nicht dieselben Bretter mehrmals zur Probenentnahme herangezogen werden. Daher wurden 3 unterschiedliche Stapel zur Probenentnahme herangezogen, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Diese Tatsache muss natürlich bei einem Vergleich der Messwerte ($t=0$, $t=5$, $t=24$) berücksichtigt werden. Des Weiteren wurden Bretter aus verschiedenen Brettpositionen im Stapel (siehe Abbildung 12) für die Messungen ausgewählt, um den Einfluss der Brettposition im Stapel zu untersuchen. Abbildung 11 zeigt die untersuchte Charge bei der Öffnung der Behandlungskammer bzw. die Position der Stapel, die untersucht wurden. Zur Abkühlung im Freien wurden die Stapel aus der Kammer gezogen (übliche Vorgangsweise des Unternehmens Mitteramskogler GmbH) und unkontrolliert unter Umgebungsbedingungen abgekühlt. Um alle drei untersuchten Stapel gleichen Abkühlungsbedingungen auszusetzen, wurden diese mit dem Stapler getrennt und nebeneinander aufgestellt. Zur Probenentnahme/Messung wurden die Stapel zum jeweiligen Messzeitpunkt auseinandergenommen. Da die Abkühlungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind, ...) von der Witterung abhängig sind, können die gemessenen Werte nicht als allgemein gültig angesehen, jedoch für eine Einschätzung herangezogen werden.



Abbildung 11: Brettstapel in der Behandlungskammer des Unternehmens Mitteramskogler GmbH, die für die Untersuchung des derzeitigen Abkühlungsprozesses herangezogen wurden

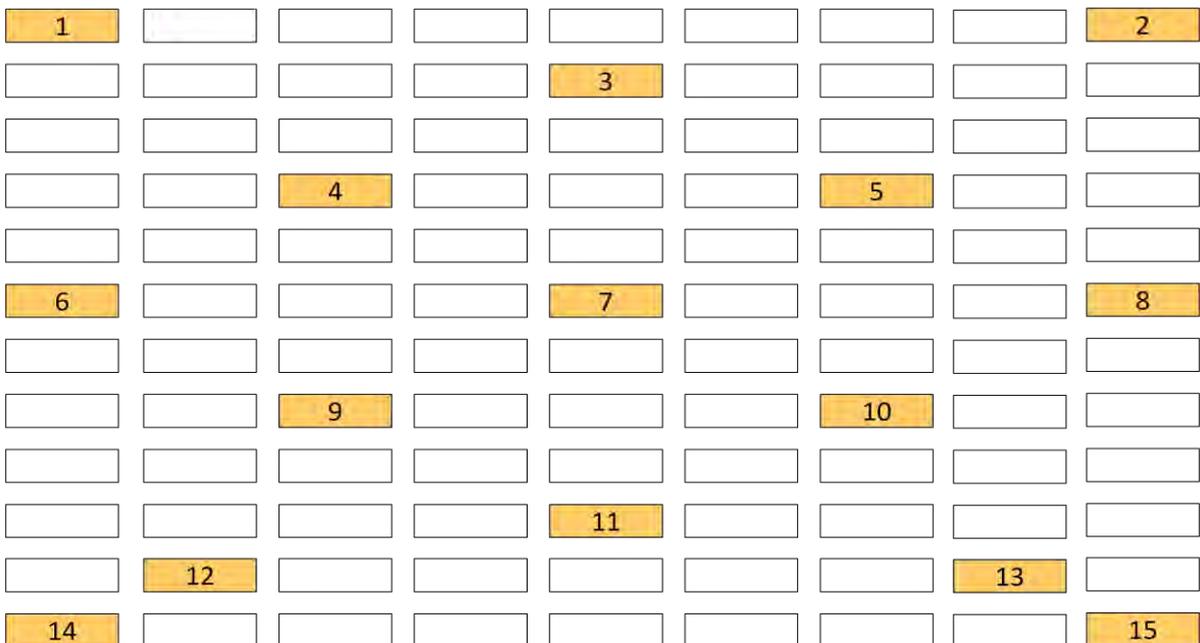


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines Brettstapels und Kennzeichnung der Bretter, die für die Probenentnahmen und Messungen herangezogen wurden

9.2.3 Beschreibung der durchgeführten Messungen

Bestimmen der Brettfeuchtigkeit am Brettrand und in Brettmitte

In Abbildung 13 sind die Stellen der Probenentnahmen für die Brettfeuchtigkeiten in der Mitte und am Rand des Brettes gekennzeichnet. Die Brettstapel wurden zu den jeweiligen Messzeitpunkten entstapelt, die Proben mit einer Kreissäge entnommen und in

Kunststoffbeutel verpackt, um eine Feuchtigkeitszunahme bzw. Feuchtigkeitsabnahme vor dem Abwiegen zu vermeiden. Die Proben wurden nach Beendigung der Probenentnahme noch vor Ort abgewogen. Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit wurde am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe in Tulln mittels Darrmethode vorgenommen. Die Probenentnahme erfolgte zu den Zeitpunkten $t=0$, $t=5$ und $t=24$ an folgenden Brettnummern: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 und 15 (siehe Abbildung 12).

Probengröße: Länge = 100mm, gesamte Brettbreite und Brettdicke.

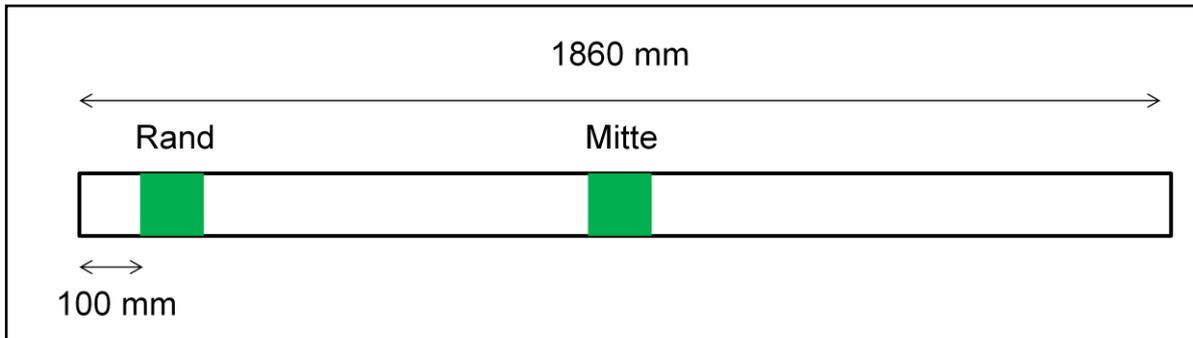


Abbildung 13: Stellen der Probenentnahmen an den Brettern für die Bestimmung der Brettfeuchtigkeiten

Bestimmen der Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite und Brettdicke

In Abbildung 14 sind die Stellen der Probenentnahmen für die Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile gekennzeichnet. Um die Holzfeuchtigkeit einzelner Holzschichten zu ermitteln und ein Profil erstellen zu können, wurden die entnommenen Probekörper mit einem Stemmeisen gespalten. In Abbildung 15 und Abbildung 16 ist die Aufspaltung der entnommenen Proben schematisch dargestellt. Die Probenentnahme erfolgte zu den Zeitpunkten $t=0$, $t=5$ und $t=24$ an folgenden Brettnummern: 1, 2, 4 und 7 (Stapelposition siehe Abbildung 12). Die Brettstapel wurden zu den jeweiligen Messzeitpunkten entstapelt und die Proben mit einer Kreissäge entnommen und in dichte Kunststoffbeutel verpackt, um eine Feuchtigkeitszunahme bzw. Feuchtigkeitsabnahme vor Spaltung der entnommenen Proben bzw. Abwiegung der einzelnen Holzschichten zu vermeiden. Die entnommenen Proben wurden nach Beendigung der Probenentnahme noch vor Ort so rasch wie möglich mit einem Stemmeisen in einzelne Schichten gespalten und abgewogen. Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit der einzelnen Schichten wurde am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe in Tulln mittels Darrmethode vorgenommen.

Probengröße für Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite:

Länge = 30mm, gesamte Brettbreite und Brettdicke.

Probengröße für Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettdicke:

Länge = 30mm, Breite=30mm, gesamte Brettdicke.

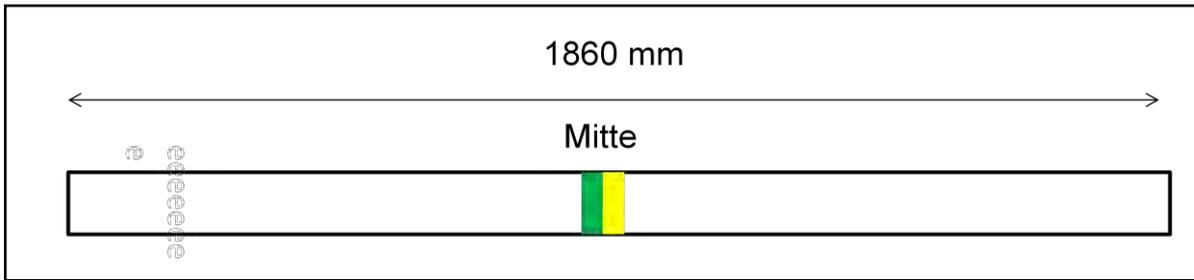


Abbildung 14: Stellen der Probenentnahmen an den Brettern für die Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile

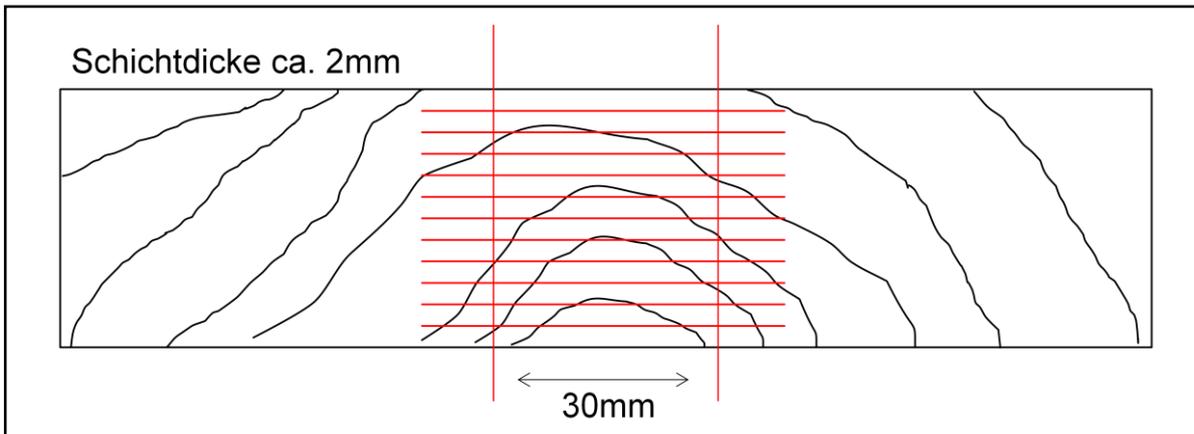


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettstärke

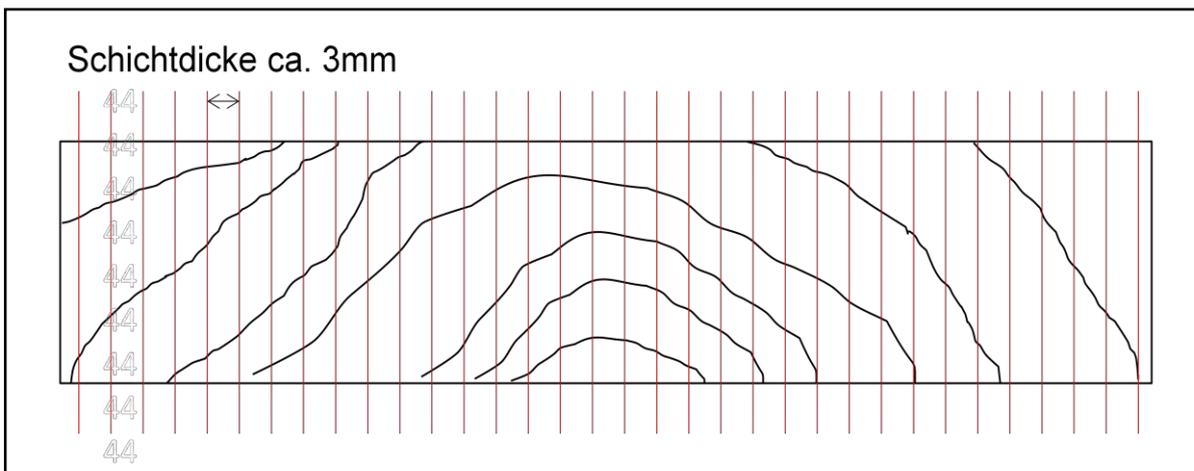


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Erstellung der Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite

Messen der Oberflächentemperatur

Um einen Eindruck davon zu erhalten, wie rasch die Bretter im Freien abkühlen bzw. ob sich die Abkühlungsgeschwindigkeit zwischen Brettern in Stapelmitte und Brettern am Stapelrand wesentlich unterscheidet, wurde die Oberflächentemperatur zu den Zeitpunkten $t=0$, $t=5$ und $t=24$ mit einem Infrarottemperaturmessgerät in Brettmitte und am Brettrand gemessen. Die Temperaturmessungen erfolgten an den selben Stellen und Brettern wie die Messung der Brettfeuchtigkeiten.

Bestimmen der Verschalung - Mittelschnitttest

In Abbildung 17 ist die Stelle der Probenentnahme für die Messung der Verschalung mittels Mittelschnitttests gekennzeichnet. Die Probenentnahme und Messung erfolgte nach ÖNORM EN 14464. Die Brettstapel wurden zu den Messzeitpunkten entstapelt und die Proben mit einer Kreissäge entnommen. Die Probenentnahme erfolgte zu den Zeitpunkten $t=0$, $t=5$ und $t=24$ an folgenden Brettnummern: 1, 2, 3, 4, 5 und 7 (Stapelposition siehe Abbildung 12).

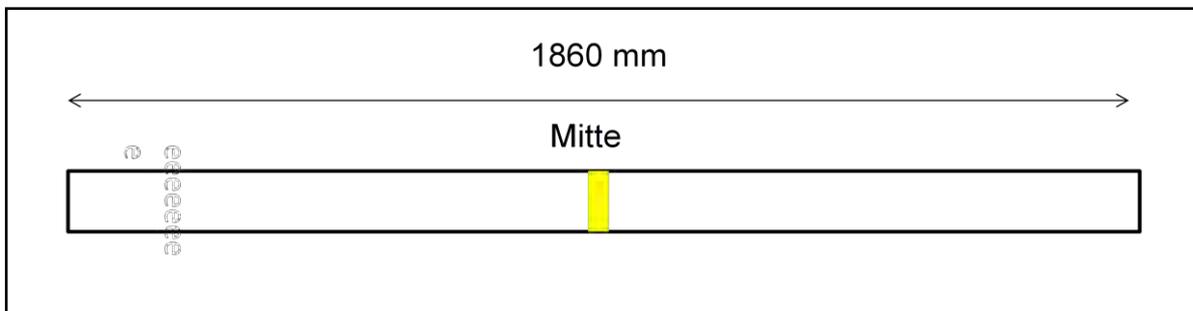


Abbildung 17: Stellen der Probenentnahme an den Brettern für den Mittelschnitttest

9.3 Untersuchung des Einflusses von Holz-, Brett- und Prozessmerkmalen auf die Bruchenergie und die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung

Um den Einfluss verschiedener Holz-, Brett- und Prozessmerkmale auf die Ergebnisse einer Bruchenergieprüfung und die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung zu untersuchen, wurden folgende Merkmale erhoben bzw. festgehalten:

- Behandlungsintensität (forte, mezzo-exterior)
- Abkühlungsbedingung (normal, schonend, rasch)
- Darrdichte [g/cm^3]
- Jahrringlage [$^\circ$]
- Frühholzanteil im Brett [%]
- durchschnittliche Jahrringbreite im Brett [mm]

Die Probenmerkmale Behandlungsintensität und Abkühlungsbedingung wurden bewusst variiert bzw. gesteuert (siehe Tabelle 4) und für den direkten Vergleich Gruppen gebildet. Die Probenmerkmale Darrdichte, Jahrringlage, Jahrringbreite und Frühholzanteil wurden nicht gesteuert und entsprechen daher einer Stichprobenentnahme. Die Verteilung dieser Merkmale in den Gruppen wird im Abschnitt 10.2 näher betrachtet. Die Probenentnahme bzw. die Erhebung der Brettmerkmale erfolgte an Brettern mit einer Länge von 800mm. Die Lage der Probenentnahmen in den Brettern ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Um Randeffekte zu vermeiden, die z. B. während der Trocknung, thermischen Behandlung und Abkühlung auftreten können, wurde vor der Probenentnahme an den Rändern 200mm weggeschnitten und die Bretter auf einen einheitlichen Querschnitt von 26mm x 100mm ausgehobelt.

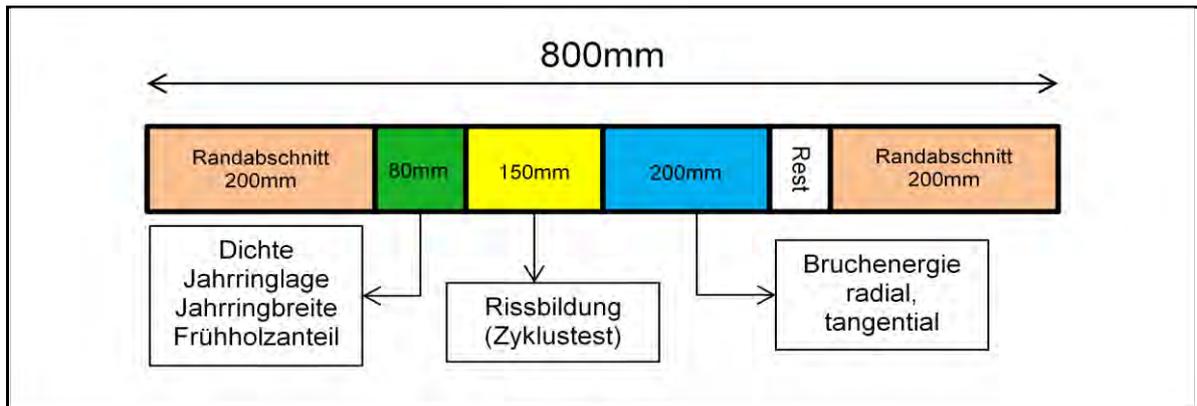


Abbildung 18: Stellen der Probenentnahmen für Holzmerkmale, Rissbildung und Bruchenergie

9.3.1 Erhebung der Darrdichte

Um die Darrdichte der Bretter zu erheben, wurden Proben mit einer Länge von 80mm aus den Brettern entnommen (siehe Abbildung 18). Die Proben wurden bis zur Massekonstante bei 103°C +/- 2°C im Darrofen getrocknet und abgewogen. Danach erfolgte die Vermessung der Probekörper mittels digitaler Schiebelehre und die Berechnung der Darrdichte nach Formel 1.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Formel 1: Berechnung der Darrdichte

ρ_0	Darrdichte [g/cm ³]
m_0	Masse im Darrzustand [g]
V_0	Volumen im Darrzustand [cm ³]

9.3.2 Erhebung des Frühholzanteils

Die Erhebung des Frühholzanteils erfolgte unter dem Mikroskop mit Hilfe eines computerunterstützten Messstreckenaufnehmers. In Abbildung 19 ist ein Beispiel dargestellt. Bei der Streckenmessung wurde auf einen rechten Winkel zur Jahrringlage geachtet. Es wurde die gesamte Brettbreite vermessen. Da es sich bei Eschenholz um eine ringporige Holzart handelt, waren die Grenzen zwischen Früh- und Spätholz in den meisten Fällen sehr einfach zu erkennen. Die Berechnung des Frühholzanteils erfolgte nach Formel 2.



Abbildung 19: Erhebung des Frühholzanteils unter dem Mikroskop

$$\mathbf{Fha} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{l}} * 100$$

Formel 2: Berechnung des Frühholzanteils

Fha	Frühholzanteil [%]
a	Messstrecke Frühholz [mm]
l	Gesamtmessstrecke [mm]

9.3.3 Erhebung der durchschnittlichen Jahrringbreite

Die Erhebung der durchschnittlichen Jahrringbreite im Brett erfolgte unter dem Mikroskop im Zuge der Ermittlung des Frühholzanteils. Es wurde die gesamte Brettbreite vermessen. Bei der Streckenmessung wurde auf einen rechten Winkel zur Jahrringlage geachtet. Die Berechnung der durchschnittlichen Jahrringbreite erfolgte mit Formel 3.

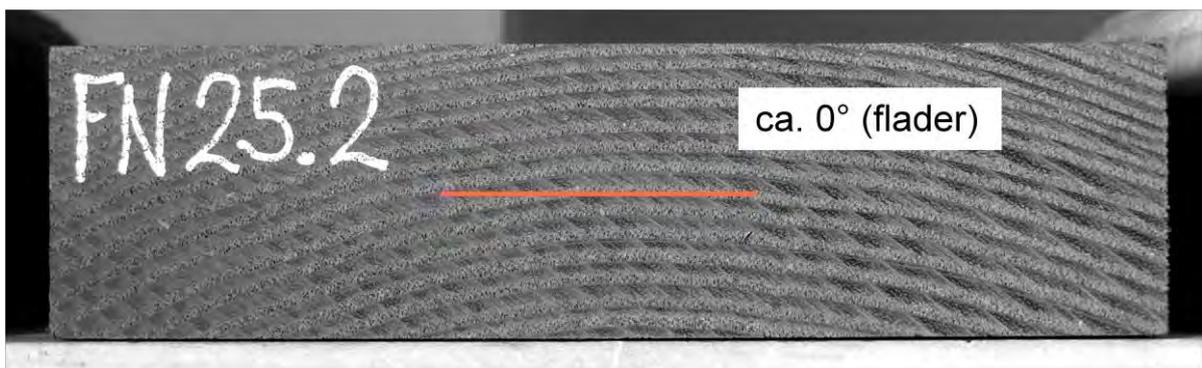
$$\mathbf{Jb} = \frac{\mathbf{l}}{\mathbf{Ja}}$$

Formel 3: Berechnung der durchschnittlichen Jahrringbreite

Jb	durchschnittliche Jahrringbreite [mm]
l	Gesamtmessstrecke [mm]
Ja	Jahrringanzahl [1]

9.3.4 Erhebung der durchschnittlichen Jahrringlage

Die Erhebung der durchschnittlichen Jahrringlage erfolgte durch Messen der Jahrringlage in Grad [°] wobei 0° liegende Jahrringe und 90° stehende Jahrringe im Brett bedeuten. Da die Jahrringlage selten über den Brettquerschnitt gleich ist, wurde ein durchschnittlicher Wert ca. in Brettmitte gemessen. In Abbildung 20 sind Beispiele dargestellt. Zur Verwendung dieses Merkmals in der multiplen linearen Regressionsanalyse wurden die Bretter in 3 Gruppen eingeteilt. <29° = flader, 30°-79° = halbrift, >79 = rift.



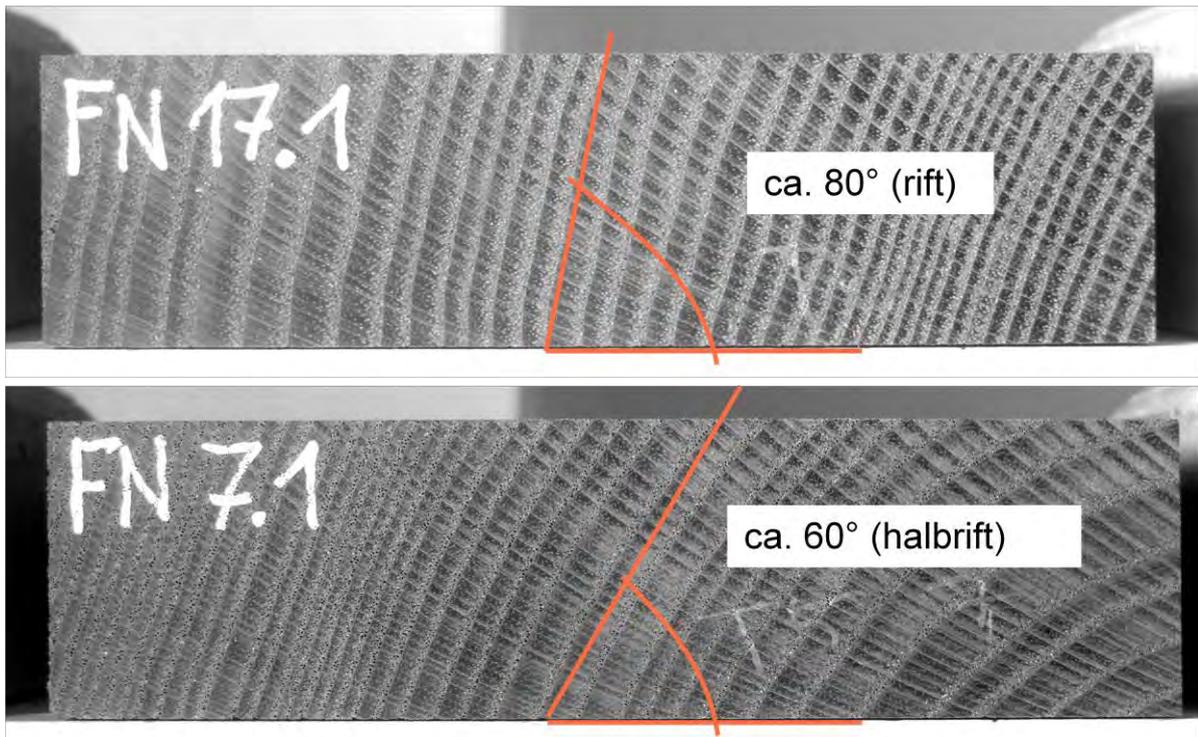


Abbildung 20: Messen der durchschnittlichen Jahrringlage im Brett

9.3.5 Bruchenergieprüfung

Um den Einfluss verschiedener Holz-, Brett- und Prozessmerkmale auf einen Materialkennwert zu untersuchen, der die strukturelle Festigkeit des Holzes beschreibt, wurden Bruchenergieproben hergestellt und unter Modus I Belastung (Zugbeanspruchung rechtwinklig zu Faser) geprüft. Experimentelle Versuche zu Bruchenergieprüfungen an Massivholzproben und deren Durchführung wurden z. B. von Stanzi-Tschegg et al. (1995), Stanzi-Tschegg (2006), Beikircher (2009), Majano-Majano et al. (2012), Pleschberger et al. (2013a) und Pleschberger et al. (2013b) beschrieben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bruchenergieprüfungen wurden nach dem von Pleschberger et al. (2013a) beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Die genauen Abmessungen der Probekörper sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Kerbe zur Risseinleitung wurde mit einem spitz zulaufenden Fräser eingefräst. Betrachtet man den inhomogenen Aufbau von Massivholz, so hat die verwendete Probengeometrie den Vorteil, dass eine relativ große Fläche geprüft werden kann. Durch die relativ große Prüffläche können Effekte aufgrund der Probengröße weitgehend vermieden werden (Pleschberger et al. 2013a). Der Einfluss der Probengröße auf die gemessenen Bruchenergiewerte wurde von Stanzi-Tschegg et al. (1995) untersucht. In den Arbeiten von Pleschberger et al. (2013a) und Pleschberger et al. (2013b) wurde die Veränderung der Bruchenergie bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen von Massivholz untersucht. In diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Bruchenergieprüfung eine sehr sensitive Methode darstellt, um eine Schädigung der Holzstruktur und eine damit einhergehende Festigkeitsminderung abzubilden. Es konnte gezeigt werden, dass sich unterschiedliche Trocknungsbedingungen auch in den gemessenen Bruchenergiewerten widerspiegeln. Daher wird die Bruchenergieprüfung auch in dieser Arbeit verwendet, mit dem Ziel, mögliche Unterschiede bzw. Schädigungen der Holzstruktur aufgrund von unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen festzustellen. Des Weiteren wird auch der Einfluss der Behandlungsintensität, der Dichte, der Jahrringlage im Brett, der durchschnittlichen Jahrringbreite im Brett, des Frühholzanteils im Brett und der anatomischen Holzrichtung (radial, tangential) mit Hilfe einer multiplen linearen Regressionsanalyse untersucht. Für die Untersuchungen wurden Probekörper für die Prüfung in radialer Prüfrichtung (RL-Rissausbreitung) und tangentialer Prüfrichtung (TL-

Rissausbreitung) hergestellt (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). Um eine exakte Jahrringlage in den Probekörpern zu erreichen, wurde die Probenentnahme an die Jahrringlage im Brett angepasst (siehe Abbildung 22). Aus jedem Brett wurde eine Probe für die Rissausbreitung in RL- und TL-Richtung hergestellt. Vor der Prüfung wurden die Probekörper bis zur Massekonstante im Klimaraum bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit gelagert und die Probenabmessungen für spätere Berechnungen aufgenommen. Die Bruchenergieprüfungen wurden mit einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell Z020) durchgeführt. Die Steuerung der Prüfung und die Aufnahme der Messwerte erfolgte mit der Prüfungssoftware testXpert V11.0. Ausgewertet wurden die maximale Prüfkraft (F_{max}), die Energie, die bis F_{max} erforderlich ist (W bis F_{max}) und die Energie, die bis zur vollkommenen Spaltung des Probekörpers notwendig ist (Gesamtbruchenergie W_{Gesamt}). Vor der eigentlichen Prüfung wurde eine Vorkraft von 20 N angebracht. Nach Anbringen der Vorkraft wurde die Prüfung mit einer anfänglichen Prüfgeschwindigkeit von 1mm/min gestartet. Nach einem Kraftabfall von 50% der maximalen Prüfkraft wurde die Prüfgeschwindigkeit progressiv auf 10 mm/min erhöht. Die Prüfung wurde nach einer zurückgelegten Wegstrecke von maximal 50mm oder einer geringeren Prüfkraft als 5N beendet. Die maximale Prüfkraft (F_{max}) kann als Festigkeitswert angesehen werden. Die Energie, die bis F_{max} erforderlich ist (W bis F_{max}), entspricht derjenigen Energie, die bis zur Risseinleitung erforderlich ist (elastische + plastische Deformationen). Die Gesamtbruchenergie (W_{Gesamt}) entspricht der gesamten Energie, die während der Prüfung zur Spaltung des Probekörpers aufgewendet werden muss. Zur Auswertung wurde die spezifische Bruchenergie (G_f) berechnet, die der Gesamtbruchenergie (W_{Gesamt}) dividiert durch die Fläche (A) entspricht (siehe Formel 4). Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Fläche (A), die durch die Probengeometrie ermittelt wurde, nicht exakt der tatsächlichen Bruchfläche entspricht. Die Ermittlung der tatsächlichen Bruchfläche wäre sinnvoll, jedoch ist der Aufwand sehr hoch und daher wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet. Dieser Umstand führt natürlich zu einer gewissen Verzerrung der Ergebnisse. Probekörper, bei welchen der Bruch aufgrund der Faserabweichung vorzeitig erfolgte, wurden bei der Auswertung der Ergebnisse ausgeschieden.

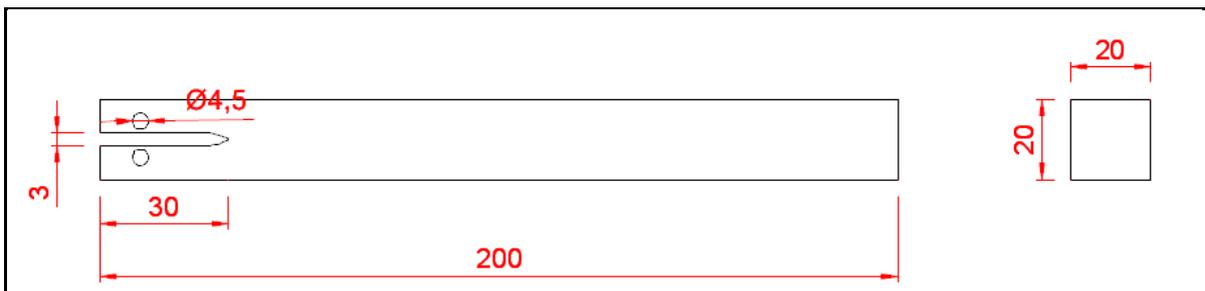


Abbildung 21: Geometrie der Bruchenergieproben (Abmessungen in mm)

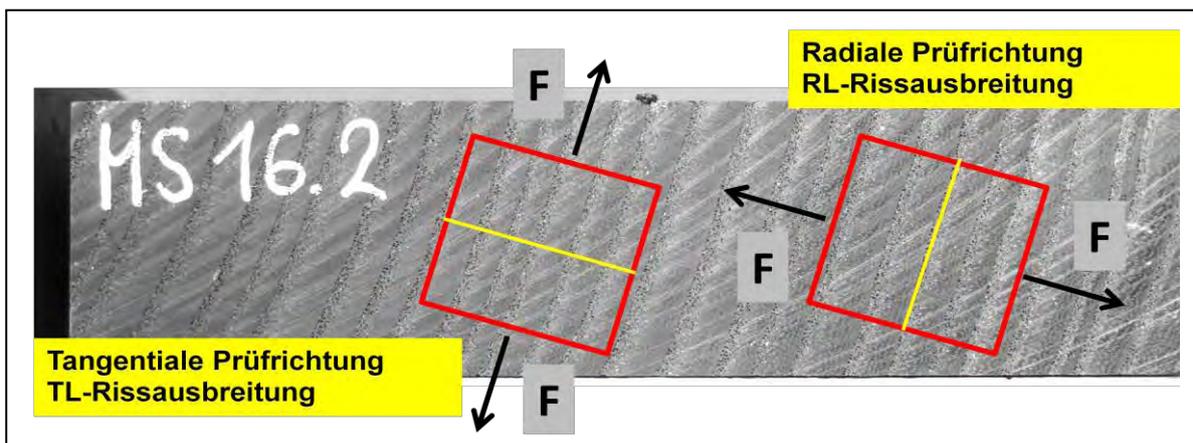


Abbildung 22: Anpassung der Probenentnahme an die Jahrringlage im Brett

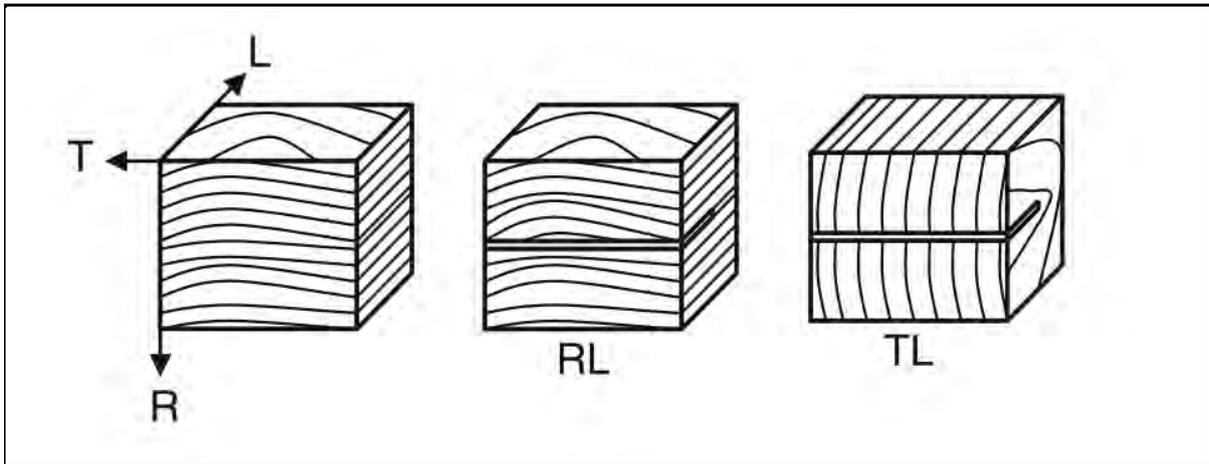


Abbildung 23: Anatomische Holzrichtungen (L längs, R radial, T tangential) und untersuchte Rissausbreitungen (RL radial/längs, TL tangential/längs) (Pleschberger et al. 2013a)

$$G_f = \frac{1}{A} \int_0^{\delta_{\max}} F(\delta) d(\delta)$$

Formel 4: Berechnung der spezifischen Bruchenergie

- G_f Spezifische Bruchenergie [J/m²]
- A Bruchfläche [m²] (ermittelt durch Probengeometrie)
- F Prüfkraft [N]
- d zurückgelegter Weg [m]
- δ Differenzialquotient

In Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 ist die verwendete Einspannvorrichtung und der Probekörper im Verlauf der Prüfung abgebildet. In Abbildung 27 ist der typische Verlauf der Prüfung in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt.



Abbildung 24: Probekörper in der Prüfmaschine vor der Prüfung



Abbildung 25: Probekörper in der Prüfmaschine während der Prüfung



Abbildung 26: Probekörper in der Prüfmaschine nach der Prüfung

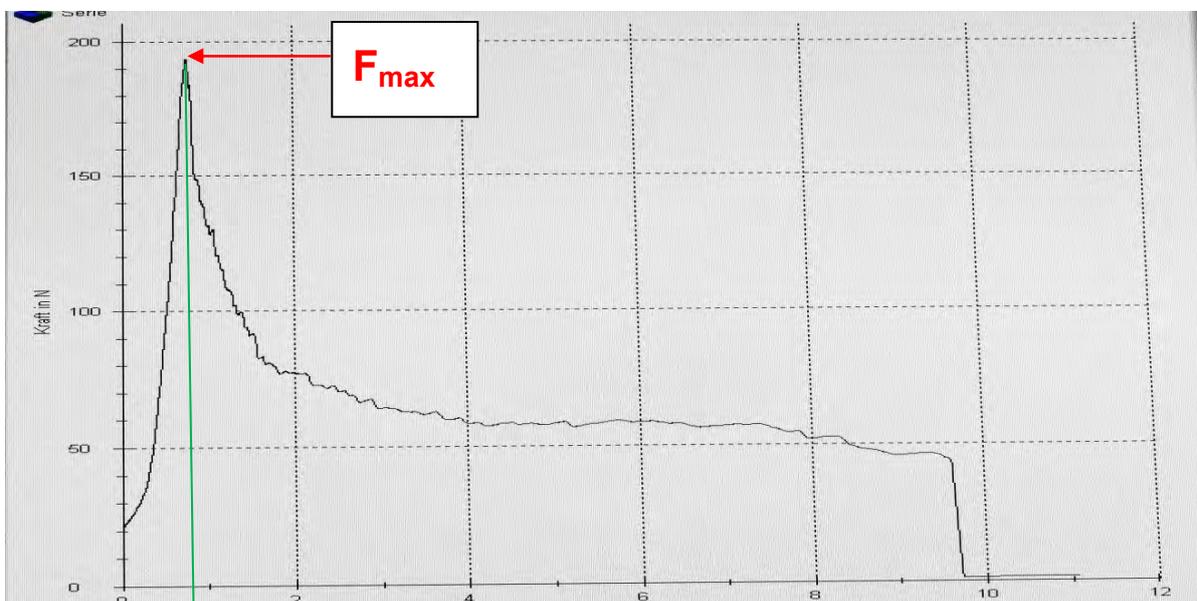


Abbildung 27: Kraft-Weg Diagramm einer Bruchenergieprüfung (y-Achse Kraft [N], x-Achse Weg [mm])

9.3.6 Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung

Um den Einfluss verschiedener Holz-, Brett- und Prozessmerkmale auf die Rissbildung bei Bewitterung zu untersuchen, wurden Probekörper in einem dreistufigen Zyklus in Anlehnung an ÖNORM EN 321 behandelt. Abweichungen von der Norm: Probengröße, pH-Wert und Temperatur während der Wasserlagerung wurden nicht kontrolliert. Die Ergebnisse sollen zur Einschätzung des Verhaltens der Bretter bei Bewitterung dienen. Für diese Untersuchung wurden Probekörper mit einer Abmessung von 150mm x 100mm x 26mm (LxBxD) verwendet. Insgesamt wurden die Probekörper drei Zyklen ausgesetzt. Nach jedem Zyklus erfolgte die Messung der absoluten Risslänge in axialer, radialer und tangentialer Holzrichtung. Zur Vermessung der Risslängen wurden die Stirnflächen und die breiteren Längsflächen der Probekörper mit einer Digitalkamera fotografiert und die Risslängen mit einer Computersoftware vermessen. Risse, die bereits vor dem 1. Zyklus an den Probekörpern vorhanden waren, wurden abgezogen, um nur Risslängen zu messen, die durch die Zyklusbehandlung entstanden sind. Die makroskopisch erkennbaren Risse vor dem 1. Zyklus waren jedoch sehr gering. Die Probekörper wurden drei Zyklen ausgesetzt, wobei ein Zyklus aus folgenden Behandlungsschritten besteht:

1. 72 Stunden Wasserlagerung
2. 24 Stunden Gefrierraum (ca. -20°C)
3. 72 Stunden Trockenschrank bei 70°C

Vor und nach jedem Zyklus erfolgte eine 14-tägige Lagerung im Klimaraum bei 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit. Die Wasserlagerung erfolgte in Kunststoffbehältern, wobei die Probekörper stehend mit einem Abstand von ca. 30mm aufgestellt und mit Steinen beschwert wurden (siehe Abbildung 28). Das verwendete Wasser wurde aus der Wasserleitung des Instituts für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe entnommen. Nach der 72-stündigen Wasserlagerung wurde das Wasser aus den Behältern entleert und die Behälter samt Probekörper in den Gefrierraum gestellt. Nach 24 Stunden im Gefrierraum wurden die Probekörper aus den Behältern entnommen und für 72 Stunden in einen Darrofen gestellt (siehe Abbildung 29). Direkt nach der Entnahme der Probekörper aus dem Darrofen erfolgte die Aufnahme der Bilder, die für die Risslängenmessungen herangezogen wurden. Da die Aufnahme der Bilder der gesamten Proben für die Risslängenmessungen insgesamt ca. 4 Stunden benötigte, konnten nicht alle Bilder zum selben Zeitpunkt aufgenommen werden. Dadurch waren manche Proben bis zu 4 Stunden länger im Darrofen. Jedoch ist auch nach einer längeren Trocknung als 72 Stunden im Darrofen keine Veränderung der Risslängen messbar (Proben sind nach 72 Stunden im Darrofen darrtrocken). Dies wurde anhand von 20 Proben, die sowohl nach 72 Stunden und auch nach 80 Stunden gemessen wurden, kontrolliert. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen die Aufnahme des Querschnittes 2 der Probennummer 24 der Behandlungsintensität "mezzo-exterior" nach dem 3. Zyklus. In Abbildung 30 und Abbildung 31 sind sowohl radiale Risse, aber auch tangentielle Risse deutlich zu erkennen. Radiale Risse verlaufen senkrecht zur Jahrringlage und tangentielle Risse verlaufen parallel zur Jahrringlage. In Abbildung 32 und Abbildung 33 ist eine Längsfläche der selben Probe abgebildet. In Tabelle 10 sind die Risslängenmessungen der einzelnen Risse für diese Probe als Beispiel dargestellt.



Abbildung 28: Wasserlagerung der Probekörper



Abbildung 29: Probekörper im Darrschrank

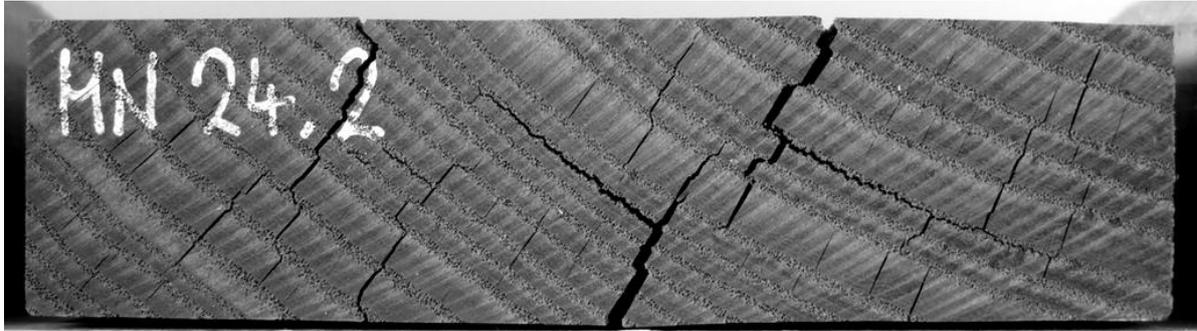


Abbildung 30: Rissbildung an einem Querschnitt

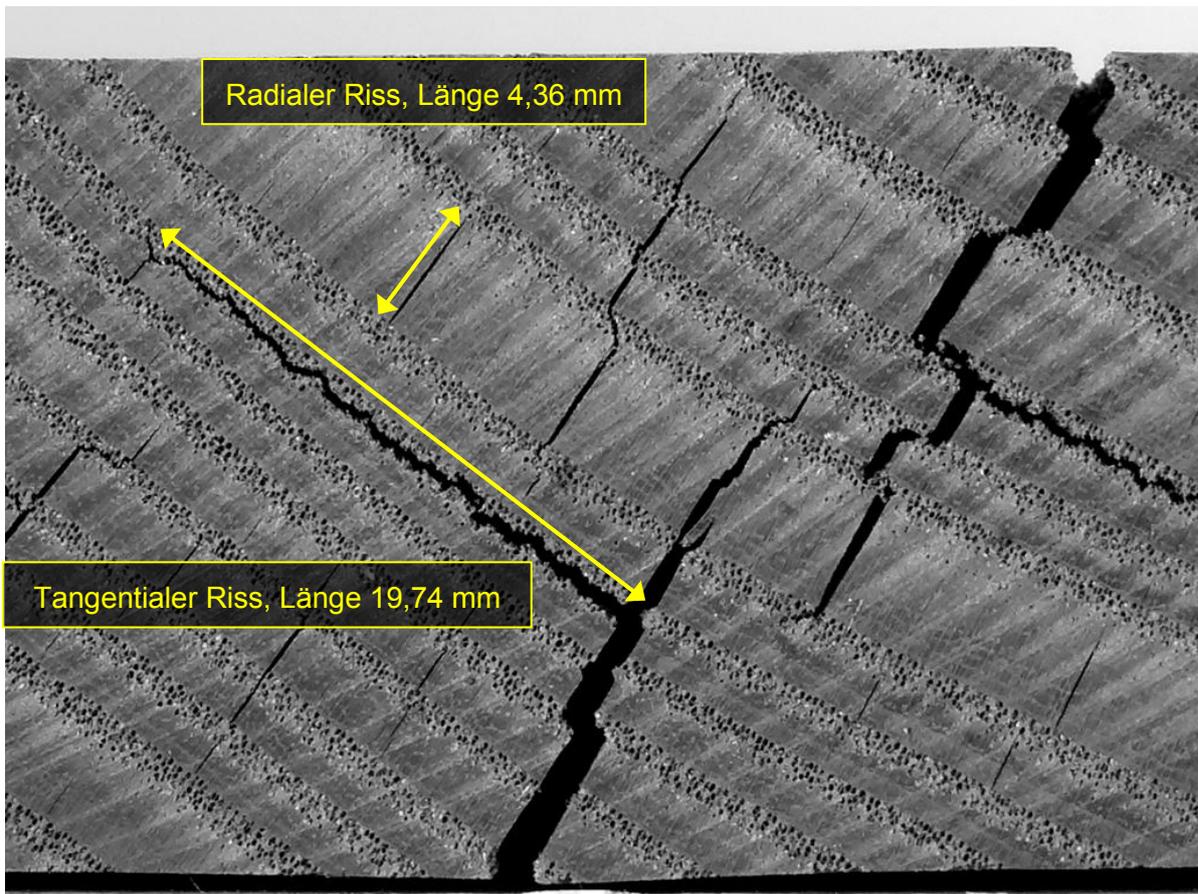


Abbildung 31: Vermessung der radialen und tangentialen Risse an den Querschnitten

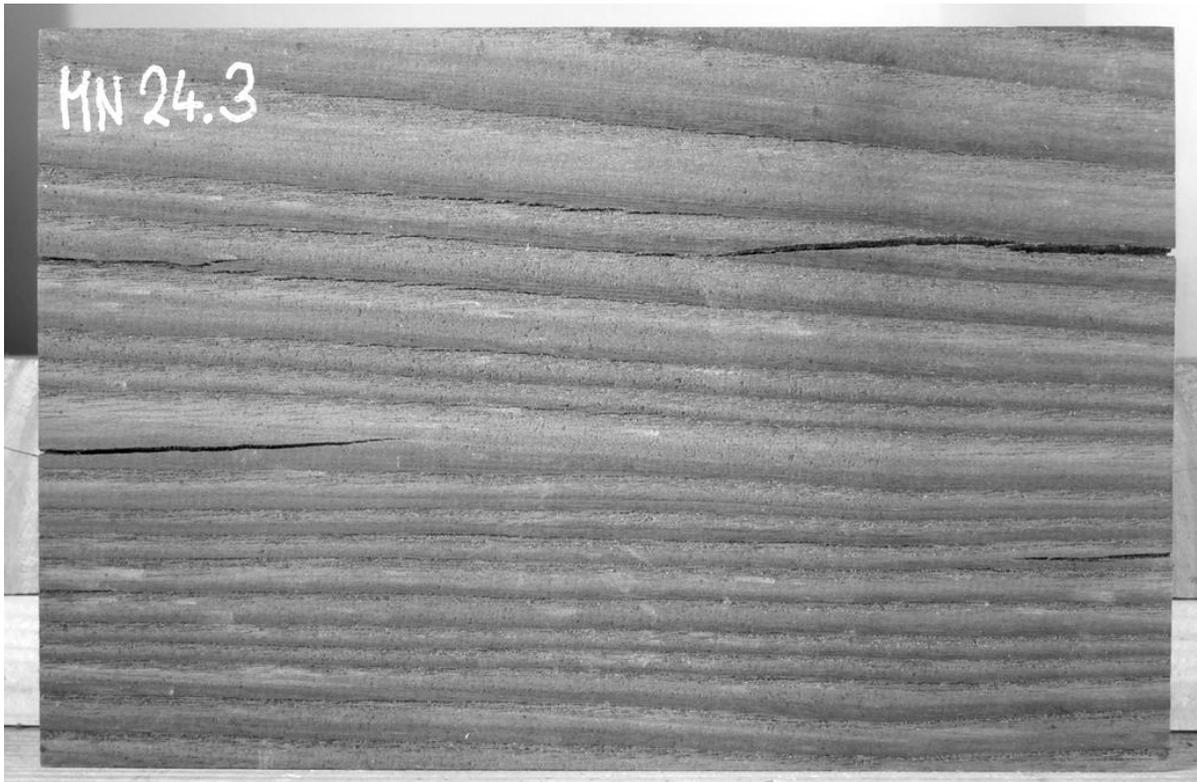


Abbildung 32: Rissbildung an einer Längsfläche

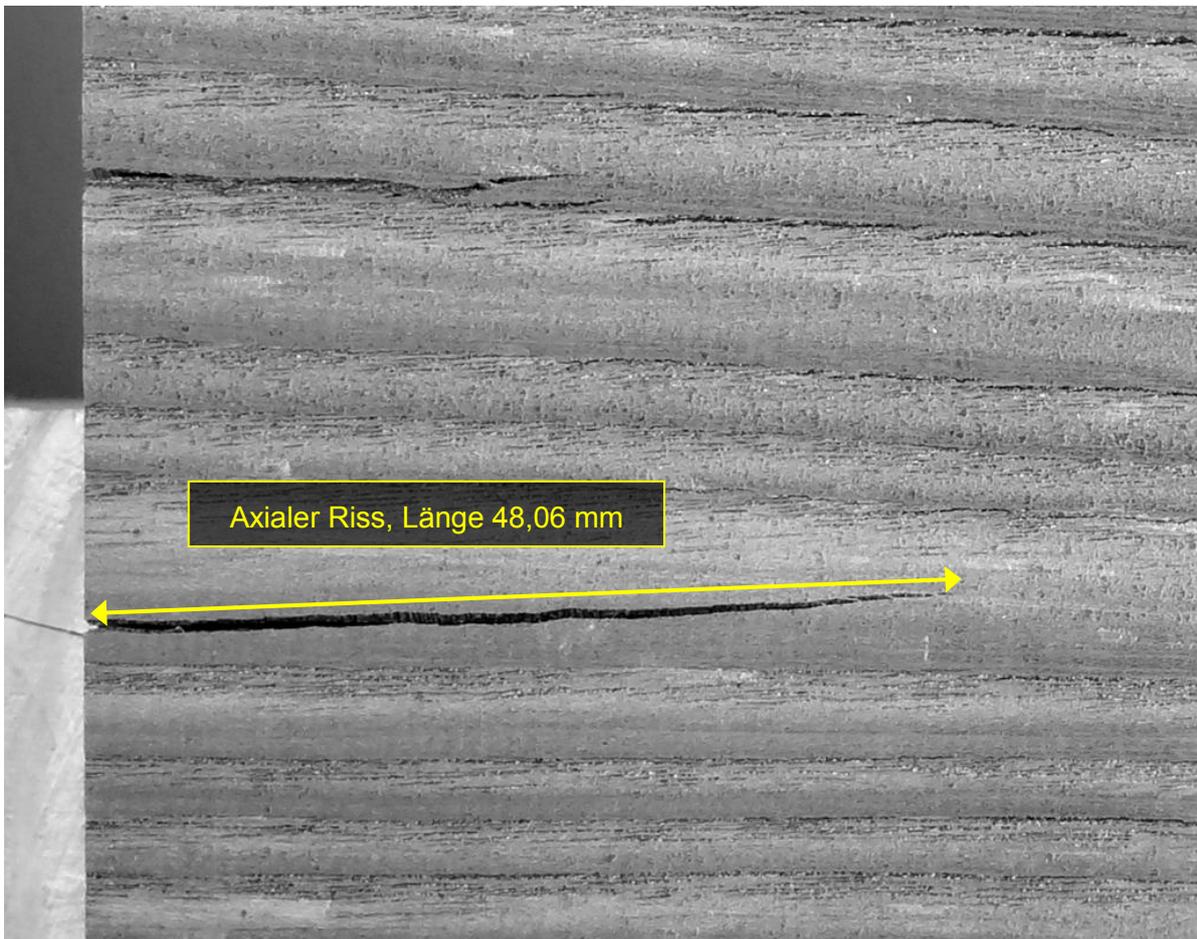


Abbildung 33: Vermessung der axialen Risse an den Längsflächen

Tabelle 10: Beispiel für das Ergebnis der Risslängenmessungen einer Probe

Probennummer	MN24	Zyklus 3				
Nr.	Radialrr. Q1	Radialrr. Q2	Tangentialr. Q1	Tangentialr. Q2	Axialr. S1	Axialr. S2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	4,87	5,05	7,27	4,53	29,86	110,81
2	1,71	3,84	2,63	3,54	6,17	29,54
3	2,49	2,22	2,62	1,59	60,44	76,88
4	4,34	2,26	16,34	5,13	62,34	
5	5,93	5,14	8,06	2,01	50,98	
6	5,89	11,59	20,91	6,7	61,35	
7	2,15	5,23	2,78	2,21	89,98	
8	2,46	4,3	2,7	20,99	26,59	
9	1,97	1,47	20,64	1,99	11,67	
10	4,45	1,65	2,5	29,34	51,19	
11	2,25	1,13	7,35	2,96	14,75	
12	16,82	3,26		2,23	23,03	
13	9,64	10,6			42,66	
14	20,35	3,44				
15	2,9	3,46				
16	1,84	14,5				
17	2,84	0,83				
18	1,66	0,55				
19	1,62	1,59				
20	3,18	1,31				
21	2,64	1,74				
22	8,62	1,54				
23	7,92	1,83				
24	1,4	8,57				
25	2,88	2,16				
26	4,4	4,03				
27	2,64	2,1				
28	2,12	1,71				
29	6,35	1,4				
30	2,83	3,89				
31	3,7	1,11				
32	3,28	7,9				
33	5,05	5,74				
34	1,85	4,22				
35	1,01	14,79				
36	3,27	18,75				
37	2,2	2,24				
38	1,53	2,02				
39	1,62	1,46				
40	1,83	3,04				
41	1,07	2,16				
42	2,73	4				
43	7,03	5,13				
44	3,89	4,57				
45	14,7	9,47				
46	2,33	1,53				
47	5,5	9,18				
48	5,19	2,39				
49	5,4	5,46				
50	6,55	16,38				
51	2,13	1,72				
52	1,48	1,96				
53	4,01	2,42				
54	18,95	4,27				
55	3,28	8,48				
56	3,09	9,49				
57	2,83	11,14				
58	9,95					
59	3,44					
	Summe Radialrisse [mm]	Summe Tangentialrisse [mm]	Summe Axialrisse [mm]			
	543,46	177,02	748,24			

9.4 Verwendete Software

Für die statistische Auswertung und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Box-Plots wurde die Statistiksoftware SPSS 21 verwendet. Für die Darstellung der Ergebnisse in Form von Diagrammen wurde Excel 2007 verwendet.

9.5 Box-Plots als Darstellungsform - eine Einführung

Da viele deskriptive Ergebnisse in Form von Box-Plots dargestellt werden, wird hier eine allgemeine Einführung in Aufbau und Interpretation gegeben.

Der Box-Plot ist ein Diagramm, das zur grafischen Darstellung der Verteilung kardinalskalierteter Daten verwendet wird. Mit Hilfe eines Box-Plots kann schnell ein Eindruck darüber vermittelt werden, in welchem Bereich die Daten liegen und wie diese über den Datenbereich verteilt sind. Deshalb werden alle Werte der sogenannten Fünf-Punkte-Zusammenfassung, also der Median, die zwei Quartile und die beiden Extremwerte, dargestellt (siehe Tabelle 11 und Abbildung 34).

Aufbau

Ein Box-Plot besteht immer aus einem Rechteck, genannt Box, und zwei Linien, die dieses Rechteck verlängern. Diese Linien werden als Antennen oder Whisker bezeichnet und werden durch einen Strich abgeschlossen. Der Strich in der Box repräsentiert den Median der Verteilung.

Box

Die Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Sie wird also durch das obere und das untere Quartil begrenzt. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand. Dieser ist ein Maß der Streuung der Daten, welches durch die Differenz des oberen und unteren Quartils bestimmt wird. Des Weiteren wird der Median als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Dieser Strich teilt das gesamte Diagramm in zwei Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen. Durch seine Lage innerhalb der Box bekommt man also einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung. Ist der Median im oberen oder unteren Teil der Box, so ist die Verteilung rechtsschief oder linksschief.

Antenne

Durch die Antennen (Whisker) werden die außerhalb der Box liegenden Werte dargestellt. Die Antenne endet jeweils beim minimalen bzw. maximalen Wert, sofern dieser Wert aufgrund seiner Lage nicht als Ausreißer behandelt wird.

Ausreißer

Werte, die zwischen dem 1,5-fachen und dem 3-fachen des Interquartilsabstandes vom Median entfernt liegen, werden als "milde" Ausreißer bezeichnet und sind in den Diagrammen als Kreise dargestellt. Werte, die über dem 3-fachen des Interquartilsabstandes liegen, werden als "extreme" Ausreißer bezeichnet und sind in den Diagrammen als Sterne dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht der Kennwerte eines Box-Plot

Kennwert	Beschreibung	Lage im Boxplot
Minimum	Kleinster Datenwert des Datensatzes	Ende eines Whiskers oder entferntester Ausreißer
Unteres Quartil	Die kleinsten 25 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	Beginn der Box
Median	Die kleinsten 50 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	Strich innerhalb der Box
Oberes Quartil	Die kleinsten 75 % der Datenwerte sind kleiner oder gleich diesem Kennwert	Ende der Box
Maximum	Größter Datenwert des Datensatzes	Ende eines Whiskers oder entferntester Ausreißer
Spannweite	Gesamter Wertebereich des Datensatzes	Länge des gesamten Box-Plots (inklusive Ausreißer)
Interquartilsabstand	Wertebereich, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden	Ausdehnung der Box
Milder Ausreißer	Wert liegt innerhalb des 1,5-fachen bis 3-fachen Interquartilsabstandes	Darstellung als Kreis
Extremer Ausreißer	Wert liegt außerhalb des 3-fachen Interquartilsabstandes	Darstellung als Stern

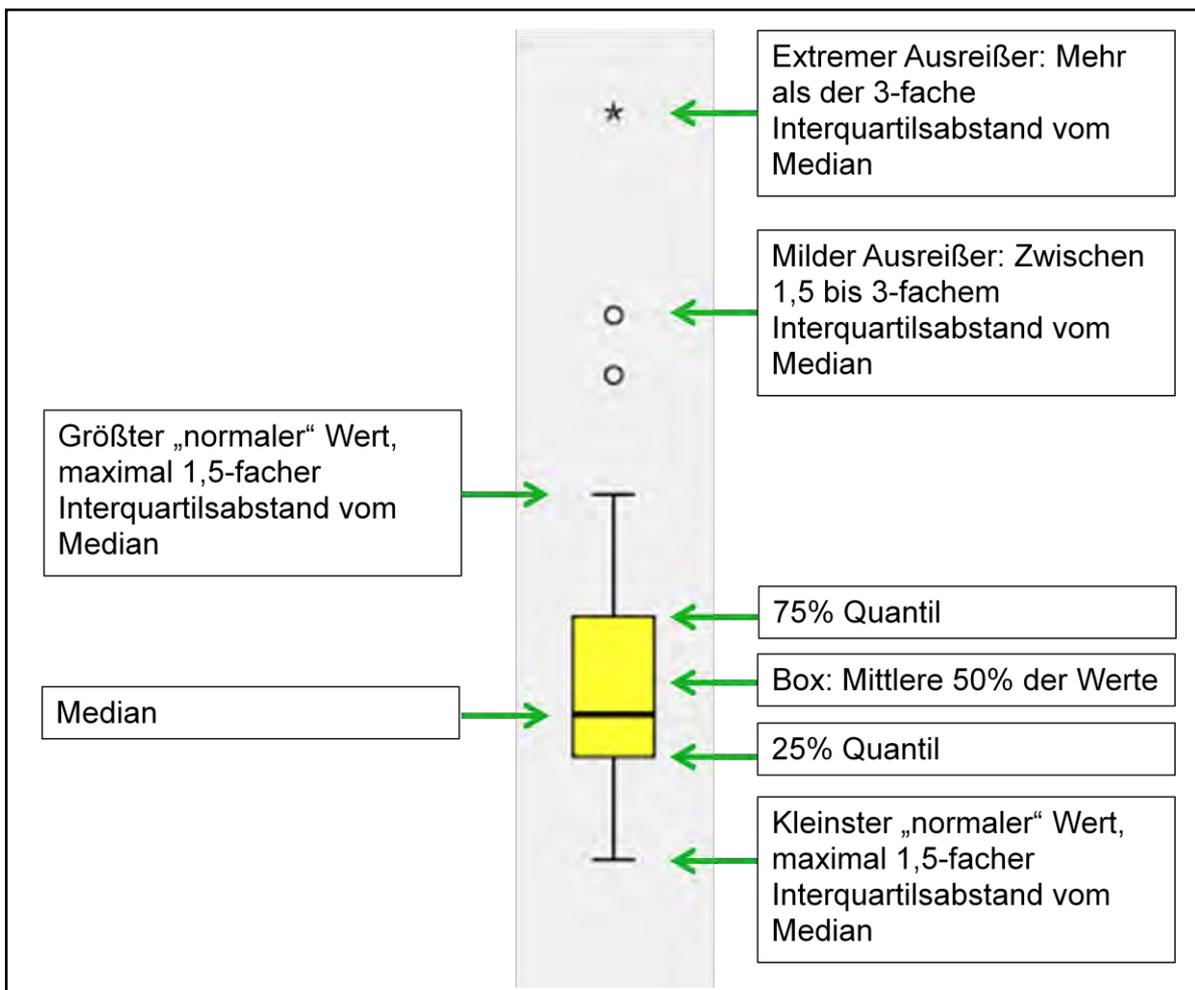


Abbildung 34: Erklärung Box-Plot

9.6 Multiple Regressionsanalyse - eine Einführung

Da die Auswertung zur Bruchenergieprüfung und zur Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung mit einer multiplen linearen Regressionsanalyse erfolgt, werden nachstehend einige wichtige Begriffe vereinfacht erklärt. Die multiple lineare Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren mit dem Ziel, eine Beziehung zwischen einer abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen herzustellen. In dieser Arbeit stellen die Werte aus der Bruchenergieprüfung bzw. die gemessenen Risslängen die abhängige Variable dar. Diese sollen durch die unabhängigen Variablen Dichte, Jahrringbreite, Frühholzanteil, Jahrringlage, Abkühlungsbedingung und Behandlungsintensität erklärt werden.

Allgemeine Form einer multiplen linearen Regression

$$y_i = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_i \cdot x_i + \dots + e_i$$

y_i	.....	abhängige Variable
a	.....	Regressionskonstante
b_{1-i}	.....	nicht standardisierte Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variable
x_{1-i}	.....	unabhängige Variable
e_i	.....	Residuum (nicht erklärter Anteil)

Referenzgruppe

Um nominalskalierte Variablen in die multiple lineare Regressionsanalyse aufnehmen zu können, ist es notwendig eine Referenzgruppe zu wählen. Zum Beispiel wird in dieser Arbeit die Variable Jahrringlage (flader, halbrift, rift) als nominale Variable behandelt. In den Regressionsanalysen stellt die Jahrringlage "halbrift" die Referenzgruppe dar und der Einfluss der Jahrringlagen "flader" und "rift" wird im Modell dargestellt.

Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der multiplen linearen Regressionsanalyse ist ein Maß für den erklärten Anteil der Varianz einer abhängigen Variable durch das aufgestellte Modell. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. 1 bedeutet vollständige Erklärung der Varianz der abhängigen Variable durch die unabhängigen Variablen.

Nicht standardisierte Regressionskoeffizienten

Der Einfluss einer unabhängigen Variable auf die abhängige Variable wird in der mathematischen Gleichung einer multiplen linearen Regression durch die Regressionskoeffizienten ausgedrückt. Nicht standardisiert bedeutet, dass der Koeffizient mit der Maßeinheit der unabhängigen Variable verknüpft ist. Daher kann die Größe des Einflusses der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable nicht direkt von den nicht standardisierten Koeffizienten abgelesen werden.

Standardisierte Regressionskoeffizienten

Um die Größe des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable bewerten zu können ist es notwendig, den Regressionskoeffizienten zu standardisieren. Für seine Berechnung werden die Werte der abhängigen und der unabhängigen Variablen zunächst standardisiert. Alle Variablen haben nach der Transformation den Mittelwert '0' und die Standardabweichung '1', die Skalenausprägungen sind somit vergleichbar. Unter dieser Voraussetzung berechnete standardisierte Regressionskoeffizient liegt daher in einem Wertebereich zwischen -1 und +1.

Standardfehler der Regressionskoeffizienten

Mit Hilfe des Standardfehlers der Regressionskoeffizienten lässt sich ein Konfidenzintervall bestimmen, in dem der Koeffizient mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in der Grundgesamtheit zu finden ist. Geprüft wird, ob der geschätzte Regressionskoeffizient in der Grundgesamtheit einen von Null verschiedenen Wert hat. Die hierfür verwendete Verteilung ist die t-Verteilung. Der nicht standardisierte Regressionskoeffizient muss mindestens 1,96mal so groß wie sein Standardfehler sein (Daumenregel 2x), damit das übliche Signifikanzniveau von $\alpha=5\%$ erreicht wird.

Signifikanz der Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen

Um die Signifikanz der Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen zu prüfen, wird ein T-Test angewendet. Hier wird geprüft, ob sich die Regressionskoeffizienten signifikant von 0 unterscheiden. Die Null-Hypothese die geprüft wird lautet: Der Regressionskoeffizient der unabhängigen Variable ist gleich Null. Die Signifikanz gibt an wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Nullhypothese der Wahrheit entspricht. In dieser Arbeit wird die Nullhypothese ab einer Wahrscheinlichkeit von $\alpha=5\%$ verworfen und die Alternativhypothese angenommen. Die Alternativhypothese lautet: Der Regressionskoeffizient der unabhängigen Variable ist ungleich Null.

Varianzinflationsfaktor VIF

Der Varianzinflationsfaktor beschreibt die Multikollinearität der unabhängigen Variablen untereinander. Multikollinearität ist ein Problem der Regressionsanalyse und liegt vor, wenn zwei oder mehr unabhängige Variablen eine sehr starke Korrelation untereinander zeigen. Zum einen wird mit zunehmender Multikollinearität das Verfahren zur Schätzung der Regressionskoeffizienten instabil und Aussagen zur Schätzung der Regressionskoeffizienten zunehmend ungenau. Zum anderen ist die Modellinterpretation nicht mehr eindeutig. Je größer der Varianzinflationsfaktor, desto stärker sind die Hinweise auf Multikollinearitäten. Eine allgemein akzeptierte Konvention, ab wann der VIF inakzeptable Werte annimmt, existiert nicht. In der Regel werden Werte zwischen vier und zehn vorgeschlagen.

Durbin-Watson-Statistik

Der Durbin-Watson-Test ist ein statistischer Test, mit dem man prüfen kann, ob Autokorrelationen 1. Ordnung vorliegen, d. h., ob die Korrelation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Residualgrößen bei einer Regressionsanalyse ungleich Null ist. Der Wert der Durbin-Watson-Teststatistik kann Werte zwischen 0 und 4 annehmen. Er sollte um den Wert 2 liegen, der besagt, dass keine Autokorrelationen vorliegen.

0 = perfekt positive Autokorrelation

2 = keine Autokorrelationen

4 = perfekt negative Autokorrelation

Verteilung der Residuen des multiplen linearen Regressionsmodells

Als Residuen werden die Abweichungen der abhängigen Variable bezeichnet, die nicht durch das Modell erklärt werden können. Ist die Varianz der Residuen über den gesamten Wertebereich gleich verteilt, spricht man von Homoskedastizität. Ist die Varianz der Residuen nicht über den gesamten Wertebereich gleich verteilt, spricht man von Heteroskedastizität. Die Residuen sollten homoskedastisch verteilt sein. Ist das nicht der Fall, ist das Modell nur beschränkt verwendbar.

10 Ergebnisse

10.1 Untersuchung des derzeitigen Abkühlungsprozesses

Um die Holzfeuchtigkeits- und Temperaturentwicklung der thermisch modifizierten Bretter während der Abkühlungsphase im Freien zu untersuchen, wurden Messungen sofort nach Kammeröffnung (t=0), 5 Stunden nach Kammeröffnung (t=5) und 24 Stunden nach Kammeröffnung (t=24) durchgeführt. Für diese Untersuchung wurden drei Brettstapel der Behandlungsintensität "forte" herangezogen. Die Messungen erfolgten in Brettmitte und am Brettrand. Da die Abkühlung im Freien stattfindet und daher von der Witterung abhängig ist, kann von einer unkontrollierten Abkühlung gesprochen werden. Um die Abkühlungsbedingungen zum Untersuchungszeitpunkt darzustellen, wurden die Daten der Wetterstation Kremsmünster herangezogen (siehe Abbildung 35). Kremsmünster liegt ca. 50km vom Untersuchungsort entfernt. Die Werte entsprechen natürlich nicht exakt den Abkühlungsbedingungen vor Ort, sind jedoch eine gute Näherung und für diese Untersuchung ausreichend.

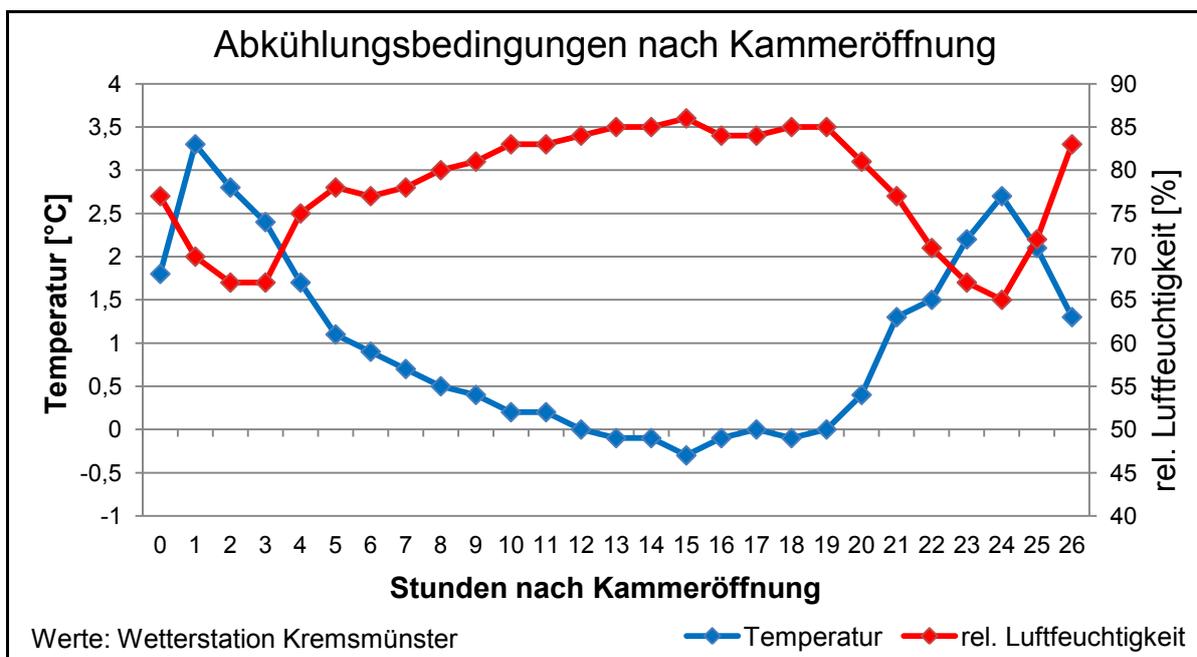


Abbildung 35: Abkühlungsbedingungen während der Abkühlung im Freien

10.1.1 Holzfeuchtigkeit der Bretter während der Abkühlung im Freien

Um die Holzfeuchtigkeiten der thermisch modifizierten Bretter während der Abkühlungsphase im Freien zu untersuchen, wurde die Holzfeuchtigkeit verschiedener Bretter im Stapel (siehe Abbildung 36) mittels Darmmethode ermittelt.

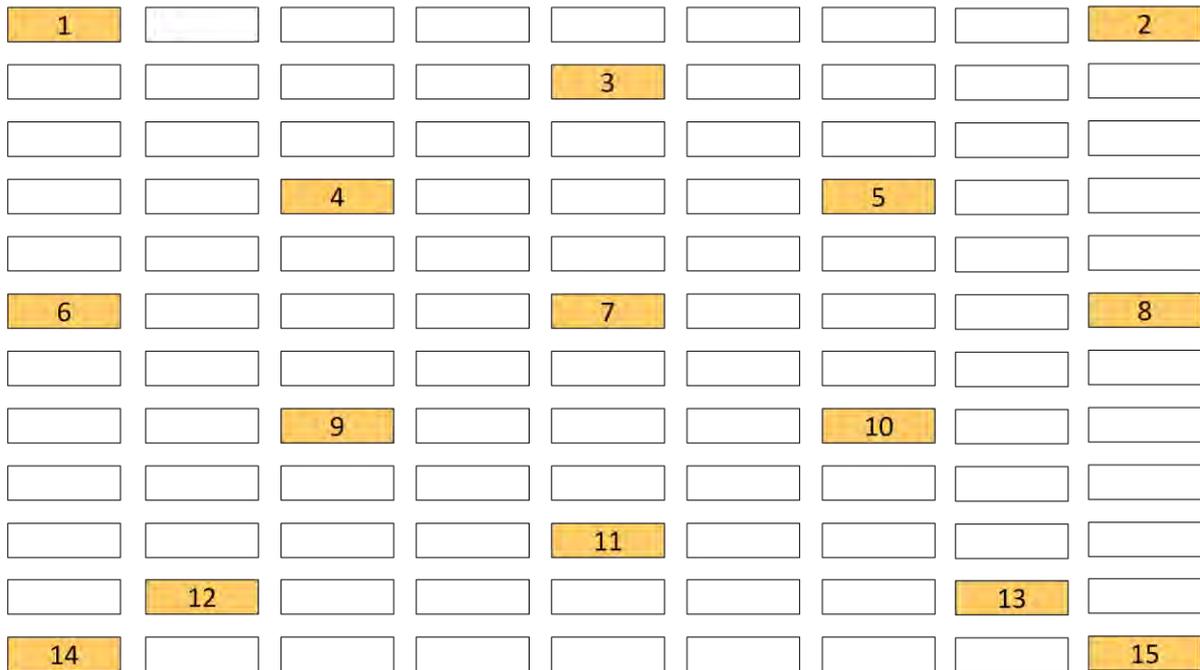


Abbildung 36: Bretter für Holzfeuchtemessung in Brettmitte und am Bretttrand

Zeitpunkt t=0:

In Abbildung 37 sind die gemessenen Holzfeuchtigkeiten der entnommenen Proben zum Zeitpunkt t=0 dargestellt. Grundsätzlich bewegt sich die Holzfeuchtigkeit der entnommenen Proben in einem sehr engen Rahmen zwischen ca. 2% und 3%. Die Holzfeuchtigkeit der Proben am Bretttrand ist geringfügig höher als die der Proben in Brettmitte. Dies ist dadurch erklärbar, da die Bretter nach der thermischen Modifikation annähernd 0% Holzfeuchtigkeit aufweisen und dann vor Kammeröffnung einer Rekonditionierung unterzogen werden und die Feuchtigkeitsaufnahme am Bretttrand verstärkt durch die Querschnittsflächen erfolgen kann. Die am Stapelrand liegenden Bretter (Probennummer, 1, 2, 6, 8, 14 und 15) weisen eine leicht höhere Holzfeuchtigkeit auf als Bretter in Stapelmitte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Wasser zur Abkühlung bzw. Rekonditionierung der Bretter durch an den Seitenwänden der Behandlungskammer liegende Sprüheinrichtungen eingesprüht wird und Bretter am Stapelrand schnell bzw. stärker angefeuchtet werden als in Stapelmitte.

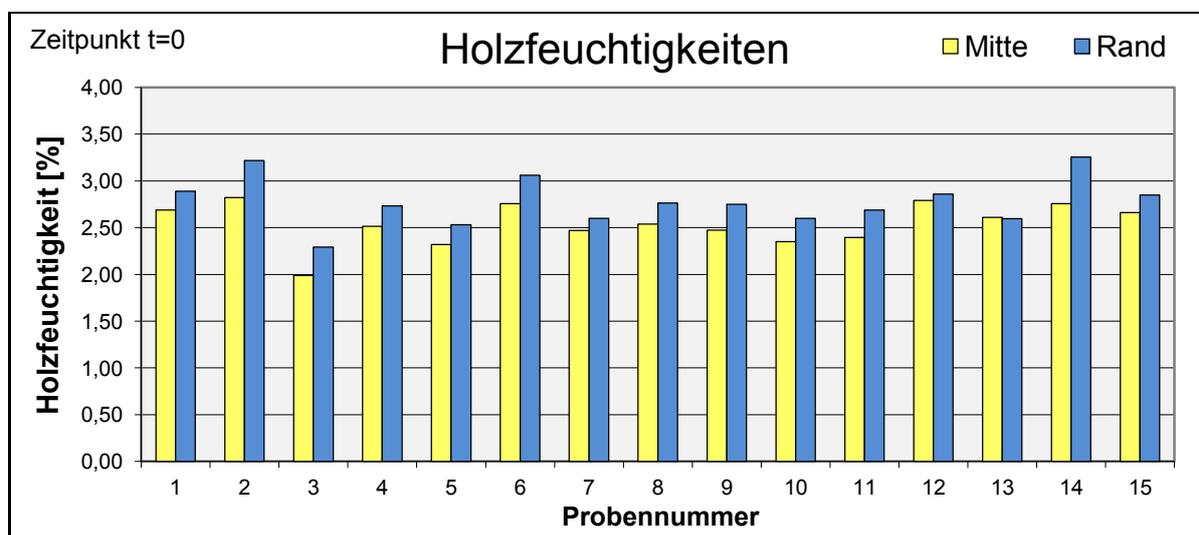


Abbildung 37: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Bretttrand zum Zeitpunkt t=0 der Abkühlungsphase im Freien

Zeitpunkt t=5:

In Abbildung 38 sind die gemessenen Holzfeuchtigkeiten der Proben zum Zeitpunkt t=5 dargestellt. Grundsätzlich bewegt sich die Holzfeuchtigkeit in einem sehr engen Rahmen zwischen ca. 2% und 3,5%. Die Holzfeuchtigkeiten der Proben am Brettrand im Vergleich zu den Holzfeuchtigkeiten der Proben in Brettmitte zeigen keine wesentlichen Veränderungen gegenüber dem Messzeitpunkt t=0. Auch hier sind die Holzfeuchtigkeiten am Rand höher als in der Mitte des Brettes. Auch die erhöhte Feuchtigkeit der Bretter am Stapelrand ist noch vorhanden.

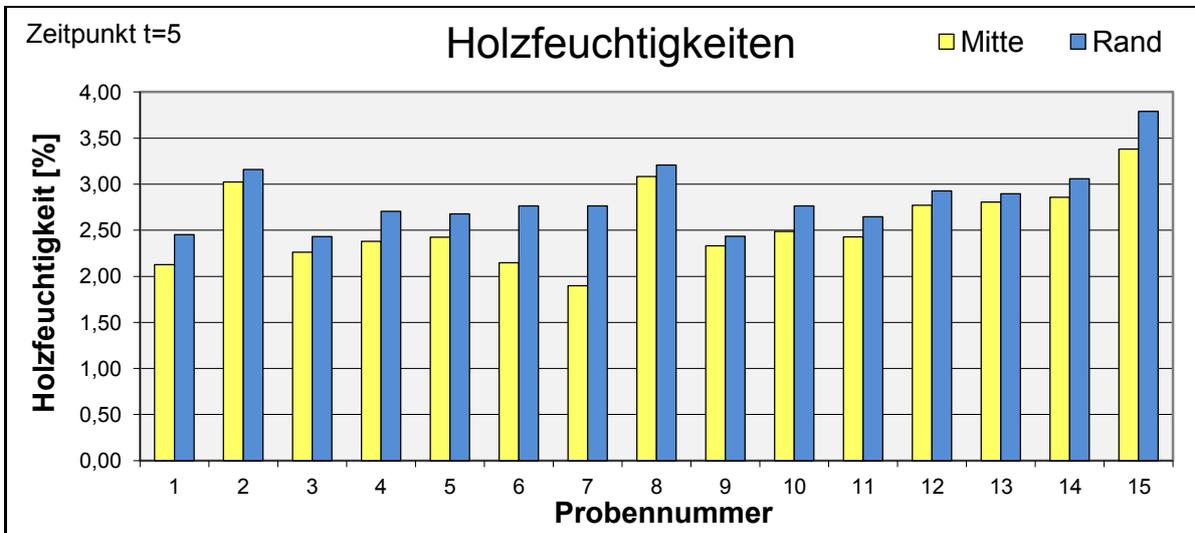


Abbildung 38: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Brettrand zum Zeitpunkt t=5 der Abkühlungsphase im Freien

Zeitpunkt t=24:

In Abbildung 39 sind die gemessenen Holzfeuchtigkeiten der Proben zum Zeitpunkt t=24 dargestellt. Im Vergleich zu t=0 und t=5 ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Brettern und auch die Differenzen zwischen Brettmitte und Brettrand abnehmen.

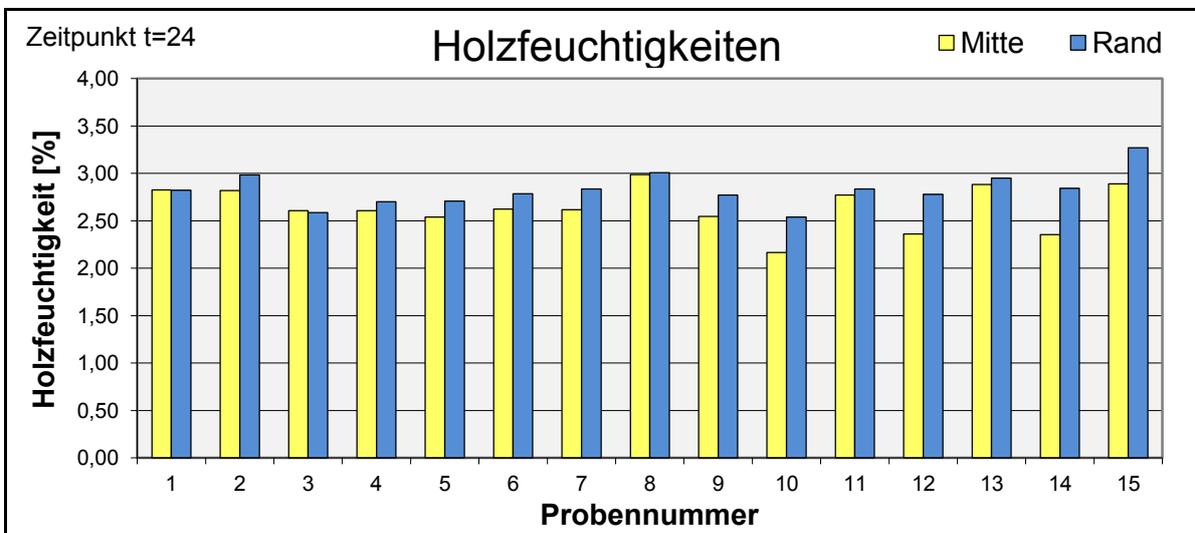


Abbildung 39: Holzfeuchtigkeiten in Brettmitte und am Brettrand zum Zeitpunkt t=24 der Abkühlungsphase im Freien

Tabelle 12 und Abbildung 40 zeigen die Feuchtigkeitsverteilungen während der Abkühlung im Freien. Man kann erkennen, dass die zum Messungszeitpunkt herrschenden Abkühlungsbedingungen zu keinen wesentlichen Feuchtigkeitsveränderungen während der Abkühlungsphase führen.

Tabelle 12: Übersicht über die Verteilung der Holzfeuchtigkeit während der Abkühlung

Zeitpunkt der Messung	t=0		t=5		t=24	
Position	Mitte	Rand	Mitte	Rand	Mitte	Rand
Mittelwert [% HF]	2,54	2,78	2,56	2,85	2,64	2,83
Standardabweichung [% HF]	0,22	0,26	0,41	0,36	0,23	0,18
VarK [%]	8,77	9,28	16,06	12,52	8,67	6,33

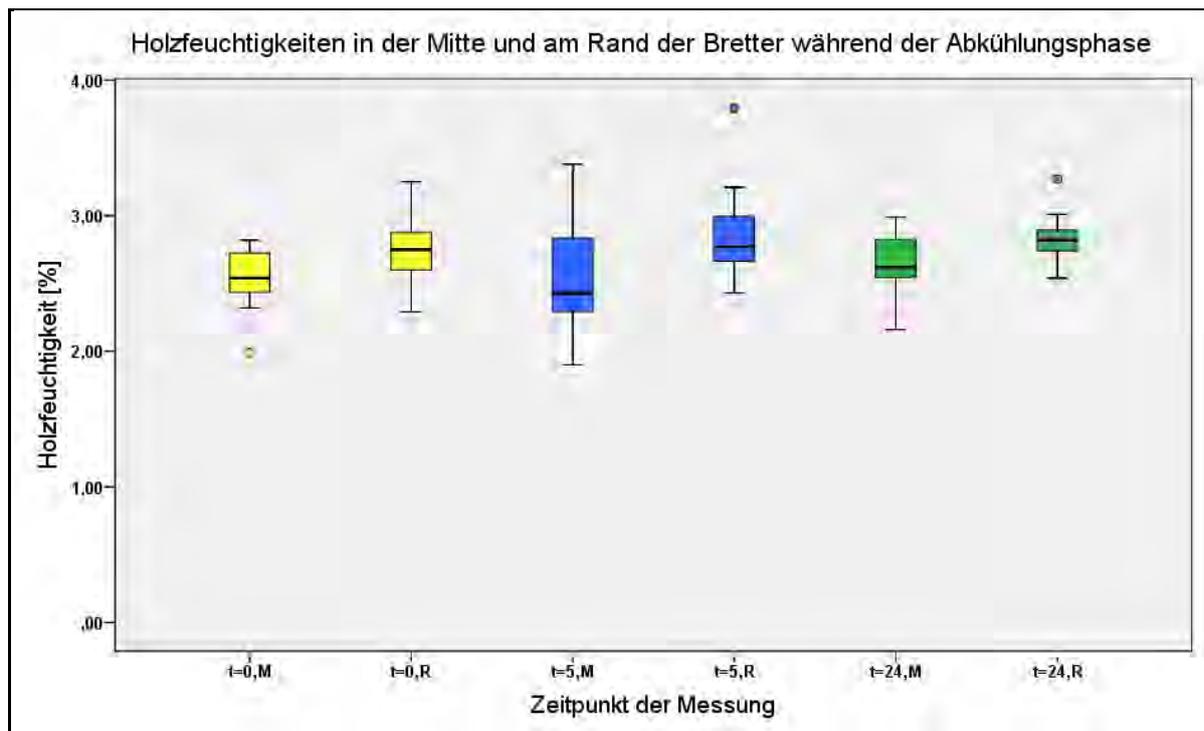


Abbildung 40: Holzfeuchtigkeiten in der Mitte und am Rand der Bretter während der Abkühlungsphase

10.1.2 Holzfeuchtigkeitsprofile

Um Aussagen über innere Spannungen treffen zu können, die aufgrund von Holzfeuchtigkeitssdifferenzen im Brettquerschnitt während der Abkühlung entstehen, wurden Holzfeuchtigkeitsprofile erstellt. Die Proben wurden aus den gekennzeichneten Brettern im Stapel (siehe Abbildung 41) in Brettmitte entnommen. Es wurden Proben zu den Zeitpunkten t=0, t=5 und t=24 entnommen. Die Anzahl der gemessenen Schichten unterscheidet sich von Probe zu Probe, da sich die Spaltbarkeit der Proben unterschieden hat und daher die Schichtdicke variiert werden musste.

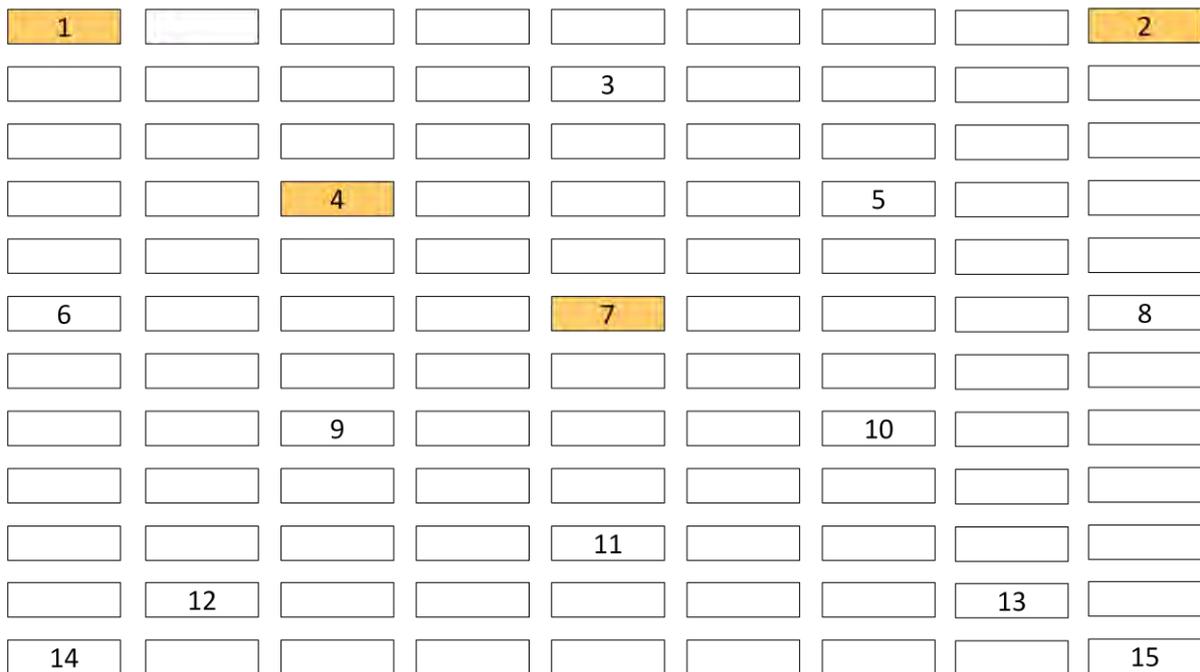


Abbildung 41: Bretter für Holzfeuchtigkeitsprofilmessungen, Probenentnahme in Brettmitte

10.1.2.1 Holzfeuchtigkeitsprofile - Brettbreite

In Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 ist die Entwicklung des Holzfeuchtigkeitsprofils während der Abkühlung ($t=0$, $t=5$, $t=24$) in Brettbreite der Probennummer 2 dargestellt. Da es sich bei dieser Probe um ein Randbrett im Stapel handelt, ist in Abbildung 42 zu erkennen, dass es auf der Außenseite zu einer stärkeren Anfeuchtung in der Abkühlungs- und Rekonditionierungsphase in der Kammer kommt. In der Rekonditionierungsphase wird zur Abkühlung der Bretter und zur Wiederbefeuchtung Wasser in die Kammer eingesprüht. Man erkennt auch, dass die erneute Abtrocknung der äußersten Randzonen nach Kammeröffnung sehr rasch erfolgt. In Abbildung 43 und Abbildung 44 ist die weitere Entwicklung während der Abkühlung dargestellt. Man erkennt, dass es durch die zum Messungszeitpunkt herrschenden Abkühlungsbedingungen zu keiner Steigerung der Holzfeuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt während der Abkühlung kommt. Die Holzfeuchtigkeitsdifferenzen der Schichten werden eher geringer. In Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 ist die Entwicklung des Holzfeuchtigkeitsprofils in Brettbreite der Probennummer 4 dargestellt. Da es sich bei dieser Probe um ein Brett aus der Stapelmitte handelt, ist zu erkennen, dass das Holzfeuchtigkeitsprofil über die Brettbreite im Vergleich zu Probennummer 2 symmetrisch ist (vergleiche dazu das Holzfeuchtigkeitsprofil der Brettnummer 2 in Abbildung 42). Man erkennt, dass es durch die zum Messungszeitpunkt herrschenden Abkühlungsbedingungen zu keiner Steigerung der Holzfeuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt während der Abkühlung kommt. Die weiteren Holzfeuchtigkeitsprofile der Probennummern 1 und 7 lieferten ähnliche Ergebnisse und sind daher nur im Anhang unter Abschnitt 13.1 angeführt.

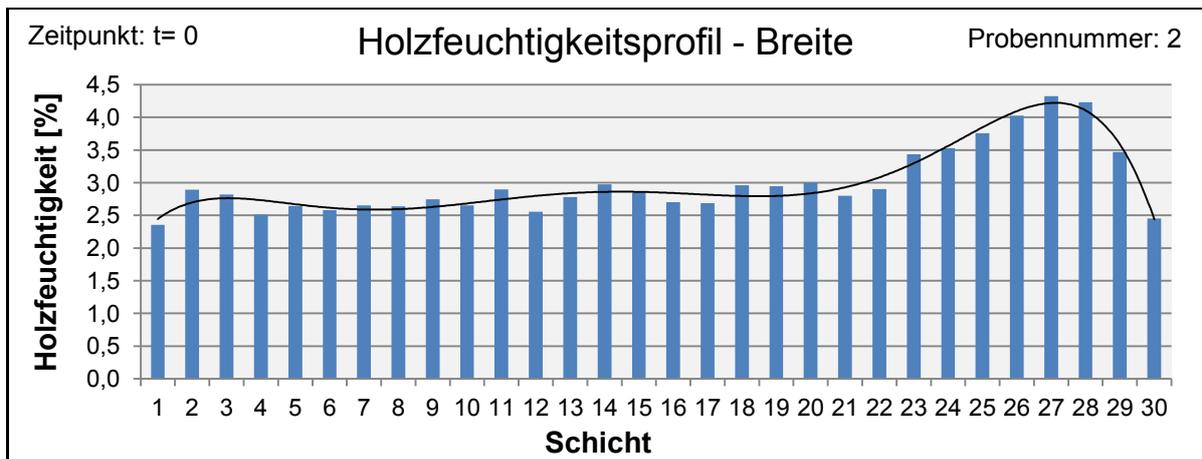


Abbildung 42: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0

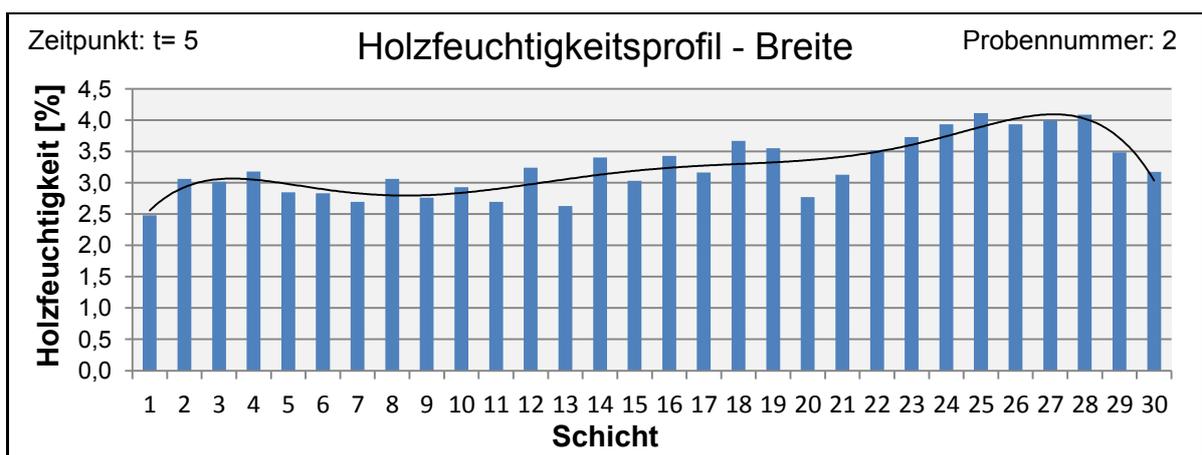


Abbildung 43: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5

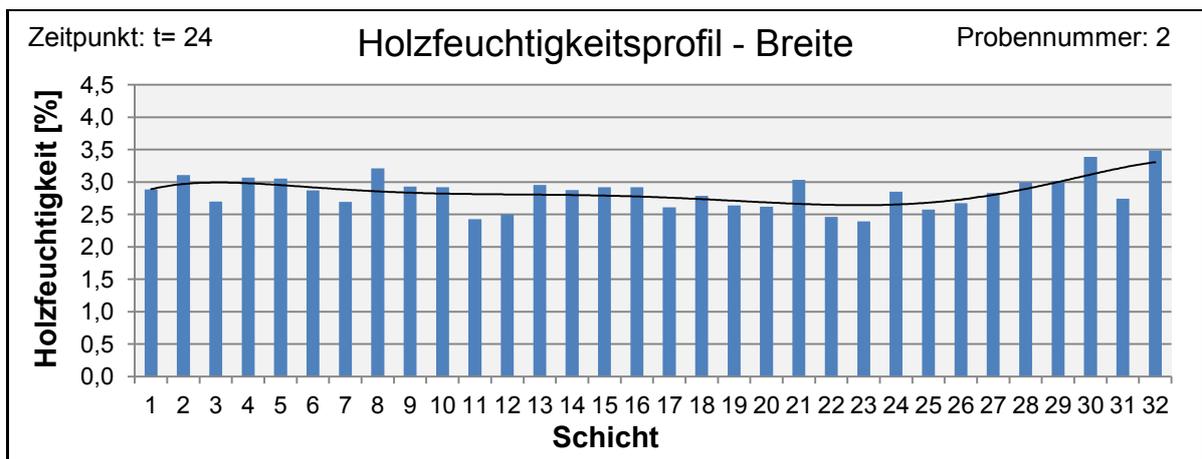


Abbildung 44: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24

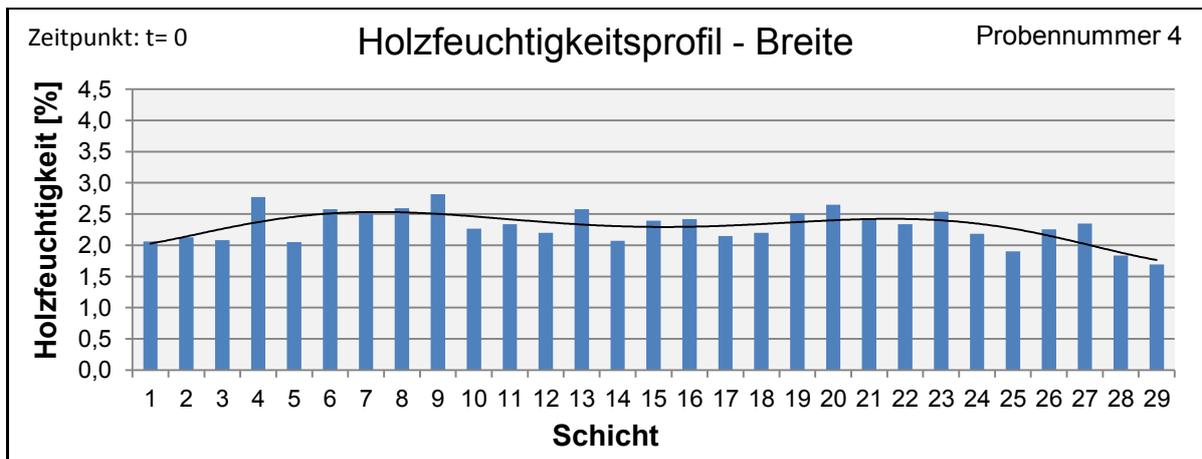


Abbildung 45: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0

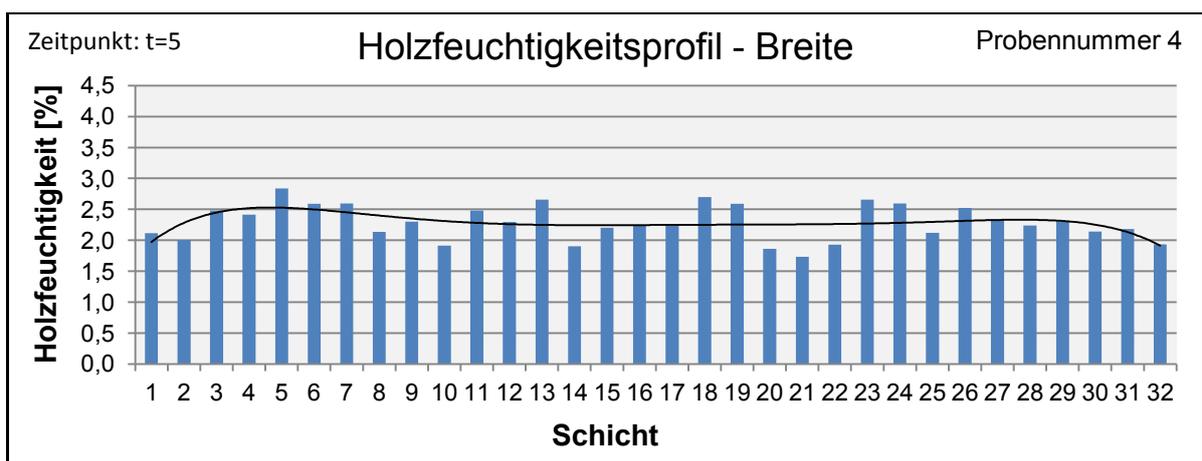


Abbildung 46: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5

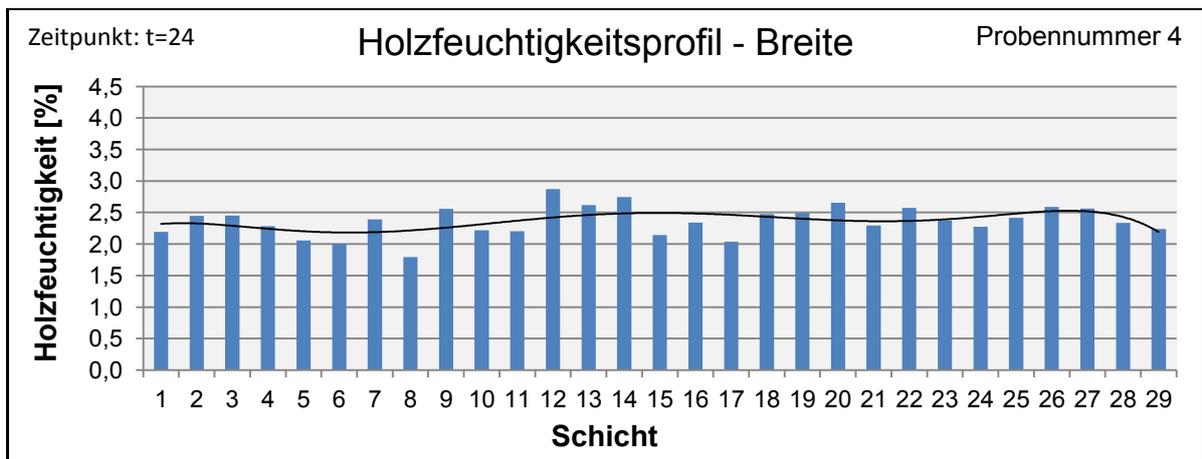


Abbildung 47: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24

10.1.2.2 Holzfeuchtigkeitsprofile - Brettstärke

In Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 50 ist die Entwicklung des Holzfeuchtigkeitsprofils in Brettstärke der Probennummer 2 dargestellt. Man erkennt, dass das Holzfeuchtigkeitsprofil bei Kammeröffnung (t=0) keine größeren Differenzen aufweist, und es durch die zum Messungszeitpunkt herrschenden Abkühlungsbedingungen zu keiner Steigerung der Holzfeuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt während der Abkühlung

kommt (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50). Es kommt eher zu einem Ausgleich der Holzfeuchtigkeitsdifferenzen. Die weiteren Holzfeuchtigkeitsprofile der Probennummern 1, 4 und 7 lieferten ähnliche Ergebnisse und sind daher nur im Anhang unter Abschnitt 13.1 angeführt.



Abbildung 48: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=0

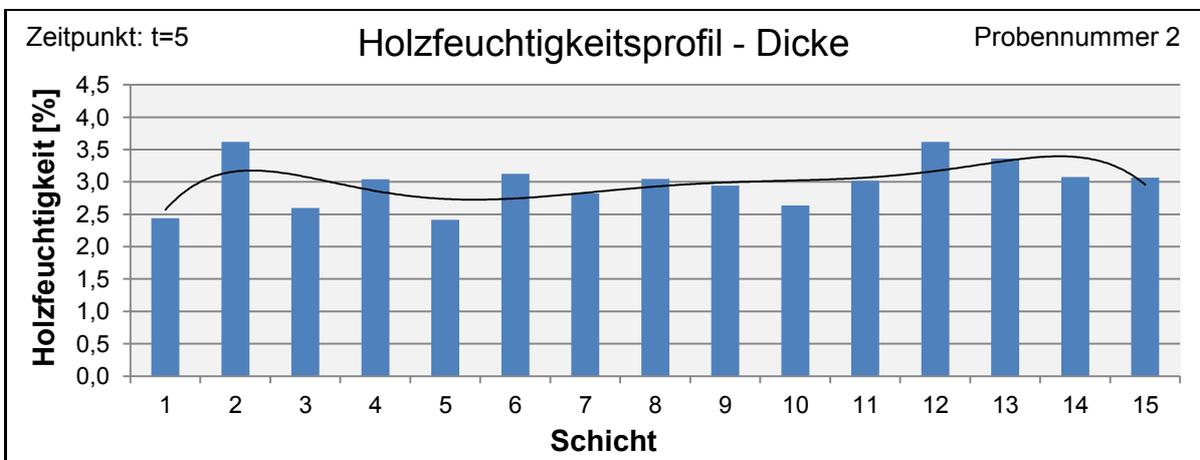


Abbildung 49: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5

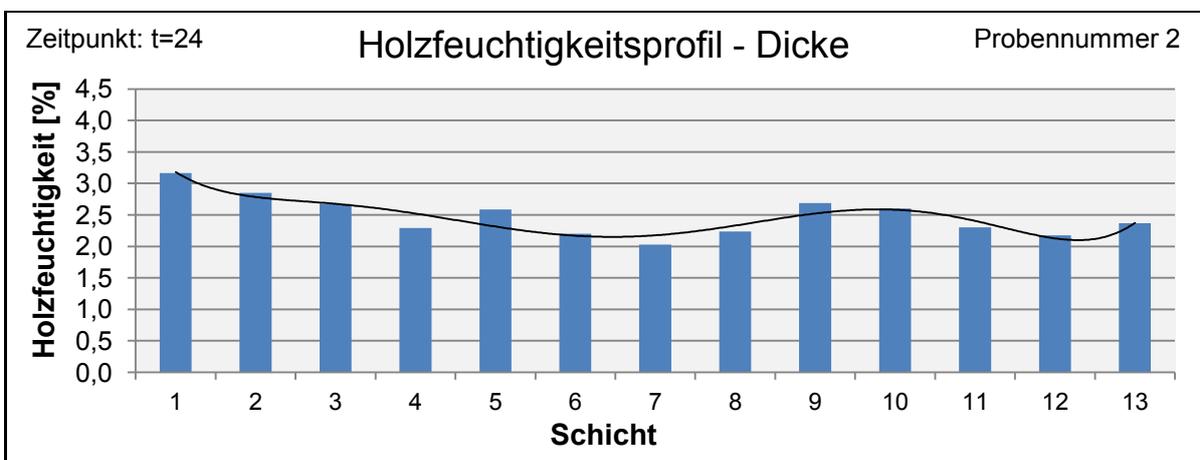


Abbildung 50: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 2 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24

10.1.3 Oberflächentemperatur

Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie rasch die Abkühlung der Bretter nach Kammeröffnung erfolgt, wurde die Oberflächentemperatur der einzelnen Bretter mit einem Infrarottemperaturmessgerät gemessen. Es wurden Messungen zum Zeitpunkt $t=0$, $t=5$ und $t=24$ am Brettrand und in Brettmitte vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 dargestellt. Die Temperatur der Bretter vor Kammeröffnung beträgt ca. 105°C (Temperaturfühler Kammer). Da die Kammeröffnung, die Entnahme der Stapel aus der Kammer und die Entstapelung der Bretter einige Zeit in Anspruch nimmt, wurden die Messungen zum Zeitpunkt $t=0$ etwas zeitverzögert vorgenommen. Die erste Probe (Probennummer 1) wurde ca. 15 Minuten nach Kammeröffnung gemessen und die letzte Probe (Probennummer 15) ca. 30 Minuten nach Kammeröffnung. Wie zu erkennen ist, nimmt die Oberflächentemperatur der Bretter nach Kammeröffnung sehr rasch ab ($t=0$). Die Abkühlung im Stapelinneren erfolgt etwas langsamer als am Stapelrand. Des Weiteren kann man erkennen, dass die Bretter zum Zeitpunkt $t=5$ an der Oberfläche bereits Umgebungstemperatur haben.

Tabelle 13: Temperaturentwicklung an den Brettern während der Abkühlung

Probennummer	t=0		t=5		t=24	
	Rand	Mitte	Rand	Mitte	Rand	Mitte
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	45,7	37,7	2,0	1,9	2,9	3
2	48,2	44,9	1,8	2,0	3	2,9
3	52,1	57,4	2,7	2,1	3	3
4	34,3	39,1	2,5	2,3	3,1	3,1
5	33,5	42,2	1,8	1,8	3	2,7
6	30,2	32,3	2,4	3,8	2,7	2,7
7	36,7	39,7	2,2	1,8	3	3
8	29,0	29,7	1,8	1,5	3	3
9	37,4	42,6	2,0	2,0	3	3,1
10	32,5	35,7	1,8	1,6	3,1	3
11	36,2	42,0	2,2	1,6	3	2,9
12	27,6	27,7	2,5	2,3	2,7	3
13	29,7	29,4	2,0	1,7	3	3
14	20,4	24,1	2,2	1,8	2,9	3
15	23,4	21,9	1,8	1,7	3	2,7

10.1.4 Messen der Verschalung - Mittelschnitttest

An den in Abbildung 51 gekennzeichneten Brettern wurden zu den Zeitpunkten $t=0$, $t=5$ und $t=24$ zur Ermittlung der Verschalung nach ÖNORM EN 14464 Mittelschnittproben in Brettmitte entnommen. In Abbildung 52 ist die Messvorrichtung für die Messung der Verschalung abgebildet. Es wurde an keiner Probe zu keinem Messzeitpunkt eine Verschalung gemessen.

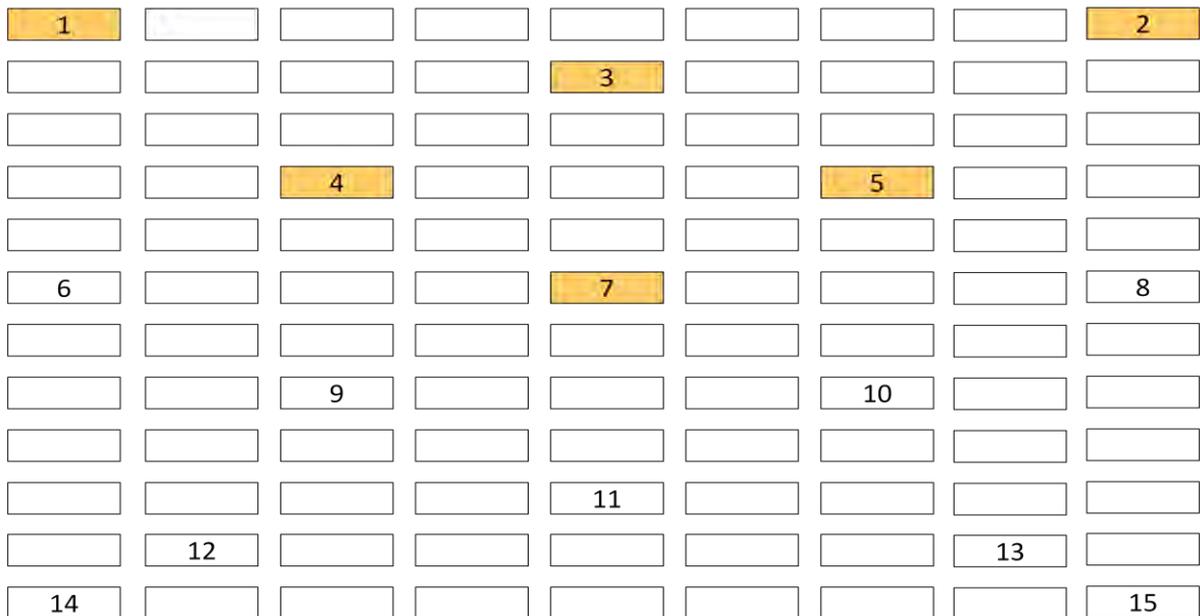


Abbildung 51: Bretter für Mittelschnitttest



Abbildung 52: Messvorrichtung zur Ermittlung der Verschalung mittels Mittelschnitttest

10.1.5 Diskussion - Untersuchung des Abkühlungsprozesses

Aus den Ergebnissen zur Untersuchung des Abkühlungsprozesses, der derzeit vom Unternehmen angewendet wird, geht hervor, dass die im Brettquerschnitt vorhandenen Feuchtigkeitsdifferenzen bei Kammeröffnung eher gering sind und es während der Abkühlung im Freien nicht zu einer Zunahme der Differenzen kommt. Es wurde festgestellt, dass Bretter am Stapelrand erheblich stärker in der Abkühlungs- und Rekonditionierungsphase vor Kammeröffnung angefeuchtet werden als Bretter in Stapelmitte. Die Temperaturmessungen zeigten eine sehr rasche Abkühlung an der Oberfläche der Bretter. Die Verschalungsproben mittels Mittelschnitttest zeigten, dass keine Verschalung der Bretter messbar ist. Aus theoretischer Sicht sollte es durch die rasche Abkühlung im Freien zu keiner Schädigung der Holzstruktur kommen, da keine erheblichen Feuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt entstehen und der Wärmeausdehnungskoeffizient von Holz gering ist. Die starke Anfeuchtung von Brettern am Stapelrand in der Abkühlungs- und Rekonditionierungsphase vor Kammeröffnung könnte aus theoretischer Sicht eine Schädigung der Holzstruktur zur Folge haben. Beachtet werden muss jedoch, dass die Abkühlung im Freien stark von Jahreszeit und Witterung abhängig ist und daher die gemessenen Werte nicht als allgemein gültig angesehen werden können.

10.2 Auswertung der erhobenen Brettmerkmale

Um den Einfluss der Brett- Holz- und Prozessmerkmale auf die Messwerte einer Bruchenergieprüfung und die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung zu untersuchen, wurden diese für die einzelnen Probekörper aufgenommen. Um die Prozessmerkmale Behandlungsintensität und Abkühlungsbedingung genauer zu untersuchen, wurden eigene Probengruppen gebildet. Um die Vergleichbarkeit dieser Gruppen zu gewährleisten, wurden die Verteilung der Dichte, der Jahrringbreite, des Frühholzanteils und der Jahrringlage in diesen Gruppen untersucht. Die detaillierten Einzelwerte sind in Tabelle 43 im Anhang, Abschnitt 13.3 angeführt. Die Ergebnisse der Auswertung sind im Folgenden dargestellt.

10.2.1 Dichte

Da die Dichte einen der wesentlichsten Einflussfaktoren bezüglich der Festigkeit von Holz darstellt, ist es für einen Vergleich der gebildeten Gruppen betreffend Abkühlungsbedingung und Behandlungsintensität notwendig, dass sich diese Gruppen hinsichtlich der Dichte nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Dies ist notwendig, da Gruppenunterschiede aufgrund von unterschiedlicher Abkühlung bzw. Behandlungsintensität untersucht werden und Dichteinflüsse so gering wie möglich gehalten werden sollen. Um dies zu überprüfen wurden die einzelnen Gruppen mit Hilfe einer univariaten Varianzanalyse und einem Scheffé Post-Hoc-Test auf Unterschiede geprüft. Um einen Überblick zu erhalten, sind die Verteilungen in Tabelle 14 und in Form von Box-Plots in Abbildung 53 dargestellt. Das Ergebnis der statistischen Auswertung zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen vorhanden sind (Signifikanzniveau $\alpha=0.05$). Dies ist auch in den unten angeführten Tabellen und Abbildungen zu erkennen. Vor allem für eine Untersuchung der Auswirkung der Abkühlungsbedingungen auf die Bruchenergie, in der die Gruppen FR im Vergleich zu FS, und MR im Vergleich zu MS untersucht werden, sind verzerrende Einflüsse aufgrund von Dichteunterschieden in den Gruppen nicht zu erwarten. Um den Einfluss der thermischen Behandlungsintensität auf die Dichte zu untersuchen, wurden alle Proben der Behandlungsintensität "forte" zu einer Gruppe vereint, alle Proben der Behandlungsintensität "mezzo-exterior" ebenso zu einer Gruppe vereint und mit einem zweiseitigen T-Test für unabhängige Stichproben auf Unterschiede untersucht. Das Ergebnis ist in Tabelle 15 und Abbildung 54 dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind Mittelwerte und Variationskoeffizienten annähernd gleich und auch der T-Test zeigt keinen signifikanten Unterschied.

Tabelle 14: Übersicht über die Dichteverteilungen in den gebildeten Probengruppen

Gruppen- bezeichnung	Dichteverteilung der Gruppen			
	n	Mittelwert (\bar{x})	Standardabweichung (s)	Variationskoeffizient (VarK)
	[1]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
FN	45	0,638	0,065	10,17
FR	27	0,611	0,068	11,14
FS	27	0,615	0,079	12,86
MN	45	0,631	0,071	11,27
MR	27	0,630	0,057	9,10
MS	27	0,636	0,053	8,35

Legende:

FN Behandlung forte, Abkühlung normal MN Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung normal
 FR Behandlung forte, Abkühlung rasch MR Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch
 FS Behandlung forte, Abkühlung schonend MS Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend

Tabelle 15: Vergleich der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität

Gruppenbezeichnung	Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	
F (forte)	99	0,624	0,072	11,54	0,378
M (mezzo-exterior)	99	0,632	0,062	9,81	

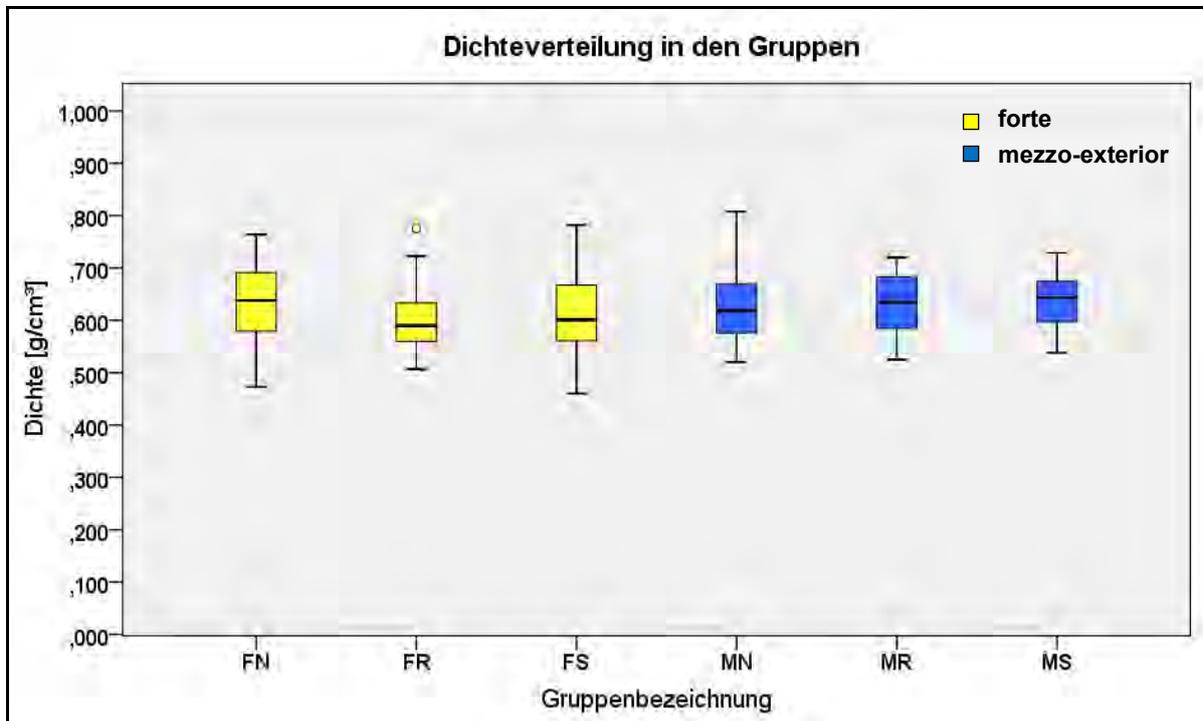


Abbildung 53: Dichteverteilung in den gebildeten Gruppen

Legende:

FN Behandlung forte, Abkühlung normal MN Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung normal
 FR Behandlung forte, Abkühlung rasch MR Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch
 FS Behandlung forte, Abkühlung schonend MS Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend

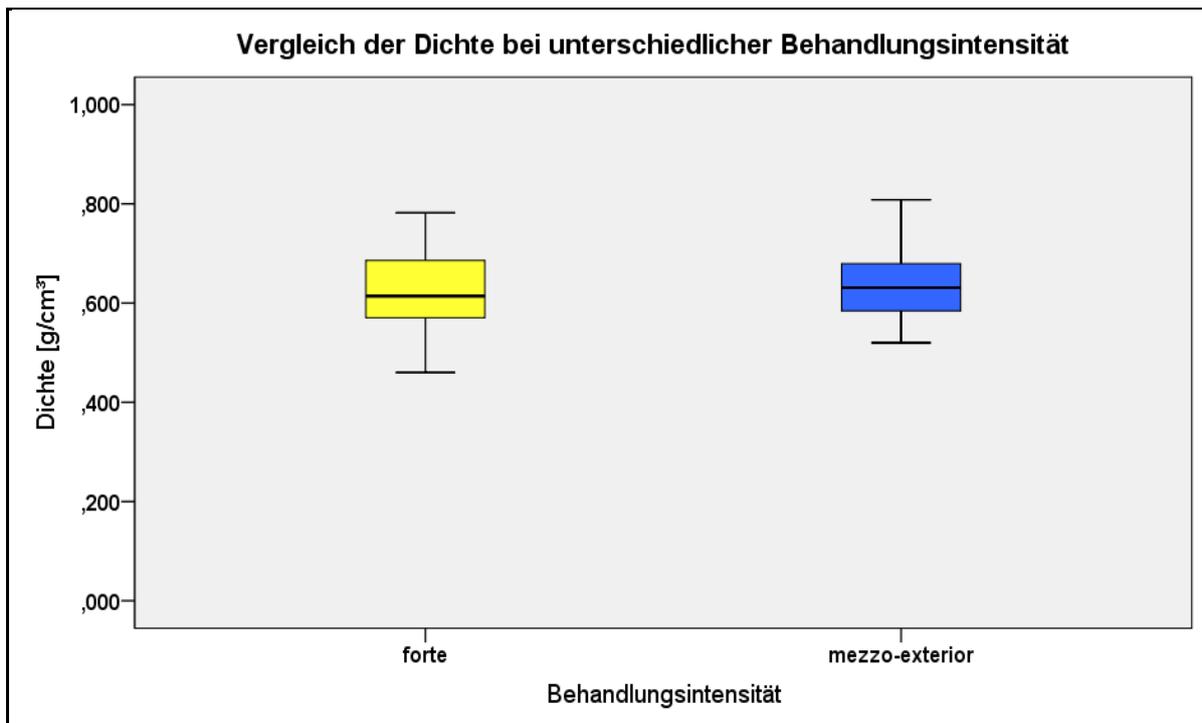


Abbildung 54: Vergleich der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität

10.2.2 Jahrringlage

Tabelle 16 zeigt die Verteilung der Jahrringlage (gruppiert in "rift", "halbrift" und "flader") für die gebildeten Probengruppen für unterschiedliche Abkühlung und Behandlungsintensität. Da die Probenauswahl zufällig erfolgte, ist zu erkennen, dass die Verteilung der Jahrringlage in den Probengruppen wesentlich variiert. Dies muss beim Vergleich dieser Gruppen berücksichtigt werden. Vor allem dann, wenn die Jahrringlage der Bretter einen signifikanten Einfluss auf die Testvariable zeigt. In Abbildung 55 ist die Verteilung der Jahrringlage in den Probengruppen in Form von Box-Plots in Grad dargestellt. Auch hier ist die ungleiche Verteilung über die Probengruppen erkennbar.

Tabelle 16: Übersicht der Probenanzahl pro Jahrringlagengruppe

Gruppen- bezeichnung	Probenanzahl pro Jahrringlagengruppe			Gesamtproben- anzahl
	rift (>79°)	halbrift (31°-79°)	flader (< 31°)	
	[1]	[1]	[1]	
FN	6	20	19	45
FR	2	8	17	27
FS	4	19	4	27
MN	8	14	23	45
MR	8	10	9	27
MS	7	11	9	27
Summe	35	82	81	198

Legende:

FN	Behandlung forte, Abkühlung normal	MN	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung normal
FR	Behandlung forte, Abkühlung rasch	MR	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch
FS	Behandlung forte, Abkühlung schonend	MS	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend

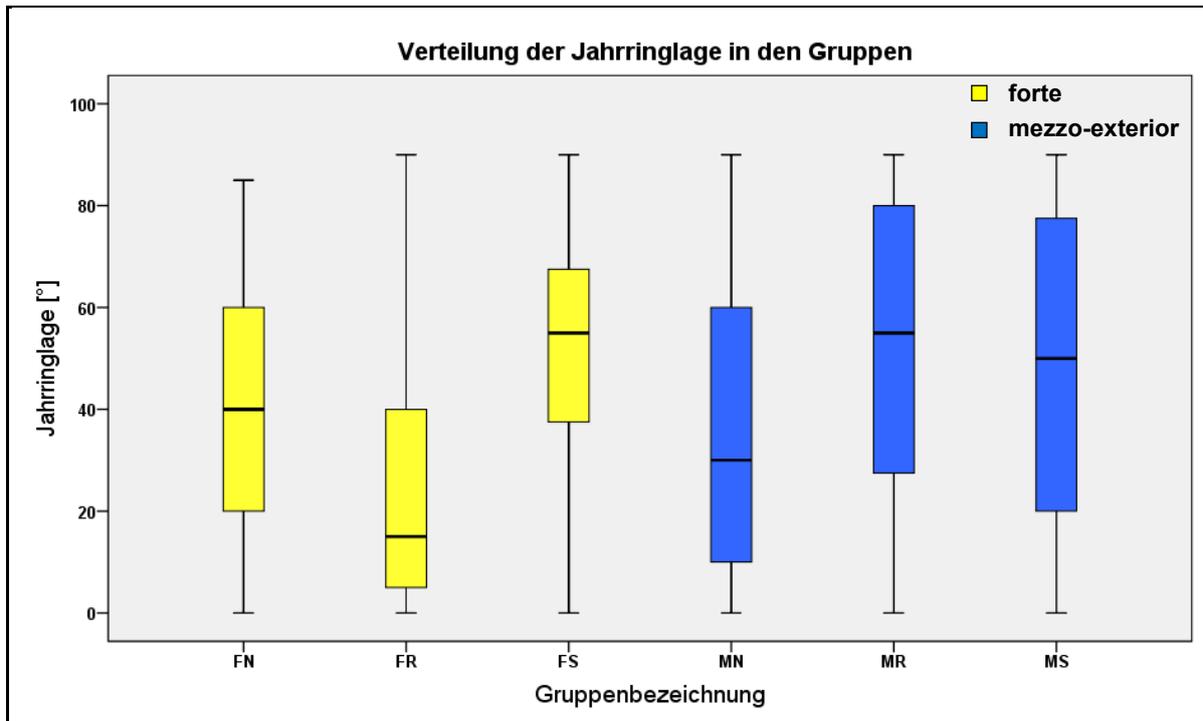


Abbildung 55: Verteilung der Jahrringlage in den Gruppen

10.2.3 Frühholzanteil

In Tabelle 17 und Abbildung 56 ist die Verteilung des Frühholzanteils in den gebildeten Probengruppen für unterschiedliche Abkühlung und Behandlungsintensität zusammengefasst. Wie man erkennen kann, weisen alle Probengruppen ähnliche Verteilungen auf. Die Probengruppen können daher bezüglich der Verteilung des Frühholzanteils als gleich angesehen werden.

Tabelle 17: Übersicht über die Verteilung des Frühholzanteils in den Probengruppen

Gruppenbezeichnung	Frühholzanteil in den Vergleichsgruppen			
	n	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	[1]	[%]	[%]	[%]
FN	45	44,14	9,88	22,37
FR	27	43,98	9,80	22,28
FS	27	42,79	10,36	24,22
MN	45	43,59	9,99	22,93
MR	27	47,36	9,92	20,95
MS	27	45,75	9,68	21,16

Legende:

FN Behandlung forte, Abkühlung normal MN Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung normal
FR Behandlung forte, Abkühlung rasch MR Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch
FS Behandlung forte, Abkühlung schonend MS Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend

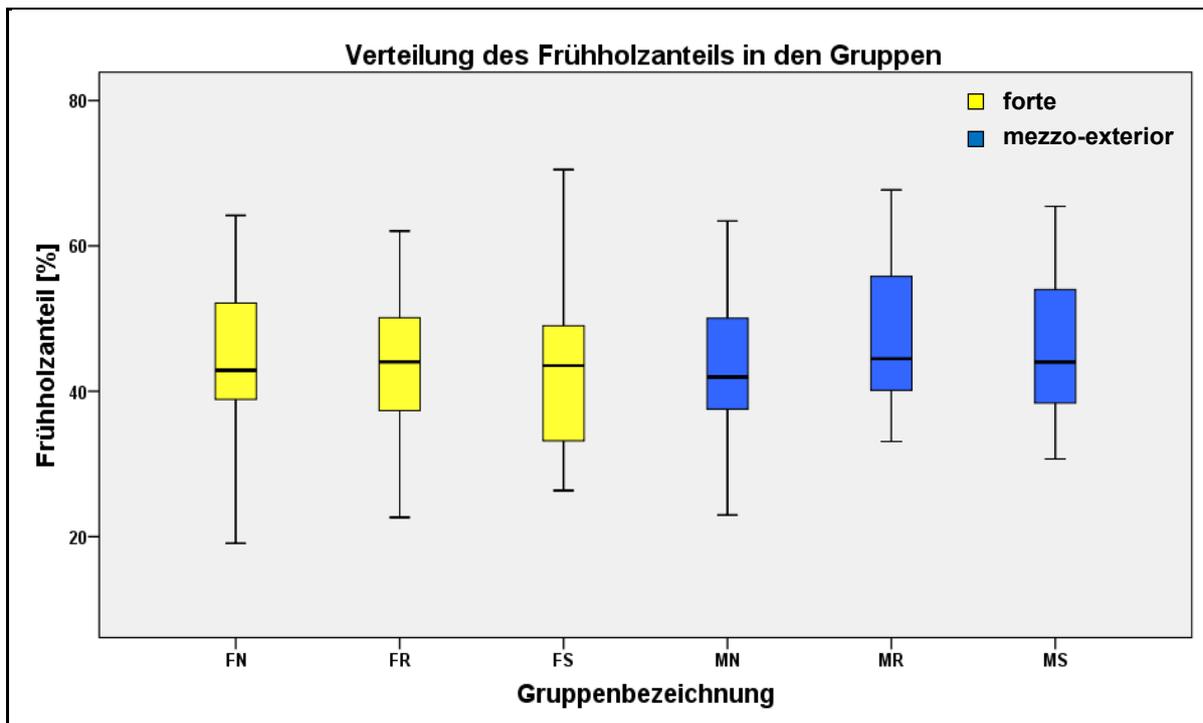


Abbildung 56: Verteilung des Frühholzanteils in den Probengruppen

10.2.4 Durchschnittliche Jahrringbreite

In Tabelle 18 und Abbildung 57 ist die Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite in den Probengruppen zusammengefasst. Wie man erkennen kann, weisen alle Probengruppen bis auf einzelne Ausreißer ähnliche Verteilungen auf. Die Probengruppen können daher bezüglich der Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite als gleich angesehen werden.

Tabelle 18: Übersicht über die Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite der Gruppen

Gruppen- bezeichnung	Durchschnittliche Jahrringbreite in den Vergleichsgruppen			
	n	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	[1]	[%]	[%]	[%]
FN	45	3,08	1,28	41,72
FR	27	2,78	1,02	36,50
FS	27	2,67	0,86	32,15
MN	45	2,90	0,94	32,51
MR	27	2,78	0,98	35,34
MS	27	2,86	1,09	38,24

Legende:

FN Behandlung forte, Abkühlung normal
 FR Behandlung forte, Abkühlung rasch
 FS Behandlung forte, Abkühlung schonend

MN Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung normal
 MR Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch
 MS Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend

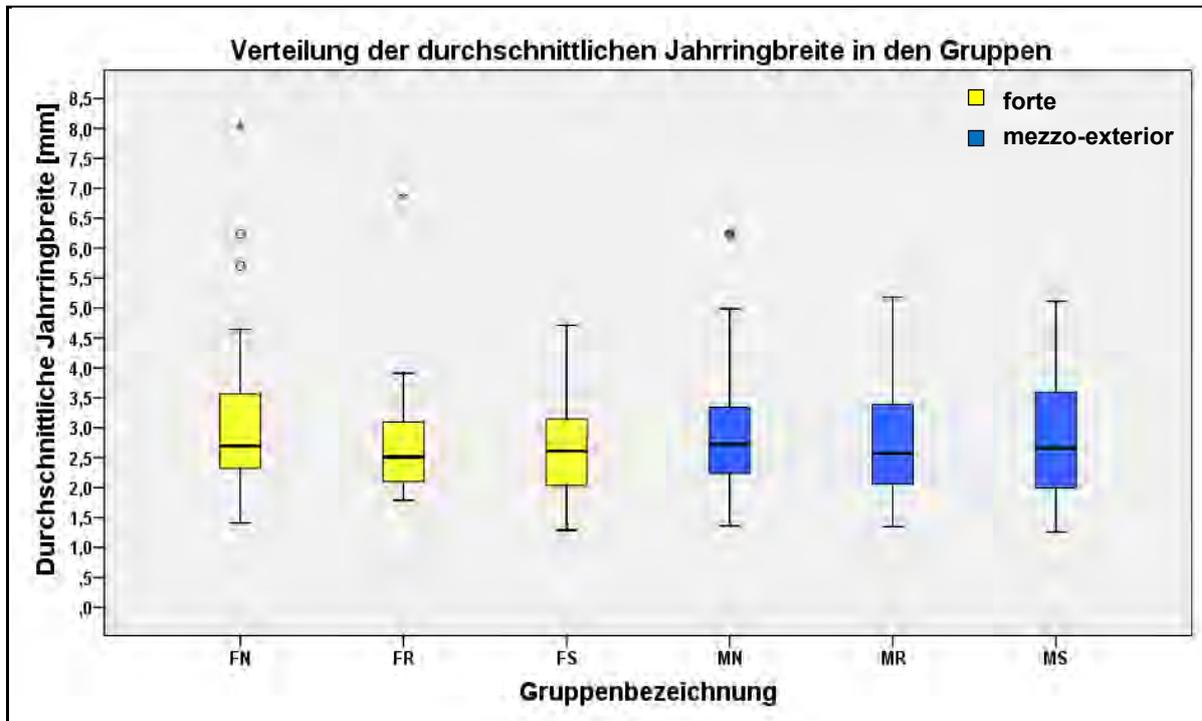


Abbildung 57: Verteilung der durchschnittlichen Jahrringbreite der Vergleichsgruppen

10.2.5 Korrelationsanalyse

Um die Abhängigkeiten, die zwischen den erhobenen Merkmalen Dichte, Jahrringbreite und Frühholzanteil vorhanden sind, zu untersuchen, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 19 dargestellt. Höhere Korrelation zeigt in dieser Untersuchung nur Jahrringbreite/Frühholzanteil mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,760. Das bedeutet, je höher die Jahrringbreite desto geringer ist der Frühholzanteil. Korrelationen zwischen Merkmalen können vor allem bei der gleichzeitigen Verwendung dieser Variablen in einer multiplen linearen Regression zu Problemen führen bzw. unzulässig sein. Auf dieses Problem und notwendige statistische Tests wurde im Abschnitt 9.6 bereits näher eingegangen.

Tabelle 19: Korrelationsmatrix der Holzmerkmale

	Dichte	Frühholzanteil	Jahrringbreite
Dichte	1,000	-0,500	0,321
Frühholzanteil	-0,500	1,000	-0,760
Jahrringbreite	0,321	-0,760	1,000

10.2.6 Diskussion - Aufnahme und Auswertung der erhobenen Brettmerkmale

Die Erhebung der Brettmerkmale erfolgte, um die Einflüsse dieser Merkmale in einer multiplen linearen Regressionsanalyse zur Bruchenergieprüfung bzw. zur Rissbildungsuntersuchung durch eine Zyklusbehandlung analysieren zu können. Des Weiteren wurde untersucht, ob sich die gebildeten Gruppen betreffend dieser Merkmale unterscheiden. Systematische Gruppenunterschiede in diesen Drittvariablen würden es erschweren, Gruppenunterschiede auf die experimentellen Bedingungen selbst zurück zu führen. Anhand der Ergebnisse wurde festgestellt, dass die Merkmale Dichte, Jahrringbreite und Frühholzanteil in den Gruppen gleich verteilt sind und somit diese Gruppen hinsichtlich dieser Merkmale als vergleichbar angesehen werden können. Nur das Merkmal

Jahrringlage zeigt Unterschiede in den gebildeten Gruppen. Dies muss vor allem dann berücksichtigt werden, wenn diese Gruppen direkt verglichen werden und die Jahrringlage einen signifikanten Einfluss zeigt.

10.3 Bruchenergieprüfung

Um die Auswirkung von unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen und thermischen Behandlungsintensitäten auf die strukturelle Festigkeit bzw. auf die Bildung von Rissen oder Mikrorissen zu untersuchen, wurden Bruchenergieprüfungen, wie in Punkt 9.3.5 beschrieben, durchgeführt. Die detaillierten Einzelwerte sind in Tabelle 44, Abschnitt 13.4, im Anhang angeführt. Ausgewertet wurden die maximale Prüfkraft während der Bruchenergieprüfung (F_{\max}), die notwendig ist um die Rissbildung einzuleiten, die Energie die notwendig ist um die Rissbildung einzuleiten (W bis F_{\max}) und die Gesamtbruchenergie die notwendig ist um den Probekörper zu spalten (W_{Gesamt}). Aus der Gesamtbruchenergie und der Fläche wurde die spezifische Bruchenergie (G_f) berechnet. In den folgenden Abschnitten werden die gemessenen Bruchenergiewerte (abhängige Variable) und die aufgenommenen Prozess-, Holz- und Brettmerkmale (unabhängige Variablen) in einer multiplen linearen Regressionsanalyse untersucht und die Probengruppen für unterschiedliche Behandlungsintensität, Abkühlungsbedingung und Prüfrichtung direkt durch einen T-Test verglichen.

10.3.1 Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung

Um den Einfluss der erhobenen Brett-, Holz- und Prozessmerkmale auf die verschiedenen Messwerte aus der Bruchenergieprüfung zu untersuchen, wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Ziel dieser Analyse ist es, signifikante Einflussmerkmale zu identifizieren und deren Einflussstärke festzustellen. In Tabelle 20, Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die Ergebnisse dargestellt. Von Interesse sind hierbei vor allem das Bestimmtheitsmaß des Modells, die standardisierten Koeffizienten und die Signifikanz der einzelnen unabhängigen Variablen. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) gibt an, wie viel Prozent der Streuung der abhängigen Variable durch die im Modell enthaltenen Merkmale erklärt werden. Mit Hilfe der standardisierten Koeffizienten kann die Einflussstärke der einzelnen Merkmale auf die abhängige Variable (Werte aus der Bruchenergieprüfung) abgeschätzt werden und das Vorzeichen bestimmt die Wirkrichtung. Die Signifikanz gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass der Regressionskoeffizient dieser Variable in der Grundgesamtheit 0 ist. In dieser Arbeit werden nur Merkmale mit einer Signifikanz von $\alpha < .05$ berücksichtigt.

10.3.1.1 Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung F_{\max}

In Tabelle 20 ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für die maximale Prüfkraft während der Bruchenergieprüfung (F_{\max}) dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß mit 0,434 ist gering. Das bedeutet, dass nur 43,4% der Streuung der F_{\max} Werte durch die erhobenen Merkmale erklärt werden. Jedoch ist anhand der standardisierten Koeffizienten zu erkennen, dass die Dichte mit 0,419 den größten Einfluss der erhobenen Merkmale hat. Auch die Behandlungsintensität mit -0,343 und die Prüfrichtung mit -0,249 zeigen einen Einfluss. Die erhobenen Merkmale Jahrringbreite, Jahrringlage, Frühholzanteil und Abkühlungsbedingung zeigen keine signifikanten Einflüsse. Zu beachten ist, dass als Referenzgruppen in der Regressionsanalyse Jahrringlage "halbrift", Abkühlung "rasch", Prüfrichtung "radial" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" herangezogen wurden und daher in der Tabelle nicht angeführt sind.

Tabelle 20: Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung F_{max}

Modell: abhängige Variable F_{max}		R= 0,658	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.
		R ² =0,434	Regressionskoeffizienten	Standardfehler		
unabhängige Variablen	Konstante		95,351	42,624		,026
	Dichte		270,105	41,799	,419	,000
	Jahringbreite		-2,611	3,282	-,064	,427
	Frühholzanteil		-,557	,373	-,136	,137
	Jahringlage rift ^A		-4,158	5,213	-,045	,426
	Jahringlage flader ^A		3,983	4,807	,047	,408
	Abkühlung schonend ^B		-1,633	4,008	-,020	,684
	Prüfrichtung tangential ^C		-20,024	3,872	-,249	,000
	Behandlungsintensität forte ^D		-27,644	4,338	-,343	,000

Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung rasch
C Prüfrichtung radial
D Behandlungsintensität mezzo-exterior

10.3.1.2 Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung W bis F_{max}

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse für W bis F_{max} dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) mit 0,382 ist gering. Das bedeutet, dass nur 38,2% der Streuung von W bis F_{max} durch die erhobenen Merkmale erklärt werden. Jedoch ist anhand der standardisierten Koeffizienten zu erkennen, dass die Behandlungsintensität mit -0,386 den größten Einfluss der erhobenen Merkmale hat. Auch die Dichte mit 0,310 zeigt einen Einfluss. Die erhobenen Merkmale Jahringbreite, Jahringlage, Frühholzanteil, Prüfrichtung und Abkühlungsbedingung zeigen keine signifikanten Einflüsse. Zu beachten ist, dass als Referenzgruppen Jahringlage "halbrift", Abkühlung "rasch", Prüfrichtung "radial" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" herangezogen wurden und daher in der Tabelle nicht angeführt sind.

Tabelle 21: Regressionsanalyse - Bruchenergieprüfung W bis F_{max}

Modell: abhängige Variable W bis F_{max}		R= 0,618	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.
		R ² = 0,382	Regressionskoeffizienten	Standardfehler		
unabhängige Variablen	Konstante		6,909	27,095		,799
	Dichte		121,090	26,632	,310	,000
	Jahringbreite		2,997	2,078	,121	,150
	Frühholzanteil		-,101	,237	-,041	,671
	Jahringlage rift ^A		3,721	3,315	,067	,263
	Jahringlage flader ^A		-,877	3,063	-,017	,775
	Abkühlung schonend ^B		-1,436	2,549	-,030	,574
	Prüfrichtung tangential ^C		,198	2,460	,004	,936
	Behandlungsintensität forte ^D		-18,840	2,762	-,386	,000

Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung rasch
C Prüfrichtung radial
D Behandlungsintensität mezzo-exterior

10.3.1.3 Regressionsanalyse - Spezifische Bruchenergie G_f

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die spezifische Bruchenergie (G_f) dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) mit 0,457 der Regressionsanalyse ist gering, jedoch der höchste Wert bezüglich der Regressionsanalysen zur Bruchenergieprüfung. Das bedeutet, dass 45,7% der Streuung von G_f durch die erhobenen Merkmale erklärt werden. Anhand der standardisierten Koeffizienten ist zu erkennen, dass die Behandlungsintensität mit -0,614 den größten Einfluss der erhobenen Merkmale hat. Auch die Dichte mit 0,171 und die Prüfrichtung mit 0,134 zeigen signifikante Einflüsse. Die erhobenen Merkmale Jahringbreite, Jahringlage, Frühholzanteil und Abkühlungsbedingung zeigen keine signifikanten Einflüsse. Zu beachten ist, dass als Referenzgruppen Jahringlage "halbrift", Abkühlung "rasch", Prüfrichtung "radial" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" herangezogen wurden und daher in der Tabelle nicht angeführt sind.

Tabelle 22: Regressionsanalyse - spezifische Bruchenergie G_f

Modell: abhängige Variable G_f		R= 0,676	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.
		R ² = 0,457	Regressionskoeffizienten	Standardfehler		
unabhängige Variablen	Konstante		117,418	54,988		,034
	Dichte		121,368	54,384	,171	,027
	Jahringbreite		1,408	4,069	,031	,730
	Frühholzanteil		-,224	,468	-,051	,634
	Jahringlage rift ^A		-10,701	6,203	-,109	,086
	Jahringlage flader ^A		5,532	5,937	,059	,353
	Abkühlung schonend ^B		-3,961	4,870	-,045	,417
	Prüfrichtung tangential ^C		11,777	4,730	,134	,014
	Behandlungsintensität forte ^D		-54,293	5,495	-,614	,000

Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung rasch
C Prüfrichtung radial
D Behandlungsintensität mezzo-exterior

10.3.2 Genaue Untersuchung der Merkmale Abkühlungsbedingung, Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Da eine der Hauptaufgaben dieser Diplomarbeit darin besteht, den Einfluss der Abkühlungsbedingung und der Behandlungsintensität auf ausgewählte Materialkennwerte zu untersuchen, werden die gebildeten Gruppen direkt auf Unterschiede durch einen zweiseitigen T-Test für unabhängige Stichproben geprüft. Wie in den Regressionsanalysen zur Bruchenergieprüfung dargestellt, kann die Streuung der Messwerte (F_{max} , W bis F_{max} und G_f) nur zu einem geringen Anteil (ca. 40%) durch die erhobenen Merkmale erklärt werden. Die größten signifikanten Einflüsse der erhobenen Merkmale zeigen die Dichte, die Behandlungsintensität und die Prüfrichtung. Da die Dichte homogen über die gebildeten Gruppen verteilt ist (siehe Punkt 10.2.1) und für Behandlungsintensität, Prüfrichtung und Abkühlungsbedingung eigene Gruppen gebildet wurden, ist ein direkter Vergleich der Gruppen möglich. Hinzuweisen ist darauf, dass der größte Anteil der Streuung der Werte aus der Bruchenergieprüfung (ca. 60%) durch die erhobenen Merkmale nicht erklärt werden kann. Für die Gültigkeit eines direkten Vergleichs mit einem T-Test muss die Annahme getroffen werden, dass auch sonstige nicht erhobene Einflussvariablen homogen über die gebildeten Probengruppen verteilt sind.

10.3.2.1 T-Test für Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen

Wie in Tabelle 23 zu erkennen ist, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlich abgekühlten Proben Gruppen weder in radialer noch in tangentialer Prüfrichtung. In Abbildung 58 sind die Messwerte in Form von Box-Plots dargestellt, wobei Gruppen mit gleicher Farbe verglichen werden. In Abbildung 59, Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 sind die Bruchenergie F_{max} Werte in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen, Behandlungsintensitäten und Prüfrichtungen dargestellt. Man kann erkennen, dass in einigen Fällen eine Korrelation der F_{max} Werte mit der Dichte besteht, jedoch kein Unterschied aufgrund unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen festgestellt werden kann.

Tabelle 23: Vergleich der Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung

Gruppen- bezeichnung	F_{max}				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[N]	[N]	[%]	
FRt	30	175,87	24,85	14,13	0,371
FSt	28	181,89	26,06	14,32	
FRr	30	207,20	41,29	19,93	0,332
FSr	29	197,07	38,09	19,33	
MRt	33	211,94	26,33	12,42	0,727
MSt	35	214,20	26,82	12,52	
MRr	32	230,19	41,52	18,04	0,897
MSr	36	228,69	52,12	22,79	

Legende:

FRt	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
FSt	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
FRr	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
FSr	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
MRt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
MSt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
MRr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch RL-Rissausbreitung
MSr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung

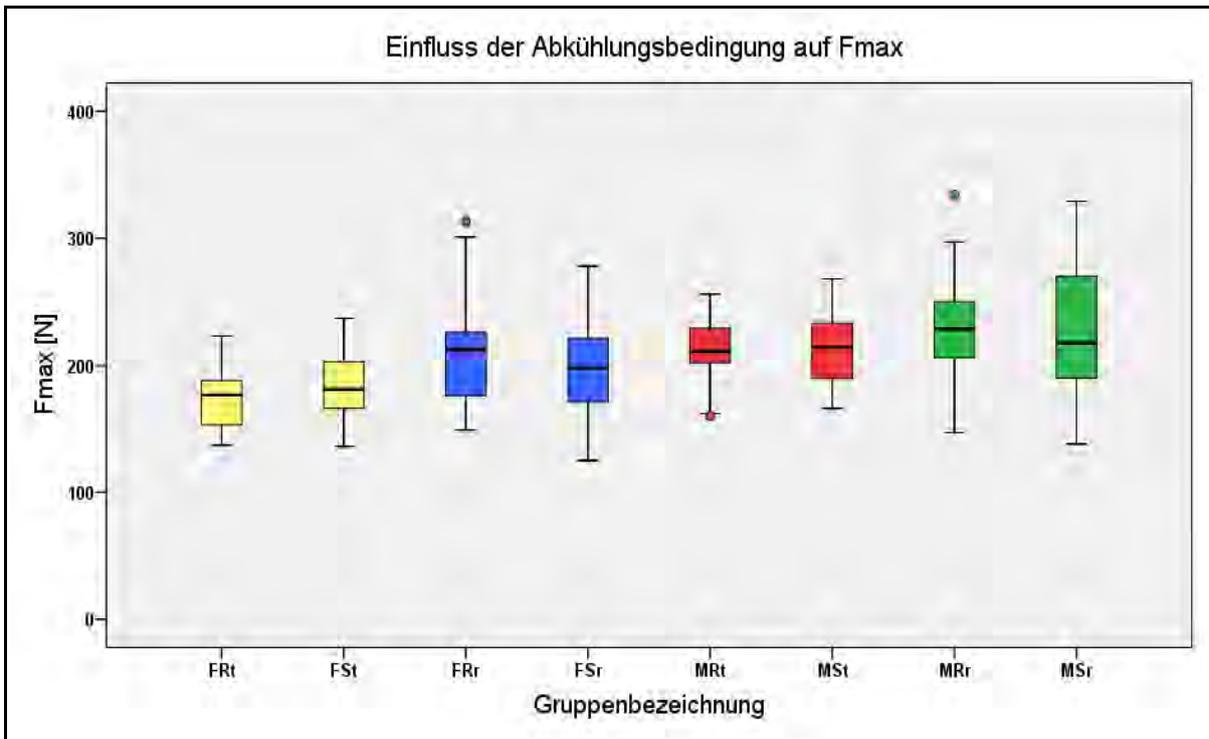


Abbildung 58: F_{max} bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL -Rissausbreitung

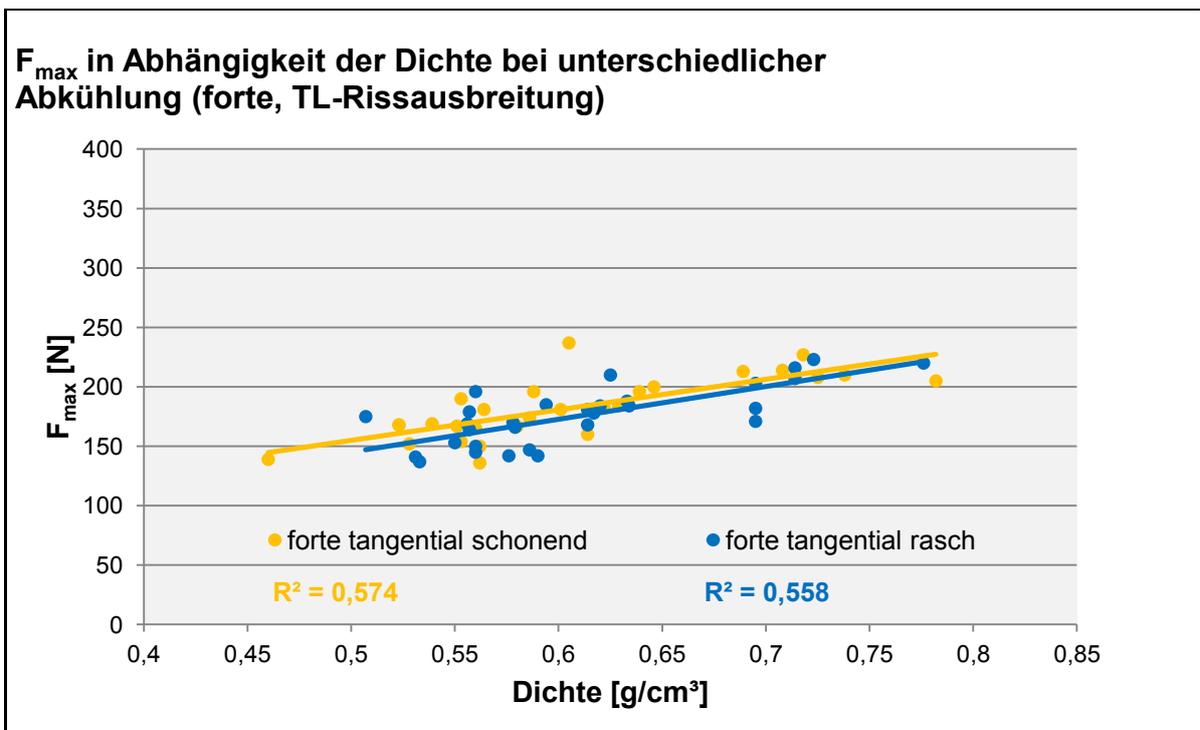


Abbildung 59: F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL-Rissausbreitung)

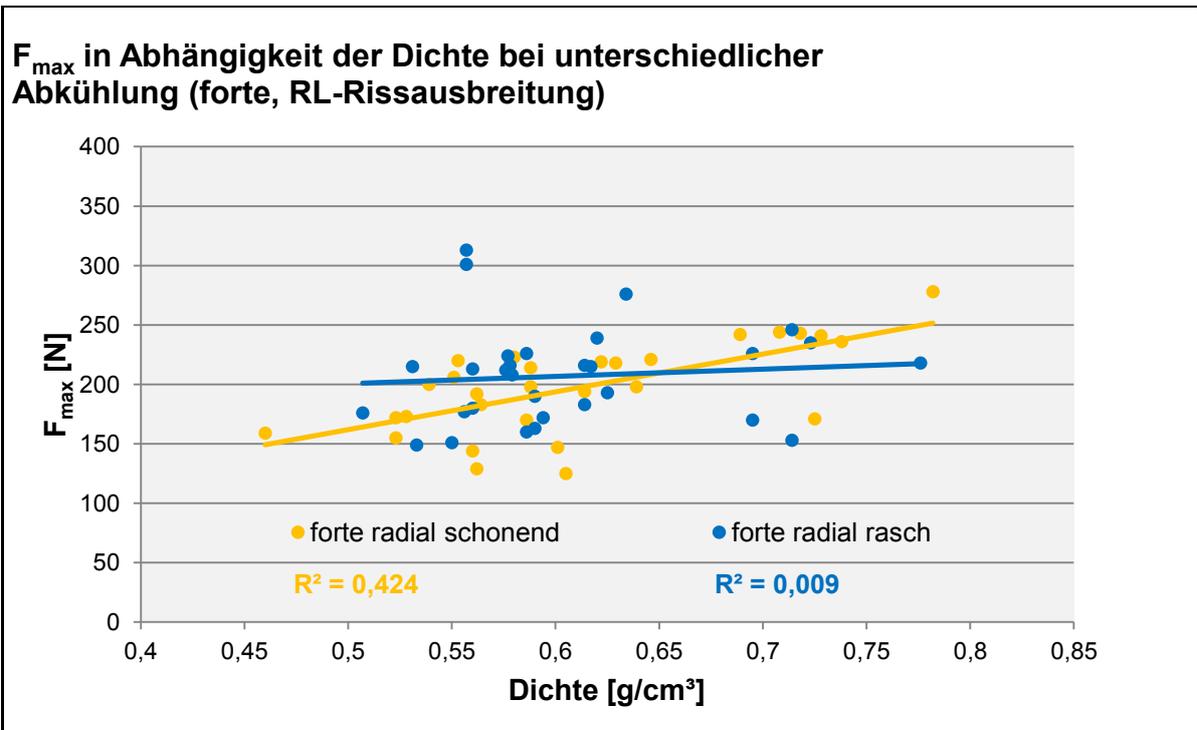


Abbildung 60: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung)

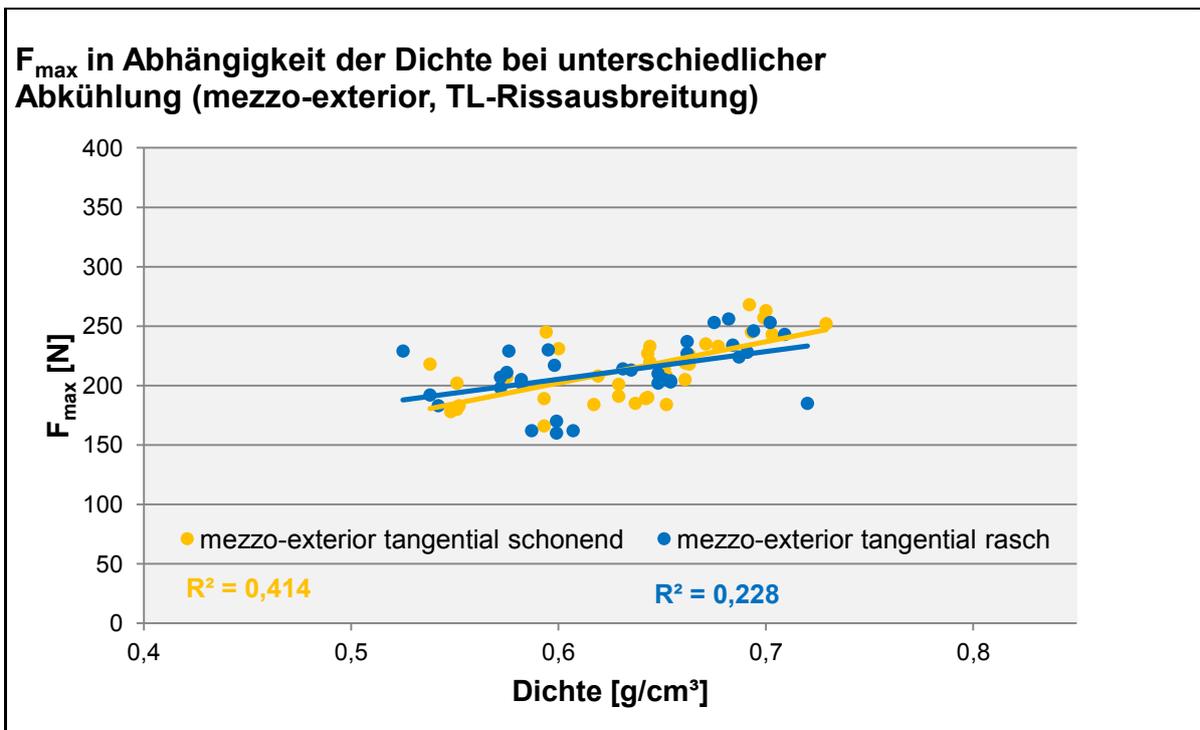


Abbildung 61: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung)

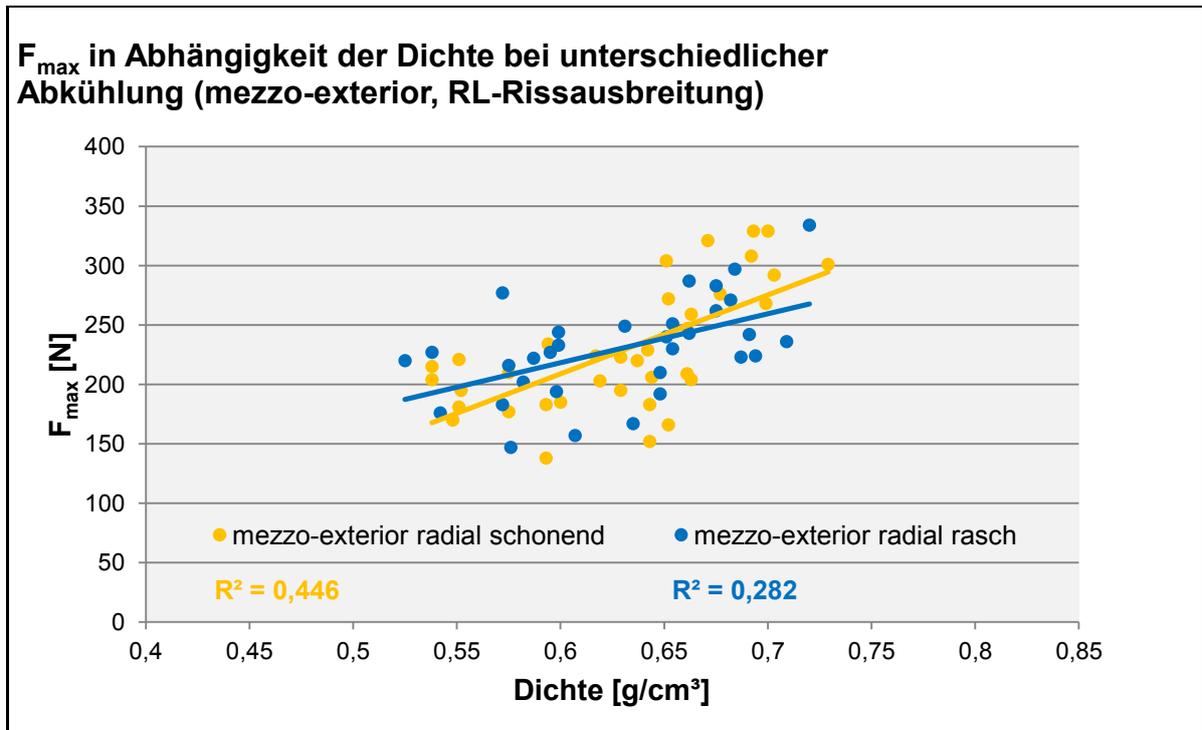


Abbildung 62: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)

10.3.2.2 T-Test für Bruchenergie F_{\max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Da unterschiedliche Abkühlungsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchenergie F_{\max} Messwerte zeigen (siehe Tabelle 23), werden die Gruppen für rasche und schonende Abkühlung zusammengefasst (Beispiel: $F_{St} + F_{Rt} = F_t$). Danach werden die neu gebildeten Probengruppen auf Unterschiede bezüglich Behandlungsintensität und Prüfrichtung untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 und Abbildung 63 im Überblick dargestellt. Wie in Tabelle 24, Abbildung 64 und Abbildung 65 zu erkennen ist, zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsintensitäten sowohl in RL-, als auch in TL-Rissausbreitung. Behandlungsintensität "mezzo-exterior" hat signifikant höhere Bruchenergie F_{\max} Werte im Vergleich zur Behandlungsintensität "forte". In Abbildung 66 und Abbildung 67 werden die Prüfrichtungen radial und tangential bei gleicher Behandlungsintensität verglichen. Hier ist zu erkennen, dass die F_{\max} Werte in radialer Prüfrichtung signifikant höher sind als in tangentialer Prüfrichtung.

Tabelle 24: Vergleich der Bruchenergie F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Gruppenbezeichnung	F_{max}				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[N]	[N]	[%]	
Ft	58	178,78	25,39	14,20	0,000
Mt	68	213,10	26,41	12,39	
Fr	59	202,22	39,74	19,65	0,000
Mr	68	229,40	47,09	20,53	
Ft	58	178,78	25,39	14,20	0,000
Fr	59	202,22	39,74	19,65	
Mt	68	213,10	26,41	12,39	0,014
Mr	68	229,40	47,09	20,53	

Legende:

- Ft Behandlung forte, TL-Rissausbreitung
- Mt Behandlung mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung
- Fr Behandlung forte, RL-Rissausbreitung
- Mr Behandlung mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung

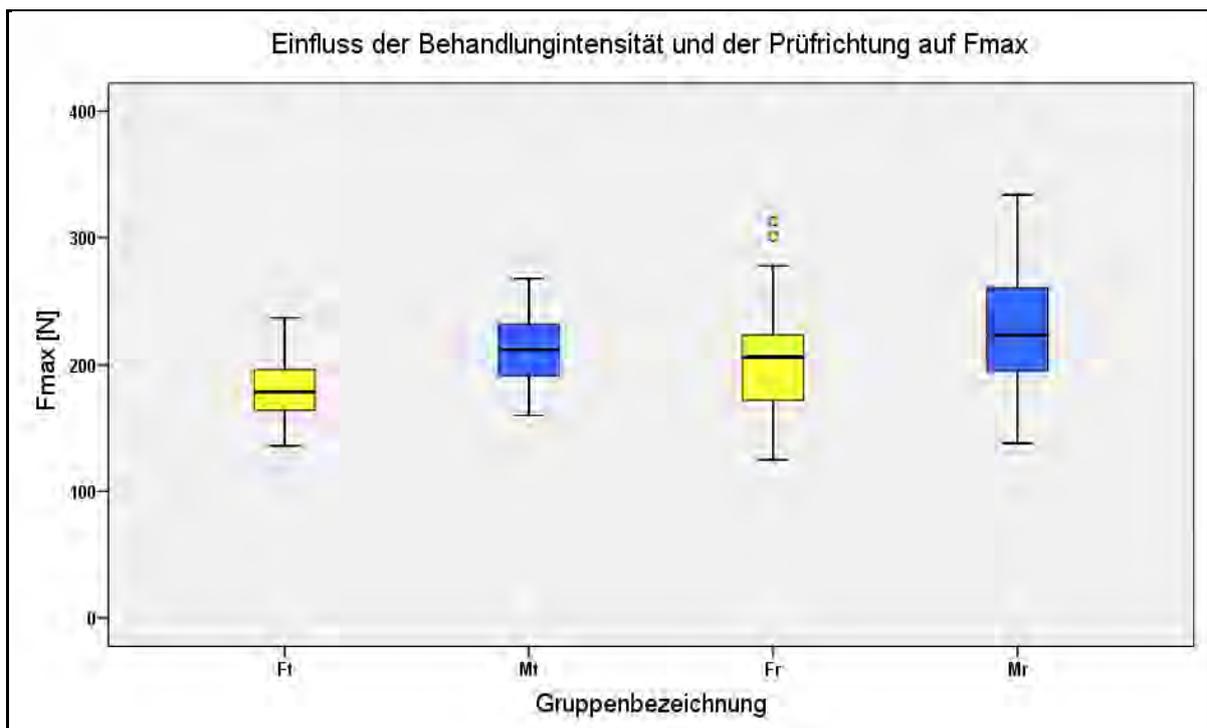


Abbildung 63: F_{max} bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

**F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte für die
Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior
(TL-Rissausbreitung)**

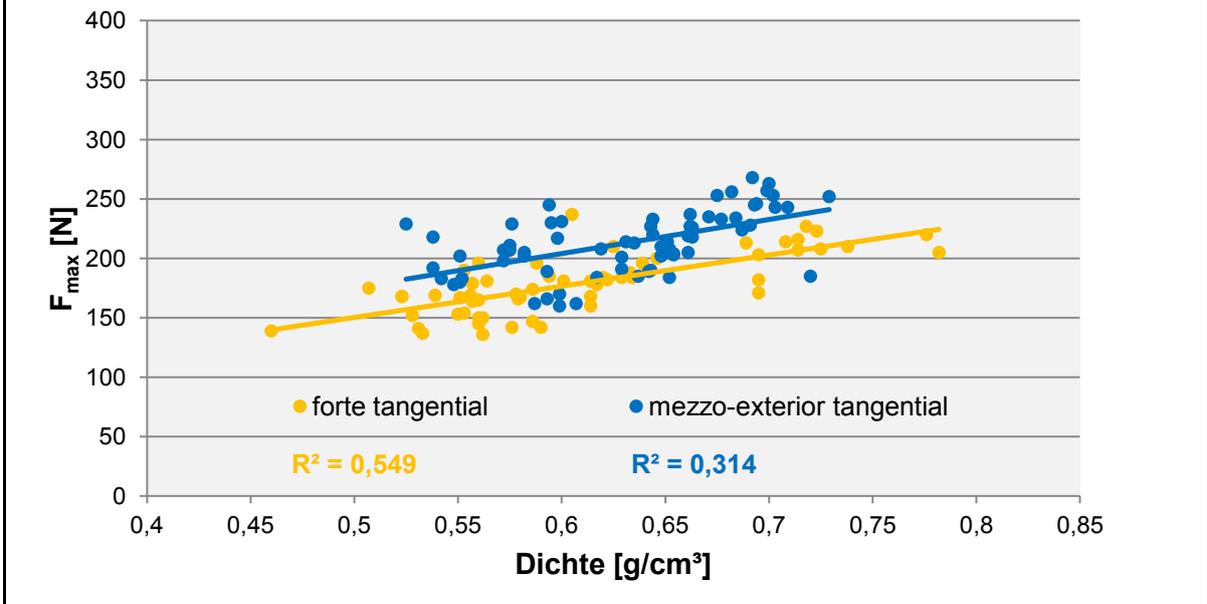


Abbildung 64: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung

**F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte für die
Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior
(RL-Rissausbreitung)**

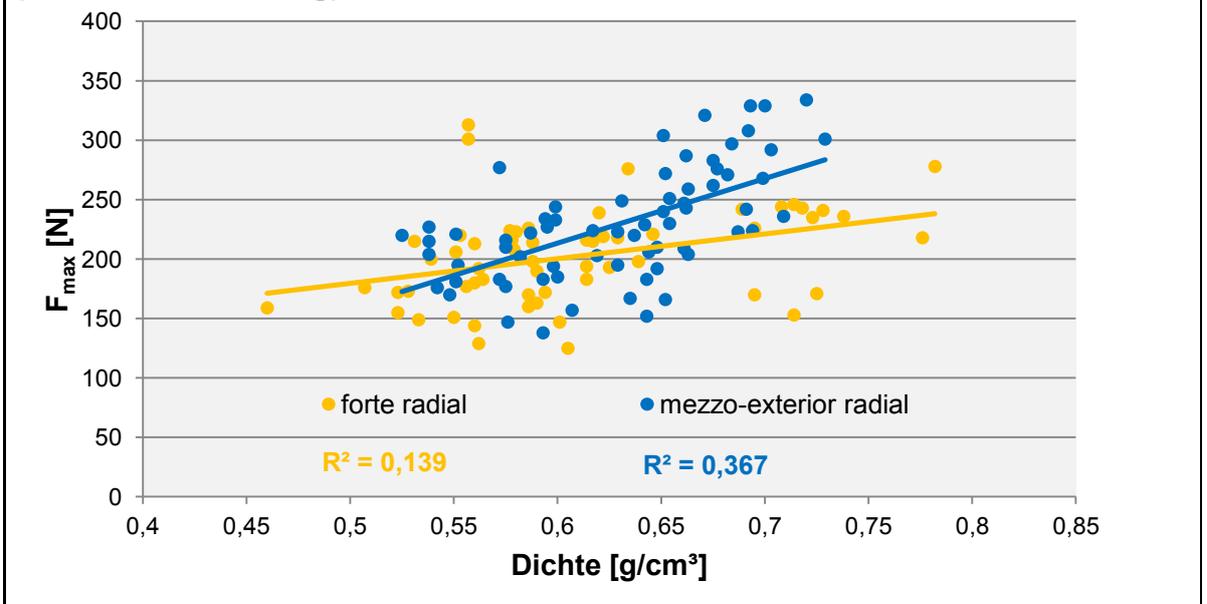


Abbildung 65: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung

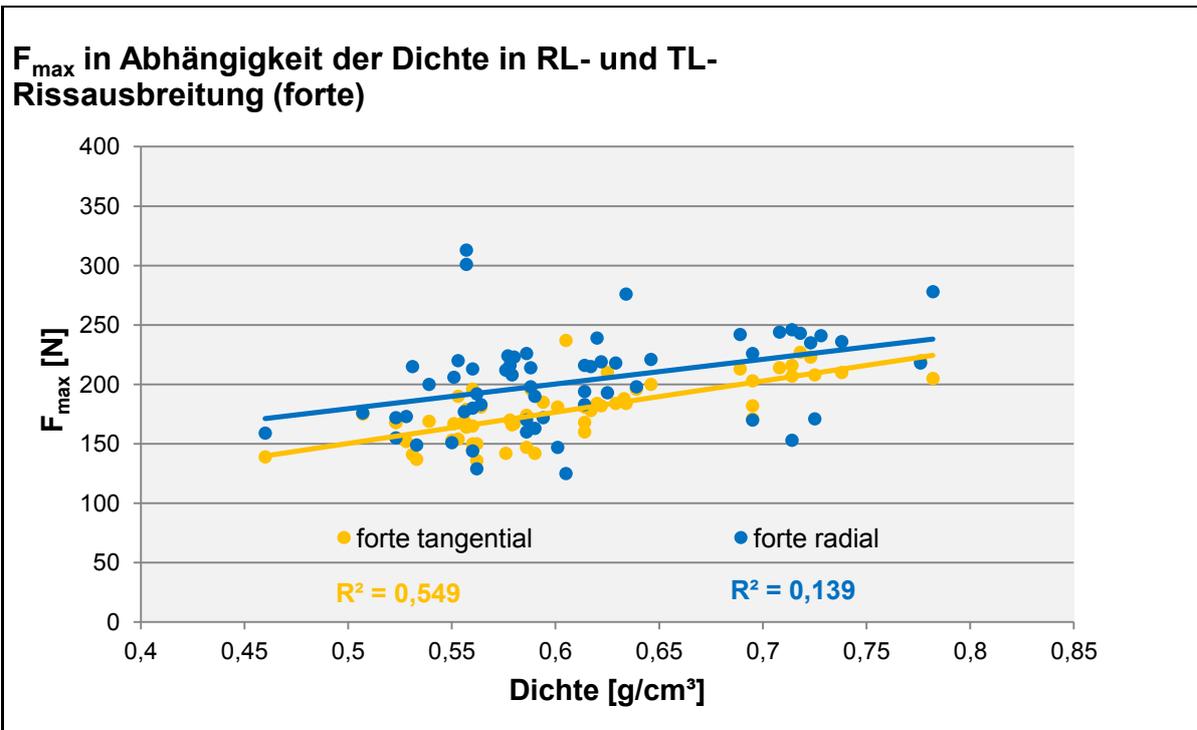


Abbildung 66: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)

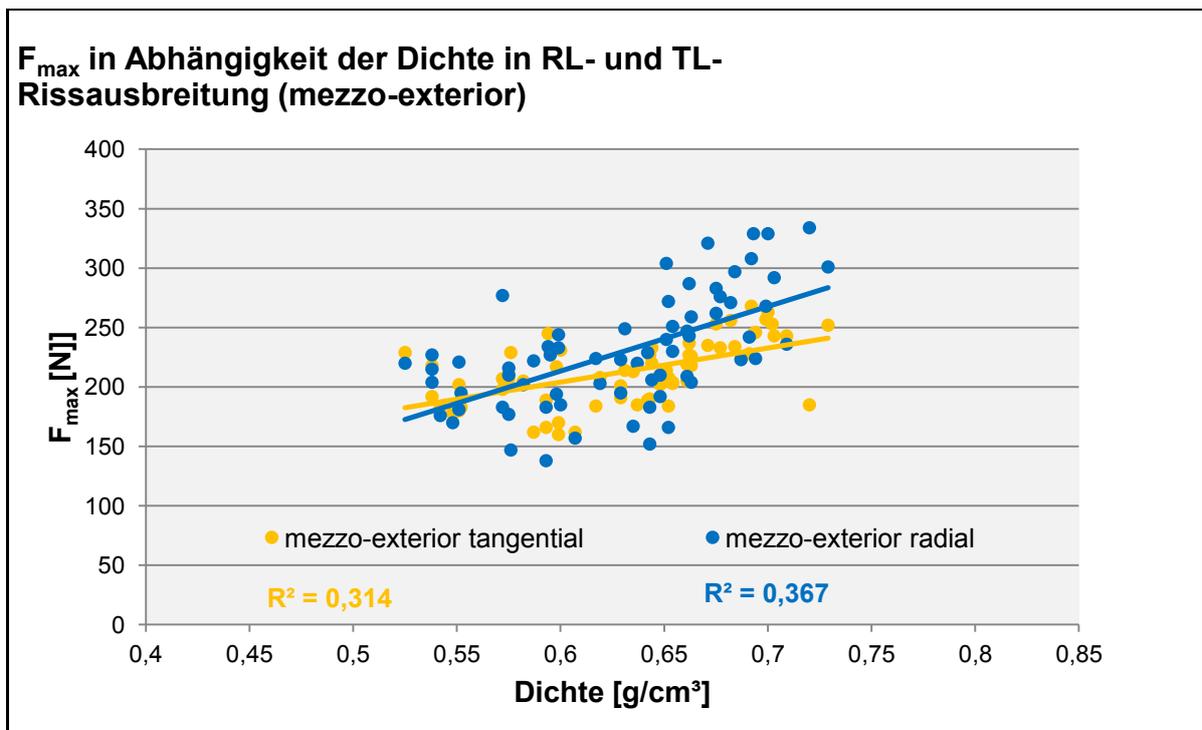


Abbildung 67: F_{\max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)

10.3.2.3 T-Test für Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen

Wie in Tabelle 25 zu erkennen ist, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlich abgekühlten Probengruppen, weder in radialer noch in tangentialer Prüfrichtung. In Abbildung 68 sind die Messwerte in Form von Box-Plots dargestellt, wobei Probengruppen mit gleicher Farbe verglichen werden. In Abbildung 69, Abbildung 70, Abbildung 71 und Abbildung 72 sind die Bruchenergie W bis F_{max} Werte in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen, Behandlungsintensitäten und Prüfrichtungen dargestellt. Man kann erkennen, dass in einigen Fällen eine Korrelation der Bruchenergie W bis F_{max} Werte und der Dichte besteht, jedoch kein signifikanter Unterschied aufgrund unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen festgestellt werden kann.

Tabelle 25: Vergleich der Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL- Rissausbreitung

Gruppen- bezeichnung	Bruchenergie W bis F_{max}				
	n	\bar{x}	s	VarK	T-Test Signifikanz
	[1]	[Nmm]	[Nmm]	[%]	
FRt	30	62,16	13,65	21,96	0,256
FSt	28	66,59	15,72	23,61	
FRr	30	64,70	17,56	27,14	0,669
FSr	29	66,56	15,39	23,12	
MRt	33	90,46	29,27	32,36	0,482
MSt	35	85,93	23,49	27,33	
MRr	30	88,74	24,93	28,09	0,478
MSr	36	84,19	26,45	31,42	

Legende:

FRt	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
FSt	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
FRr	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
FSr	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
MRt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
MSt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
MRr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch RL-Rissausbreitung
MSr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung

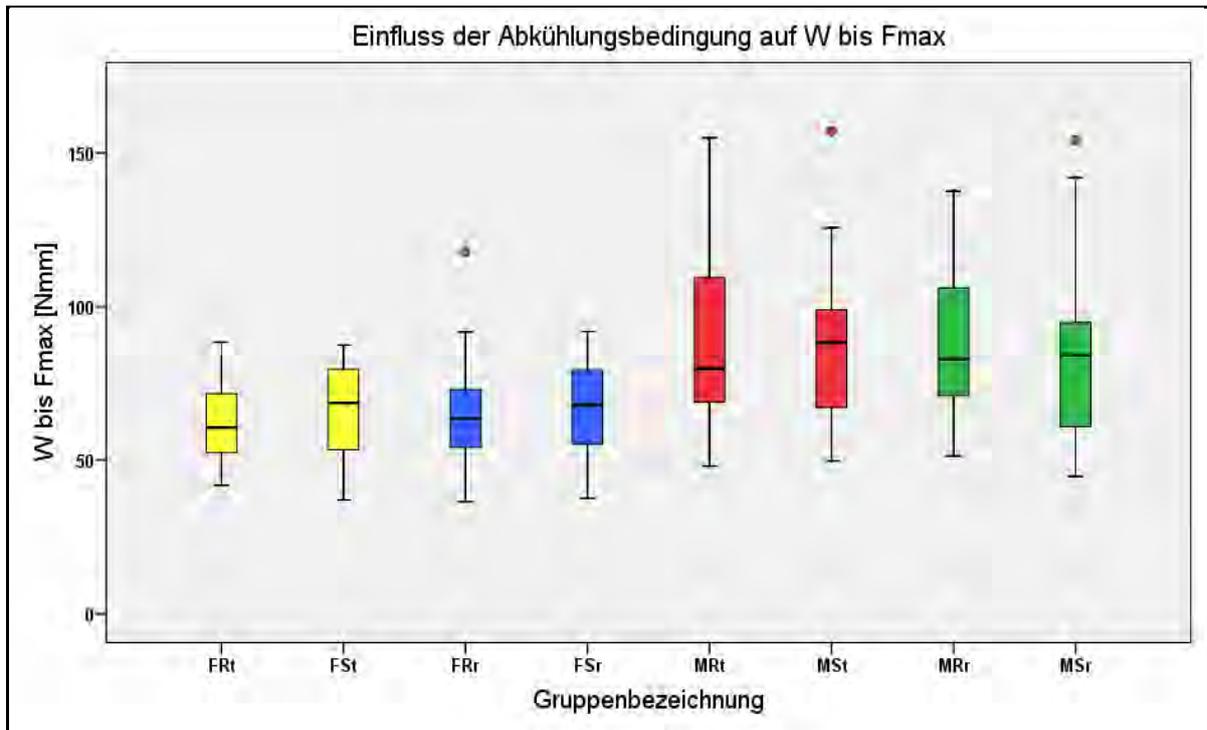


Abbildung 68: W bis F_{max} bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung

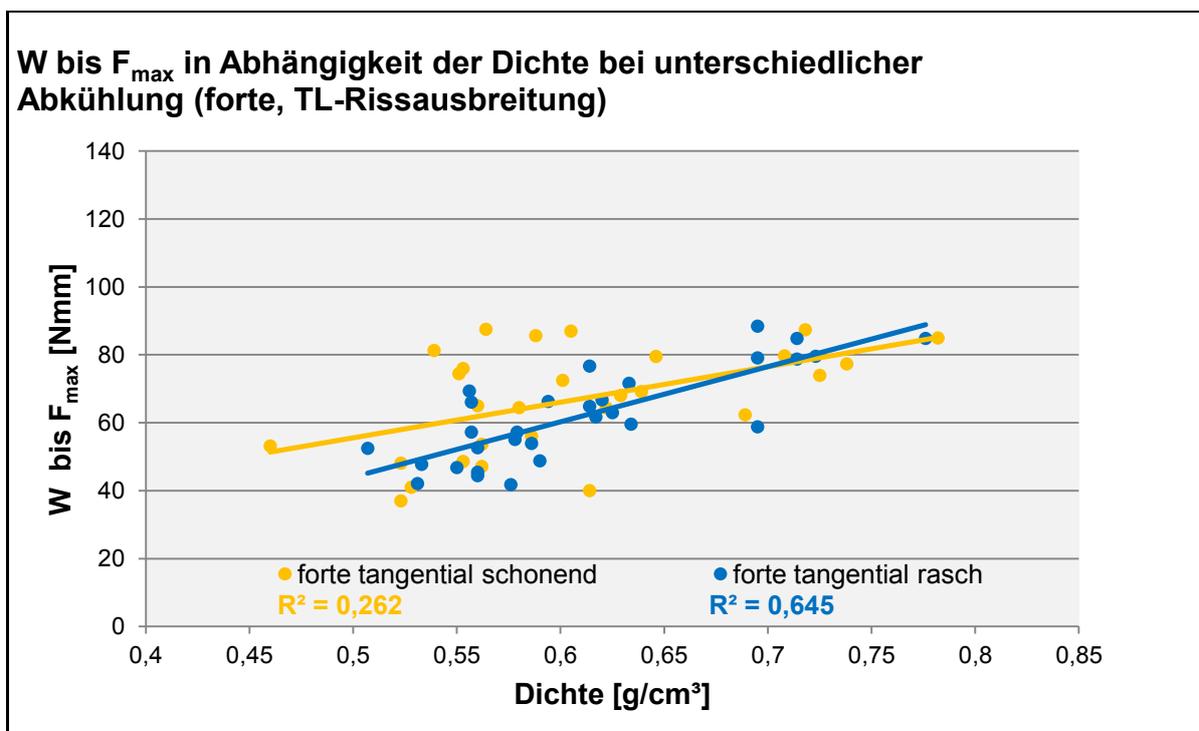


Abbildung 69: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL-Rissausbreitung)

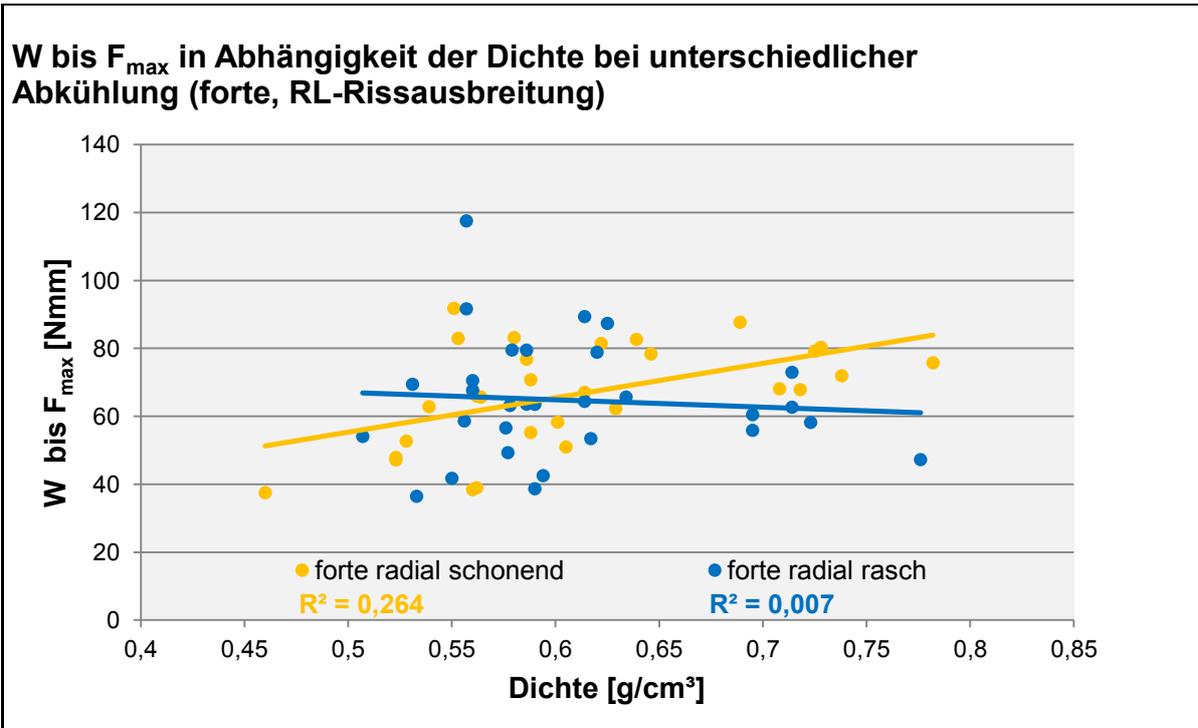


Abbildung 70: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung)

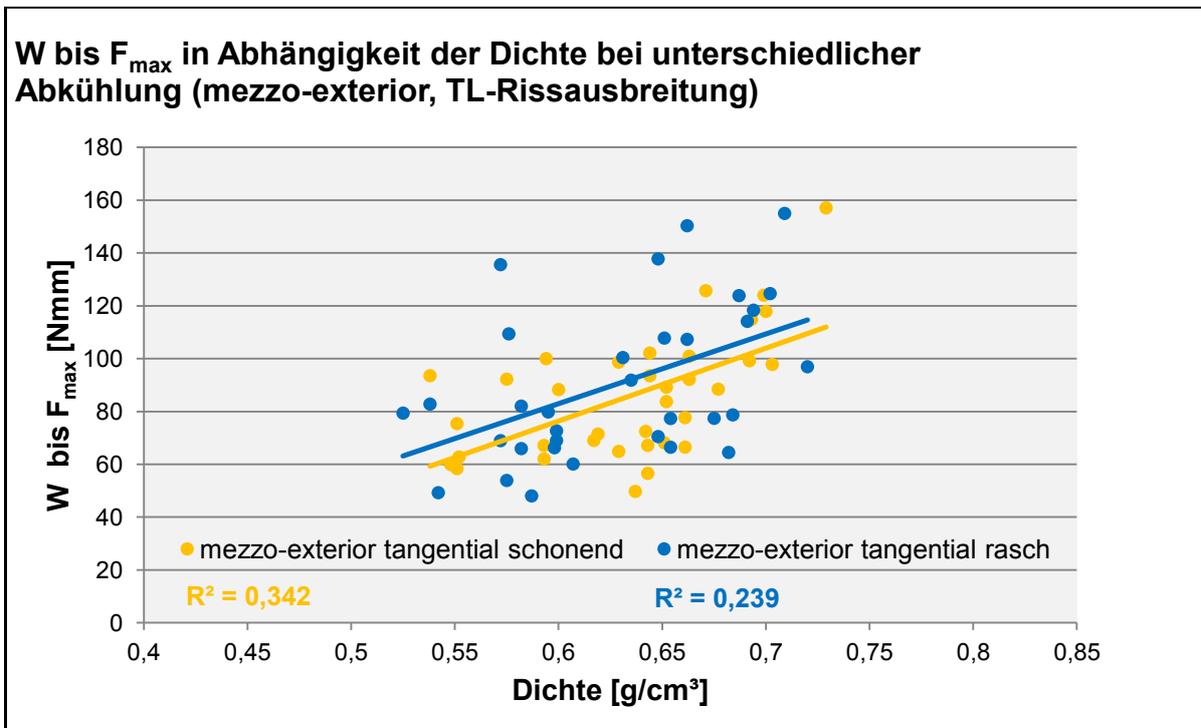


Abbildung 71: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung)

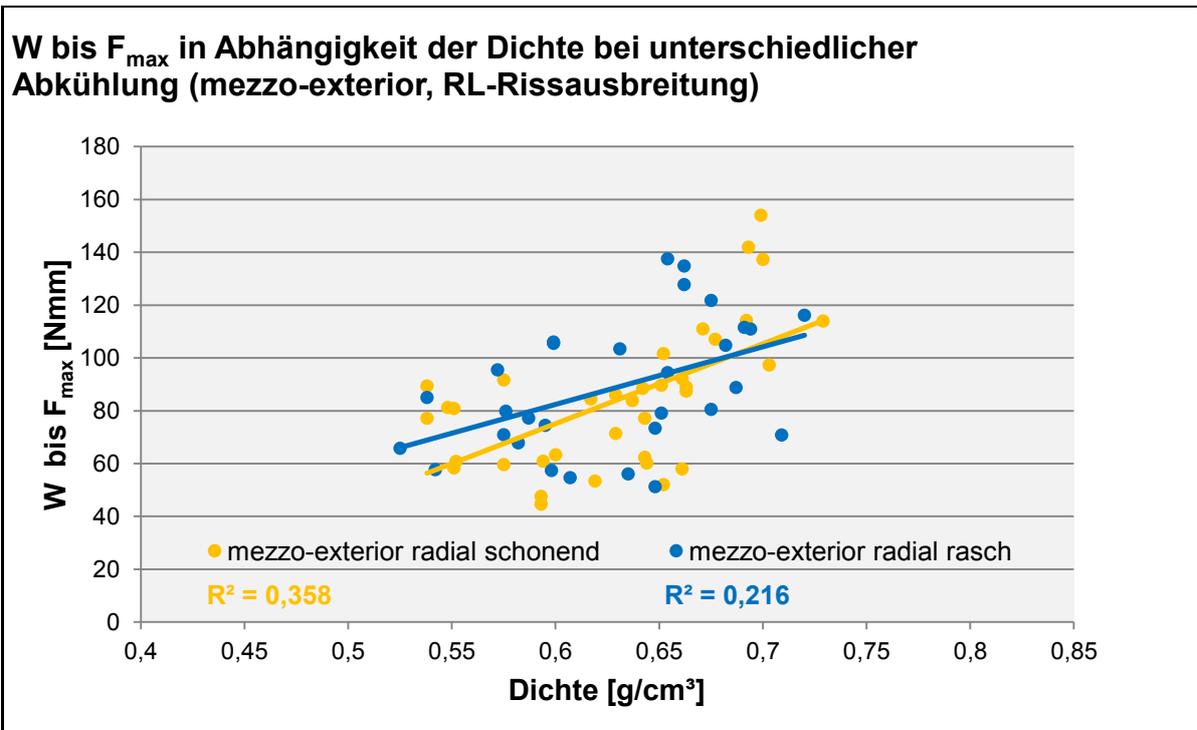


Abbildung 72: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)

10.3.2.4 T-Test für Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Da unterschiedliche Abkühlungsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchenergie W bis F_{max} Messwerte zeigen (siehe Tabelle 25), werden die Probengruppen für rasche und schonende Abkühlung zusammengefasst (Beispiel: FSt+FRt=Ft). Danach werden die neu gebildeten Probengruppen auf Unterschiede bezüglich Behandlungsintensität und Prüfrichtung untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 und Abbildung 73 im Überblick dargestellt. Wie in Abbildung 73, Abbildung 74 und Abbildung 75 zu erkennen ist, zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsintensitäten sowohl in RL-, als auch in TL-Rissausbreitung. Behandlungsintensität "mezzo-exterior" hat signifikant höhere Bruchenergie W bis F_{max} Werte als die Behandlungsintensität "forte". In Abbildung 76 und Abbildung 77 werden die Prüfrichtungen radial und tangential bei gleicher Behandlungsintensität verglichen. Hier ist zu erkennen, dass die W bis F_{max} Werte in radialer und tangentialer Prüfrichtung bei gleicher Behandlungsintensität keine signifikanten Unterschiede zeigen.

Tabelle 26: Vergleich der Bruchenergie W bis F_{max} Werte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Gruppenbezeichnung	Bruchenergie W bis F_{max}				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[Nmm]	[Nmm]	[%]	
Ft	58	64,30	14,73	22,90	0,000
Mt	68	88,13	26,35	29,90	
Fr	59	65,61	16,41	25,01	0,000
Mr	66	86,26	25,67	29,76	
Ft	58	64,30	14,73	22,90	0,649
Fr	59	65,61	16,41	25,01	
Mt	68	88,13	26,35	29,90	0,678
Mr	66	86,26	25,67	29,76	

Legende:

- Ft Behandlung forte, TL-Rissausbreitung
- Mt Behandlung mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung
- Fr Behandlung forte, RL-Rissausbreitung
- Mr Behandlung mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung

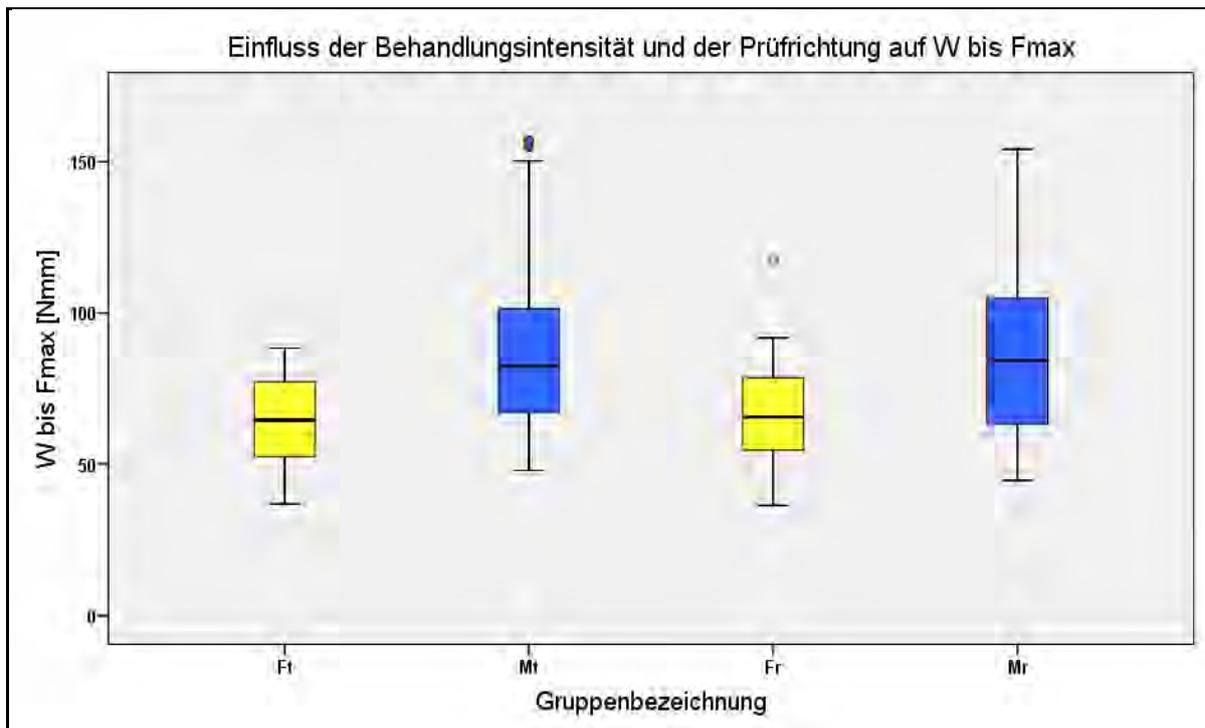


Abbildung 73: W die F_{max} bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

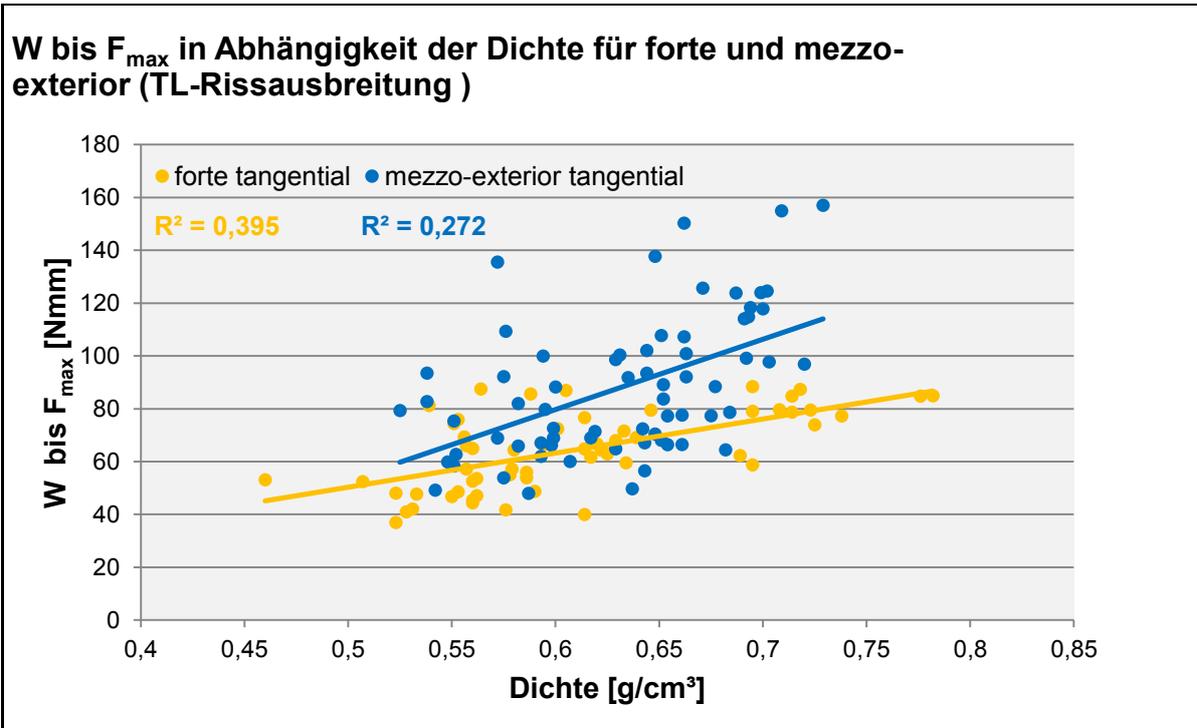


Abbildung 74: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung

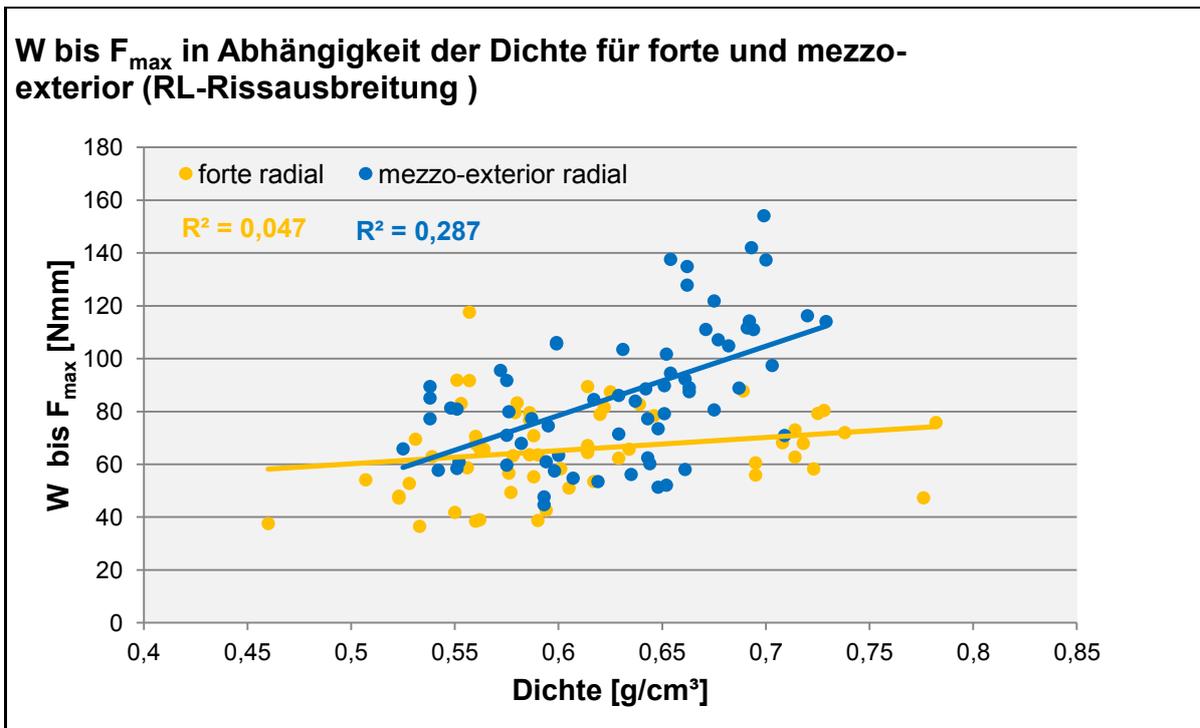


Abbildung 75: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung

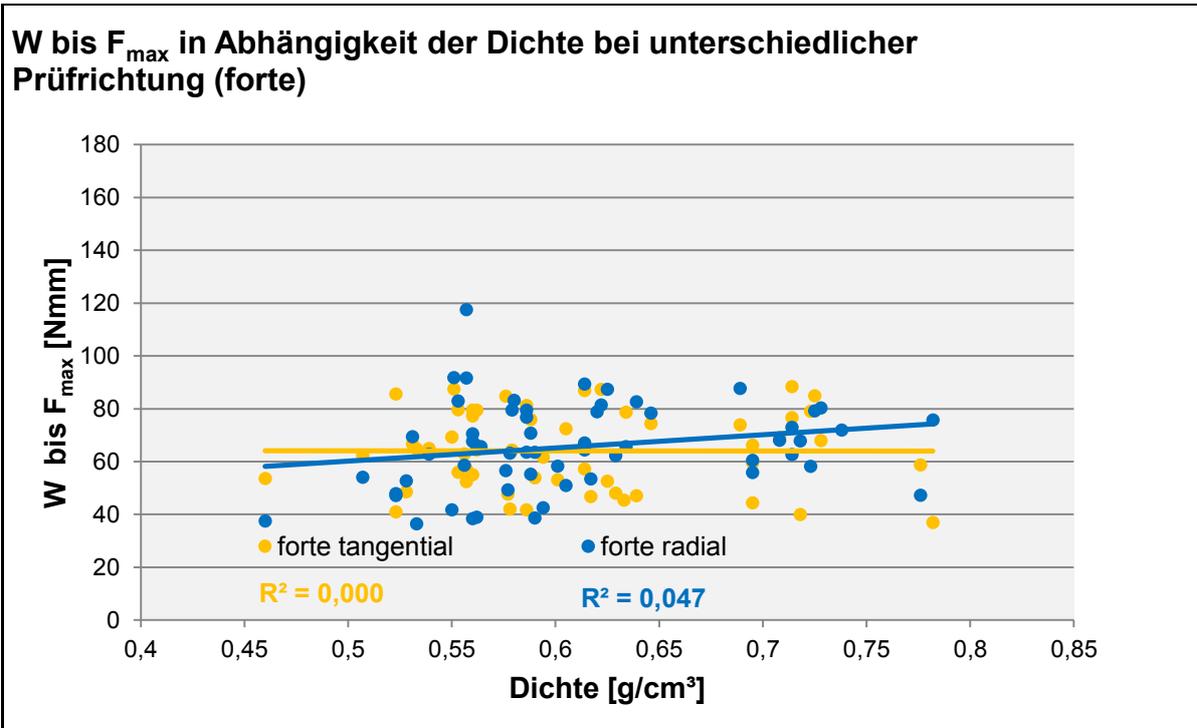


Abbildung 76: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)

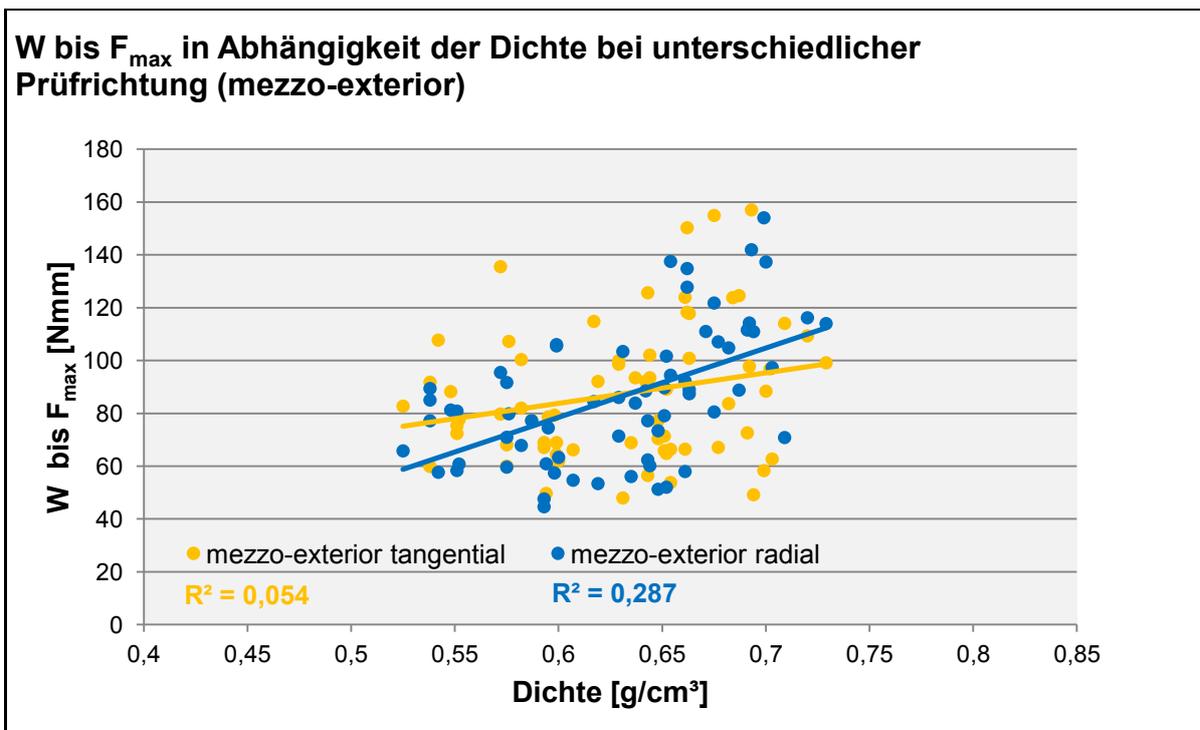


Abbildung 77: W bis F_{max} in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)

10.3.2.5 T-Test für die spezifische Bruchenergie G_f bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen

Wie in Tabelle 27 zu erkennen ist, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlich abgekühlten Probengruppen, weder in radialer noch in tangentialer Prüfrichtung. In Abbildung 78 sind die Messwerte in Form von Box-Plots dargestellt, wobei Probengruppen mit gleicher Farbe verglichen werden. In Abbildung 79, Abbildung 80, Abbildung 81 und Abbildung 82 ist die spezifische Bruchenergie (G_f) in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen, Behandlungsintensitäten und Prüfrichtungen dargestellt. Man kann erkennen, dass in einigen Fällen eine Korrelation der spezifischen Bruchenergie und der Dichte besteht, jedoch kein signifikanter Unterschied aufgrund unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen festgestellt werden kann.

Tabelle 27: Vergleich der spezifischen Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung

Gruppen- bezeichnung	Spezifische Bruchenergie G_f				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[J/m ²]	[J/m ²]	[%]	
FRt	20	142,10	31,50	22,17	0,987
FSt	23	141,95	28,23	19,88	
FRr	20	132,94	22,54	16,95	0,383
FSr	23	124,64	36,47	29,26	
MRt	27	198,10	41,74	21,07	0,563
MSt	28	191,74	39,33	20,51	
MRr	26	187,67	26,54	14,14	0,307
MSr	30	178,16	41,62	23,36	

Legende:

FRt	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
FSt	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
FRr	.....	Behandlung forte, Abkühlung rasch, RL-Rissausbreitung
FSr	.....	Behandlung forte, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung
MRt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch, TL-Rissausbreitung
MSt	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, TL-Rissausbreitung
MRr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung rasch RL-Rissausbreitung
MSr	.....	Behandlung mezzo-exterior, Abkühlung schonend, RL-Rissausbreitung

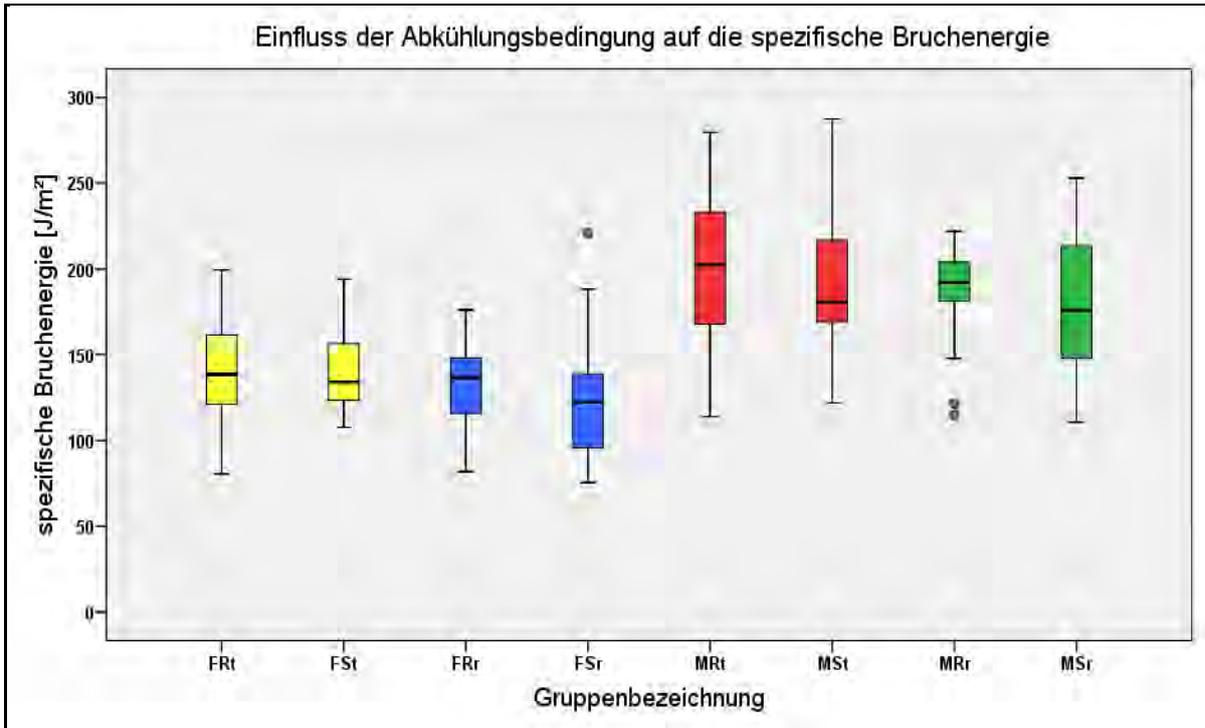


Abbildung 78: G_f bei unterschiedlicher Abkühlung in RL- und TL-Rissausbreitung

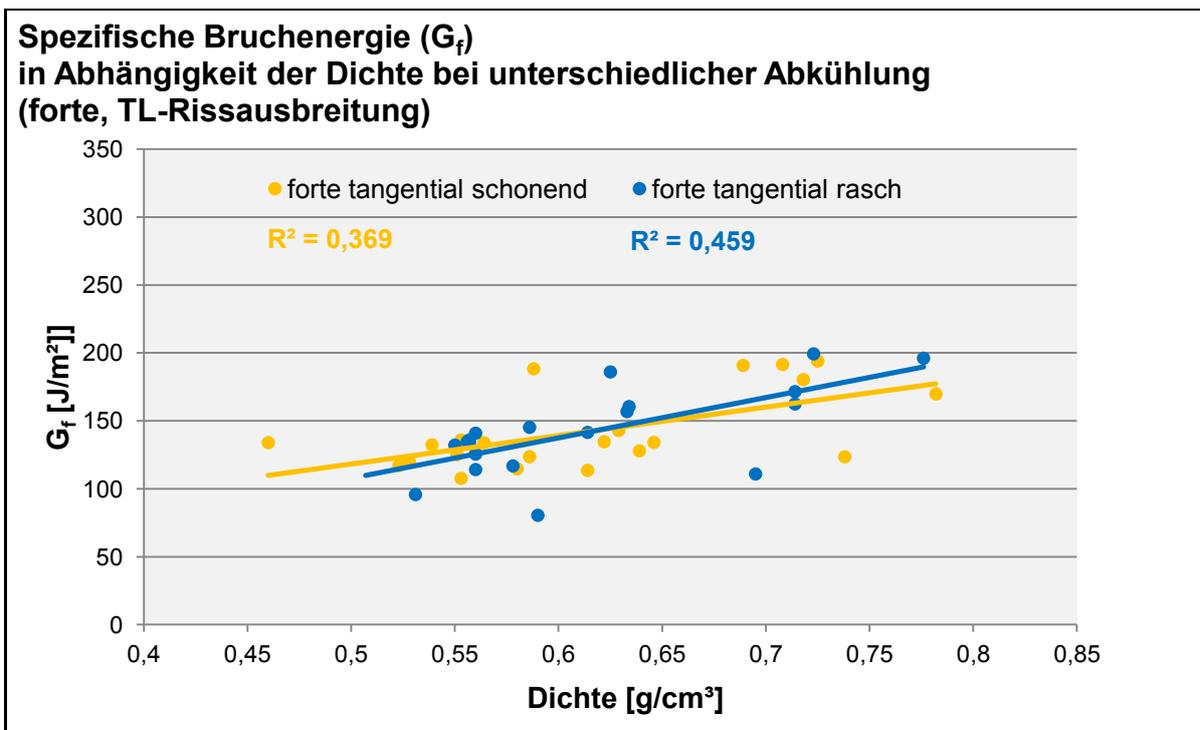


Abbildung 79: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, TL-Rissausbreitung)

**Spezifische Bruchenergie (G_f)
in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung
(forte, RL-Rissausbreitung)**

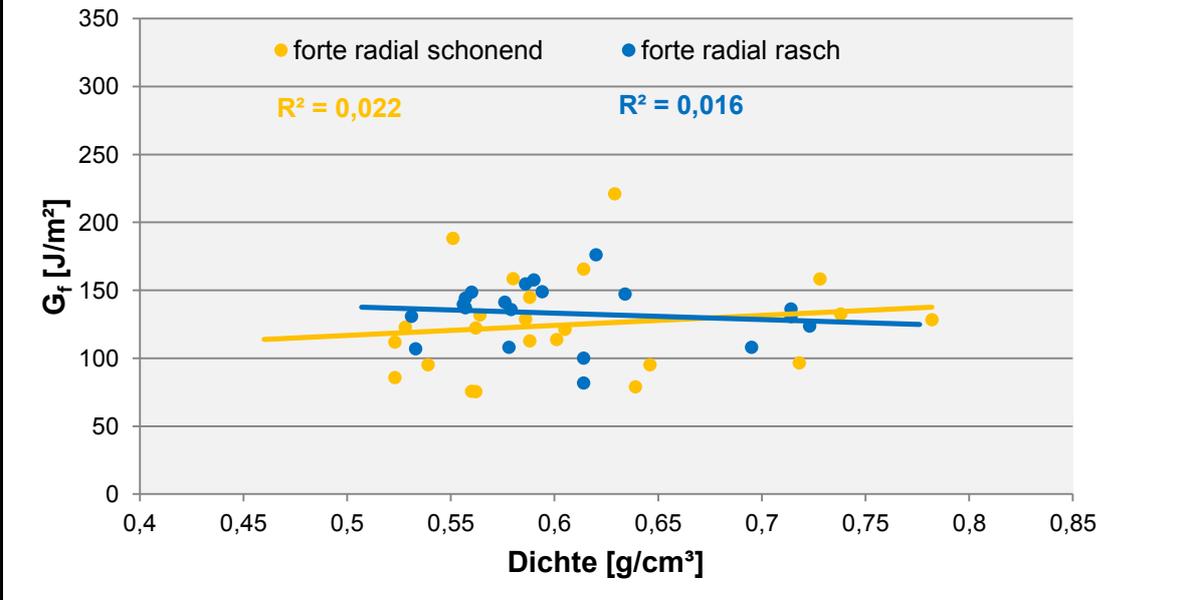


Abbildung 80: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte, RL-Rissausbreitung)

**Spezifische Bruchenergie (G_f)
in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung
(mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung)**

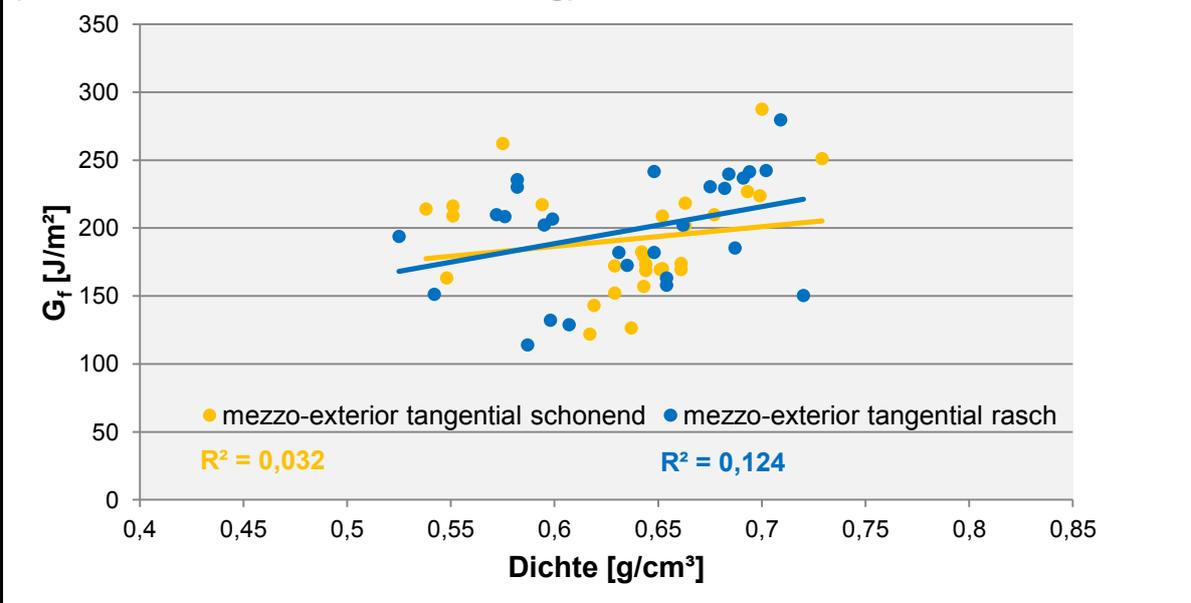


Abbildung 81: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung)

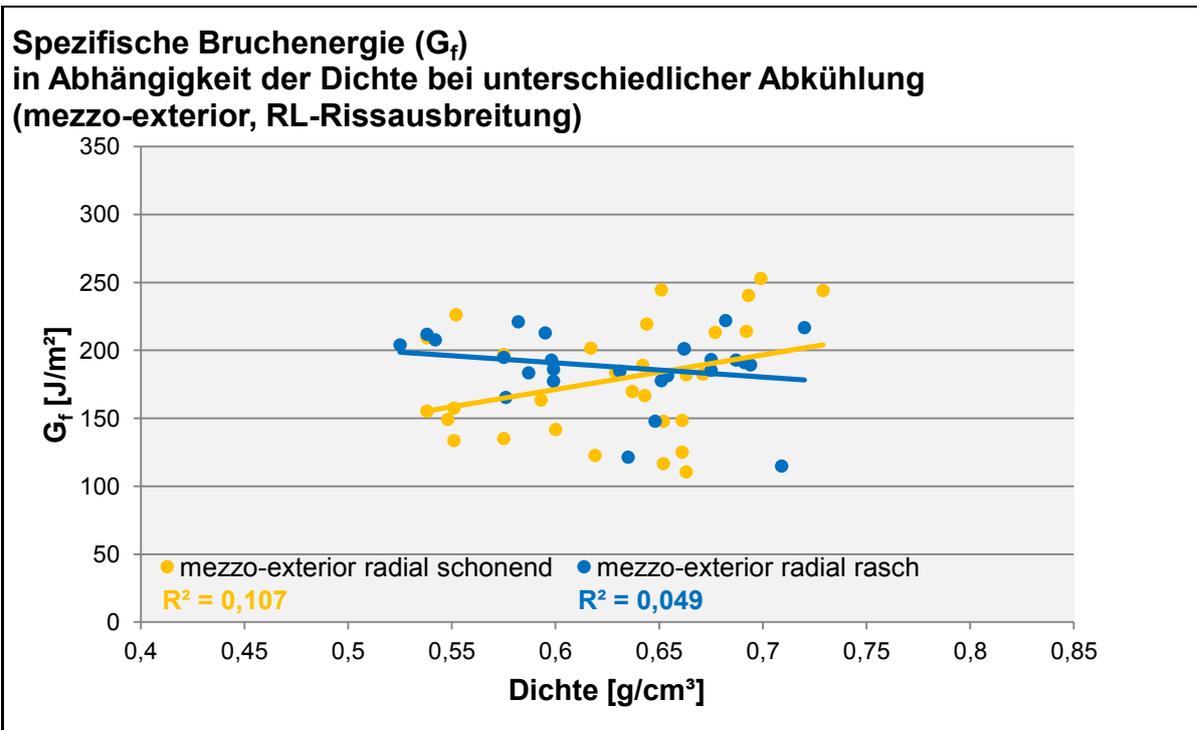


Abbildung 82: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung)

10.3.2.6 T-Test für die spezifischen Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Da unterschiedliche Abkühlungsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die spezifische Bruchenergie zeigen (siehe Tabelle 27), werden die Proben­gruppen für rasche und schonende Abkühlung zusammengefasst (Beispiel: $F_{St} + F_{Rt} = F_t$). Danach werden die neu gebildeten Proben­gruppen auf Unterschiede bezüglich Behandlungsintensität und Prüfrichtung untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 und Abbildung 83 im Überblick dargestellt. Wie in Tabelle 28, Abbildung 84 und Abbildung 85 zu erkennen ist, zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsintensitäten sowohl in RL-, als auch in TL-Rissausbreitung. Behandlungsintensität "mezzo-exterior" hat eine signifikant höhere spezifische Bruchenergie (G_f) als die Behandlungsintensität "forte". In Abbildung 86 und Abbildung 87 wird die Prüfrichtung in RL- und TL-Rissausbreitung bei gleicher Behandlungsintensität verglichen. Hier ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen RL- und TL-Rissausbreitung nur minimal sind. Für die Behandlungsintensität "forte" wurde eine signifikant höhere spezifische Bruchenergie in TL-Rissausbreitung festgestellt.

Tabelle 28: Vergleich der spezifischen Bruchenergie (G_f) bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

Gruppenbezeichnung	Spezifische Bruchenergie (G_f)				T-Test Signifikanz
	n	\bar{x}	s	VarK	
	[1]	[J/m ²]	[J/m ²]	[%]	
Ft	43	142,02	29,43	20,72	0,000
Mt	55	194,86	40,28	20,67	
Fr	43	128,50	30,72	23,91	0,000
Mr	56	182,58	35,45	19,42	
Ft	43	142,02	29,43	20,72	0,040
Fr	43	128,50	30,72	23,91	
Mt	55	194,86	40,28	20,67	0,091
Mr	56	182,58	35,45	19,42	

Legende:

- Ft Behandlung forte, TL-Rissausbreitung
- Mt Behandlung mezzo-exterior, TL-Rissausbreitung
- Fr Behandlung forte, RL-Rissausbreitung
- Mr Behandlung mezzo-exterior, RL-Rissausbreitung

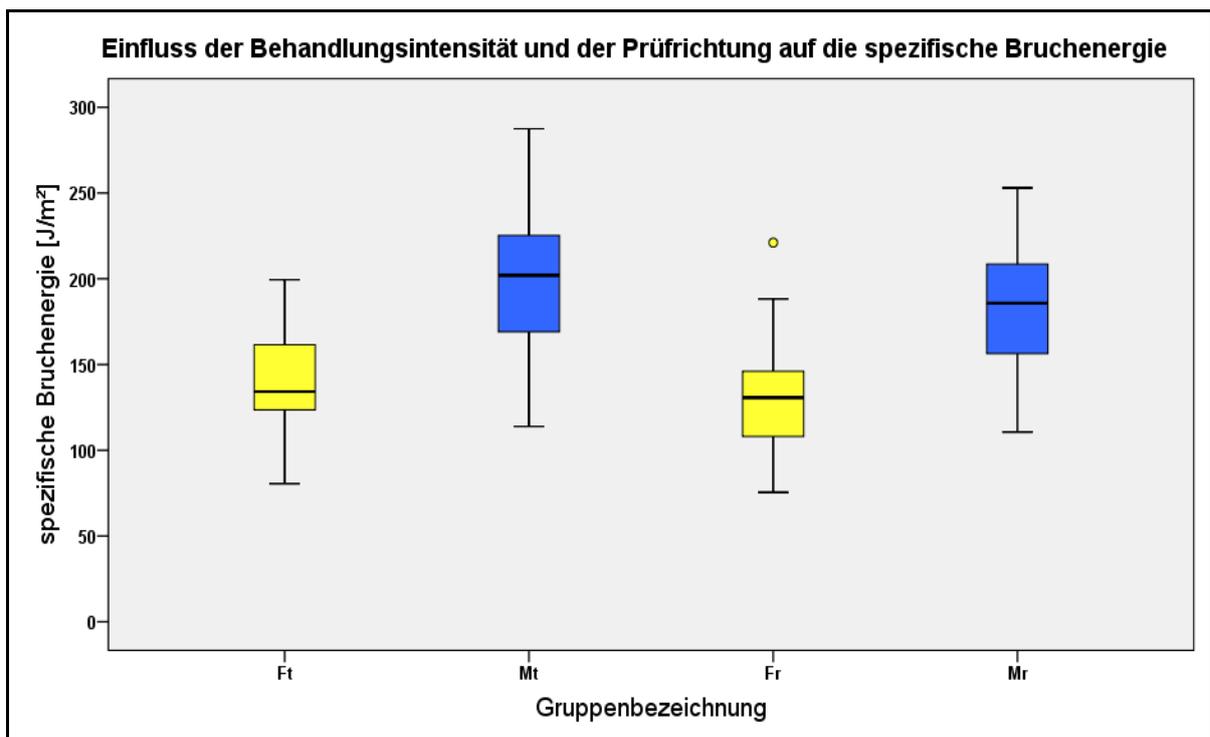


Abbildung 83: G_f bei unterschiedlicher Behandlungsintensität und Prüfrichtung

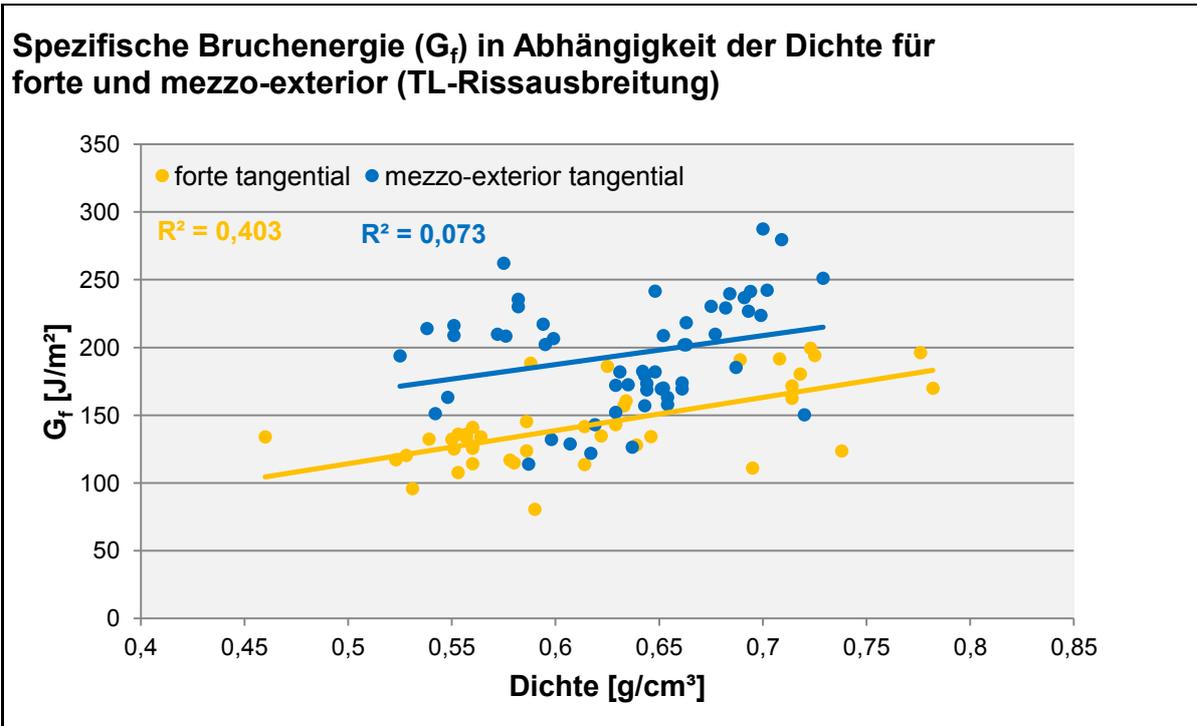


Abbildung 84: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in TL-Rissausbreitung

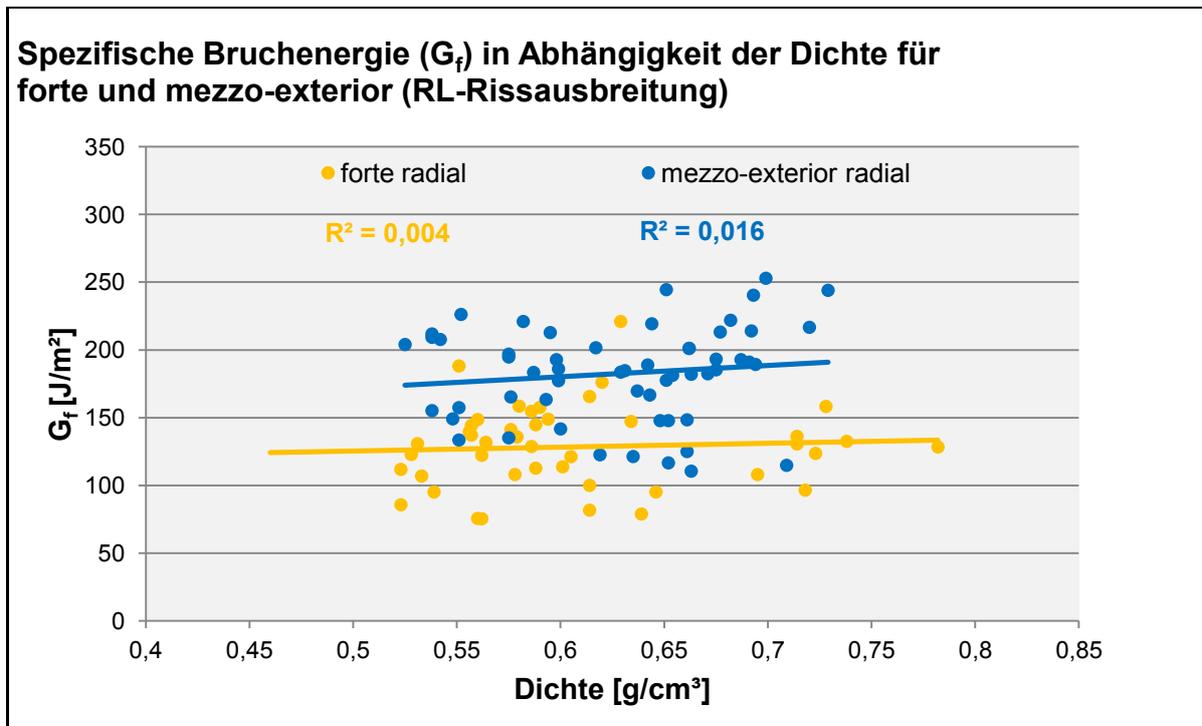


Abbildung 85: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Behandlungsintensität in RL-Rissausbreitung

Spezifische Bruchenergie (G_f) in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)

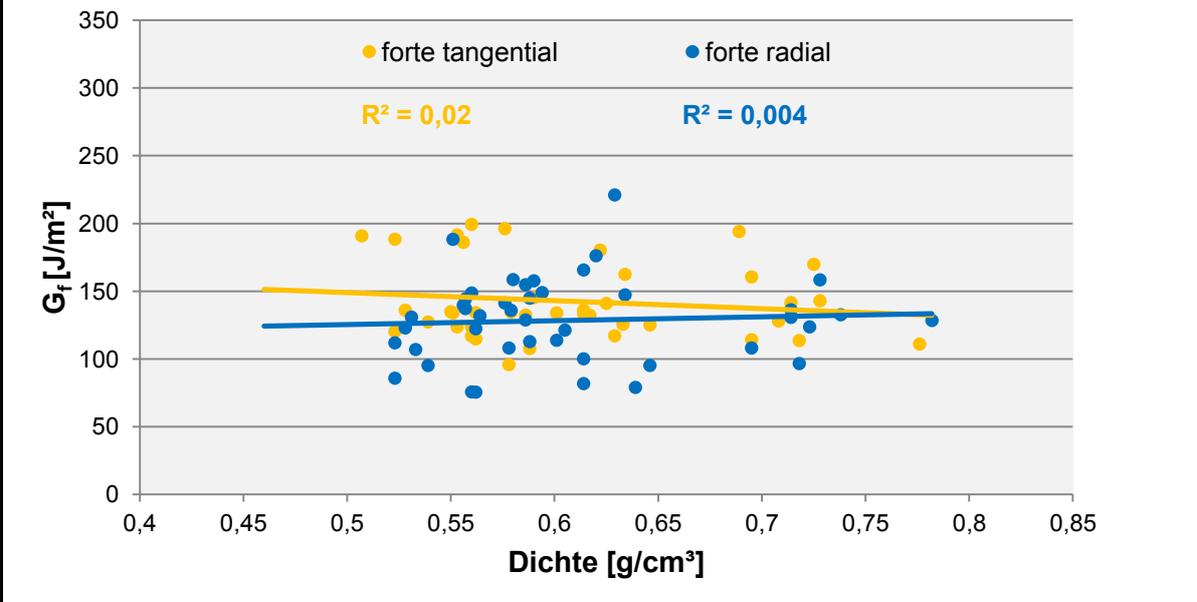


Abbildung 86: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (forte)

Spezifische Bruchenergie (G_f) in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)

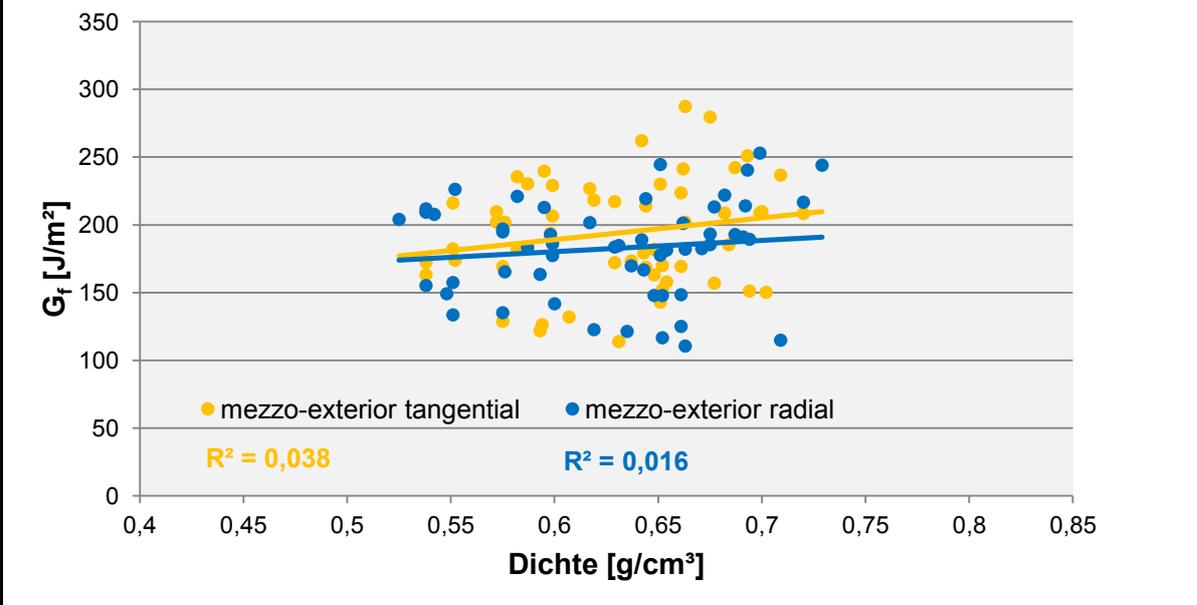


Abbildung 87: G_f in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Prüfrichtung (mezzo-exterior)

10.3.3 Zusammenfassung der Materialkennwerte aus der Bruchenergieprüfung

In Tabelle 29 sind die Materialkennwerte, die im Rahmen der Bruchenergieprüfung ermittelt wurden zusammengefasst.

Tabelle 29: Zusammenfassung der Materialkennwerte aus der Bruchenergieprüfung

Behandlungs- intensität	Mittelwerte					
	F_{max} [N]		W bis F_{max} [Nmm]		G_f [J/m ²]	
	RL	TL	RL	TL	RL	TL
mezzo-exterior	229,4	213,1	86,3	88,1	182,6	194,9
forte	202,2	178,8	65,6	64,3	128,5	142,0

10.3.4 Diskussion - Bruchenergieprüfung

In den durchgeführten Untersuchungen zur Bruchenergie und der statistischen Auswertung von F_{max} , W bis F_{max} , und G_f konnten keine signifikanten Unterschiede aufgrund von unterschiedlichen Abkühlungsbedingungen festgestellt werden. Die Dichte zeigt als einziges Holzmerkmal einen signifikanten Einfluss auf alle untersuchten Werte zur Bruchenergieprüfung. Wobei die Einflussstärke der Dichte auf F_{max} stärker ist als auf W bis F_{max} und G_f . Mit steigender Dichte wurden steigende Materialkennwerte der Bruchenergieprüfung festgestellt. Vergleichbare Ergebnisse brachte auch die Untersuchung von Reiterer et al. (2002b). Hoch signifikante Unterschiede wurden aufgrund der Behandlungsintensität festgestellt. Hier zeigte sich eine deutliche Abnahme aller Bruchenergiewerte mit steigender Behandlungsintensität. Wobei die Einflussstärke der Behandlungsintensität auf W bis F_{max} und G_f stärker ist als auf F_{max} . Eine Abnahme der Bruchenergiewerte mit steigender Behandlungsintensität wurde auch in Untersuchungen von Beikircher (2009), Majano-Majano et al. (2012) und Pleschberger et al. (2014) festgestellt. Auch betreffend der Prüfrichtung (TL- und RL- Rissausbreitung) konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden. Jedoch gestaltet sich hier die Erklärung nicht so einfach. Bezüglich der maximalen Prüfkraft (F_{max}) zeigten sich signifikant höhere Werte in radialer Prüfrichtung (RL-Rissausbreitungssystem). Höhere Bruchenergie F_{max} Werte bzw. daraus berechnete K_{IC} Werte (kritischer Spannungsintensitätsfaktor) in RL-Rissausbreitung wurden auch in Untersuchungen von Reiterer et al. (2002a) an unbehandeltem Eschenholz und Eichenholz festgestellt und von Majano-Majano et al. (2012) für unbehandeltes aber auch für thermisch behandeltes Eschenholz. Begründet werden die höheren Bruchenergie F_{max} Werte in RL-Rissausbreitung mit den in RL-Rissausbreitung vorhandenen Holzstrahlen, die wie Verstärkungsfasern wirken. Dieser Verstärkungseffekt bleibt auch noch nach einer thermischen Modifikation vorhanden. Bezüglich der Bruchenergie W bis F_{max} Werte wurde kein signifikanter Unterschied zwischen RL- und TL- Rissausbreitung festgestellt. Bezüglich der spezifischen Bruchenergie wurde ein Unterschied zwischen RL- und TL- Rissausbreitung festgestellt. Die spezifische Bruchenergie ist in TL- Rissausbreitung höher als in RL-Rissausbreitung, wobei ein signifikanter Unterschied nur für die Behandlungsintensität "forte" festgestellt wurde. Eine höhere spezifische Bruchenergie in TL-Rissausbreitung wurde auch schon von Majano-Majano et al. (2012) für thermisch behandeltes Eschenholz festgestellt. Interessant ist hier, dass für unbehandeltes Eschenholz eine signifikant höhere spezifische Bruchenergie in RL-Rissausbreitung festgestellt wurde (Majano-Majano et al. 2012), (Reiterer et al. 2002a). Dies wird grundsätzlich bei unbehandeltem Holz mit der verstärkenden Wirkung der Holzstrahlen erklärt. Jedoch wird in der vorliegenden Arbeit und auch in den Untersuchungen von Beikircher (2009) und Majano-Majano et al. (2012) festgestellt, dass diese verstärkende Wirkung durch die thermische Behandlung

beeinträchtigt wird bzw. die Abnahme der spezifischen Bruchenergie durch eine thermische Behandlung in RL-Rissausbreitung stärker ist, als in TL-Rissausbreitung. Die festgestellten Unterschiede aufgrund von Behandlungsintensität und Prüfrichtung und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Studien unterstützen die Reliabilität der vorliegenden Arbeit. Dadurch wird das Ergebnis unterstützt, dass kein Einfluss der Abkühlungsbedingung auf die Bruchenergiewerte besteht.

10.3.5 Bewertung der Hypothesen - Bruchenergieprüfung

Hypothese 1

Je rascher die Bretter nach der thermischen Behandlung abgekühlt werden, desto geringer ist die Bruchenergie.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an unterschiedlich rasch abgekühlten Probekörpern.

Ergebnis: Aufgrund der Ergebnisse aus der Bruchenergieprüfung konnte kein Einfluss der Abkühlungsbedingung auf die Messwerte der Bruchenergieprüfung festgestellt werden.

Entscheidung: Hypothese abgelehnt.

Hypothese 2

Je höher die thermische Behandlungsintensität, desto niedriger ist die Bruchenergie des Holzes.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern unterschiedlicher Behandlungsintensität.

Ergebnis: Aufgrund der Ergebnisse aus der Bruchenergieprüfung konnte eine sinkende Bruchenergie mit steigender Behandlungsintensität festgestellt werden.

Entscheidung: Hypothese angenommen.

Hypothese 3

Je höher die Darrdichte des thermisch modifizierten Holzes, desto höher ist die Bruchenergie des Holzes.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern mit unterschiedlicher Dichte.

Ergebnis: Aufgrund der Ergebnisse aus der Bruchenergieprüfung konnte eine steigende Bruchenergie mit steigender Darrdichte festgestellt werden.

Entscheidung: Hypothese angenommen.

Hypothese 4

Liegende Jahrringlagen im Brett führen zu einer Abnahme der Bruchenergie.

Überprüfung durch Messen der Bruchenergie unter Modus I Belastung in RL- und TL-Rissausbreitung an Probekörpern, die aus Brettern mit unterschiedlicher Jahrringlage hergestellt wurden.

Ergebnis: Aufgrund der Ergebnisse aus der Bruchenergieprüfung konnte kein Einfluss der Jahrringlage auf die Messwerte der Bruchenergieprüfung festgestellt werden.

Entscheidung: Hypothese abgelehnt

10.4 Rissbildung nach einer Zyklusbehandlung

Um die Rissbildung an thermisch modifizierten Brettern in Abhängigkeit von verschiedenen Produktions-, Brett- und Holzmerkmalen zu untersuchen, wurden Probekörper einer Zyklusbehandlung, wie in Punkt 9.3.6 beschrieben, ausgesetzt. Durch die Ergebnisse sollte ein Rückschluss auf das Verhalten der Bretter bei Bewitterung möglich sein. Die Messwerte der Risslängenmessungen sind im Detail im Anhang unter Abschnitt 13.5 in Tabelle 45, Tabelle 46, Tabelle 47 und Tabelle 48 angeführt. Um den Einfluss der erhobenen Merkmale auf die absolute gemessene axiale, radiale und tangentielle Risslänge zu prüfen, wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die Risslängen wurden nach jedem der drei Zyklen vermessen. Da sich in den Ergebnissen jedoch keine wesentlichen Unterschiede zeigen, sind im folgenden Teil nur die Ergebnisse für die multiple lineare Regressionsanalyse nach der 3. Zyklusbehandlung im Detail dargestellt. Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse für die 1. und 2. Zyklusbehandlung sind im Überblick in Tabelle 37, Tabelle 38, Tabelle 39, Tabelle 40, Tabelle 41 und Tabelle 42 im Anhang unter Abschnitt 13.2, dargestellt. Um einen Eindruck davon zu erhalten, wie sich die Holzfeuchtigkeiten während der Zyklusbehandlung entwickeln, wurden diese an jeweils 10 Probekörpern jeder Behandlungsintensität gemessen. In Tabelle 30 sind die Mittelwerte für den 1. und 2. Zyklus dargestellt. Man kann erkennen, dass die Holzgleichsfeuchtigkeit im Klimaraum mit steigender Behandlungsintensität abnimmt. Die Abnahme der Holzgleichsfeuchtigkeit mit steigender Behandlungsintensität wurde bereits in mehreren Untersuchungen zu thermisch modifiziertem Holz festgestellt (Literaturangaben siehe Abschnitt 4.4.7). Des Weiteren kann man erkennen, dass im 2. Zyklus die Holzfeuchtigkeiten im Durchschnitt höher sind als im 1. Zyklus. Dies kann dadurch erklärt werden, da durch die im 1. Zyklus entstandenen Risse schneller Wasser in das Holz eindringen kann. Interessant ist hier auch, dass vor dem 2. Zyklus eine höhere Holzgleichsfeuchtigkeit im Klimaraum gemessen wurde als vor dem 1. Zyklus. Dieser Trend kann jedoch nicht mit Sicherheit bestätigt werden, da die Massekonstante nicht überprüft wurde. Vor der Messung der Holzgleichsfeuchtigkeit erfolgte jeweils eine 14-tägige Lagerung im Klimaraum. Darüber, ob sich das Sorptionsverhalten von thermisch modifiziertem Holz durch eine Zyklusbehandlung oder eine Bewitterung verändert oder nicht, konnte keine Literatur gefunden werden. Welzbacher (2007) stellte jedoch fest, dass die gesenkte Holzgleichsfeuchtigkeit von thermisch modifiziertem Holz durch eine Behandlung mit einer 2% KOH-Lösung vollständig aufgehoben werden kann bzw. dadurch der hydrophile Charakter wieder hergestellt wird. In Abbildung 88, Abbildung 89, Abbildung 91 und Abbildung 92 sind die Holzfeuchtigkeitsentwicklungen einzelner Probekörper während der Zyklusbehandlung dargestellt. Man kann erkennen, dass die Wasseraufnahme zwischen den Probekörpern sehr stark variiert, jedoch für die einzelnen Probekörper in den Zyklen 1 und 2 annähernd gleich ist. Da die Holzfeuchtigkeit auf die Darrdichte des Holzes bezogen wird, wurde auch die absolute Wasseraufnahme der einzelnen Probekörper berechnet und in Abbildung 90 und Abbildung 93 graphisch dargestellt. Auch die absolute

Wasseraufnahme variiert stark zwischen den Probekörpern, verändert sich jedoch kaum zwischen dem 1. und 2. Zyklus. Dies lässt darauf schließen, dass die Wasseraufnahme vom jeweiligen Brett abhängig ist und nicht durch eine andere Störgröße verursacht wurde. Metsä-Kortelainen et al. (2006) und Scheiding & Direske (2014) stellte eine unterschiedliche Wasseraufnahme von Kern- und Splintholz bei thermisch modifizierter Kiefer und Fichte fest. Dies könnte auch bei dieser Untersuchung zu unterschiedlichen Wasseraufnahmen geführt haben. Jedoch wurde in dieser Untersuchung das Merkmal (Kernholz, Splintholz, Reifholz) nicht erhoben. Anzumerken ist hier noch, dass die Holzfeuchtigkeit nach der Wasserlagerung nicht konstant über den Probekörper verteilt ist und die angeführte Holzfeuchtigkeit einen Durchschnitt darstellt. In den Randbereichen der Probekörper wird nahezu die maximal mögliche Holzfeuchtigkeit vorliegen, wohingegen im Inneren der Probekörper eher geringe Holzfeuchtigkeiten vorliegen werden. Die genaue Holzfeuchtigkeitsverteilung wurde jedoch nicht näher untersucht. Da durch die sehr unterschiedliche Wasseraufnahme der Probekörper die Frage aufkam, ob die unterschiedlichen Wasseraufnahmen der Hauptgrund für die unterschiedliche Rissbildung sein könnte, wird dies im Rahmen des vorhandenen Datenmaterials untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 94 und Abbildung 95 dargestellt. Man kann erkennen, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der maximalen Holzfeuchtigkeit während der Zyklusbehandlung und den gemessenen Risslängen besteht. Jedoch ist hier der Probenumfang für eine gesicherte Aussage zu gering.

Tabelle 30: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten in der Zyklusbehandlung - Mittelwerte

			Mittelwerte Holzfeuchtigkeit [%]			
Behandlungsintensität	Zyklus	n	Klimaraum (20°C/65%)	Wasserlagerung	Gefrieren	Darrofen
FN	1	10	2,78	23,98	22,63	0
FN	2	10	4,28	24,66	23,22	0
MN	1	10	3,70	22,45	21,29	0
MN	2	10	4,58	23,56	22,44	0

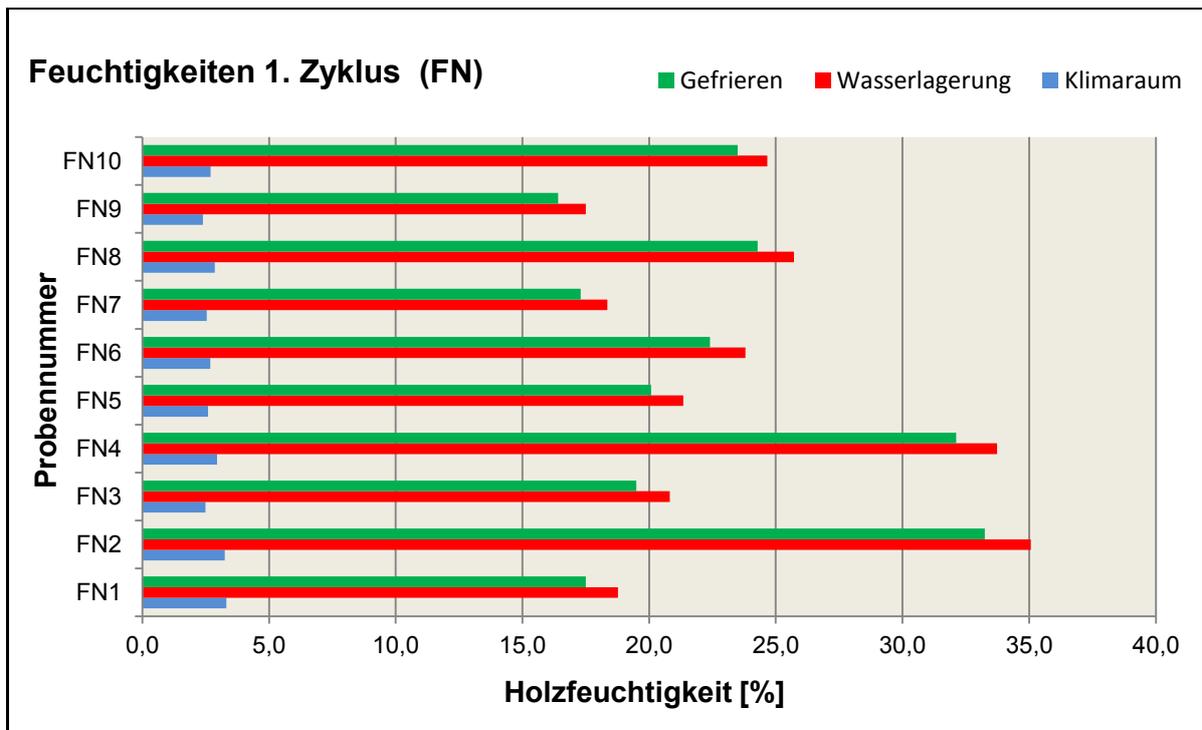


Abbildung 88: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von FN Probekörpern während der 1. Zyklusbehandlung

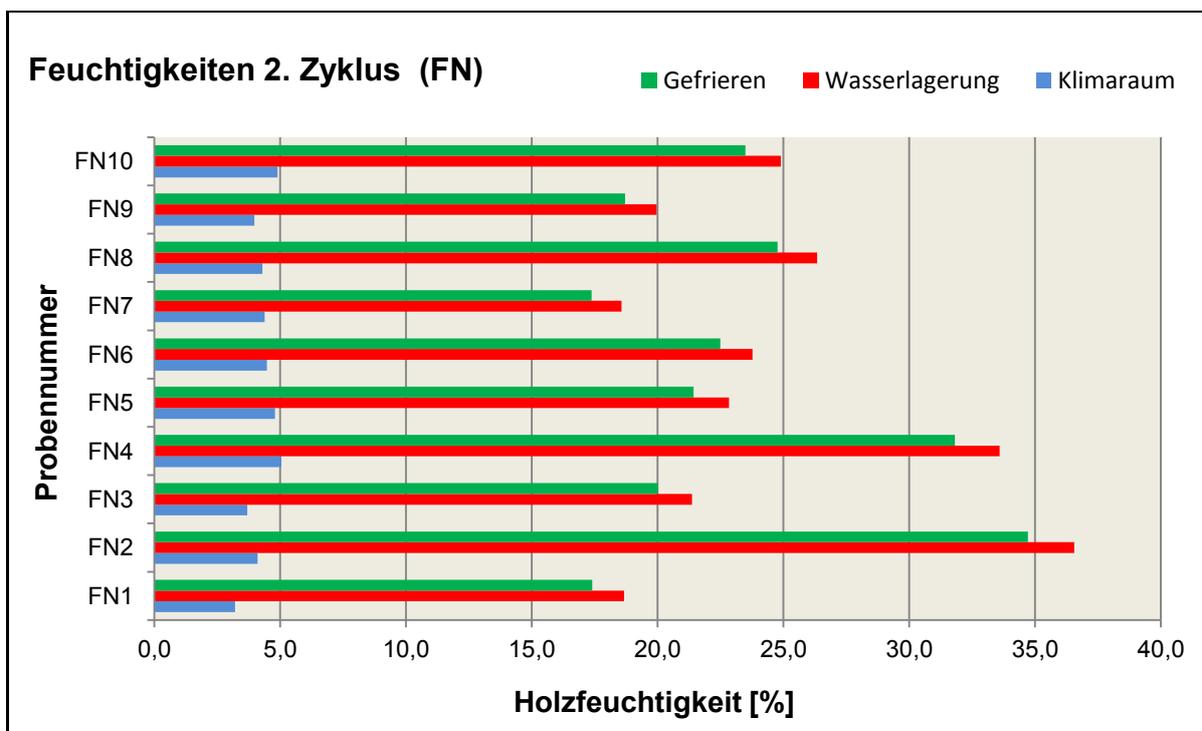


Abbildung 89: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von FN Probekörpern während der 2. Zyklusbehandlung

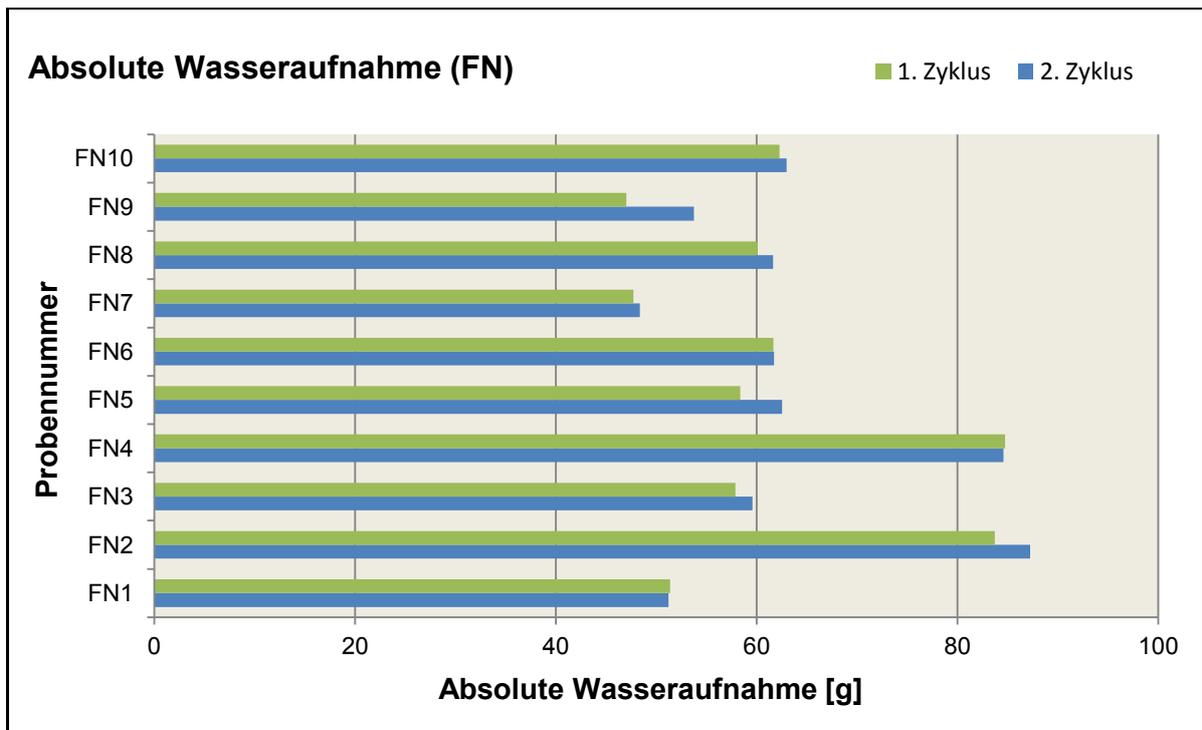


Abbildung 90: Absolute Wasseraufnahme von FN Probekörpern während der 1. und 2. Wasserlagerung

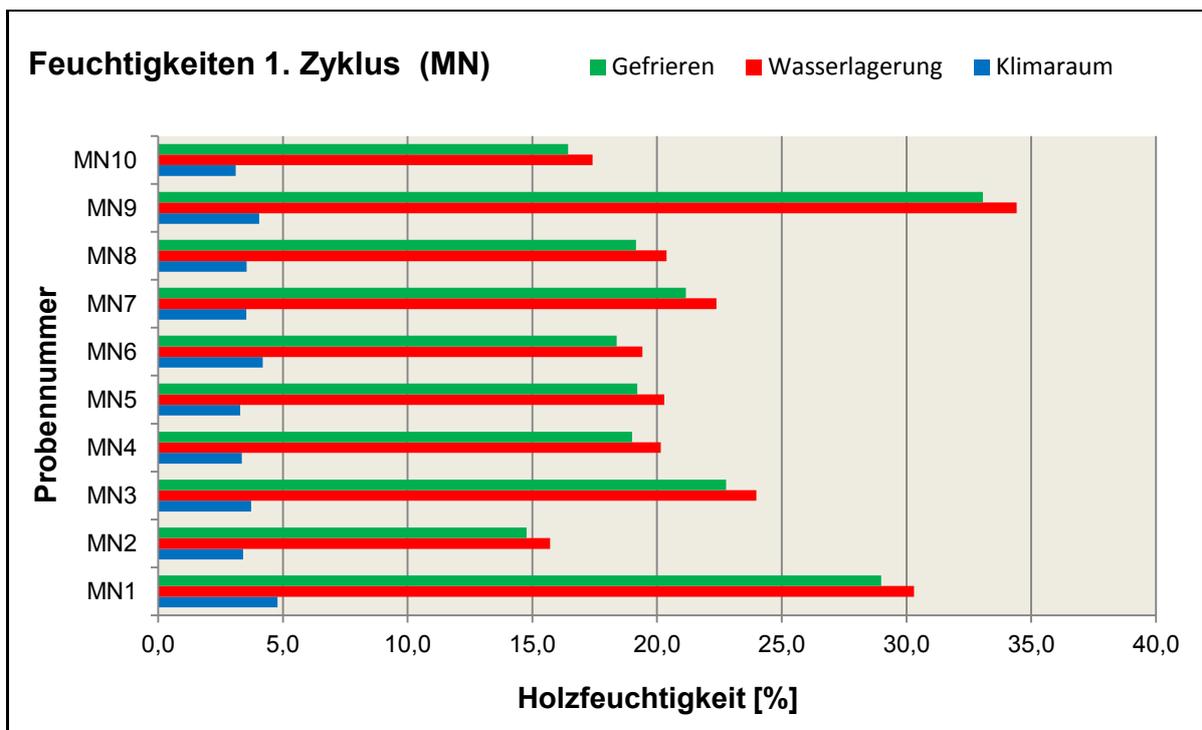


Abbildung 91: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von MN Probekörpern während der 1. Zyklusbehandlung

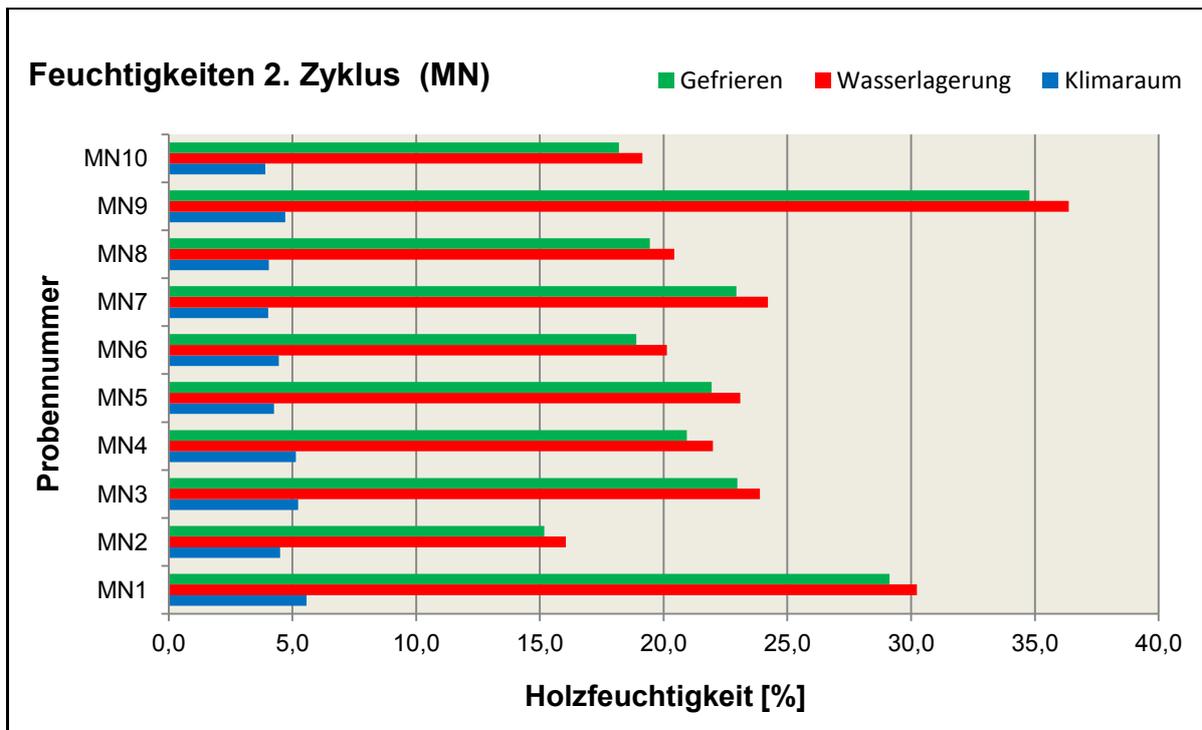


Abbildung 92: Entwicklung der Holzfeuchtigkeiten von MN Probekörpern während der 2. Zyklusbehandlung

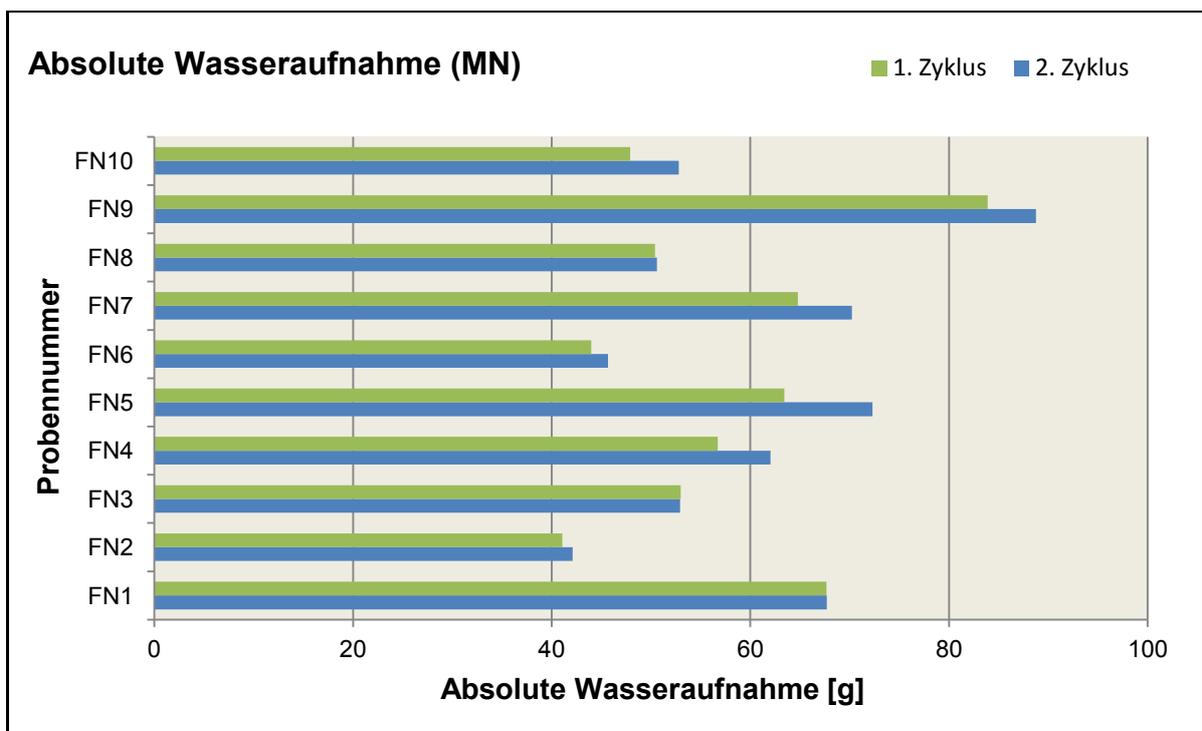


Abbildung 93: Absolute Wasseraufnahme von MN Probekörpern während der 1. und 2. Wasserlagerung

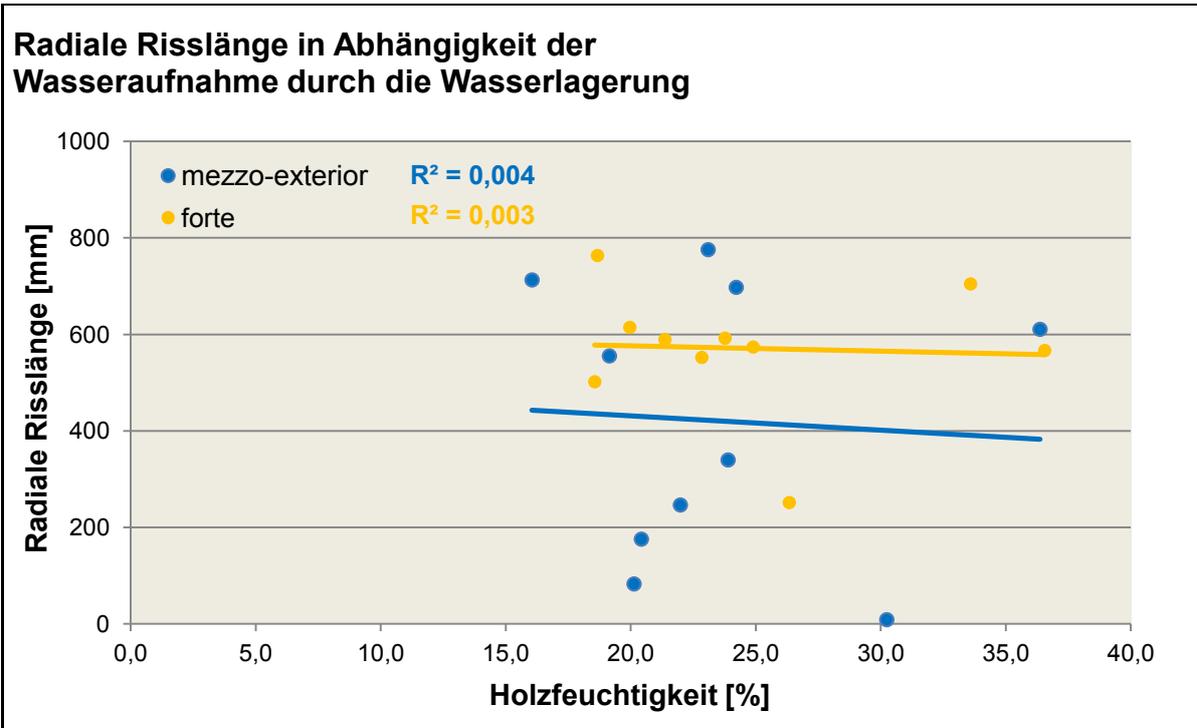


Abbildung 94: Radiale Risslänge in Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Wasserlagerung

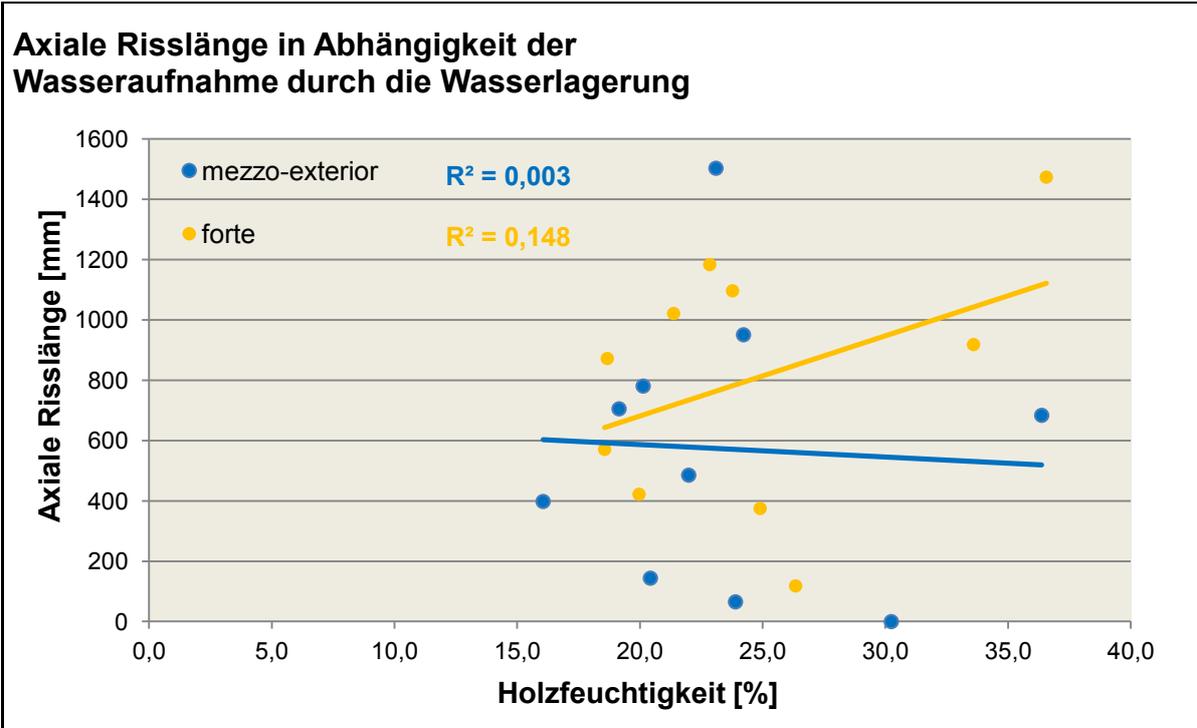


Abbildung 95: Axiale Risslänge in Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Wasserlagerung

10.4.1 Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen

Tabelle 31 zeigt das Ergebnis der multiplen linearen Regressionsanalyse bezüglich der Bildung von Rissen in axialer Holzrichtung (Längsriss) in Abhängigkeit von den erhobenen Merkmalen. Wie zu erkennen ist, zeigen die erhobenen Merkmale Dichte, Jahrringbreite, Jahrringlage "riff", Jahrringlage "flader", Abkühlung "rasch" und Behandlung "forte" signifikante Einflüsse. Keine signifikanten Einflüsse zeigen die Merkmale Frühholzanteil und Abkühlung "schonend". Zu beachten ist, dass in diesem Modell die Gruppen Jahrringlage "halbrift", Abkühlung "normal" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" als Referenzgruppen herangezogen werden.

Tabelle 31: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,804	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,646	Regressionskoeffizienten	Standardfehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-3133,261	412,615		,000	
	Dichte		4845,020	400,548	0,633	,000	1,47
	Jahrringbreite		65,145	32,926	0,135	,050	2,48
	Frühholzanteil		2,807	3,816	0,055	,463	2,96
	Jahrringlage rift ^A		324,306	65,355	0,244	,000	1,29
	Jahrringlage flader ^A		345,516	50,681	0,335	,000	1,29
	Abkühlung schonend ^B		59,787	54,468	0,053	,274	1,23
	Abkühlung rasch ^B		120,755	53,488	0,106	,025	1,18
	Behandlung forte ^C		218,726	44,847	0,216	,000	1,05
a) Referenzgruppen: A Jahrringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin-Watson-Statistik: 1,870							

Zur Berechnung der multiplen linearen Regressionsgleichung und der Darstellung der Formel werden nur signifikante Merkmale der Tabelle 31 verwendet. In Tabelle 32 sind die neu berechneten Werte der multiplen linearen Regressionsanalyse, die nur signifikante Einflussmerkmale beinhaltet, angeführt. Da sich die Abkühlungsbedingung "schonend" nicht signifikant von der Abkühlungsbedingung "normal" unterscheidet, werden diese Gruppen für die erneute Berechnung in der Gruppe Abkühlung "schonend/normal" zusammengefasst. Das Bestimmtheitsmaß des Modells ist mit 0,644 relativ hoch. Das heißt, dass 64,4% der Streuung der axialen Risslängen durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden. Betrachtet man die standardisierten Koeffizienten ist zu erkennen, dass die Dichte einen sehr hohen Einfluss auf die axiale Risslänge zeigt, gefolgt von der Jahrringlage und der Behandlungsintensität. Eher geringe Einflüsse zeigen die Jahrringbreite und die Abkühlungsbedingung. Die Werte für den Varianzinflationsfaktor (Multikollinearität) und der Wert der Durbin-Watson-Statistik (Autokorrelation) befinden sich in einem akzeptablen Rahmen. Die Formel zur Berechnung der axialen Risslängen ist nachstehend im Detail angeführt (Formel 5). Ein Vergleich von berechneten und gemessenen axialen Risslängen ist in Abbildung 96 dargestellt.

Tabelle 32: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung (1)

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,802	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R²= 0,644	Regressionskoeffizienten	Standardfehler			
unab. Variablen	Konstante	-2842,464	(A)	216,060		,000	
	Dichte	4709,680	(k ₁)	361,861	,615	,000	1,20
	Jahringbreite	46,598	(k ₂)	22,558	,096	,040	1,17
	Jahringlage rift ^A	325,590	(k ₃₁)	65,199	,245	,000	1,29
	Jahringlage flader ^A	336,460	(k ₃₂)	49,903	,326	,000	1,26
	Abkühlung rasch ^B	100,168	(k ₄₁)	49,687	,088	,045	1,02
	Behandlung forte ^C	214,102	(k ₅₁)	44,405	,211	,000	1,02

a) Referenzgruppen:
 A Jahringlage halbrift* (k₃₃),
 B Abkühlung schonend/normal* (k₄₂)
 C Behandlungsintensität mezzo-exterior* (k₅₂)
 *) Koeffizient ist 0, da im Modell Referenzgruppe
 b) Durbin-Watson-Statistik: 1,853

$$R_a = A + k_1 \cdot \rho_0 + k_2 \cdot J_b + k_{31} \cdot J_{Lr} + k_{32} \cdot J_{Lf} + k_{33} \cdot J_{Lh} + k_{41} \cdot A_r + k_{42} \cdot A_{sn} + k_{51} \cdot B_{lf} + k_{52} \cdot B_{lm}$$

Konstante
Jahringbreite
Abkühlungsbedingung

Dichte
Jahringlage
Behandlungsintensität

Formel 5: Berechnung der axialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale

R _a	.....	Risslänge axial (Längsrisse)		[mm]
ρ ₀	.....	Dichte		[g/cm ³]
J _b	.....	Jahringbreite		[mm]
J _{Lr}*	.....	Jahringlage rift (Dummy)		[1]
J _{Lf}*	.....	Jahringlage flader (Dummy)		[1]
J _{Lh}*	.....	Jahringlage halbrift (Dummy)		[1]
A _r*	.....	Abkühlung rasch (Dummy)		[1]
A _{sn}*	.....	Abkühlung schonend oder normal (Dummy)		[1]
B _{lf}*	.....	Behandlungsintensität forte (Dummy)		[1]
B _{lm}*	.....	Behandlungsintensität mezzo-exterior (Dummy)		[1]
A	.....	Konstante	-2842,464	[1]
k ₁	.....	Koeffizient Dichte	4709,680	[1]
k ₂	.....	Koeffizient Jahringbreite	46,598	[1]
k ₃₁	.....	Koeffizient Jahringlage rift	325,590	[1]
k ₃₂	.....	Koeffizient Jahringlage flader	336,460	[1]
k ₃₃**	.....	Koeffizient Jahringlage halbrift	0**	[1]
k ₄₁	.....	Koeffizient Abkühlung rasch	100,168	[1]
k ₄₂**	.....	Koeffizient Abkühlung schonend/normal	0**	[1]
k ₅₁	.....	Koeffizient Behandlungsintensität forte	214,102	[1]
k ₅₂**	.....	Koeffizient Behandlungsintensität mezzo-exterior	0**	[1]
*	.....	0 wenn Merkmal "nein", 1 wenn Merkmal "ja"		
**	.....	Koeffizient ist 0, da im Modell Referenzgruppe		

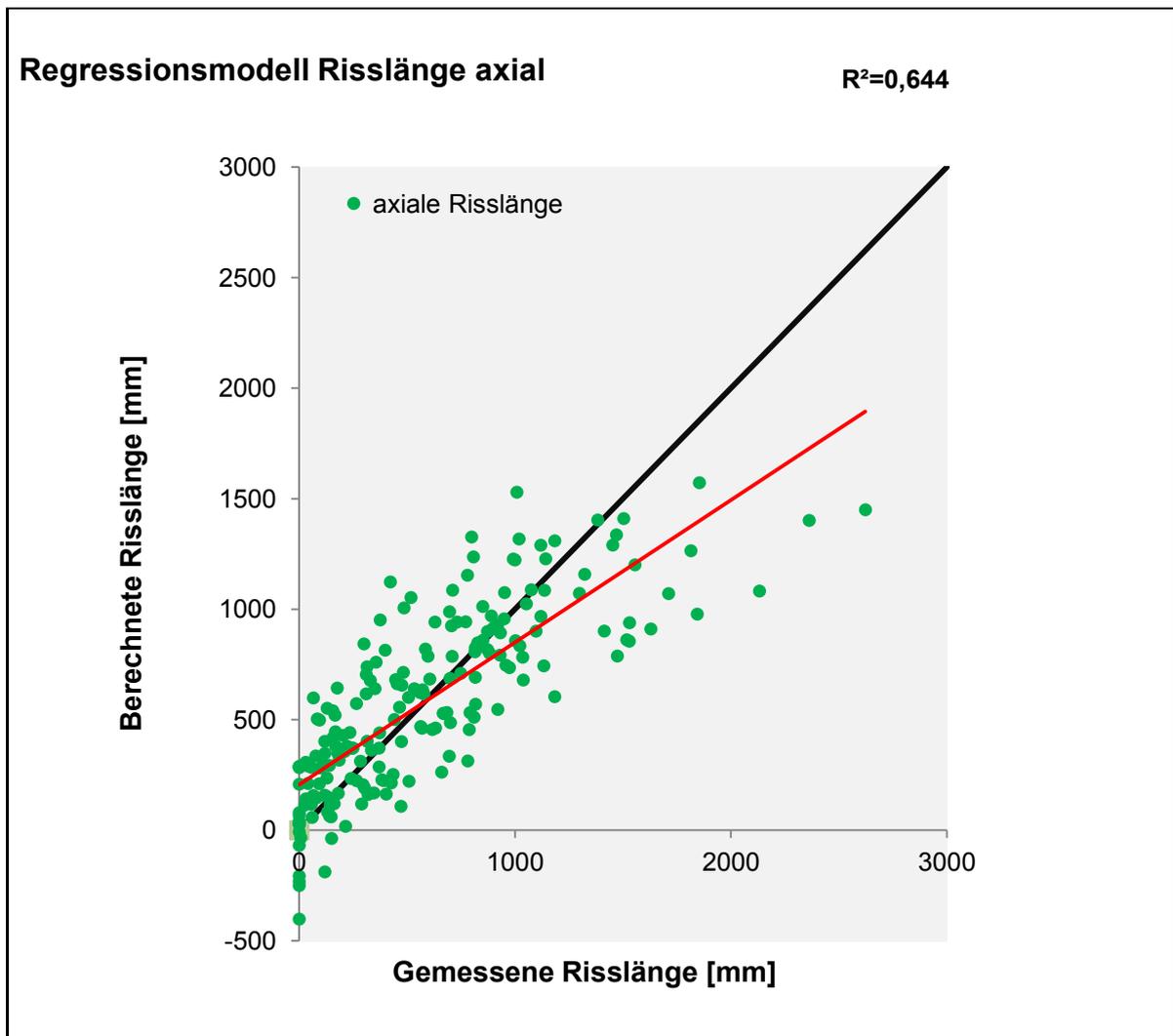


Abbildung 96: Vergleich der gemessenen axialen Risslänge und der durch das Modell berechneten axialen Risslänge

In Abbildung 96 ist der Vergleich von gemessenen und berechneten axialen Risslängen dargestellt. Der Abstand der Punkte zur schwarz eingezeichneten Linie im Diagramm (Optimum) zeigt wie groß der Fehler der Berechnung ist bzw. wie die Residuen des Modells verteilt sind. Die rote Linie zeigt, dass die Residuen nicht homoskedastisch über den Wertebereich verteilt sind. Man kann erkennen, dass die Residuen heteroskedastisch verteilt sind und es bei der Berechnung der geringeren Risslängen eher zu einer Überschätzung und bei der Berechnung der längeren Risslängen eher zu einer Unterschätzung durch das aufgestellte Modell kommt. Die exakte Vorhersage der Risslängen ist nicht möglich, jedoch kann man erkennen, dass die Risslängen zu einem Teil durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden können. Da die Dichte den größten Einfluss der erhobenen Merkmale auf die axiale Risslänge zeigt (siehe Tabelle 32), ist in Abbildung 97 die axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten "forte" und "mezzo-exterior" dargestellt. Man erkennt deutlich den Einfluss der Dichte und der Behandlungsintensität. Je höher die Dichte und die Behandlungsintensität, desto höher ist auch die gemessene axiale Risslänge. In Abbildung 98 und Abbildung 99 ist die axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensität "forte" bzw. "mezzo-exterior" dargestellt. Zusätzlich sind in diesen Diagrammen die Werte nach Jahrringlagengruppen (flader, rift, halbriff) unterteilt. Man kann erkennen, dass Bretter der Gruppe Jahrringlage "halbriff" im Durchschnitt bei beiden Behandlungsintensitäten die geringsten gemessenen axialen Risslängen aufweisen. Dieser

visuell erkennbare Trend deckt sich mit dem Ergebnis aus der multiplen linearen Regressionsanalyse. Bretter in der Jahrringlagengruppe "flader" weisen bei der Behandlungsintensität "forte" die höchste gemessene Risslänge auf. Bei der Behandlungsintensität "mezzo-exterior" weisen Bretter der Jahrringlagengruppe "riff" die höchst gemessene axiale Risslänge auf. Da die Untersuchung unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen eine wesentliche Aufgabe darstellt, werden die gemessenen axialen Risslängen in Abhängigkeit der Dichte für unterschiedliche Abkühlungsbedingungen in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt. Man erkennt geringfügige Unterschiede zwischen den Gruppen (rasch, schonend, normal), die jedoch der normalen Streuung einer Stichprobe entsprechen. Die leicht erhöhte axiale Risslänge in Abbildung 100 für Bretter, die rasch abgekühlt wurden, ist vermutlich nicht auf die Abkühlungsbedingung zurückzuführen, da diese Gruppe im Vergleich zu den anderen Proben Gruppen (schonend, normal) mehr Bretter der Jahrringlage "flader" beinhaltet. Dieser Unterschied in den Proben Gruppen wurde auch schon im Abschnitt 10.2.2 festgestellt. Die Ergebnisse, die in der multiplen linearen Regressionsanalyse festgestellt wurden, decken sich im Allgemeinen mit den visuell erkennbaren Trends in den Diagrammen.

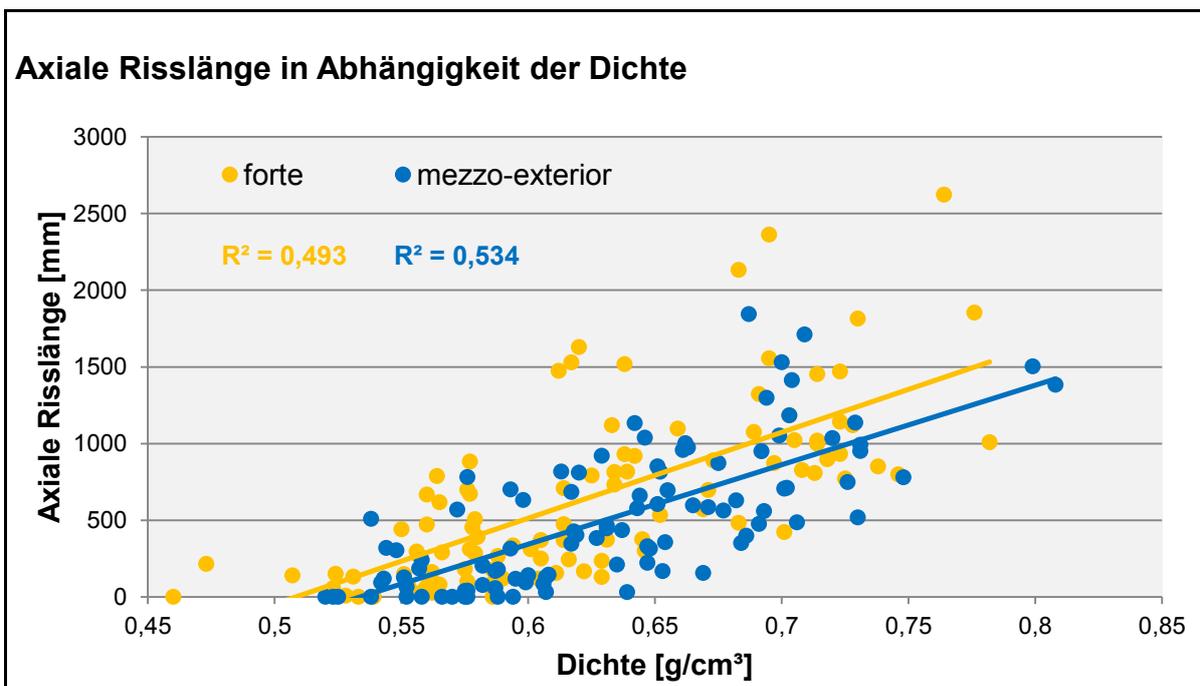


Abbildung 97: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior

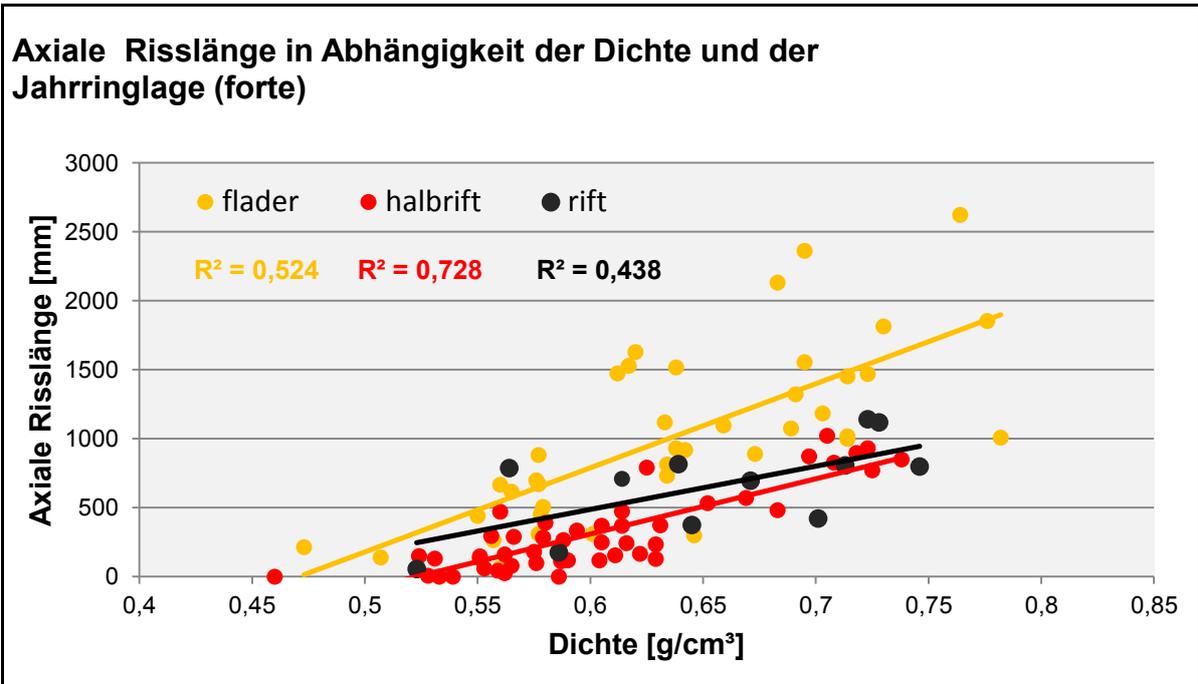


Abbildung 98: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (forte)

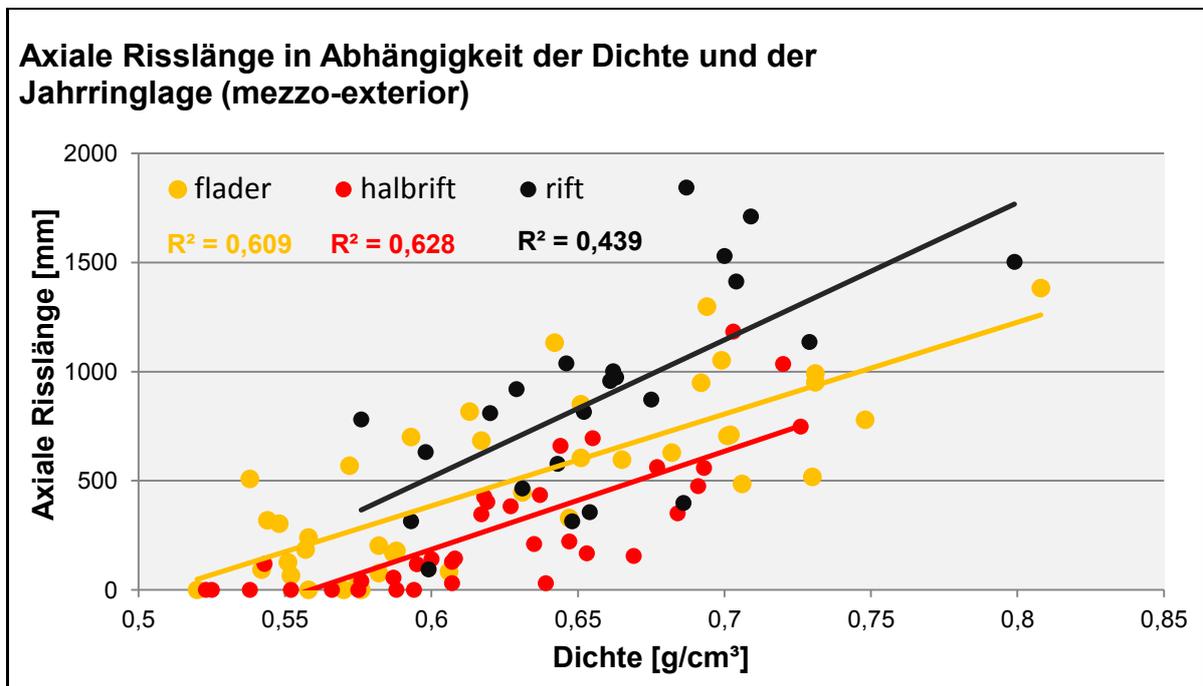


Abbildung 99: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (mezzo-exterior)

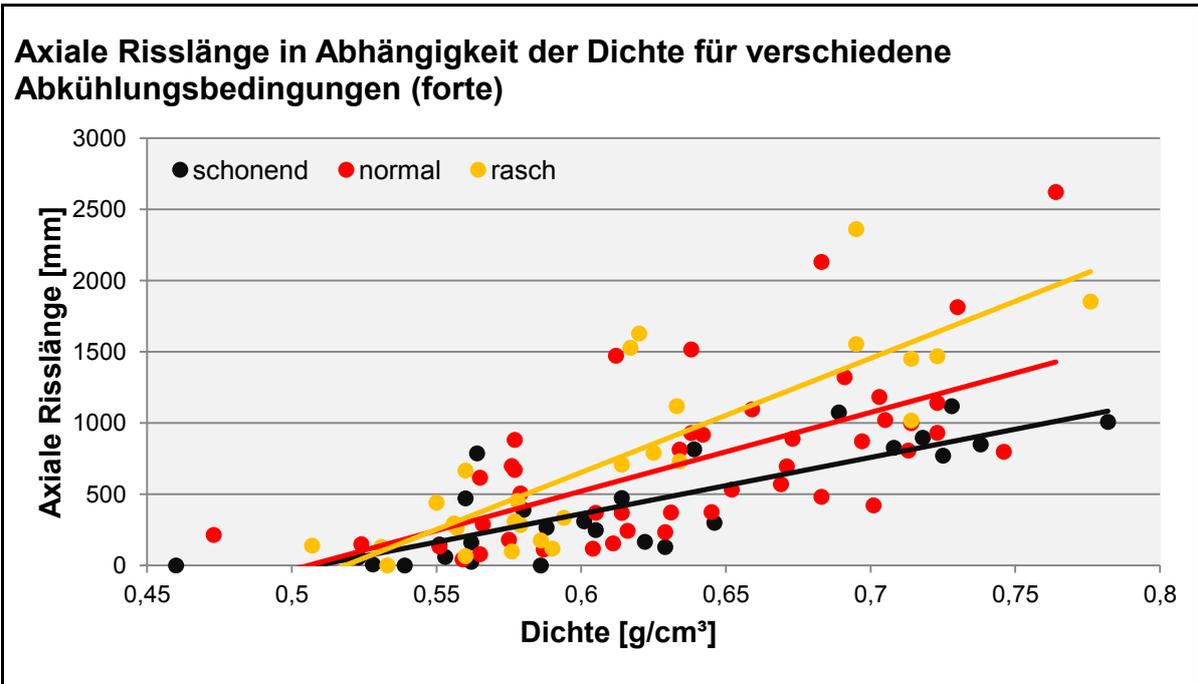


Abbildung 100: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte)

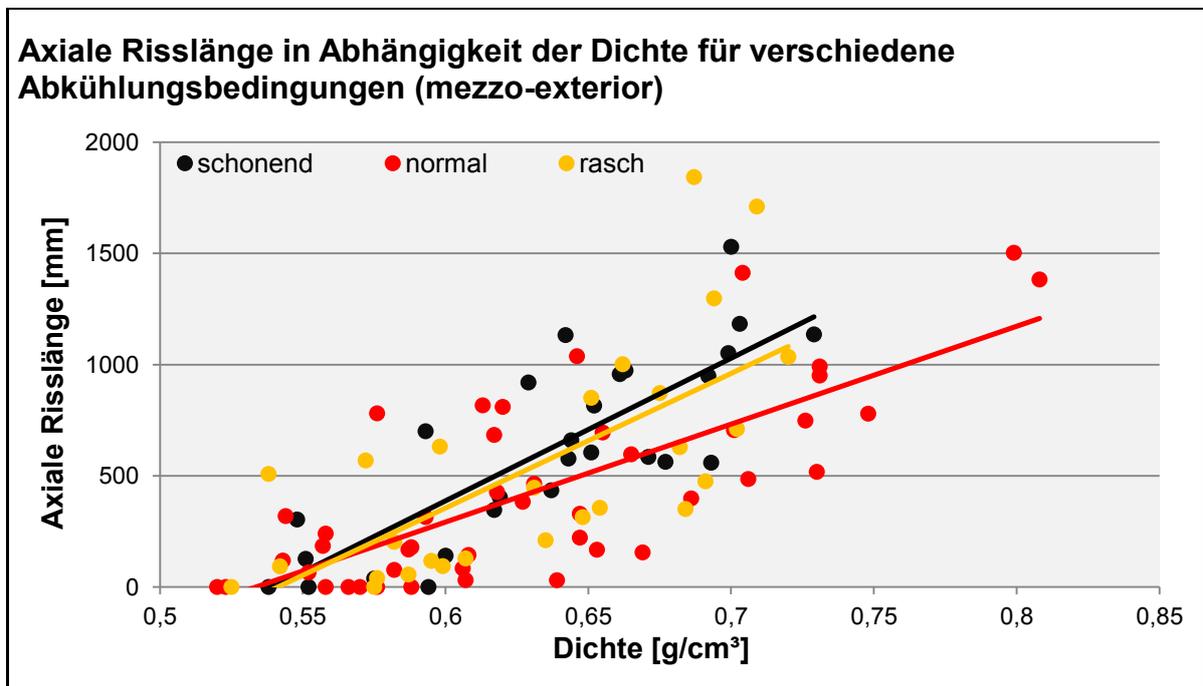


Abbildung 101: Gemessene axiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior)

10.4.2 Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen

Tabelle 33 zeigt das Ergebnis der multiplen linearen Regressionsanalyse bezüglich der Bildung von Rissen in radialer Holzrichtung an den Querschnitten der Probekörper, in Abhängigkeit von den erhobenen Merkmalen. Wie zu erkennen ist, zeigen die Merkmale Dichte, Jahrringbreite, Jahrringlage "riff", Jahrringlage "flader" und Behandlungsintensität "forte" signifikante Einflüsse. Keine signifikanten Einflüsse zeigen die Merkmale Abkühlung "rasch", Abkühlung "schonend" und Frühholzanteil. Zu beachten ist, dass in diesem Modell die Gruppen Jahrringlage "halbrift", Abkühlung "normal" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" als Referenzgruppen herangezogen werden.

Tabelle 33: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge radial		R= 0,819	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,670	Regressionskoeffizienten	Standardfehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-1486,006	174,531		,000	
	Dichte		2476,623	169,426	,739	,000	1,47
	Jahrringbreite		30,860	13,927	,146	,028	2,48
	Frühholzanteil		2,980	1,614	,133	,066	2,97
	Jahrringlage rift ^A		70,790	27,644	,122	,011	1,29
	Jahrringlage flader ^A		44,718	21,438	,099	,038	1,29
	Abkühlung schonend ^B		-40,980	23,039	-,082	,077	1,23
	Abkühlung rasch ^B		16,352	22,625	,033	,471	1,18
	Behandlungsintensität forte ^C		151,518	18,970	,341	,000	1,05
a) Referenzgruppen: A Jahrringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin Watson-Statistik: 1,884							

Zur Berechnung der multiplen linearen Regressionsgleichung und der Darstellung der Formel wurden nur signifikante Merkmale verwendet. In Tabelle 34 sind die neu berechneten Werte der multiplen linearen Regressionsanalyse, die nur signifikante Einflussmerkmale beinhaltet, angeführt. Da sich die Abkühlungsbedingungen "rasch" und "schonend" nicht signifikant von der Abkühlungsbedingung "normal" unterscheiden und das Holzmerkmal Frühholzanteil keinen signifikanten Einfluss zeigt, wurden diese Merkmale in dieser Berechnung weggelassen. Bei der erneuten Berechnung zeigt auch das Merkmal Jahrringbreite keinen signifikanten Einfluss ($p=0,209$). Daher fehlt auch das Merkmal Jahrringbreite in Tabelle 34. Das Bestimmtheitsmaß mit 0,650 ist relativ hoch. Das heißt, dass 65,0% der Streuung der radialen Risslängen durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden. Betrachtet man die standardisierten Koeffizienten ist zu erkennen, dass die Dichte den größten Einfluss auf die radiale Rissbildung zeigt, gefolgt von der Behandlungsintensität und der Jahrringlage. Die Werte für den Varianzinflationsfaktor und der Wert der Durbin-Watson-Statistik befinden sich in einem akzeptablen Rahmen. Die Formel zur Berechnung der radialen Risslängen ist nachstehend im Detail angeführt (Formel 6). Ein Vergleich von berechneten und gemessenen radialen Risslängen ist in Abbildung 102 dargestellt.

Tabelle 34: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung (1)

Modell: abhängige Variable Risslänge radial		R= 0,806	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R²= 0,650	Regressionskoeffizienten	Standardfehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-1226,971 (B)	92,209		,000	
	Dichte		2397,211 (z ₁)	147,443	,716	,000	1,069
	Jahringlage rift ^A		75,309 (z ₂₁)	28,016	,129	,008	1,281
	Jahringlage flader ^A		59,693 (z ₂₂)	21,113	,132	,005	1,208
	Behandlungsintensität forte ^B		148,103 (z ₃₁)	19,148	,334	,000	1,028

a) Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift* (z₂₃)
B Behandlungsintensität mezzo-exterior* (z₃₂)
*) Koeffizient ist 0, da im Modell Referenzgruppe
b) Durbin Watson-Statistik: 1,806

$$R_r = B + \underbrace{z_1 \cdot \rho_0}_{\text{Dichte}} + \underbrace{z_{21} \cdot JLr + z_{22} \cdot JLf + z_{23} \cdot JLh}_{\text{Jahringlage}} + \underbrace{z_{31} \cdot Bf + z_{32} \cdot Blm}_{\text{Behandlungsintensität}}$$

Formel 6: Berechnung der radialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale

Legende:

R _r	Risslänge radial	[mm]
ρ ₀	Dichte	[g/cm ³]
JLr*	Jahringlage rift (Dummy)	[1]
JLf*	Jahringlage flader (Dummy)	[1]
JLh*	Jahringlage halbrift (Dummy)	[1]
Bf*	Behandlungsintensität forte (Dummy)	[1]
Blm*	Behandlungsintensität mezzo-ex (Dummy)	[1]
B	Konstante (Radialrisse)	-1226,971 [1]
z ₁	Koeffizient Dichte (Radialrisse)	2397,211 [1]
z ₂₁	Koeffizient Jahringlage rift (Radialrisse)	75,309 [1]
z ₂₂	Koeffizient Jahringlage flader (Radialrisse)	59,693 [1]
z ₂₃ **	Koeffizient Jahringlage halbrift (Radialrisse)	0** [1]
z ₃₁	Koeffizient Behandlungsintensität forte (Radialrisse)	148,103 [1]
z ₃₂ **	Koeffizient Behandlungsintensität mezzo-ex. (Radialrisse)	0** [1]
*	0 wenn Merkmal "nein", 1 wenn Merkmal "ja"	
**	Koeffizient ist 0, da im Modell Referenzgruppe	

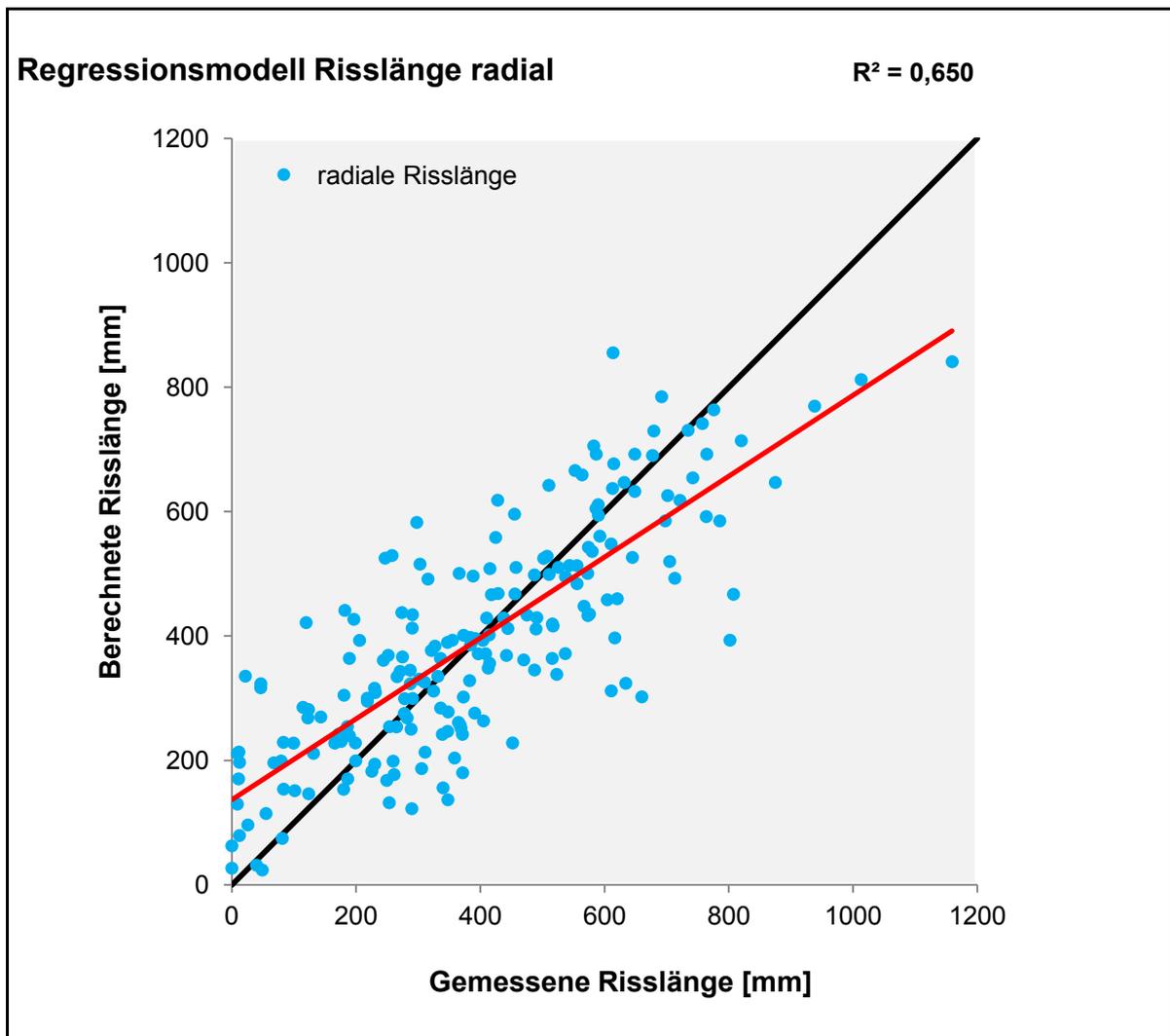


Abbildung 102: Vergleich der gemessenen radialen Risslängen und der durch das Modell berechneten radialen Risslängen

In Abbildung 102 ist der Vergleich von gemessenen und berechneten radialen Risslängen dargestellt. Der Abstand der Punkte zur schwarz eingezeichneten Linie im Diagramm (Optimum) zeigt, wie groß der Fehler der Berechnung ist. Die rote Linie zeigt, wie die Residuen der multiplen linearen Regression verteilt sind. Man kann erkennen, dass die Residuen heteroskedastisch verteilt sind und es bei der Berechnung der geringeren Risslängen eher zu einer Überschätzung und bei der Berechnung der längeren Risslängen eher zu einer Unterschätzung kommt. Die exakte Vorhersage der Risslängen ist durch dieses Modell nicht möglich, jedoch kann man erkennen, dass die Risslängen zu einem Teil durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden können. Da die Dichte den größten Einfluss der erhobenen Merkmale auf die radiale Risslänge zeigt (siehe Tabelle 34), ist in Abbildung 103 die radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten "forte" und "mezzo-exterior" dargestellt. Man erkennt deutlich den Einfluss der Dichte und der Behandlungsintensität. Je höher die Dichte und die Behandlungsintensität, desto höher ist auch die gemessene Risslänge. In Abbildung 104 und Abbildung 105 ist die radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensität "forte" bzw. "mezzo-exterior" dargestellt. Zusätzlich sind in diesen Diagrammen die Werte nach Jahrringlagengruppen (flader, rift, halbrift) unterteilt. Man kann erkennen, dass der Einfluss der Jahrringlage auf die radial gemessene Risslänge eher gering ist. Dieser visuelle Eindruck deckt sich mit dem Ergebnis aus der multiplen linearen Regressionsanalyse. Da die Untersuchung unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen eine wesentliche Aufgabe darstellt, werden die gemessenen radialen Risslängen in Abhängigkeit

der Dichte für unterschiedliche Abkühlungsbedingungen in Abbildung 106 und Abbildung 107 dargestellt. Man erkennt geringfügige Unterschiede zwischen den Gruppen (rasch, schonend, normal), die jedoch der normalen Streuung einer Stichprobe entsprechen. Die Ergebnisse, die in der multiplen linearen Regressionsanalyse festgestellt wurden, decken sich im Allgemeinen mit den visuell erkennbaren Trends in den Diagrammen.

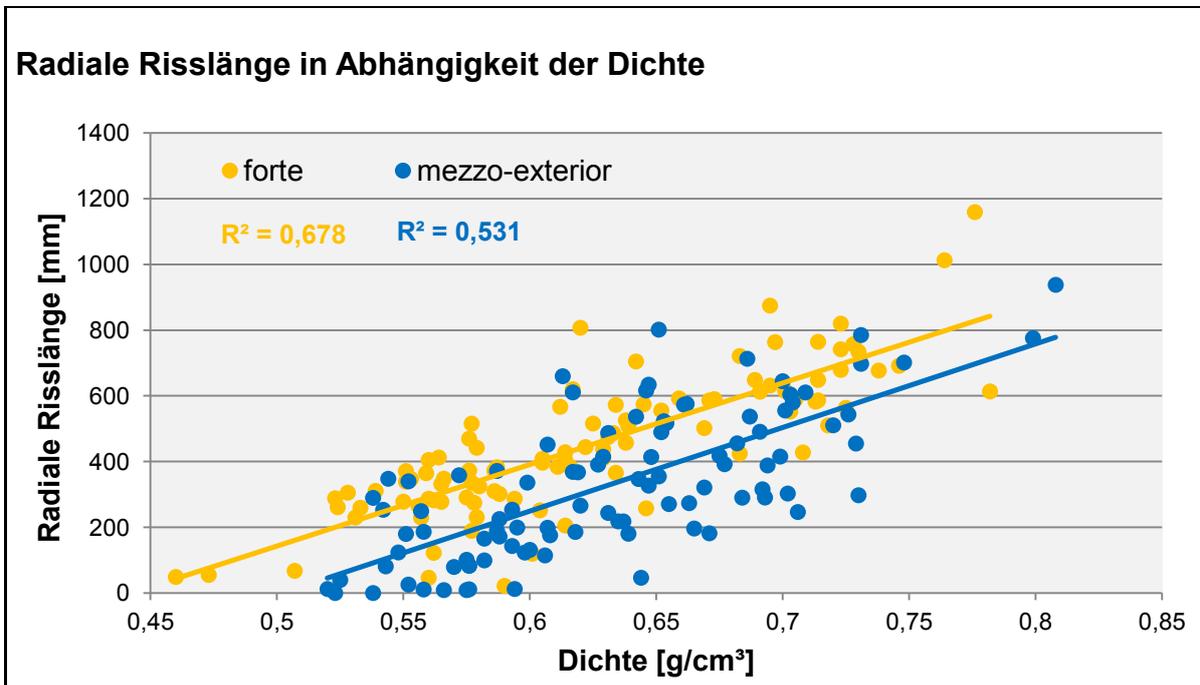


Abbildung 103: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior

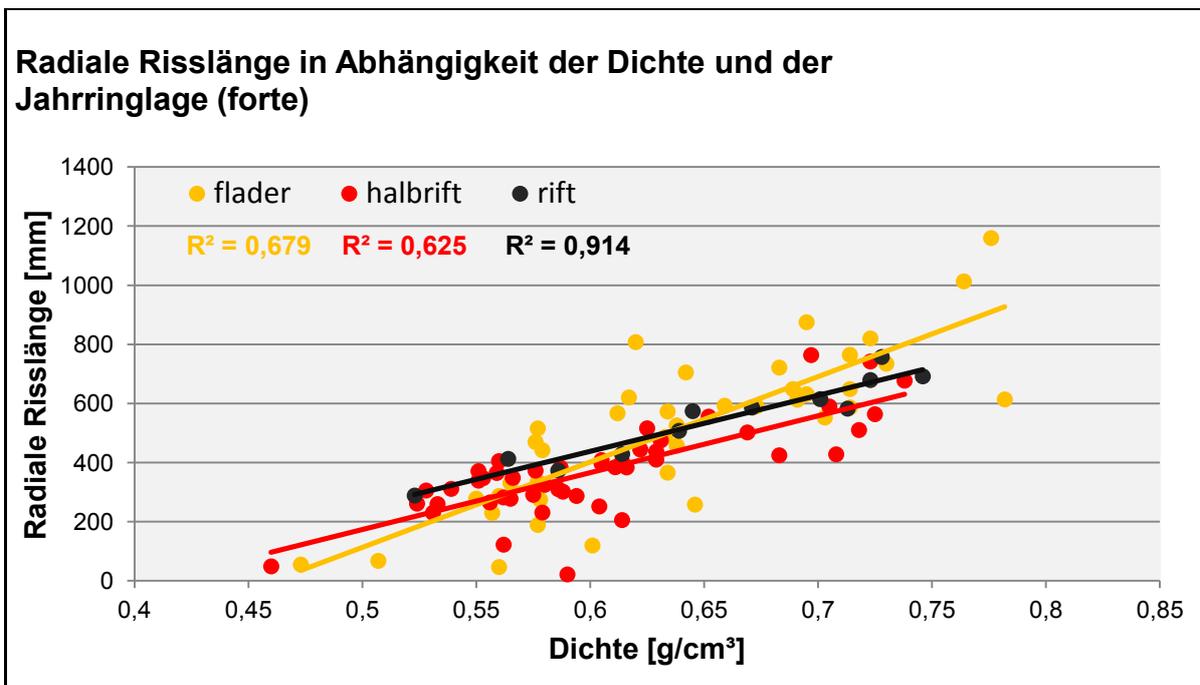


Abbildung 104: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (forte)

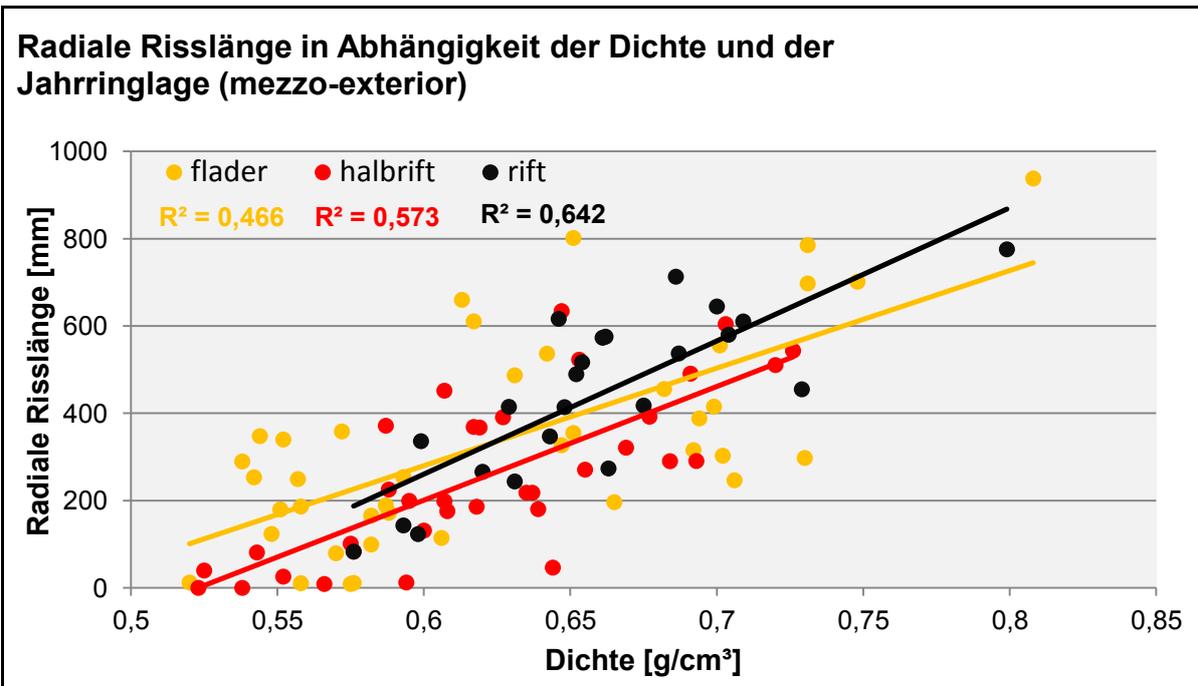


Abbildung 105: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Jahrringlage (mezzo-exterior)

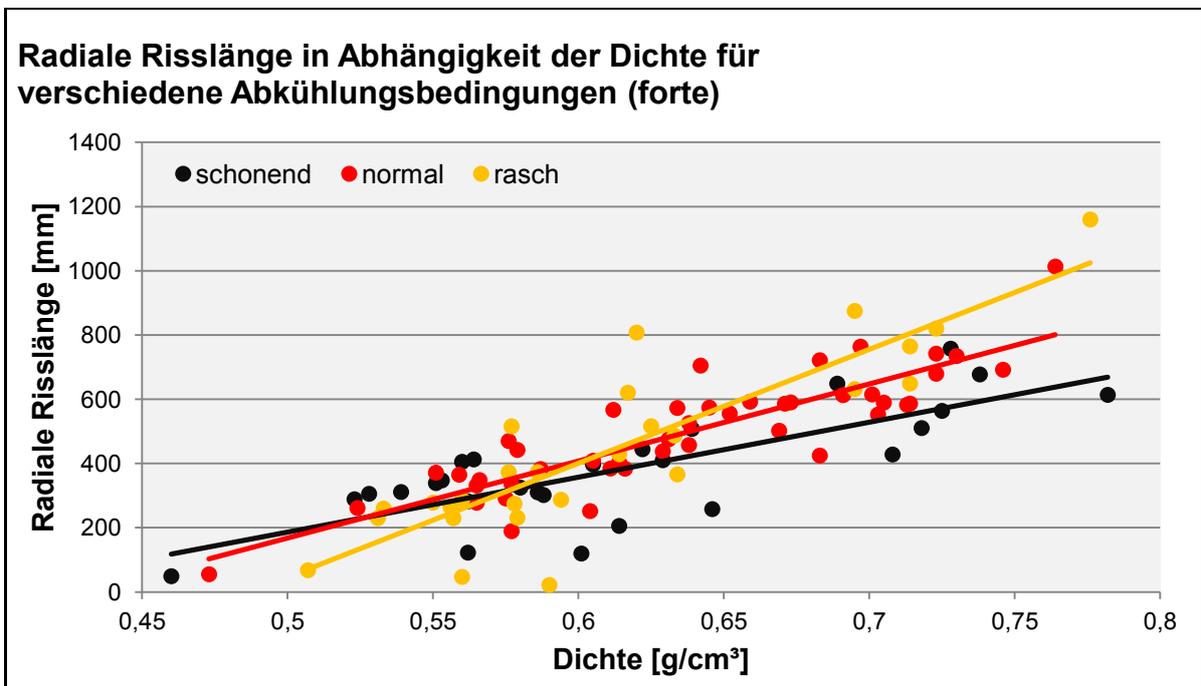


Abbildung 106: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (forte)

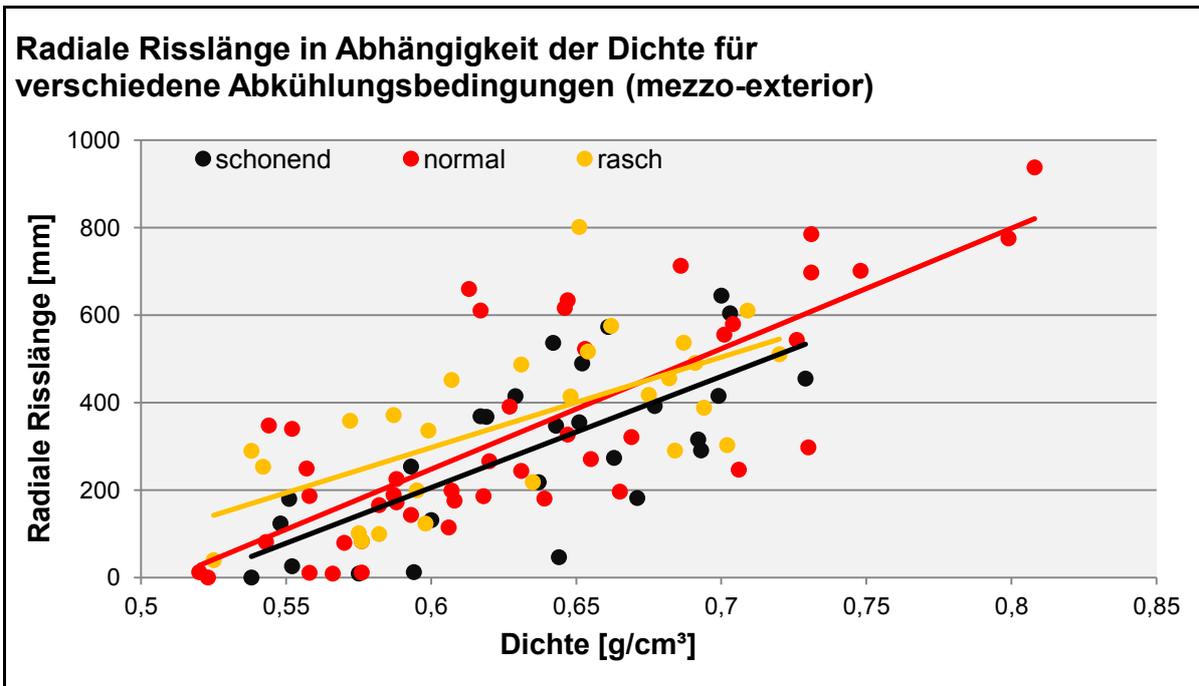


Abbildung 107: Gemessene radiale Risslänge in Abhängigkeit der Dichte bei unterschiedlicher Abkühlung (mezzo-exterior)

10.4.3 Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen

Tabelle 35 zeigt das Ergebnis der multiplen linearen Regressionsanalyse bezüglich der Bildung von Rissen in tangentialer Holzrichtung an den Querschnittsflächen der Probekörper, in Abhängigkeit von den erhobenen Merkmalen. Wie zu erkennen ist, zeigen die Merkmale Dichte, Jahrringbreite, Frühholzanteil und Abkühlung "rasch" signifikante Einflüsse. Keine signifikanten Einflüsse zeigen die Merkmale Jahrringlage "riff", Jahrringlage "flader", Abkühlung "schonend", Behandlungsintensität "forte" und die Konstante. Zu beachten ist, dass in diesem Modell die Gruppen Jahrringlage "halbriff", Abkühlung "normal" und Behandlungsintensität "mezzo-exterior" als Referenzgruppen herangezogen werden.

Tabelle 35: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge tangential		R= 0,546	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,298	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		63,178	83,912		,452	
	Dichte		408,377	81,458	,370	,000	1,47
	Jahringbreite		-40,029	6,696	-,573	,000	2,48
	Frühholzanteil		-2,665	,776	-,360	,001	2,97
	Jahringlage rift ^A		-4,698	13,291	-,025	,724	1,29
	Jahringlage flader ^A		2,913	10,307	,020	,778	1,29
	Abkühlung schonend ^B		19,639	11,077	,120	,078	1,23
	Abkühlung rasch ^B		22,243	10,878	,135	,042	1,18
	Behandlungsintensität forte ^C		10,110	9,120	,069	,269	1,05

a) Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung normal
C Behandlungsintensität mezzo-exterior

b) Durbin-Watson-Statistik: 1,879

Zur Berechnung der multiplen linearen Regressionsgleichung und der Darstellung der Formel werden nur signifikante Merkmale verwendet. In Tabelle 36 sind die neu berechneten Werte der multiplen linearen Regressionsanalyse, die nur signifikante Einflussmerkmale beinhaltet, angeführt. Da die Merkmale Jahringlage "rift", Jahringlage "flader", Abkühlung "schonend" und Behandlungsintensität "forte" keine signifikanten Einflüsse in der multiplen Regressionsanalyse zeigen, werden diese für eine erneute Berechnung weggelassen. Bei der erneuten Berechnung zeigt auch das Merkmal Abkühlung "rasch" keinen signifikanten Einfluss mehr ($\alpha=0,136$) und fehlt daher in Tabelle 36. Das Bestimmtheitsmaß mit 0,273 ist relativ niedrig. Das heißt, dass durch dieses Modell 27,3% der Streuung der tangentialen Risslängen durch die im Modell enthaltenen Variablen erklärt werden. Die Formel zur Abschätzung der tangentialen Risslänge ist nachstehend im Detail angeführt (Formel 7). Ein Vergleich von berechneten und gemessenen tangentialen Risslängen ist in Abbildung 108 dargestellt. Wie anhand des geringen Bestimmtheitsmaßes des Modells und dem Vergleich von berechneten und gemessenen tangentialen Risslängen in Abbildung 108 erkennbar ist, kann die Streuung der tangentialen Risslängen mit den erhobenen Merkmalen nicht zufriedenstellend erklärt werden. Auch die Varianz der Residuen ist sehr heteroskedastisch verteilt und nicht akzeptabel.

Tabelle 36: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 3. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge tangential		R=0,522	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² =0,273	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unab. Var.	Konstante		116,241 (C)	80,684		,151	
	Dichte		375,476 (y ₁)	78,468	,340	,000	1,35
	Jahringbreite		-41,680 (y ₂)	6,619	-,597	,000	2,40
	Frühholzanteil		-2,909 (y ₃)	,766	-,393	,000	2,87

a) keine Referenzgruppen da alle nominalskalierten Merkmale nicht signifikant sind
b) Durbin-Watson-Statistik: 1,824

$$R_t = C + \underbrace{y_1 \cdot \rho_0}_{\text{Dichte}} + \underbrace{y_2 \cdot Jb}_{\text{Jahrringbreite}} + \underbrace{y_3 \cdot Fha}_{\text{Frühholzanteil}}$$

Formel 7: Berechnung der tangentialen Risslänge anhand der erhobenen Merkmale

Legende:

R _t	Risslänge tangential	[mm]
ρ ₀	Dichte	[g/cm ³]
Jb	Durchschnittliche Jahrringbreite	[mm]
Fha	Durchschnittlicher Frühholzanteil	[%]
C	Konstante (Tangentialrisse)	116,241 [1]
y ₁	Koeffizient Dichte (Tangentialrisse)	389,220 [1]
y ₂	Koeffizient Jahrringbreite (Tangentialrisse)	-40,311 [1]
y ₃	Koeffizient Frühholzanteil (Tangentialrisse)	-2,816 [1]

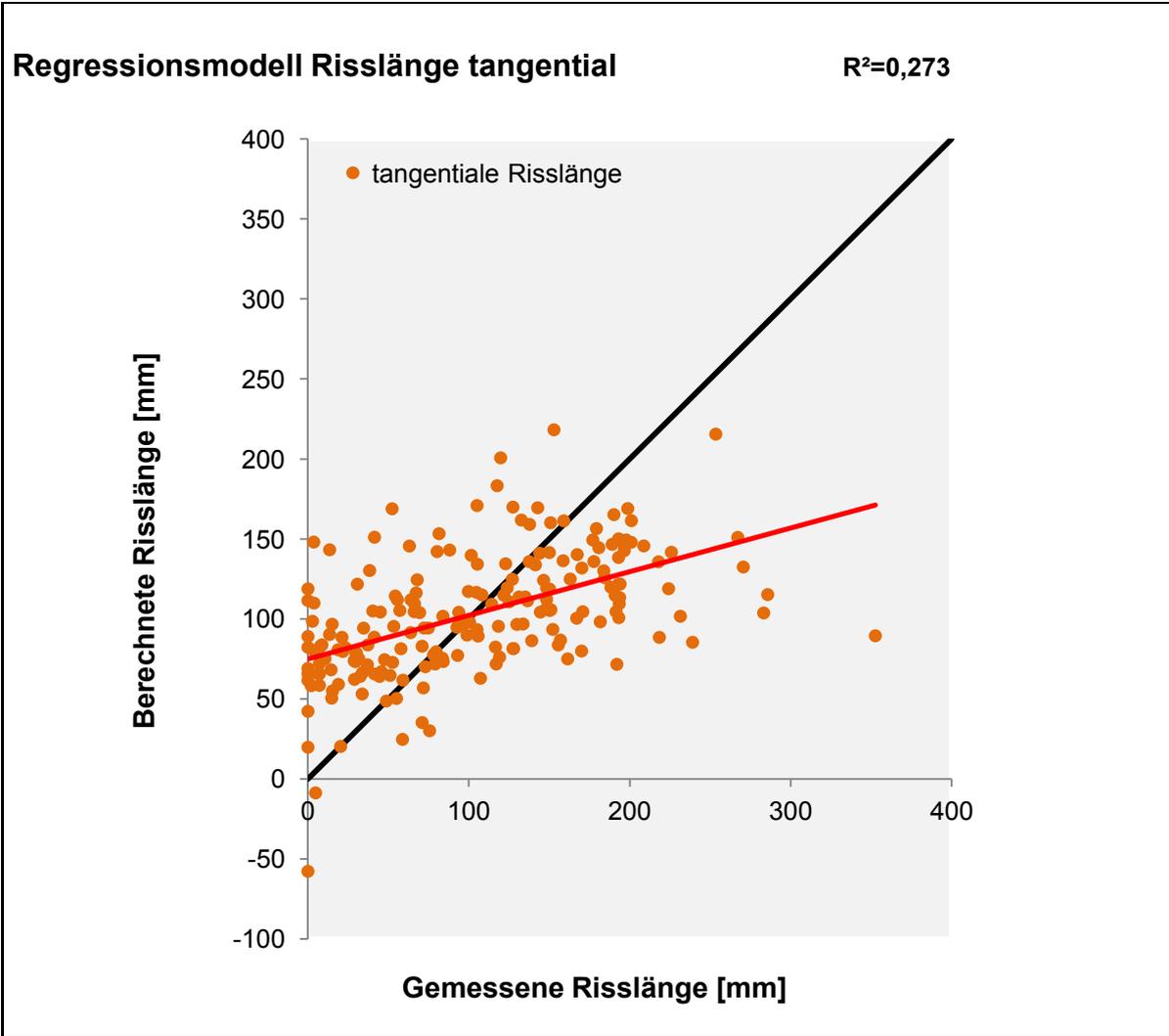


Abbildung 108: Vergleich der gemessenen tangentialen Risslängen und der durch das Modell berechneten tangentialen Risslängen

Da die durchschnittliche Jahrringbreite, der Frühholzanteil und die Dichte den größten Einfluss der erhobenen Merkmale auf die tangentielle Risslänge zeigen (siehe Tabelle 36), ist in Abbildung 109, Abbildung 110 und Abbildung 111 die tangentielle Risslänge in Abhängigkeit der Dichte, der durchschnittlichen Jahrringbreite und des Frühholzanteils für die Behandlungsintensitäten "forte" und "mezzo-exterior" dargestellt. Die visuell erkennbaren Einflüsse der erhobenen Merkmale sind sehr gering bzw. nicht vorhanden.

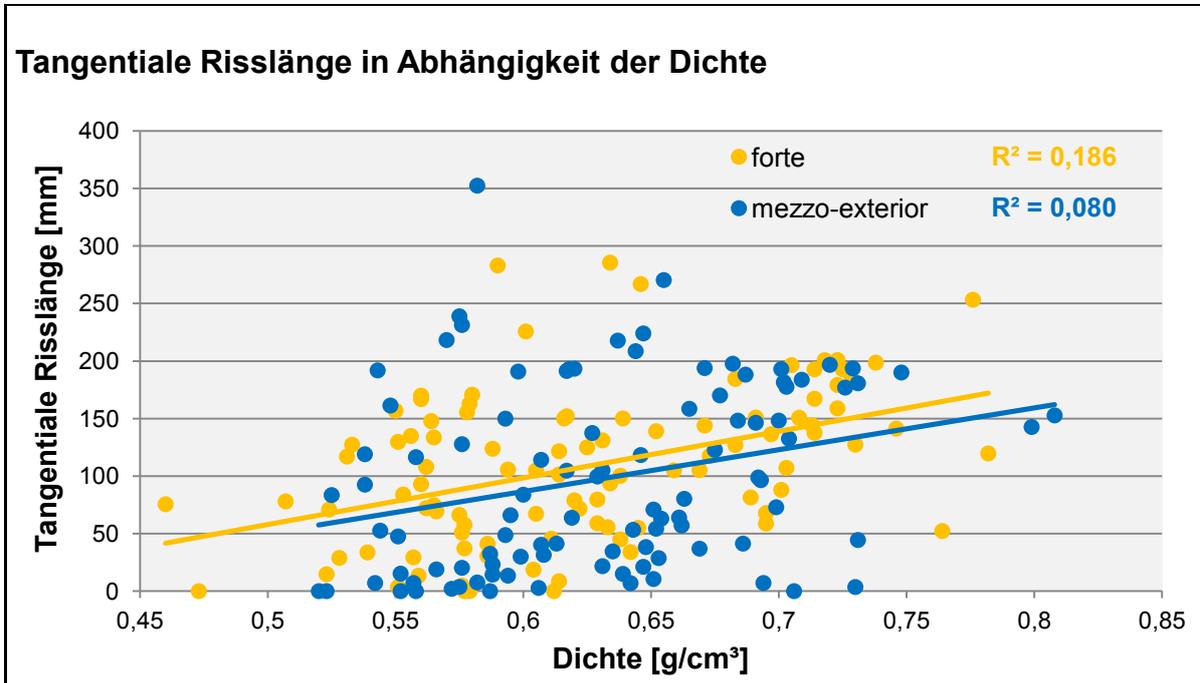


Abbildung 109: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit der Dichte für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior

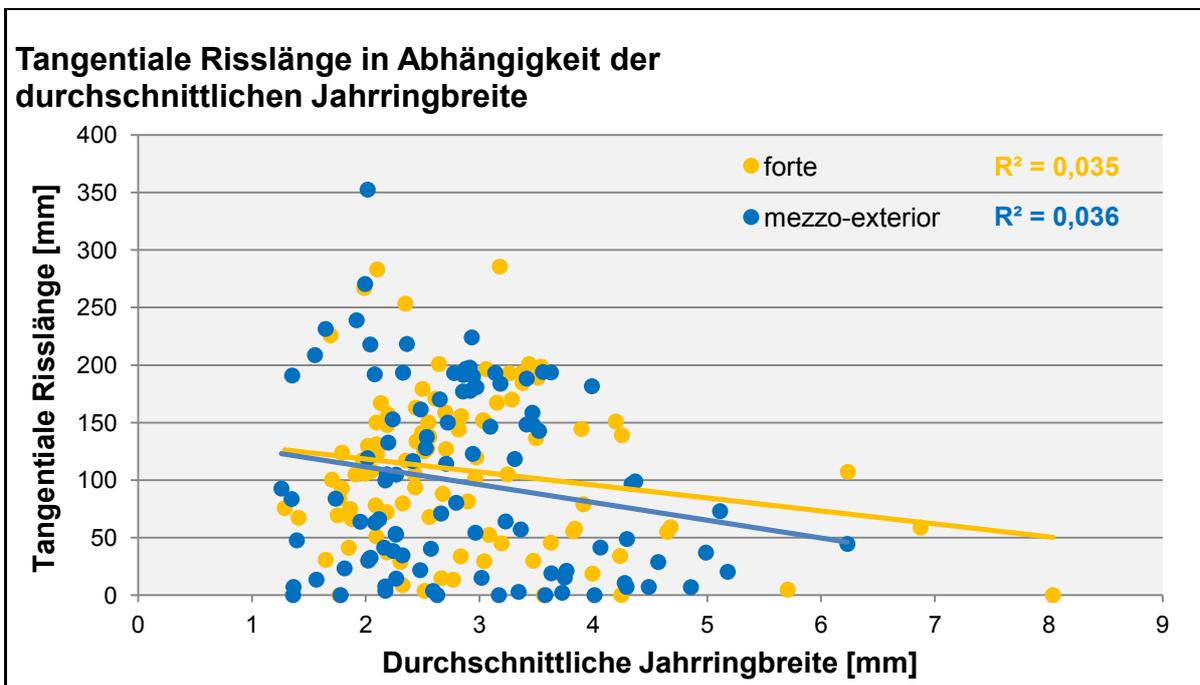


Abbildung 110: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit der durchschnittlichen Jahrringbreite für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior

Tangentiale Risslänge in Abhängigkeit des Frühholzanteils

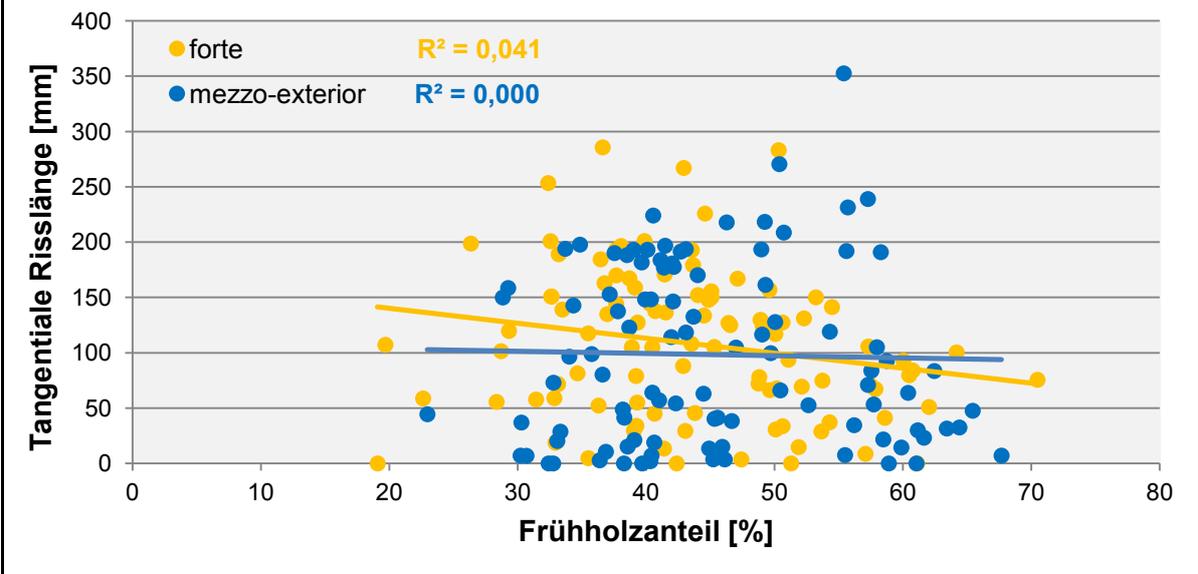


Abbildung 111: Gemessene tangentielle Risslänge in Abhängigkeit des Frühholzanteils für die Behandlungsintensitäten forte und mezzo-exterior

10.4.4 Diskussion - Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung

In der Untersuchung der Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung wurden die entstehenden Risse an den Querschnitten und den breiteren Längsflächen der Probenkörper vermessen. Dabei wurden die absoluten Risslängen gemessen und die Risslängen unterteilt in axiale Risse an den Längsflächen und radiale bzw. tangentielle Risse an den Querschnittsflächen. Danach wurde die Einflussstärke verschiedener Brett-, Holz- und Prozessmerkmale auf die gemessenen Risslängen in einer multiplen linearen Regressionsanalyse untersucht. Betreffend der gemessenen axialen Risslängen wurden signifikante Einflüsse der Merkmale Dichte, Jahrringlage, Behandlungsintensität, Jahrringbreite und Abkühlungsbedingung "rasch" festgestellt (Reihung nach Einflussstärke). Aufgrund der Einflussstärke können die Dichte, die Jahrringlage im Brett und die Behandlungsintensität als relevant angesehen werden. Die Jahrringbreite und die Abkühlungsbedingung "rasch" zeigen zwar knapp signifikante Einflüsse mit $p=,04$ bzw. $p=,045$, sind jedoch aufgrund der geringen Einflussstärke von geringer Bedeutung. Durch die signifikanten Einflussmerkmale konnten 64,4% der Varianz der axialen Risslängen erklärt werden. Die Dichte zeigte in dieser Untersuchung mit Abstand den größten Einfluss auf die axiale Rissbildung. Je höher die Dichte, desto höher ist die axiale Rissbildung. Der Einfluss der Jahrringlage auf die Rissbildung bei Bewitterung wurde auch schon von Sandberg (1999) und Sandberg & Söderström (2006) für unbehandeltes Holz und von Altgen et al. (2012) für thermisch behandeltes Holz feststellt. In diesen Untersuchungen wurde eine gesteigerte Rissbildung an tangentialen Holzoberflächen beobachtet. Auch in der vorliegenden Arbeit wird grundsätzlich eine steigende Rissbildung an Brettern der Jahrringlage "flader" aufgrund der gesteigerten tangentialen Holzoberflächen festgestellt. Die geringste Rissbildung zeigten Bretter der Jahrringlage "halbrift". Ein etwas widersprüchliches und aus theoretischer Sicht schwer erklärbares Ergebnis zeigte sich jedoch für die axiale Rissbildung der Behandlungsintensität "mezzo-exterior", da hier die Jahrringlage "riff" zur stärksten Rissbildung führte, obwohl an diesen Brettern die geringste tangentielle Oberfläche vorhanden ist. Betreffend der Behandlungsintensität wurde eine steigende Rissbildung mit steigender Behandlungsintensität festgestellt. Zum Einfluss der Behandlungsintensität auf die Rissbildung bei Bewitterung konnte keine vergleichbare Literatur gefunden werden. Jedoch stellte Altgen et al. (2012) in einer Untersuchung fest, dass es durch eine thermische Modifikation zu einer gesteigerten Rissbildung bei Bewitterung im Vergleich zu unbehandeltem Holz kommt. Bezüglich der radialen Rissbildung an den Querschnittsflächen wurden signifikante Einflüsse der Merkmale Dichte, Behandlungsintensität und Jahrringlage festgestellt (Reihung nach Einflussstärke). Wobei auch hier die Dichte mit Abstand die größte Einflussstärke zeigte. Durch die signifikanten Einflussmerkmale konnten 65% der Varianz der radialen Risslängen erklärt werden. Bezüglich der tangentialen Rissbildung an den Querschnittsflächen wurden signifikante Einflüsse der Merkmale Jahrringbreite, Frühholzanteil und Dichte festgestellt (Reihung nach Einflussstärke). Durch die signifikanten Einflussmerkmale konnten nur 27,3% der Varianz der tangentialen Risslängen erklärt werden. Während für die axiale Rissbildung an den Längsflächen und die radiale Rissbildung an den Querschnittflächen mit den erhobenen Brett-, Holz-, und Prozessmerkmalen in einer multiplen linearen Regressionsanalyse ein Modell erstellt werden konnte, das einen Großteil der Varianz der Risslängen erklärt, konnte die tangentielle Rissbildung mit den erhobenen Merkmalen nur unzureichend erklärt werden.

10.4.5 Bewertung der Hypothesen - Rissbildung nach einer Zyklusbehandlung

Hypothese 5

Liegende Jahrringlagen im Brett führen zu einer Zunahme der Risse, die durch Bewitterung an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen der Bretter entstehen.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 an Probekörpern mit unterschiedlichen Jahrringlagen.

Ergebnis: Die axiale Rissbildung bei Bewitterung ist grundsätzlich an tangentialen Holzoberflächen höher als auf radialen Holzoberflächen (Altgen et al. 2012), (Sandberg 1999), (Sandberg & Söderström 2006). Dies wurde auch in der vorliegenden Arbeit festgestellt, da Bretter der Jahrringlage "flader" vermehrte Rissbildung zeigten. Jedoch zeigten sich vor allem bei Probekörpern der Behandlungsintensität "mezzo-exterior" auch verstärkte Rissbildungen an Brettern der Jahrringlage "riff". Die geringste Rissbildung zeigten Bretter der Jahrringlage "halbrift". Der Einfluss der Jahrringlage im Brett auf die radiale Rissbildung an den Querschnittsflächen ist sehr gering. Betreffend der tangentialen Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde kein Einfluss der Jahrringlage im Brett festgestellt.

Entscheidung: Hypothese weder angenommen noch abgelehnt.

Anmerkung: Der Probenumfang der Bretter in der Jahrringlagengruppe "riff" (forte n=12, mezzo-ex. n=23) ist im Vergleich zum Probenumfang der Bretter in den Jahrringlagengruppen "halbrift" (forte n=47, mezzo-ex. n=35) und "flader" (forte n=40, mezzo-ex. n=41) für eine gesicherte Aussage zu gering. Da eine repräsentative Stichprobe aus dem Produktionsprozess gezogen wurde, konnte die Brettanzahl pro Jahrringlagengruppe nicht bewusst ausgewählt werden. Aus theoretischer Sicht liegen derzeit keine wissenschaftlichen Begründungen für eine verstärkte Rissbildung an Brettern der Jahrringlage "riff" vor. Zur eindeutigen Klärung sollten weitere Untersuchungen mit größerem Stichprobenumfang und/oder bewusst gewählter Jahrringlage im Brett durchgeführt werden.

Hypothese 6

Je höher die Darrdichte des Brettes, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 an Probekörpern mit unterschiedlicher Dichte.

Ergebnis: Die Dichte zeigte den stärksten Einfluss aller Merkmale auf die Rissbildung. Die axiale Rissbildung an den Längsflächen und die radiale Rissbildung an den Querschnitten steigen stark mit der Dichte. Auch betreffend der tangentialen Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde eine Zunahme der Rissbildung mit steigender Dichte festgestellt.

Entscheidung: Hypothese angenommen.

Hypothese 7

Je höher die durchschnittliche Jahrringbreite im Brett, desto weniger Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern mit unterschiedlicher Jahrringbreite nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321.

Ergebnis: Die Ergebnisse zeigten für die axiale Rissbildung an den Längsflächen, entgegen der aufgestellten Hypothese, eine Zunahme der Rissbildung mit steigender Jahrringbreite. Für die radiale Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde kein Einfluss der Jahrringbreite festgestellt. Betreffend der tangentialen Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde mit steigender Jahrringbreite eine Abnahme der Rissbildung festgestellt.

Entscheidung: Hypothese für die tangentiale Rissbildung an den Querschnittsflächen angenommen. Hypothese für die radiale Rissbildung an den Querschnittsflächen und für die axiale Rissbildung an den Längsflächen abgelehnt.

Hypothese 8

Je stärker die thermische Behandlungsintensität, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern unterschiedlicher Behandlungsintensität nach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321.

Ergebnis: Für die axiale Rissbildung an den Längsflächen und die radiale Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde eine steigende Rissbildung mit steigender Behandlungsintensität festgestellt. Bezüglich der tangentialen Rissbildung an den Querschnittsflächen konnte kein Einfluss der Behandlungsintensität festgestellt werden.

Entscheidung: Hypothese für die axiale Rissbildung an den Längsflächen und die radiale Rissbildung an den Querschnittsflächen angenommen. Hypothese für die tangentiale Rissbildung an den Querschnittsflächen abgelehnt.

Hypothese 9

Je rascher die Bretter nach der thermischen Behandlung abgekühlt werden, desto mehr Risse entstehen bei Bewitterung.

Überprüfung durch Messen der absoluten Risslänge an den Querschnitten (Stirnflächen) und den breiteren Längsflächen an Probekörpern die unterschiedlich rasch abgekühlt und danach einer Zyklusbehandlung in Anlehnung an ÖNORM EN 321 ausgesetzt wurden.

Ergebnis: Für die axiale Rissbildung an den Längsflächen wurde eine signifikante Steigerung der Rissbildung durch die Abkühlungsbedingung "rasch" im Vergleich zur Abkühlungsbedingung "schonend" und "normal" festgestellt. Die Einflussstärke ist jedoch vergleichsweise gering und die Irrtumswahrscheinlichkeit mit $\alpha=,045$ relativ hoch. Für die radiale und tangentiale Rissbildung an den Querschnittsflächen wurde kein Einfluss der Abkühlungsbedingung festgestellt.

Entscheidung: Hypothese abgelehnt.

11 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Untersuchung des Abkühlungsprozesses im Freien zeigen, dass es während der Abkühlung zu keiner Zunahme der Holzfeuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt kommt. Temperaturdifferenzen, die während der Abkühlung im Brettquerschnitt entstehen, jedoch nicht näher untersucht wurden, sollten aufgrund des geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Holz zu keiner Schädigung der Holzstruktur führen. Es wurde festgestellt, dass an Brettern am Stapelrand bei Kammeröffnung größere Feuchtigkeitsdifferenzen im Brettquerschnitt vorhanden sind, die während der Abkühlungs- und Rekonditionierungsphase vor Kammeröffnung entstehen. Dies könnte aus theoretischer Sicht die Qualität dieser Bretter beeinträchtigen. Verschalungsmessungen an den thermisch modifizierten Brettern führten zu dem Ergebnis, dass keine Verschalung der Bretter vorhanden ist. Zu beachten ist jedoch, dass die gemessenen Werte von den Abkühlungsbedingungen abhängig sind und daher nicht als allgemein gültig angesehen werden können, da diese von Jahreszeit und Witterung abhängig sind. Um den Einfluss unterschiedlicher Abkühlungsbedingungen zu untersuchen, wurden Probekörper unterschiedlich rasch abgekühlt und danach Bruchenergieprüfungen durchgeführt bzw. die Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung untersucht. Hier kann kein Einfluss der Abkühlungsbedingung festgestellt werden. Der Einfluss der Abkühlungsbedingung, der bei der Untersuchung der axialen Rissbildung festgestellt wird, ist aufgrund der geringen Einflussstärke zu vernachlässigen. Mit steigender Dichte wurde eine steigende Bruchenergie festgestellt. Mit steigender Behandlungsintensität wurde eine Abnahme der Bruchenergie festgestellt. Bezüglich der Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung, der zur Abschätzung des Verhaltens bei Bewitterung durchgeführt wurde, konnte festgestellt werden, dass die Merkmale Dichte, Jahrringlage und Behandlungsintensität einen erheblichen Einfluss auf die Rissbildung zeigen. Mit steigender Dichte und Behandlungsintensität steigt die Rissbildung. Bezüglich der Jahrringlage im Brett zeigten Brett mit der Jahrringlage "halbrift" die geringste Rissbildung. Bretter mit der Jahrringlage "flader" zeigten die stärkste Rissbildung. Jedoch wurde auch an Brettern mit der Jahrringlage "rift" vor allem an Probekörper der Behandlungsintensität "mezzo-exterior" eine verstärkte Rissbildung beobachtet. Zur Jahrringlage und Rissbildung sind daher noch weiterführende Untersuchungen notwendig. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass eine Veränderung der Abkühlungsbedingungen zu keiner Erhöhung der Produktqualität hinsichtlich Festigkeit und Rissbildung führt. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass eine Qualitätsverbesserung betreffend der Rissbildung durch eine Zyklusbehandlung (Bewitterung) durch eine Sortierung der Bretter hinsichtlich Dichte und Jahrringlage erreicht werden könnte. Des Weiteren sollte die thermische Behandlungsintensität betreffend der Qualitätsmerkmale Rissbildung bei Bewitterung und Festigkeit so niedrig wie möglich gehalten werden.

12 Literaturverzeichnis

- Accsys Technologies. (2013). Datenblatt - Accoya Radiata. Retrieved from: <http://www.accoya.com/deutsch/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/DS-DE.pdf>
- Alén, R., Kotilainen, R., & Zaman, A. (2002). Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225 °C. *Wood Science and Technology*, 36(2), 163–171.
- Altgen, M., Adamopoulos, S., Ala-Viikari, J., Antti, H., Tetri, T., & Militz, H. (2012). Factors Influencing the Crack Formation in Thermally Modified Wood. *In: Proceedings of the Sixth European Conference on Wood Modification 2012. Ljubljana, Slovenia.*
- Andritschke, S., Dünisch, O., & Herres, T. (2012). Verwendung von Holz im Außenbereich. München: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Augusta, U. (2007). Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation. Universität Hamburg.
- Beikircher, W. (2009). Bruchmechanische Untersuchungen von thermisch modifizierter Buche (*fagus sylvatica*) unter Mode I Belastung bei unterschiedlichen Materialfeuchtigkeiten. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien.
- Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforschung*, 57(5), 539–546.
- Boonstra, M. J., & Acker, J. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*, 64, 679–690.
- Boonstra, M. J., Acker, J., Kegel, E., & Stevens, M. (2006b). Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. *Wood Science and Technology*, 41(1), 31–57.
- Boonstra, M. J., & Tjeerdsma, B. (2006a). Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3), 204–211.
- Calonego, F. W., Severo, E. T. D., & Furtado, E. L. (2010). Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C and 220 °C. *Bioresource Technology*, 101(23), 9391–4.
- Dunky, M., & Niemz, P. (2002). Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren. Berlin u.a.: Springer.
- Esteves, B. M., Domingos, I. J., & Pereira, H. M. (2008b). Pine wood modification by heat treatment in air. *BioRes.*, 3(1), 142–154.
- Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., & Pereira, H. (2007). Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 41(3), 193–207.
- Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., & Pereira, H. (2008a). Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 42(5), 369–384.
- Esteves, B., Nunes, L., & Pereira, H. (2011). Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 521–525.
- Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 370–404.
- Esteves, B., Videira, R., & Pereira, H. (2011). Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. *Wood Science and Technology*, 45(4), 661–676.

- Firstwood GmbH. (2013). Verarbeitungshinweise - Thermoholz. Retrieved from: http://www.firstwood.de/medien/downloads/verarbeitungshinweise/Verarbeitungshinweise_FW.pdf
- Frühwald, A. (2000). Holz, der ökologische Baustoff: Verschläft die Holzwirtschaft ein Marketinginstrument der Zukunft? *Beiträge Der 17. Dreiländer- Holztagung HOLZ ART 2000, Zürich*.
- Furuno, T., Imamura, Y., & Kajita, H. (2004). The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Science and Technology*, 37(5), 349–361.
- Geistlich Ligamenta AG. (2013). Klebstoffempfehlung für Thermoholz. Retrieved from: http://www.geistlich.com/upload/docs/technische_informationen_pdf/Klebstoffempfehlung_fur_Thermoholz_DE.pdf
- González-Peña, M. M., Curling, S. F., & Hale, M. D. C. (2009b). On the effect of heat on the chemical composition and dimensions of thermally-modified wood. *Polymer Degradation and Stability*, 94(12), 2184–2193.
- González-Peña, M. M., & Hale, M. D. C. (2009a). Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes. *Holzforschung*, 63(4), 385–393.
- Grüll, G. (2006). Oberflächenbehandlung von Holz im Außenbereich: Gestaltungsmittel mit Schutzfunktion. *Zuschnitt*, 21.
- Gunduz, G., & Aydemir, D. (2009). Some Physical Properties of Heat-Treated Hornbeam (Carpinus betulus L.) Wood. *Drying Technology*, 27(5), 714–720.
- Gündüz, G., Niemz, P., & Aydemir, D. (2008). Changes in Specific Gravity and Equilibrium Moisture Content in Heat-Treated Fir (Abies nordmanniana subsp. bornmülleriana Mattf.) Wood. *Drying Technology*, 26(9), 1135–1139.
- Hakkou, M., Pétrissans, M., Gérardin, P., & Zoulalian, A. (2006). Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 393–397.
- Hansmann, C. (2013). Persönliche Besprechung mit Dipl.-Ing. Dr. Christian Hansmann, Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, März 2013.
- Hill, C. (2007). Wood modification: Chemical, Thermal and Other Processes. Chichester: John Wiley & Sons.
- Hill, C. (2011). Wood modification: An update. *BioResources*, 6(2), 918–919.
- Homan, W., Tjeerdsma, B., Beckers, E., & Jorissen, A. (2013). Structural and other properties of modified wood. Retrieved from: <http://timber.ce.wsu.edu/Resources/papers/3-5-1.pdf>
- Institut für Holztechnologie Dresden. (2013a). Dauerhaftigkeit von TMT. Retrieved from: http://www.tmt.iht-dresden.de/fileadmin/THERMOHOLZTAGE/download/Merkblatt_TMT.02.pdf
- Institut für Holztechnologie Dresden. (2013b). Verfahren zur Herstellung von TMT. Retrieved from: http://www.tmt.iht-dresden.de/fileadmin/THERMOHOLZTAGE/download/Merkblatt_TMT.06.pdf
- Junghans, K., & Niemz, P. (2005). Thermoholz im Praxiseinsatz: Ergebnisse einer Evaluation von in der Schweiz verbautem Holz. *Holztechnologie, Ausgabe 3/2005*, 26–30.

- Kačičko, A., Kačik, F., Caba, I., & Jurko, J. (2013). Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresource Technology*, 144, 669–74.
- Kamdem, D. P., Pizzi, A., & Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60(1), 1–6.
- Kaygin, B., Gunduz, G., & Aydemir, D. (2009). Some Physical Properties of Heat-Treated Paulownia (*Paulownia elongata*) Wood. *Drying Technology*, 27(1), 89–93.
- Koch, C. (2011). Holzbeläge im Freien: Auf die Konstruktion kommt es an. *Zuschnitt*, 41.
- Kollmann, F. (1936). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer.
- Kubojima, Y., Okano, T., & Ohta, M. (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science*, 46, 8–15.
- Lohmann, U. (1990). *Holz-Handbuch*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl.
- Majano-Majano, A., Hughes, M., & Fernandez-Cabo, J. L. (2012). The fracture toughness and properties of thermally modified beech and ash at different moisture contents. *Wood Science and Technology*, 46(1-3), 5–21.
- Metsä-Kortelainen, S., Antikainen, T., & Viitaniemi, P. (2006). The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3), 192–197.
- Mitteramskogler GmbH. (2013). Merkblatt Thermoholz-Verarbeitung. Retrieved from: http://www.mirako.at/downloads/Merkblatt-Thermoholzverarbeitung_1.0.pdf
- Münchinger Holz GmbH. (2013). Materialeigenschaften Belmadur Kiefer. Retrieved from: http://www.muenchinger-holz.de/pdfs/Materialeigenschaften_1012d.pdf
- Notburga, P. (2006). Chemischer Holzschutz: Übel oder Notwendigkeit? *Zuschnitt*, (21).
- Niemz, P. (1993). *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl.
- Olek, W., Majka, J., & Czajkowski, L. (2013). Sorption isotherms of thermally modified wood. *Holzforschung*, 67(2), 183–191.
- ÖNORM CEN/TS 15679: Thermisch modifiziertes Holz - Definitionen und Eigenschaften. Ausgabe 01. 02. 2008.
- ÖNORM EN 350-2: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. Ausgabe 01.12. 1994.
- ÖNORM EN 321: Holzwerkstoffe - Bestimmung der Feuchtbeständigkeit durch Zyklustest. Ausgabe 01. 03. 2002.
- ÖNORM EN 14464: Schnittholz - Verfahren zur Ermittlung der Verschalung. Ausgabe 01. 09. 2010.
- Patzelt, M., & Stingl, R. (2002). Einleitung. In: *Lignovisionen Band 3*. Schriftenreihe des Institutes für Holzforschung gemeinsam mit dem Verband Holzwirte Österreichs. Wien.
- Patzelt, M., Stingl, R., & Teischinger, A. (2002). Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. In: *Lignovisionen Band 3*. Schriftenreihe des Institutes für Holzforschung gemeinsam mit dem Verband Holzwirte Österreichs. Wien.
- Pleschberger, H., Hansmann, C., Müller, U., & Teischinger, A. (2013a). Fracture energy approach for the identification of changes in the wood caused by the drying processes. *Wood Science and Technology*, 47(6), 1323–1334.

- Pleschberger, H., Teischinger, A., Müller, U., & Hansmann, C. (2013b). Mechanical Characterization of Lumber of Small-Diameter Hardwood Species after Different Drying Schedules. *Drying Technology*, 31(9), 1056–1062.
- Pleschberger, H., Teischinger, A., Müller, U., & Hansmann, C. (2014). Changes in fracturing and colouring of solid spruce and ash wood after thermal modification. *Accepted by: Material Science and Engineering*.
- Reiterer, A., Burgert, I., Sinn, G., & Tschegg, S. (2002a). The radial reinforcement of the wood structure and its implication on mechanical and fracture mechanical properties - A comparison between two tree species. *Journal of Material Science*, 7, 935–940.
- Reiterer, A., Sinn, G., & Stanzl-Tschegg, S. E. (2002b). Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain. *Materials Science and Engineering*, 332, 29–36.
- Sandberg, D. (1999). Weathering of radial and tangential wood surfaces of pine and spruce. *Holzforschung*, 53, 355–364.
- Sandberg, D., & Söderström, O. (2006). Crack formation due to weathering of radial and tangential sections of pine and spruce. *Wood Material Science and Engineering*, 1(1), 12–20.
- Scheiding, W., & Direske, M. (2014). Comparison of reaction to water and moisture of sapwood and heartwood of *Pinus sylvestris* L., thermally modified with two treatment intensities. In: *Proceedings of the Seventh European Conference on Wood Modification*. Lissabon, Portugal.
- Schindler, C. (2011). Holzmodifikationen: Wider die Vergänglichkeit des Holzes. *Zuschnitt*, 41.
- Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A., Despres, A., & Gérardin, P. (2007). Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66(3), 173–180.
- Stanzl-Tschegg, S. E. (2006). Microstructure and fracture mechanical response of wood. *International Journal of Fracture*, 139(3-4), 495–508.
- Stanzl-Tschegg, S. E., Tan, D. M., & Tschegg, E. K. (1995). New splitting method for wood fracture characterization. *Wood Science and Technology*, 29, 31–55.
- Stefke, B., & Hinterstoisser, B. (2002). Acetylierung von Holz. In: *Lignovisionen Band 3*. Schriftreihe des Institutes für Holzforschung gemeinsam mit dem Verband Holzwirte Österreichs. Wien.
- Stefke, B., & Teischinger, A. (2002). Methoden der Holzmodifikation. In: *Lignovisionen Band 3*. Schriftreihe des Institutes für Holzforschung gemeinsam mit dem Verband Holzwirte Österreichs. Wien.
- Sundqvist, B., Karlsson, O., & Westermark, U. (2006). Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. *Wood Science and Technology*, 40(7), 549–561.
- Sundqvist, B., & Morén, T. (2002). The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60(5), 375–376.
- Tjeerdsma, B. F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., & Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56(3), 149–153.
- University of British Columbia. (2013). Sample Size Calculator. Department of Statistics. Retrieved from: <http://www.stat.ubc.ca/~rollin/stats/ssize/n2.html>

- Unsal, O., & Ayrimis, N. (2005). Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. *Journal of Wood Science*, 51(4), 405–409.
- ae n f h r, A., & Scholz, F. (2012). Taschenbuch der Holztechnik. M n chen: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.
- Weiland, J. J., & Guyonnet, R. (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61, 216–220.
- Welzbacher, C. R. (2007). Verhalten von nach neuen thermischen Modifikationsverfahren behandelte Fichte und Kiefer unter besonderer Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Mikroorganismen. Dissertation. Universität Hamburg.
- Windeisen, E., Strobel, C., & Wegener, G. (2007). Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41(6), 523–536.
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z., & Militz, H. (2013). Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(4), 401–416.
- Yildiz, S., Yildiz, U., & Tomak, E. (2011). The effects of natural weathering on the properties of heat-treated alder wood. *BioResources*, 6(3), 2504–2521.
- Yildiz, U. C., Yildiz, S., & Gezer, E. D. (2005). Mechanical and chemical behavior of beech wood modified by heat. *Wood and Fiber Science*, 37(3), 456–461.
- Zobel, B. J., & Buijtenen, J. P. V. (1989). Wood variation: Its causes and control. Berlin u.a: Springer-Verlag.

13 Anhang

13.1 Holzfeuchtigkeitsprofile

Alle nicht in den Ergebnissen im Abschnitt 10.1.2 angeführten Holzfeuchtigkeitsprofile sind im folgenden Teil abgebildet.

13.1.1 Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettbreite

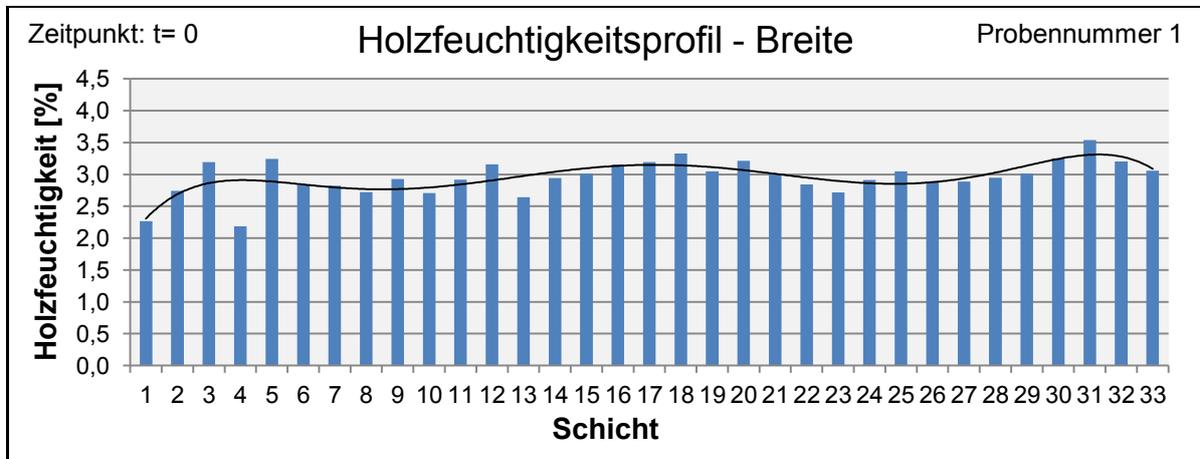


Abbildung 112: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0

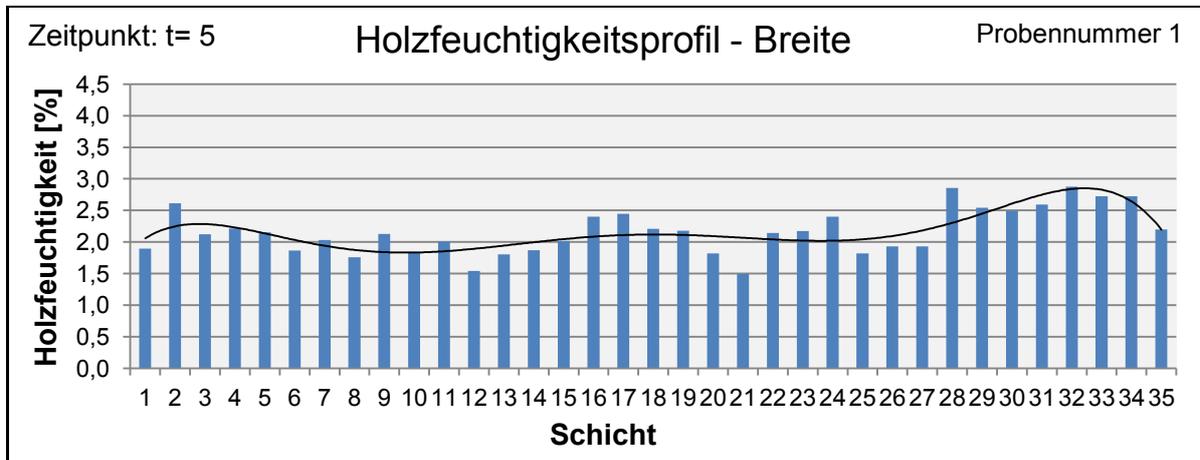


Abbildung 113: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5

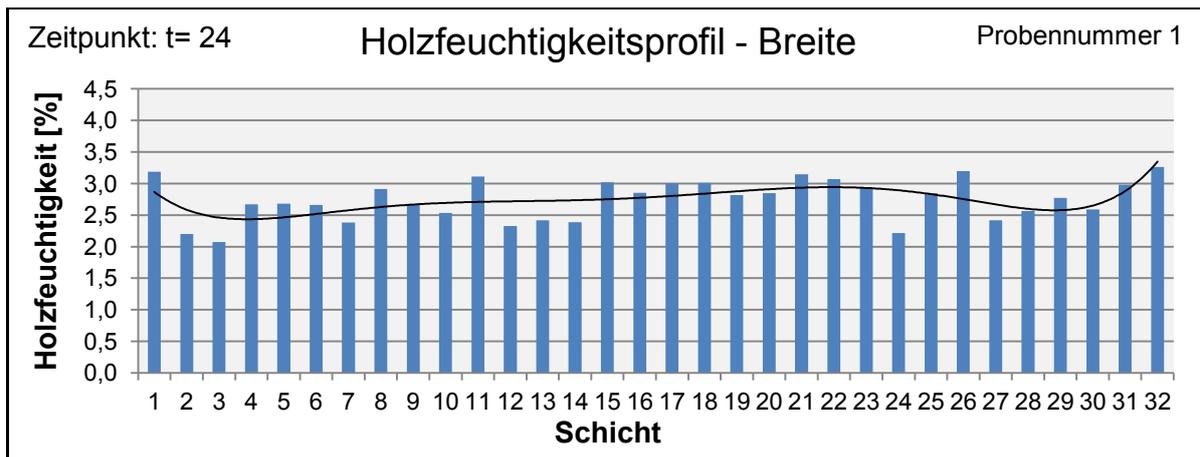


Abbildung 114: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24

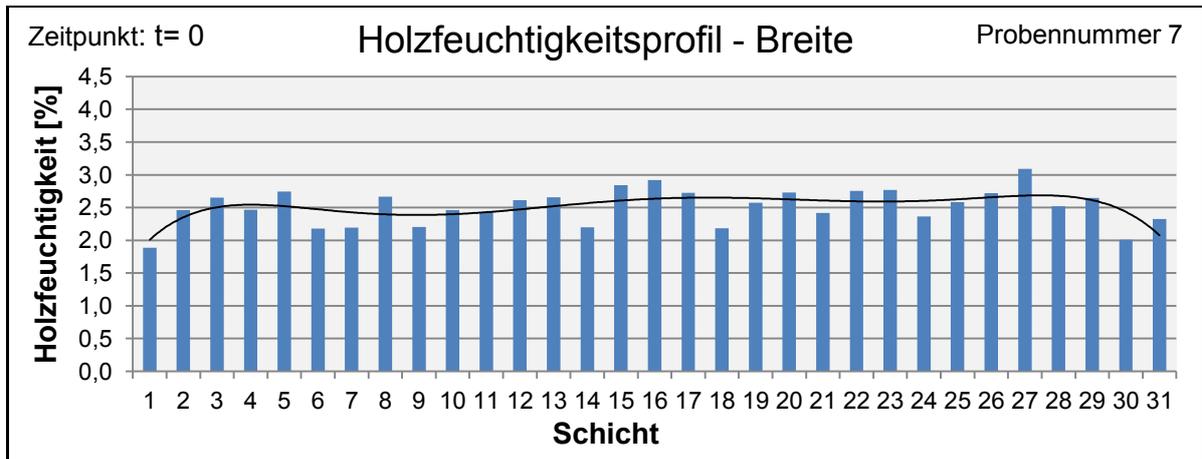


Abbildung 115: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=0

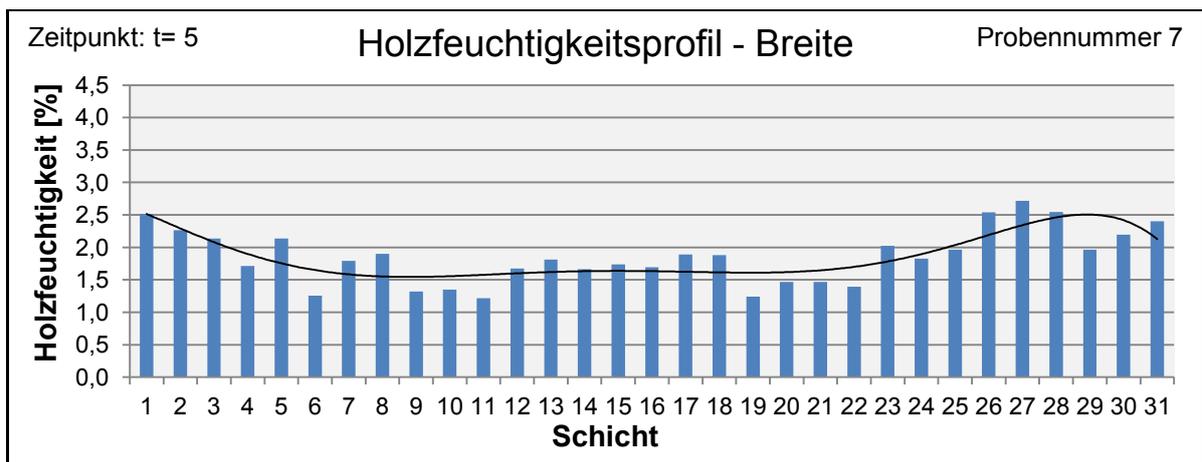


Abbildung 116: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=5

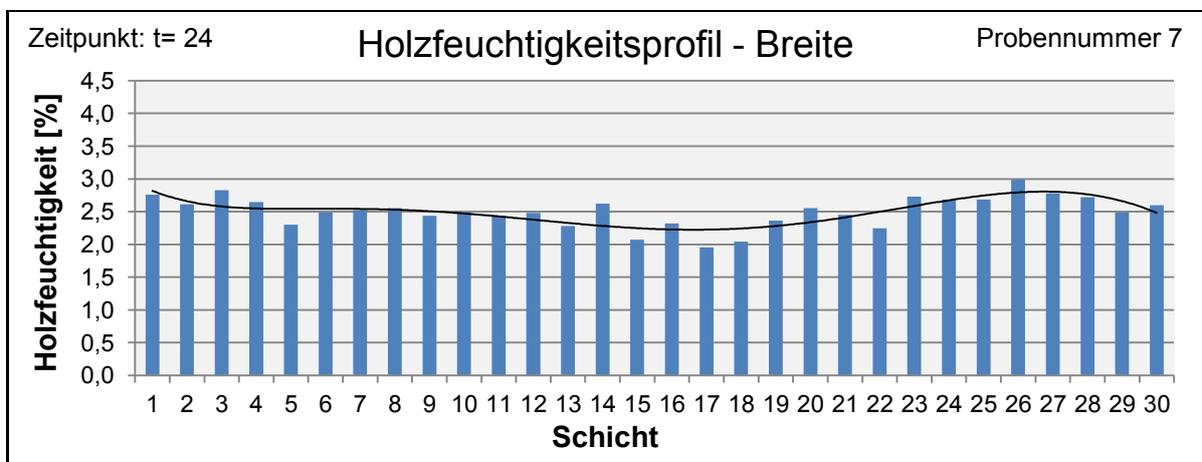


Abbildung 117: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettbreite zum Zeitpunkt t=24

13.1.2 Holzfeuchtigkeitsprofile in Brettstärke*

*Probennummer 4, Zeitpunkt t=0 fehlt, da die entnommene Probe aufgrund von Verwachsungen nicht gespalten werden konnte.

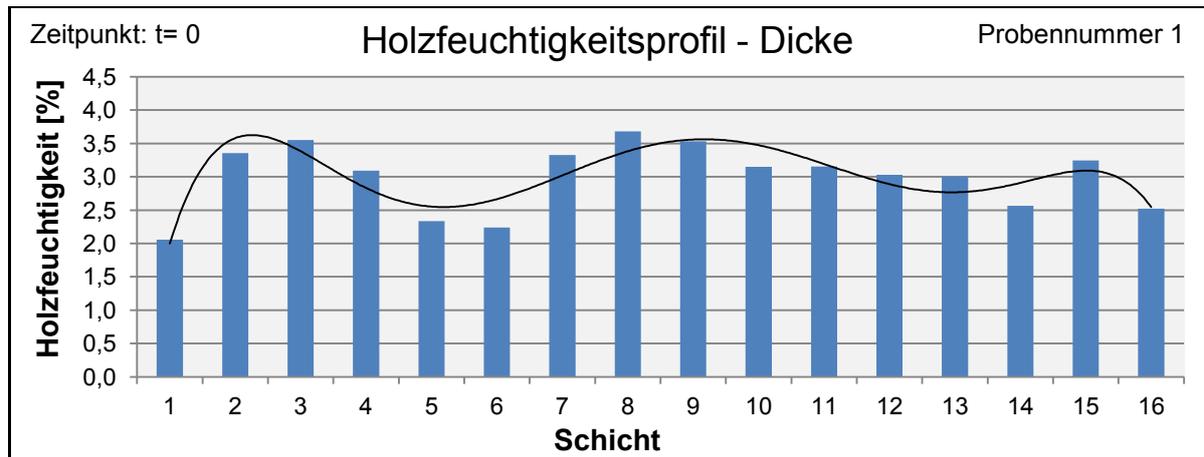


Abbildung 118: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=0

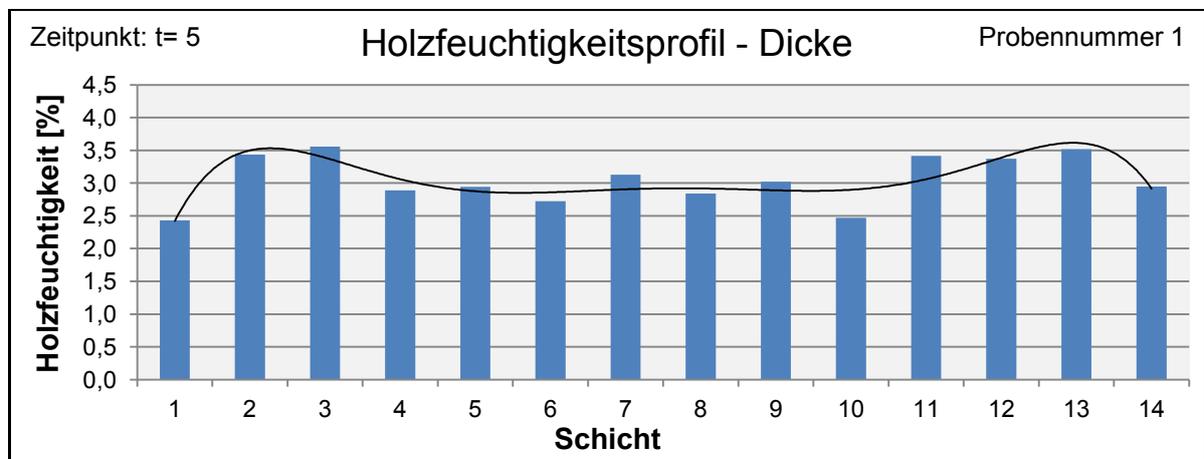


Abbildung 119: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5

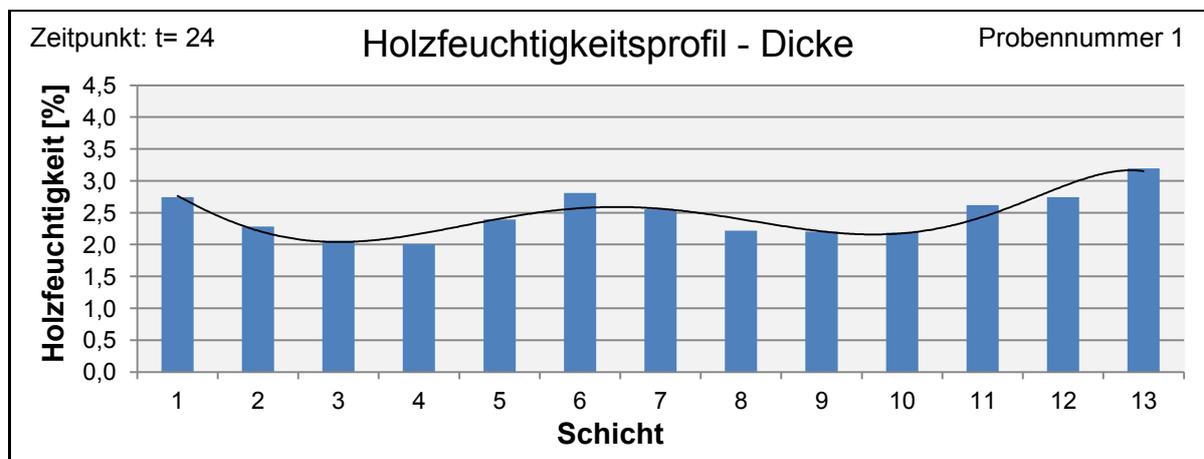


Abbildung 120: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 1 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24

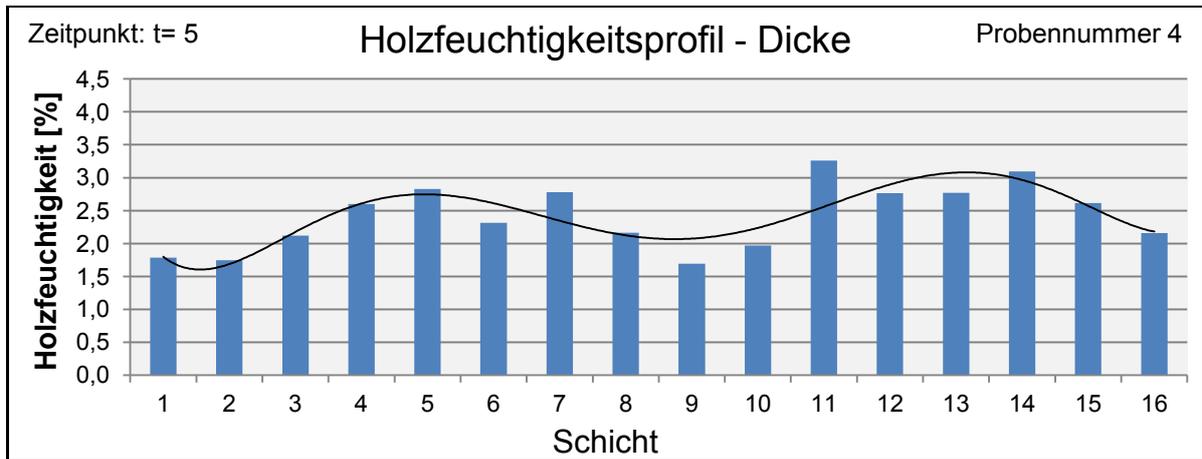


Abbildung 121: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5

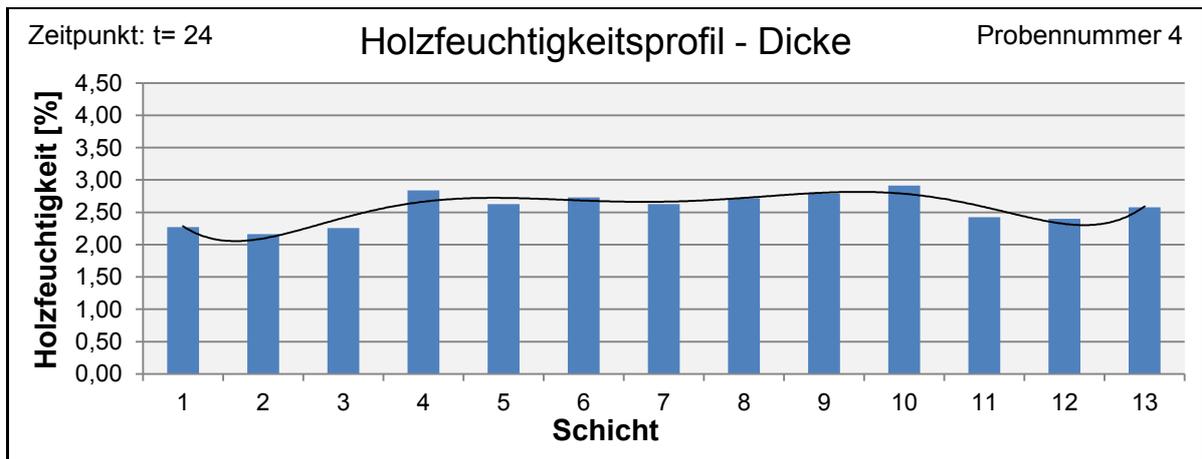


Abbildung 122: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 4 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24



Abbildung 123: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=0

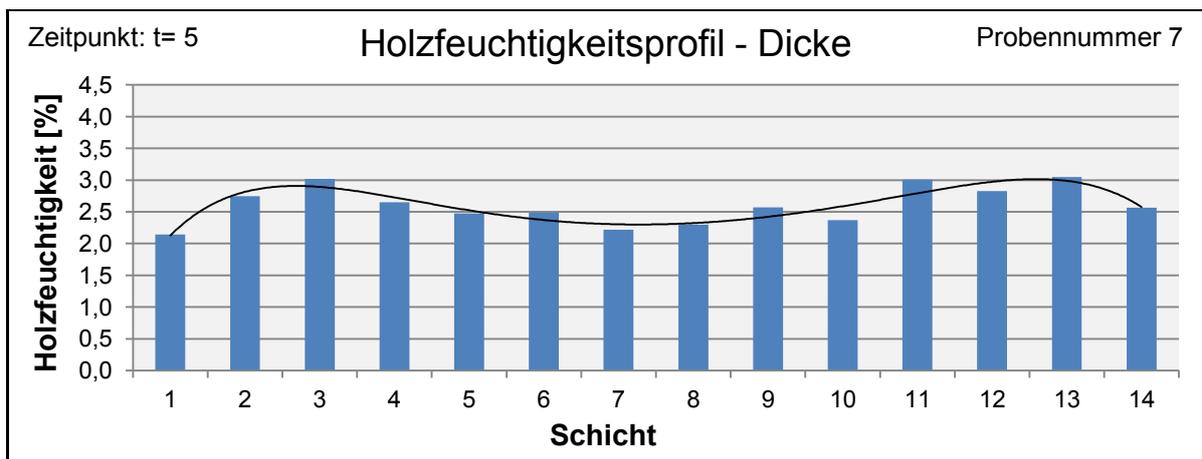


Abbildung 124: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=5

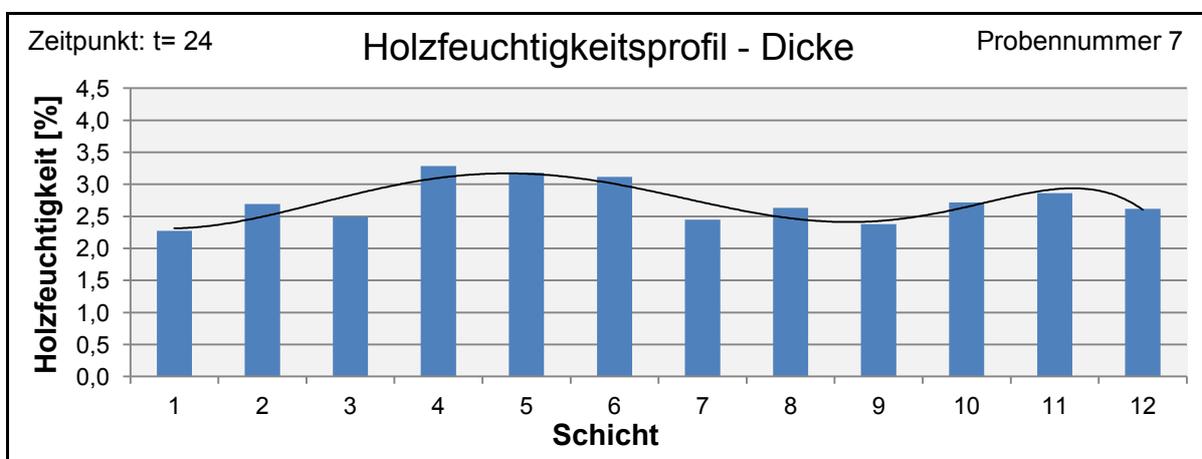


Abbildung 125: Holzfeuchtigkeitsprofil der Probennummer 7 in Brettstärke zum Zeitpunkt t=24

13.2 Regressionsanalysen zur Rissbildung nach 1. und 2. Zyklusbehandlung

Tabelle 37: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,682	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,465	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-991,663	178,218		0,000	
	Dichte		1696,218	173,006	0,632	0,000	1,466
	Jahringbreite		-2,780	14,221	-0,016	0,845	2,477
	Frühholzanteil		1,258	1,648	0,070	0,446	2,965
	Jahringlage rift ^A		95,139	28,229	0,204	0,001	1,294
	Jahringlage flader ^A		52,139	21,891	0,145	0,017	1,293
	Abkühlung schonend ^B		2,256	23,526	0,006	0,924	1,225
	Abkühlung rasch ^B		-40,939	23,103	-0,102	0,078	1,182
	Behandlung forte ^C		32,733	19,371	0,092	0,093	1,047
a) Referenzgruppen: A Jahringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin-Watson-Statistik: 1,772							

Tabelle 38: Multiple lineare Regressionsanalyse für die axiale Risslänge an den Längsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,797	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,634	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-2564,228	359,638		0,000	
	Dichte		4060,342	349,120	0,619	0,000	1,466
	Jahringbreite		44,899	28,698	0,108	0,119	2,477
	Frühholzanteil		1,127	3,326	0,026	0,735	2,965
	Jahringlage rift ^A		301,304	56,964	0,265	0,000	1,294
	Jahringlage flader ^A		282,093	44,174	0,319	0,000	1,293
	Abkühlung schonend ^B		32,135	47,475	0,033	0,499	1,225
	Abkühlung rasch ^B		49,329	46,620	0,051	0,291	1,182
	Behandlung forte ^C		196,168	39,089	0,226	0,000	1,047
a) Referenzgruppen: A Jahringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin-Watson-Statistik: 1,910							

Tabelle 39: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,778	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,605	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-580,213	75,128		0,000	
	Dichte		886,226	73,128	0,671	0,000	1,466
	Jahringbreite		11,395	6,011	0,136	0,060	2,477
	Frühholzanteil		0,823	0,697	0,093	0,239	2,965
	Jahringlage rift ^A		21,053	11,932	0,092	0,079	1,294
	Jahringlage flader ^A		43,451	9,253	0,244	0,000	1,293
	Abkühlung schonend ^B		-0,925	9,944	-0,005	0,926	1,225
	Abkühlung rasch ^B		13,518	9,765	0,069	0,168	1,182
	Behandlung forte ^C		50,650	8,188	0,289	0,000	1,047
a) Referenzgruppen: A Jahringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin-Watson-Statistik: 1,686							

Tabelle 40: Multiple lineare Regressionsanalyse für die radiale Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,818	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R ² = 0,669	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		-1209,712	148,190		0,000	
	Dichte		1929,362	143,856	0,680	0,000	1,466
	Jahringbreite		34,925	11,825	0,195	0,004	2,477
	Frühholzanteil		2,042	1,370	0,107	0,138	2,965
	Jahringlage rift ^A		58,258	23,472	0,118	0,014	1,294
	Jahringlage flader ^A		39,890	18,202	0,104	0,030	1,293
	Abkühlung schonend ^B		-34,224	19,562	-0,081	0,082	1,225
	Abkühlung rasch ^B		11,308	19,210	0,027	0,557	1,182
	Behandlung forte ^C		147,814	16,107	0,393	0,000	1,047
a) Referenzgruppen: A Jahringlage halbrift B Abkühlung normal C Behandlungsintensität mezzo-exterior b) Durbin-Watson-Statistik: 1,901							

Tabelle 41: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 1. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,567	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R²= 0,322	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		43,603	32,942		0,187	
	Dichte		82,474	31,978	0,187	0,011	1,466
	Jahringbreite		-9,560	2,629	-0,343	0,000	2,477
	Frühholzanteil		-0,956	0,305	-0,309	0,003	2,965
	Jahringlage rift ^A		19,505	5,218	0,255	0,000	1,294
	Jahringlage flader ^A		-13,540	4,046	-0,228	0,001	1,293
	Abkühlung schonend ^B		-1,637	4,349	-0,025	0,707	1,225
	Abkühlung rasch ^B		-5,213	4,270	-0,080	0,224	1,182
	Behandlung forte ^C		-6,388	3,580	-0,109	0,076	1,047

a) Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung normal
C Behandlungsintensität mezzo-exterior
b) Durbin-Watson-Statistik: 1,637

Tabelle 42: Multiple lineare Regressionsanalyse für die tangentielle Risslänge an den Querschnittsflächen nach der 2. Zyklusbehandlung

Modell: abhängige Variable Risslänge axial		R= 0,526	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	Sig.	VIF
		R²= 0,276	Regressions- koeffizienten	Standard- fehler			
unabhängige Variablen	Konstante		97,597	70,354		0,167	
	Dichte		284,756	68,297	0,321	0,000	1,466
	Jahringbreite		-32,856	5,614	-0,570	0,000	2,477
	Frühholzanteil		-2,692	0,651	-0,441	0,000	2,965
	Jahringlage rift ^A		9,736	11,144	0,062	0,383	1,294
	Jahringlage flader ^A		1,405	8,642	0,011	0,871	1,293
	Abkühlung schonend ^B		6,470	9,287	0,048	0,487	1,225
	Abkühlung rasch ^B		3,866	9,120	0,029	0,672	1,182
	Behandlung forte ^C		4,502	7,647	0,037	0,557	1,047

a) Referenzgruppen:
A Jahringlage halbrift
B Abkühlung normal
C Behandlungsintensität mezzo-exterior
b) Durbin-Watson-Statistik: 1,917

13.3 Brettmerkmale - Einzelwerte

Tabelle 43: Brettmerkmale

Proben- bezeichnung	Dichte	Ø Jahringbreite	Frühholzanteil	Jahringlage	Behandlung	Abkühlung
	[g/cm³]	[mm]	[%]			
FN 1	0,697	3,495	41,529	halbrift	forte	normal
FN 2	0,612	4,244	51,296	flader	forte	normal
FN 3	0,705	3,057	38,054	halbrift	forte	normal
FN 4	0,642	4,234	39,244	flader	forte	normal
FN 5	0,703	6,235	19,695	flader	forte	normal
FN 6	0,659	1,909	38,888	flader	forte	normal
FN 7	0,669	2,430	45,307	halbrift	forte	normal
FN 8	0,604	3,991	32,945	halbrift	forte	normal
FN 9	0,701	2,676	42,886	rift	forte	normal
FN 10	0,645	4,647	39,309	rift	forte	normal
FN 11	0,730	2,540	39,344	flader	forte	normal
FN 12	0,559	2,767	41,393	halbrift	forte	normal
FN 13	0,551	2,517	47,417	halbrift	forte	normal
FN 14	0,575	1,876	49,643	halbrift	forte	normal
FN 15	0,611	3,625	43,800	halbrift	forte	normal
FN 16	0,614	2,322	57,091	halbrift	forte	normal
FN 17	0,746	2,494	54,481	rift	forte	normal
FN 18	0,713	3,894	40,306	rift	forte	normal
FN 19	0,473	1,768	61,106	flader	forte	normal
FN 20	0,577	8,036	19,093	flader	forte	normal
FN 21	0,629	2,324	60,492	halbrift	forte	normal
FN 22	0,577	2,186	54,296	flader	forte	normal
FN 23	0,691	4,196	32,631	flader	forte	normal
FN 24	0,631	2,092	52,296	halbrift	forte	normal
FN 25	0,638	1,703	64,188	flader	forte	normal
FN 26	0,673	1,975	35,491	flader	forte	normal
FN 27	0,524	2,651	57,451	halbrift	forte	normal
FN 28	0,723	2,698	39,136	rift	forte	normal
FN 29	0,683	3,377	36,464	flader	forte	normal
FN 30	0,671	2,816	37,676	rift	forte	normal
FN 31	0,579	3,564	42,383	flader	forte	normal
FN 32	0,616	2,094	53,231	halbrift	forte	normal
FN 33	0,683	2,705	46,417	halbrift	forte	normal
FN 34	0,638	3,193	40,661	flader	forte	normal
FN 35	0,566	1,753	52,123	halbrift	forte	normal
FN 36	0,652	4,250	33,483	halbrift	forte	normal
FN 37	0,587	3,471	39,053	halbrift	forte	normal
FN 38	0,576	5,706	35,506	flader	forte	normal
FN 39	0,764	3,084	36,298	flader	forte	normal
FN 40	0,723	2,498	43,656	halbrift	forte	normal
FN 41	0,565	2,446	44,505	halbrift	forte	normal
FN 42	0,714	3,261	43,561	flader	forte	normal
FN 43	0,565	1,863	53,739	flader	forte	normal
FN 44	0,634	2,433	51,085	flader	forte	normal
FN 45	0,605	1,409	57,860	halbrift	forte	normal

Proben- bezeichnung	Dichte	Ø Jahringbreite	Frühholzanteil	Jahringlage	Behandlung	Abkühlung
	[g/cm³]	[mm]	[%]			
FR 1	0,560	3,283	37,685	flader	forte	rasch
FR 2	0,507	2,086	48,816	flader	forte	rasch
FR 3	0,579	2,439	36,764	halbrift	forte	rasch
FR 4	0,625	2,512	46,552	halbrift	forte	rasch
FR 5	0,557	3,040	43,056	flader	forte	rasch
FR 6	0,556	2,485	36,980	halbrift	forte	rasch
FR 7	0,614	2,097	49,653	rift	forte	rasch
FR 8	0,550	2,197	49,599	flader	forte	rasch
FR 9	0,533	2,099	50,625	halbrift	forte	rasch
FR 10	0,714	2,559	40,721	flader	forte	rasch
FR 11	0,617	3,029	44,041	flader	forte	rasch
FR 12	0,577	3,838	31,433	flader	forte	rasch
FR 13	0,634	3,177	36,621	flader	forte	rasch
FR 14	0,594	1,995	57,315	halbrift	forte	rasch
FR 15	0,620	3,911	39,223	flader	forte	rasch
FR 16	0,695	6,874	22,636	flader	forte	rasch
FR 17	0,531	2,351	50,066	halbrift	forte	rasch
FR 18	0,776	2,347	32,377	flader	forte	rasch
FR 19	0,723	2,643	39,877	flader	forte	rasch
FR 20	0,578	2,838	45,079	flader	forte	rasch
FR 21	0,576	2,092	62,041	halbrift	forte	rasch
FR 22	0,560	1,789	60,034	flader	forte	rasch
FR 23	0,586	1,850	58,597	rift	forte	rasch
FR 24	0,695	2,559	50,169	flader	forte	rasch
FR 25	0,633	3,822	28,356	flader	forte	rasch
FR 26	0,590	2,100	50,325	halbrift	forte	rasch
FR 27	0,714	3,153	38,697	flader	forte	rasch
FS 1	0,580	2,611	41,445	halbrift	forte	schonend
FS 2	0,564	2,187	44,864	rift	forte	schonend
FS 3	0,560	2,132	47,125	halbrift	forte	schonend
FS 4	0,562	2,183	48,759	halbrift	forte	schonend
FS 5	0,551	2,019	48,913	halbrift	forte	schonend
FS 6	0,539	2,834	50,633	halbrift	forte	schonend
FS 7	0,639	2,549	45,090	rift	forte	schonend
FS 8	0,646	1,987	42,935	flader	forte	schonend
FS 9	0,586	1,648	50,094	halbrift	forte	schonend
FS 10	0,708	3,046	32,615	halbrift	forte	schonend
FS 11	0,562	2,051	43,533	halbrift	forte	schonend
FS 12	0,553	1,767	60,761	halbrift	forte	schonend
FS 13	0,460	1,288	70,490	halbrift	forte	schonend
FS 14	0,588	1,791	49,091	halbrift	forte	schonend
FS 15	0,528	2,304	53,652	halbrift	forte	schonend
FS 16	0,601	1,689	44,590	flader	forte	schonend
FS 17	0,523	2,665	51,886	rift	forte	schonend
FS 18	0,605	3,245	40,484	halbrift	forte	schonend
FS 19	0,629	4,678	32,856	halbrift	forte	schonend
FS 20	0,782	2,970	29,319	flader	forte	schonend
FS 21	0,614	2,961	28,708	halbrift	forte	schonend
FS 22	0,728	3,510	33,196	rift	forte	schonend
FS 23	0,725	3,368	37,661	halbrift	forte	schonend
FS 24	0,718	3,433	32,557	halbrift	forte	schonend
FS 25	0,738	3,541	26,353	halbrift	forte	schonend
FS 26	0,689	2,896	34,657	flader	forte	schonend
FS 27	0,622	4,711	33,146	halbrift	forte	schonend

Proben- bezeichnung	Dichte	Ø Jahringbreite	Frühholzanteil	Jahringlage	Behandlung	Abkühlung
	[g/cm³]	[mm]	[%]			
MN 1	0,566	3,630	40,638	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 2	0,686	2,161	45,569	rift	mezzo-ex	normal
MN 3	0,552	1,361	61,060	flader	mezzo-ex	normal
MN 4	0,706	4,009	32,761	flader	mezzo-ex	normal
MN 5	0,799	3,521	34,336	rift	mezzo-ex	normal
MN 6	0,576	2,527	50,053	rift	mezzo-ex	normal
MN 7	0,731	2,971	42,024	flader	mezzo-ex	normal
MN 8	0,608	2,030	63,422	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 9	0,617	2,857	42,698	flader	mezzo-ex	normal
MN 10	0,701	2,776	39,033	flader	mezzo-ex	normal
MN 11	0,669	4,988	30,288	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 12	0,704	2,197	43,694	rift	mezzo-ex	normal
MN 13	0,748	2,941	37,542	flader	mezzo-ex	normal
MN 14	0,665	3,463	29,259	flader	mezzo-ex	normal
MN 15	0,576	1,647	55,717	flader	mezzo-ex	normal
MN 16	0,731	6,231	22,971	flader	mezzo-ex	normal
MN 17	0,543	2,078	55,608	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 18	0,647	2,931	40,556	flader	mezzo-ex	normal
MN 19	0,631	2,184	57,977	rift	mezzo-ex	normal
MN 20	0,730	2,591	46,126	flader	mezzo-ex	normal
MN 21	0,588	2,267	59,883	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 22	0,588	1,813	61,642	flader	mezzo-ex	normal
MN 23	0,570	2,361	49,244	flader	mezzo-ex	normal
MN 24	0,726	2,854	41,391	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 25	0,613	4,061	38,305	flader	mezzo-ex	normal
MN 26	0,808	2,236	37,165	flader	mezzo-ex	normal
MN 27	0,587	2,628	39,700	flader	mezzo-ex	normal
MN 28	0,523	3,169	38,281	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 29	0,639	3,017	45,934	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 30	0,520	1,778	58,908	flader	mezzo-ex	normal
MN 31	0,647	3,763	39,083	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 32	0,653	4,569	33,326	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 33	0,646	3,308	43,101	rift	mezzo-ex	normal
MN 34	0,627	2,536	37,807	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 35	0,557	4,291	30,226	flader	mezzo-ex	normal
MN 36	0,607	2,706	41,964	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 37	0,618	3,137	40,107	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 38	0,620	2,327	48,972	rift	mezzo-ex	normal
MN 39	0,558	2,413	49,038	flader	mezzo-ex	normal
MN 40	0,544	2,265	52,649	flader	mezzo-ex	normal
MN 41	0,582	2,171	55,498	flader	mezzo-ex	normal
MN 42	0,655	1,993	50,379	halbrift	mezzo-ex	normal
MN 43	0,593	2,720	28,841	rift	mezzo-ex	normal
MN 44	0,558	3,577	32,408	flader	mezzo-ex	normal
MN 45	0,606	3,342	36,387	flader	mezzo-ex	normal

Proben- bezeichnung	Dichte	Ø Jahringbreite	Frühholzanteil	Jahringlage	Behandlung	Abkühlung
	[g/cm³]	[mm]	[%]			
MR 1	0,682	2,914	34,852	flader	mezzo-ex	rasch
MR 2	0,599	2,021	61,162	rift	mezzo-ex	rasch
MR 3	0,691	3,094	42,100	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 4	0,709	3,182	41,129	rift	mezzo-ex	rasch
MR 5	0,675	2,940	38,692	rift	mezzo-ex	rasch
MR 6	0,587	2,041	64,404	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 7	0,631	2,478	58,475	flader	mezzo-ex	rasch
MR 8	0,582	2,016	55,397	flader	mezzo-ex	rasch
MR 9	0,651	4,275	36,870	flader	mezzo-ex	rasch
MR 10	0,542	1,365	67,689	flader	mezzo-ex	rasch
MR 11	0,694	4,486	40,423	flader	mezzo-ex	rasch
MR 12	0,662	3,361	41,012	rift	mezzo-ex	rasch
MR 13	0,576	5,179	33,083	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 14	0,720	2,879	41,486	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 15	0,702	3,986	39,658	flader	mezzo-ex	rasch
MR 16	0,687	3,413	38,516	rift	mezzo-ex	rasch
MR 17	0,684	3,467	39,925	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 18	0,595	2,117	50,457	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 19	0,572	3,725	40,336	flader	mezzo-ex	rasch
MR 20	0,635	2,322	56,206	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 21	0,538	2,015	54,313	flader	mezzo-ex	rasch
MR 22	0,525	1,348	62,447	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 23	0,598	1,353	58,283	rift	mezzo-ex	rasch
MR 24	0,607	2,572	45,329	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 25	0,575	2,172	45,231	halbrift	mezzo-ex	rasch
MR 26	0,654	2,081	44,473	rift	mezzo-ex	rasch
MR 27	0,648	2,241	46,673	rift	mezzo-ex	rasch
MS 1	0,671	3,556	33,708	flader	mezzo-ex	schonend
MS 2	0,643	2,262	57,731	rift	mezzo-ex	schonend
MS 3	0,677	2,650	44,019	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 4	0,700	3,412	40,380	rift	mezzo-ex	schonend
MS 5	0,663	2,794	36,610	rift	mezzo-ex	schonend
MS 6	0,619	1,952	60,408	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 7	0,651	2,662	57,282	flader	mezzo-ex	schonend
MS 8	0,575	1,919	57,279	flader	mezzo-ex	schonend
MS 9	0,642	4,856	30,682	flader	mezzo-ex	schonend
MS 10	0,551	1,394	65,437	flader	mezzo-ex	schonend
MS 11	0,699	5,112	32,784	flader	mezzo-ex	schonend
MS 12	0,661	3,228	40,492	rift	mezzo-ex	schonend
MS 13	0,552	3,747	38,566	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 14	0,703	2,917	42,157	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 15	0,692	4,367	35,763	flader	mezzo-ex	schonend
MS 16	0,729	3,626	43,091	rift	mezzo-ex	schonend
MS 17	0,693	4,335	34,018	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 18	0,617	2,266	47,001	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 19	0,593	4,294	38,190	flader	mezzo-ex	schonend
MS 20	0,600	1,735	57,548	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 21	0,548	2,482	49,299	flader	mezzo-ex	schonend
MS 22	0,538	1,259	58,744	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 23	0,644	1,553	50,727	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 24	0,637	2,039	46,276	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 25	0,594	1,566	44,909	halbrift	mezzo-ex	schonend
MS 26	0,629	2,172	49,710	rift	mezzo-ex	schonend
MS 27	0,652	2,963	42,315	rift	mezzo-ex	schonend

13.4 Bruchenergieprüfung - Einzelwerte

Tabelle 44: Werttabelle Bruchenergieprüfung

Probenbezeichnung	F_{\max}	Steigung	W bis F_{\max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1FSt1	167	186,41	64,41	114,8	0,00346617	ok
2FSt1	181	171,02	87,49	134,0	0,00348156	ok
3FSt1	165	230,6	64,98	127,3	0,00346275	ok
4FSt1	136	131,89	47,1	-	0,00346959	Bruch bei 85mm
5FSt1	167	156,29	74,42	125,1	0,00347643	ok
6FSt1	169	157,11	81,26	132,4	0,00347301	ok
7FSt1	196	287,29	69,15	128,0	0,00346617	ok
8FSt1	200	188,02	79,49	134,2	0,00346959	ok
9FSt1	174	97,69	55,99	123,7	0,00348156	ok
10FSt1	214	191,72	79,66	191,6	0,00348156	ok
11FSt1	150	170,25	53,62	-	0,00348156	Bruch bei 100mm
12FSt1	190	220,03	75,95	107,7	0,00348156	ok
12FSt2	154	195,37	48,57	136,0	0,00347643	ok
13FSt1	139	129,84	53,13	134,0	0,00347301	ok
14FSt1	196	242,25	85,62	188,4	0,00346275	ok
15FSt1	152	200,35	40,98	120,3	0,00347130	ok
16FSt1	181	242,95	72,45	-	0,00347643	Bruch bei 120mm
17FSt1	168	254,77	48,07	117,1	0,00347472	ok
17FSt2	168	341,22	36,96	-	0,00347472	Bruch bei 110mm
18FSt1	237	346,61	86,95	-	0,00347130	Bruch bei 150mm
19FSt1	184	265,13	67,98	143,0	0,00347643	ok
20FSt1	205	361,49	84,93	169,9	0,00346959	ok
21FSt1	160	309,22	39,99	113,6	0,00346959	ok
22FSt1	-	-	-	-	0,00346959	Jahrringlage!
23FSt1	208	330	73,93	194,1	0,00347301	ok
24FSt1	227	360,81	87,35	180,4	0,00348156	ok
25FSt1	210	379,7	77,3	123,6	0,00348156	ok
26FSt1	213	297,42	62,3	190,9	0,00348498	ok
27FSt1	182	286,91	64,37	134,7	0,00347643	ok
Mittelwert \bar{x}	181,89	240,44	66,59	141,95		
Standardabweichung s	26,06	79,70	15,72	28,23		
VarK [%]	14,32	33,15	23,61	19,88		
gültige Probenzahl n [1]	28	28	28	23		

Probenbezeichnung	F_{\max}	Steigung	W bis F_{\max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1FRt1	196	282,71	52,6	141,0	0,00346104	ok
2FRt1	175	211,52	52,44	-	0,00347472	Bruch bei 140mm
3FRt1	166	188,26	57,2	-	0,00347472	Bruch bei 85mm
4FRt1	210	336,65	62,94	186,1	0,00348156	ok
5FRt1	164	203,4	57,22	133,6	0,00347130	ok
5FRt2	179	237,9	66,05	136,0	0,00347130	ok
6FRt1	169	312,81	69,32	134,9	0,00347301	ok
7FRt1	168	202,14	64,81	-	0,00346446	Bruch bei 130mm
7FRt2	181	180,83	76,66	141,6	0,00347472	ok
8FRt1	153	190,22	46,77	132,2	0,00347301	ok
9FRt1	137	175,37	47,71	-	0,00347130	Bruch bei 80mm
10FRt1	207	258,31	78,72	162,5	0,00347130	ok
11FRt1	178	225,66	61,68	-	0,00347985	Bruch bei 100mm
12FRt1	-	-	-	-	0,00347814	Jahringlage!
13FRt1	184	304,63	59,54	160,6	0,00347814	ok
14FRt1	185	232,04	66,24	-	0,00348669	Bruch bei 105mm
15FRt1	184	345,01	66,71	-	0,00348669	Bruch bei 115mm
16FRt1	171	169,73	58,77	111,0	0,00347472	ok
16FRt2	182	233,22	79,07	-	0,00347472	Bruch bei 115mm
17FRt1	141	181,84	42,06	95,8	0,00347472	ok
18FRt1	220	380,43	84,8	196,2	0,00347472	ok
19FRt1	223	370,11	79,53	199,4	0,00347472	ok
20FRt1	170	242,27	55,05	116,9	0,00347985	ok
21FRt1	142	188,85	41,74	-	0,00347985	Bruch bei 130mm
22FRt1	150	236,68	44,39	114,2	0,00346446	ok
23FRt2	145	209,73	45,41	125,6	0,00346617	ok
23FRt1	147	205,54	53,88	145,3	0,00346617	ok
24FRt1	203	179,31	88,41	-	0,00347643	Bruch bei 50mm
25FRt1	188	248,81	71,59	156,9	0,00346617	ok
26FRt1	142	146,32	48,75	80,5	0,00348156	ok
27FRt1	216	318,61	84,79	171,6	0,00347472	ok
Mittelwert \bar{x}	175,87	239,96	62,16	142,10		
Standardabweichung s	24,85	63,56	13,65	31,50		
VarK [%]	14,13	26,49	21,96	22,17		
gültige Probenzahl n [1]	30	30	30	20		

Probenbezeichnung	F_{\max}	Steigung	W bis F_{\max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1FSr1	223	265,32	83,21	158,6	0,00348498	ok
2FSr1	183	261,35	65,68	131,9	0,00347472	ok
3FSr1	144	196,92	38,42	75,7	0,00347985	ok
4FSr1	129	94,31	38,96	75,5	0,00347985	ok
5FSr1	206	238,38	91,81	188,3	0,00347985	ok
6FSr1	200	249,94	62,84	95,2	0,00347130	ok
7FSr1	198	242,59	82,67	79,0	0,00349182	ok
8FSr1	221	349,35	78,37	95,2	0,00349353	ok
9FSr1	170	159,87	76,81	128,8	0,00347130	ok
10FSr1	244	387,21	68,11	-	0,00347814	Bruch bei 130mm
11FSr1	192	304,05	65,98	122,3	0,00348840	ok
12FSr1	220	288,09	82,96	-	0,00348327	Bruch bei 70mm
13FSr1	159	274,45	37,52	-	0,00347130	Bruch bei 165mm
14FSr1	214	363,36	55,24	144,9	0,00348327	ok
14FSr2	198	192,2	70,78	112,8	0,00348840	ok
15FSr1	173	260,07	52,72	122,9	0,00348327	ok
16FSr1	147	227,49	58,29	113,8	0,00348327	ok
17FSr1	155	168,29	47,17	85,8	0,00347130	ok
17FSr2	172	281,18	47,9	111,9	0,00348156	ok
18FSr1	125	195,81	50,98	121,3	0,00347814	ok
19FSr1	218	294,64	62,29	221,1	0,00348669	ok
20FSr1	278	439,03	75,77	128,4	0,00347985	ok
21FSr1	194	234,51	67,07	165,7	0,00347643	ok
22FSr1	241	451,05	80,34	158,4	0,00349182	ok
23FSr1	171	245,62	79,22	-	0,00348498	Bruch bei 125mm
24FSr1	243	337,18	67,87	96,6	0,00348498	ok
25FSr1	236	269,49	71,96	132,6	0,00348840	ok
26FSr1	242	219,66	87,72	-	0,00347472	Bruch bei 120mm
27FSr1	219	310,24	81,46	-	0,00347301	Bruch bei 90mm
Mittelwert \bar{x}	197,07	269,02	66,56	124,64		
Standardabweichung s	38,09	79,56	15,39	36,47		
VarK [%]	19,33	29,57	23,12	29,26		
gültige Probenzahl n [1]	29	29	29	23		

Probenbezeichnung	F_{\max}	Steigung	W bis F_{\max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1FRr1	213	254,33	67,68	-	0,00348669	Bruch bei 110mm
2FRr1	176	270,41	54,09	-	0,00347472	Bruch bei 135mm
3FRr1	208	255,55	79,54	135,9	0,00348327	ok
4FRr1	193	226,31	87,39	-	0,00349011	Bruch bei 120mm
5FRr1	313	417,94	117,56	144,3	0,00347301	ok
5FRr2	301	456,6	91,66	137,2	0,00347301	ok
6FRr1	177	181,92	58,65	139,7	0,00348669	ok
7FRr1	183	286,69	64,42	100,1	0,00348840	ok
7FRr2	216	173,27	89,38	81,8	0,00349695	ok
8FRr1	151	229,21	41,76	-	0,00348156	Bruch bei 85mm
9FRr1	149	298,14	36,46	107,0	0,00347985	ok
10FRr1	153	222,07	62,69	130,7	0,00348327	ok
11FRr1	215	351,15	53,45	-	0,00347814	Bruch bei 100mm
12FRr1	224	454,95	49,31	-	0,00347985	Bruch bei 90mm
13FRr1	276	544,51	65,68	147,3	0,00348498	ok
14FRr1	172	283,33	42,55	149,0	0,00347301	ok
15FRr1	239	251,95	78,88	176,2	0,00347130	ok
16FRr1	170	283,7	60,5	108,1	0,00346788	ok
17FRr1	215	290,19	69,45	130,9	0,00347814	ok
18FRr1	218	478,02	47,27	-	0,00348669	Bruch bei 145mm
19FRr1	235	394,28	58,22	123,7	0,00348327	ok
20FRr1	216	307,58	63,22	108,1	0,00347985	ok
21FRr1	212	356,54	56,6	141,3	0,00346788	ok
22FRr1	180	196,54	70,54	148,7	0,00348327	ok
23FRr1	226	300,36	79,5	154,8	0,00348156	ok
23FRr2	160	169,69	63,58	-	0,00347985	Bruch bei 100mm
24FRr1	226	355,72	55,89	-	0,00347643	Bruch bei 100mm
25FRr1	-	-	-	-	0,00000000	Probe fehlt
26FRr1	190	222,36	63,54	157,7	0,00347985	ok
26FRr2	163	303,83	38,68	-	0,00348840	Bruch bei 100mm
27FRr1	246	317,41	72,98	136,3	0,00348840	ok
Mittelwert \bar{x}	207,20	294,66	64,70	132,94		
Standardabweichung s	41,29	107,94	17,56	22,54		
VarK [%]	19,93	36,63	27,14	16,95		
gültige Probenzahl n [1]	30	30	30	20		

Probenbezeichnung	F_{max}	Steigung	W bis F_{max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1MSt1	235	156,26	125,69	-	0,00346617	Bruch bei 100mm
2MSt1	227	592,88	56,52	179,3	0,00348327	ok
2MSt2	190	304,93	67,13	157,0	0,00348156	ok
3MSt1	233	334,19	88,41	209,8	0,00348840	ok
4MSt1	263	383,19	117,85	287,5	0,00347814	ok
5MSt1	218	266,82	100,89	202,0	0,00351063	ok
5MSt2	226	307,66	92,11	218,3	0,00347985	ok
6MSt1	208	285,09	71,42	143,0	0,00347301	ok
7MSt1	214	262	68,1	169,4	0,00348498	ok
8MSt1	207	269,3	92,19	262,2	0,00348840	ok
9MSt1	189	235,33	72,42	182,4	0,00347985	ok
10MSt1	202	315,42	75,37	216,2	0,00347301	ok
10MSt2	180	288,83	58,34	208,9	0,00347301	ok
11MSt1	257	349,07	123,98	223,7	0,00347130	ok
12MSt1	219	427,6	66,47	169,4	0,00348156	ok
12MSt2	205	284,69	77,63	173,9	0,00347985	ok
13MSt1	183	261,07	62,73	-	0,00349011	Bruch bei 90mm
14MSt1	243	461,7	97,78	-	0,00349011	Bruch bei 110mm
15MSt1	268	400,72	99,15	-	0,00348498	Bruch bei 120mm
16MSt1	252	249,63	157,05	251,1	0,00348156	ok
17MSt1	245	341,5	114,83	226,8	0,00348327	ok
18MSt1	184	210,58	69	121,9	0,00348327	ok
19MSt1	189	253,09	67,09	-	0,00347472	Bruch bei 100mm
19MSt2	166	218,71	62	-	0,00347472	Bruch bei 45mm
20MSt1	231	277,55	88,26	-	0,00347472	Bruch bei 100mm
21MSt1	178	265,04	59,89	163,2	0,00347301	ok
22MSt1	218	211,43	93,51	214,0	0,00347985	ok
23MSt1	220	241,79	102,08	168,7	0,00348156	ok
23MSt2	233	330,8	93,49	173,4	0,00348327	ok
24MSt1	185	374,91	49,71	126,4	0,00347985	ok
25MSt1	245	309,27	99,97	217,2	0,00347130	ok
26MSt1	201	247,06	98,64	172,1	0,00347985	ok
26MSt2	191	248,58	64,85	152,1	0,00348327	ok
27MSt1	184	202,47	89,15	170,1	0,00347472	ok
27MSt2	208	255,68	83,71	208,8	0,00347472	ok
Mittelwert \bar{x}	214,20	297,85	85,93	191,74		
Standardabweichung s	26,82	83,50	23,49	39,33		
VarK [%]	12,52	28,03	27,33	20,51		
gültige Probenzahl n [1]	35	35	35	28		

Probenbezeichnung	F_{max}	Steigung	W bis F_{max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1MRt1	256	459,64	64,46	229,2	0,00348840	ok
2MRt1	160	190,92	68,97	206,6	0,00346959	ok
2MRt2	170	246,08	72,63	-	0,00347130	Bruch bei 100mm
3MRt1	228	220,63	114,09	236,8	0,00348498	ok
4MRt1	243	228,66	154,95	279,6	0,00347814	ok
5MRt1	253	408,89	77,37	230,4	0,00349353	ok
6MRt1	162	204,59	47,99	113,9	0,00347985	ok
7MRt1	214	232,26	100,38	182,0	0,00348327	ok
8MRt1	205	192,16	82	235,6	0,00348669	ok
8MRt2	202	221,72	65,91	230,1	0,00347985	ok
9MRt1	205	200,8	107,75	-	0,00348327	Bruch bei 110mm
10MRt1	183	273,73	49,21	151,2	0,00346617	ok
11MRt1	246	287,83	118,31	241,4	0,00347643	ok
12MRt1	237	257,43	150,3	-	0,00346788	Bruch bei 120mm
12MRt2	227	314,38	107,27	202,0	0,00346788	ok
13MRt1	229	268,07	109,35	208,4	0,00347301	ok
14MRt1	185	208,22	96,91	150,3	0,00347643	ok
15MRt1	253	214,59	124,6	242,3	0,00348327	ok
16MRt1	224	227,75	123,83	185,3	0,00349011	ok
17MRt1	234	315,32	78,67	239,7	0,00347985	ok
18MRt1	230	397,84	79,78	202,2	0,00348498	ok
19MRt1	198	302,75	135,56	209,8	0,00348327	ok
19MRt2	207	338,27	68,91	-	0,00346275	Bruch bei 50mm
20MRt1	213	250,48	91,82	172,5	0,00347985	ok
21MRt1	192	206,32	82,75	-	0,00346617	Bruch bei 100mm
22MRt1	229	353,21	79,34	193,8	0,00347643	ok
23MRt1	217	299,47	66,23	132,1	0,00349182	ok
24MRt1	162	145,84	60,06	128,8	0,00347985	ok
25MRt1	211	344,63	53,85	-	0,00347814	Bruch bei 95mm
26MRt1	204	319,77	66,42	157,9	0,00348327	ok
26MRt2	203	253,65	77,31	163,2	0,00347643	ok
27MRt1	202	324,09	70,45	182,0	0,00347643	ok
27MRt2	210	205,2	137,74	241,6	0,00347130	ok
Mittelwert \bar{x}	211,94	270,16	90,46	198,10		
Standardabweichung s	26,33	71,47	29,27	41,74		
VarK [%]	12,42	26,45	32,36	21,07		
gültige Probenzahl n [1]	33	33	33	27		

Probenbezeichnung	F_{max}	Steigung	W bis F_{max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1MSr1	321	428,13	111,02	182,5	0,00347814	ok
2MSr1	152	182,47	77,21	-	0,00349524	Bruch bei 120mm
2MSr2	183	269,39	62,4	166,8	0,00348498	ok
3MSr1	276	315,07	107,1	213,3	0,00349866	ok
4MSr1	329	430,31	137,34	-	0,00350550	Bruch bei 130mm
5MSr1	204	279,37	89	182,1	0,00350892	ok
5MSr2	259	376,89	87,46	110,6	0,00349011	ok
6MSr1	203	340,73	53,42	122,7	0,00348156	ok
7MSr1	304	547,57	89,72	244,6	0,00349524	ok
8MSr1	177	231,69	59,65	135,2	0,00349524	ok
8MSr2	210	254,02	91,7	197,0	0,00349182	ok
9MSr1	229	234,69	88,53	189,0	0,00348156	ok
10MSr1	181	285,58	58,38	133,6	0,00348498	ok
10MSr2	221	234,7	80,88	157,5	0,00347985	ok
11MSr1	268	257,32	154,07	253,0	0,00347985	ok
12MSr1	209	298,05	58	125,1	0,00347130	ok
12MSr2	247	344,56	92,22	148,5	0,00349182	ok
13MSr1	195	298,59	60,84	226,3	0,00348498	ok
14MSr1	292	416,55	97,38	-	0,00348156	Bruch bei 110mm
15MSr1	308	376,28	114,24	214,1	0,00347472	ok
16MSr1	301	366,39	114,02	244,1	0,00349524	ok
17MSr1	329	372,17	141,97	240,5	0,00349866	ok
18MSr1	224	283,89	84,5	201,7	0,00349011	ok
19MSr1	138	179,39	47,62	163,5	0,00348156	ok
19MSr2	183	275,42	44,66	-	0,00347301	Bruch bei 80mm
20MSr1	185	187,85	63,36	141,8	0,00347301	ok
21MSr1	170	215	81,28	149,2	0,00349182	ok
22MSr1	215	263,68	89,41	209,4	0,00347985	ok
22MSr2	204	208,53	77,2	155,3	0,00350037	ok
23MSr1	206	318,03	60,19	219,4	0,00348156	ok
24MSr1	220	222,04	83,89	169,8	0,00348498	ok
25MSr1	234	384,31	60,93	-	0,00348840	Bruch bei 135mm
26MSr1	195	285,02	71,43	183,7	0,00349353	ok
26MSr2	223	302,85	86,04	-	0,00348327	Bruch bei 100mm
27MSr1	166	295,47	52,05	147,9	0,00348840	ok
27MSr2	272	318,2	101,68	116,7	0,00347985	ok
Mittelwert \bar{x}	228,69	302,23	84,19	178,16		
Standardabweichung s	52,12	80,15	26,45	41,62		
VarK [%]	22,79	26,52	31,42	23,36		
gültige Probenzahl n [1]	36	36	36	30		

Probenbezeichnung	F_{max}	Steigung	W bis F_{max}	G_f	Fläche	Angaben zum Bruch
	[N]	[N/mm]	[Nmm]	[J/m ²]	[m ²]	
1MRr1	271	355,9	104,82	222,0	0,00350037	ok
2MRr1	233	275,19	105,56	177,4	0,00349524	ok
2MRr2	244	154,84	106,06	186,1	0,00348669	ok
3MRr1	242	245,47	111,59	191,1	0,00348327	ok
4MRr1	236	415,34	70,86	114,9	0,00349695	ok
5MRr1	262	292,19	80,56	193,3	0,00348840	ok
5MRr2	283	353,35	121,8	185,4	0,00350550	ok
6MRr1	222	308,84	77,26	183,5	0,00348669	ok
7MRr1	249	228,94	103,46	184,8	0,00349866	ok
8MRr1	202	218,63	67,88	221,1	0,00350037	ok
9MRr1	240	316,37	79,14	177,7	0,00348498	ok
10MRr1	176	184,71	57,72	207,8	0,00349011	ok
11MRr1	224	243,4	110,98	189,4	0,00348327	ok
12MRr1	243	211,28	134,85	201,2	0,00348840	ok
12MRr2	287	240,42	127,8	201,3	0,00349353	ok
13MRr1	147	80,25	79,86	165,4	0,00348840	ok
14MRr1	334	378,41	116,21	216,8	0,00348840	ok
15MRr1	-	-	-	-	0,00348669	Jahrringlage!
16MRr1	223	196,39	88,83	192,9	0,00349353	ok
17MRr1	297	315,88	-	-	0,00349524	Bruch bei 145mm
18MRr1	227	272,86	74,52	212,9	0,00346275	ok
19MRr1	183	168,17	95,52	-	0,00347985	Bruch bei 110mm
19MRr2	277	217,58	-	-	0,00348327	Bruch bei 60mm
20MRr1	167	254,27	56,11	121,4	0,00346788	ok
21MRr1	227	193,6	85,05	211,9	0,00349011	ok
22MRr1	220	360,07	65,82	204,1	0,00349353	ok
23MRr1	194	301,76	57,43	192,9	0,00348327	ok
24MRr1	157	238,12	54,7	-	0,00347301	Bruch bei 130mm
25MRr1	216	277,13	70,95	194,9	0,00347643	ok
26MRr1	251	244,66	137,56	-	0,00347301	Bruch bei 145mm
26MRr2	230	289,75	94,47	181,4	0,00349695	ok
27MRr1	192	268,57	51,29	147,9	0,00349524	ok
27MRr2	210	192,24	73,43	-	0,00349182	Bruch bei 135mm
Mittelwert \bar{x}	230,19	259,21	88,74	187,67		
Standardabweichung s	41,52	71,43	24,93	26,54		
VarK [%]	18,04	27,56	28,09	14,14		
gültige Probenzahl n [1]	32	32	30	26		

13.5 Risslängen - Einzelwerte

Tabelle 45: Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)

Probenbezeichnung	Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z0 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z0 [mm]	Längsrisse Z0 [mm]
FN 1	-	-	-
FN 2	-	-	-
FN 3	-	-	-
FN 4	-	-	-
FN 5	-	-	-
FN 6	-	-	-
FN 7	-	-	-
FN 8	-	-	-
FN 9	-	-	-
FN 10	-	-	-
FN 11	-	-	-
FN 12	-	-	-
FN 13	-	-	-
FN 14	-	-	-
FN 15	-	-	-
FN 16	-	-	-
FN 17	-	-	-
FN 18	-	-	-
FN 19	-	-	-
FN 20	-	-	-
FN 21	-	-	-
FN 22	-	-	-
FN 23	-	-	-
FN 24	-	-	-
FN 25	14	-	-
FN 26	-	-	-
FN 27	-	-	-
FN 28	-	-	-
FN 29	-	-	-
FN 30	-	-	-
FN 31	-	-	-
FN 32	-	-	-
FN 33	-	-	-
FN 34	-	-	-
FN 35	-	-	-
FN 36	-	-	-
FN 37	-	-	-
FN 38	-	-	-
FN 39	-	-	-
FN 40	-	-	-
FN 41	-	-	-
FN 42	-	-	-
FN 43	-	-	-
FN 44	-	-	-
FN 45	-	-	-

Probenbezeichnung	Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z0 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z0 [mm]	Längsrisse Z0 [mm]
FR 1	-	-	-
FR 2	-	-	-
FR 3	-	-	-
FR 4	-	-	-
FR 5	-	-	-
FR 6	-	-	-
FR 7	-	-	-
FR 8	-	-	-
FR 9	-	-	-
FR 10	-	-	-
FR 11	-	-	-
FR 12	-	-	-
FR 13	-	-	-
FR 14	-	-	-
FR 15	-	-	-
FR 16	-	-	-
FR 17	-	-	-
FR 18	-	-	-
FR 19	-	-	-
FR 20	-	-	-
FR 21	-	-	-
FR 22	-	-	-
FR 23	-	-	-
FR 24	-	-	-
FR 25	-	-	-
FR 26	-	-	-
FR 27	-	-	-
FS 1	-	-	-
FS 2	-	-	-
FS 3	-	-	-
FS 4	-	-	-
FS 5	-	-	-
FS 6	-	-	-
FS 7	-	-	-
FS 8	-	-	-
FS 9	-	-	-
FS 10	20	-	-
FS 11	-	-	-
FS 12	-	-	-
FS 13	-	-	-
FS 14	-	-	-
FS 15	-	-	-
FS 16	-	-	-
FS 17	-	-	-
FS 18	-	-	-
FS 19	-	-	-
FS 20	40	3	-
FS 21	-	-	-
FS 22	-	-	-
FS 23	-	-	-
FS 24	50	57	60
FS 25	-	-	-
FS 26	115	4	213
FS 27	-	-	-

	Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z0	Hirnholzrisse tangential Z0	Längsrisse Z0
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MN 1	-	-	-
MN 2	-	-	-
MN 3	-	-	-
MN 4	-	-	-
MN 5	-	-	-
MN 6	-	-	-
MN 7	-	-	-
MN 8	-	-	-
MN 9	-	-	-
MN 10	-	-	-
MN 11	-	-	-
MN 12	35	-	-
MN 13	-	-	-
MN 14	-	-	-
MN 15	-	-	-
MN 16	-	-	-
MN 17	-	-	-
MN 18	-	-	-
MN 19	-	-	-
MN 20	-	-	-
MN 21	-	-	-
MN 22	-	-	-
MN 23	-	-	-
MN 24	-	-	-
MN 25	5	-	51
MN 26	-	-	-
MN 27	-	-	-
MN 28	-	-	-
MN 29	-	-	-
MN 30	-	-	-
MN 31	-	-	-
MN 32	-	-	-
MN 33	-	-	-
MN 34	-	-	-
MN 35	-	-	-
MN 36	-	-	-
MN 37	-	-	-
MN 38	-	-	-
MN 39	-	-	-
MN 40	-	-	-
MN 41	-	-	-
MN 42	-	-	-
MN 43	-	-	-
MN 44	-	-	-
MN 45	-	-	-

	Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z0	Hirnholzrisse tangential Z0	Längsrisse Z0
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MR 1	-	-	-
MR 2	-	-	-
MR 3	-	-	-
MR 4	-	46	25
MR 5	-	-	-
MR 6	-	-	-
MR 7	-	-	-
MR 8	-	-	-
MR 9	-	-	-
MR 10	-	-	-
MR 11	-	-	-
MR 12	-	-	-
MR 13	-	-	-
MR 14	-	-	-
MR 15	-	-	-
MR 16	141	-	-
MR 17	-	-	-
MR 18	-	-	-
MR 19	-	-	-
MR 20	-	-	-
MR 21	-	-	-
MR 22	-	-	-
MR 23	-	-	-
MR 24	-	-	-
MR 25	-	-	-
MR 26	-	-	-
MR 27	-	-	-
MS 1	-	-	-
MS 2	-	-	-
MS 3	-	-	-
MS 4	-	-	-
MS 5	-	-	-
MS 6	-	-	-
MS 7	-	-	-
MS 8	-	-	-
MS 9	-	-	-
MS 10	-	-	-
MS 11	-	-	-
MS 12	-	-	-
MS 13	-	-	-
MS 14	-	54	150
MS 15	-	-	-
MS 16	-	-	-
MS 17	-	-	-
MS 18	-	-	-
MS 19	-	-	-
MS 20	-	-	-
MS 21	-	-	-
MS 22	-	-	-
MS 23	-	-	-
MS 24	-	-	-
MS 25	-	-	-
MS 26	-	-	-
MS 27	-	-	-

Tabelle 46: Risslängen nach 1. Zyklusbehandlung (Z1) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)

Probenbezeichnung	Risslängen nach 1. Zyklusbehandlung (Z1) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z1 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z1 [mm]	Längsrisse Z1 [mm]
FN 1	100,59	68,68	395,26
FN 2	147,31	0	462,2
FN 3	138,56	42,27	531,48
FN 4	77,93	0	0
FN 5	228,95	4,06	492,5
FN 6	238,99	13,13	495,69
FN 7	148,46	13,35	151
FN 8	38,73	0	0
FN 9	126,4	27,22	150
FN 10	34,36	26,55	153,29
FN 11	183,71	0	489,61
FN 12	53,55	0	0
FN 13	45,29	0	0
FN 14	2,49	26,67	61,61
FN 15	59,19	0	0
FN 16	127,84	0	112,32
FN 17	136,59	61,57	402,42
FN 18	224,99	13,6	374,66
FN 19	14,32	0	33,45
FN 20	88,3	0	90,33
FN 21	91,52	30,6	93,99
FN 22	129,01	0	45,55
FN 23	249,11	2,5	224,33
FN 24	56,22	13,13	99,23
FN 25	103,95	4,7	509,91
FN 26	151,86	10,09	334,03
FN 27	14,45	9,36	0
FN 28	203,7	66,01	407,77
FN 29	263,48	4,97	255,91
FN 30	147,75	51,73	125,78
FN 31	197,88	0	0
FN 32	102,61	13,02	60,87
FN 33	185,66	22,6	77,08
FN 34	93,11	0	187,27
FN 35	31,2	0	0
FN 36	48,91	25,98	199,2
FN 37	48,21	0	0
FN 38	85,82	0	0
FN 39	296,35	0	349,41
FN 40	222,36	30,03	452,71
FN 41	44,99	0	0
FN 42	189,3	8,72	581,4
FN 43	107,6	0	213,41
FN 44	163	0	285,08
FN 45	51,53	2,77	232,97

	Risslängen nach 1. Zyklus (Z1) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z1	Hirnholzrisse tangential Z1	Längsrisse Z1
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
FR 1	8,02	0	0
FR 2	0	0	0
FR 3	62,17	46,2	188,59
FR 4	159,75	59,15	98,28
FR 5	40,57	0	119,95
FR 6	26,14	80,92	109,95
FR 7	132,44	49,09	99,2
FR 8	45,41	4	129,68
FR 9	4,72	0	0
FR 10	270,12	0	99,03
FR 11	280,39	0	106,46
FR 12	84,56	0	110,67
FR 13	120,67	39,1	250,94
FR 14	109,14	11,25	108,29
FR 15	350,36	0	104,11
FR 16	429,67	4,18	554,74
FR 17	41,79	3,57	134,11
FR 18	397,96	18,37	286,13
FR 19	272,41	43,32	245,22
FR 20	71,07	7,55	197,7
FR 21	110,36	3,64	20,54
FR 22	153,51	0	272,37
FR 23	120,72	2,01	0
FR 24	199,64	0	399,04
FR 25	141,25	0	45,1
FR 26	0	0	0
FR 27	279,22	17,45	239,77
FS 1	10,11	60,84	163,22
FS 2	47,56	75,66	162,22
FS 3	27,7	51,45	165,97
FS 4	62,17	13,05	52,57
FS 5	59,76	0	0
FS 6	17,97	0	0
FS 7	110,29	56,53	96,6
FS 8	34,84	8,15	211,37
FS 9	9,35	0	0
FS 10	89,49	35,67	578,62
FS 11	0	0	0
FS 12	23,26	0	0
FS 13	0	0	0
FS 14	77,92	0	143,62
FS 15	42,51	0	0
FS 16	27,48	0	21,73
FS 17	52,83	0	0
FS 18	113,33	38,2	21,35
FS 19	95,51	9,11	0
FS 20	245,33	6,13	293,89
FS 21	57,5	14,24	103,72
FS 22	229,14	84,81	196,27
FS 23	107,27	38,2	250,84
FS 24	53,17	31,27	357,56
FS 25	213,49	63,05	461,96
FS 26	56,93	36,26	387,76
FS 27	208,49	0	0

Probenbezeichnung	Risslängen nach 1. Zyklus (Z1) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z1 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z1 [mm]	Längsrisse Z1 [mm]
MN 1	0	0	0
MN 2	155,66	0	173,58
MN 3	6,56	0	0
MN 4	114,42	0	355,29
MN 5	281,79	66,2	652,24
MN 6	2,66	29,52	339,51
MN 7	287,73	27,33	372,87
MN 8	27,97	0	87,35
MN 9	138,51	0	0
MN 10	85,64	64,04	427,49
MN 11	31,07	6,95	31,81
MN 12	217,26	73,47	309,11
MN 13	269,16	50,36	335,88
MN 14	23,86	0	0
MN 15	0	45,8	0
MN 16	277,51	0	179,86
MN 17	13,4	33,49	0
MN 18	81,22	74,99	71,74
MN 19	57,58	34,73	152,56
MN 20	61,53	0	232,91
MN 21	9,48	0	0
MN 22	27,61	0	101,2
MN 23	0	59,71	0
MN 24	189,45	60,42	188,87
MN 25	198,99	5,25	83,48
MN 26	386,45	12,99	546,34
MN 27	0	0	0
MN 28	0	0	0
MN 29	27,48	0	0
MN 30	0	0	0
MN 31	92,86	11,77	101,08
MN 32	67,05	3,06	85,3
MN 33	65,43	85,13	859,81
MN 34	61,45	55,17	335,02
MN 35	79,49	0	0
MN 36	16,92	29,59	0
MN 37	14,87	118,2	347,24
MN 38	19,7	123,14	485,85
MN 39	52,98	0	212,3
MN 40	84,35	5	54,25
MN 41	7,1	0	0
MN 42	7,94	123,91	332,21
MN 43	31,91	84,77	268,56
MN 44	0	0	0
MN 45	37,47	0	0

	Risslängen nach 1. Zyklus (Z1) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z1	Hirnholzrisse tangential Z1	Längsrisse Z1
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MR 1	72,86	0	55,19
MR 2	34,64	0	0
MR 3	61,69	19,52	74,22
MR 4	75,73	32,74	224,58
MR 5	45,89	69,77	287,58
MR 6	17,82	12,65	27,04
MR 7	135,1	0	349,84
MR 8	24,18	0	0
MR 9	133,85	0	241,3
MR 10	0	0	0
MR 11	116,56	0	161,11
MR 12	135,61	0	0
MR 13	9,35	0	0
MR 14	151,8	72,55	215,91
MR 15	63,07	0	146,41
MR 16	91,27	113,72	654,53
MR 17	92,07	10,2	0
MR 18	13,01	0	0
MR 19	42,72	0	0
MR 20	0	0	0
MR 21	39,67	0	0
MR 22	3,1	0	0
MR 23	0	74,22	303,79
MR 24	71,5	0	0
MR 25	31,46	0	0
MR 26	73,75	26,44	163,22
MR 27	101,31	0	149,45
MS 1	83,51	3,91	261,59
MS 2	90,78	0	102,55
MS 3	95,86	19,14	105,48
MS 4	209,38	64,74	403,78
MS 5	70,87	37,02	297,66
MS 6	124,67	0	49,77
MS 7	72,47	6,41	354,73
MS 8	0	75,64	0
MS 9	175,37	0	237,35
MS 10	28,7	0	141,01
MS 11	139,91	11,21	392,32
MS 12	189,79	52,66	296
MS 13	0	0	0
MS 14	132,23	8,69	309,87
MS 15	92,39	0	305,3
MS 16	94,15	87,37	824,19
MS 17	82,78	2,98	85,42
MS 18	116,89	64,3	289,34
MS 19	48,68	0	28,98
MS 20	27,53	40,35	52,54
MS 21	37,63	6,89	32,81
MS 22	0	0	0
MS 23	0	103,09	397,51
MS 24	58,33	64,23	163,97
MS 25	0	0	0
MS 26	158,25	38,92	215,89
MS 27	177,63	0	47,13

Tabelle 47: Risslängen nach 2. Zyklusbehandlung (Z2) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)

Probenbezeichnung	Risslängen nach 2. Zyklus (Z2) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z2 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z2 [mm]	Längsrisse Z2 [mm]
FN 1	638,73	96,33	649,62
FN 2	448,13	0	1170,03
FN 3	457,13	127,08	924,29
FN 4	646,16	28,44	766,22
FN 5	531,98	105,14	1030,54
FN 6	573,04	103,14	943,29
FN 7	403,19	45,19	428,03
FN 8	191,72	18,09	58,24
FN 9	587,46	72,75	350,95
FN 10	449,3	35,96	372,72
FN 11	570,46	110,2	1621,08
FN 12	280,64	0	0
FN 13	279,68	0	118,68
FN 14	241,12	58,89	177,19
FN 15	356,89	15,33	85,03
FN 16	361,81	0	245,43
FN 17	575,64	126,24	763,63
FN 18	504,55	130,36	674,07
FN 19	36,23	0	174,54
FN 20	136,63	0	702,17
FN 21	391,16	45,76	218,7
FN 22	293,82	0	457,74
FN 23	564,98	127,74	1128,79
FN 24	385,45	106,64	287,15
FN 25	306,4	82,64	815,18
FN 26	443,93	98,71	765,71
FN 27	190,57	49	104,41
FN 28	507,5	101,38	1056,66
FN 29	658,76	162,99	1631,89
FN 30	469,79	79,21	444,02
FN 31	381,85	0	324,62
FN 32	336,04	102,49	184,14
FN 33	355,46	81,18	258,05
FN 34	442,74	22,04	1275,69
FN 35	210,63	46,06	149,58
FN 36	335,11	103,04	423,19
FN 37	292,56	16,93	23,55
FN 38	363,44	4,26	498,21
FN 39	759,03	6,63	2180,44
FN 40	486,67	132,78	838,74
FN 41	206,36	117,06	64,13
FN 42	386,98	89,34	737,1
FN 43	229,93	23,97	476,23
FN 44	338,16	37,83	588,97
FN 45	239,06	19,15	316,49

	Risslängen nach 2. Zyklus (Z2) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z2	Hirnholzrisse tangential Z2	Längsrisse Z2
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
FR 1	29,29	58,25	39,14
FR 2	57,5	23,44	100,56
FR 3	196,69	102,68	200,43
FR 4	415,44	86,47	552,25
FR 5	154,3	0	196,6
FR 6	144,62	126,67	235,86
FR 7	257,94	105,75	566,21
FR 8	194,94	112,6	303,73
FR 9	127,98	86,58	0
FR 10	601,8	81,69	1244,07
FR 11	579,93	98,72	1280,83
FR 12	370,21	42,81	193,67
FR 13	253,28	219,03	556,48
FR 14	190,24	31,48	201,5
FR 15	700,9	52,5	1307,66
FR 16	817,37	22,47	2049,91
FR 17	139,57	58,42	80,64
FR 18	904,12	182,7	1687,52
FR 19	578,13	148,09	1057,09
FR 20	171,29	72,49	357,38
FR 21	252,08	24,04	52,56
FR 22	246,05	21,83	453,13
FR 23	282,66	39,99	112,29
FR 24	495,91	21,51	1134,18
FR 25	428,79	36,55	845,44
FR 26	5,78	221,82	51,19
FR 27	503,45	99,8	660,68
FS 1	222,38	113,19	312,6
FS 2	261,65	120,75	725,96
FS 3	245,22	103,32	354,21
FS 4	214,53	53,57	85,73
FS 5	245,68	100,69	56,75
FS 6	242,54	20,4	0
FS 7	339,37	127,99	647,4
FS 8	118,07	125,51	261,68
FS 9	199,4	18,03	0
FS 10	311,02	120,71	782,8
FS 11	92,83	42,2	12,95
FS 12	214,5	48,26	10,31
FS 13	0	0	0
FS 14	197,3	46,65	156,96
FS 15	185,91	0	0
FS 16	92,71	214,62	300,35
FS 17	177,22	3,16	0
FS 18	302,94	59,39	142,27
FS 19	310,34	39,65	78,82
FS 20	550,45	101,22	987,02
FS 21	130,61	88,71	370,79
FS 22	755,72	142,14	1010,25
FS 23	540,4	160,27	768,09
FS 24	406,28	101,8	678,95
FS 25	562,11	162,98	756,55
FS 26	314,04	47,73	623,53
FS 27	396,32	39,7	96,47

Probenbezeichnung	Risslängen nach 2. Zyklus (Z2) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z2 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z2 [mm]	Längsrisse Z2 [mm]
MN 1	3,43	0	0
MN 2	340,9	12,55	376,64
MN 3	104,34	0	18,88
MN 4	162,91	0	450,67
MN 5	535,11	116,6	1224,91
MN 6	25,31	111,25	688,33
MN 7	483,57	109,66	885,44
MN 8	46,9	0	129,49
MN 9	409,81	152,15	422,24
MN 10	265,48	106,21	704,74
MN 11	168,18	13,7	104,94
MN 12	463,62	114,65	1348,22
MN 13	536,79	179,9	581,7
MN 14	106,77	144,98	405,4
MN 15	0	162,77	0
MN 16	599,32	31,93	935,27
MN 17	49,34	108,25	0
MN 18	223,35	207,73	170,29
MN 19	131,41	75,42	319,99
MN 20	154,83	0	340,18
MN 21	82,48	3,24	0
MN 22	109,23	3,39	143,56
MN 23	31,77	196,86	0
MN 24	424,54	159,38	657,87
MN 25	528,46	22,92	588,5
MN 26	679,61	91,6	1102,58
MN 27	81,34	0	143,72
MN 28	0	0	0
MN 29	98,96	0	0
MN 30	3,82	0	0
MN 31	425,76	17,05	188,93
MN 32	358,61	6,91	114,23
MN 33	507,3	93,67	990,32
MN 34	251,11	96,43	341,32
MN 35	219,13	0	118,1
MN 36	138,07	101,11	0
MN 37	150,1	156,83	419,17
MN 38	221,07	172,56	733,26
MN 39	143,12	54,86	239,89
MN 40	275,37	15,45	224,83
MN 41	121,66	0	63,28
MN 42	158,3	265,85	523,35
MN 43	137,84	142,37	294,12
MN 44	6,01	0	0
MN 45	99,25	2,53	31,75

	Risslängen nach 2. Zyklus (Z2) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z2	Hirnholzrisse tangential Z2	Längsrisse Z2
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MR 1	327,38	98,76	379,06
MR 2	212,48	0	21,15
MR 3	372,5	101,22	351,31
MR 4	466,06	95,05	1264,1
MR 5	315,45	115,76	699,74
MR 6	206,77	26,1	36,4
MR 7	340,89	6,9	410,57
MR 8	74,47	239,25	67,12
MR 9	686,39	4,67	791,33
MR 10	104,88	0	0
MR 11	269,57	0	876,53
MR 12	416,24	43,34	594,35
MR 13	33,95	10,02	0
MR 14	361,6	135,38	829,88
MR 15	211,86	89,11	456,18
MR 16	266,27	169,53	1558,77
MR 17	203,13	61,56	15,63
MR 18	96,72	34,2	78,22
MR 19	263,14	0	427,59
MR 20	124,31	8,22	83,22
MR 21	226,06	39,01	0
MR 22	23,37	34,28	0
MR 23	74,77	142,12	465,13
MR 24	331,02	12,16	84,61
MR 25	82,84	0	0
MR 26	378,51	26,88	181,78
MR 27	269,78	32,15	252,03
MS 1	141,16	162,19	497,43
MS 2	206,7	41,43	370,61
MS 3	288,43	74,6	239,74
MS 4	567,32	107,72	1387,53
MS 5	178,89	63,08	841,48
MS 6	265,81	41,2	291,7
MS 7	230,65	24,4	412,01
MS 8	0	214,57	0
MS 9	401,3	0	930,21
MS 10	107,37	0	178,43
MS 11	334,12	43,74	795,2
MS 12	380,29	63,55	837,16
MS 13	5,31	0	0
MS 14	448,1	96,03	749,87
MS 15	204,89	47,47	697,09
MS 16	304,63	146,08	1112,57
MS 17	189,16	48,75	271,85
MS 18	251,11	97,74	331,83
MS 19	188,54	33,05	507,7
MS 20	73,09	66,96	105,26
MS 21	67,47	104,02	173,74
MS 22	0	27,42	0
MS 23	15,72	163,35	522,85
MS 24	140,1	156,18	340,74
MS 25	0	0	0
MS 26	297,23	86,87	732,13
MS 27	312,65	33,33	520,26

Tabelle 48: Risslängen nach 3. Zyklusbehandlung (Z3) minus Risslängen vor Zyklusbehandlung (Z0)

Probenbezeichnung	Risslängen nach 3. Zyklus (Z3) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z3 [mm]	Hirnholzrisse tangential Z3 [mm]	Längsrisse Z3 [mm]
FN 1	763,59	136,45	872,29
FN 2	566,83	0	1473,49
FN 3	589,6	196,54	1021,65
FN 4	704,7	34	918,52
FN 5	552,37	107,21	1183,64
FN 6	592,31	105,08	1096,76
FN 7	501,95	105,28	571,11
FN 8	251,66	18,71	118,35
FN 9	614,73	88,07	422,29
FN 10	573,94	55,04	375,14
FN 11	734,29	127,37	1814,28
FN 12	364,81	13,44	43,5
FN 13	371,16	3,62	133,45
FN 14	290,95	66,25	180,7
FN 15	384,2	45,6	155,42
FN 16	404,05	8,66	369,51
FN 17	691,72	141,34	798,7
FN 18	582,46	144,43	807,05
FN 19	55,02	0	214,64
FN 20	189,1	0	882,15
FN 21	437,59	79,7	234,61
FN 22	335,83	37,19	671,02
FN 23	612,7	150,95	1322,33
FN 24	474,99	131,14	372,23
FN 25	457,32	100,36	930,03
FN 26	590,07	117,55	889,97
FN 27	261,16	70,96	149,83
FN 28	679,21	158,96	1141,53
FN 29	721,28	184,48	2131,88
FN 30	586,09	143,97	696,33
FN 31	442,03	0	506,03
FN 32	383,59	150,13	243,57
FN 33	424,62	127	482,29
FN 34	525,68	44,97	1517,19
FN 35	348,14	69,4	289,19
FN 36	555,54	139,06	533,29
FN 37	382,67	29,85	112,61
FN 38	469,73	4,75	698,45
FN 39	1012,91	52,31	2622,64
FN 40	741,87	179,29	931,53
FN 41	277,61	133,66	79,7
FN 42	586,48	192,84	999,26
FN 43	331,49	74,84	616,52
FN 44	572,68	93,72	813,95
FN 45	408,41	67,25	370,08

	Riszlängen nach 3. Zyklus (Z3) minus Riszlängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z3	Hirnholzrisse tangential Z3	Längsrisse Z3
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
FR 1	46,66	170,02	65,7
FR 2	67,6	78,06	139,51
FR 3	230,93	162,97	283,91
FR 4	515,92	125,07	791,01
FR 5	229,62	29,42	265,01
FR 6	265,1	134,96	295,25
FR 7	428,5	121,72	708,44
FR 8	278,12	156,9	440,66
FR 9	259,59	127,39	0
FR 10	764,41	137,73	1452,29
FR 11	620,31	152,13	1528,81
FR 12	515,6	57,78	310,66
FR 13	365,9	285,68	731,82
FR 14	286,99	105,73	334,81
FR 15	807,38	79,02	1628,79
FR 16	874,75	58,77	2362,13
FR 17	229,96	116,98	131,48
FR 18	1159,39	253,41	1853,43
FR 19	819,96	200,99	1469,36
FR 20	274,61	155,57	453,66
FR 21	372,71	51,02	98,88
FR 22	287,22	92,98	666,77
FR 23	373,04	41,2	176,1
FR 24	631,5	67,9	1555,09
FR 25	486,93	55,62	1119,18
FR 26	21,74	283,17	118,92
FR 27	648,61	167,32	1018,25
FS 1	324,68	170,79	390,29
FS 2	412,57	147,91	787,55
FS 3	405,05	167,01	471,39
FS 4	282,08	72,16	161,83
FS 5	338,85	129,82	147,72
FS 6	311,04	33,7	0
FS 7	507,37	150,16	816,02
FS 8	257,81	267,07	299,88
FS 9	310,17	30,7	0
FS 10	427,86	150,8	826,8
FS 11	122,34	108,08	25,83
FS 12	347,23	84,06	60,08
FS 13	48,95	75,6	0
FS 14	301,62	123,82	265,96
FS 15	305,45	28,93	7,31
FS 16	119,56	225,84	310,11
FS 17	288,49	14,76	56,11
FS 18	396,7	105,01	248,98
FS 19	410,07	59,04	129,48
FS 20	613,55	119,74	1008,09
FS 21	205,51	101,46	473,5
FS 22	757,24	189,05	1118,71
FS 23	563,63	193	771,19
FS 24	510,15	200,87	897,16
FS 25	677,11	198,72	850,1
FS 26	648,53	81,47	1074,89
FS 27	444,19	71,71	166,14

	Risslängen nach 3. Zyklus (Z3) minus Risslängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z3	Hirnholzrisse tangential Z3	Längsrisse Z3
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MN 1	8,91	18,93	0
MN 2	712,99	41,35	398,27
MN 3	339,99	0	65,5
MN 4	246,63	0	485,54
MN 5	775,71	142,77	1503,06
MN 6	83,03	127,8	780,91
MN 7	697,59	180,77	951
MN 8	175,84	31,54	143,97
MN 9	610,64	191,48	683,89
MN 10	555,52	193,05	705,46
MN 11	321,21	36,96	155,44
MN 12	579,97	132,62	1412,97
MN 13	701,54	190,12	779,47
MN 14	196,41	158,57	596,56
MN 15	11,35	231,42	0
MN 16	785,32	44,47	991,67
MN 17	81,17	191,96	118,79
MN 18	326,89	224,09	329,27
MN 19	243,85	105,04	464,7
MN 20	297,65	3,6	517,8
MN 21	225,29	14,39	0
MN 22	171,99	23,24	178,77
MN 23	79,35	218,36	0
MN 24	543,46	177,02	748,24
MN 25	659,9	41,36	816,93
MN 26	937,99	152,84	1382,86
MN 27	189,07	0	168,48
MN 28	0	0	0
MN 29	180,47	15,03	30,48
MN 30	12,27	0	0
MN 31	634,16	21,15	221,85
MN 32	522,9	28,74	167,54
MN 33	616,41	118,36	1037,82
MN 34	390,89	137,51	383,01
MN 35	249,33	7,1	184,82
MN 36	198,78	114,19	30,95
MN 37	185,94	193,16	426,5
MN 38	265,98	193,43	809,97
MN 39	186,4	116,53	240,09
MN 40	347,76	52,62	318,81
MN 41	165,58	7,59	76,81
MN 42	270,85	270,52	694,9
MN 43	143,11	150	314,49
MN 44	10,77	0	0
MN 45	114,51	2,81	83,6

	Riszlängen nach 3. Zyklus (Z3) minus Riszlängen vor Zyklus (Z0)		
	Hirnholzrisse radial Z3	Hirnholzrisse tangential Z3	Längsrisse Z3
Probenbezeichnung	[mm]	[mm]	[mm]
MR 1	455,62	197,77	628,93
MR 2	336,1	29,99	93,85
MR 3	490,87	146,42	475,3
MR 4	610,48	183,83	1710,98
MR 5	417,75	122,84	871,98
MR 6	371,51	32,5	56,18
MR 7	487,15	21,7	446,58
MR 8	99,4	352,58	202,83
MR 9	801,68	10,55	850,7
MR 10	253,32	7,09	92,76
MR 11	388,3	7,11	1297,94
MR 12	575,58	57,1	1001,79
MR 13	83,28	20,28	40,27
MR 14	510,56	196,8	1035,06
MR 15	302,83	181,65	710,64
MR 16	537,1	188,29	1843,61
MR 17	290,28	148,28	350,71
MR 18	199,37	66,03	117,44
MR 19	358,49	2,03	568,95
MR 20	218,12	34,58	210,2
MR 21	289,65	119,08	508,41
MR 22	39,77	83,55	0
MR 23	123,29	190,94	631,41
MR 24	451,8	40,32	128,31
MR 25	101,29	3,71	0
MR 26	516,9	63,03	356,08
MR 27	414,12	38,33	314,09
MS 1	181,81	193,99	584,82
MS 2	347,07	53,33	577,5
MS 3	392,16	170,18	562,71
MS 4	644,71	148,34	1529,93
MS 5	273,64	80,29	973,78
MS 6	367,48	63,8	402,92
MS 7	354,96	70,96	604,87
MS 8	8,96	238,99	38,1
MS 9	536,68	6,94	1132,84
MS 10	179,83	47,61	126,49
MS 11	415,37	72,98	1051,86
MS 12	573,16	64,03	957,35
MS 13	25,8	15,25	0
MS 14	604,36	177,67	1183,5
MS 15	315,71	98,87	949,12
MS 16	454,98	193,69	1136,02
MS 17	290,69	96,52	558,91
MS 18	368,73	104,75	346,31
MS 19	253,76	48,77	700,31
MS 20	131,34	83,87	140,81
MS 21	123,58	161,42	303,38
MS 22	0	92,63	0
MS 23	46,47	208,69	659,85
MS 24	217,99	217,87	434,76
MS 25	12,33	13,46	0
MS 26	414,83	99,69	919,75
MS 27	489,55	54,3	815,71

