

Kölner Beiträge
zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut
Digitale Edition
Band 5

Auswirkungen von wässrigen Behandlungen auf Prägedrucke
Profilometrische Untersuchungen und Restaurierung eines
Werkes von Günther Uecker

Theresa Martina Frey

Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von
Kunst- und Kulturgut Digitale Edition, Band 5

2024

Herausgeber:

Technische Hochschule Köln

Cologne Institute of Conservation Sciences (CICS)

Ubierring 40, D-50968 Köln

Satz / Realisierung des Layouts: Theresa Martina Frey; Andrea Pataki-Hundt

[DOI: 10.57683/EPUB-2740](https://doi.org/10.57683/EPUB-2740)

[URN: urn:nbn:de:hbz:832-epub4-27404](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:832-epub4-27404)

Dieser Band basiert auf der Masterarbeit von Theresa Martina Frey (2022), betreut
durch Prof. Dr. Andrea Pataki-Hundt und Marlen Börngen, M.A.

© Theresa Martina Frey

Zusammenfassung

Es wurde untersucht, inwiefern verschiedene wässrige Behandlungen die Dimensionen eines geprägten Reliefs auf Papier verändern. Zu diesem Zweck wurden Testreihen mit Blindprägedrucken durchgeführt. Während ein Teil der dafür angefertigten Probekörper verschiedenen wässrigen Behandlungen unterzogen wurde, blieb ein anderer Teil unbehandelt. Anschließend wurden die Dimensionen der geprägten Reliefs aus beiden Gruppen mit einem 3D-Profilometer vermessen. Bei allen behandelten Probekörpern wurden Dimensionsveränderungen festgestellt, die jedoch ohne Vergleichsbild mit dem bloßen Auge nicht wahrnehmbar sind. Die Wässerungsdauer, Wässerungszusätze, der Einsatz von Bleichmedien sowie die Grammaturn des Papiers haben die Dimensionsstabilität der geprägten Reliefs kaum beeinflusst, während der zyklische Wechsel zwischen wässriger Behandlung und Trocknung und die Zusammensetzung des Papiers zu stärkeren Veränderungen führen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde eine Risikoeinschätzung und ein Behandlungskonzept für den Prägedruck *Hommage à Fontana* des Künstlers Günther Uecker erarbeitet.

Abstract

The extent to which different aqueous treatments change the dimensions of an embossed relief on paper was investigated. For this purpose, test series were carried out with blind embossed printings. While part of the test specimens was subjected to various aqueous treatments, another part remained untreated. Then the dimensions of the embossed reliefs from both groups were measured with a 3D profilometer. Dimensional changes were observed in all of the treated test specimens, but these were not perceptible to the naked eye without a comparison image. The duration of soaking, soaking additives, the use of bleaching media and the grammage of the paper hardly influenced the dimensional stability of the embossed reliefs, while the cyclical change between aqueous treatment and drying and the composition of the paper led to more significant changes. Based on these results, a risk assessment and a treatment concept for the embossed printing *Hommage à Fontana* by the artist Günther Uecker were developed.

Dank

Mein Dank gebührt Frau Prof. Dr. Andrea Pataki-Hundt (CICS, TH Köln), Marlen Börngen (CICS, TH Köln) und Bert Jaček (CICS, TH Köln), die meine Arbeit sowohl fachlich als auch moralisch unterstützt und begleitet haben.

Ich danke Frau Bardenheuer (artothek Köln) für die kooperative Zusammenarbeit und das zur Verfügung stellen eines Prägedrucks von Günther Uecker für den praktischen Teil meiner Arbeit.

Ich bedanke mich bei Hilmar Dettlaff (Buchbinderei Dettlaff, Leipzig) für seine praktische Unterstützung bei der Herstellung meiner Probekörper.

Vielen Dank an Herrn Grajewski (Fa. Keyence) für die Vor-Ort-Demonstration des VR-3000/VR-3200 3D-Profilometers der Firma Keyence.

Mein Dank gilt der Papiertechnischen Stiftung (PTS), die mir die Arbeit mit dem 3D-Profilometer (VR-3000/VR-3200) ermöglichte. Ich danke insbesondere Frau Dr. Sabine Genest (PTS) für ihre fachliche Beratung, hilfreiche Anregungen und konstruktive Kritik sowie Mandy Mende (PTS) für die Einführung und Betreuung der praktischen Arbeit mit dem 3D-Profilometer.

Vielen Dank an Hanna Freres (TH Köln) für ihre Unterstützung bei der fotografischen Dokumentation des Uecker-Prägedrucks.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Kommilitoninnen, meinen Freund*innen und meiner Familie für ihren Rückhalt und ihre emotionale Unterstützung bedanken.

Inhalt

1	Einleitung	9
2	Forschungsfrage	10
3	Prägedruck	11
3.1	Forschungsstand.....	11
3.2	Terminologie	14
3.3	Technik.....	14
3.4	Objektgruppen.....	16
4	Wechselwirkungen zwischen Papier und Wasser	16
4.1	Forschungsstand.....	17
4.2	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten von Cellulosefasern .	18
4.3	Quellung und Schrumpfung	20
4.4	Materialinterne Faktoren, die das Wasseraufnahme- und Quell- verhalten von Papier beeinflussen	21
4.4.1	Faserart.....	21
4.4.2	Anteil an Hemicellulosen und Lignin	22
4.4.3	Faseraufbereitung und Zugabe von Additiven	23
4.4.4	Struktur des Faservlieses	24
4.4.5	Papiervolumen.....	25
4.4.6	Alterungszustand	25
4.4.7	Verhornungszustand der Fasern	26
4.4.8	Leimung / Oberflächenveredelung des Papiers.....	27
4.5	Materialexterne Faktoren, die das Wasseraufnahme- und Quell- verhalten von Papier beeinflussen	27
4.5.1	Menge des Wassereintrags und Dauer der Wässerung	27
4.5.2	Wässerungs- und Trocknungszyklen.....	28
4.5.3	Wassertemperatur	28

4.5.4	pH-Wert und Salzgehalt des Wassers	29
4.5.5	Anwendung von Bleichmedien.....	29
5	Eigene Versuchsreihen.....	30
5.1	Papierauswahl.....	30
5.2	Prägung.....	32
5.3	Behandlungen	34
5.4	Versuchsstrategie	35
5.5	Messmethode / Messgerät.....	40
5.6	Vorgehen bei der Vermessung	42
5.7	Vorgehen bei der Datenauswertung	44
5.8	Ergebnisse der Datenauswertung.....	45
5.8.1	Einfluss der verschiedenen Behandlungsverfahren auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs	45
5.8.2	Einfluss des Flächengewichts auf die Dimensions- veränderungen des Reliefs	67
5.8.3	Einfluss der Papiersorte auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs	76
5.9	Fazit / Risikobewertung und Handlungsempfehlungen.....	81
5.10	Offen gebliebene Fragestellungen	83
6	Praxisbeispiel.....	84
6.1	Bedeutung des Prägedrucks im Gesamtwerk Günther Ueckers.....	84
6.2	Motiv.....	85
6.3	Bildästhetik.....	86
6.4	Werkgenese	87
6.5	Papierträger	88
6.6	Zustand	89
6.7	Restaurierungsziel	91
6.8	Risikoeinschätzung	92

6.9	Restaurierung.....	92
6.9.1	Trockenreinigung	92
6.9.2	Nassbehandlung	93
6.9.3	Zwischenbeurteilung nach der ersten Wässerung und Trocknung	94
6.9.4	Behandlung der Eisenflecken	95
6.9.5	Bleichbehandlung	96
6.9.6	Einbringen einer alkalischen Reserve.....	96
6.9.7	Trocknung	97
6.10	Konservatorische Empfehlungen	98
6.11	Reflexion	99
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
8	Literaturverzeichnis.....	102
Anhang	109

1 Einleitung

Obwohl sie in den verschiedensten Formen vorkommen und in fast allen Gedächtnisinstitutionen zu finden sind, gehören Prägedrucke zu einer bislang noch wenig beachteten Objektgruppe. Dass diese Objektgruppe nicht nur in der allgemeinen, sondern auch in der fachspezifischen Wahrnehmung unterrepräsentiert ist, spiegelt sich unter anderem in der überschaubaren Zahl an Fachpublikationen wider. Auch die wissenschaftliche Aufarbeitung von Prägedruckten innerhalb künstlerischer Œuvre ist bis heute vielfach noch gar nicht oder nur in Ansätzen erfolgt. Ein Beispiel dafür ist das Werkverzeichnis des Künstlers Günther Uecker, einem der bekanntesten Vertreter des Prägedrucks. In dem von Marion Haedeke bearbeiteten Werkverzeichnis sind alle Werke, bis auf die Werkzeichnungen und Prägedrucke erfasst. Jedoch sind Prägedrucke nicht nur aus der Perspektive der Kunstgeschichte und Kunsttechnologie interessant. Auch in Hinblick auf restauratorische Maßnahmen stellt ihr charakterisierendes Merkmal, das plastische Relief, eine besondere Herausforderung dar. In dieser Arbeit stehen insbesondere wässrige Behandlungen im Fokus. Durch die Anwendung wässriger Systeme kann Papier gereinigt und stabilisiert werden, indem Schmutz sowie wasserlösliche Abbauprodukte aus dem Papier ausgeschwemmt werden, das Fasergefüge neu strukturiert wird oder stabilisierende Substanzen wie beispielsweise eine alkalische Reserve über die wässrige Phase in das Papier eingebracht werden. Neben diesen erwünschten Effekten kann eine feuchte oder wässrige Behandlung aber auch mit unerwünschten Veränderungen eines Papierobjekts hinsichtlich seiner materiellen Zusammensetzung, Struktur, Dimension und Farbe verbunden sein. Um die Vorteile und Gefahren einer wässrigen Behandlung bewerten und bestmöglich einschätzen zu können, müssen Restaurator*innen das Objekt sowie mögliche Risikofaktoren genau kennen.¹ Zu den Wechselwirkungen zwischen Papier und Wasser ist bereits viel erforscht und bekannt. Diese Arbeit greift den Aspekt der Dimensionsstabilität heraus und untersucht diesen im Zusammenhang mit der wässrigen Behandlung von geprägten Papierobjekten. Cellulosehaltige Fasern unterliegen grundsätzlich charakteristischen Dimensionsveränderungen, je nachdem, ob Wasser aus ihren Strukturelementen entfernt oder ihnen wieder zugeführt wird. Die Wasseraufnahme ist mit einer Quellung der Fasern verbunden, die Wasserabgabe hingegen mit einer Schrumpfung der Fasern.

¹ BRÜCKLE 2015 c, S. 512.

Ziel der Arbeit ist es, einen Leitfaden zur Risikoeinschätzung für die wässrige Behandlung von Prägedruckten zu erarbeiten, sowie ein individuelles Behandlungskonzept für einen von der artothek Köln zur Verfügung gestellten Blindprägdruck des Künstlers Günther Uecker zu entwickeln. Die artothek Köln ist eine dem Kulturred der Stadt Köln angegliederte Einrichtung, welche seit 1973 die Möglichkeit bietet, Werke zeitgenössischer Kunst auszuleihen. Das Konzept des Hauses entwickelte sich in einer Zeit der kulturellen Aufbruchstimmung mit dem Ziel, Kunstwerke einem breiten Publikum durch eine lebendige, individuelle und unmittelbare Erfahrung zugänglich zu machen. Des Weiteren engagiert sich die artothek Köln für die Förderung und Vermittlung junger Kunst, indem sie einen Ort für Ausstellungen Kölner Künstler sowie internationaler Gäste zur Verfügung stellt, über die Kölner Kunstszenen informiert und eine Auswahl aktueller internationaler Kunstzeitschriften zur Ansicht bereithält.²

Als weiterer Kooperationspartner unterstützte die Papiertechnische Stiftung (PTS) diese Arbeit. Die Papiertechnische Stiftung (PTS) ist ein Forschungs- und Dienstleistungsinstitut, welches Unternehmen aller Branchen, insbesondere Unternehmen aus der Papiererzeugung, Papierverarbeitung und deren Zulieferindustrien bei der Entwicklung und Anwendung von modernen faserbasierten Lösungen berät und praktisch unterstützt.³

2 Forschungsfrage

Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Untersuchung der Auswirkungen von wässrigen Behandlungen auf Prägedrucke speziell in Hinblick auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs. Neben thermisch induzierten Größenänderungen werden die meisten Dimensionsveränderungen bei Papierobjekten entweder durch Veränderungen der relativen Feuchte (rF) in der Umgebung des Objekts oder durch Tränkung des Objekts mit flüssigem Wasser wie es bei der Nassbehandlung der Fall ist, hervorgerufen. Dimensionsveränderungen zeigen sich als Feuchtdehnung (Hygroexpansion) beziehungsweise Nassdehnung (Hydroexpansion).⁴ Beide Phänomene werden jeweils durch die Quellung der Faserzellwände und die Erweiterung des Abstands zwischen den Fasern verursacht. In dieser Ar-

² ARTOTHEK (29.11.2021).

³ PTS (29.11.2021).

⁴ KELLER 2015, S. 222.

beit werden ausschließlich die durch restauratorische Nassbehandlungen bedingten Dimensionsveränderungen am geprägten Relief beleuchtet. Dimensionsveränderungen, bedingt durch Schwankungen der relativen Feuchte (rF), werden nicht explizit untersucht. Ebenso werden die allgemeinen Veränderungen der Blattdimensionen in x-, y- und z-Richtung nicht erforscht. Ausgehend von der bisherigen Forschung werden Kriterien erarbeitet, die als Entscheidungsgrundlage für die Anwendung wässriger Verfahren bei der Restaurierung von Prägedrucken herangezogen werden können. Damit wird eine Risikoeinschätzung für verschiedene Konstellationen von Papiereigenschaften und wässrigen Behandlungen ermöglicht. Mithilfe eines 3D-Profilometers werden Messungen durchgeführt, um die aus der Theorie abgeleiteten Annahmen zu überprüfen. Darüber hinaus wird das Messgerät hinsichtlich seiner Möglichkeiten und Grenzen sowie seiner Anwendbarkeit in der Restaurierung evaluiert. Abschließend werden die Ergebnisse auf ein praktisches Fallbeispiel übertragen und ein Konzept für den zur Verfügung gestellten Prägedruck von Günther Uecker entwickelt und umgesetzt.

3 Prägedruck

Das aus der Fläche hervortretende Relief kennzeichnet den Prägedruck und hebt ihn von der zweidimensionalen Grafik ab. Claus W. Gerhardt stellt die These auf, dass eine präzise gearbeitete Prägung a priori als wertvoll empfunden wird. „Die Darstellung tritt *erhaben* aus der Fläche heraus. Man sagt ‚erhaben‘, wenn sich etwas über das Gewöhnliche erhebt. Man spricht von einer erhabenen Darstellung – sowohl im formalen als auch im übertragenen Sinne.“⁵

3.1 Forschungsstand

Im deutschsprachigen Raum geht fast die gesamte bisherige Forschung zu Prägedrucken auf Claus Walther Gerhardt zurück. Als ausgebildeter Drucker und Prägemeister widmete er sich in seiner Arbeit sowohl praktischen als auch theoretischen Fragestellungen. Mit seinem zweiteiligen Artikel *Was ist Prägedruck? Eine systematische Betrachtung* versucht er 1966 eine erste methodische Grund-

⁵ GERHARDT 1974, S. 30.

lage zu schaffen, indem er im ersten Teil eine geeignete, allgemeingültige Terminologie vorschlägt⁶ und den Prägedruck in die Systematik der anderen Druckverfahren einordnet beziehungsweise ihn als eigenständige Gruppe neben Hochdruck, Flachdruck, Tiefdruck und Durchdruck angliedert.⁷ Im zweiten Teil des Artikels verweist Claus W. Gerhardt auf die bestehenden Forschungslücken und konkretisiert den Forschungsbedarf. Dabei appelliert er auch an andere Forschungsdisziplinen, sich aktiv an der wissenschaftlichen Untersuchung der Technik des Prägedrucks zu beteiligen. Historische beziehungsweise kunsttechnologische Forschung sollte sich darauf konzentrieren, die zeitliche und örtliche Herkunft der einzelnen Prägedruckverfahren nachzuweisen sowie die Umstände zu ergründen, die diese Erfindungen erforderlich machten. Die Disziplin der Kunstgeschichte sollte sich mit den Wechselwirkungen zwischen künstlerischen Strömungen und der Technik des Prägedrucks, aber auch mit der spezifischen Verwendung des Prägedrucks bei einzelnen Künstler*innen beschäftigen. Für die Volks- und Betriebswirtschaft wäre aus seiner Sicht die Erforschung der wirtschaftlichen Bedeutung des Prägedrucks lohnenswert. Aber auch Buchkundler*innen und Gebrauchsgrafiker*innen sowie Werbegestalter*innen empfiehlt Claus W. Gerhardt die Beschäftigung mit der Technik des Prägedrucks hinsichtlich seiner Weiterentwicklung und Verwendung für die verschiedensten Produkte.⁸ Unabhängig von der jeweiligen Fachdisziplin plädiert er mit Nachdruck dafür, vor allem praxisnahe Forschung zu betreiben und den Erkenntnisgewinn durch Untersuchungen an den in Archiven und Sammlungen erhaltenen Prägedruck-Erzeugnissen zu erzielen. 1970 legt Claus W. Gerhardt seine Dissertation zum Thema *Die Anfänge des Prägedrucks: Ein Beitrag zur Geschichte der Druckmaschinen und Druckverfahren* an der Universität Mainz vor. Bis zum Ende seiner beruflichen Karriere sind viele seiner Publikationen der Technik des Prägedrucks gewidmet. Ebenfalls auf der Grundlage der praktischen Anwendung und Erfahrung beschreibt Walter Hess die Technik des Prägedrucks in seinem 1923 erschienen Werk *Die Papier-Prägetechnik. Praktisches Handbuch für die gesamte Papier-Prägetechnik*.

⁶ GERHARDT 1966, S. 18.

⁷ GERHARDT 1966, S. 71.

⁸ Ebd., S. 71 f.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Prägedruck sowohl als besondere künstlerische Technik als auch besondere Objektgruppe zu beleuchten. Dabei soll in erster Linie der restauratorisch-konservatorische Umgang mit geprägten Papieren im

Zusammenhang mit wässrigen Behandlungsmaßnahmen im Vordergrund stehen. Eine systematische Aufarbeitung der bestehenden Forschungslücken kann in dieser Arbeit nicht geleistet werden.

3.2 Terminologie

Terminologisch sind die Begriffe *drucken*, *pressen* und *prägen* voneinander zu unterscheiden. Beim *Drucken* wird das Motiv mithilfe einer eingefärbten Druckform durch Berührung auf die Oberfläche des Bedruckstoffs übertragen. Dabei sollten theoretisch keine Erhebungen oder Vertiefungen im Bedruckstoff entstehen. Beim *Pressen* wird das Motiv konturenscharf in den Bedruckstoff hineingeformt. Bei diesem Vorgang bilden sich rückseitig entsprechende Erhebungen. Beim *Prägen* hingegen wird das Motiv konturenscharf aus dem Bedruckstoff herausgehoben. Dabei kommt es zu rückseitig entsprechenden Vertiefungen.⁹ Je nach Prägedruckverfahren sind Gemeinsamkeiten sowohl mit der Technik des Tiefdrucks als auch mit der Technik des Hochdrucks zu erkennen.¹⁰ Besonderes Charakteristikum des Prägedrucks ist die Gleichzeitigkeit von *Prägen* und *Drucken* in einem einzigen Vorgang (Maschinenhub).¹¹ Ausnahmen bilden dabei nur die Blindpressung und -prägung, die ohne Farbe ausgeführt werden. Trotzdem sind sie der Technik des Prägedrucks zuzuordnen, da sie die gleichen Druckstöcke wie die farbigen Prägeverfahren erfordern und genauso der Herstellung plastischer Reliefs auf Papier oder papierähnlichen Materialien dienen.¹² Der Begriff *Prägedruck* bezeichnet sowohl das Verfahren als auch das Erzeugnis.¹³

3.3 Technik

Wie bei anderen Drucktechniken wird das Motiv beim Prägedruck mithilfe einer Druckform durch Berührung auf den Bedruckstoff übertragen. Die Druckform besteht aus zwei Teilen: der Prägeplatte, auch Patrize genannt sowie dem entsprechenden Gegenstück, auch Matrize genannt. Da beim Prägen eine besonders hohe Druckkraft erforderlich ist, bestehen die Prägeplatten aus Messing oder

⁹ GERHARDT 1974, S. 12.

¹⁰ GERHARDT 1966, S. 16.

¹¹ Ebd., S. 16.

¹² Ebd., S. 18.

¹³ GERHARDT 1974, S. 11.

Stahl.¹⁴ Das gewünschte Motiv wird seitenverkehrt, vertieft in die Prägedruckplatte eingraviert, gemeißelt oder geätzt. Alle übrigen Flächen werden glattpoliert.¹⁵ Das zum Prägen benötigte Gegenstück, die Matrize, besteht meist aus mehreren aufeinander geklebten Schichten Pappe oder Karton. Das Material muss eine gewisse Elastizität besitzen und darf nicht zu hart oder spröde sein, um sich optimal in die Form der Prägeplatte einzupassen und eine präzise Prägung zu gewährleisten.¹⁶

Je nach Ausrichtung von Matrize und Matrize (Druckrichtung) kann jeweils zwischen Prägung und Pressung unterschieden werden. Jedes Druckverfahren kann auch ohne Farbe als sogenannte Blindprägung beziehungsweise Blindpressung ausgeführt werden.

Für eine erfolgreiche Prägung spielen neben der Passgenauigkeit von Matrize und Matrize sowie dem aufgewendeten Druck auch die Wahl des Papiers, auf dem die Prägung ausgeführt werden soll, der Wassergehalt des Prägepapiers sowie die Prägetemperatur eine Rolle. Papiere, die als Prägepapiere verwendet werden, sollten möglichst dehnfähig sein. Daher sind Papiere mit längeren, gut verfilzten Fasern besser geeignet als Papiere mit kurzen Fasern und einem hohen Anteil an Füllstoffen.¹⁷ Ebenso sollten sie mindestens schwach geleimt sein. Ihr Flächengewicht liegt in der Regel zwischen 40 g/m² und 400 g/m².¹⁸ Um beim Prägen ein Relief im Papierträger zu erzeugen, wird das Material gedehnt. Um dabei ein Reißen oder Brechen der Papierfasern zu vermeiden, sollte das für den Prägedruck verwendete Papier einen gewissen Feuchtigkeitsgehalt besitzen. Durch das Befeuchten des Prägepapiers werden die Fasern flexibler und können sich besser ihrer neu gegebenen Form anpassen. Um diese Neuformung des Faservlieses möglichst dauerhaft zu fixieren, sind ein hoher Anpressdruck und eine erwärmte Presse von Vorteil.¹⁹

In der künstlerischen Nutzung wird dieser technische Aufbau häufig etwas variiert. Eine Rekonstruktion der Herstellungsweise der bekannten Nagelreliefs des Künstlers Günther Uecker folgt in Kapitel 6.4.

¹⁴ GERHARDT 1966, S. 16.

¹⁵ GERHARDT 1966, S. 18., HESS 1923, S. 11.

¹⁶ HESS 1923, S. 16 ff.

¹⁷ Ebd., S. 27 f.

¹⁸ GERHARDT 1974, S. 39.

¹⁹ HESS 1923, S. 28-33.

3.4 Objektgruppen

Die Vielfältigkeit in der historischen Entwicklung spiegelt sich ebenso in der Vielfältigkeit der heute vorkommenden Prägedruckerzeugnisse wider. Dabei sind diese nicht nur in Einrichtungen präsent, in denen sie als Kulturgüter gesammelt und bewahrt werden, sondern nach wie vor auch im alltäglichen Gebrauch.

Die wohl größten Anwendungsgebiete stellen die Verpackungs- und Werbeindustrie dar. Hier finden sich Prägedrucke vor allem in Form von Schachteln, Etiketten oder Banderolen. Im Zusammenhang mit amtlichen Schriftstücken sind Prägedrucke beispielsweise in Form von geprägten Siegeln oder Siegelmarken zu finden, die ein zusätzliches Sicherheitsmerkmal darstellen. Im Bereich der postalischen Kommunikation finden sich Prägedrucke unter anderem auf Briefmarken, Briefpapier, Briefumschlägen oder Grußkarten. Auch für repräsentative Drucksachen oder Papierprodukte mit besonderem ästhetischem Anspruch wie beispielsweise Visiten- oder Menükarten wird die Technik des Prägedrucks nach wie vor verwendet.²⁰ Nicht zuletzt wird der Prägedruck auch als künstlerische Ausdrucksform genutzt. Als Zwischenform zwischen Grafik und Plastik ermöglicht die Technik des Prägedrucks die Gestaltung aller drei Raumdimensionen. Der Autor Heinz Stahlhut beschäftigte sich in seinem Artikel „... Gesichtstäuschungen sind Gesichtswahrheiten ...“. *Der Prägedruck im Schaffen Günther Ueckers* mit Künstlern wie Günther Uecker (*1930), Rolf Nesch (1893-1975), Étienne Hajdú (1907-1996), Lucio Fontana (1899-1968) und Enrico Castellani (1930-2017), bei denen der Prägedruck eine besondere Stellung innerhalb ihres Œuvres einnimmt.²¹

4 Wechselwirkungen zwischen Papier und Wasser

Papier ist ein dreidimensionaler Werkstoff und besteht hauptsächlich aus Cellulosefasern, welche durch chemische, thermische und / oder mechanische Aufschlussverfahren aus verschiedenen Pflanzenarten gewonnen werden. Bei der Papierherstellung wird aus diesen Fasern ein Vlies gebildet, in das, entsprechend den gewünschten Eigenschaften, zusätzlich Füllstoffe, Leimsubstanzen und Additive eingebettet oder aufgetragen werden.²² Zusätzlich ermöglicht der

²⁰ GERHARDT 1974, S. 131.

²¹ STAHLHUT 2000, S. 303-307.

²² MENTJES 2006, S. 17.

als Gleichgewichtsfeuchte im Papier verbleibende Wasseranteil die Flexibilität des Werkstoffs.²³ Papier ist ein hygroskopisches Material und besitzt dementsprechend eine gewisse Affinität gegenüber Wasser. Diese Eigenschaft wird in der Papierrestaurierung ausgenutzt, wenn es darum geht, Schmutz oder lösliche Abbauprodukte mithilfe einer wässrigen Behandlung aus dem Faservlies auszuwaschen. Dabei treten Quellungs- beziehungsweise Schrumpfungphänomene auf, welche Auswirkungen auf die Dimensionen des gewässerten Objekts haben.

4.1 Forschungsstand

Die Erforschung der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Papier und Wasser liegt im Interesse verschiedener Fachdisziplinen. Dazu zählen neben der Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft unter anderem auch die Chemie, Physik, Materialwissenschaft und Verfahrenstechnologie. Einen Versuch, die Erkenntnisse all dieser Fachdisziplinen zusammenzuführen, stellt der 2015 von Gerhardt Banik und Irene Brückle herausgegebene Sammelband *Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher* dar²⁴. Darin werden naturwissenschaftliche Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten in Bezug auf restauratorische Behandlungskonzepte interpretiert, einerseits um deren Bedeutung im Kontext der Restaurierung darzulegen, andererseits um die Systematisierung wässriger Behandlungen von Papier in ihrer jeweiligen Variantenvielfalt zu ermöglichen. Der Sammelband vereint Beiträge von Papiermachern wie Günther Wegele und Reinhard Lacher, von Papierrestauratorinnen wie Irene Brückle und Joanne Kosek und Chemikern wie Gerhardt Banik, Vincent Daniels, D. Sven Keller, Anthony Smith und Paul Whitmore.

Alle Grundlagen und Forschungsergebnisse, die für diese Arbeit, insbesondere für die praktischen Versuche (s. Kapitel 5) relevant sind, werden in den folgenden Kapiteln (s. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis 4.5) im Einzelnen vorgestellt. Als weitere wichtige Grundlage für diese Kapitel dient auch die 2006 veröffentlichte Publikation von der Restauratorin Meike Mentjes²⁵, in der sie die Ergebnisse ihrer Diplomarbeit zum Trocknungsverhalten und zu Trocknungstechniken aus der Papierrestaurierung vorstellt.

²³ MENTJES 2006, S. 19.

²⁴ BANIK, BRÜCKLE 2015

²⁵ MENTJES 2006

Für den praktischen Teil dieser Arbeit wird, wie bereits erwähnt, unter anderem auf die Expertise der Papiertechnischen Stiftung (PTS) zurückgegriffen.

4.2 Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten von Cellulosefasern

Die Molekülketten der Cellulose sind weitgehend parallel zueinander ausgerichtet und physikalisch durch Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden. „Haben sich die gegenüberliegenden Monomere von zwei benachbarten Polymerketten an allen sechs verfügbaren Bindungsstellen mit Wasserstoffbrückenbindungen verbunden, kommt es zur Ausbildung geordneter, kristalliner Bereiche. Beim Zusammenfügen benachbarter Celluloseketten unter Beteiligung von weniger Bindungsstellen als den sechs verfügbaren, kommt es zur Ausbildung amorpher Bereiche.“²⁶ Diese Struktur bestimmt auch die Wechselwirkungen zwischen Cellulose und Wasser. Während Wasser in die amorphen Bereiche problemlos eindringen und dort Bindungen mit den funktionellen Gruppen der Cellulose eingehen kann, sind die kristallinen Bereiche für Wasser weitgehend unzugänglich. Da sich amorphe und kristalline Bereiche in der Cellulose abwechseln, können Wasserdampf und flüssiges Wasser relativ gleichmäßig verteilt in die Cellulose eindringen, sie dabei aber nicht vollständig auflösen.²⁷

Veränderungen des Wassergehalts durch Wasseraufnahme oder Wasserabgabe führen bei Cellulosefasern zu charakteristischen Dimensionsveränderungen. Diese liegen unter anderem in der gestreckten Form der Fasern, ihrer komplexen Mikrostruktur sowie ihrer Hygroskopizität begründet.²⁸ Grundsätzlich lassen sich die mit einer Wasseraufnahme beziehungsweise -abgabe verbundenen Prozesse in Adsorption, Absorption, Migration und Desorption unterscheiden.

Als Adsorption bezeichnet man allgemein die Bindung von Molekülen im gasförmigen oder flüssigen Zustand an die Oberfläche eines Feststoffs.²⁹ Auch bei Cellulosefasern erfolgt die Wasseraufnahme zunächst durch Adsorption an den zugänglichen Oberflächen der Fasern.³⁰ Nähern sich Wassermoleküle aufgrund von elektrostatischen Wechselwirkungen an die Cellulose an, bilden sich zwischen

²⁶ MENTJES 2006, S. 21.

²⁷ Ebd., S. 21.

²⁸ KELLER 2015, S. 228.

²⁹ BRÜCKLE 2015 a, S. 91

³⁰ Ebd., S. 96.

den Wassermolekülen und dem Cellulosemolekül Wasserstoffbrückenbindungen aus.³¹ Dabei wird die Geschwindigkeit und der Verlauf der Wasseraufnahme wesentlich durch die Benetzbarkeit der Cellulosefasern mitbestimmt. Je besser die Benetzbarkeit der Cellulosefaser ist, desto besser kann die Adsorption des Wassers erfolgen. Die Benetzbarkeit der Cellulosefasern ist wiederum abhängig von der Oberflächenspannung des Wassers sowie von der Zugänglichkeit der Cellulosefasern für das Wasser.³²

Ist die Adsorption erfolgt, schließt sich die Absorption an. Unter Absorption wird allgemein die Aufnahme eines Gases oder einer Flüssigkeit über Diffusionsprozesse ins Innere eines porösen Festkörpers verstanden.³³ Bei Cellulosefasern meint Absorption die Aufnahme von Wasser in das Porenvolumen der Fasern. Zusammen werden Adsorption und Absorption auch als Sorption bezeichnet. Die natürliche Verteilung des Wassers innerhalb der faserigen Matrix wird als Migration bezeichnet. Werden adsorbiertes und absorbiertes Wasser bei der Trocknung wieder abgegeben, spricht man von Desorption. Dabei ändert das flüssige Wasser seinen Aggregatzustand und wandelt sich in Wasserdampf um, der an der Faseroberfläche verdampft.³⁴

Da Cellulose aufgrund seiner großen Anzahl von Hydroxygruppen ein hygroskopisches Verhalten aufweist, finden auch, wenn die Wasseraufnahme beziehungsweise -abgabe nicht aktiv von außen herbeigeführt wird, permanente Wechselwirkungen mit dem Umgebungsklima statt. „Steigt die Temperatur der Umgebungsluft an oder verringert sich ihr Feuchtegehalt, gibt die Cellulose Wasser ab. Verringert sich hingegen die Temperatur der Umgebungsluft oder steigt ihr Feuchtegehalt an, nimmt die Cellulose Wasser auf. Die Wasseraufnahme oder -abgabe geschieht so lange, bis die Cellulose eine der Umgebungsfeuchte entsprechende Gleichgewichtsfeuchte erreicht hat. Bei kommerziell gebräuchlicher Cellulose liegt die Gleichgewichtsfeuchte in Raumluft von 20 °C und relativer Feuchte (rF) von 50 % bei 6-8 %.“³⁵

³¹ MENTJES 2006, S. 24.

³² Ebd., S. 25.

³³ BRÜCKLE 2015 a, S. 91.

³⁴ BRÜCKLE 2015 a, S. 91., MENTJES 2006, S. 26.

³⁵ MENTJES 2006, S. 18.

4.3 Quellung und Schrumpfung

Die Faserquellung ist das Resultat von zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Wasser- und Cellulosemolekülen im Verlauf der Absorption.³⁶ Eindringendes Wasser flutet zunächst das Hohlraumnetzwerk zwischen den Fasern und gelangt anschließend durch Migration weiter in das Faserinnere. Die Wassermoleküle werden dort durch die hydrophilen Hydroxy- und Carbonylgruppen in multimolekularen Schichten gebunden, wodurch sich der Abstand der Fibrillen zueinander vergrößert und die Fasern quellen.³⁷ „Charakteristisch an der Quellung ist, dass sie im Faserdurchmesser 10-20 mal so stark auftritt wie in der Faserlänge. Der Grund für dieses Phänomen liegt in der Orientierung der Fibrillen parallel zur Faserachse.“³⁸ Insgesamt beträgt die Dimensionsveränderung zwischen einer gequollenen und einer nicht gequollenen Faser in Richtung des Faserdurchmesser circa 40 % bis 45 % und in Längsrichtung der Faser circa 1 %.³⁹ Gequollene Fasern verhalten sich viskoelastisch, da die Fibrillen durch die gelösten intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zu einem gewissen Grad gegeneinander verschieblich sind.⁴⁰ Der maximale Quellungszustand der Faser wird als Fasersättigungspunkt (engl. Fiber Saturation Point (FSP)) bezeichnet.⁴¹ Ein weiteres Maß zur Bestimmung des Quellungszustandes ist das Wasserrückhaltevermögen (WRV).⁴² Das Wasserrückhaltevermögen beschreibt die Fähigkeit von Faserstoffen, eine bestimmte Wassermenge unter definierten Bedingungen zurückzuhalten.

Neben der Quellung der Einzelfasern führt die Aufnahme von flüssigem Wasser auch dazu, dass die Bindungen zwischen den Fasern gelöst sowie im Papier befindliche Spannungen abgebaut werden. Aus dem Zusammenwirken dieser Effekte resultiert wiederum die Nassdehnung des Papiers und die Vergrößerung seiner Dimensionen.⁴³

Bei der Trocknung vollzieht sich der umgekehrte Prozess: das an- und in die Fasern eingelagerte Wasser wird desorbiert. Dabei wandelt sich flüssiges Wasser in

³⁶ BRÜCKLE 2015 a, S. 105.

³⁷ BANIK, BRÜCKLE 2015, S. 611.

³⁸ MENTJES 2006, S. 23.

³⁹ BELLE 2016, S.18.

⁴⁰ MENTJES 2006, S. 24.

⁴¹ WOLFINGER 2017, S. 44.

⁴² BELLE 2016, S. 17.

⁴³ BRÜCKLE, BANIK 2015 b, S. 470.

Wasserdampf um, welcher an der Faseroberfläche verdunstet.⁴⁴ Durch die Wasserabgabe kommt es zu einem Kollabieren der Fasern, welches durch das Zusammenfallen der Hohlräume in der Fasermittte, der Lumina, sowie der Verkleinerung der Zellwandvolumina gekennzeichnet ist. Dies führt zu einem lateralen und axialen Schrumpfen der Fasern, wobei diese, genau wie bei der Faserquellung, deutlich stärker im Faserdurchmesser als in der Faserlänge auftritt.⁴⁵ Da die Fasern im Papier jedoch in einem Fasernetzwerk eingebunden sind, wirkt sich ihr Schrumpfverhalten auf das gesamte Vlies aus. Dies führt dazu, dass Papiere, die ohne eine Druck- oder Zugspannung getrocknet werden, insgesamt kleiner werden und lokale Spannungen oder Verwellungen und Verwerfungen ausbilden können.⁴⁶ Im Unterschied zur Wasseraufnahme und Quellung von Cellulosefasern, die innerhalb von Sekunden geschieht, verlaufen die Wasserabgabe und Schrumpfung deutlich langsamer.⁴⁷

4.4 Materialinterne Faktoren, die das Wasseraufnahme- und Quellverhalten von Papier beeinflussen

Als materialinterne Faktoren werden im Folgenden die Parameter zusammengefasst, die das Wasseraufnahme- und Quellverhalten von Papier aufgrund seiner Zusammensetzung und seines Zustandes beeinflussen.

4.4.1 Faserart

Papier ist ein hauptsächlich aus Cellulosefasern bestehender Werkstoff. Dabei unterscheiden sich die für die Papierherstellung verwendeten Fasern hinsichtlich ihres pflanzlichen Ursprungs, ihrer geografischen Herkunft sowie ihrer Morphologie. Entsprechend ihrer Ausprägung besitzen diese Parameter einen mehr oder weniger großen Einfluss auf das Dimensionsverhalten des Papiers.

Wesentliche morphologische Unterscheidungskriterien von Fasern sind deren Länge sowie deren Querschnittsfläche. Letztere wird einerseits durch den Faserdurchmesser und andererseits durch die Faserwanddicke beschrieben. So besitzen Nadelholzfasern im Vergleich zu Laubholzfasern einen größeren Faserdurchmesser sowie dickere Faserwände. Spätholzfasern weisen im Vergleich zu

⁴⁴ MENTJES 2006, S. 26.

⁴⁵ KELLER 2015, S. 203., MENTJES 2006, S. 26., WOLFINGER 2017, S. 52 f.

⁴⁶ KELLER 2015, S. 228., MENTJES 2006, S. 26.

⁴⁷ MENTJES 2006, S. 26.

Frühholzfäsern einen geringeren Faserdurchmesser aber zumindest bei Nadelhölzern dickere Faserwände auf.⁴⁸ Daneben ist die von der Faserart abhängige Zusammensetzung der Faserzellwand ein weiterer wesentlicher Faktor hinsichtlich der Dimensionsstabilität. Dabei spielt vor allem das anteilige Vorkommen von Hemicellulosen und Lignin eine entscheidende Rolle⁴⁹ (s. Kapitel 4.4.2). Zudem muss bei der Betrachtung von Faserlänge, Faserdurchmesser und Faserwandstärke auch zwischen dem ungemahlten beziehungsweise wenig gemahlten Zustand und dem gemahlten Faserzustand unterschieden werden (s. Kapitel 4.4.3). Ebenso müssen auch ein ungealterter und gealterter sowie ein nicht verhornter und verhornter Faserzustand differenziert betrachtet werden (s. Kapitel 4.4.6 und 4.4.7).

4.4.2 Anteil an Hemicellulosen und Lignin

Neben der Cellulose sind Hemicellulosen und Lignin weitere wesentliche Bestandteile der Faserrohstoffe für die Papiererzeugung. Während die Cellulose das entscheidende Strukturelement ist, welches den Fasern Elastizität und Widerstandskraft gegenüber Zugbelastungen verleiht, fungieren Hemicellulosen als elastische Kittsubstanzen, die den Verbund zwischen Cellulose und Lignin ermöglichen. Alle Komponenten liegen in bestimmten Bereichen der Faserzellwände durchmischt vor. Ihre Anteile unterscheiden sich je nach pflanzlicher Herkunft der Fasern.⁵⁰

Hemicellulosen und Lignin besitzen einen wesentlichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften der Faserstoffe sowie auf deren chemische Reaktionsfähigkeit.⁵¹

Hemicellulosen weisen ein hygroskopisches Verhalten auf und sind in der Lage, Wasser in Form von Wasserdampf aus der Umgebungsatmosphäre spontan zu absorbieren.⁵² Eine Voraussetzung dafür ist ihr hoher Gehalt an OH-Gruppen. Diese können vorhandenes Wasser über Wasserstoffbrücken binden, was zu einer Aufweitung der Zellwandstruktur führt.⁵³ Hemicellulosen besitzen eine überwiegend amorphe Struktur. Kristalline oder teilkristalline Bereiche entstehen nur

⁴⁸ WOLFINGER 2017, S. 33 f.

⁴⁹ ERHARD et al. 2006, S. 3.

⁵⁰ BRÜCKLE 2015 b, S. 131.

⁵¹ Ebd., S. 132.

⁵² Ebd., S. 133.

⁵³ ERHARD et al. 2006, S. 3.

dort, wo sie an die Cellulose gebunden sind.⁵⁴ Dadurch erleichtern sie das Eindringen von Wasser in die Cellulosestrukturen über die amorphen Bereiche.⁵⁵ Des Weiteren enthalten Hemicellulosen freie Carboxylgruppen. Diese interagieren mit den im Wasser gelösten Ionen und bewirken dadurch ein Ladungsgefälle in Fasernähe, welches wiederum den Osmoseeffekt auslöst.⁵⁶ Dadurch sind Hemicellulosen deutlich besser durch Wasser quellbar als reine Cellulose.⁵⁷

Lignin ist eine komplex aufgebaute, spröde und amorphe makromolekulare Substanz von unregelmäßiger, dreidimensionaler Struktur. Es besteht aus vernetzten aromatischen Ringen⁵⁸, welche neben den kaum vorhandenen hydrophilen funktionellen Gruppen seinen hydrophoben Charakter bestimmen.⁵⁹ In verholzten Faserstoffen besitzt Lignin eine Stützfunktion und dient der Faserstabilität.⁶⁰ Über kovalente Bindungen und Wasserstoffbrücken ist es mit Hemicellulosen verbunden, die wiederum über Wasserstoffbrücken an den Cellulosefasern fixiert sind.⁶¹

Da Hemicellulosen und Lignin eine gegensätzliche Affinität zu Wasser besitzen, gilt: je größer der Anteil hydrophiler Hemicellulosen in der Faser ist, desto mehr Wasser kann die Cellulosefaser binden und umso stärker ist ihre Quellung. Je mehr hydrophobes Lignin in der Faser enthalten ist, desto weniger Wasser kann die Cellulosefaser binden und umso geringer ist ihre Quellung.⁶²

4.4.3 Faseraufbereitung und Zugabe von Additiven

Der Stoffaufschluss, die Stoffmahlung sowie die Zugabe von Additiven wirken sich direkt auf das Dimensionsverhalten von Papier bei Wasseraufnahme beziehungsweise Wasserabgabe aus. Durch den chemischen und thermischen Faseraufschluss werden gewisse Anteile von Hemicellulosen und Lignin sowie weitere Begleitstoffe aus dem Porensystem herausgelöst. Dadurch verkleinert sich dieses und es entsteht eine verstärkte Kohäsion zwischen den Mikrofibrillen, was zu einer verminderten Quellfähigkeit der Fasern führt. Gleichzeitig kommt es auch

⁵⁴ BRÜCKLE 2015 b, S. 132 f.

⁵⁵ ERHARD et al. 2006, S. 3.

⁵⁶ BELLE 2016, S. 17.

⁵⁷ BRÜCKLE 2015 b, S. 132 f. MENTJES 2006, S. 22.

⁵⁸ MENTJES 2006, S. 22. BRÜCKLE 2015 b, S. 134.

⁵⁹ ERHARD et al. 2006, S. 3.

⁶⁰ BRÜCKLE 2015 b, S. 132.

⁶¹ Ebd., S. 135.

⁶² MENTJES 2006, S. 23, WOLFINGER 2017, S. 28 f., S. 44.

zu einer Verringerung des durchschnittlichen Polymerisationsgrades der Cellulose. Auch eine Bleiche führt zu einer Verringerung des Wasseraufnahmevermögens und der Quelfähigkeit der Cellulosefasern.⁶³ Durch die Mahlung werden in der Faserstoffaufbereitung die gewünschten papiertechnologischen Eigenschaften wie Festigkeit und strukturelle Gleichmäßigkeit eingestellt. Bei der Stoffmahlung werden die Zellwände delaminiert und fibrilliert und erhalten dadurch eine vergrößerte Oberfläche. Das Wasseraufnahme- und -rückhaltevermögen der Faserwände steigt und die Fasern können stärker quellen. Dadurch steigt auch ihr Schrumpfungspotenzial bei der Trocknung.⁶⁴

Durch die Zugabe von Additiven kann die Nassdehnung begrenzt werden, indem die Quellung vermindert oder verzögert wird. Mit wachsendem Füllstoffgehalt nimmt die Dimensionsstabilität von Papieren in der Regel zu, da der relative Anteil von quellfähigem Material und die mittlere Faser-Faser-Bindungsstärke verringert werden.

4.4.4 Struktur des Faservlieses

Die Strukturmerkmale eines Papiers werden entscheidend von der dreidimensionalen Anordnung des Fasernetzwerks in x-, y- und z-Richtung, das heißt in Blattlänge, Blattbreite und Blattdicke bestimmt. Bedingt durch ihre Herstellung unterscheiden sich maschinell gefertigte und handgeschöpfte Papiere hinsichtlich der Faserorientierung im Papiervlies. Bei Maschinenpapieren entspricht die x-Richtung der Maschinenlaufrichtung (MD), die y-Richtung der Querrichtung zum Maschinenverlauf (CD).⁶⁵ Handgeschöpfte Papiere hingegen weisen in der Regel nur eine geringe bis gar nicht erkennbare Faserorientierung auf, die davon abhängt, wie das Schöpfsieb beim Entwässern des Faserstoffs bewegt wurde.⁶⁶ Bei maschinell hergestellten Papieren ist die Papierbahn durch Zugspannungen in Maschinenlaufrichtung (MD) gedehnt. Diese Dehnungsspannung wird bei der Papiertrocknung im Fasergefüge fixiert. Wird ein solches Papier befeuchtet, tritt zunächst eine irreversible Schrumpfung auf. Diese ist darauf zurückzuführen, dass die im Papiervlies fixierten Spannungen durch die Schwächung der Faser-Faser-

⁶³ MENTJES 2006, S. 27 f.

⁶⁴ KELLER 2015, S. 209 f.

⁶⁵ BRÜCKLE 2015 a, S. 114.

⁶⁶ Ebd., S. 115.

Bindungen gelöst werden.⁶⁷ In der Folge führt die Faserquellung zu einer Vergrößerung der Blattdimensionen. Da Cellulosefasern deutlich stärker in der Faserbreite als in der Faserlänge quellen, treten Dimensionsveränderungen bei Papieren mit Laufrichtung in den beiden Richtungen der Blattebene unterschiedlich stark auf.⁶⁸ „Ein maschinell hergestelltes Papier kann sich in Querrichtung (CD) um zwischen 1 und 7 % ausdehnen, aber deutlich unter 1 % in Maschinenlaufrichtung (MD).“⁶⁹ Demgegenüber dehnen sich handgeschöpfte Papiere relativ gleichmäßig aus. Die Blattdicke nimmt bei allen Papieren durch die Quellung zu.⁷⁰

4.4.5 Papiervolumen

Trotz gleicher Grammatur können Papiere unterschiedlich dick sein, das heißt, ein voneinander abweichendes Volumen besitzen. Dementsprechend beschreibt Papiervolumen das Verhältnis zwischen der Papierdicke und seinem Flächengewicht. Ein bei der Herstellung nicht gesondert bearbeitetes Papier besitzt ein einfaches Volumen. Wird das Faservlies bei der Papierherstellung sehr stark verdichtet, handelt es sich um ein Papier mit einem Volumen kleiner 1, welches hart und wenig saugfähig ist (z.B. Pergaminpapier, stark satinierte Papiere). Sind die Fasern hingegen eher locker angeordnet und enthält das Faservlies viele Hohlräume, ist es weicher und saugfähiger (z.B. Löschpapier).

Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, erfolgt die Wasseraufnahme sowohl durch Adsorption an den zugänglichen Oberflächen als auch durch Absorption in das Porenvolumen der Cellulosefasern sowie in das von den Fasern gebildete und umschlossene Porensystem.⁷¹ Dadurch besitzen voluminöse Papiere mit einem lockeren Faserverbund und vielen Hohlräumen eine besonders hohe Saugfähigkeit und können mehr Wasser aufnehmen.

4.4.6 Alterungszustand

Im Laufe der Papieralterung führen Hydrolyse, Oxidation und Elimination zu einem Abbau der Cellulosefasern. Wie bei allen Makromolekülen bewirkt schon ein

⁶⁷ KELLER 2015, S. 223.

⁶⁸ KELLER 2015, S. 210 f., MENTJES 2006, S. 33.

⁶⁹ BRÜCKLE 2015 a, S. 115.

⁷⁰ Ebd., S. 116.

⁷¹ Ebd., S. 96.

kleiner Anteil an oxidierten oder hydrolysierten Stellen im Molekül überproportionale Veränderungen seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften. Durch Kettenspaltung verringert sich der durchschnittliche Polymerisationsgrad der Cellulose. Der Abbau der amorphen Bereiche bewirkt, dass die Kristallinität der Fasern relativ zunimmt. Dadurch verringern sich die Bereiche, in denen eine Wasseraufnahme möglich ist.⁷² Daneben sind auch durch Oxidationsreaktionen immer weniger Hydroxygruppen vorhanden, die in der Lage wären, Wassermoleküle zu binden. Das Wasseraufnahme- und Quellvermögen der Cellulose nehmen ab.⁷³

4.4.7 Verhornungszustand der Fasern

Die Verhornung von Cellulosefasern ist eine irreversible, durch den Vorgang der Trocknung induzierte Veränderung. Georg Jayme führte diesen Begriff 1944 ein, um damit die Verringerung der Wiederbefeuchtbarkeit und Quellfähigkeit hochreiner Zellstoffe nach einmaliger Trocknung zu beschreiben.⁷⁴ Bei der Verhornung kommt es zum Zusammenbruch der Porenstruktur in den Zellwänden und zur Neubildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Fibrillen. Diese sind ohne eine mechanische Behandlung nicht wieder aufzulösen.⁷⁵ Das Kollabieren der Fasern führt zu einer Verdichtung sowie Versteifung der Fasern.⁷⁶ Dadurch wird die Wasseraufnahmefähigkeit sowie das Quellvermögen der Cellulose deutlich vermindert.⁷⁷ Messtechnisch kann dieses Phänomen durch die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens erfasst werden. Das Wasserrückhaltevermögen nimmt mit fortschreitender Verhornung der Fasern immer weiter ab. Die stärkste Verhornung findet während der erstmaligen Trocknung der Fasern statt. Je intensiver ein Faserstoff bei der Mahlung behandelt wird, desto größer ist seine Verhornungsneigung. Diese resultiert gleichzeitig in einem verminderten Quellvermögen. Die Verhornungsneigung wird zudem auch durch den Aufschlussgrad des Faserstoffes sowie die Trocknungstemperatur beeinflusst.⁷⁸

⁷² WHITMORE 2015, S. 241.

⁷³ MENTJES 2006, S. 49.

⁷⁴ KELLER 2015, S. 226.

⁷⁵ BELLE 2016, S. 19., MENTJES 2006, S. 26.

⁷⁶ BELLE 2016, S. 90.

⁷⁷ KELLER 2015, S. 226. MENTJES 2006, S. 26., WOLFINGER 2017, S. 53.

⁷⁸ WOLFINGER 2017, S. 53.

Die Verhornung bewirkt eine geringere Flexibilität der Fasern und führt somit mittelbar zu einer geringeren Festigkeit im Papier.⁷⁹

4.4.8 Leimung / Oberflächenveredelung des Papiers

„Papiere, die nicht weiter durch Zusatzstoffe veredelt wurden, sind aufgrund des hydrophilen Charakters der Cellulose, der Porosität der Cellulosefasern und des kapillaren Hohlraumnetzwerks im Faservlies sehr saugfähig.“⁸⁰ Die Leimung ist ein Verfahren zur Ausrüstung von Papier mit Zusatzstoffen, die das Eindringen von flüssigem Wasser in das Faservlies verhindern oder zumindest reduzieren soll. Eine Leimung verringert die innere Oberflächenspannung und Kapillarität des Papiervlieses und trägt zur Hydrophobierung des Papiers bei. Dadurch ist das Papier weniger gut benetzbar, nimmt Wasser langsamer auf und bleibt länger dimensionsstabil.⁸¹

Auch Oberflächenveredelungen wie Kalandrieren und Satinieren oder ein Oberflächenstrich tragen durch die Verdichtung des Papiervlieses beziehungsweise das Verschließen der Poren dazu bei, dass sich die Benetzbarkeit und Wasseraufnahmefähigkeit verringert. Bei Befeuchtungs- und Trocknungsvorgängen besitzen auch diese Papiere eine erhöhte Dimensionsstabilität.⁸²

4.5 Materialextreme Faktoren, die das Wasseraufnahme- und Quellverhalten von Papier beeinflussen

Als materialextreme Faktoren werden im Folgenden alle äußeren, im Zusammenhang mit der restauratorischen Nassbehandlung stehenden Parameter zusammengefasst, die das Wasseraufnahme- und Quellverhalten von Papier beeinflussen.

4.5.1 Menge des Wassereintrags und Dauer der Wässerung

Je größer die Menge des Wassereintrags ist, desto mehr Wasser kann die Cellulosefaser theoretisch binden. Praktisch ist die Dauer der Wasseraufnahme jedoch durch die Wasseraufnahmekapazität der Faser begrenzt. Im Kontakt mit

⁷⁹ BELLE 2016, S. 19.

⁸⁰ BANIK et al. 2015, S. 156.

⁸¹ MENTJES 2006, S. 41.

⁸² Ebd., S. 41 f.

flüssigem Wasser quellen die Fasern so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Wassergehalt in den Fasern und dem Wasser außerhalb der Fasern eingestellt hat.

4.5.2 Wässerungs- und Trocknungszyklen

Mehrere aufeinander folgende Sorptions- und Desorptionszyklen führen, wie bereits in Kapitel 4.4.7 beschrieben, zu einer irreversiblen Verhornung der Cellulosefasern. Insbesondere bei der Planung von restauratorischen Nassbehandlungen ist dies ein bedenkenswerter Aspekt, da die Befeuchtungs-, Wässerungs- und Trocknungsgeschichte eines Papiers einen erheblichen Einfluss auf sein aktuelles Verhalten gegenüber Wasser ausüben kann. Vor allem wiederholte Befeuchtung und / oder Wässerung und die jeweils anschließenden Trocknungen verstärken den Verhornungseffekt enorm. Bei der Trocknung ziehen sich die Poren in den Faserwänden durch den Wasserverlust zusammen. Dabei können kleine Poren kollabieren und sich vollständig schließen. Gleichzeitig kommt es zu einer Neuorientierung der Fibrillen. Durch die Bildung zusätzlicher Wasserstoffbrückenbindungen steigt der Kristallisationsgrad der Cellulose, was sich einerseits in einer Versteifung der Fasern und andererseits in einer Abnahme des Wasseraufnahme- und Quellvermögens zeigt. Besonders kritisch sind lokale Eingriffe, da sich in der Folge das Wasseraufnahmeverhalten des behandelten Bereichs vom unbehandelten Bereich deutlich unterscheidet und es zu unvorhersehbaren Spannungen im Papier kommen kann.⁸³ „Bei zyklischer Befeuchtung und Trocknung sind die größten Veränderungen in der Struktur der Cellulosefasern nach dem ersten Trocknungsvorgang zu beobachten.“⁸⁴

4.5.3 Wassertemperatur

Der Einfluss der Wassertemperatur auf die Wasseraufnahme zeigt sich erst bei Temperaturen, die für die Restaurierungspraxis schon zu extrem sind.

In einem Versuch mit einem Arches-Platine-Aquarellpapier untersuchten Daniels und Kosek das Wasseraufnahmevermögen bei konstanten Wässerungszeiten von 40 Minuten und Badtemperaturen von 25, 70 und 100 °C. Erst bei Tempera-

⁸³ BRÜCKLE, BANIK 2015 a, S. 351.

⁸⁴ MENTJES 2006, S. 26.

turen von über 70 °C nahm die Wasseraufnahme signifikant zu. Diese Beobachtung ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Gelatineleimung ab einer Wassertemperatur von über 70 °C gelöst wird und das Wasser dadurch leichter in das Papier eindringen kann. Nach 40-minütiger Wässerung im Bad mit einer Temperatur von 100 °C hatte das Papier 112,8 % (w/w) Wasser absorbiert und war auf den Boden der Wässerungswanne abgesunken.⁸⁵

4.5.4 pH-Wert und Salzgehalt des Wassers

Sowohl der pH-Wert als auch der Salzgehalt des Wassers beeinflussen das Ladungspotenzial und das Quellverhalten von Cellulosefasern.⁸⁶ Während ein alkalischer pH-Wert die Faserquellung und das Wasseraufnahmevermögen eher begünstigt⁸⁷, werden diese durch einen sauren pH-Wert eher gehemmt. Bei einem sauren pH-Wert ist die Faser geringer negativ geladen und das Wasser penetriert aufgrund des geringeren osmotischen Druckes nicht so stark in die Faser.⁸⁸ Auf im Wasser gelöste Salze reagieren die Mikro- und Makrofibrillen ähnlich wie Polyelektrolyte. „Bei geringer Leitfähigkeit strecken sich Feinstoffe und Fibrillen in das sie umgebende Wasser. Hohe Leitfähigkeit führt hingegen zu einem Verknäulen beziehungsweise einem Anlegen der Fibrille an die Faser.“⁸⁹ Generell führt ein höherer Salzgehalt im Wasser zu einer Verringerung der Faserquellung. Die einzige Ausnahme bildet dabei das Na⁺-Ion, welches bei einer geringen Konzentration zunächst die Quellung durch den Osmoseeffekt begünstigt, jedoch bei hoher Konzentration die Quellung nahezu vollständig verhindert.⁹⁰

4.5.5 Anwendung von Bleichmedien

Das Bleichen im Sinne einer restauratorischen Behandlung ist ein invasiver Eingriff, der in erster Linie dazu dient, Flecken oder großflächige Verfärbungen zu entfernen oder zumindest zu reduzieren, um den ästhetischen Gesamteindruck eines Objektes positiv hervorzubringen. Das Bleichen zielt nicht darauf ab, die physikalische oder chemische Stabilität eines Objektes zu verbessern.⁹¹ Zum Bleichen werden sowohl oxidierende als auch reduzierende Chemikalien meist in

⁸⁵ DANIELS 2015, S. 377.

⁸⁶ BELLE 2016, S. 13.

⁸⁷ BRÜCKLE, BANIK 2015 a, S. 351.

⁸⁸ HARTMANN 2016, S. 39.

⁸⁹ BELLE 2016, S. 13.

⁹⁰ Ebd., S. 90 f.

⁹¹ HENNIGES, POTTHAST 2009, S. 294.

wässriger Form verwendet. Hinsichtlich der Dimensionsstabilität sind daher alle Faktoren relevant, die auch bei der Nassbehandlung mit Wasser zum Tragen kommen. Insbesondere der pH-Wert spielt eine wesentliche Rolle, da einige Bleichmedien bei pH-Werten zwischen 9 und 10 angewendet werden müssen, um eine optimale Bleichwirkung zu erreichen. Da das Bleichen die Struktur des Cellulosemoleküls verändert, sind auch Folgephänomene wie beispielsweise die Materialalterung zu betrachten. Bleichmedien haben die Fähigkeit, die Menge an Carbonylgruppen zu erhöhen beziehungsweise zu verringern. Ein geringerer Anteil an Carbonylgruppen bedeutet dabei eine bessere Alterungsbeständigkeit der Cellulose.⁹² Vor allem oxidative Bleichen neigen jedoch dazu, oxidative Schäden am Cellulosemolekül zu verursachen, was den Materialabbau beschleunigt.⁹³ Wie auch bei der Nassbehandlung mit Wasser erhöhen lokale Bleichbehandlungen das Risiko, dass behandelte und unbehandelte Bereiche in der Folge ein abweichendes Wasseraufnahmeverhalten aufweisen.

5 Eigene Versuchsreihen

Um Kriterien für eine Risikoeinschätzung hinsichtlich der Auswirkungen wässriger Behandlungen auf die Dimensionen geprägter Papierreliefs erarbeiten sowie ein individuelles Behandlungskonzept für den Uecker-Prägedruck entwickeln zu können, sind die in der Literatur als relevant beschriebenen Faktoren im Rahmen eigener Versuchsreihen überprüft worden.

Dafür wurden charakteristische Papiere ausgewählt und mit einer Blindprägung versehen. Während ein Teil dieser Probekörper verschiedenen wässrigen Behandlungen unterzogen wurde, blieb ein anderer Teil unbehandelt. Anschließend wurden die Dimensionen der geprägten Reliefs aus beiden Gruppen vermessen und nach verschiedenen Kriterien miteinander verglichen.

5.1 Papierauswahl

Bei der Papierauswahl wurden einerseits Papiere berücksichtigt, die in der Praxis üblicherweise für Prägedrucke verwendet werden. Andererseits wurden die Faktoren Grammatik, Faserzusammensetzung und Leimung bedacht, die unter an-

⁹² HENNIGES, POTTHAST 2009, S. 301.

⁹³ Ebd., S. 318.

derem Einfluss auf das Quellverhalten von Cellulosefasern ausüben. Des Weiteren wurde die Oberflächentextur einbezogen, da auch sie das optische Erscheinungsbild nach einer wässrigen Behandlung beeinflusst. Idealerweise sollten Papiere gefunden werden, bei denen diese Eigenschaften bekannt sind. Ziel war es, Gruppen bilden zu können, bei denen sich jeweils genau eine dieser Eigenschaften unterscheidet, beispielsweise eine Gruppe von drei Papieren mit der gleichen Faserzusammensetzung, der gleichen Oberflächentextur und -leimung, aber drei verschiedenen Flächengewichten.

In der Praxis erwies es sich als eine große Herausforderung, unter den genannten Aspekten eine geeignete Papierauswahl zusammenzustellen. Grund dafür ist, dass der Werkstoff Papier aus vielen verschiedenen Komponenten besteht, die für eine große Vielfalt von Verwendungszwecken optimiert werden. Deshalb werden angebotene Papiere häufig sehr unterschiedlich und meist nur bezüglich ihrer Eignung für den beabsichtigten Verwendungszweck beschrieben. Zudem ist es auch sehr unterschiedlich, welche Spezifikationen überhaupt in der Produktbeschreibung genannt werden. Da die meisten Firmen, die Papierprodukte vertreiben, ihre Sortimente vorrangig nach dem jeweiligen Verwendungszweck für ihre potenziellen Kund*innen zusammenstellen, waren oft keine exakten Angaben zu den Parametern zu ermitteln oder die gewünschte Auswahl in den jeweiligen Sortimenten nicht zu beziehen.

In Annäherung an die oben beschriebene Idealsystematik wurden folgende Papiere für die Probekörper verwendet:

Produktname (Bezugsquelle) Grammatur	für die Arbeit verwendetes Kürzel	vom Hersteller angegebene Eigenschaften
Velin d' Arches (Fa. Römerturm) <ul style="list-style-type: none"> • 160 g/m² • 250 g/m² • 300 g/m² 	VDA 160 g/m ² VDA 250 g/m ² VDA 300 g/m ²	100 % Baumwolle / Hadern, auf dem Rundsieb geschöpft, feinkörnige Textur, säurefrei, neutralgeleimt, alkalisch gepuffert, alterungsbeständig nach ANSI Z 39.48-1992, DIN ISO 9706 und DIN 6738, ohne optischen Aufheller ⁹⁴

⁹⁴ RÖMERTURM a (28.12.2021), ARCHES PAPERS (28.12.2021).

Tactile Blanc (Fa. Gmund) <ul style="list-style-type: none"> • 170 g/m² • 250 g/m² • 300 g/m² 	TB 170 g/m ² TB 250 g/m ² TB 300 g/m ²	holzfrei, matte Oberfläche, frei von Schwermetallen gemäß EU-Verpackungsdirektive (94/62/EC), elementarchlorfrei gebleicht (ECF), alterungsbeständig nach DIN ISO 9706 und DIN 6738 ⁹⁵
Smooth Blanc (Fa. Gmund) <ul style="list-style-type: none"> • 170 g/m² • 250 g/m² • 300 g/m² 	SB 170 g/m ² SB 250 g/m ² SB 300 g/m ²	holzfrei, glatte Oberfläche, frei von Schwermetallen gemäß EU-Verpackungsdirektive (94/62/EC), elementarchlorfrei gebleicht (ECF), alterungsbeständig nach DIN ISO 9706 und DIN 6738 ⁹⁶
Artic Volume White (Fa. Römerturm) <ul style="list-style-type: none"> • 150 g/m² • 250 g/m² • 300 g/m² 	AVW 150 g/m ² AVW 250 g/m ² AVW 300 g/m ²	100 % chlorfrei gebleichter Zellstoff (ECF), vollgestrichen, matte Oberfläche, hohe Opazität und Steifigkeit ⁹⁷
Filterkarton (Fa. Römerturm) <ul style="list-style-type: none"> • 450 g/m² 	FK 450 g/m ²	45 % Baumwollfasern, säurefrei, ungeleimt, sehr saugfähig, ohne optische Aufheller ⁹⁸
Circle Offset Premium White (Fa. Igepa) <ul style="list-style-type: none"> • 160 g/m² • 300 g/m² 	COPW 160 g/m ² COPW 300 g/m ²	100 % Altpapier, matt oberflächengeleimt ⁹⁹

Tab. 1: Übersicht über die für die Probekörper verwendeten Papiere und deren Eigenschaften.

Da bei gealterten Materialien das Risiko besteht, dass sich Eigenschaften verändert haben könnten, wurden alle Versuche ausschließlich mit neuen Materialien durchgeführt. Bei der Interpretation der Ergebnisse können so Herstellerangaben zu den Materialeigenschaften miteinbezogen werden.

5.2 Prägung

Erste Vortests, die pandemiebedingt lediglich mit improvisierten Werkzeugen realisiert werden konnten, hatten gezeigt, dass mit diesen Mitteln gefertigte Probekörper eine große herstellungsbedingte Varianz aufweisen. Dadurch war eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse nicht möglich. Um den Prägeprozess re-

⁹⁵ Datenblatt Tactile Blanc (TB) s. Anlage 1.a.

⁹⁶ Datenblatt Smooth Blanc (SB) s. Anlage 1.b.

⁹⁷ RÖMERTURM b (28.12.2021), Datenblatt Artic Volume White (AVW) s. Anlage 1.c.

⁹⁸ RÖMERTURM c (28.12.2021), Datenblatt Filterkarton (FK) s. Anlage 1.d.

⁹⁹ IGEPA (28.12.2021), Datenblatt Circle Offset Premium White (COPW) s. Anlage 1.e.

produzierbarer zu gestalten, wurden die Prägungen der im Folgenden beschriebenen Probekörper mithilfe einer Hand betriebenen und beheizbaren Kniehebelpresse hergestellt (s. Abb. 1).



Abb. 1: Zur Herstellung der Blindprägung genutzte handbetriebene und beheizbare Kniehebelpresse.

In Analogie zu dem zu restaurierenden Prägedruck von Günther Uecker handelt es sich um Blindprägungen. Es wurde ein grafisches Linienmotiv gewählt, welches angeschnitten auf die lange Blattkante des Probekörpers gesetzt wurde. Mit dieser Platzierung sollte die Option offengehalten werden, einen bereits definierten Profilschnitt vergleichend untersuchen zu können.

Die Laufrichtung der Papiere, sofern diese eine besitzen, verläuft jeweils parallel zur kurzen Blattseite, um mögliche Dimensionsveränderungen in der Dehnrichtung entlang der langen Blattkante beobachten zu können (s. Abb. 2).

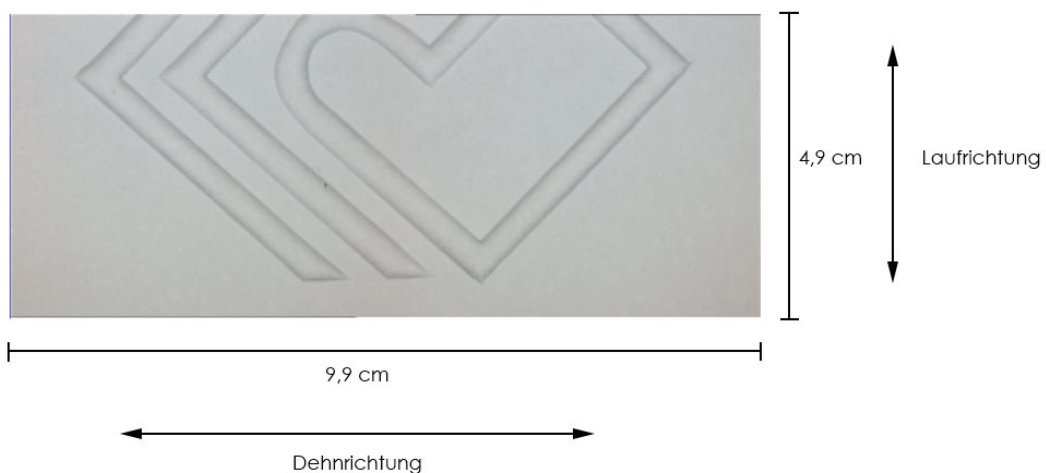


Abb. 2: Ansicht der Probekörpergeometrie sowie des Prägemotivs.

Zum Prägen wurde das Metallstück, in dem das Motiv vertieft war, an der oberen Pressplatte befestigt und das entsprechende Gegenstück aus Hartpappe mit dem erhabenen Motiv auf dem beweglichen Tischchen der Presse ausgerichtet. Mithilfe eines Anlagewinkels konnte das Motiv auf den zuvor zugeschnittenen Probekörpern jeweils an der gleichen Stelle positioniert werden. Die Prägetemperatur von 100-110 °C ermöglichte es, das Relief noch präziser abzubilden und das Papier noch nachhaltiger zu verformen. Lediglich der eingesetzte Druck war aufgrund des Handbetriebs nicht messbar. Da die Arbeit durch immer dieselbe Person ausgeführt wurde und die Apparatur nur eine begrenzte Varianz zuließ, kann von einem nahezu konstanten Druck bei allen Prägungen ausgegangen werden.

5.3 Behandlungen

Das Behandlungsschema für die Probekörper wurde so konzipiert, dass sowohl häufig in der Restaurierungspraxis angewendete und etablierte Verfahren als auch die für das Quell- und Schrumpfungsverhalten von Cellulosefasern relevanten und bereits in den Kapiteln 4.4 und 4.5 vorgestellten Parameter, Berücksichtigung fanden.

Wässrige Behandlungen dienen in der Papierrestaurierung in aller Regel der Reinigung eines Objektes, indem Schmutz sowie wasserlösliche Abbauprodukte aus dem Papier ausgeschwemmt werden.

Die wässrigen Behandlungen mit vollentsalztem Wasser (VE-H₂O) wurden mit drei unterschiedlichen Zeitdauern durchgeführt:

- 1 x 5 min VE-H₂O
- 1 x 20 min VE-H₂O
- 1 x 60 min VE-H₂O

Um den Einfluss der Verhornung auf das Quell- beziehungsweise Schrumpfungsverhalten der Cellulosefasern zu untersuchen, wurde ein zyklischer Wechsel zwischen Wässerung und Trocknung durchgeführt:

- 12 x 5 min VE-H₂O

Um den Einfluss des pH-Wertes auf das Quell- beziehungsweise Schrumpfvverhalten der Cellulosefasern zu untersuchen, wurde der pH-Wert durch die Zugabe von Zusätzen erhöht beziehungsweise erniedrigt:

- 1 x 20 min H₂O pH 12 (eingestellt mit Ca(OH)₂) *
- 1 x 20 min H₂O pH 2 (eingestellt mit HCl) *

Bleichbehandlungen dienen in der Papierrestaurierung zur Entfernung oder Minimierung von Flecken und Verfärbungen. Je nach Objekt eignen sich oxidierende beziehungsweise reduzierende Bleichmedien. Diese wurden in zwei verschiedenen Konzentrationen angewendet:

oxidierende Bleichmedien

- 1 x 5 min H₂O₂ 0,5 %, pH 9 (eingestellt mit Ca(OH)₂) *
- 1 x 5 min H₂O₂ 3 %, pH 9 (eingestellt mit Ca(OH)₂) *
- 1 x 5 min KMnO₄ 0,5 % (+ Reduktionsbad mit Na₂S₂O₅ 2 %) *
- 1 x 5 min KMnO₄ 3 % (+ Reduktionsbad mit Na₂S₂O₅ 6 %) *

reduzierende Bleichmedien

- 1 x 5 min NaBH₄ 0,5 %, pH 9-10 (eingestellt mit C₆H₈O₇) *
- 1 x 5 min NaBH₄ 3 %, pH 9-10 (eingestellt mit C₆H₈O₇) *

Allen mit * gekennzeichneten Behandlungen folgte ein 5-minütiges Nachspül-Bad mit vollentsalztem Wasser. Die Wassertemperatur betrug bei allen Bädern circa 20 °C.

Alle Probekörper wurden nach der jeweiligen Behandlung auf einem Vlies in einem Gittertrockengestell bei durchschnittlich 20 °C und 30 % relativer Luftfeuchtigkeit offen trocknen gelassen. Um die Welligkeit der Papiere etwas zu reduzieren, wurden die Probekörper im trockenen Zustand für ein paar Tage mit Sandsäckchen leicht beschwert.

5.4 Versuchsstrategie

Pro Papiersorte und Grammaturn blieben je drei Probekörper als Referenz-Exemplare unbehandelt. Alle zuvor beschriebenen Behandlungen wurden zunächst mit jeweils einem Probekörper je Papiersorte und Grammaturn durchgeführt. Nach der Behandlung und vollständigen Trocknung wurden die Probekörper

per in einem ersten Schritt ohne optische Hilfsmittel, ausschließlich durch eine visuelle Begutachtung, beurteilt. Bedingt durch die offene Trocknung wiesen alle Papiere eine geringere bis stärkere Welligkeit auf. Allerdings zeigten einzelne Papiere auch deutlich augenfälligere Schadensbilder wie Brüche in der Papieroberfläche oder partielle Schichtentrennungen mit Blasenbildung. Es handelt sich dabei um Schadensbilder, die bezogen auf ihre Lokalisation relativ willkürlich auftreten. Behandlungen wurden mit einem zweiten und dritten Probekörper wiederholt, wenn der aufgetretene Schaden außerhalb des zuvor festgelegten Messbereichs lag. Dies diente gleichzeitig auch der Überprüfung der Reproduzierbarkeit und damit der Absicherung des Ergebnisses.

In der folgenden Tabelle sind die Probekörper erfasst, die nach einer Behandlung eines oder mehrere der oben beschriebenen Schadensbilder aufwiesen.

1 x 5 min VE-H ₂ O	
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichttrennung / Blasenbildung
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichttrennung / Blasenbildung
COPW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
1 x 20 min VE-H ₂ O	
SB 250 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
1 x 60 min VE-H ₂ O	
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichttrennung / Blasenbildung
12 x 5 min VE-H ₂ O	
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichttrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs

AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
1 x 20 min H ₂ O pH 12	
TB 250 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
TB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
SB 250 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
SB 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
FK 450 g/m ²	oberflächliche Verhornungserscheinung
1 x 20 min H ₂ O pH 2	
AVW 250 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
AVW 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	
SB 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
COPW 300 g/m ²	minimale Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	
TB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
SB 250 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung
COPW 160 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
COPW 300 g/m ²	minimale Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs

1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
FK 450 g/m ²	aufgeraute Papieroberfläche
1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	
AVW 150 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung
AVW 300 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung
FK 450 g/m ²	aufgeraute Papieroberfläche
COPW 300 g/m ²	minimale Schichtentrennung / Blasenbildung
1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	
SB 300 g/m ²	minimale Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 150 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
COPW 300 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	
SB 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs
AVW 250 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs
AVW 300 g/m ²	Brüche in der Papieroberfläche im Bereich des Reliefs, Schichtentrennung / Blasenbildung
COPW 300 g/m ²	Schichtentrennung / Blasenbildung im Bereich des Reliefs

Tab. 2: Auflistung aller Probekörper, die nach den durchgeführten Behandlungen einen oder mehrere Schäden aufwiesen.

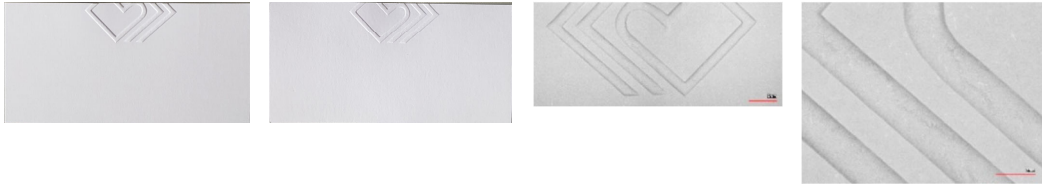
Papiere mit einer glatten Oberflächenstruktur (SB, AVW) und einem höheren Flächengewicht (250 g/m², 300 g/m²) wiesen vermehrt Schadensbilder auf. Eine glatte Oberfläche ist bei derartigen Behandlungen naturgemäß schwer zu erhal-

ten. Dickere Papiere haben generell eine höhere Neigung zur Delamination. Brüche in der Papieroberfläche traten hauptsächlich im Bereich des Reliefs auf, wo das Fasergefüge durch den Prägeprozess schon vorstrapaziert ist und unter mechanischer Spannung steht. Brüche in der Oberfläche weisen zudem auf einen Papierstrich hin, das heißt eine pigmentierte, meist Calciumcarbonat- oder Kaolin-haltige Schicht mit polymeren Bindemitteln aus Styrolbutadien- oder Styrolacrylat-Latex.¹⁰⁰ Blasenbildung und Schichtentrennung können darauf hindeuten, dass Luft aus dem Fasergefüge durch das eindringende Wasser verdrängt wurde und zu den oberen Schichten gewandert ist (s. Tab. 3).

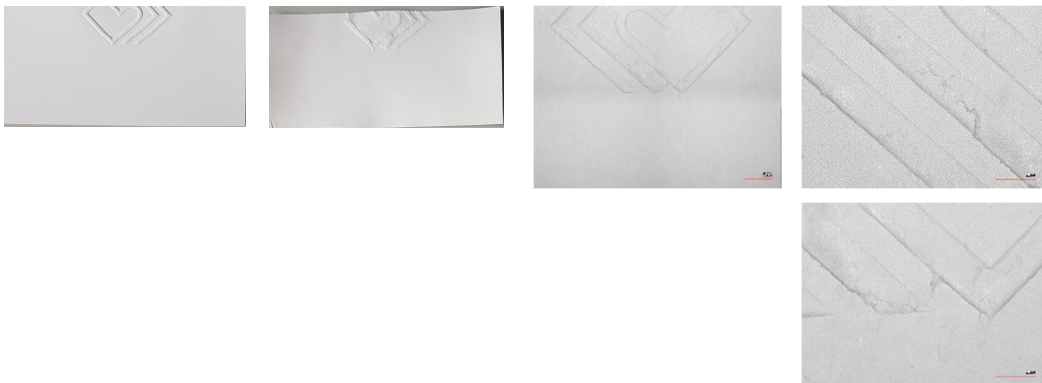
Unbehandelter Referenzprobekörper	Behandelter Probekörper	Nahaufnahme Maßstab 5 mm	Nahaufnahme Maßstab 2 mm
AVW 250 g/m ² / 12 x 5 min H ₂ O			
AVW 300 g/m ² / 12 x 5 min H ₂ O			
FK 450 g/m ² / 1 x 5 min KMnO ₄ 3 %			

¹⁰⁰ Freundliche mündliche Mitteilung von Dr. Sabine Genest (08.10.2021).

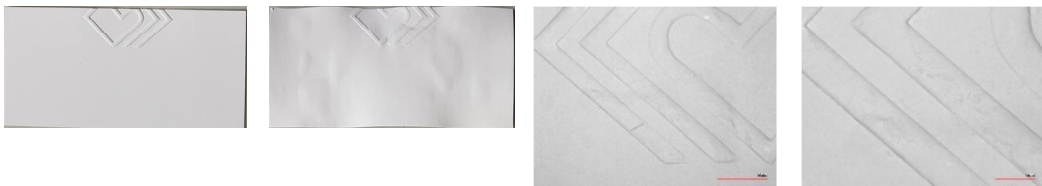
TB 300 g/m²/ 1 x 5 min KMnO₄ 3 %



AVW 250 g/m²/ 1 x 5 min NaBH₄ 0,5 %



AVW 300 g/m²/ 1 x 5 min NaBH₄ 0,5 %



Tab. 3: Exemplarische Fotodokumentation verschiedener Schadensbilder. Fotos: Dr. Sabine Genest (PTS).

5.5 Messmethode / Messgerät

Die Hauptanforderung an die Messmethode bestand darin, eine Erfassung aller Dimensionen des geprägten Reliefs, sprich Länge, Breite und Höhe zu ermöglichen. Dabei sollte die Methode so anwendbar sein, dass die Probekörper bei der Erfassung nicht verformt werden, um Fehlinterpretationen durch Formveränderungen auszuschließen. Zudem sollte gewährleistet sein, dass jeweils die Abbildungen beziehungsweise Messungen vor und nach der wässrigen Behandlung miteinander vergleichbar sind.

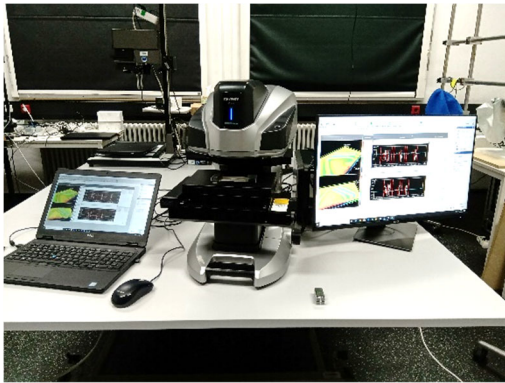


Abb. 3: 3D-Profilometer - erste Erprobung in der TH Köln.

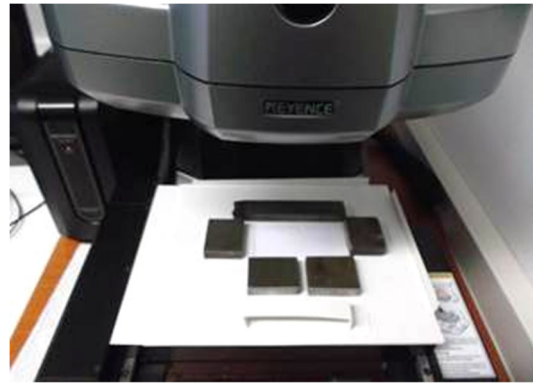


Abb. 4: Papierschablone als Anlagehilfe zur Platzierung und Ausrichtung der Probekörper. Foto: Mandy Mende (PTS).

Für die Erfassung und Vermessung der Probekörper wurde das 3D-Profilometer VR-3000/VR-3200 der Firma Keyence verwendet. Dieses Gerät ermöglicht mithilfe des sogenannten Lichtschnittverfahrens, auch Streifenprojektion genannt, die kontaktlose Aufnahme und lückenlose Oberflächenmessung von dreidimensionalen Objekten. „Das vom Senderobjektiv ausgegebene Lichtstreifenmuster wird von der Oberfläche des Messobjekts reflektiert. Das reflektierte Licht fällt auf das Empfängerobjektiv, wo die Erhebungen und Vertiefungen zu entsprechenden Verschiebungen der Lichtstreifen führen. Mithilfe der Triangulation kann anhand dieser Verschiebungen die Höhe des Messobjekts ermittelt werden“.¹⁰¹ Das Gerät ist damit in der Lage, Höhenunterschiede von 1 μm über einen 200 mm großen Bereich zu erfassen. Mittels der Gerätesoftware können aus den Messwerten der Gesamtform, bestehend aus einer Vielzahl an Höhenprofilen anschließend Durchschnittswerte berechnet werden. Das Messverfahren ist unabhängig von der mit dem Gerät arbeitenden Person und bietet eine hohe Reproduzierbarkeit, welche überprüft wurde.

Die bildliche Darstellung der Probenkörperoberfläche erfolgte mit der Betrachtungssoftware VR-H2VD bei 12-facher Vergrößerung (Low Mag Cam 12x). Es wurden immer zwei Aufnahmen derselben Messflächenbereiche gemacht, die anschließend mithilfe von Bild-Stitching zu einem Gesamtbild zusammengesetzt wurden. Die Probekörper wurden jeweils von der Oberseite aufgenommen, da sich hier das nach oben aus der Fläche hebende Relief am kontrastreichsten abzeichnete und die Vorderseite in aller Regel auch die primäre Betrachtungsseite

¹⁰¹ KEYENCE a, S. 14.

ist. Die Aufnahme der Rückseiten wurde ebenfalls erwogen, allerdings aufgrund des geringen Kontrasts und einer folgend uneindeutigen Abbildung verworfen.

5.6 Vorgehen bei der Vermessung

Die eigentliche Vermessung der Probekörper erfolgte in einem zweiten Schritt mithilfe der Analysesoftware VR-H2AD, welche verschiedene Möglichkeiten der Bildverarbeitung sowie verschiedene mathematische Analysefunktionen bietet. In Vorbereitung der Analyse stehen verschiedene Optionen der Bildverarbeitung zur Verfügung, um die Rohdaten für diese zu optimieren.

Um kleine Strukturen auf einer welligen oder stark gekrümmten Oberfläche zu beobachten, ist es sinnvoll, die Oberflächenform zu korrigieren.¹⁰² Mithilfe des Optionsfelds „Entfernen der Welle“ kann eine komplexe Welligkeit in der Oberfläche entfernt und zu einer horizontalen Ebene korrigiert werden, indem ein Bandpass-Filter auf die Höhendaten in diesem Bereich gesetzt wird.¹⁰³ Dieses Werkzeug wurde auf alle Probekörper in gleicher Weise angewendet.

Mit dem Ziel, die Dimensionsveränderungen im Relief sicht- und messbar zu machen, wurde mithilfe eines Lots ein definierter Schnitt durch das geprägte Motiv festgelegt. Um den Einfluss materialbedingter Abweichungen zu reduzieren, wurde die Profillinie aus einem Durchschnitt von 50 Höhenlinien im kleinstmöglichen Abstand von 0,024 mm gebildet. Der Messbereich besitzt damit insgesamt eine Breite von 1,2 mm (s. Abb. 5).



Abb. 5: Exemplarische Ansicht des Probekörpers VDA 160 g/m² Ref1. Rot abgebildet ist die Hilfslinie auf die das hellblau abgebildete Lot gefällt wurde. Die berechnete Profillinie ergibt sich aus einem Durchschnitt von 50 nebeneinander liegenden Linien.

¹⁰² KEYENCE b, Abschnitt 5-12.

¹⁰³ KEYENCE b, Abschnitt 5-13 und 5-17.

Zur Beschreibung des Profils wurden die in der Abb. 6 markierten Punkte festgelegt. Dabei beschreiben die Punkt-zu-Punkt-Abstände *vert1* bis *vert4* jeweils die Höhen des geprägten Reliefs, während die Punkt-zu-Punkt-Abstände *horiz1* bis *horiz4* die Breiten der geprägten Streifen beziehungsweise *horiz5* bis *horiz7* jeweils die dazwischen liegenden Bereiche beschreiben.

Im Folgenden werden diese Punkt-zu-Punkt-Abstände zusammenfassend als Messwerte bezeichnet.

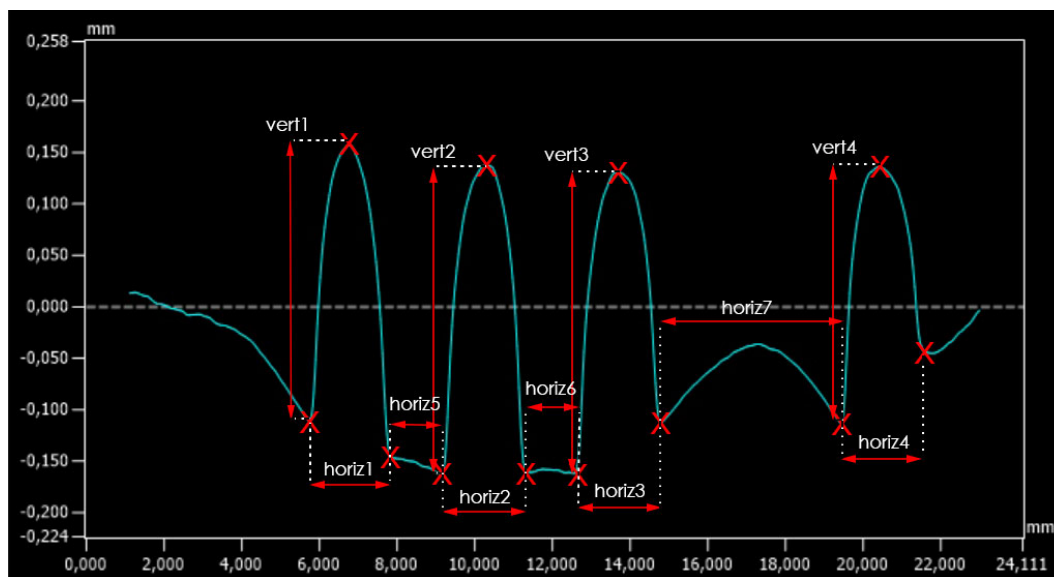


Abb. 6: Exemplarische Ansicht des Probekörpers VDA 160 g/m² Ref1. Blau abgebildet ist die aus den 50 Höhenlinien berechnete durchschnittliche Höhenlinie; rot abgebildet sind die Punkt-zu-Punkt-Abstände, die zur Beschreibung der Höhenlinie festgelegt wurden.

Legende:

vert1 bis *vert4* \triangleq Reliefhöhe, *horiz1* bis *horiz4* \triangleq Reliefbreite, *horiz5* bis *horiz7* \triangleq Reliefzwischenräume

Der Vergleich der Messungen untereinander erfolgte auf Grundlage dieser markanten Punkte und den sich daraus ergebenden Messwerten durch Abstandsmessungen vor und nach den Probekörperbehandlungen. Da die einzelnen Papiere sehr unterschiedlich wellig waren, wurde darauf verzichtet, die Messungen auf eine Referenzebene zu beziehen.

Trotz der verwendeten Anlagenhilfe und definierten Lage der Probekörper war es nicht möglich, ein Analyse-Template für die Datenauswertung zu nutzen, da die einzelnen Probekörper zu stark intrinsisch variierten. Bei einer ersten Erprobung eines Analyse-Templates mit hinterlegtem Koordinatensystem fiel auf, dass die Profile der Reliefs sowie die gesetzten Messpunkte trotz desselben Motivs an denselben Stellen bei den einzelnen Probekörpern nicht exakt übereinstimmten. Die festgelegten Punkte mussten daher für jeden Probekörper einzeln digital per

Hand markiert werden. Somit kann die Streuung der Prüfergebnisse neben der ohnehin vorhandenen intrinsischen Materialinhomogenität auch durch leichte Abweichungen beim Markieren der Punkte bedingt sein. Es muss also von einer Materialstreuung, die sich sowohl auf die Qualität des Papiers als auch auf die der Prägung bezieht sowie von einer Messwertstreuung ausgegangen werden. Um die Dimension dieser Varianzen besser einschätzen und später bei der Auswertung eindeutig als Streuung erkennen zu können, wurden die Messungen für jeden Papiertyp zunächst mit drei unbehandelten Referenz-Probekörpern vorgenommen. Mit dem Wissen um die Größe der Abweichung der drei Referenzprobekörper untereinander war es möglich, diese Abweichungen von den behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen eindeutig abzugrenzen.

Bei Versuchswiederholungen mit mehreren behandelten Probekörpern wurde immer der am meisten geschädigte Probekörper mit dem 3D-Profilometer aufgenommen und vermessen, um realistische Aussagen für die Restaurierungspraxis machen zu können.

5.7 Vorgehen bei der Datenauswertung

Um die mit der Analysesoftware ermittelten Primärdaten auswerten und die Ergebnisse anschließend grafisch darstellen zu können, wurden die Primärdaten in die Tabellenkalkulationssoftware MS Excel exportiert. Ziel der Datenauswertung war es, die behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen (Veränderungen der Profilhöhe, Profilbreite und Abstände zwischen den Profilabschnitten s. Abb. 6 zu ermitteln. Um behandlungsbedingte Dimensionsveränderungen eindeutig von Abweichungen abzugrenzen, die der Materialinhomogenität der Versuchspapiere sowie geringfügigen Unterschieden beim Markieren der Messpunkte geschuldet sind, wurde zunächst jeweils für die Messwerte der drei unbehandelten Referenz-Probekörper der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung als mittlere Abweichung vom arithmetischen Mittel berechnet. Die behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen können somit als mathematischer Differenzbetrag zwischen dem jeweiligen Messwert des behandelten Probekörpers und dem Basiswert, also dem aus den Messwerten der unbehandelten Referenz-Probekörpern gebildeten Mittelwert berechnet werden.

Berechnung der Dimensionsveränderung des Reliefs:

Dimensionsveränderung des Reliefs = Messwert behandelte Probekörper –
((Messwert Ref1 + Messwert Ref2 + Messwert Ref3) / 3)

Die Ergebnisse wurden für jede Papiersorte und Grammaturn, aufgegliedert nach den verschiedenen Behandlungen, in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

Um erkennbare Tendenzen noch deutlicher herauszustellen, wurden in zwei weiteren Auswertungen die berechneten Dimensionsveränderungen der Höhen- beziehungsweise Flächenmesswerte einer Probe durch das Bilden des arithmetischen Mittelwertes zu einem Wert zusammengefasst. Da bei den horizontalen Messwerten sowohl positive Werte (Materialdehnung) als auch negative Werte (Materialschrumpfung) auftraten, wurden für die Berechnung dieses arithmetischen Mittelwertes die mathematischen Beträge der Einzelwerte verwendet, so dass dieser letztendlich das absolute Ausmaß der Veränderung abbildet. Es wurde zum einen der Vergleich der verschiedenen Grammaturn innerhalb einer Papiersorte und zum anderen der Vergleich ähnlicher Grammaturn unterschiedlicher Papiersorten angestellt und in den Zusammenhang mit den unterschiedlichen Behandlungsmethoden gebracht. Beide Vergleiche wurden grafisch ebenfalls in Form eines Balkendiagramms veranschaulicht.

Um eine optische Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wurde die Skaleneinteilung aller Diagramme einheitlich gewählt. Dafür wurden bei den horizontalen Messwerten teilweise geringe Balkenhöhen in Kauf genommen.

5.8 Ergebnisse der Datenauswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller durchgeführten Versuche an den in Tab. 1 näher charakterisierten Papieren beschrieben.

5.8.1 Einfluss der verschiedenen Behandlungsverfahren auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs

In den folgenden Diagrammen (s. Diagramm 1 bis Diagramm 30) entspricht jeder farbige Balken einer Behandlungsmethode. Die Höhe der Balken zeigt die Größe der Dimensionsveränderung am jeweiligen Punkt-zu-Punkt-Abstand *vert1* bis *vert4* beziehungsweise *horiz1* bis *horiz7* an. Der jeweils rechts abgebildete Balken bildet die Standardabweichung der unbehandelten Referenz-Probekörper ab. Alle Angaben erfolgen in der Einheit Millimeter.

Alle Probekörper weisen bei allen Grammaturen und allen Behandlungsmethoden eine deutliche Abweichung sowohl der vertikalen als auch der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz auf. Das lässt darauf schließen, dass die wässrigen Behandlungen eindeutig zu Veränderungen der Dimensionen des geprägten Reliefs geführt haben. Diese sind bei den horizontalen Messwerten deutlich geringer als bei den vertikalen.

Papiersorte VDA

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

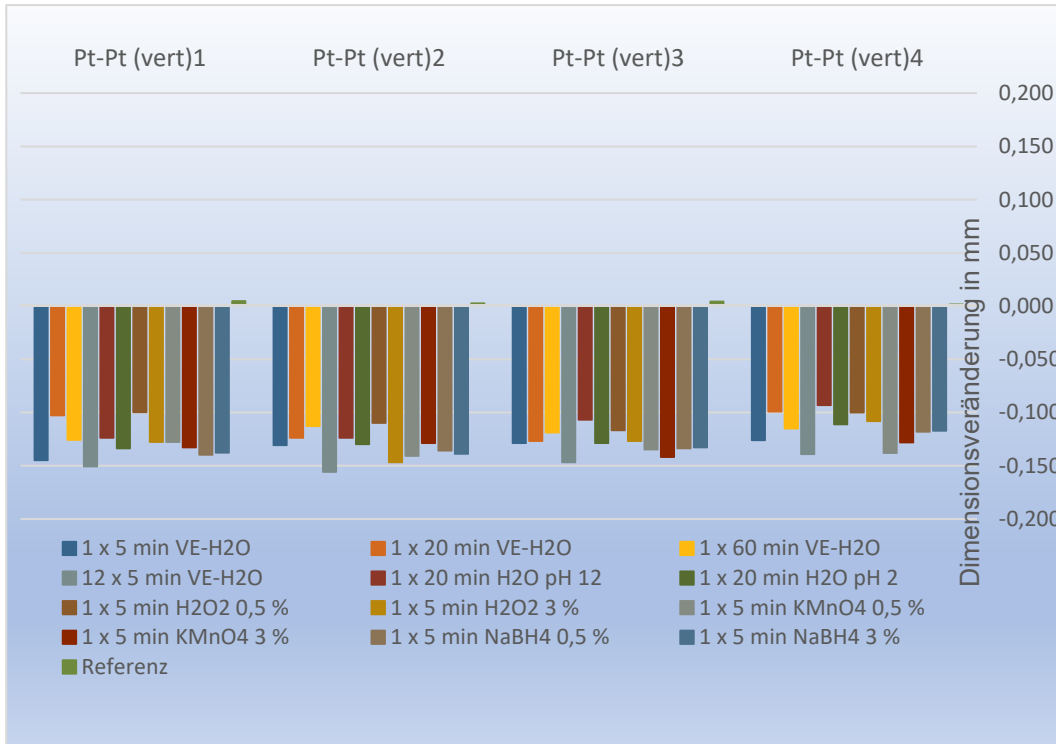


Diagramm 1: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 160 g/m².

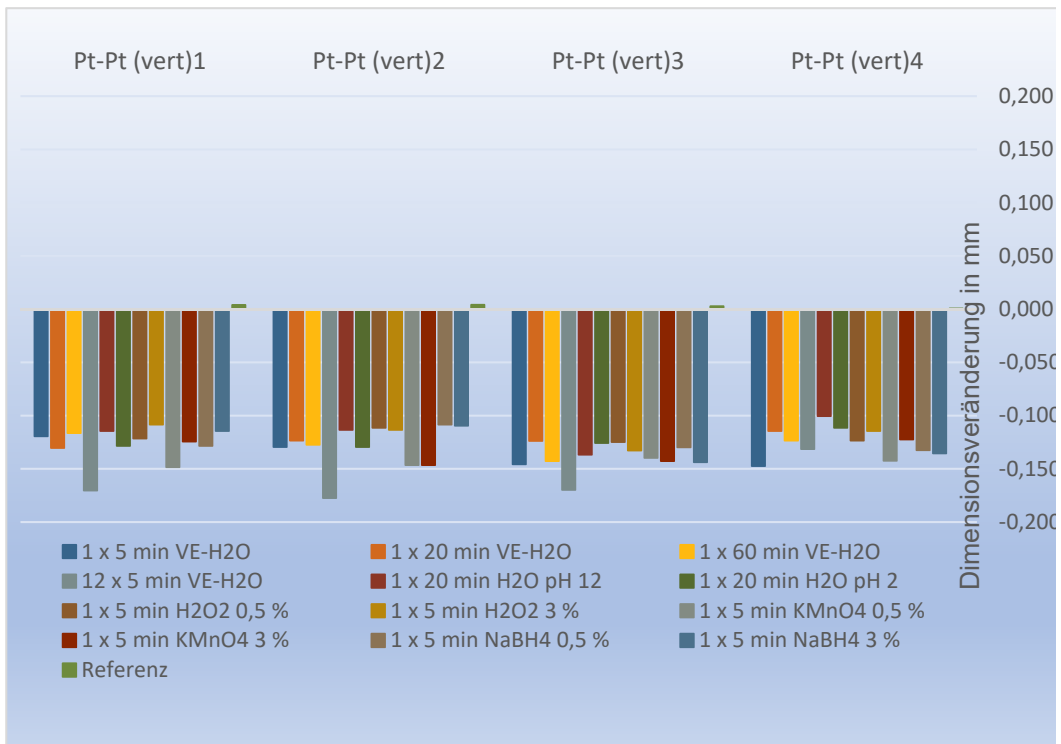


Diagramm 2: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 250 g/m².

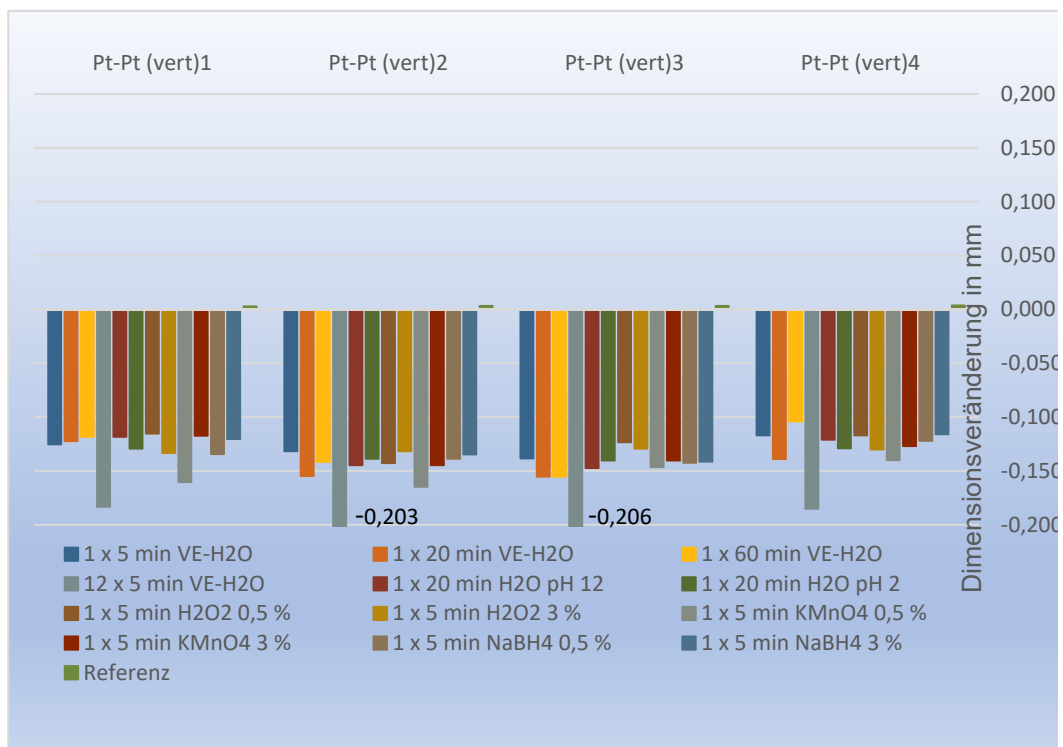


Diagramm 3: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 300 g/m².

Das Papier VDA 160 g/m² zeigt für alle Behandlungen eine signifikante Veränderung der vertikalen Messwerte. Die hervorgerufenen Veränderungen sind im Vergleich der Behandlungen untereinander relativ ähnlich und bewegen sich zwischen -0,1 und -0,15 mm. Es handelt sich demnach um eine Abflachung des Reliefs (s. Diagramm 1). Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Papieren VDA 250 g/m² und VDA 300 g/m², wobei bei diesen beiden die 12-mal 5-minütige Wässerung mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) sichtlich größere Veränderungen mit bis zu -0,2 mm (VDA 300 g/m² vert2 und vert3) hervorgerufen hat (s. Diagramm 2 und Diagramm 3). Mit einem Unterschied von durchschnittlich ≈0,06 mm sind diese bei dem Papier VDA 300 g/m² auch signifikant größer als die durch die 60-minütige Wässerung am Stück (1 x 60 min VE-H₂O) verursachten Veränderungen.

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

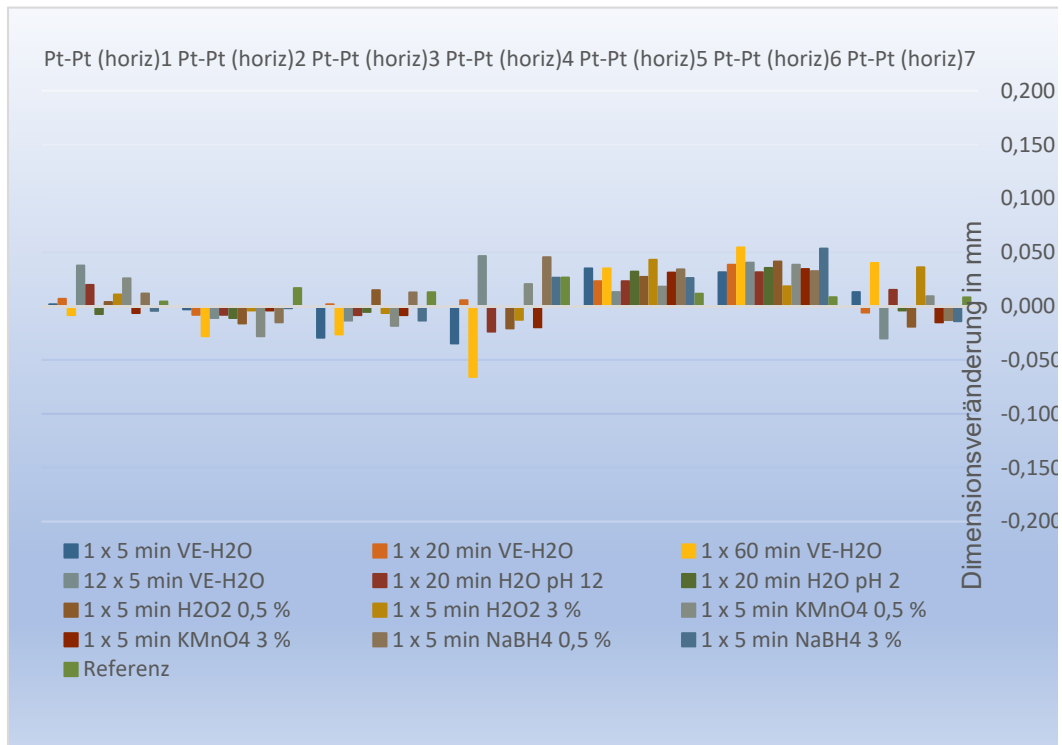


Diagramm 4: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 160 g/m².

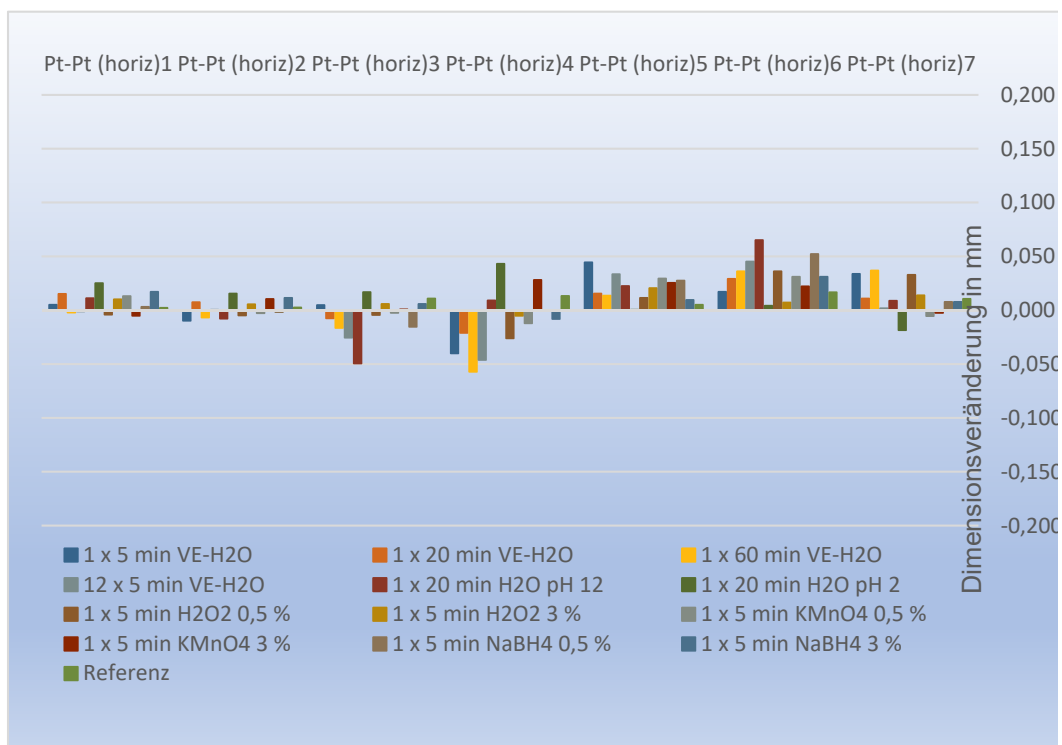


Diagramm 5: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 250 g/m².

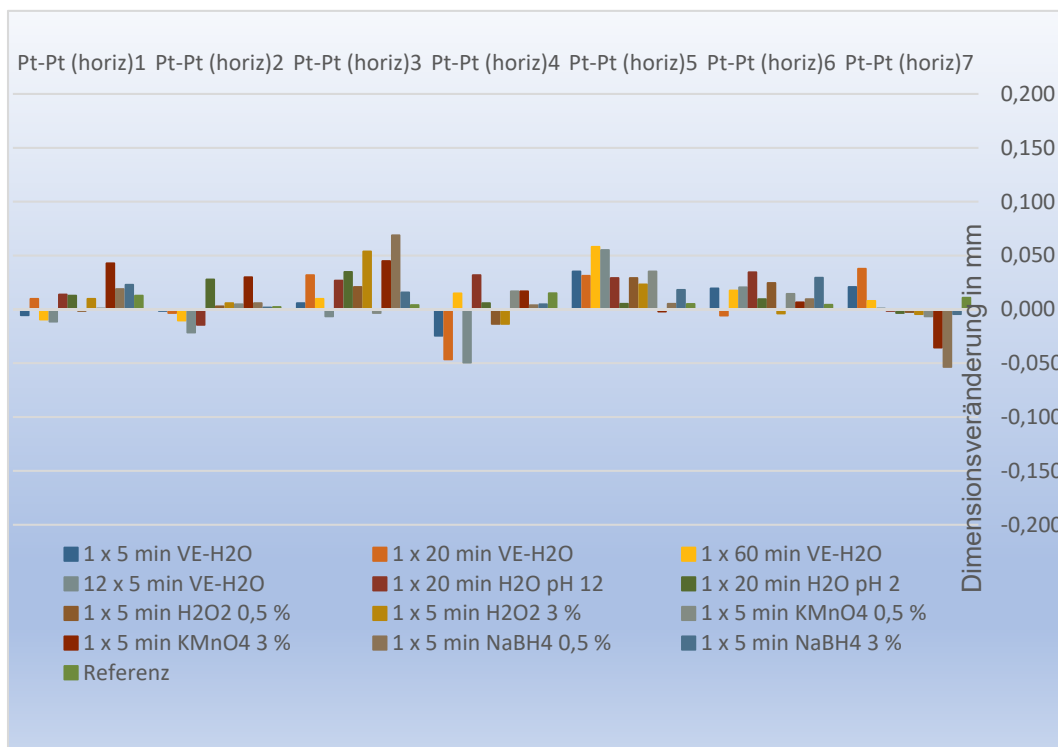


Diagramm 6: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte VDA 300 g/m².

Die horizontalen Dimensionsveränderungen liegen bei den Papieren VDA 160 g/m², VDA 250 g/m², VDA 300 g/m² in einem Bereich von minus beziehungsweise plus 0,05 mm. Es handelt sich demnach sowohl um Material-schrumpfungen als auch um Materialdehnungen. Es sind keine signifikanten Veränderungen, die bestimmten Behandlungen zuzuordnen sind, zu beobachten.

Papiersorte TB

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

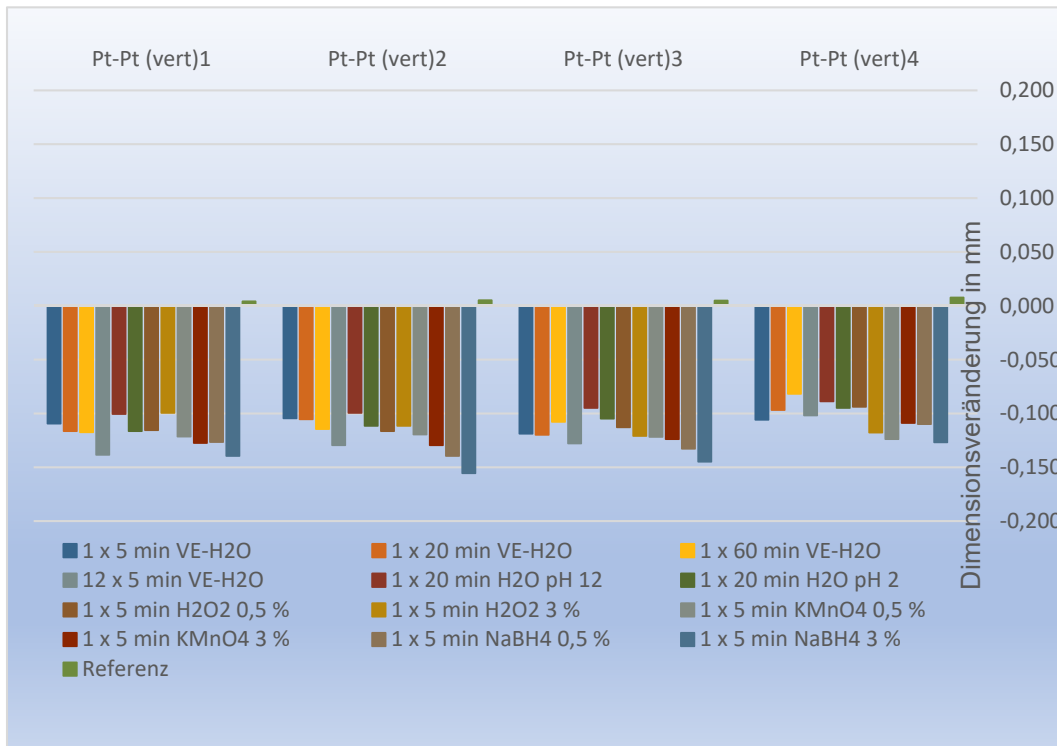


Diagramm 7: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 170 g/m².

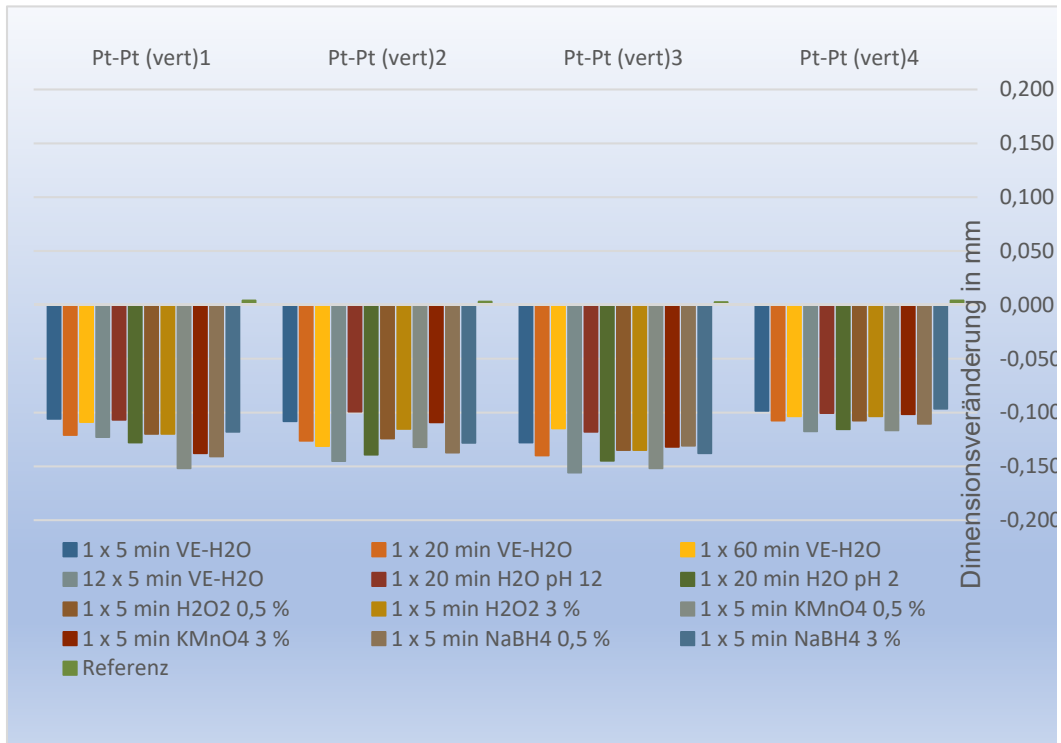


Diagramm 8: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 250 g/m².

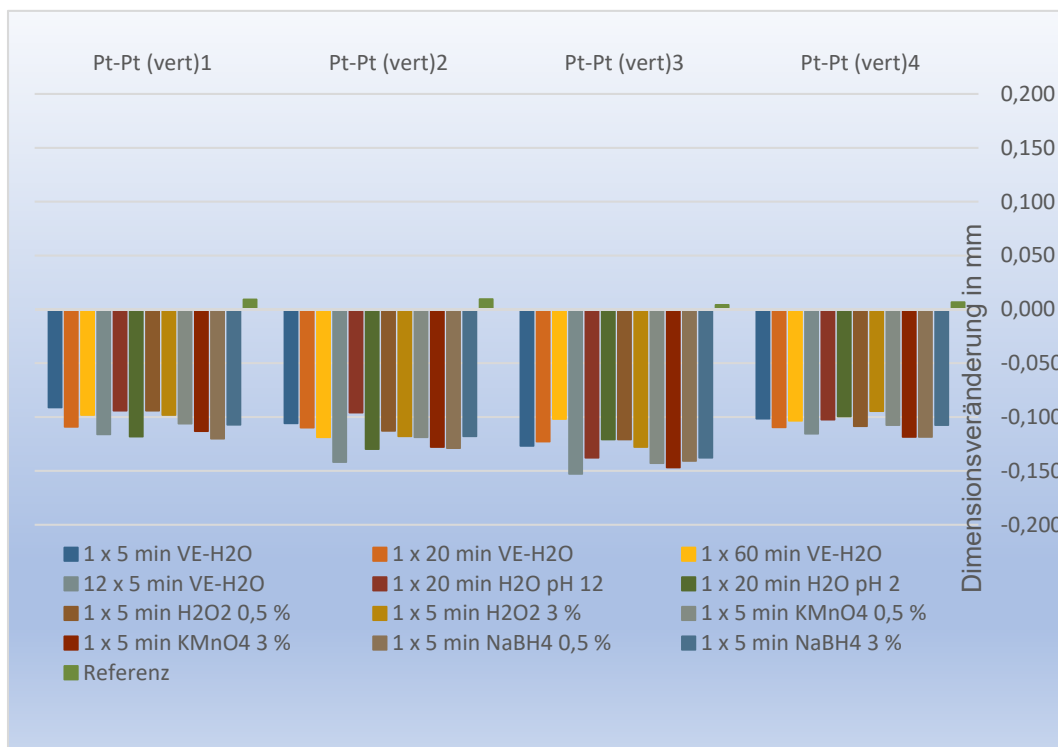


Diagramm 9: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 300 g/m².

Die durch die verschiedenen Behandlungen entstandenen vertikalen Dimensionsveränderungen sind untereinander sehr ähnlich und alle als Abflachung des geprägten Reliefs einzuordnen. Die Veränderungen bewegen sich alle etwa in einem Bereich von -0,1 bis -0,15 mm. Die größten Veränderungen zeigen sich bei dem Papier TB 170 g/m² bei dem Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) sowie bei den Bleichbehandlungen mit Kaliumpermanganat (1 x 5 min KMnO₄ 0,5 % und 3 %) und Natriumborhydrid (1 x 5 min NaBH₄ 0,5 % und 3 %) (s. Diagramm 7). Dieses Ergebnis zeigt sich etwas schwächer auch bei den Papieren TB 250 g/m² und TB 300 g/m² (s. Diagramm 8 und Diagramm 9).

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

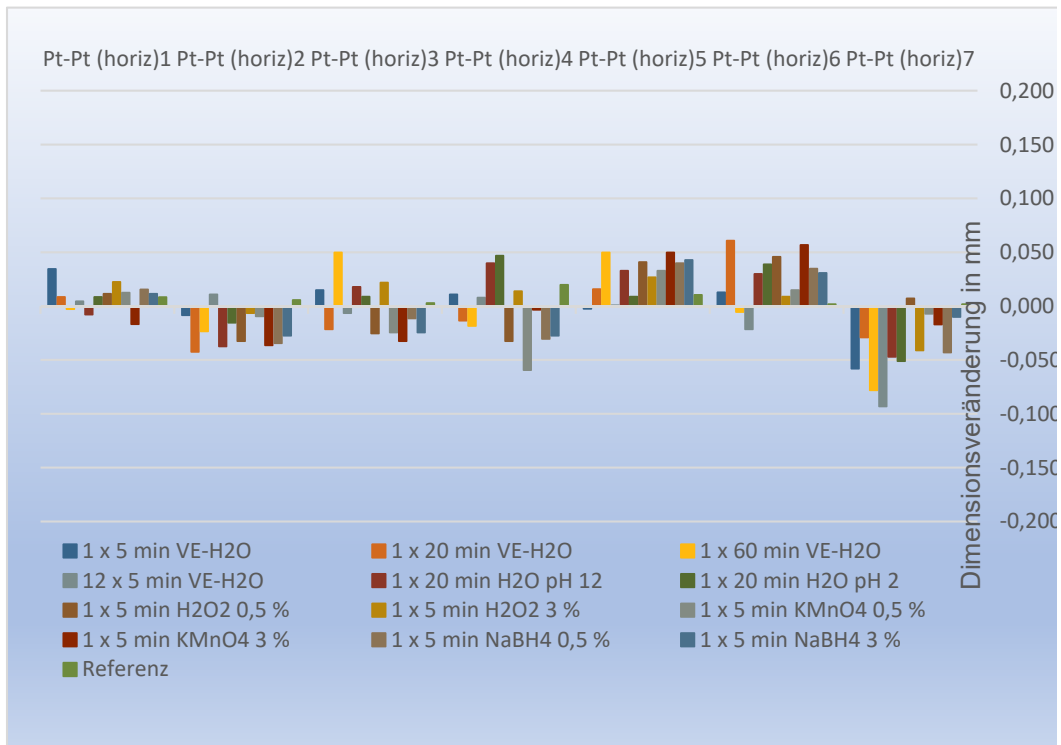


Diagramm 10: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 170 g/m².

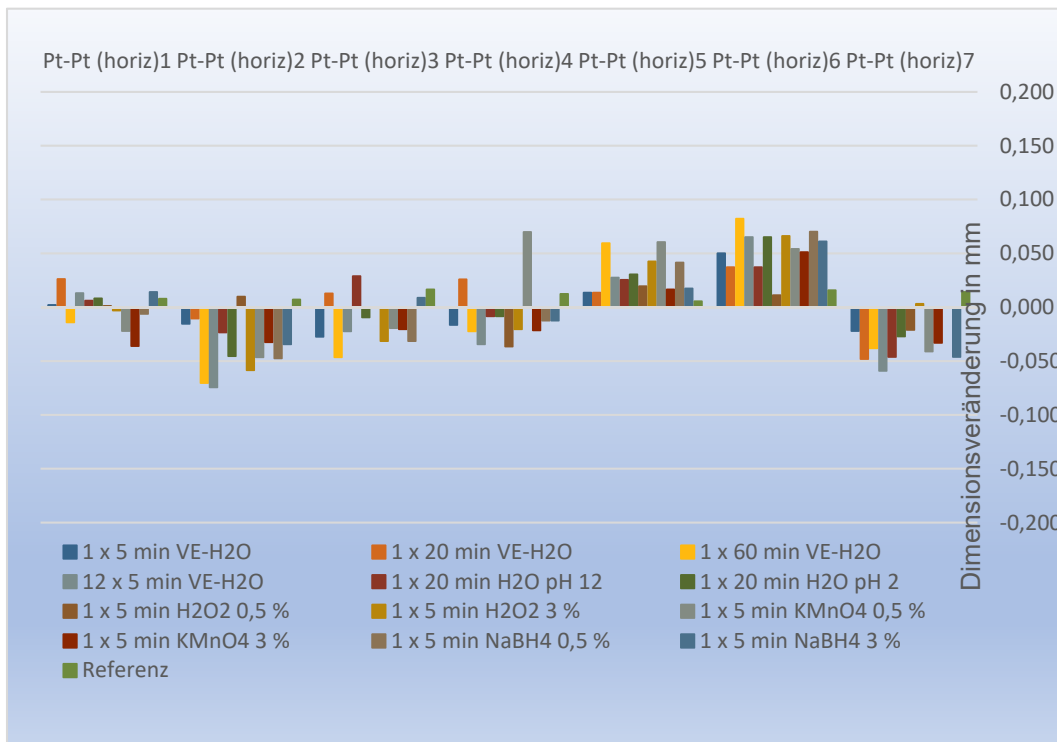


Diagramm 11: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 250 g/m².

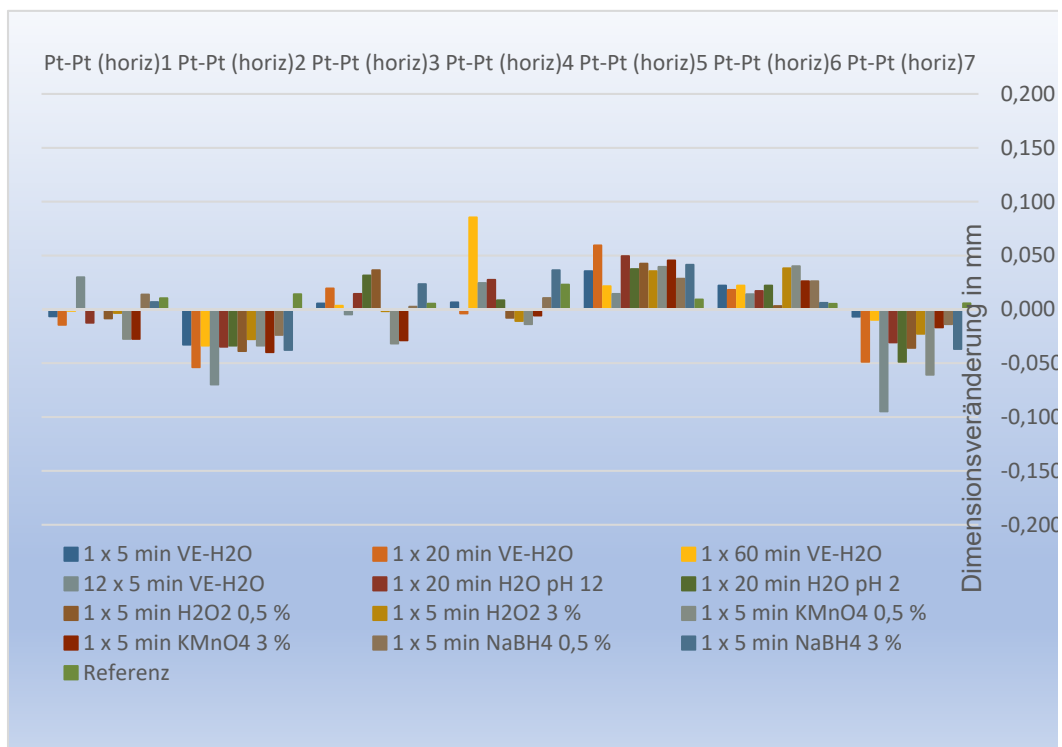


Diagramm 12: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte TB 300 g/m².

Die horizontalen Dimensionsveränderungen der Papiere TB 170 g/m², TB 250 g/m² und TB 300 g/m² sind als Stauchungen beziehungsweise Streckungen zu interpretieren und liegen in einem Bereich von minus beziehungsweise plus 0,1 mm. Keine der Behandlungen verursacht eine auffallend größere Veränderung im Vergleich zu den anderen Behandlungen.

Papiersorte SB

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

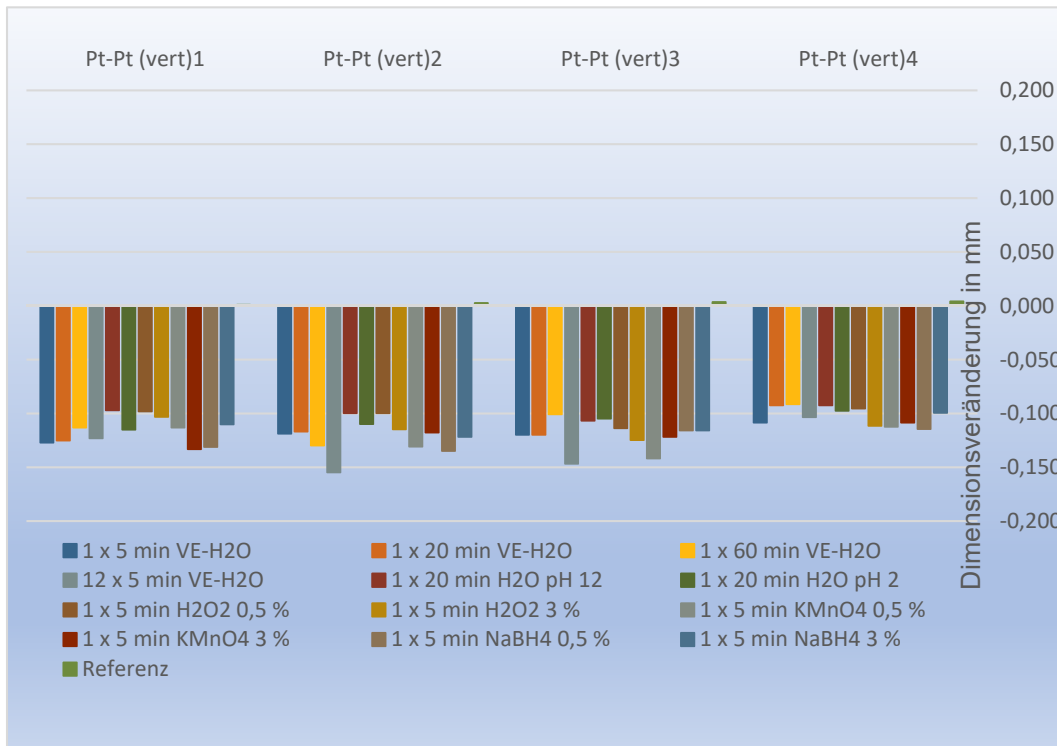


Diagramm 13: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 170 g/m².

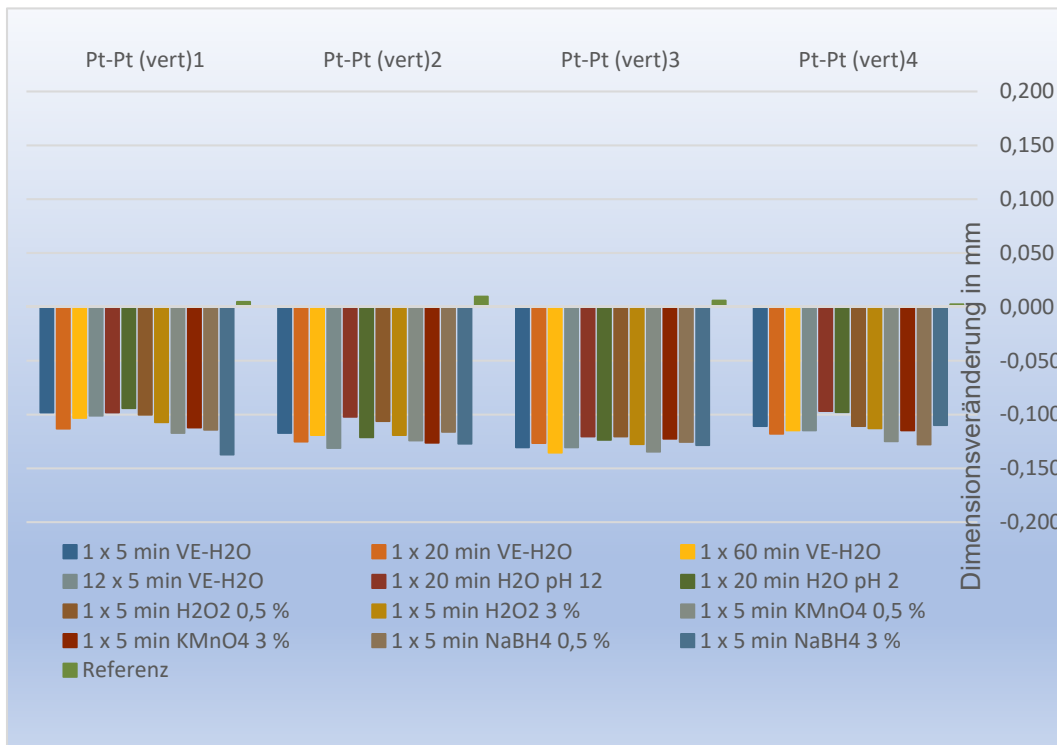


Diagramm 14: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 250 g/m².

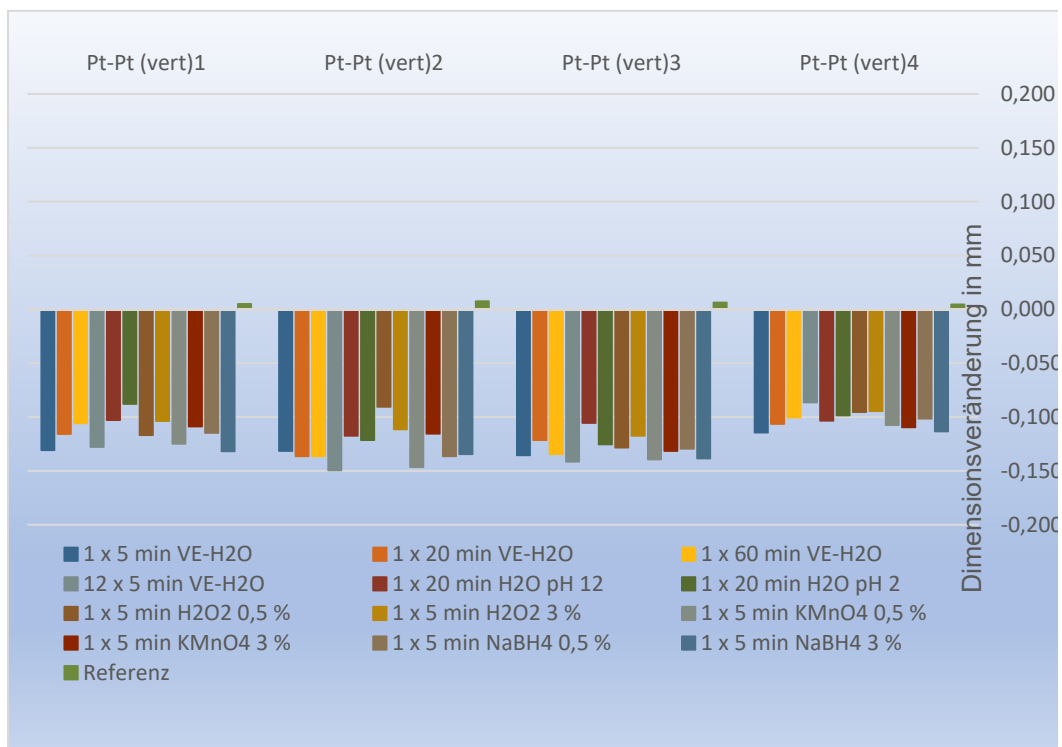


Diagramm 15: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 300 g/m².

Die vertikalen Dimensionsveränderungen der Papiere SB 170 g/m², SB 250 g/m² und SB 300 g/m² fallen sehr ähnlich aus und liegen überwiegend in einem Bereich von -0,1 bis -0,15 mm. Die größten Veränderungen werden durch den Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) verursacht.

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

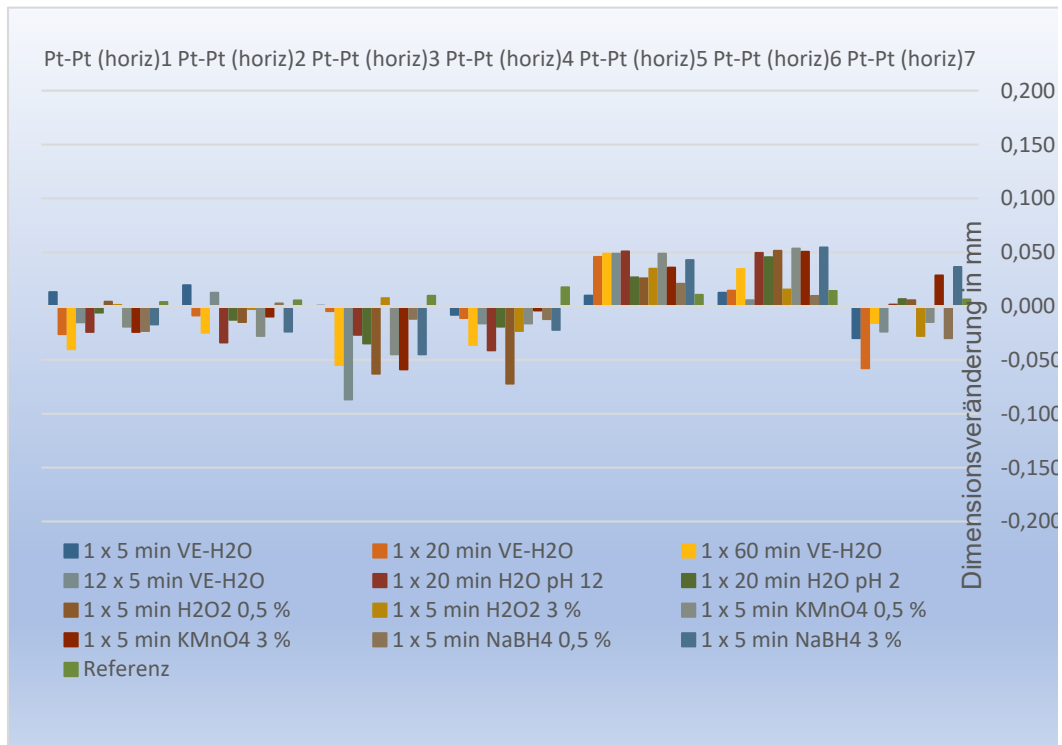


Diagramm 16: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 170 g/m².

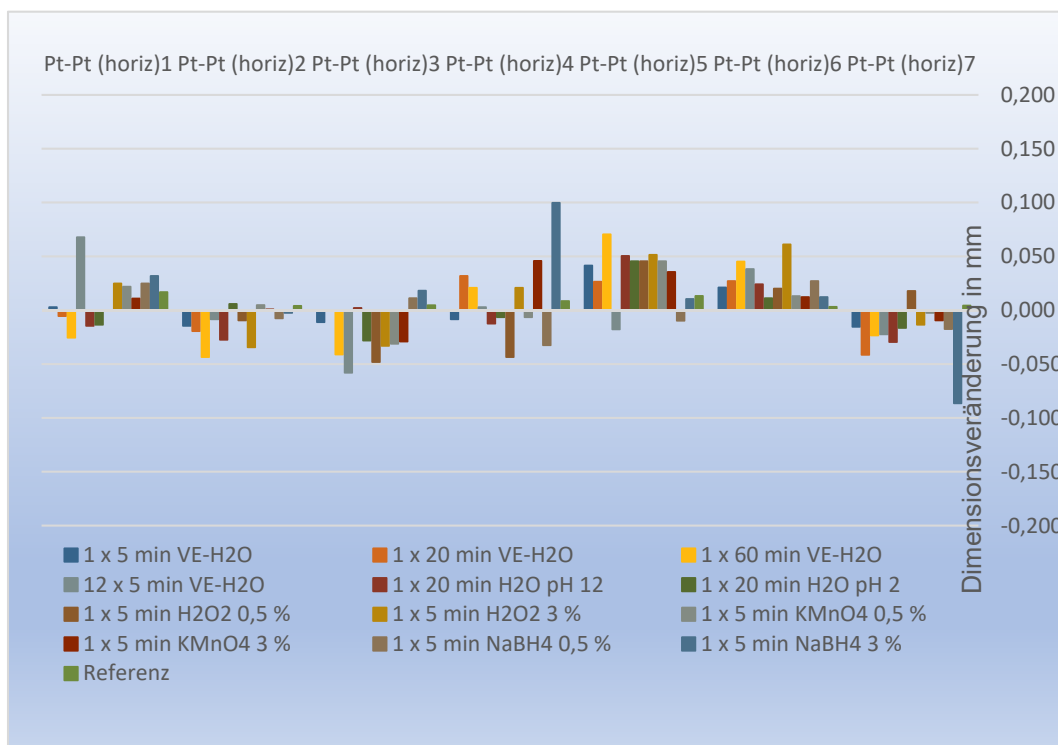


Diagramm 17: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 250 g/m².

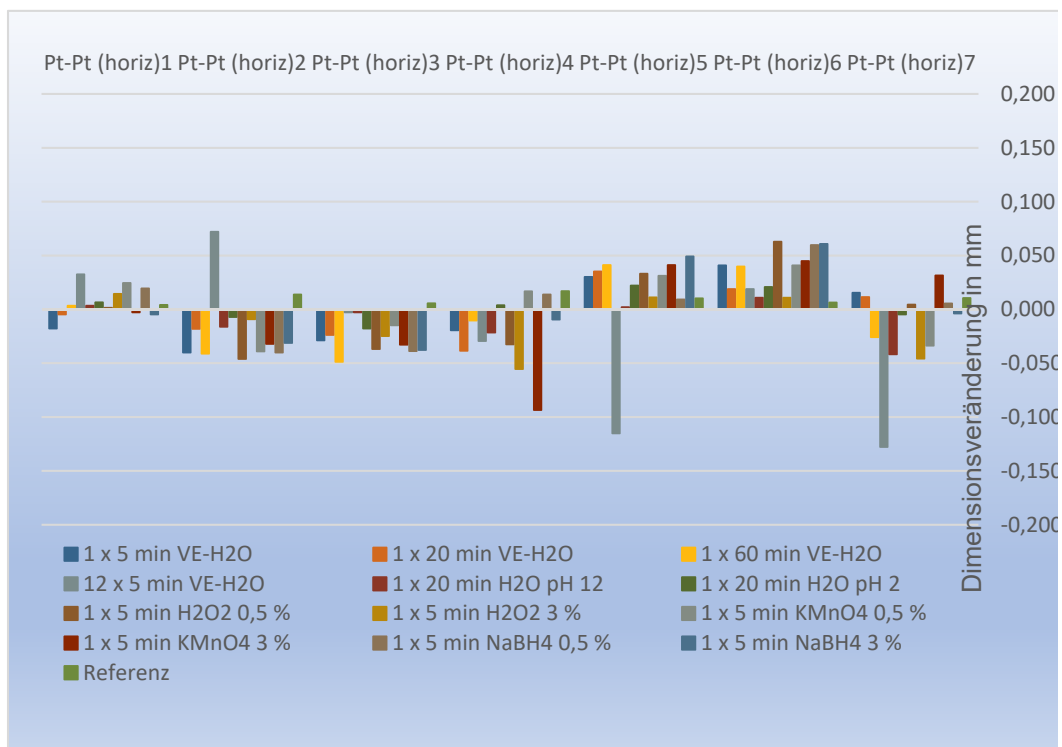


Diagramm 18: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte SB 300 g/m².

Die horizontalen Dimensionsveränderungen der Papiere SB 170 g/m², SB 250 g/m² und SB 300 g/m² liegen überwiegend bei minus beziehungsweise plus 0,05 mm. Bei dem Papier mit dem höchsten Flächengewicht (SB 300 g/m²) fallen vor allem die durch das zyklische Wässern und Trocknen (12 x 5 min VE-H₂O) verursachten Veränderungen bei den Punkt-zu-Punkt-Abständen *horiz2*, *horiz5* und *horiz7* auf (s. Diagramm 18).

Papiersorte AVW

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

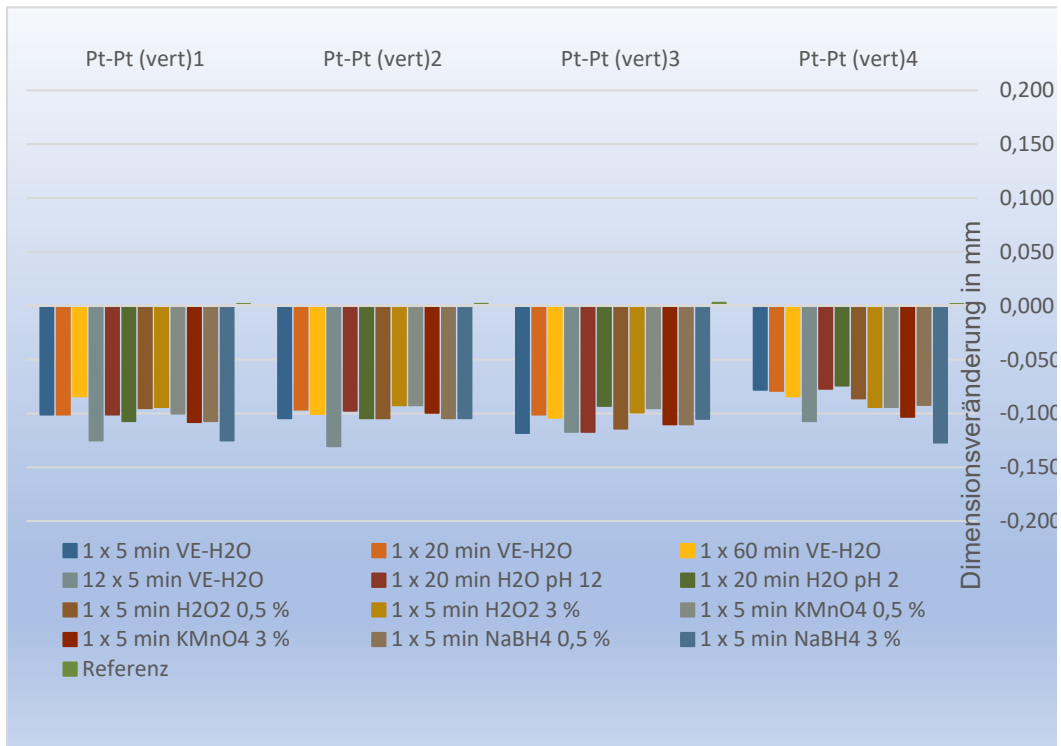


Diagramm 19: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 150 g/m².

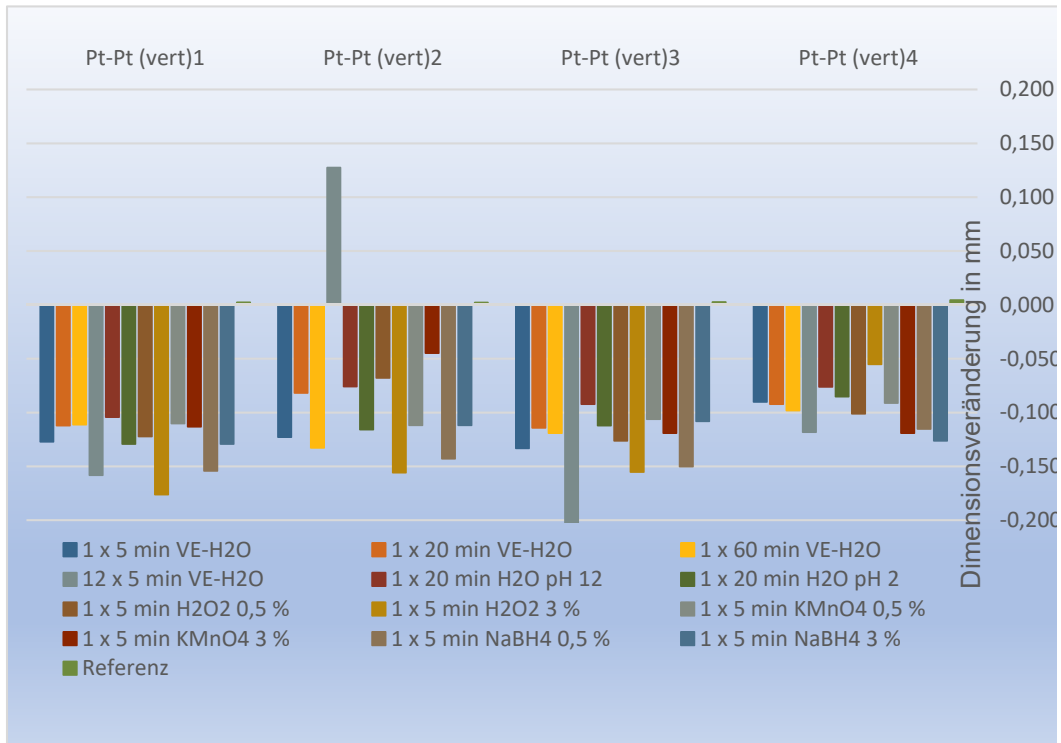


Diagramm 20: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 250 g/m².

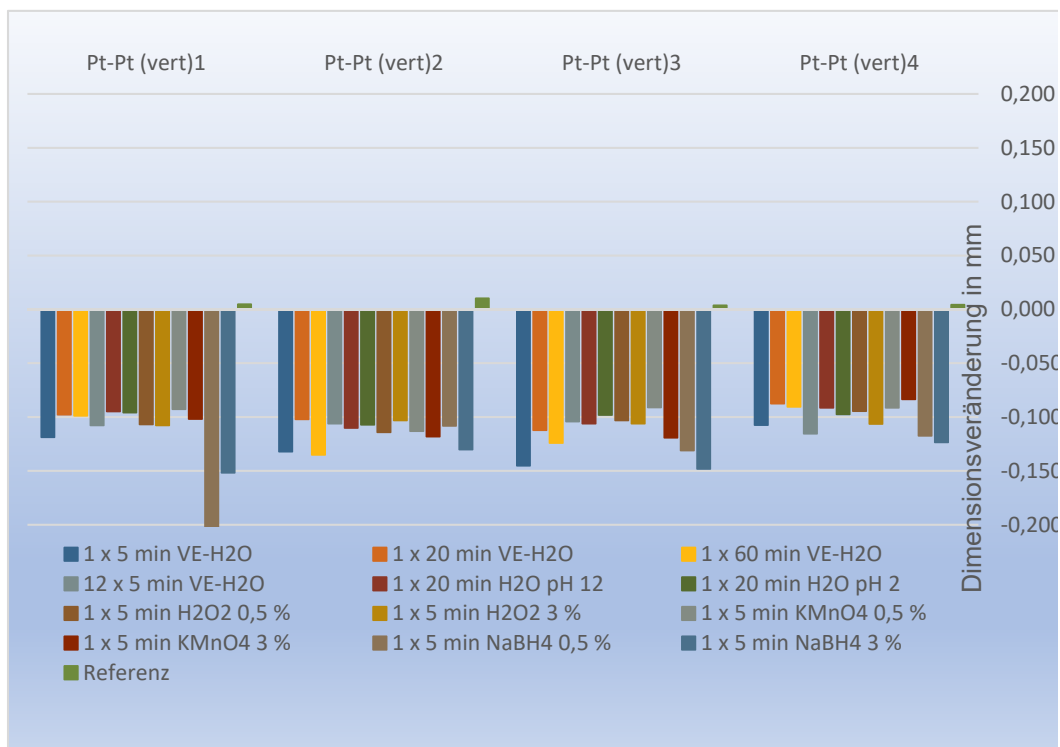


Diagramm 21: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 300 g/m².

Das Papier AVW 150 g/m² zeigt für alle Behandlungen in Hinblick auf die vertikalen Messwerte ähnlich große Veränderungen. Diese bewegen sich in einem Bereich zwischen -0,1 und -0,125 mm. Die zyklische Wässerung mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) und die Bleichbehandlung mit Natriumborhydrid 3 % (1 x 5 min NaBH₄ 3 %) haben dabei die größten Dimensionsveränderungen bewirkt (s. Diagramm 19). Bei dem Papier AVW 250 g/m² unterscheiden sich die durch die Behandlungen hervorgerufenen Veränderungen, jedoch zeichnet sich keine klare Tendenz ab. Bei den Bleichbehandlungen scheinen teilweise sogar die geringer konzentrierten Bleichmedien die größeren Veränderungen verursacht zu haben. Da das auf theoretischer Grundlage eher nicht zu erwarten war, könnte es sich hier auch um Messschwankungen handeln. Bei dem deutlich auffallenden Wert bei *vert2* / 12 x 5 min VE-H₂O handelt es sich um eine Blase, die im Messbereich lag. Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, sind an einigen Papieren im Zuge der wässrigen Behandlung deutlich augenfällige Schadensbilder aufgetreten (s. Diagramm 20). Bei dem Papier AVW 300 g/m² fallen die behandlungsbedingten Veränderungen wieder deutlich ähnlicher aus. Die Bleichbehandlung mit Natriumborhydrid (1 x 5 min NaBH₄ 0,5 % und 3 %) hebt sich dabei mit etwas höheren Werten im Vergleich zu den anderen Behandlungen ab (s. Diagramm 21).

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

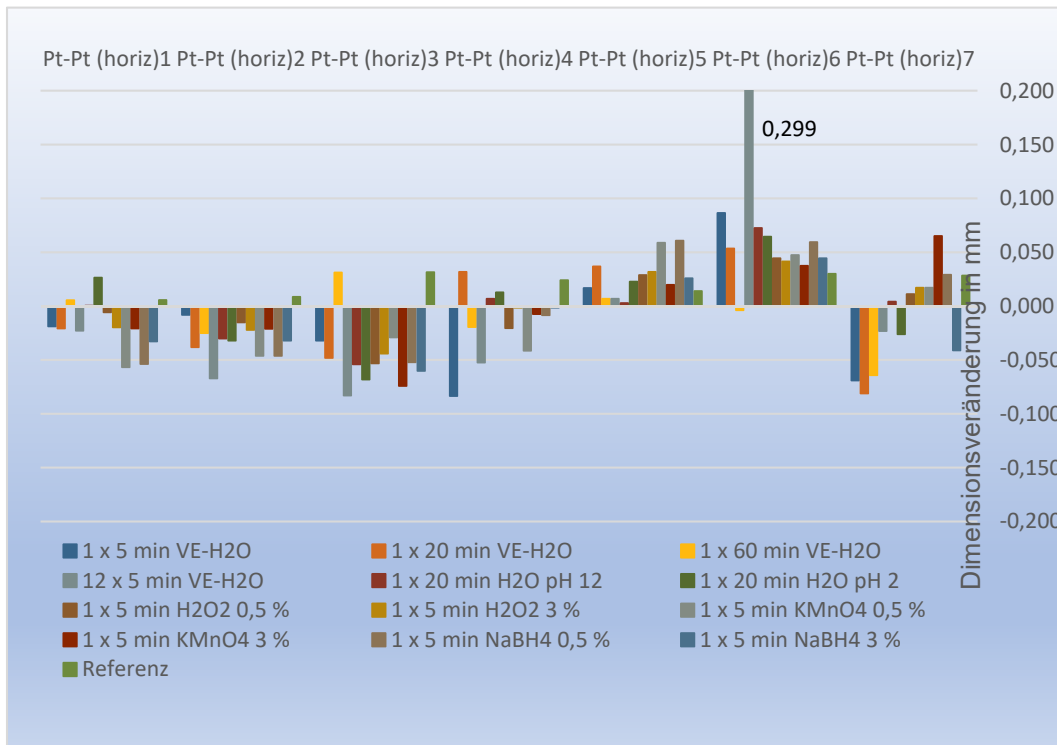


Diagramm 22: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 150 g/m².

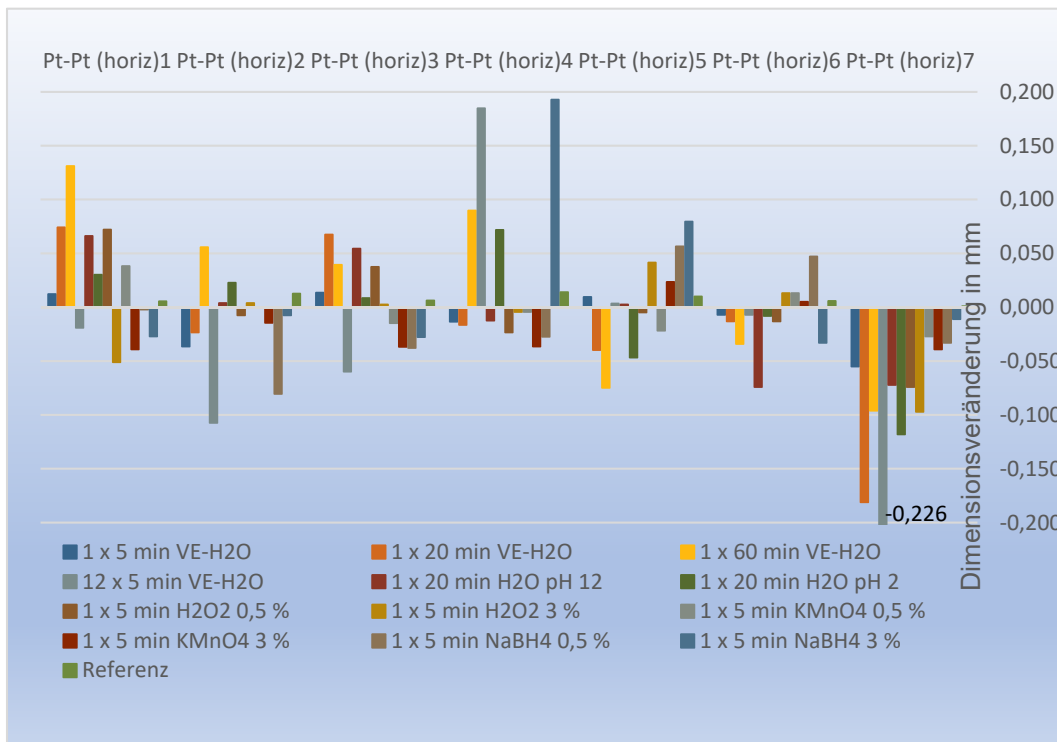


Diagramm 23: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 250 g/m².

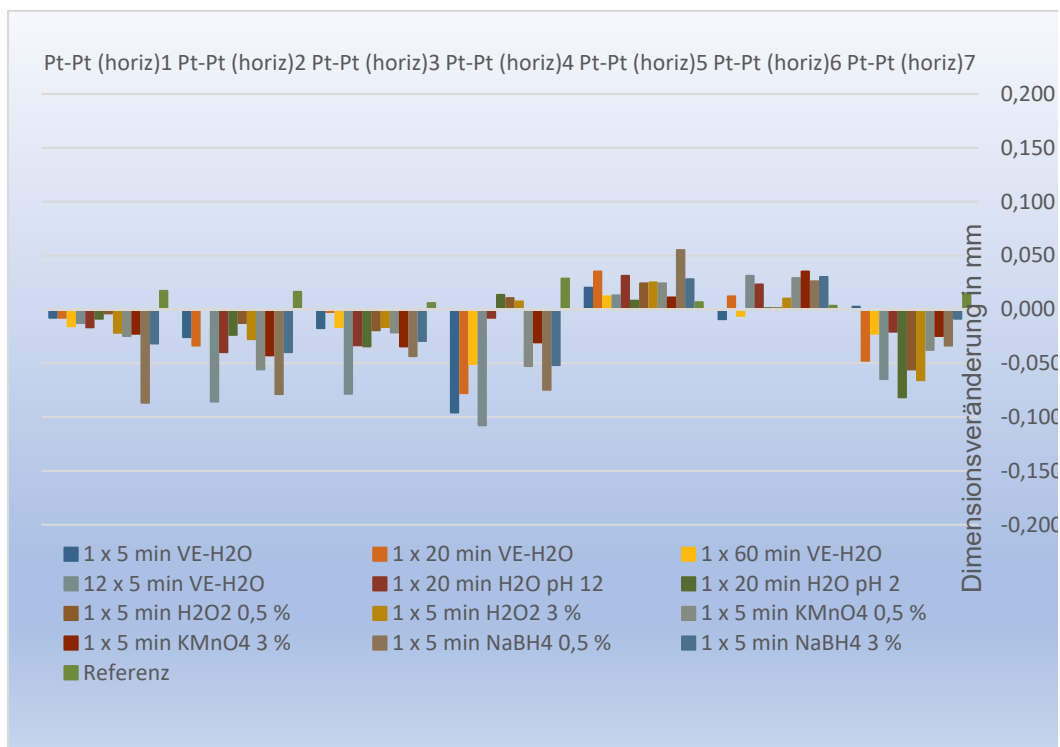


Diagramm 24: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte AVW 300 g/m².

Bei den horizontalen Dimensionsveränderungen zeigen sich bei den Papieren AVW 170 g/m², AVW 250 g/m² und AVW 300 g/m² sichtbar stärkere Unterschiede zwischen den Behandlungen, jedoch ist auch hier keine eindeutige Tendenz erkennbar. Vermutet werden kann, dass die Papiersorte AVW aufgrund ihrer Materialeigenschaften, vor allem aufgrund ihrer oberflächlichen Beschichtung sehr empfindlich auf wässrige Behandlungen reagiert. Die größten Veränderungen traten auch hier wieder bei der zyklischen Wässerung mit Zwischentrocknung (AVW 150 g/m² / *horiz6*, AVW 250 g/m² / *horiz4*, *horiz7*) (s. Diagramm 22 und Diagramm 23) sowie der Bleichbehandlung mit Natriumborhydrid 3 % (AVW 250 g/m² / *horiz4*) auf (s. Diagramm 23).

Papiersorte FK

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

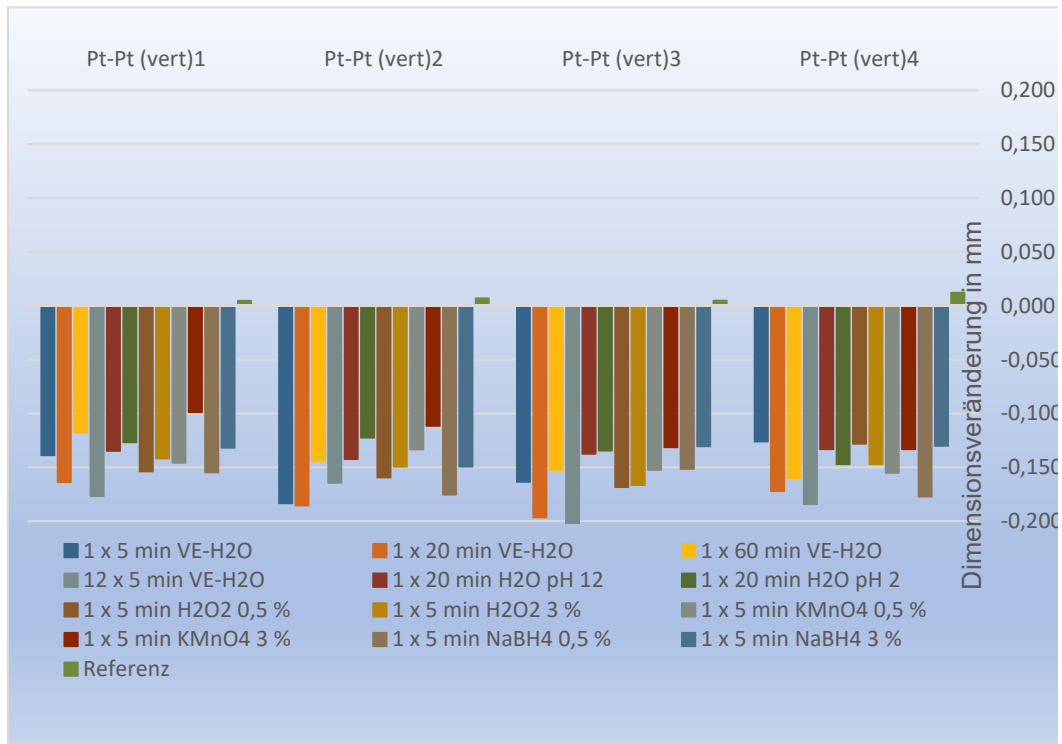


Diagramm 25: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte FK 450 g/m².

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

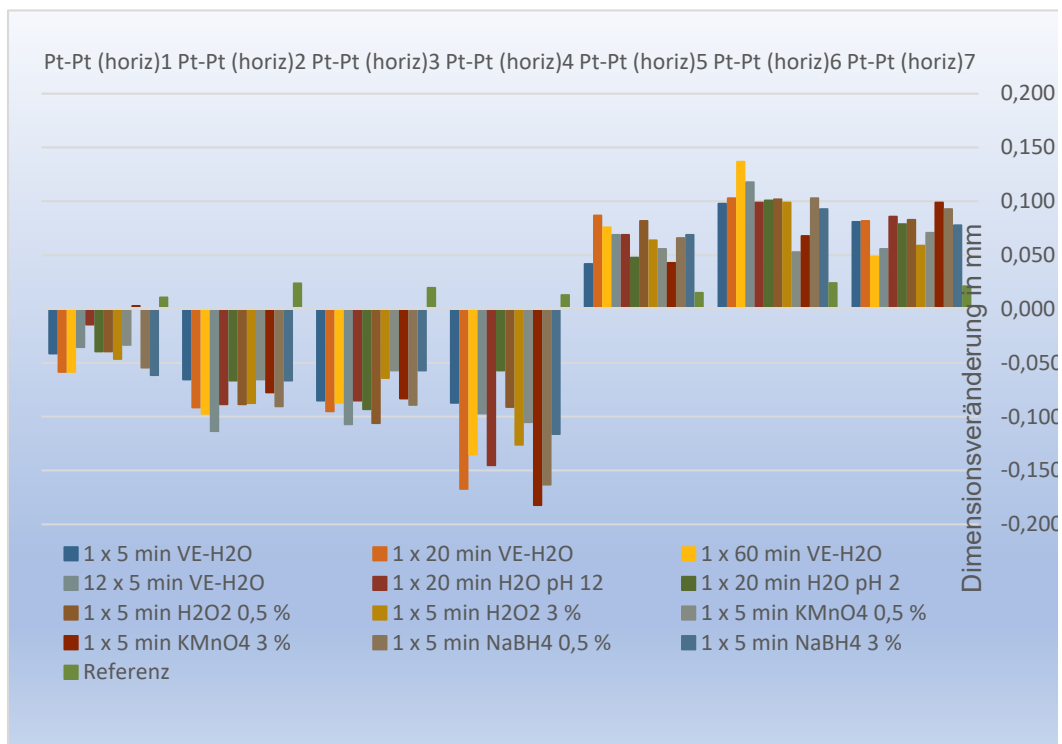


Diagramm 26: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte FK 450 g/m².

Das Papier FK 450 g/m² zeigt von allen untersuchten Papieren sowohl bezogen auf die Reliefhöhen als auch auf die Reliefbreiten die stärksten Veränderungen. Die gemessenen Veränderungen liegen bei den vertikalen Messwerten überwiegend zwischen -0,125 und -0,2 mm (s. Diagramm 25), bei den horizontalen Messwerten bei minus beziehungsweise plus 0,1 mm (s. Diagramm 26). Das geprägte Relief ist also durch die wässrigen Behandlungen deutlich abgeflacht beziehungsweise in der Breite gestaucht oder gestreckt. Im Vergleich der Behandlungen untereinander ist keine eindeutige Tendenz erkennbar.

Papiersorte COPW

Dimensionsveränderungen der vertikalen Messwerte

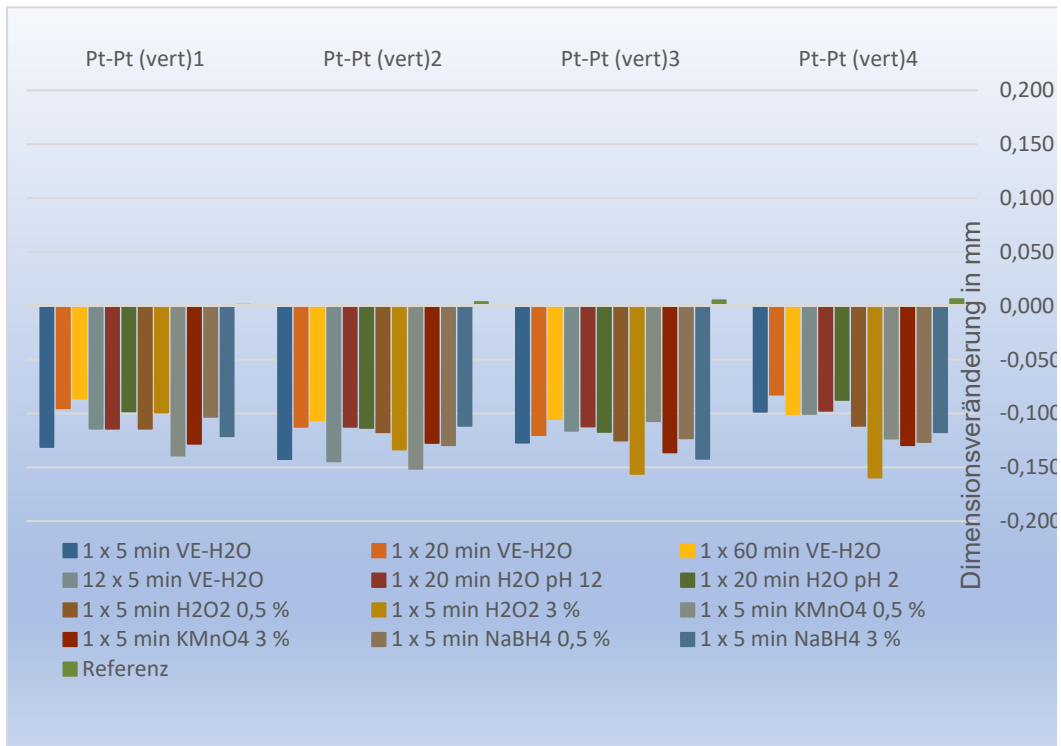


Diagramm 27: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte COPW 160 g/m².

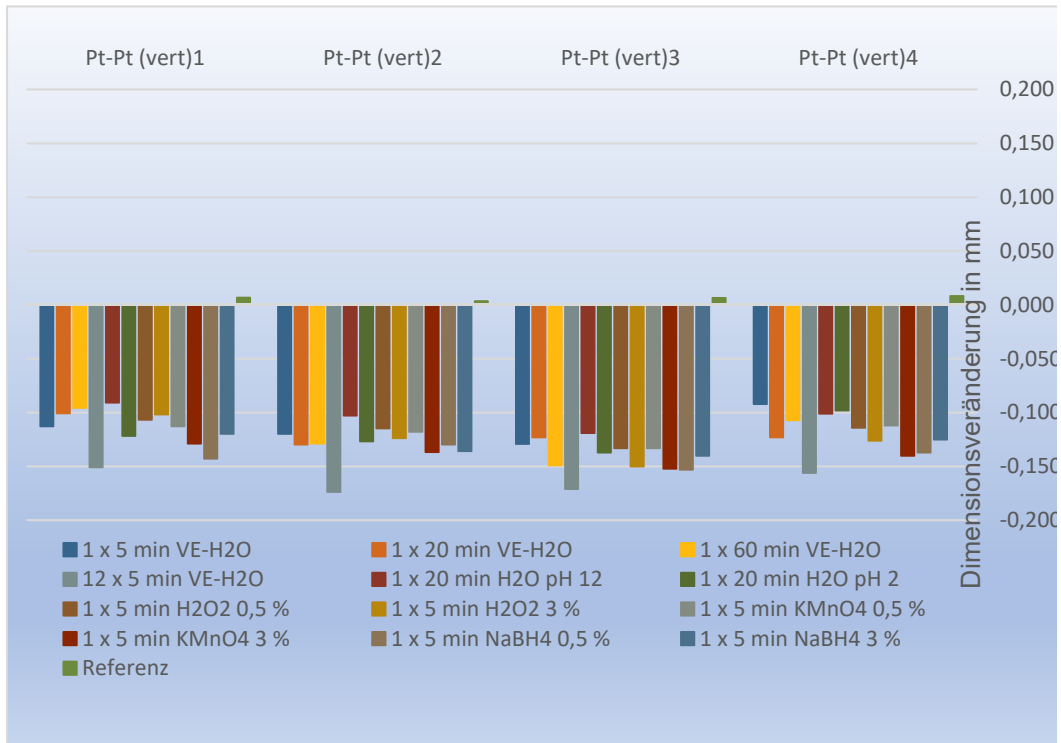


Diagramm 28: Abweichung der vertikalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte COPW 300 g/m².

Die vertikalen Dimensionsveränderungen der Papiere COPW 160 g/m² und COPW 300 g/m² fallen sehr ähnlich aus und liegen überwiegend in einem Bereich von -0,1 bis -0,15 mm. Die größten Veränderungen werden bei dem Papier COPW 160 g/m² durch alle drei Bleichbehandlungen (s. Diagramm 27), bei dem Papier COPW 300 g/m² ebenfalls durch die Bleichbehandlungen sowie durch den Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) verursacht (s. Diagramm 28).

Dimensionsveränderungen der horizontalen Messwerte

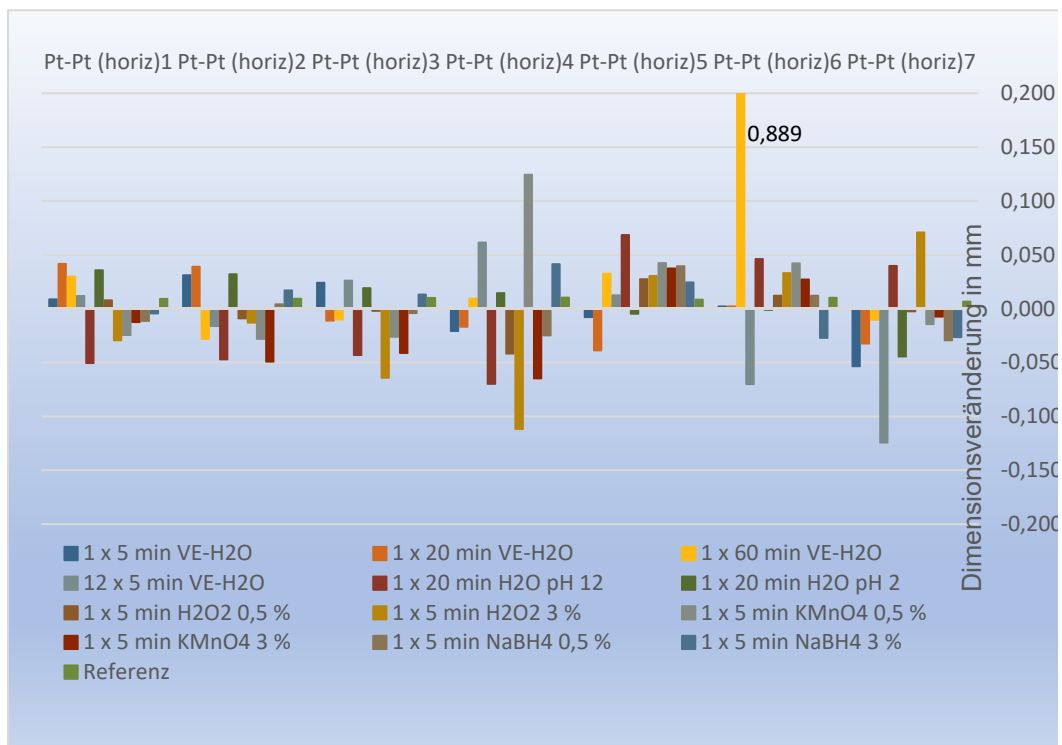


Diagramm 29: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte COPW 160 g/m².

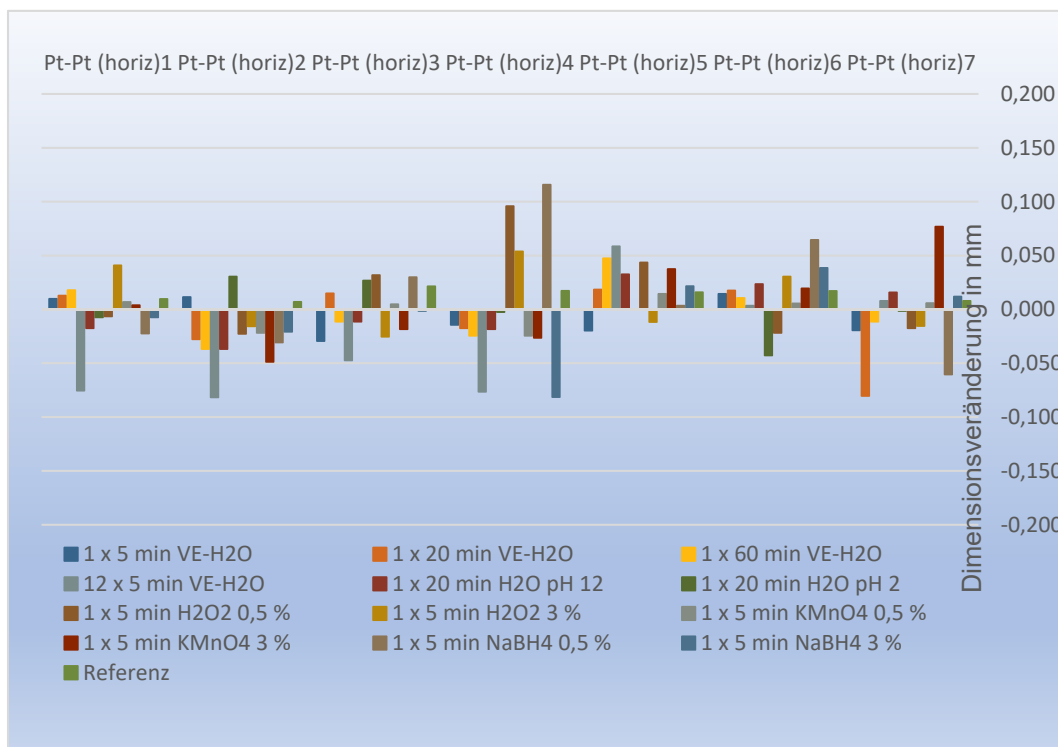


Diagramm 30: Abweichung der horizontalen Messwerte von den Messwerten der Referenz bei der Papiersorte COPW 300 g/m².

Die horizontalen Dimensionsveränderungen der Papiere COPW 160 g/m² und COPW 300 g/m² liegen überwiegend bei minus beziehungsweise plus 0,1 mm (s. Diagramm 29 und Diagramm 30). Die im Vergleich zu den anderen Messwerten starke Materialdehnung bei *horiz6* des Papiers COPW 160 g/m² ist nicht eindeutig erklärbar (s. Diagramm 29).

5.8.2 Einfluss des Flächengewichts auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs

Um den Einfluss des Flächengewichts auf die Dimensionsveränderungen besser auswerten zu können, wurden, wie in Abschnitt 5.7 beschrieben, die berechneten Dimensionsveränderungen der Höhen- beziehungsweise Flächenmesswerte einer Probe durch das Bilden des arithmetischen Mittelwertes zu einem Wert zusammengefasst.

In den folgenden Diagrammen (s. Diagramm 31 bis Diagramm 45) bildet die horizontale Achse alle untersuchten Grammaturen derselben Papiersorte ab. Die vertikale Achse zeigt den absoluten Betrag der Dimensionsveränderung in der Einheit Millimeter. Die einzelnen farblich gekennzeichneten Balken stehen erneut für die durchgeführten Behandlungen. Die vertikalen Messwerte (Reliefhöhe) und

die horizontalen Messwerte, welche nochmal in Reliefbreite und Reliefzwischenräume unterteilt wurden, wurden getrennt voneinander betrachtet.

Veränderung der Reliefhöhe (vertikale Dimensionsveränderungen)

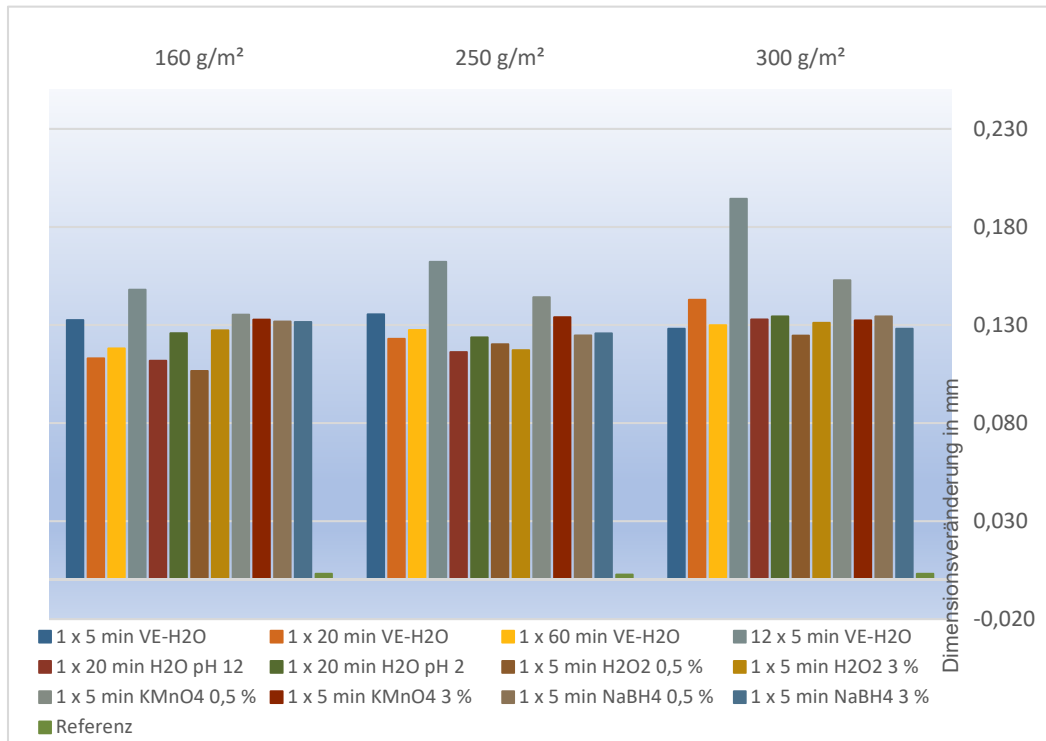


Diagramm 31: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte VDA.

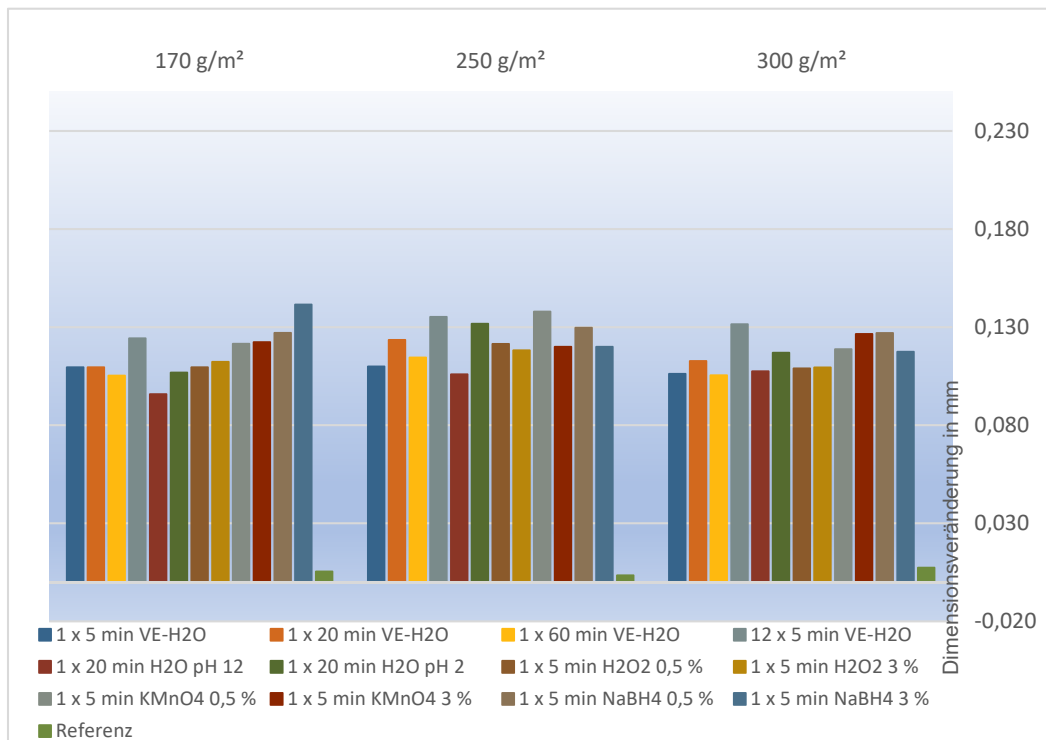


Diagramm 32: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte TB.

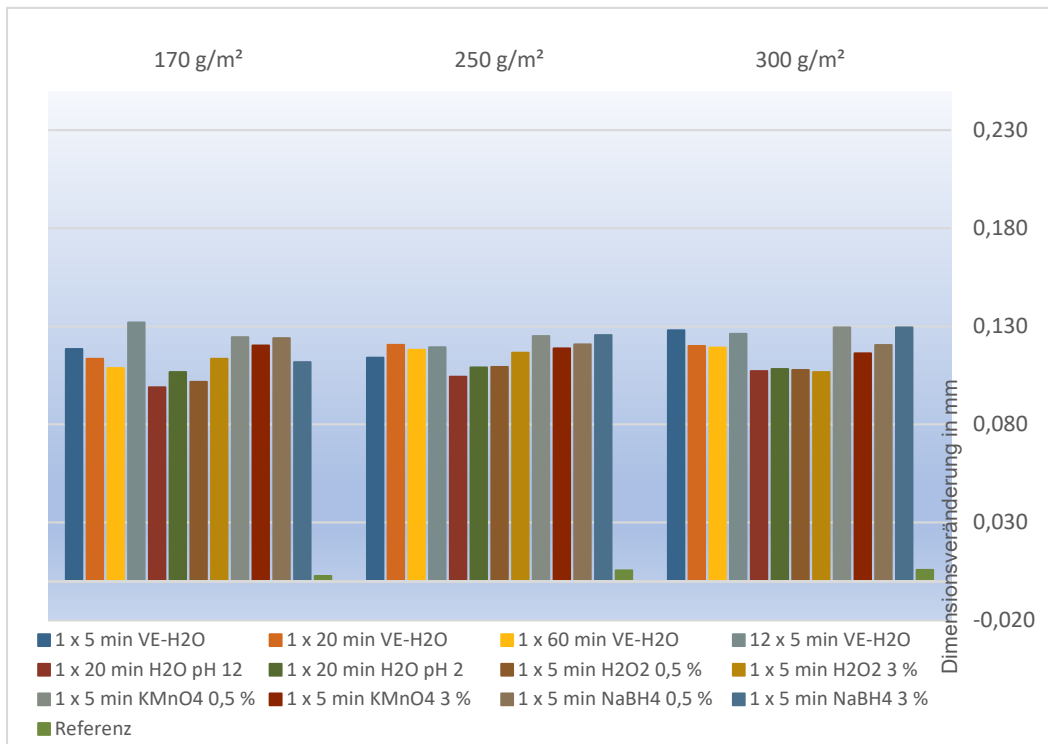


Diagramm 33: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte SB.

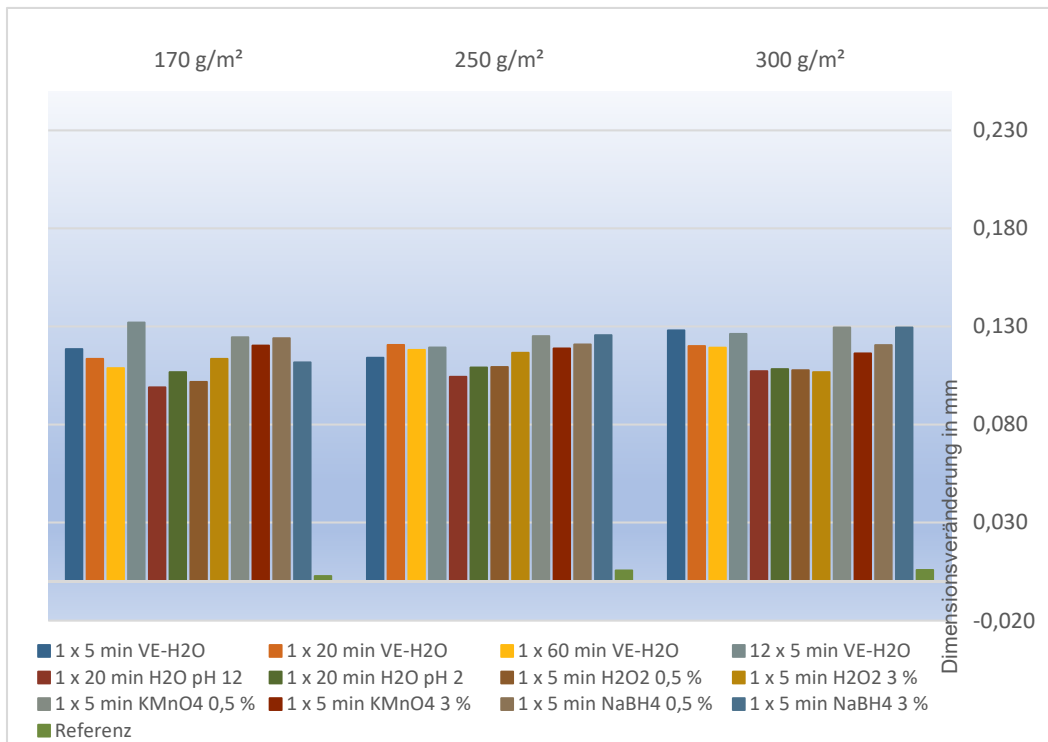


Diagramm 34: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte AVW.

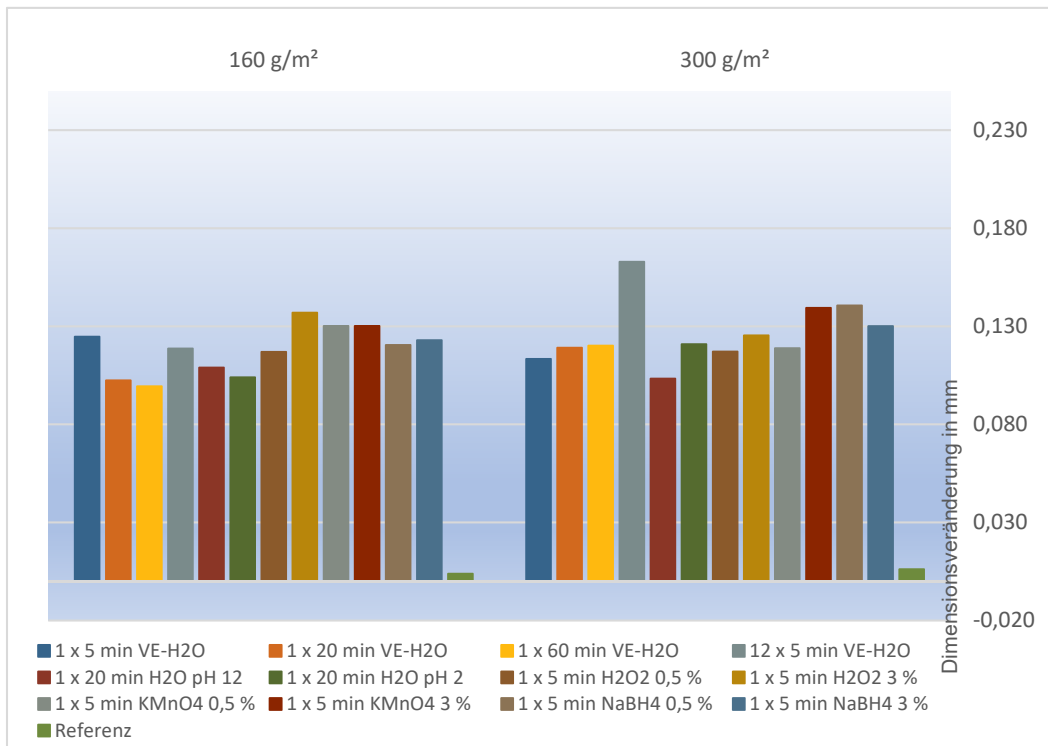


Diagramm 35: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte COPW.

Veränderung der Reliefbreite (horizontale Dimensionsveränderungen)

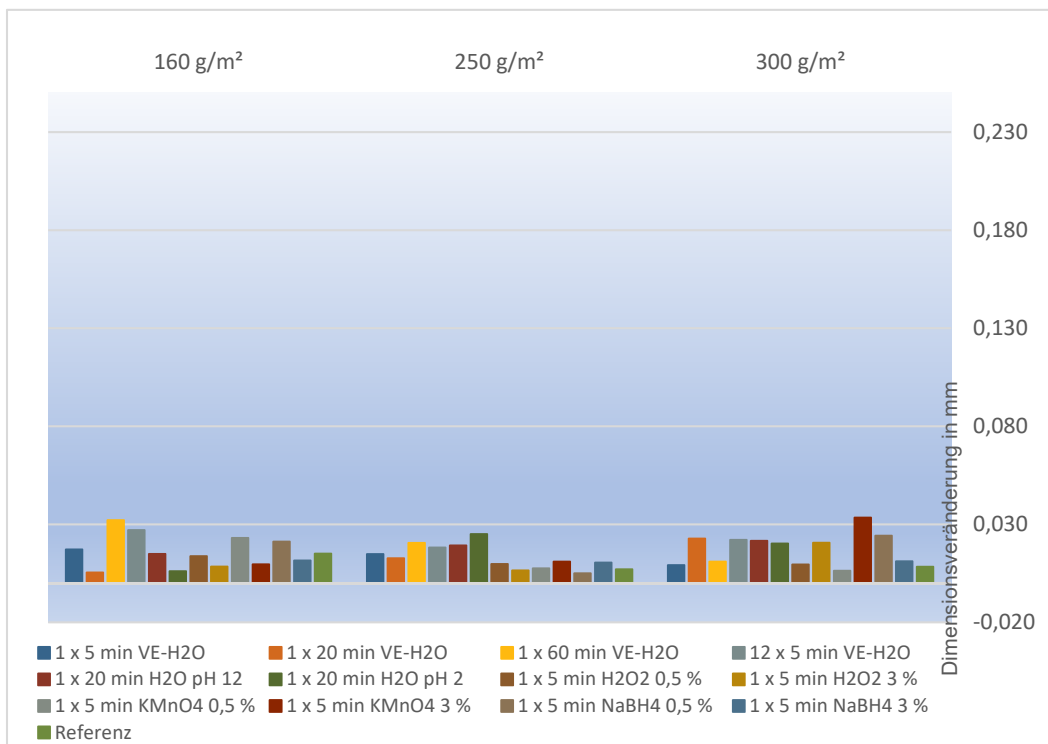


Diagramm 36: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte VDA.

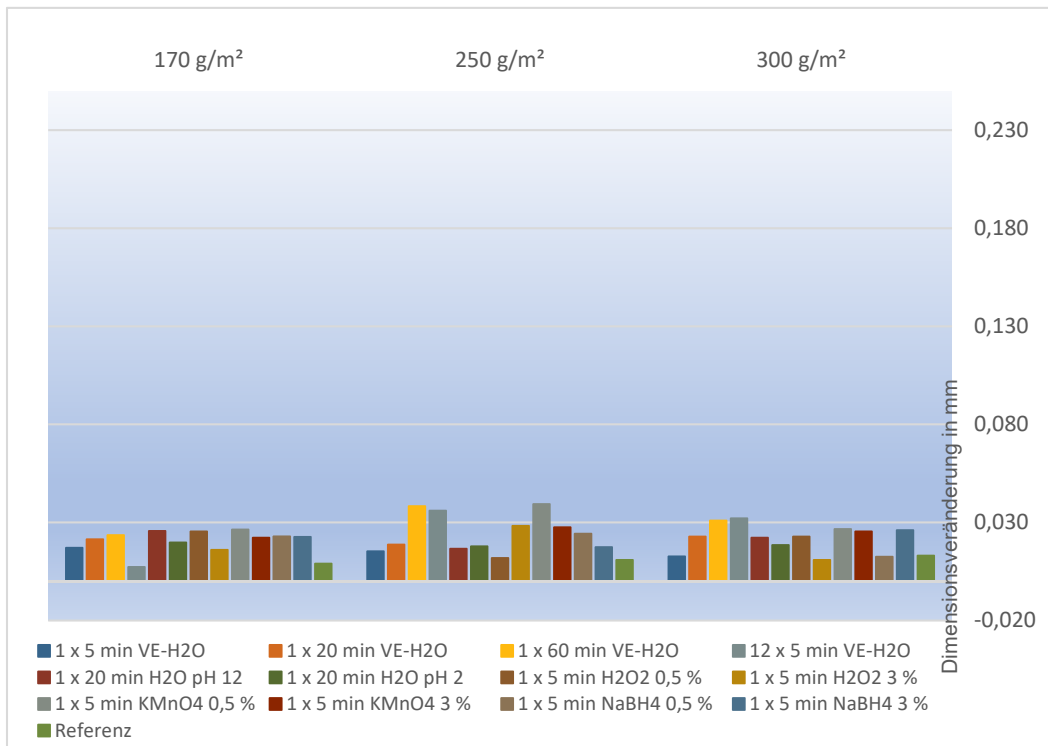


Diagramm 37: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte TB.

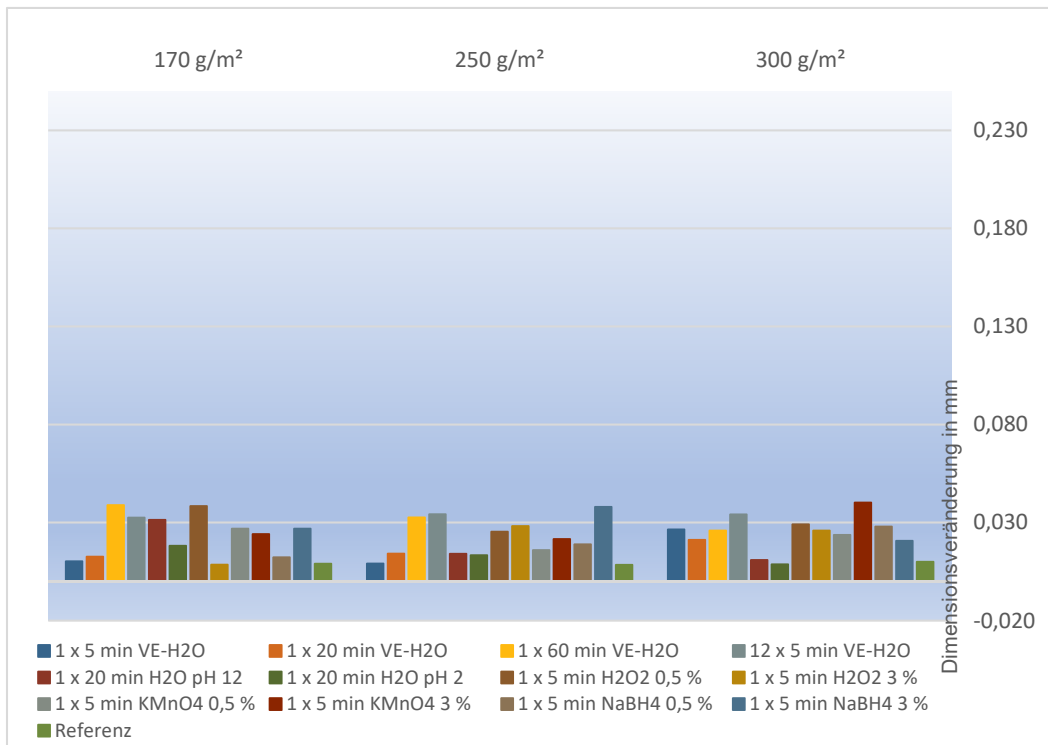


Diagramm 38: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte SB.

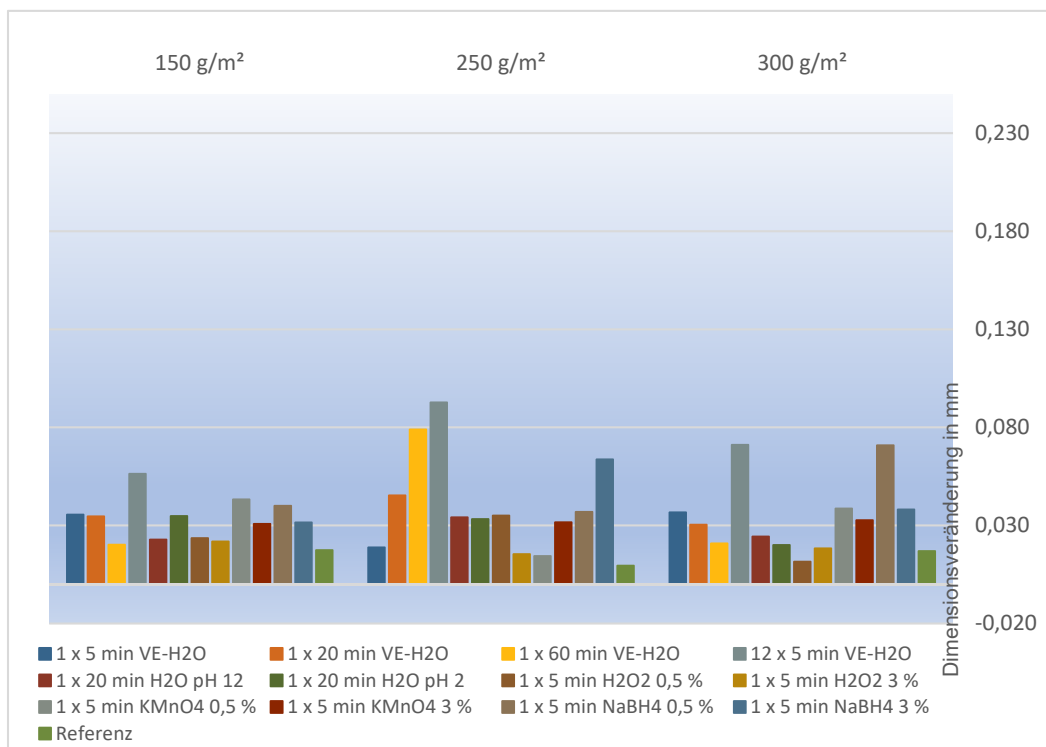


Diagramm 39: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte AVW.

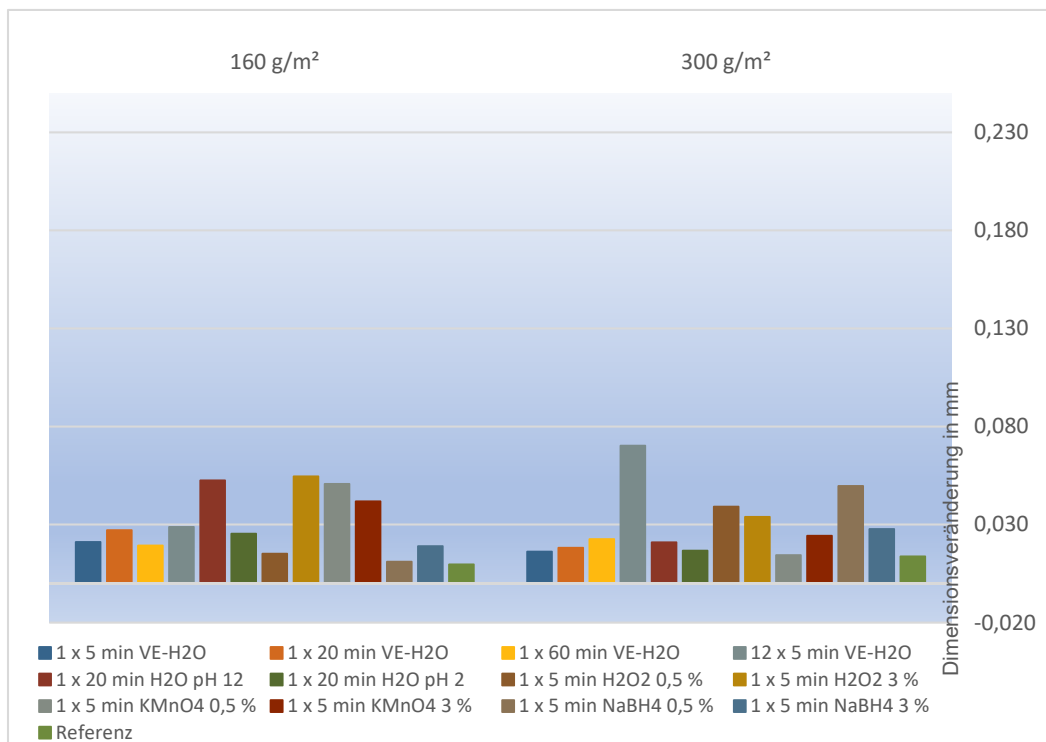


Diagramm 40: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte COPW.

Veränderung der Reliefzwischenräume (horizontale Dimensionsveränderungen)

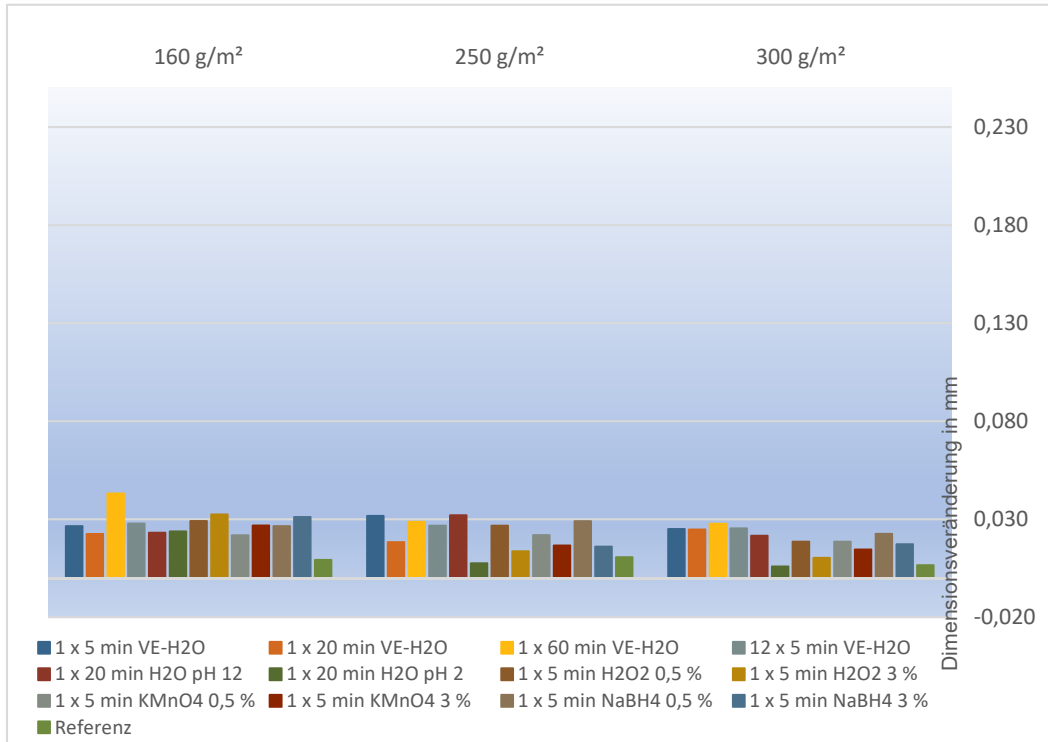


Diagramm 41: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte VDA.

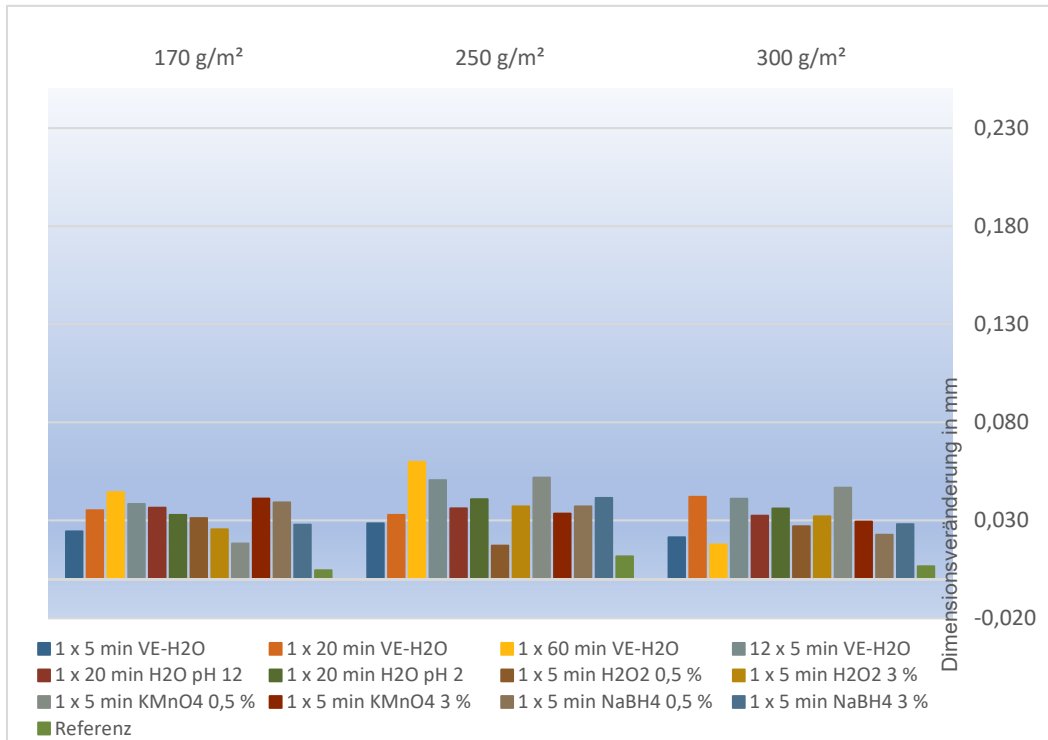


Diagramm 42: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte TB.

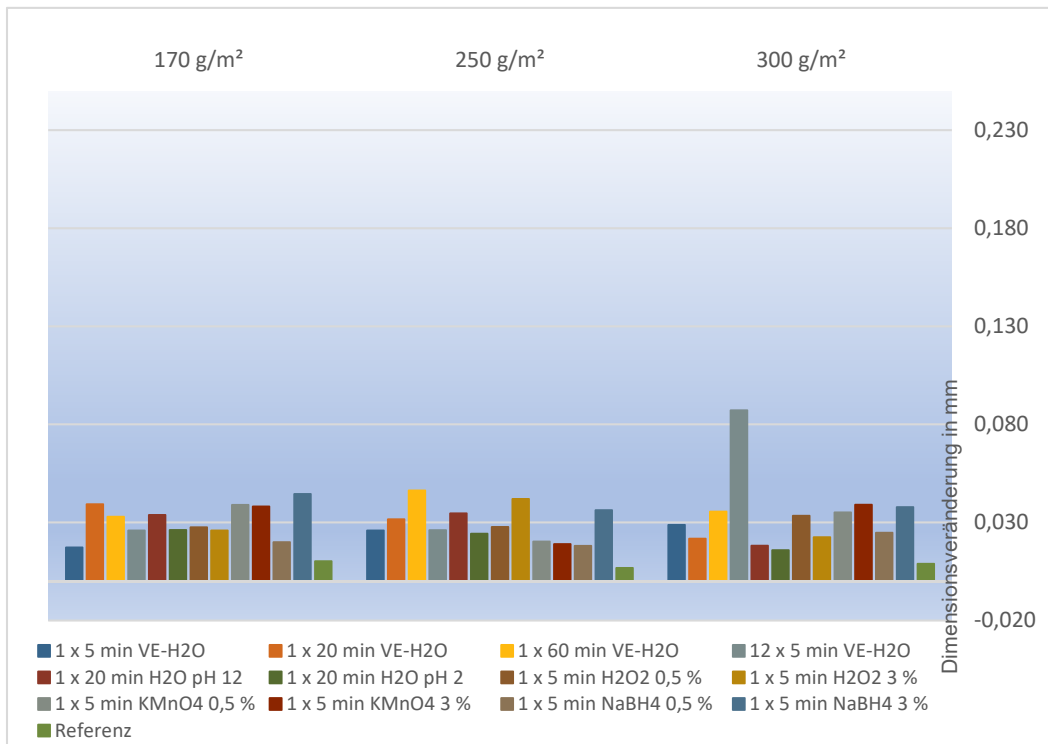


Diagramm 43: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte SB.

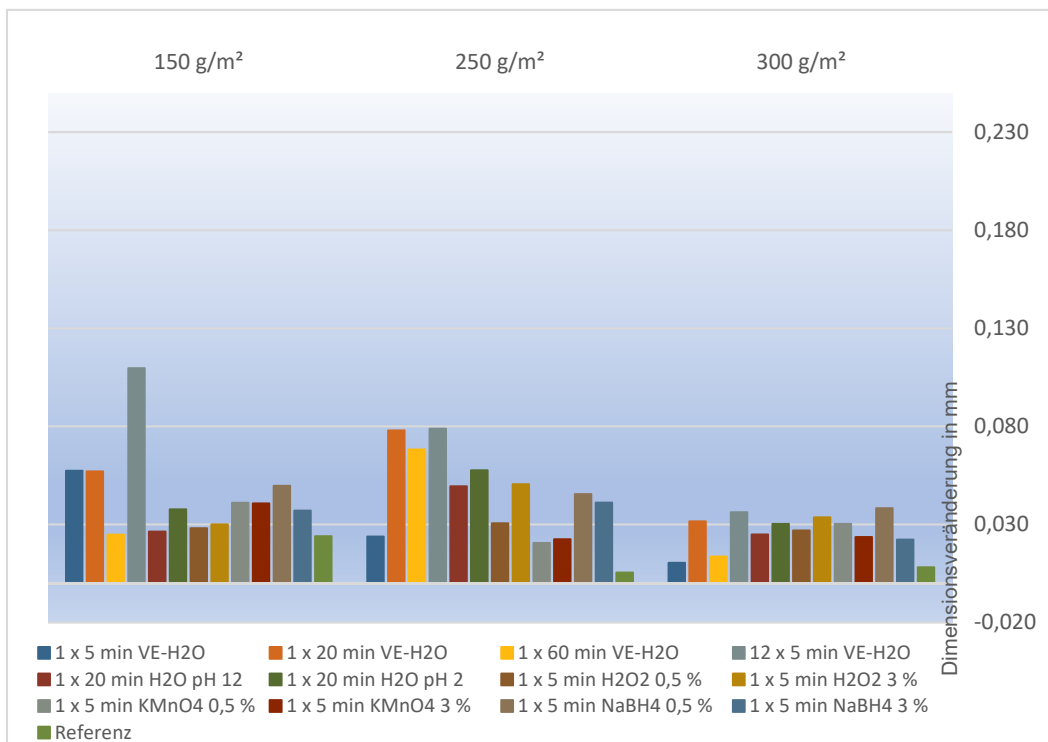


Diagramm 44: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte AVW.

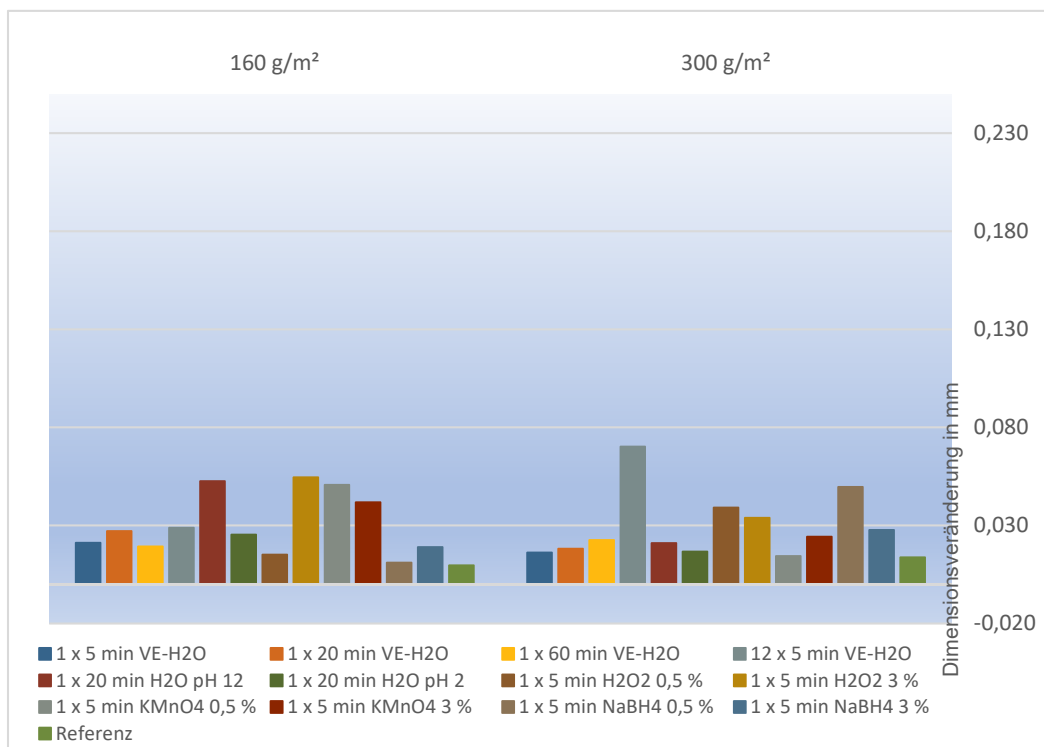


Diagramm 45: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den Flächengewichten der Papiersorte COPW.

In der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass die Grammaturn einen eher geringfügigen Einfluss auf die Dimensionsveränderungen der Papiere nach einer wässrigen Behandlung hat. Innerhalb einer Papiersorte unterscheiden sich die aufgetretenen Veränderungen zwischen den einzelnen Grammaturn kaum.

Mit Blick auf die Relieffhöhen fällt bei allen Papiersorten auf, dass der Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) die stärksten Veränderungen hervorgerufen hat. Diese fallen bei den Papieren mit höherem Flächengewicht etwas größer aus als bei den Papieren mit kleinerem Flächengewicht. Dies zeigt sich besonders deutlich bei der Papiersorte VDA. Die Höhenveränderung bei VDA 160 g/m² liegt bei 0,148 mm, bei VDA 250 g/m² bei 0,162 mm und bei VDA 300 g/m² bei 0,194 mm (s. Diagramm 31).

Hinsichtlich der Reliefbreiten weisen die Papiersorten VDA, TB und SB sehr ähnliche Veränderungen auf. Diese liegen zwischen 0,0 und 0,03 mm (s. Diagramm 36, Diagramm 37, Diagramm 38). Es sind keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Grammaturn zu beobachten. Bei den Papiersorten AVW und COPW zeigen sich etwas größere Unterschiede zwischen den Behandlungen, jedoch ebenfalls keine hinsichtlich der verschiedenen Grammaturn.

Die bei den Reliefzwischenräumen gemessenen Veränderungen sind bei den Papiersorten TB und SB (s. Diagramm 42, Diagramm 43) etwas größer als bei den Reliefbreiten. Bei den Papiersorten VDA, AVW und COPW entsprechen die gemessenen Veränderungen etwa den der Reliefbreiten. Es sind keine deutlichen Abweichungen zwischen den Grammaturen erkennbar.

5.8.3 Einfluss der Papiersorte auf die Dimensionsveränderungen des Reliefs

Um den Einfluss der Papiersorte auf die Dimensionsveränderungen besser auswerten zu können, wurden, wie in Abschnitt 5.7 beschrieben, die berechneten Dimensionsveränderungen der Höhen- beziehungsweise Flächenmesswerte einer Probe durch das Bilden des arithmetischen Mittelwertes zu einem Wert zusammengefasst.

Für die folgenden Diagramme (s. Diagramm 46 bis Diagramm 54) wurden die Flächengewichte der Papiere in drei Gruppen (klein: 150 g/m², 160 g/m², 170 g/m², mittel: 250 g/m², groß: 300 g/m², 450 g/m²) zusammengefasst, wobei die einzelnen Balken für die verschiedenen Papiersorten stehen.

Veränderung der Reliefhöhe (vertikale Dimensionsveränderungen)

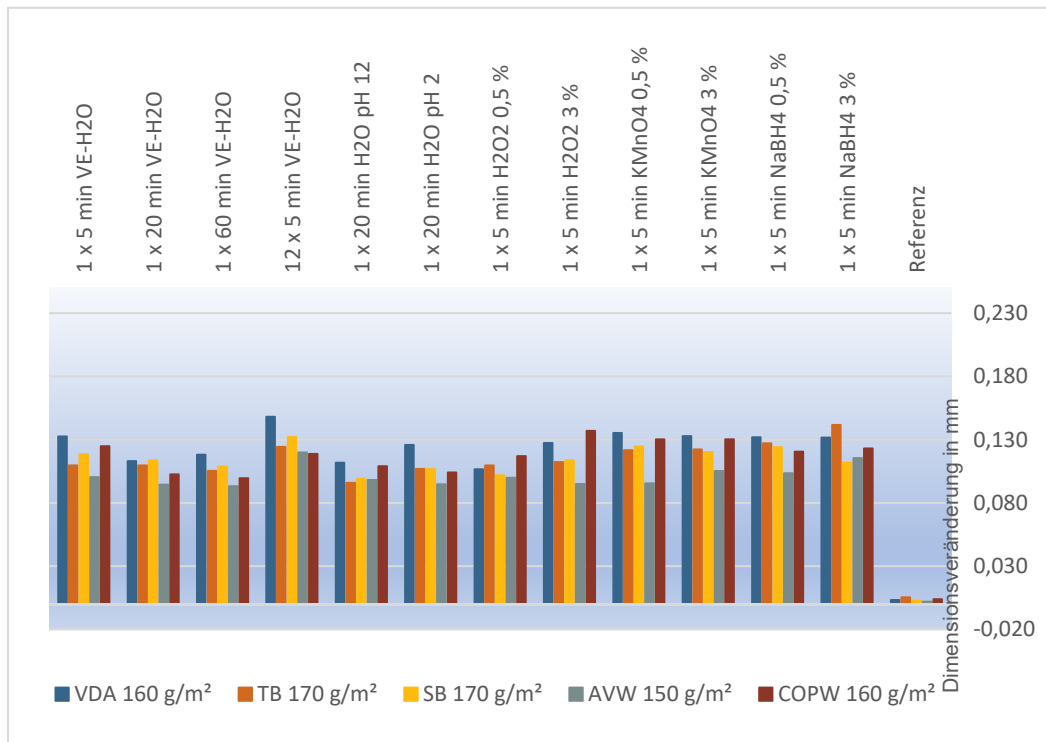


Diagramm 46: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils kleinsten Flächengewichten aller Papiersorten.

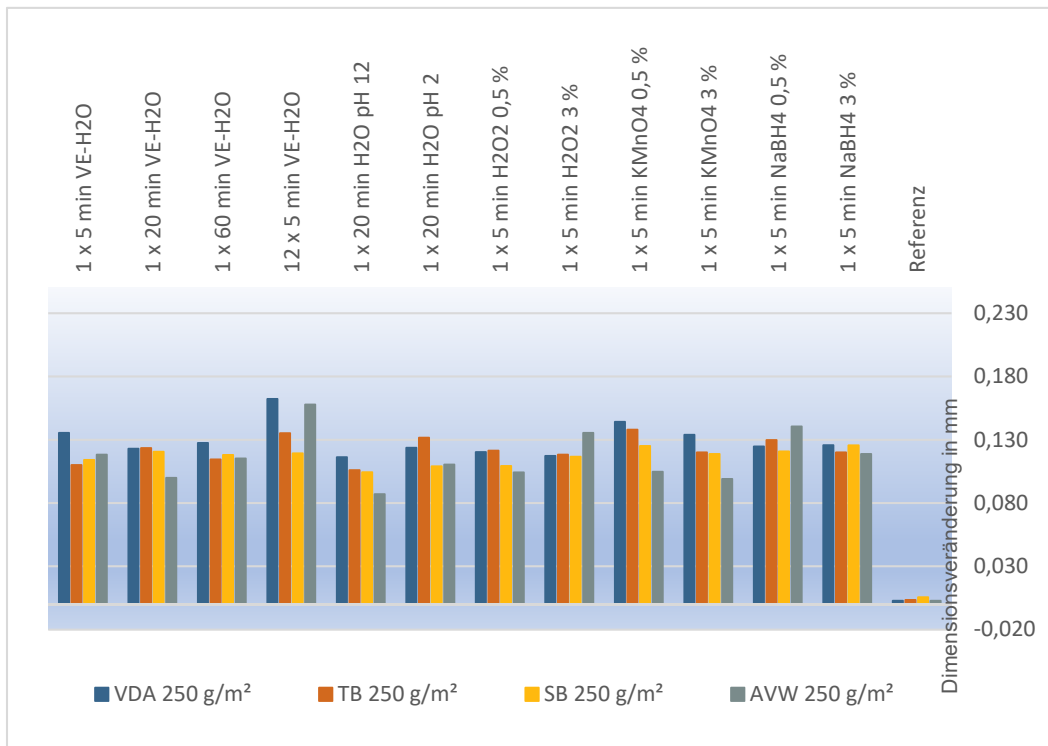


Diagramm 47: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils mittleren Flächen- gewichten aller Papiersorten.

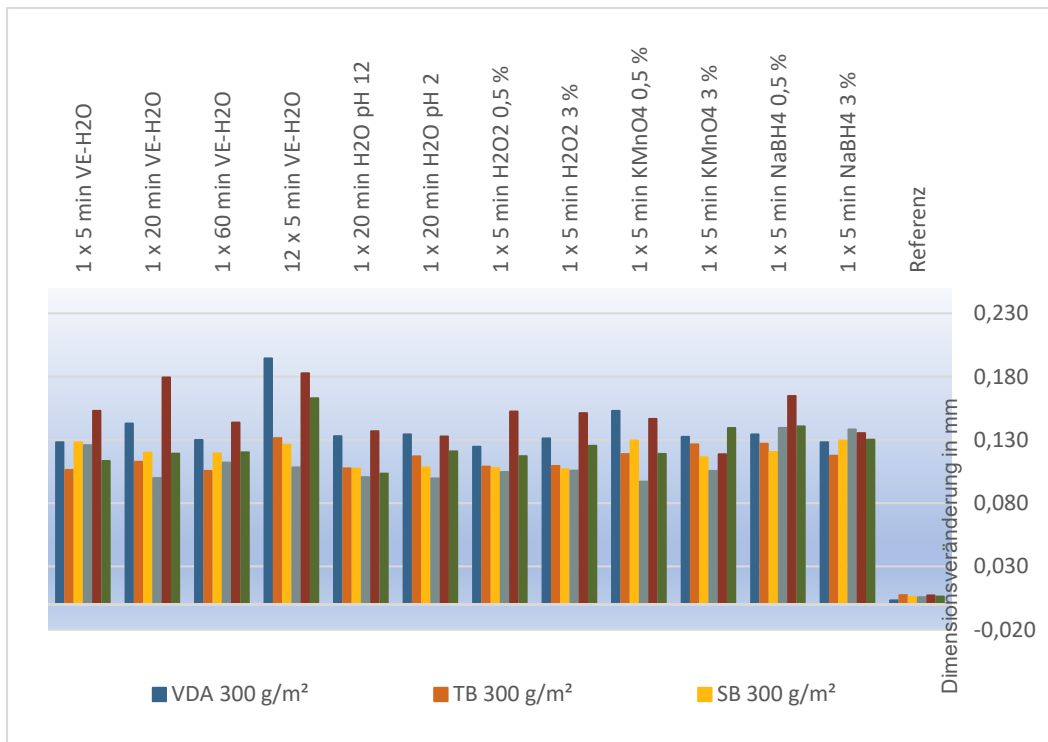


Diagramm 48: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils größten Flächen- gewichten aller Papiersorten.

Veränderung der Reliefbreite (horizontale Dimensionsveränderungen)

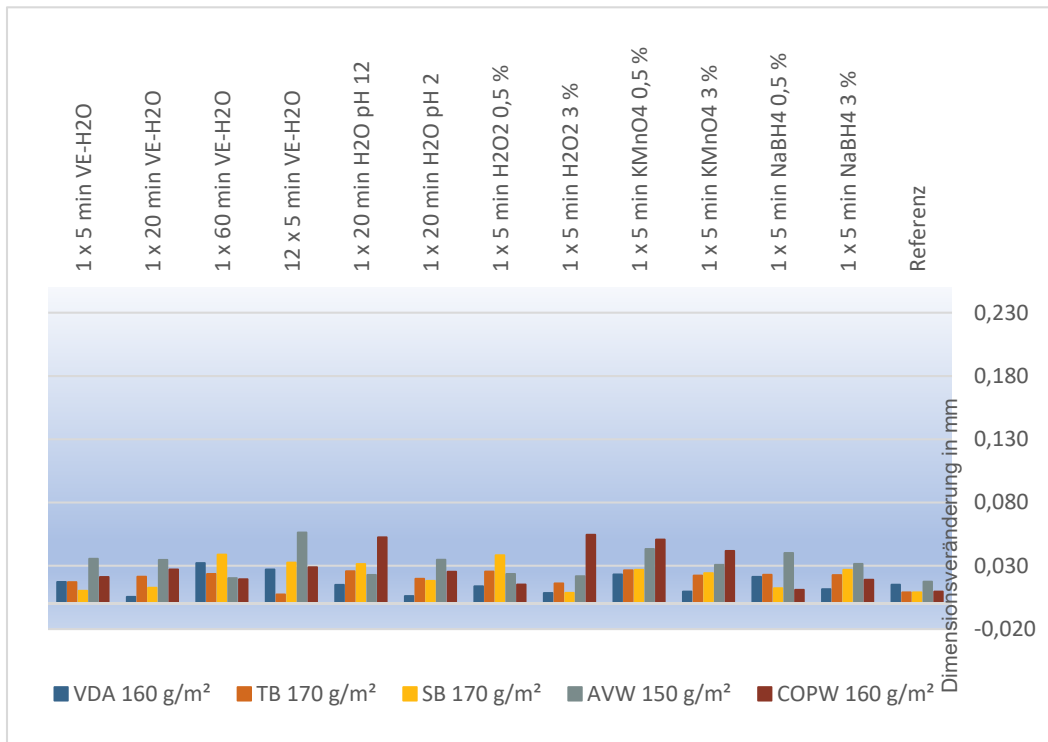


Diagramm 49: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils kleinsten Flächen- gewichten aller Papiersorten.

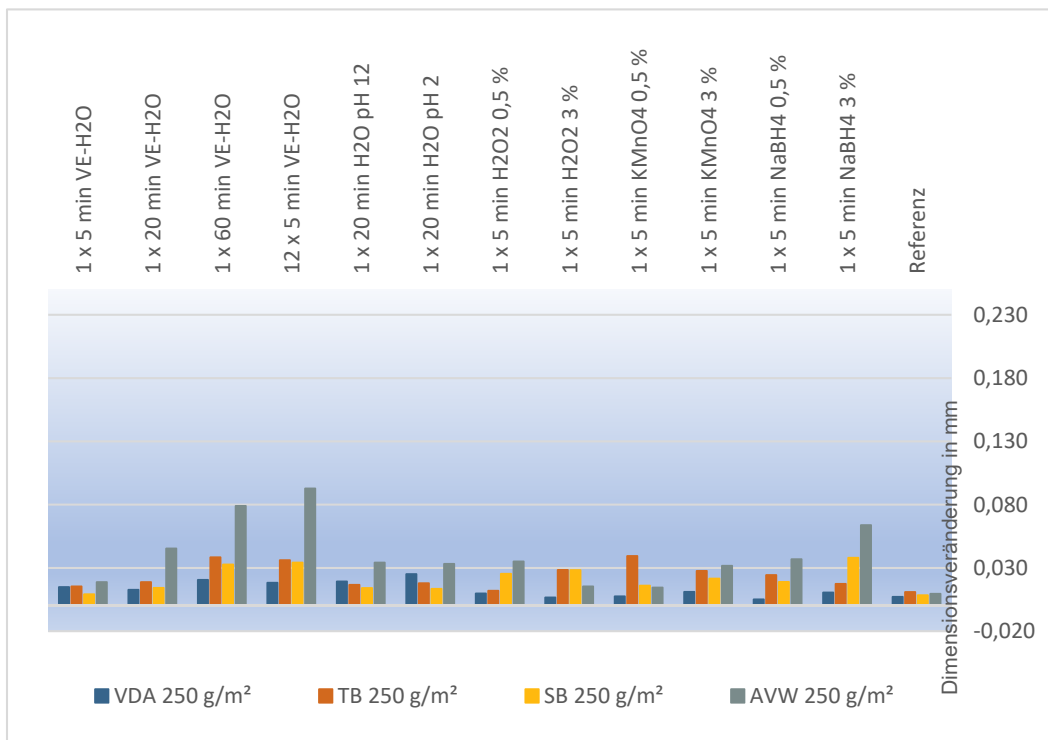


Diagramm 50: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils mittleren Flächen- gewichten aller Papiersorten.

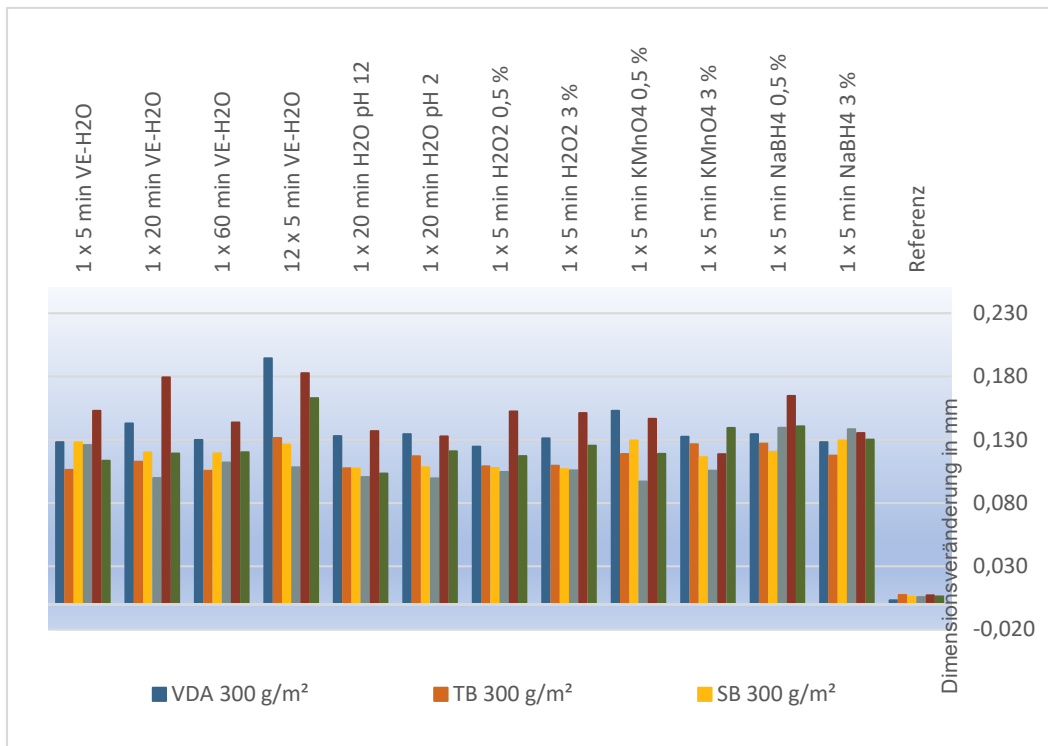


Diagramm 51: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils größten Flächen- gewichten aller Papiersorten.

Veränderung der Reliefwischenräume (horizontale Dimensionsveränderungen)

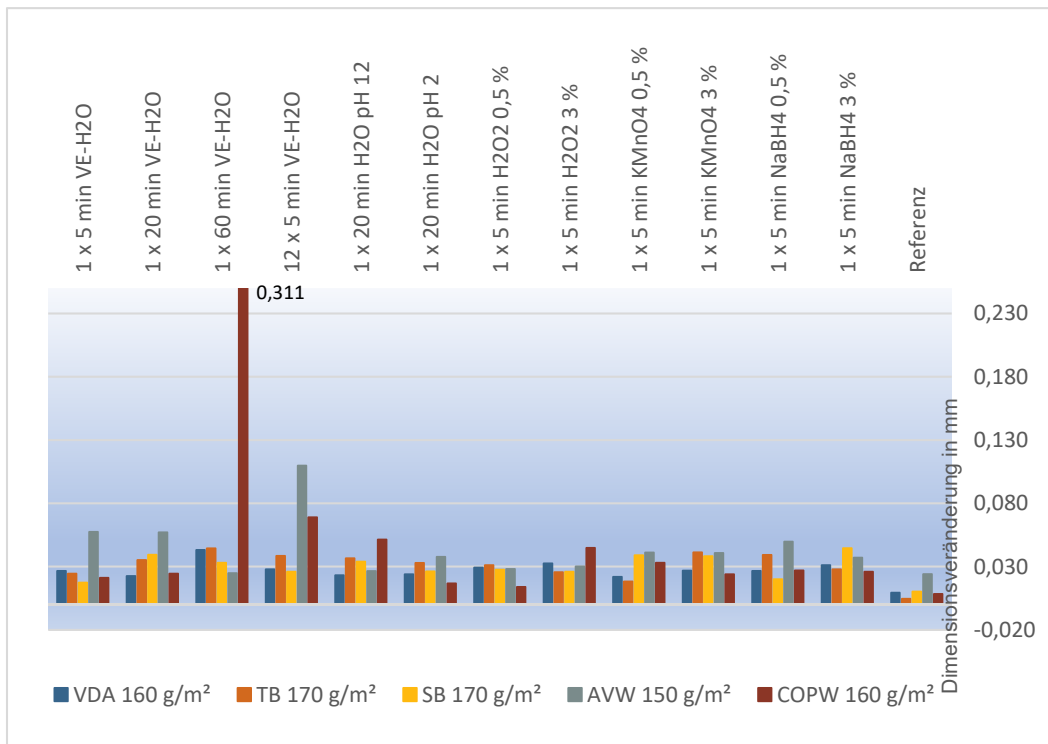


Diagramm 52: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils kleinsten Flächen- gewichten aller Papiersorten.

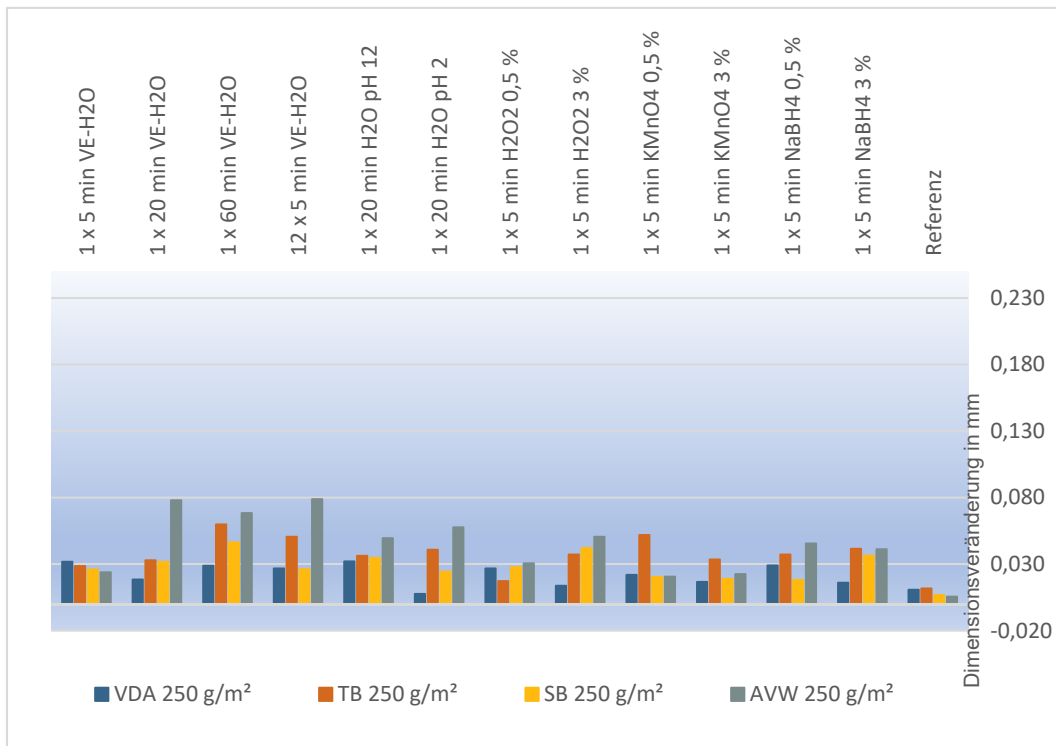


Diagramm 53: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils mittleren Flächen-
gewichten aller Papiersorten.

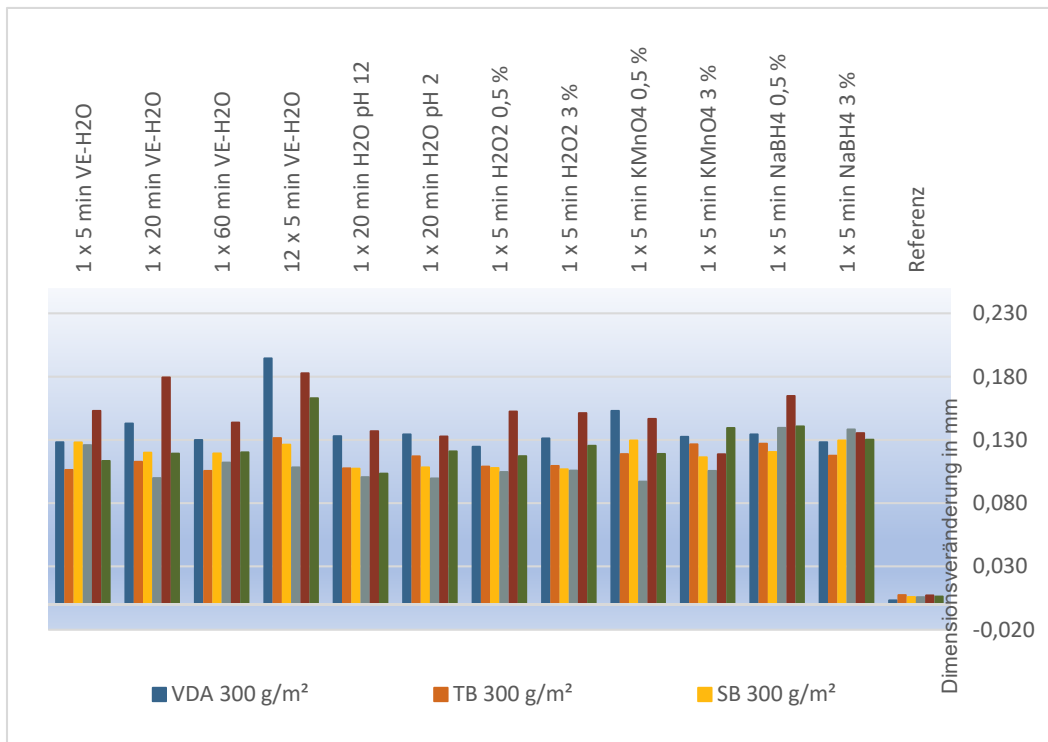


Diagramm 54: Vergleich der Behandlungsverfahren gruppiert nach den jeweils größten Flächen-
gewichten aller Papiersorten.

In der Gesamtbetrachtung wird deutlich, dass die Papierzusammensetzung das Ausmaß der Dimensionsveränderung maßgeblich beeinflusst.

Mit Blick auf die Reliefhöhen fallen in der Gruppe mit den kleinsten Flächengewichten vor allem die Papiere VDA 160 g/m² und COPW 160 g/m² als Papiere mit den stärksten Veränderungen auf (s. Diagramm 46). In der Gruppe der mittleren Flächengewichte treten die stärksten Veränderungen bei dem Papier VDA 250 g/m² auf. Das Papier AVW 250 g/m² fällt vor allem bei dem Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) mit ebenso großen Veränderungen auf (s. Diagramm 47). In der Gruppe mit den größten Flächengewichten zeigen die Papiere VDA 300 g/m² und FK 450 g/m² die stärksten Veränderungen (s. Diagramm 48). Bei der Papiersorte FK ist die starke Veränderung sehr wahrscheinlich der fehlenden Leimung geschuldet, da die anderen Zellstoffpapiere TB und SB deutlich kleinere Veränderungen aufweisen.

Bei der Betrachtung der Reliefbreiten und Reliefzwischenräume fallen in der Gruppe mit den kleinsten Flächengewichten vor allem die Papiere AVW 150 g/m² und COPW 160 g/m² auf (s. Diagramm 49 und Diagramm 52). Der besonders auffällige Wert bei den Reliefzwischenräumen bei der 60-minütigen Wässerung des Papiers COPW 160 g/m² ist nicht eindeutig erklärbar (s. Diagramm 52). Im Vergleich der mittleren Grammaturen zeigt das Papier AVW 250 g/m² die stärksten Veränderungen, wobei die stärkste bei dem Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen (12 x 5 min VE-H₂O) zu verzeichnen ist (s. Diagramm 50 und Diagramm 53). Innerhalb der Gruppe der Papiere mit den höchsten Flächengewichten zeigen die Papiere VDA 300 g/m² und FK 450 g/m² die stärksten Veränderungen (s. Diagramm 51 und Diagramm 54). Bei dem Wässerungszyklus mit Zwischentrocknungen zeigt sich auch bei dem Papier COPW 300 g/m² eine starke Veränderung.

5.9 Fazit / Risikobewertung und Handlungsempfehlungen

Auf Grundlage der zuvor detailliert beschriebenen Ergebnisse lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

- Jede wässrige Behandlung verändert das Erscheinungsbild von geprägten Papierreliefs. Die auf die wässrigen Behandlungen zurückzuführenden Veränderungen liegen in der Höhe überwiegend zwischen 0,1 und 0,15 mm (im Durchschnitt 0,13 mm) und in der Breite zwischen 0,01 und

0,05 mm (im Durchschnitt 0,03 mm). Bezogen auf die Relieffhöhen zeigen sie sich als Abflachung. In der Reliefbreite treten sie sowohl in Form von Stauchungen als auch Streckungen auf. Ohne ein Vergleichsbild sind diese Veränderungen mit dem bloßen (geschulten) Auge lediglich als leichte Unschärfe wahrnehmbar.

Die Abflachung der Relieffhöhen lässt sich zum einen als Konsequenz aus den bei der wässrigen Behandlung gelösten Spannungen im Papier erklären, welche beim Prägeprozess entlang des Motivs entstanden sind. Bei der Wässerung nimmt die unter Druck und Kraftereinwirkung eingefrorene Form der Reliefs in ihrer Ausprägung durch irreversible Schrumpfungsvorgänge und Faserverhornung ab. Zum anderen kann auch die Ausdehnung in horizontaler Ebene zur Abflachung beigetragen haben.

Streckungen und Stauchungen in der Fläche sind nur mit Materialverdrängung möglich und fallen daher naturgemäß geringer aus als die Abflachung des Reliefs.

- Die Dimensionsveränderungen treten zeitgleich mit dem ersten Wässern und Trocknen auf. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen auf, dass der Einfluss der Wässerungsdauer, der Wässerungszusätze oder der Einsatz von Bleichmedien als eher unwesentlich einzuschätzen ist.
- Eine Ausnahme bildet der zyklische Wechsel zwischen wässriger Behandlung und Trocknung, welcher, wie bereits in Kapitel 4.4.7 ausgeführt, mit einer stetigen Verhornung der Papierfasern einhergeht. Für das praktische Arbeiten ist daher zu empfehlen, die Anzahl der Wässerungs- und Trocknungsdurchgänge auf ein Minimum zu reduzieren.
- Der Vergleich der verschiedenen Flächengewichte innerhalb einer Papiersorte verdeutlicht, dass die Grammatik bezogen auf die behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen des Reliefs eine eher untergeordnete Rolle spielt. Leichte Tendenzen lassen vermuten, dass Papiere mit größeren Flächengewichten etwas stärkere Veränderungen aufweisen.
- Dagegen zeigt der Vergleich ähnlicher Flächengewichte unterschiedlicher Papiersorten, dass die Papierzusammensetzung ein eher ausschlaggebender Faktor für die behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen des Reliefs ist. Größere Veränderungen sind unter anderem bei der Papiersorte Velin d'Arches (VDA) zu beobachten, was auf die hohe Wasseraufnahme- und Quellfähigkeit der Hadernzusammensetzung und den

nicht vorhandenen Ligninanteil zurückzuführen sein dürfte. Bei der Papiersorte Artic Volume White (AVW) und dem Filterkarton (FK) stehen die größer ausgefallenen Veränderungen vermutlich im Zusammenhang mit der Oberflächenbeschichtung beziehungsweise der nicht vorhandenen Leimung. Auch die Laufrichtung des Papiers kann bei den behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen eine Rolle spielen. Die Feuchtdehnung isotroper Papiere (Probekörper VDA und FK) ist deutlich höher als die von Maschinenpapieren (alle anderen Probekörper). Auch ist bekannt, dass eine hohe Blattdichte, welche indikativ für die Anzahl von Zwischenfaserbindungen ist, eine höhere Trockenschumpfung und Feuchtdehnung zur Folge haben kann.

- Abgesehen von den Dimensionsveränderungen des Reliefs, hat sich bereits bei der visuellen Begutachtung gezeigt, dass vor allem sehr glatte oder gestrichene Papiersorten wie Artic Volume White (AVW) und teilweise Smooth Blanc (SB), sehr problematisch auf eine wässrige Behandlung reagieren können. Es können, wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, irreparable Schadensbilder entstehen.

5.10 Offen gebliebene Fragestellungen

Auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Messdaten sowie deren Auswertung war es möglich, erste Handlungsempfehlungen für die Restaurierungspraxis zu formulieren. Um diese Handreichung zukünftig noch erweitern zu können, besteht weiterer Untersuchungsbedarf, der im Folgenden erläutert wird.

Eine der bisher noch nicht untersuchten Einflussgrößen ist die Materialalterung. Zu erwarten ist, wie in Kapitel 4.4.6 beschrieben, dass das Wasseraufnahmevermögen sowie die Quellfähigkeit von Cellulose im Laufe ihrer Alterung abnehmen. Dies bedeutet, dass bei gealterten Papieren weniger große Dimensionsveränderungen auftreten. Ebenfalls außen vor geblieben ist die Untersuchung holzhaltiger Papiere. Aufgrund des höheren Ligningehalts ist auch hier von geringeren Dimensionsveränderungen auszugehen. Hinsichtlich der Betrachtung verschiedener Behandlungsverfahren lohnt es sich zu untersuchen, wie groß die Auswirkungen schonenderer Befeuchtungsverfahren sind, bei denen deutlich weniger Feuchtigkeit in das Objekt eingetragen wird.

Neben den Dimensionsveränderungen des Reliefs führt jede wässrige Behandlung auch zu Veränderungen anderer optisch wahrnehmbarer Merkmale wie beispielsweise der Oberflächenrauheit, welche ebenfalls einer näheren Untersuchung unterzogen werden könnten.

Da die bisherigen Untersuchungen ausschließlich darauf abzielten, das Phänomen der Papierquellung und -schrumpfung nach Befeuchtung und Trocknung messtechnisch zu untersuchen, ist es interessant zu prüfen, ob und wie sich Veränderungen des Reliefs durch vorbeugende Maßnahmen minimieren oder verhindern lassen. Heather Hendry, Restauratorin am Yale Center for British Art, stellt in einem Dokumentationsbericht von 2001 bereits eine mögliche Präventivmaßnahme vor. Gegenstand ihres Artikels ist der Prägedruck *Homage to Webern No. 1* des Künstlers Yves Gaucher, welcher an mehreren Stellen Metallflecken aufwies, die entfernt werden sollten. Um das geprägte Relief während der vorgesehenen Komplexierung sowie Bleichbehandlung mit anschließender Wässerung dimensionsstabil zu halten, füllte sie die Hohlräume des Reliefs mithilfe einer Cyclododecan-Schmelze auf. Das Cyclododecan fungierte im erstarrten Zustand als temporärer physikalischer Support. Nach den Behandlungen sublimierte das flüchtige Bindemittel bei Raumtemperatur.¹⁰⁴

6 Praxisbeispiel

Die beschriebenen theoretischen Grundlagen sowie die gewonnenen Erkenntnisse aus den eigenen Versuchsreihen werden im Folgenden exemplarisch auf den Prägedruck *Hommage à Fontana* des Künstlers Günther Uecker übertragen. Das Objekt dient als Fallbeispiel, da zur Behandlung des vorgefundenen Schadensbildes eine wässrige Behandlung vorgesehen ist.

6.1 Bedeutung des Prägedrucks im Gesamtwerk Günther Ueckers

Einem breiten Publikum ist Günther Uecker als „Nagelkünstler“ bekannt. Zu einem seiner ersten Nagelbilder gehört die Arbeit mit dem Titel *Informelle Struktur*.¹⁰⁵ Ab 1963 begann Uecker damit, Gegenstände des täglichen Gebrauchs zu

¹⁰⁴ HENDRY 2001, S. 5-7.

¹⁰⁵ SCHMIED 1972, S. 25 ff.

übernageln und brachte damit die wohl auffälligste Werkgruppe seines Œuvres hervor.¹⁰⁶

Parallel dazu griff er seit Beginn der 1960er Jahre die Technik des Prägedrucks auf und schuf etliche druckgrafische Varianten seiner berühmten Nagelreliefs.¹⁰⁷ Neben anderen druckgrafischen Techniken nimmt der Prägedruck, insbesondere die Blindprägung als dessen elementarste Form, einen herausragenden Stellenwert im grafischen Schaffen Günther Ueckers ein.¹⁰⁸ Bedauerlicherweise ist diese Werkgruppe jedoch bis heute noch nicht wissenschaftlich aufgearbeitet worden und scheint dadurch in der allgemeinen Wahrnehmung den plastischen und installativen Arbeiten sowie den Gemälden nachgeordnet zu sein.¹⁰⁹ Trotz dieses Eindrucks handelt es sich bei den Papierarbeiten Günther Ueckers um uneingeschränkt autonome Kunstwerke. Der Künstler wählte dieses Medium ganz bewusst, um damit seinen Bildideen bestmöglich Ausdruck zu verleihen.¹¹⁰

Anfangs folgte die Flächengestaltung der Prägedrucke noch einer strengen regelhaften Gliederung und symmetrischer Reihung und griff geometrische Formen wie den Kreis oder das Quadrat auf. Später lösten sich diese eher starren Strukturen zu freien Rhythmen, lockeren Streuungen und dynamischen Konzentrationen wie beispielsweise Strudeln oder Spiralen auf. Das vereinheitlichende Weiß lässt die Oberflächen entstofflicht wirken und die Effekte von Licht und Schatten besonders zur Geltung kommen. Mit jedem Wechsel der Lichtverhältnisse und jeder Bewegung der Betrachter*innen verändern sich die Strukturen und scheinen selbst in Bewegung zu geraten. Die Themen Bewegung und Licht prägen damit nicht nur das Gesamtwerk Günther Ueckers, sondern besonders auch seine druckgrafischen Arbeiten.¹¹¹

6.2 Motiv

Das Werk *Hommage à Fontana* ist eine Huldigung an den italienischen Avantgardisten Lucio Fontana (1899-1968). Abgebildet ist ein stilisierter Daumenabdruck, welchen Fontana gelegentlich zum Signieren benutzte. Das Motiv setzt sich aus

¹⁰⁶ THIELEN 2004, S. 331.

¹⁰⁷ WIESE 2006, S. 50.

¹⁰⁸ STAHLHUT 2000, S. 296.

¹⁰⁹ WIESE 2006, S. 48.

¹¹⁰ TOLNAY 2006, S. 9 f.

¹¹¹ HOLECZEK 1987, S. 17., TOLNAY 2006, S. 10.

zwei Bildelementen zusammen. Im unteren Bereich des Blattes sind auf einer fast kreisrunden Fläche etwa 200 Nagelköpfe in Form einer Blindprägung im Papier abgeformt. Im oberen Bereich des Blattes bildet eine Graphitlinie in der Form eines Ovals einen Rahmen um das geprägte Relief. Mit dieser Formwahl stellt Günther Uecker einen weiteren Bezug zum Schaffen Lucio Fontanas her, der für seine Bildserie *La fine di Dio* eiförmig zugeschnittene sowie teilweise bemalte Leinwände wild durchstoßen hatte. Weiterhin sind Rückbezüge auf seine bereits im Jahr 1962 entstandenen Arbeiten *Hommage à Fontana I und II* zu erkennen.

6.3 Bildästhetik

Besonderheit des Prägedrucks ist seine Verortung an der Grenze zwischen der Zweidimensionalität der Grafik und der Dreidimensionalität der Plastik. Bei Günther Ueckers *Hommage à Fontana* lenken insbesondere die realen, abgeformten Nagelstrukturen sowie die monochrome Bildgestaltung den Fokus auf die dreidimensionale Form.¹¹² Diese wiederum ist unmittelbar eingebettet in den Betrachtungsraum. In Abhängigkeit von der Beleuchtungssituation des Raumes und der Position des Betrachters oder der Betrachterin kann das Nagelrelief entweder nahezu ausgelöscht oder besonders stark hervorgehoben erscheinen.¹¹³

Voraussetzung für die uneingeschränkte Wirkung dieses Wechselspiels zwischen Licht und Schatten ist die monochrome Bildgestaltung. Die Farbe Weiß besitzt in diesem Zusammenhang für Günther Uecker eine besondere Bedeutung und dominiert viele seiner Werke. Als Licht- und auch Nichtfarbe¹¹⁴ symbolisiert sie für ihn einerseits universelles Sein, andererseits den Begriff der Leere. Das universelle Sein versteht er im Sinne vom Weiß als universellste Farbe, als das Licht, welches aus allen Farben zusammengesetzt ist.¹¹⁵ Den Begriff der Leere verbindet Uecker im Sinne der buddhistischen Tradition mit der „Welt der Stille“.¹¹⁶ Es geht dementsprechend nicht um eine weiß angestrichene Welt, sondern um einen „Raum des geistigen Seins“.¹¹⁷

¹¹² HELMS 1970, S. 6.

¹¹³ Ebd., S. 13.

¹¹⁴ HOLECZEK 1987, S. 17.

¹¹⁵ SCHMIED 1972, S. 25 ff.

¹¹⁶ THIELEN 2004, S. 330.

¹¹⁷ HOLECZEK 1987, S. 17.

Auch das Element des Nagels transportiert sowohl eine formale als auch inhaltliche Aussage. Mit dem Nagel überführt Günther Uecker einen Gegenstand aus dem praktischen, alltäglichen Gebrauch in einen ästhetischen, künstlerischen Kontext¹¹⁸ und überwindet damit die Trennung zwischen „Banalem“ und „Erhabenem“ - im übertragenen Sinn zwischen Leben und Kunst.¹¹⁹ Der Nagel als seriell hergestelltes Industrieprodukt, gewohnheitsmäßig zum Festhalten und Fixieren von Objekten genutzt, dient in den Werken Günther Ueckers dazu, Bewegung zu demonstrieren und zu artikulieren.¹²⁰ Dem Prozess des Nageleinschlagens wird seit der mitteleuropäischen Antike eine hohe Bedeutung zuteil. Nageln wurde als eine Art Weihhandlung verstanden mit dem Zweck etwas zu bekräftigen und zu besiegeln oder ein Urteil zu fällen. Im Altertum wurde davon ausgegangen, dass das Einschlagen eines Nagels in einen Baum Krankheiten fernhielt. Während des Ersten Weltkriegs entstanden durch das Benageln von Wappen eiserne Kriegswahrzeichen und auch in heutigen militärischen Kontexten gilt das Nageleinschlagen als ein symbolischer Brauch um Gegenstände wie z.B. Armeefahnen zu weihen.¹²¹ „Demnach haftet Nagel und Nageln – neben der Alltäglichkeit – unterschwellig auch eine mystisch-mythische Komponente an, die in Ueckers Werken gewiss ebenso enthalten ist wie die Erhöhung des Nagels zum Kunstmaterial und die Profanisierung der Kunst durch ihr Material.“¹²² Überdies ist in den genagelten Reliefs auch immer ein unmittelbarer Bezug zum menschlichen Körper, speziell dem Körper des Künstlers zu erkennen, da dieser die Abstände der Nägel entsprechend seiner eigenen Körperproportionen (Dicke seiner Finger) wählte.¹²³

6.4 Werkgenese

Da es bisher kaum Untersuchungen zur Werkgruppe der Prägedrucke im Œuvre Günther Ueckers gibt, liegen nur wenige Informationen zu den verwendeten Materialien sowie zu einzelnen Arbeitsschritten vor. Abbildungen von seinen Druckstöcken lassen aber zumindest teilweise eine Rekonstruktion des Werkprozesses zu.

¹¹⁸ Ebd., S. 14 f.

¹¹⁹ GASSEN 1987, S. 38.

¹²⁰ SCHMIED 1972, S. 31.

¹²¹ HOLECZEK 1987, S. 16.

¹²² Ebd., S. 16.

¹²³ GASSEN 1987, S. 35., THIELEN 2004, S. 332.

Bei seinen geprägten Nagelbildern handelt es sich um Blindprägedrucke, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass das Motiv ohne Farbe erhaben aus der Fläche hervortritt. Die Werkentstehung beginnt mit der Herstellung eines Prägestocks. Dabei handelt es sich um eine robuste Holzplatte, auf die das angestrebte Papierformat sowie das Motiv in einer groben Skizze angelegt werden. Anschließend werden die Nägel in die Platte hineingetrieben und gegebenenfalls beispielsweise durch Flachs schlagen weiterbearbeitet. Die entstehende Nagelstruktur muss möglichst dicht und gleichmäßig eben sein, um ein Reißen des Papiers beim Abformen zu verhindern.¹²⁴ Bei den Papierträgern handelt es sich meist um besonders reißfeste und schwere Büttenpapiere, die sich der Künstler zum Teil nach seinen Maßvorgaben individuell schöpfen lässt. Das Papier wird dann im feuchten Zustand auf den mit eingeschlagenen Nägeln versehenen Druckstock gepresst, wodurch das papierene Relief entsteht. Ob der Zuschnitt des endgültigen Formats vor oder nach dem Prägen erfolgt, ist nicht eindeutig zu rekonstruieren.

6.5 Papierträger

Bei dem Papierträger handelt es sich um ein cremefarbenes Velinpapier mit beschnittenen Blattkanten. Das Papier misst 49,8 x 70,0 cm und besitzt ein Flächengewicht von etwa 300 g/m². Es besteht aus Zellstoff (s. Anlage 4.b) und weist ein dichtes Fasergefüge auf. Die Verwendung als Prägepapier sowie die schlechte Wasser-Benetzbarkeit lassen auf eine mittlere Leimung schließen. Wasserzeichen, Stempel sowie andere auf die Provenienz des Objektes hinweisende Vermerke (Signaturen etc.) sind nicht vorhanden. Auf dem Blatt unten links ist handschriftlich vermerkt, dass es sich um das 51. Druckexemplar einer 150 Blatt starken Auflage handelt. Unten rechts ist das Werk vom Künstler mit Bleistift signiert und datiert.

¹²⁴ STAHLHUT 2000, S. 298 f.

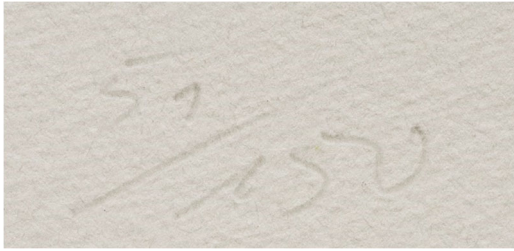


Abb. 7: Handschriftliche Kennzeichnung des Druckexemplars innerhalb der Auflage. Foto: Hanna Freres (TH Köln).

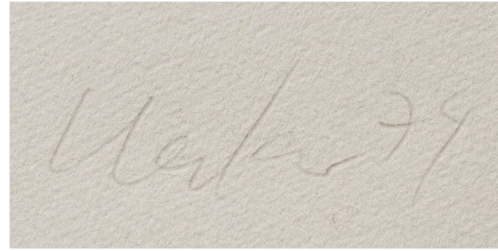


Abb. 8: Signatur und handschriftliche Datierung des Künstlers. Foto: Hanna Freres (TH Köln).

6.6 Zustand

Das Objekt befindet sich insgesamt in einem gut erhaltenen Zustand. Es liegt vollständig plan und das geprägte Relief ist präzise definiert. Entsprechend des Konzepts der artothek Köln ist das Objekt durch regelmäßige Präsentation und Ausleihe stark beansprucht. Vor allem die Einwirkung von natürlicher oder künstlicher Beleuchtung hat dazu geführt, dass der Papierträger an den Stellen, die nicht durch das Passepartout und den Rahmen abgedeckt waren, gleichmäßig verbräunt ist (s. Abb. 9). Der chemische Abbau von Papier ist häufig mit der Bildung von farbigen Abbauprodukten verbunden. Dabei gehören die saure Hydrolyse sowie die Oxidation zu den relevantesten Abbaumechanismen. Durch die Einwirkung elektromagnetischer Strahlung (Licht) werden diese Prozesse erheblich beschleunigt.¹²⁵ Bei alterungsbedingten Verfärbungen von Papier handelt es sich um organische Verbindungen, die die Wellenlängen des sichtbaren Lichts selektiv absorbieren. Diese Verbindungen enthalten chromophore Gruppen mit konjugierten Doppelbindungssystemen.¹²⁶ Einige dieser farbigen Verbindungen sind wasser- oder lösemittellöslich und lassen sich durch wässrige Behandlungen aus dem Papier extrahieren. Farbgebende Molekülstrukturen können aber auch chemisch an die Cellulose gebunden und dadurch wasserunlöslich sein. Dies ist eine wesentliche Einschränkung für wässrige Behandlungsverfahren zur Reduzierung alterungsbedingter Papierverfärbungen.¹²⁷

¹²⁵ DANIELS 2015, S. 361., WHITMORE 2015, S. 257.

¹²⁶ WHITMORE 2015, S. 256.

¹²⁷ DANIELS 2015, S. 362.



Abb. 9: Objektansicht recto. Rot markiert ist die flächige lichtinduzierte Verbräunung des Papierträgers. Foto: Hanna Freres (TH Köln).



Abb. 10: Objektansicht verso. Auf der lichtgeschützten Rückseite ist der Papierträger nicht verbräunt. Foto: Hanna Freres (TH Köln).

Als weitere Auffälligkeit ist bei der Betrachtung des Objekts im Durchlicht zu erkennen, dass das Faservlies im Bereich des geprägten Reliefs unterschiedlich dicht ist. Dies ist jedoch nicht als Schadensbild im eigentlichen Sinne zu bewerten, sondern vielmehr Resultat des Herstellungsprozesses. Bei der Abformung vom Druckstock wird das feuchte Papier hoher Spannung ausgesetzt, wodurch das Blatt zum Teil gestaucht beziehungsweise gestreckt wurde (s. Abb. 11 und Abb. 12).



Abb. 11: Kartierung der Stellen, an denen das Fasergefüge durch den Prägeprozess gestreckt wurde. Foto: Hanna Freres (TH Köln).

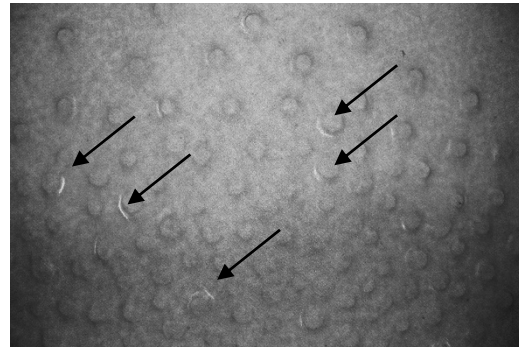


Abb. 12: Detailaufnahme des Objekts im Durchlicht. Stellen, an denen das Fasergefüge weniger dicht ist, sind lichtdurchlässiger und erscheinen hell (s. Pfeile).

6.7 Restaurierungsziel

Aufgrund des stabilen Zustands des Objekts sind keine substanzsichernden Maßnahmen erforderlich. In Absprache mit der artothek Köln wurde versucht, die durch die regelmäßige Lichteinwirkung und die abdeckende Rahmung entstandene Verbräunung zu reduzieren.

Dokumentierte Interviews mit Günther Uecker belegen, dass sich der Künstler bereits bei der Herstellung seiner Kunstwerke auch mit deren Erhaltung auseinandersetzt. So wählt und verarbeitet er seine Materialien ganz bewusst, um materialspezifischen oder kunsttechnologischen Schäden und Veränderungen an seinen Kunstwerken vorzubeugen.¹²⁸ Für seine Nagelarbeiten testete er beispielsweise verschiedene Rostschutzmittel, um seine Werke langfristig zu erhalten.¹²⁹

Ziel der Restaurierung war deshalb, die ursprünglich weiße Bildfläche, die für den Künstler mit einer sinntragenden Symbolik verbunden ist, wieder hervorzubringen und damit sowohl den Intensionen des Künstlers als auch den Bedarfen der artothek Köln zu entsprechen. Wichtigste Prämisse bei der Umsetzung des Restaurierungsziels war eine möglichst schonende Behandlung des Reliefs, um dessen charakteristisches Aussehen nicht zu beeinträchtigen. Entsprechend der Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihe wurde die Anzahl der Wässerungen und Zwischentrocknungen im Rahmen der Nassbehandlung auf ein Minimum reduziert.

¹²⁸ THIELEN 2004, S. 340.

¹²⁹ Ebd., S. 336.

6.8 Risikoeinschätzung

In Bezug auf die Papierqualität und den Erhaltungszustand des Objektes gibt es keine generellen Vorbehalte gegenüber einer wässrigen Behandlung. Das Blatt ist mechanisch stabil und zeigt bis auf die flächige Verbräunung keine weiteren Abbauerscheinungen. Es gibt keine Hinweise darauf, dass das Blatt beispielsweise im Rahmen einer früheren Restaurierung behandelt wurde. Daher ist davon auszugehen, dass sich das Blatt bei einer ganzheitlichen Behandlung relativ gleichmäßig verhält. Die Leimung des Papiers wird den Prozess der Wasseraufnahme etwas bremsen, jedoch ist die Wasseraufnahmekapazität des Blattes nicht zu unterschätzen. Es ist damit zu rechnen, dass das Gewicht des Blattes durch die Wasseraufnahme deutlich zunimmt, während gleichzeitig seine mechanische Festigkeit im nassen Zustand abnimmt. Um vor allem den kritischen Bereich der Prägung sowie den Übergang zum Bereich ohne Prägung zu schützen, sollte eine stabile Unterlage verwendet sowie gegebenenfalls eine weitere Person, die das Handling unterstützt, hinzugezogen werden. Bei längerer und / oder wiederholter Wässerung ist außerdem einzukalkulieren, dass ein Teil der Leimung mit ausgewaschen wird und dadurch die Form- und Dimensionsstabilität abnimmt. Da durch das Wässern im Blatt „eingefrorene“ Spannungen gelöst werden, könnten nach dem Trocknen Planlagestörungen auftreten. Dementsprechend muss ein geeignetes Trocknungsverfahren gefunden werden, um das Blatt wieder in einen planen Zustand zu versetzen.

6.9 Restaurierung

Entsprechend des Themenschwerpunkts dieser Arbeit lag der Fokus der Restaurierung auf der wässrigen Behandlung sowie der Trocknung des Objekts. Aufgrund der Komplexität des Objekts ist es jedoch notwendig, diese Aspekte eingebettet im Gesamtkonzept zu betrachten. Dementsprechend werden im Folgenden alle durchgeführten Restaurierungsmaßnahmen beschrieben.

6.9.1 Trockenreinigung

In Vorbereitung auf die vorgesehene Nassbehandlung wurde das Objekt einmal von beiden Seiten trocken gereinigt, um zu vermeiden, dass aufliegende Schmutzpartikel durch den Kontakt mit Wasser in das Papiervlies eingetragen werden und sich dort zwischen den Fasern festsetzen. Entsprechend der Emp-

findlichkeit der Papieroberfläche gegenüber mechanischer Belastung wurde dafür ein Zeichenbesen mit weichen Ziegenhaaren benutzt. Durch die Rahmung war das Objekt gut geschützt, so dass kaum Auflagerungen vorhanden waren.

6.9.2 Nassbehandlung

In Vorbereitung auf die Wässerung im Bad, wurde das Objekt zunächst mithilfe eines wässrigen Sprühnebels befeuchtet. Um eine möglichst gleichmäßige Befeuchtung zu erreichen, wurde das Objekt aus einiger Distanz besprüht, so dass sich die Wassertröpfchen sehr fein in der Luft verteilen konnten. Neben der angestrebten Entspannung des Papiers, sollte die Befeuchtung auch dazu dienen, Deformationen, die durch eine ungleichmäßige Wasseraufnahme verursacht werden können, entgegenzuwirken und die Papierfasern für die Wasseraufnahme besser zugänglich zu machen. Anschließend folgte eine 10-minütige Behandlung im Wasserbad. Die Nassbehandlung hat gleichermaßen die Extraktion der farbigen und löslichen Abbauprodukte aus dem Papiervlies sowie die strukturelle Neukonfiguration der Fasern zum Ziel. Auf diese Weise soll eine optische Aufhellung sowie eine Verbesserung der Langzeitstabilität des Papiers erreicht werden. Durch die Wasseraufnahme werden wasserlösliche Produkte im Papiervlies hydratisiert und in Lösung überführt. Wenn das Papier im Bad vollständig von Wasser umgeben ist, diffundieren die gelösten Produkte langsam aus dem Blatt in das umgebende Wasser. Die Extraktionsprodukte reichern sich zunächst in unmittelbarer Umgebung des Papiers an, wodurch sich der Diffusionsprozess verlangsamt. Um eine erneute Ablagerung der gelösten Substanzen auf dem Objekt zu vermeiden und um den Prozess zu beschleunigen, muss das Wasser in Bewegung gehalten werden, damit das Konzentrationsgefälle - die Triebkraft der Diffusion - möglichst groß gehalten wird.¹³⁰ Das Objekt wurde über den gesamten Zeitraum der Behandlung auf einem porösen Träger gelagert, der als Stützmaterial beim Handling des durch die Befeuchtung in seiner mechanischen Festigkeit geschwächten Papiers diente. Als Auflagematerial eignen sich dazu Vliesstoffe aus Polyester zum Beispiel Hollytex, die den Wassertransport nicht behindern sowie dimensionsstabil sind und dem Objekt ausreichend Raum für die Feuchtdéhnung bieten. Nach der ersten Wässerung wurde das Objekt an den Rändern

¹³⁰ KOSEK 2015, S. 397 f.

leicht beschwert trocknen gelassen. Dabei wurde die Oberfläche mit einem Polyester volumenvlies abgedeckt, um den Trocknungsprozess hinsichtlich seiner Gleichmäßigkeit und Geschwindigkeit zu regulieren.

6.9.3 Zwischenbeurteilung nach der ersten Wässerung und Trocknung

Nach der ersten Wässerung und Trocknung erschien der Papierton insgesamt schon etwas aufgehellt, allerdings war die in Form eines Lichtrandes manifestierte Grenze zwischen dem verbräunten und dem nicht verbräunten Bereich noch immer deutlich sichtbar. Des Weiteren zeigten sich über das gesamte Blatt verteilt an verschiedenen Stellen winzige, sprenkelartige Flecken, die auf das Vorhandensein von Eiseneinschlüssen im Papier hindeuteten. „Eisen ist ein Übergangsmetall, welches bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 65 % oder durch direkte Einwirkung von Wasser auf das Objekt korrodiert. Dabei werden Eisen(II)hydroxid-Ionen gebildet, die als ein weißes, farbloses, aber stark reaktives Salz ausfallen [...]. Mit Sauerstoff aus der Luft können sie weiter zu Eisen(III)hydroxidoxid oxidiert werden. Eisen(III)hydroxidoxid ist ein Bestandteil von Rost und für dessen Farbe verantwortlich. Die Eisenpartikel werden in Form von Stockflecken im Papier sichtbar.“¹³¹ Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde ein Test auf Eisen(II)-/Eisen(III)-Ionen¹³² durchgeführt und das Objekt unter UV-Strahlung betrachtet. Mithilfe des Tests konnten sowohl Eisen(II)- als auch Eisen(III)-Ionen nachgewiesen werden (s. Anlage 4.c). Unter UV-Anregung erschienen die Zentren der Flecken dunkelblau bis schwarz (s. Abb. 13). Teilweise waren angrenzend zusätzlich gelb-orange und blass-gelb fluoreszierende Ringe zu erkennen.

¹³¹ JACOBY, PERNAK 2019, S. 6.

¹³² Für den Nachweis von Eisen(II)-/Eisen(III)-Ionen wird ein nicht blutendes Indikatorpapier verwendet. Dieses enthält den Indikatorstoff Bathophenanthrolin, welcher mit vorhandenen Eisen(II)-Ionen einen intensiv magentafarbenen Komplex bildet. Da der Indikator spezifisch für Eisen(II)-Ionen ist, können in das Indikatorpapier migrierte Eisen(III)-Ionen nur indirekt, durch Zufügung eines Reduktionsmittels (z.B. Ascorbinsäure), nachgewiesen werden. Vgl. Johan G. Neevel, Birgit Reißland: Bathophenanthroline Indicator Paper. Development of a New Test for Iron Ions. In: PapierRestaurierung Vol. 6 (2005), No. 1.

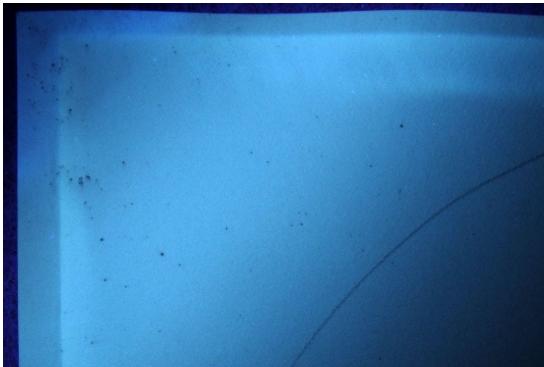


Abb. 13: Detailansicht der linken oberen Blattecke. Die im Papier verteilten Metalleinschlüsse erscheinen unter UV-Anregung dunkelblau bis schwarz.



Abb. 14: Unter Tageslichtbedingungen erscheinen oxidierte Metalleinschlüsse als orange-braune Rostflecken.

Dass historische Papiere Eisen enthalten, ist nicht unüblich. Dieses gelangt häufig schon während des Herstellungsprozesses beispielsweise durch den Verschleiß von Maschinenteilen oder Werkzeugen oder auch durch Verunreinigungen im Wasser in den Faserstoff.¹³³ „Eisen-Ionen können aber auch durch später erfolgten Kontakt mit eisenhaltigen Materialien wie Heftklammern, Reiszwecken und Nägeln, eisenhaltigen Tinten oder auch Pigmenten und eisenhaltigen Malmaterialien in die Papiersubstanz gelangen.“¹³⁴ Im Falle des Uecker-Prägedrucks könnten sich auch Eisenstäube aus seiner Arbeitsumgebung auf das Objekt niedergeschlagen haben.

6.9.4 Behandlung der Eisenflecken

Eisenhaltige Einschlüsse können auf unterschiedliche Weise behandelt werden. Sie können durch Säuren zersetzt, mithilfe von Komplexbildnern maskiert oder chemisch reduziert werden.¹³⁵ Die Flecken auf dem Uecker-Prägedruck wurden lokal mit 3 %-igem Oxalsäure-Dihydrat ($C_2H_2O_4 \cdot 2 H_2O$) behandelt. Die Chemikalie wurde mit einem Pinsel auf das trockene Blatt aufgetragen. Da viele der Eiseneinschlüsse bei Tagelichtbeleuchtung nicht sichtbar waren, erfolgte die Behandlung unter einer UV-Lampe. Alle behandelten Stellen wurden genau beobachtet, da Oxalsäure eine intensive Bleichwirkung besitzt und die Entstehung von hellen Flecken durch das Ausbreiten der Flüssigkeit im Faservlies vermieden werden sollte.

¹³³ JACOBY, PERNAK 2019, S. 3.

¹³⁴ Ebd., S. 3.

¹³⁵ BURGESS 1991, S. 39.

6.9.5 Bleichbehandlung

Um keine weiteren unerwünschten Oxidationsreaktionen zu provozieren, wurde für die Bleichbehandlung ein reduktives Bleichmittel gewählt. Das Blatt wurde nach dem Auftragen des Oxalsäure-Dihydrats direkt weiter behandelt und mit einer 4 %-igen Natriumborhydrid-Lösung entlang des Lichtrandes besprüht. Nach einer kurzen Einwirkzeit wurde das Objekt anschließend für 10 Minuten in ein 2 %-iges Natriumborhydrid-Bad gegeben. Die Behandlung musste beendet werden, als das Blatt erste Erscheinungen von Blistering¹³⁶ zeigte (s. Abb. 15). Nach dem Ausspülen des Bleichmittels in einem separaten Wässerungsbad konnten die entstandenen Blasen jedoch vorsichtig auf einer festen Unterlage mithilfe eines weichen Pinsels ausgestrichen werden. Um die gegenüber mechanischer Belastung empfindliche Oberfläche zu schützen, wurde diese mit einem Hollytex-Vlies abgedeckt.



Abb. 15: Objekt nach dem 10-minütigen Bleichbad. Es zeigten sich erste Erscheinungen von Blistering (linke Seite), die mit einem weichen Pinsel ausgestrichen werden konnten (rechte Seite). Foto: Svenja Tempich (TH Köln).

6.9.6 Einbringen einer alkalischen Reserve

Zur langfristigen Stabilisierung der Papiersubstanz wurde eine alkalische Reserve in Form von Calciumcarbonat (CaCO_3) in das Papier eingebracht. Dieses befindet sich zunächst in Lösung und wird bei der Trocknung feinkristallin im Faservlies abgeschieden. Die alkalische Reserve schützt das Papier vor der zerstörenden Wirkung saurer Verbindungen, die im Verlauf der Alterung im Papier entstehen oder von ihm aufgenommen werden.

¹³⁶ Blasenbildung, lokale Abhebungen der Papieroberfläche (Delamination)

Darüber hinaus sorgt er dafür, dass im Papier ein moderat alkalisches Milieu vorherrscht.¹³⁷ Das Blatt wurde anschließend wieder an den Rändern leicht beschwert und mit einem Polyestervolumenvlies abgedeckt trocken gelassen.

6.9.7 Trocknung

Trotz der Verwendung eines reduzierenden Bleichmittels wies das Blatt nach der Trocknung – entgegen der Erwartung hinsichtlich der chemischen Mechanismen – wieder einen neuen Eisenfleck nahe des oberen Blattrandes auf (s. Abb. 16). Um eine weitere Badbehandlung zu vermeiden, wurde dieser Fleck lokal auf dem Saugtisch mit 3 %-igem Oxalsäure-Dihydrat behandelt und mit vollentsalztem Wasser nachgespült. Je nach Betrachtungswinkel ist noch ein leichter „Schatten“ des Flecks sichtbar (s. Abb. 17). Da das Risiko die Cellulose durch eine Fortsetzung der Behandlung des Flecks zu schädigen zu groß war, wurde auf diese verzichtet.

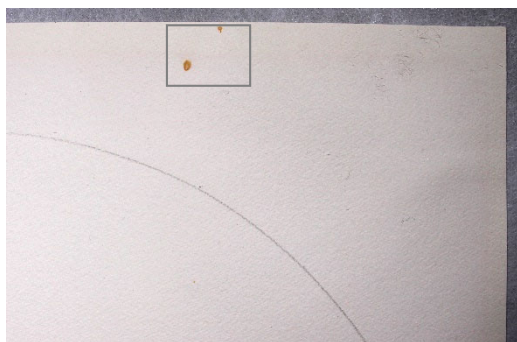


Abb. 16: Nach der Nass- und Bleichbehandlung sichtbar gewordene Eisenflecken am oberen Blattrand.

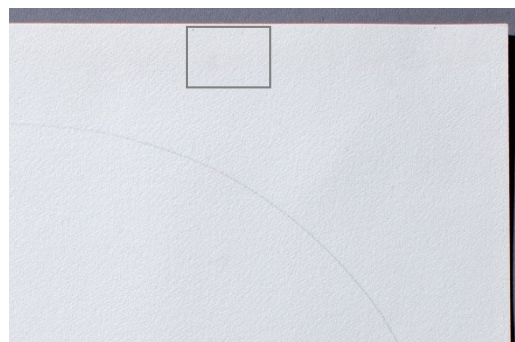


Abb. 17: Oberer Blattrand nach der Entfernung der Eisenflecken.

Um das Blatt wieder in seine ursprüngliche Planlage zu versetzen, wurde das Objekt noch einmal durch Besprühen befeuchtet und zunächst versuchsweise unter Druck getrocknet. Dabei wurde das Objekt flächig mit einer Aussparung des Reliefs zwischen Hollytex-Vliesen und Filzmatten gelagert und mit Brettern und Gewichten beschwert. Der offene Bereich des Reliefs wurde wieder mit einem Polyestervolumenvlies abgedeckt. Diese Methode führte jedoch zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Das Blatt zeigte Planlagestörungen, die auf die ungleichmäßige Trocknung im abgedeckten und nicht abgedeckten Bereich zurückzuführen waren. Daher war die Überlegung, die dem zweiten Versuch zugrunde lag, so wenig Objektfläche wie möglich abzudecken und das Blatt allein durch

¹³⁷ SMITH 2015, S. 452.

Beschweren der Ränder unter Zugspannung zu trocknen. Dabei konnte ausgenutzt werden, dass sich das Blatt im befeuchten Zustand um etwa 4 mm quer zur Laufrichtung ausdehnte und so beim Trocknen und Schrumpfen gespannt wurde. Diese Methode führte letztlich zu einer zufriedenstellenden Planlage des Objekts.

6.10 Konservatorische Empfehlungen

Für die artothek Köln als Kunst vermittelnde Institution besitzt das Ausstellen und Zeigen der Werke eine hohe Priorität. Dies gilt es, bei der Empfehlung konservatorischer Maßnahmen zu berücksichtigen. Bedingt durch die Ausleihe der Werke an Privatpersonen ist die Kontrolle der Gegebenheiten, denen das Werk ausgesetzt ist, begrenzt. Umso wichtiger ist es, den Rahmen der verfügbaren Möglichkeiten vollständig auszuschöpfen, um die Kunstwerke bestmöglich zu schützen. Dazu gehört, die Leihnehmenden für einen adäquaten Umgang mit den Kunstwerken zu sensibilisieren, bestmögliche Lagerungsbedingungen in der artothek Köln zu gewährleisten sowie das Kunstwerk bestmöglich für den Transport zu verpacken. Alle Werke sind bereits für eine einfache Handhabung dauerhaft gerahmt und werden so an die Leihnehmenden übergeben. Ein Nebeneffekt des Rahmens besteht darin, dass er gleichzeitig auch als Klimapuffer dient. Generell ist für Papierarbeiten gemäß DIN ISO 11799 *Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut* ein konstantes Raumklima von 14-20 °C und 40-55 % rF zu empfehlen.¹³⁸ Wie auch der Uecker-Prägedruck deutlich gezeigt hat, birgt vor allem die regelmäßige Einwirkung von Licht für Papierarbeiten ein sehr großes Schadensrisiko. Um optisch störende, lichtinduzierte Schäden wie Lichtränder zu vermeiden, sollten Grafiken möglichst freigestellt und nicht durch ein Passepartout abgedeckt montiert werden. Auch aus ästhetischer Sicht würde eine freigestellte Präsentation dem Charakter des Uecker-Prägedrucks näherkommen, da ein Passepartout den Bildausschnitt einengt und als „zweites Relief“ mit dem Relief des Prägedrucks in Konkurrenz tritt. Zugunsten einer unkomplizierten und sicheren Handhabung im Rahmen der Ausleihe soll das Objekt in diesem konkreten Fall dennoch ein Passepartout bekommen. Dieses soll neu aus archivgerechten und alterungsbeständigen Materialien angefertigt werden. Des Weiteren ist es auf lange Sicht sinnvoll, das einfache Glas in den Rahmen durch ein Glas zu ersetzen, welches die UV-Strahlung filtert. Zudem ist auch die

¹³⁸ ARCHIVE NRW (27.11.2021).

Dokumentation von Ausleihen sowie ein regelmäßiges Monitoring zu empfehlen, um lichtinduzierte, aber auch andere Veränderungen frühzeitig zu erkennen. Wenn Werke nicht ausgeliehen sind, sollten sie lichtgeschützt gelagert werden.

6.11 Reflexion

Ziel der Restaurierung war es, die Verbräunung des Objektes so zu reduzieren, dass die vom Künstler intendierte Bildästhetik wieder ablesbar ist. Durch eine kombinierte Nass- und Bleichbehandlung konnte eine sichtbare Aufhellung des Papiertons erreicht werden. Um die mechanische Belastungsgrenze der Papiersubstanz nicht zu überschreiten, wurde akzeptiert, dass ein minimaler farblicher Unterschied zwischen dem vom Passepartout abgedeckten und dem nicht abgedeckten Bereich bestehen geblieben ist. In Bezug auf die Hauptfragestellung dieser Arbeit ist positiv hervorzuheben, dass das geprägte Relief sowohl hinsichtlich seiner Ausformung als auch seiner Dimensionen rein optisch keine wahrnehmbaren Veränderungen aufweist. Auf Grundlage der vorangestellten Versuchsreihen ist zwar davon auszugehen, dass auch bei diesem Relief eine Abflachung stattgefunden hat, jedoch ist diese so gering, dass sie nicht mit dem bloßen Auge zu erfassen ist. Minimale Veränderungen einzelner Nagelabdrücke sind ausschließlich im direkten Vergleich der fotografischen Zustandsaufnahmen vor und nach der Behandlung zu erkennen.

Jedoch zeigt das konkrete Fallbeispiel auch, dass bei der Beurteilung der Behandlungen ebenso weitere Aspekte zu betrachten sind. Mit der Durchführung einer wässrigen Behandlung und dem Kontakt mit dem Luftsauerstoff bei der anschließenden Trocknung musste das Risiko in Kauf genommen werden, dass die im Papier vorhandenen Eiseneinschlüsse oxidiert werden könnten. Nach der Behandlung zeigten sich die oxidierten Metallpartikel in der Tat als winzige sprenkelartige Flecken auf dem Papier. Deshalb musste eine weitere Behandlung zur Entfernung der Flecken durchgeführt werden, die, wie bereits in Kapitel 6.9.4 beschrieben, an einer Stelle nur bedingt erfolgreich war (s. Abb. 17).

Eine weitere Herausforderung ergab sich durch die Einschränkung bei der Wahl einer geeigneten Trocknungsmethode. Aufgrund des geprägten Reliefs musste auf vollflächigen Pressdruck verzichtet werden. Die stattdessen angewendete partielle Beschwerung unter Aussparung des Reliefs hat zu einer ungleichmäßi-

gen Trocknung geführt und Planlagestörungen verursacht. Durch eine anschließende Trocknung unter Zugspannung konnte die ursprüngliche Blattdimension weitgehend wieder hergestellt werden.

In der Rückschau bleibt kritisch zu hinterfragen, inwiefern die positiven Ergebnisse in einem legitimen Verhältnis zur Beanspruchung des Objekts stehen.

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Objekt nun wieder mit Passepartout gerahmt werden soll, ist es absehbar, dass sich das Schadensbild wieder ähnlich ausbilden wird.

Das Konzept der artothek Köln lässt nur geringen Spielraum für Alternativen. Neben der Erneuerung des Passepartouts sollten die in Abschnitt 6.10 beschriebenen konservatorischen Empfehlungen beachtet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen als auch das exemplarische Fallbeispiel haben deutlich gezeigt, dass die Wechselwirkungen zwischen Papier und Wasser sehr komplex sind. Insbesondere bei Objekten mit dreidimensionalen Merkmalen muss die Durchführung einer wässrigen Behandlung sorgfältig abgewogen werden.

Die beschriebene und angewendete Methode der 3D-Profilometrie erwies sich als ein geeignetes Instrument, um behandlungsbedingte Veränderungen der Objektdimensionen messtechnisch zu quantifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass jede wässrige Behandlung das Erscheinungsbild von geprägten Papierreliefs verändert. Bezogen auf die Reliefhöhen liegen diese Veränderungen durchschnittlich bei 0,13 mm; bezogen auf die Reliefbreiten bei durchschnittlich 0,03 mm. Sie sind mit dem bloßen Auge nicht mehr differenziert wahrnehmbar. Die Dimensionsveränderungen treten zeitgleich mit dem ersten Wässern und Trocknen auf, wobei der Einfluss der Wässerungsdauer, der Wässerungszusätze oder des Einsatzes von Bleichmedien als eher unwesentlich einzuschätzen ist. Eine Ausnahme bildet der zyklische Wechsel zwischen wässriger Behandlung und Trocknung, welcher zu besonders starken Veränderungen führt. Die Versuche haben außerdem gezeigt, dass die Grammaturn einen eher unwesentlichen Einfluss auf die behandlungsbedingten Dimensionsveränderungen ausübt, während die Papierzusammensetzung ein eher ausschlaggebender Faktor ist. Größere Verände-

rungen sind bei ungeleimten Papieren sowie bei Papieren mit Hadernzusammensetzung zu beobachten, was auf deren hohe Wasseraufnahme- und Quellfähigkeit und den nicht vorhandenen Ligninanteil zurückzuführen sein dürfte.

Im Sinne eines Leitfadens sollen die Ergebnisse dazu dienen, mögliche Risikofaktoren bereits vorab erkennen und präziser einschätzen zu können. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen ausdrücklich nicht dazu verleiten, pauschale Entscheidungen zu treffen. Die Entscheidung für oder gegen eine wässrige Behandlung bleibt eine individuelle Einzelfallentscheidung, die unter Berücksichtigung aller Wertedimensionen eines Objektes getroffen werden muss. Dabei ist immer auch der potenzielle Werteverlust durch physikalisch-chemische Veränderungen zu bedenken.

Wie auch der Prägedruck *Hommage à Fontana* des Künstlers Günther Uecker gezeigt hat, sind Dimensionsveränderungen nicht die einzige Herausforderung, mit der im Zusammenhang mit einer wässrigen Behandlung zu rechnen ist.

Selbstverständlich müssen auch alle anderen Faktoren, wie beispielsweise wasserempfindliche Oberflächen oder Farbmedien etc. mit in den Entscheidungsprozess für oder gegen eine wässrige Behandlung einbezogen werden.

Um als Restaurator*in am Objekt bestmögliche Entscheidungen treffen zu können, ist es wichtig, dass der Transfer neuer Erkenntnisse in die Praxis gelingt. Oft werden etablierte Praktiken über lange Zeit beibehalten, ohne hinterfragt zu werden. An dieser Stelle soll exemplarisch auf die schädigende Wirkung von zyklischen Wechseln zwischen wässrigen Behandlungen und Trocknungen im Vergleich zu längeren Wässerungen ohne Unterbrechungen verwiesen werden.

Aufbauend auf diese Arbeit, wäre es lohnenswert weitere, bereits in Kapitel 5.10 konkret benannte, Parameter bezüglich ihres Risikos einzuschätzen sowie die Effektivität von Methoden zu überprüfen, die Dimensionsveränderungen verhindern sollen. In diesem Zuge könnte ebenfalls geprüft werden, ob auch andere dickenabhängige und messbare Größen wie beispielsweise die Opazität, Biegesteifigkeit oder weitere Festigkeitsparameter dazu geeignet wären, quantifizierbare Ergebnisse zu generieren, die wiederum Grundlage für eine Risikoeinschätzung sein können.

8 Literaturverzeichnis

ARCHES PAPERS

ARCHES Premium art papers. <https://arches-papers.com/de/das-arches-papier-sortiment/kunstdrucke/velin-d-arches-dessin-creme> (28.12.2021).

ARCHIVE NRW

Bestandserhaltung in Behörden. Handreichung des Landesarchivs NRW für den richtigen Umgang mit Schriftgut aus Papier in den Behörden. https://www.archive.nrw.de/sites/default/files/media/files/Bestandserhaltung%20in%20Beh%C3%B6rden%20Flyer_0.pdf (27.11.2021).

ARTOTHEK

artothek. Raum für junge Kunst. <https://www.museenkoeln.de/artothek/seite.aspx?s=542> (29.11.2021).

BANIK, BRÜCKLE 2015

Banik, Gerhard; Brückle, Irene: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. München 2015.

BANIK et al. 2015

Banik, Gerhard; Brückle, Irene; Lacher, Reinhard; Wegele, Günther: Leimung von Papier. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 155-187.

BELLE 2016

Belle, Jürgen: Gewichtung von Einflussfaktoren auf die initiale Nassfestigkeit von Papier. Hamburg 2016.

BRÜCKLE 2015 a

Brückle, Irene: Struktur und Eigenschaften von trockenem und nassem Papier. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 89-128.

BRÜCKLE 2015 b

Brückle, Irene: Stoffaufbereitung. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 129-154.

BRÜCKLE 2015 c

Brückle, Irene: Wässrige Behandlungen: Nutzen, Risiken und Folgen. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 511- 531.

BRÜCKLE, BANIK 2015 a

Brückle, Irene; Banik, Gerhard: Wasseraufnahme durch Papier: Einfluss von Klimafaktoren. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 319-358.

BRÜCKLE, BANIK 2015 b

Brückle, Irene; Banik, Gerhard: Papiertrocknung in der Restaurierung. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 469-509.

BURGESS 1991

Burgess, Helen: The Use of Chelating Agents in Conservation Treatments. In: The Paper Conservator Vol. 15, 1991, S. 36-44.

DANIELS 2015

Daniels, Vincent: Wässrige Extraktion alterungsbedingter Verfärbungen aus Papier. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 359-384.

ERHARD et al. 2006

Erhard, Klaus; Fiedler, Manuela; Kretzschmar, J.: Verbesserung der Dimensionsstabilität von Papier durch gezielte Auswahl und Aufbereitung

der Faserstoffe. PTS-Forschungsbericht, Projektstart 01.2004 - Projektende 12.2005. https://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/PTSPAPER/06_Forschung/Dokumente/Forschungsprojekte/AiF_13916.pdf (13.08.2021).

GASSEN 1987

Gassen, Richard W.: Unsichtbar Sichtbares sichtbar machen. Kontinuität und Transmutation im Werk der 80er Jahre. In: Uecker. Hrsg. Richard W. Gassen, Bernhard Holeczek. Heidelberg 1987, S. 27-46.

GERHARDT 1966

Gerhardt, Claus Walther: Was ist Prägedruck? Eine systematische Betrachtung. In: Der Polygraph 19, 1966, Heft 1, S. 16 u. 18, Heft 2, S. 71 f.

GERHARDT 1974

Gerhardt, Claus Walther: Prägedruck und Siebdruck. (Geschichte der Druckverfahren, Teil 1). Stuttgart 1974.

HARTMANN 2016

Hartmann, Alexandra: Mahlungsversuche für die Verwendung von Enzymen bei der Papierherstellung. Graz 2016.

HELMS 1970

Helms, Dietrich: Günther Uecker. (Monographien zur rheinisch-westfälischen Kunst der Gegenwart Bd. 41). Recklinghausen 1970.

HENDRY 2001

Hendry, Heather: Yves Gaucher's Homage to Webern No. 1: A Multidimensional Treatment. In: The Book and Paper Group Annual Vol. 20, 2001, S. 5-7.

HENNIGES, POTTHAST 2009

Henniges, Ute, Potthast, Antje: Bleaching Revisited: Impact of Oxidative and Reductive Bleaching Treatments on Cellulose and Paper. In: Restaurator Bd. 30, H. 4, 2009, S. 294-320.

HESS 1923

Hess, Walter F.: Die Papier-Prägetechnik. Praktisches Handbuch für die gesamte Papier-Prägetechnik. 2. vermehrte und verbesserte Auflage. Bern 1923.

HOLECZEK 1987

Holeczek, Bernhard: Uecker – Eine Annäherung. In: Uecker. Hrsg. Richard W. Gassen, Bernhard Holeczek. Heidelberg 1987, S. 9-25.

IGEPA

IGEPA. Circleoffset Premium White. https://www.igepa.de/shop/igepa_group/circleoffset-premium-white.html (28.12.2021).

JACOBY, PERNAK 2019

Jacoby, Shirin, Pernak, Julia: Reduzieren von Eisen im Papier: Ethylendiamintetraacetat (EDTA), Diethylentriaminpentaacetat (DTPA) und Natrium-dithionit (NDT). Wien 2019.

KELLER 2015

Keller, D. Steven: Trocknungstechniken in der industriellen Papierproduktion. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 189-235.

KEYENCE a

Keyence 3D-Profilometer. Modellreihe VR. [Info-Broschüre]. https://www.keyence.de/mykeyence/?ptn=001&deqwas_inflow=QGRzcdUwOkF6aTd0aVIEeEVHN-zlsaWE5Mjl5YWc6aXRlbV92aWV3OjpXU18xNTcxMjg6MVE&ad_local=recoassetcamyk [Registrierung erforderlich] (28.12.2021).

KEYENCE b

Keyence. 3D-Profilometer VR-3000. Analysesoftware VR-H2AD. Referenzhandbuch. Hrsg. Keyence Corporation. Osaka 2018.

KOSEK 2015

Kosek, Joanna M.: Wässern von Papier. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 385-417.

MENTJES 2006

Mentjes, Meike: Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Papier bei der Anwendung von Trocknungstechniken aus der Papierrestaurierung. Konstruktion und Anwendung des Karibari-Trocknungspaneels. München 2006.

PRÄGEDRUCK 1994

Prägedruck + Prägekunst. zur Erinnerung an die Gründung der Graphischen Werkstätten Gerhardt & Teltow vor 100 Jahren. Ausstellungskatalog Leipzig, Die Deutsche Bibliothek. Katalogbearb.: Claus W. Gerhardt, Leipzig 1994.

PTS

Willkommen in der Papiertechnischen Stiftung. <https://www.ptspaper.de> (29.11.2021).

RÖMERTURM a

RÖMERTURM. VELIN D'ARCHES. <https://www.roemerturm.de/de/echt-buetten/velin-d-arches.html> (28.12.2021).

RÖMERTURM b

RÖMERTURM. ARCTIC VOLUME WHITE. <https://www.roemerturm.de/de/grafisches-papier/arctic-volume-white.html> (28.12.2021).

RÖMERTURM c

RÖMERTURM. LÖSCHKARTON BAUMWOLLE HAHNEMÜHLE. <https://www.roemerturm.de/de/restaurierung-und-archivierung/loschkarton-baumwolle-hahnemuhle.html> (28.12.2021).

SCHMIED 1972

Schmied, Wieland: Uecker. St. Gallen 1972.

SMITH 2015

Smith, Anthony W.: Wässrige Entsäuerung von Papier. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 419-468.

STAHLHUT 2000

Stahlhut, Heinz: „... Gesichtstäuschungen sind Gesichtswahrheiten ...“. Der Prägedruck im Schaffen Günther Ueckers. In: Jahrbuch der Berliner Museen Bd. 42, 2000, S. 295-310.

TOLNAY 2006

Tolnay, Alexander: Ueckers Arbeiten auf Papier. In: Günther Uecker: Letter to China. Works on Paper. Hrsg. Dirk Geuer. Düsseldorf 2006, S. 9-11.

THIELEN 2004

Thielen, Stephanie Katharina: Günther Uecker – Nagelarbeiten. Eine Untersuchung zu Materialien und Technik und Überlegungen zu Restaurierung, Konservierung und Präsentation. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung Jg. 18, Heft 2, 2004, S. 329-348.

WERTHMANN 1993

Barbara Werthmann: Mikroskopische Prüfung von Zellstoffen, Holzstoffen und Papier. In: Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff. Mikroskopische und photometrische Verfahren. (Bd. 2). Hrsg. Werner Franke. Berlin et al. 1993, S. 2-163.

WHITMORE 2015

Whitmore, Paul M.: Einfluss des Wassers auf die Papieralterung. In: Papier und Wasser. Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Hrsg. Gerhard Banik, Irene Brückle. München 2015, S. 237-273.

WIESE 2006

Wiese, Stephan von: Das Blatt Papier als offenes Feld. Zu den Papierarbeiten, insbesondere zur Druckgrafik, von Günther Uecker. In: Günther

Uecker: Letter to China. Works on Paper. Hrsg. Dirk Geuer. Düsseldorf
2006, S. 48-51.

WOLFINGER 2017

Wolfinger, Tobias: Dreidimensionale Strukturanalyse und Modellierung
des Kraft-Dehnungsverhaltens von Fasergefügen. Dresden 2017.

Anhang


Anlage 1.	Produktdatenblätter der untersuchten Papiersorten	110
a.	Tactile Blanc (TB)	110
b.	Smooth Blanc (SB)	112
c.	Arctic Volume White (AVW).....	114
d.	Filterkarton (FK).....	116
e.	Circle Offset Premium White (COPW).....	117
Anlage 2.	Verzeichnis aller verwendeten Chemikalien und von deren Bezugsquellen	118
Anlage 3.	Versuchsauswertung	119
a.	Tabelle der Messdaten zu den unbehandelten Referenzprobekörpern...	119
b.	Tabelle der Messdaten behandelten Probekörper.....	121
c.	Einfluss der Behandlungsverfahren	131
d.	Einfluss des Flächengewichts und der Papiersorten	140
Anlage 4.	Objektdokumentation	142
a.	Fotodokumentation	142
b.	Faseranalyse / Faseranfärbung	146
c.	Test auf Eisen(II)-/Eisen(III)-Ionen.....	148

Anlage 1. Produktdatenblätter der untersuchten Papiersorten

a. Tactile Blanc (TB)

Gmund Original Tactile

Premium Geschäftsausstattungspapier, holzfrei, in unterschiedlichen Weißtönen, matte Oberfläche,
Preprint-Garantie 90 – 100 g/m², passende Briefhüllen



Flächengewicht	ISO 536	g/m ²	90	100	120	170	250	300
Dicke	ISO 534	µm	125	140	170	240	350	435
Spezifisches Volumen	ISO 534	cm ³ /g	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Cobb Wert	DIN EN 20535	g/m ²	35	35	35	35	35	35

Alle Angaben sind Richtwerte des Herstellers, die industriellen Schwankungen unterliegen können.

Anwendungen


- Geschäftsausstattungen, Briefpapier, Visitenkarten, Empfehlungskarten, Mappen, Direkt-Mailings, Einladungen, Gutscheine, Menükarten, Anhänger

Technische Produktzertifikate und Informationen

- Alterungsbeständigkeit (DIN/ISO 9706)
- Alterungsbeständigkeit (DIN 6738)
- Frei von Schwermetallen gemäß EU-Verpackungsdirektive (94/62/EC)

Umweltrelevante Produktzertifikate und Informationen

- FSC®
- Elementarchlorfrei gebleicht (ECF)



Das Zeichen für verantwortungsvolle
Waldwirtschaft
FSC® C004423

Hersteller-Zertifikate

- FSC®
- Qualitätsmanagementsystem (ISO 9001)

1/2

Technische Produkteigenschaften

Drucktechnologie:	Nicht-saugfähiger Druckstoff, der für den Offset-, UV- und Siebdruck geeignet ist. Eine ausreichende Menge von Druckpuder mit passender Partikelgröße sollte beachtet werden.
Rasterweiten:	Alle gängigen Rasterweiten bis zu 60 l/cm (150 lpi) sind bei ungestrichenem Papier anwendbar, bei gestrichenem Papier bis zu 80 l/cm (200lpi). Werden andere Druckrasterstechniken benutzt, werden Tests vor dem Druck empfohlen. Die Wahl des Farbprofils und der maximalen Farbdeckung liegt bei der Druckerei, die die verschiedenen Faktoren wie das Papier selbst und die vorhandene Ausrüstung berücksichtigen muss.
Druckfarben:	Geeignet sind rein oxidativ trocknende Offsetfarben, UV- und Siebdruckfarben. Achten Sie auf eine optimale Wasserführung.
Trocknung:	Der Trocknungsprozess rein oxidativ trocknender Farben und konventioneller Offsetfarben ist, abhängig von der Menge des Farbauftrags, innerhalb 24 bis 48 Stunden vollständig abgeschlossen.
Druckpressung:	Standardanpressdruck: Ein leicht erhöhter Anpressdruck bei Volumenpapieren unter Verwendung eines kompressiblen Gummituches wird empfohlen.
Veredelung:	Lackierungen mit ölbasierenden-, wasserbasierenden- und UV-Lacken, sowie Heißfolienprägung, Prägen und Stanzen sind anwendbar. Eine Veredelung mit UV-Lack sollte vorher geprüft werden und könnte eine Vorbeschichtung mit einem Primer erfordern.
Heißfolienprägung:	geeignet
Rillen & Falzen:	Für eine Dicke von 150 g/m ² oder höher, muss der Falzvorgang über eine Stanzung/Rillung hergestellt werden. Um das bestmögliche Falzergebnis zu erlangen, müssen Standardwerte berücksichtigt werden.
Verarbeitungshinweise:	Die Planlage von diesem Papier ist gewährleistet bei einer relativen Feuchtigkeit zwischen 45 und 55% und einer Temperatur zwischen 20 und 23°C. Es ist zu empfehlen, dass der Druckraum vergleichbare Klimabedingungen hat. Das Papier sollte, bevor es genutzt wird, so lang wie möglich in der Verpackung sein. Extrem schwankende Temperaturen und Feuchtigkeit sollten vermieden werden.

Bei allen Druck- und Verarbeitungstechniken sind die Empfehlungen der Hersteller von Maschinen, Druckfarben, Klebstoffen, Kaschier- und Prägefolien etc. zu beachten. Für Schäden, die durch fehlerhafte Anwendung beim Druck und bei der Weiterverarbeitung entstehen, kann Papyrus keine Haftung übernehmen.

Druckfehler und Änderungen vorbehalten

b. Smooth Blanc (SB)

Gmund Original Smooth

PAPYRUS 

Premium Geschäftsausstattungspapier, holzfrei, in unterschiedlichen Weißtönen, glatte Oberfläche, Preprint-Garantie
90 – 100 g/m², passende Briefhüllen

Flächengewicht	ISO 536	g/m ²	90	120	170	250	300
Dicke	ISO 534	µm	100	125	195	270	330
Spezifisches Volumen	ISO 534	cm ³ /g	1,05	1,05	1,15	1,15	1,15
Cobb Wert	DIN EN 20535	g/m ²	35	35	35	35	35

Alle Angaben sind Richtwerte des Herstellers, die industriellen Schwankungen unterliegen können.

Anwendungen

- Geschäftsausstattungen, Briefpapier, Visitenkarten, Empfehlungskarten, Mappen, Direkt-Mailings, Einladungen, Gutscheine, Menükarten, Anhänger

Technische Produktzertifikate und Informationen

- Alterungsbeständigkeit (DIN/ISO 9706)
- Alterungsbeständigkeit (DIN 6738)
- Frei von Schwermetallen gemäß EU-Verpackungsdirektive (94/62/EC)

Umweltrelevante Produktzertifikate und Informationen

- FSC®
- Elementarchlorfrei gebleicht (ECF)



Hersteller-Zertifikate



- FSC®
- Qualitätsmanagementsystem (ISO 9001)

Technische Produkteigenschaften

Drucktechnologie:	Nicht-saugfähiger Druckstoff, der für den Offset-, UV- und Siebdruck geeignet ist. Eine ausreichende Menge von Druckpuder mit passender Partikelgröße sollte beachtet werden.
Rasterweiten:	Alle gängigen Rasterweiten bis zu 60 l/cm (150 lpi) sind bei ungestrichenem Papier anwendbar, bei gestrichenem Papier bis zu 80 l/cm (200lpi). Werden andere Druckrasterstechniken benutzt, werden Tests vor dem Druck empfohlen. Die Wahl des Farbprofils und der maximalen Farbdeckung liegt bei der Druckerei, die die verschiedenen Faktoren wie das Papier selbst und die vorhandene Ausrüstung berücksichtigen muss.
Druckfarben:	Geeignet sind rein oxidativ trocknende Offsetfarben, UV- und Siebdruckfarben. Achten Sie auf eine optimale Wasserführung.
Trocknung:	Der Trocknungsprozess rein oxidativ trocknender Farben und konventioneller Offsetfarben ist, abhängig von der Menge des Farbauftrags, innerhalb 24 bis 48 Stunden vollständig abgeschlossen.
Druckpressung:	Standardanpressdruck: Ein leicht erhöhter Anpressdruck bei Volumenpapieren unter Verwendung eines kompressiblen Gummituches wird empfohlen.
Veredelung:	Lackierungen mit ölbasierenden-, wasserbasierenden- und UV-Lacken, sowie Heißfolienprägung, Prägen und Stanzen sind anwendbar. Eine Veredelung mit UV-Lack sollte vorher geprüft werden und könnte eine Vorbeschichtung mit einem Primer erfordern.
Heißfolienprägung:	geeignet
Rillen & Falzen:	Für eine Dicke von 150 g/m ² oder höher, muss der Falzvorgang über eine Stanzung/Rillung hergestellt werden. Um das bestmögliche Falzergebnis zu erlangen, müssen Standardwerte berücksichtigt werden.
Verarbeitungshinweise:	Die Planlage von diesem Papier ist gewährleistet bei einer relativen Feuchtigkeit zwischen 45 und 55% und einer Temperatur zwischen 20 und 23°C. Es ist zu empfehlen, dass der Druckraum vergleichbare Klimabedingungen hat. Das Papier sollte, bevor es genutzt wird, so lang wie möglich in der Verpackung sein. Extrem schwankende Temperaturen und Feuchtigkeit sollten vermieden werden.

Bei allen Druck- und Verarbeitungstechniken sind die Empfehlungen der Hersteller von Maschinen, Druckfarben, Klebstoffen, Kaschier- und Prägefolien etc. zu beachten. Für Schäden, die durch fehlerhafte Anwendung beim Druck und bei der Weiterverarbeitung entstehen, kann Papyrus keine Haftung übernehmen.

c. Arctic Volume White (AVW)

 TECHNISCHES DATENBLATT Stand 08/2020	
Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 90 Dicke µm: 99 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4	Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 100 Dicke µm: 110 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4
Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 115 Dicke µm: 126 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4	Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 130 Dicke µm: 143 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4
Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 150 Dicke µm: 185 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4	Produkt: Arctic Volume Oberfläche: matt Farbe: white Wasserzeichen: ohne Grammatur in g/m²: 170 Dicke µm: 187 Volumen cm³/g: 1,1 Weiß: CIE 120 Glätte: 4,4
RÖMERTURM FEINSTPAPIER GMBH & CO. KG T +49 2234 95595-0 F +49 2234 95595-55 Alfred-Nobel-Straße 19 50226 Frechen www.roemerturm.de	Zertifikate: 



TECHNISCHES DATENBLATT

Stand 08/2020

Produkt: Arctic Volume
Oberfläche: matt
Farbe: white
Wasserzeichen: ohne

Grammatur in g/m²: 200

Dicke µm: 220
Volumen cm³/g: 1,2
Weiß: CIE 120
Glätte: 4,4

Produkt: Arctic Volume
Oberfläche: matt
Farbe: white
Wasserzeichen: ohne

Grammatur in g/m²: 250

Dicke µm: 275
Volumen cm³/g: 1,3
Weiß: CIE 120
Glätte: 4,4

Produkt: Arctic Volume
Oberfläche: matt
Farbe: white
Wasserzeichen: ohne

Grammatur in g/m²: 300

Dicke µm: 330
Volumen cm³/g: 1,4
Weiß: CIE 120
Glätte: 4,4



**RÖMERTURM FEINSTPAPIER
GMBH & CO. KG**

T + 49 2234 95585-0
F + 49 2234 95585-55
Alfred-Nobel-Straße 19
50226 Frechen
www.roemerturm.de

Zertifikate:



d. Filterkarton (FK)

	TECHNISCHES DATENBLATT
Produkt: Löschkarton Baumwolle Mahnemühle Oberfläche: matt Farbe: weiß	Produkt: Löschkarton Baumwolle Mahnemühle Oberfläche: matt Farbe: weiß
Grammatur in g/m²: 330 Säurefrei: ja Leimung: ungeleimt Stoffzusammensetzung: 100% Baumwollfasern	Grammatur in g/m²: 450 Säurefrei: ja Leimung: ungeleimt Stoffzusammensetzung: 45% Baumwollfasern
RÖMERTURM FEINSTPAPIER GMBH & CO. KG T + 49 2234 95595-0 F + 49 2234 95595-55 Alfred-Nobel-Straße 19 50226 Frechen www.roemerturm.de	Zertifikate: 

e. Circle Offset Premium White (COPW)



Circleoffset Premium White

Technische Informationen										
Grammatur / Weight (g/m ²) ISO 536	80	90	100	120	140	160	200	250	300	350
Spez. Volumen / Spec. Volume (cm ³ /g) ISO 534	1,25	1,25	1,25	1,25	1,20	1,20	1,15	1,15	1,15	1,15
CIE Weiße / Whiteness (%) ISO 11475	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Opazität / Opacity (%) ISO 2471	93,0	95,0	96,0	97,0	98,0	> 99,0	> 99,0	> 99,0	> 99,0	> 99,0
Rauigkeit / Roughness Bendtsen (ml/min) ISO 8791-3	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
Absolute Feuchte / Abs. Humidity (%) ISO 20287	5,0	5,0	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0
Berstfestigkeit / Burst Strength (kPa · m ² /g) ISO 2758	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Cobb Index (g/m ²) ISO 535	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Herstellerangaben / Instructions of Manufacturer

Der Hersteller ist für die Richtigkeit und Einhaltung der Angaben verantwortlich.
The Manufacturer is responsible for the validity of facts and figures.

Zertifikate und Labels / Certificates and Labels

EU Ecolabel, FSC® Recycled certified, ISO 14001, ISO 9001, DIN 6738 Altersbeständigkeit / Age-resistant standard,
Frei von Schwermetallen / Heavy metal absence, PCF, Blauer Engel / Blue Angel

Hinweis / Advice

Alle Angaben zu den Digitaldruck-Verfahren sind Empfehlungen und ausdrücklich keine Garantien.
Bitte beachten Sie die Anforderungen der Digitaldruckmaschinenhersteller und deren Spezifikationen zur Verwendung und Eignung der Bedruckmaterialien.
All data regarding digital printing are suggestions and explicitly no guarantees.
Please follow the instructions of the manufacturer of the digital printing machine and its specifications for use and suitability of printing materials.

Regionale Unterschiede in den Spezifikationen möglich, bitte fragen Sie dazu Ihre zuständige IGEPA Fachberatung.
Regional variations in specifications may apply; please contact your local IGEPA Sales office for more information.



Ziel-Produktionswerte Stand April 2019 / Target production values updated April 2019

Anlage 2. Verzeichnis aller verwendeten Chemikalien und von deren Bezugsquellen

Chemikalie	Bezugsquelle
Calciumhydroxid ≥ 96 %, pulv. Art.nr.: 3529	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Citronensäure $\geq 99,5$ %, Ph.Eur., wasserfrei Art.nr.: 6490	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Kaliumpermanganat ≥ 99 %, p.a., ACS Art.nr.: P752	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Natriumborhydrid ≥ 97 %, reinst Art.nr. 4051	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Natriumdisulfit ≥ 97 %, reinst Art.nr.: 8554	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Oxalsäure-Dihydrat Art.nr.: 100495	Merck KGaA, Darmstadt
Salzsäure 1 mol/l - 1 N, Maßlösung Art.nr. K025	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Wasserstoffperoxid 35 %, rein, stabilisiert Art.nr.: 9683	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe

Alle Sicherheitsdatenblätter zu den verwendeten Chemikalien sind unter
<<https://www.carlroth.com/>> und <<https://www.merckmillipore.com/>> abrufbar.

Anlage 3. Versuchsauswertung

a. Tabelle der Messdaten zu den unbehandelten Referenzprobekörpern

Sorte	Grammatur	Probekörper	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (horiz)1	Pt-Pt (horiz)2	Pt-Pt (horiz)3	Pt-Pt (horiz)4	Pt-Pt (horiz)5	Pt-Pt (horiz)6	Pt-Pt (horiz)7
VDA	160	1	0,268	0,297	0,292	0,247	2,1	2,193	2,196	2,113	1,29	1,252	4,644
VDA	160	2	0,274	0,303	0,282	0,25	2,094	2,163	2,226	2,055	1,301	1,248	4,639
VDA	160	3	0,279	0,299	0,289	0,25	2,104	2,154	2,203	2,059	1,318	1,267	4,625
VDA	250	1	0,297	0,32	0,325	0,27	2,095	2,154	2,199	2,115	1,311	1,27	4,64
VDA	250	2	0,295	0,329	0,324	0,27	2,1	2,159	2,21	2,084	1,303	1,263	4,617
VDA	250	3	0,288	0,321	0,319	0,271	2,099	2,154	2,225	2,107	1,315	1,232	4,619
VDA	300	1	0,299	0,337	0,324	0,276	2,079	2,152	2,176	2,075	1,306	1,278	4,646
VDA	300	2	0,294	0,33	0,33	0,283	2,094	2,149	2,183	2,069	1,316	1,268	4,634
VDA	300	3	0,293	0,331	0,331	0,275	2,11	2,147	2,185	2,103	1,305	1,272	4,62
TB	170	1	0,275	0,309	0,28	0,238	2,093	2,179	2,203	2,1	1,291	1,239	4,607
TB	170	2	0,284	0,305	0,283	0,243	2,104	2,183	2,204	2,101	1,268	1,235	4,605
TB	170	3	0,276	0,317	0,291	0,256	2,084	2,17	2,209	2,142	1,288	1,238	4,603
TB	250	1	0,306	0,334	0,321	0,26	2,111	2,185	2,206	2,085	1,266	1,225	4,617
TB	250	2	0,297	0,327	0,323	0,259	2,119	2,201	2,23	2,112	1,262	1,187	4,603
TB	250	3	0,305	0,332	0,327	0,268	2,1	2,188	2,246	2,11	1,275	1,203	4,583
TB	300	1	0,306	0,333	0,333	0,264	2,118	2,164	2,198	2,061	1,268	1,243	4,623
TB	300	2	0,292	0,333	0,342	0,273	2,093	2,192	2,198	2,114	1,277	1,234	4,614
TB	300	3	0,314	0,353	0,341	0,28	2,108	2,195	2,209	2,103	1,255	1,231	4,61
SB	170	1	0,253	0,295	0,276	0,222	2,111	2,172	2,219	2,122	1,27	1,237	4,603
SB	170	2	0,254	0,297	0,274	0,23	2,105	2,17	2,217	2,08	1,291	1,234	4,588
SB	170	3	0,255	0,301	0,268	0,221	2,114	2,182	2,238	2,095	1,268	1,206	4,596

SB	250	1	0,269	0,327	0,297	0,254	2,123	2,176	2,224	2,095	1,262	1,233	4,607
SB	250	2	0,265	0,31	0,283	0,249	2,082	2,174	2,213	2,115	1,294	1,235	4,597
SB	250	3	0,276	0,305	0,291	0,249	2,102	2,167	2,217	2,109	1,277	1,24	4,6
SB	300	1	0,28	0,342	0,32	0,246	2,091	2,178	2,204	2,088	1,292	1,236	4,621
SB	300	2	0,285	0,331	0,308	0,252	2,1	2,19	2,216	2,129	1,269	1,234	4,602
SB	300	3	0,292	0,324	0,306	0,241	2,099	2,157	2,215	2,108	1,288	1,248	4,597
AVW	150	1	0,238	0,27	0,258	0,206	2,068	2,134	2,253	2,094	1,326	1,207	4,587
AVW	150	2	0,234	0,269	0,252	0,21	2,081	2,152	2,198	2,04	1,322	1,247	4,647
AVW	150	3	0,236	0,266	0,252	0,208	2,078	2,152	2,179	2,047	1,295	1,28	4,647
AVW	250	1	0,267	0,314	0,295	0,239	2,053	2,118	2,154	2,083	1,327	1,291	4,665
AVW	250	2	0,271	0,319	0,298	0,249	2,045	2,117	2,169	2,082	1,332	1,28	4,664
AVW	250	3	0,272	0,317	0,301	0,247	2,058	2,144	2,162	2,112	1,309	1,278	4,663
AVW	300	1	0,26	0,294	0,278	0,237	2,081	2,13	2,172	2,099	1,315	1,263	4,631
AVW	300	2	0,268	0,298	0,286	0,24	2,072	2,144	2,177	2,098	1,307	1,259	4,665
AVW	300	3	0,257	0,317	0,285	0,247	2,041	2,169	2,186	2,159	1,299	1,267	4,638
FK	450	1	0,338	0,368	0,357	0,317	2,058	2,168	2,249	2,194	1,323	1,241	4,593
FK	450	2	0,339	0,354	0,365	0,292	2,072	2,131	2,204	2,165	1,314	1,278	4,643
FK	450	3	0,348	0,353	0,368	0,318	2,084	2,188	2,24	2,169	1,288	1,22	4,607
COPW	160	1	0,255	0,308	0,27	0,224	2,1	2,174	2,186	2,087	1,27	1,266	4,622
COPW	160	2	0,256	0,302	0,28	0,235	2,083	2,156	2,207	2,084	1,287	1,243	4,638
COPW	160	3	0,254	0,3	0,281	0,238	2,079	2,177	2,207	2,107	1,288	1,247	4,628
COPW	300	1	0,29	0,322	0,315	0,276	2,068	2,161	2,183	2,094	1,308	1,271	4,635
COPW	300	2	0,276	0,316	0,302	0,266	2,091	2,177	2,156	2,072	1,271	1,301	4,625
COPW	300	3	0,276	0,324	0,316	0,256	2,082	2,165	2,208	2,114	1,299	1,261	4,616

b. Tabelle der Messdaten behandelten Probekörper

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
VDA	160	1x 5 min VE-H2O	1	0,129	0,169	0,159	0,123	2,101	2,167	2,179	2,041	1,338	1,287	4,649
VDA	160	1x 20 min VE-H2O	1	0,171	0,176	0,161	0,15	2,106	2,162	2,21	2,081	1,326	1,294	4,63
VDA	160	1x 60 min VE-H2O	1	0,148	0,187	0,169	0,134	2,091	2,142	2,182	2,01	1,338	1,31	4,676
VDA	160	12x 5 min VE-H2O	1	0,123	0,144	0,141	0,11	2,137	2,159	2,195	2,122	1,316	1,296	4,606
VDA	160	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,15	0,176	0,181	0,156	2,119	2,162	2,2	2,052	1,326	1,287	4,651
VDA	160	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,14	0,17	0,159	0,138	2,092	2,159	2,203	2,075	1,335	1,291	4,632
VDA	160	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,174	0,19	0,171	0,149	2,103	2,154	2,223	2,055	1,33	1,297	4,617
VDA	160	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,146	0,153	0,161	0,141	2,11	2,166	2,202	2,063	1,346	1,274	4,672
VDA	160	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,146	0,159	0,153	0,111	2,125	2,142	2,19	2,096	1,321	1,294	4,645
VDA	160	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,141	0,171	0,146	0,121	2,093	2,166	2,2	2,056	1,334	1,29	4,621
VDA	160	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,134	0,164	0,154	0,131	2,111	2,155	2,221	2,121	1,337	1,288	4,623
VDA	160	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,136	0,161	0,155	0,132	2,095	2,168	2,195	2,102	1,329	1,309	4,622
VDA	160	Referenz	MW	0,274	0,300	0,288	0,249	2,099	2,170	2,208	2,076	1,303	1,256	4,636
VDA	160	Referenz	SA	0,004	0,002	0,004	0,001	0,004	0,017	0,013	0,026	0,012	0,008	0,008
VDA	250	1x 5 min VE-H2O	1	0,174	0,194	0,177	0,123	2,103	2,146	2,216	2,062	1,354	1,272	4,659
VDA	250	1x 20 min VE-H2O	1	0,163	0,2	0,199	0,156	2,113	2,163	2,204	2,081	1,325	1,284	4,636
VDA	250	1x 60 min VE-H2O	1	0,177	0,196	0,18	0,147	2,096	2,149	2,195	2,045	1,323	1,291	4,662
VDA	250	12x 5 min VE-H2O	1	0,123	0,146	0,153	0,139	2,097	2,156	2,186	2,056	1,343	1,3	4,627
VDA	250	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,179	0,21	0,186	0,17	2,109	2,148	2,162	2,111	1,332	1,32	4,634
VDA	250	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,165	0,194	0,197	0,159	2,123	2,171	2,228	2,145	1,31	1,259	4,607
VDA	250	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,172	0,212	0,198	0,147	2,094	2,151	2,207	2,076	1,321	1,291	4,658
VDA	250	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,185	0,21	0,19	0,156	2,108	2,161	2,217	2,097	1,33	1,262	4,639

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
VDA	250	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,145	0,177	0,183	0,128	2,111	2,153	2,209	2,09	1,339	1,286	4,62
VDA	250	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,169	0,177	0,18	0,148	2,093	2,166	2,212	2,13	1,335	1,277	4,623
VDA	250	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,165	0,215	0,193	0,138	2,101	2,154	2,196	2,102	1,337	1,307	4,633
VDA	250	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,179	0,214	0,179	0,135	2,115	2,167	2,217	2,094	1,319	1,286	4,633
VDA	250	Referenz	MW	0,293	0,323	0,323	0,270	2,098	2,156	2,211	2,102	1,310	1,255	4,625
VDA	250	Referenz	SA	0,004	0,004	0,003	0,000	0,002	0,002	0,011	0,013	0,005	0,017	0,010
VDA	300	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,17	0,201	0,19	0,161	2,089	2,148	2,187	2,058	1,344	1,292	4,654
VDA	300	1x 20 min VE-H ₂ O	1	0,173	0,178	0,173	0,139	2,104	2,146	2,213	2,036	1,34	1,267	4,671
VDA	300	1x 60 min VE-H ₂ O	1	0,177	0,191	0,173	0,174	2,085	2,139	2,191	2,097	1,367	1,29	4,641
VDA	300	12x 5 min VE-H ₂ O	1	0,112	0,13	0,122	0,093	2,083	2,128	2,175	2,033	1,364	1,293	4,634
VDA	300	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,177	0,188	0,181	0,157	2,108	2,135	2,208	2,114	1,338	1,307	4,632
VDA	300	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,166	0,194	0,188	0,149	2,107	2,177	2,216	2,088	1,314	1,282	4,63
VDA	300	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,18	0,19	0,205	0,161	2,093	2,152	2,202	2,069	1,338	1,297	4,631
VDA	300	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,162	0,201	0,199	0,148	2,104	2,155	2,235	2,069	1,332	1,269	4,629
VDA	300	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,135	0,168	0,182	0,138	2,095	2,154	2,178	2,099	1,344	1,287	4,627
VDA	300	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,178	0,188	0,188	0,151	2,137	2,179	2,226	2,099	1,307	1,279	4,598
VDA	300	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,161	0,194	0,186	0,156	2,113	2,155	2,25	2,086	1,314	1,282	4,58
VDA	300	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,175	0,198	0,187	0,162	2,117	2,151	2,197	2,087	1,327	1,302	4,629
VDA	300	Referenz	MW	0,295	0,333	0,328	0,278	2,094	2,149	2,181	2,082	1,309	1,273	4,633
VDA	300	Referenz	SA	0,003	0,003	0,003	0,004	0,013	0,002	0,004	0,015	0,005	0,004	0,011
TB	170	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,169	0,206	0,166	0,14	2,128	2,169	2,22	2,125	1,28	1,25	4,547
TB	170	1x 20 min VE-H ₂ O	1	0,162	0,205	0,165	0,149	2,102	2,135	2,184	2,101	1,298	1,298	4,576
TB	170	1x 60 min VE-H ₂ O	1	0,161	0,196	0,177	0,164	2,091	2,154	2,255	2,096	1,332	1,232	4,527

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
TB	170	12x 5 min VE-H2O	1	0,14	0,181	0,157	0,144	2,098	2,188	2,199	2,122	1,283	1,216	4,512
TB	170	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,178	0,211	0,19	0,157	2,086	2,14	2,223	2,154	1,315	1,267	4,558
TB	170	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,162	0,199	0,18	0,151	2,102	2,162	2,214	2,161	1,291	1,276	4,554
TB	170	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,163	0,194	0,172	0,152	2,105	2,145	2,18	2,082	1,323	1,283	4,612
TB	170	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,179	0,199	0,164	0,128	2,116	2,171	2,227	2,128	1,309	1,246	4,564
TB	170	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,157	0,191	0,163	0,122	2,106	2,168	2,181	2,055	1,315	1,252	4,598
TB	170	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,151	0,181	0,161	0,137	2,077	2,141	2,173	2,111	1,332	1,294	4,588
TB	170	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,152	0,171	0,152	0,136	2,109	2,143	2,194	2,084	1,322	1,272	4,562
TB	170	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,139	0,155	0,14	0,119	2,105	2,15	2,181	2,087	1,325	1,268	4,595
TB	170	Referenz	MW	0,278	0,310	0,285	0,246	2,094	2,177	2,205	2,114	1,282	1,237	4,605
TB	170	Referenz	SA	0,004	0,005	0,005	0,008	0,008	0,005	0,003	0,020	0,010	0,002	0,002
TB	250	1x 5 min VE-H2O	1	0,197	0,223	0,196	0,164	2,112	2,176	2,2	2,086	1,281	1,255	4,579
TB	250	1x 20 min VE-H2O	1	0,182	0,205	0,184	0,155	2,136	2,181	2,24	2,128	1,281	1,242	4,553
TB	250	1x 60 min VE-H2O	1	0,194	0,2	0,209	0,159	2,096	2,121	2,181	2,08	1,327	1,287	4,563
TB	250	12x 5 min VE-H2O	1	0,18	0,186	0,168	0,145	2,123	2,117	2,205	2,068	1,295	1,27	4,542
TB	250	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,196	0,232	0,206	0,162	2,116	2,168	2,256	2,094	1,293	1,242	4,555
TB	250	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,175	0,192	0,179	0,147	2,118	2,146	2,218	2,094	1,298	1,27	4,574
TB	250	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,183	0,207	0,189	0,155	2,111	2,201	2,227	2,066	1,287	1,216	4,58
TB	250	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,183	0,216	0,189	0,159	2,107	2,133	2,196	2,082	1,31	1,271	4,604
TB	250	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,151	0,199	0,172	0,146	2,088	2,145	2,208	2,172	1,328	1,259	4,56
TB	250	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,165	0,222	0,192	0,161	2,074	2,159	2,207	2,081	1,284	1,256	4,568
TB	250	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,162	0,194	0,193	0,152	2,104	2,144	2,196	2,09	1,309	1,275	4,601
TB	250	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,185	0,203	0,186	0,166	2,124	2,157	2,236	2,09	1,285	1,266	4,555

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
TB	250	Referenz	MW	0,303	0,331	0,324	0,262	2,110	2,191	2,227	2,102	1,268	1,205	4,601
TB	250	Referenz	SA	0,004	0,003	0,002	0,004	0,008	0,007	0,016	0,012	0,005	0,016	0,014
TB	300	1x 5 min VE-H2O	1	0,213	0,234	0,212	0,171	2,1	2,151	2,207	2,099	1,302	1,258	4,609
TB	300	1x 20 min VE-H2O	1	0,195	0,23	0,216	0,163	2,092	2,13	2,221	2,089	1,326	1,254	4,567
TB	300	1x 60 min VE-H2O	1	0,206	0,221	0,237	0,169	2,105	2,15	2,205	2,178	1,288	1,258	4,606
TB	300	12x 5 min VE-H2O	1	0,188	0,198	0,186	0,157	2,136	2,114	2,197	2,117	1,281	1,25	4,521
TB	300	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,21	0,244	0,201	0,17	2,094	2,149	2,216	2,12	1,316	1,253	4,585
TB	300	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,186	0,21	0,218	0,173	2,106	2,15	2,233	2,101	1,304	1,258	4,567
TB	300	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,21	0,227	0,218	0,164	2,098	2,145	2,238	2,085	1,309	1,239	4,58
TB	300	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	2	0,206	0,222	0,211	0,178	2,103	2,156	2,2	2,082	1,302	1,274	4,593
TB	300	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,198	0,221	0,196	0,165	2,079	2,15	2,17	2,079	1,306	1,276	4,555
TB	300	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,191	0,212	0,192	0,154	2,079	2,144	2,173	2,087	1,312	1,262	4,599
TB	300	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,184	0,211	0,198	0,154	2,12	2,16	2,204	2,103	1,295	1,262	4,602
TB	300	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,197	0,222	0,201	0,165	2,113	2,146	2,225	2,129	1,308	1,242	4,579
TB	300	Referenz	MW	0,304	0,340	0,339	0,272	2,106	2,184	2,202	2,093	1,267	1,236	4,616
TB	300	Referenz	SA	0,009	0,009	0,004	0,007	0,010	0,014	0,005	0,023	0,009	0,005	0,005
SB	170	1x 5 min VE-H2O	1	0,127	0,179	0,153	0,116	2,123	2,194	2,225	2,091	1,286	1,238	4,566
SB	170	1x 20 min VE-H2O	1	0,129	0,181	0,153	0,132	2,084	2,166	2,22	2,088	1,322	1,24	4,538
SB	170	1x 60 min VE-H2O	1	0,141	0,168	0,172	0,133	2,07	2,15	2,17	2,063	1,325	1,26	4,58
SB	170	12x 5 min VE-H2O	1	0,131	0,143	0,126	0,121	2,095	2,187	2,138	2,083	1,325	1,231	4,572
SB	170	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,157	0,198	0,166	0,132	2,086	2,141	2,198	2,058	1,327	1,275	4,597
SB	170	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,139	0,188	0,168	0,127	2,104	2,162	2,19	2,08	1,303	1,271	4,602
SB	170	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,156	0,198	0,159	0,129	2,114	2,16	2,162	2,027	1,302	1,277	4,601

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (horiz)1	Pt-Pt (horiz)2	Pt-Pt (horiz)3	Pt-Pt (horiz)4	Pt-Pt (horiz)5	Pt-Pt (horiz)6	Pt-Pt (horiz)7
SB	170	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,151	0,183	0,148	0,113	2,111	2,172	2,232	2,076	1,311	1,241	4,568
SB	170	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,141	0,167	0,131	0,112	2,091	2,147	2,18	2,083	1,325	1,279	4,581
SB	170	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,121	0,18	0,151	0,116	2,086	2,165	2,166	2,095	1,312	1,276	4,624
SB	170	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,123	0,163	0,157	0,11	2,087	2,177	2,213	2,087	1,297	1,235	4,566
SB	170	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,144	0,176	0,157	0,125	2,093	2,151	2,18	2,077	1,319	1,28	4,632
SB	170	Referenz	MW	0,254	0,298	0,273	0,224	2,110	2,175	2,225	2,099	1,276	1,226	4,596
SB	170	Referenz	SA	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,009	0,017	0,010	0,014	0,006
SB	250	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,172	0,197	0,16	0,14	2,105	2,158	2,207	2,098	1,319	1,257	4,586
SB	250	1x 20 min VE-H ₂ O	1	0,157	0,189	0,164	0,133	2,097	2,153	2,218	2,138	1,304	1,263	4,56
SB	250	1x 60 min VE-H ₂ O	1	0,167	0,195	0,155	0,136	2,077	2,129	2,177	2,127	1,348	1,281	4,578
SB	250	12x 5 min VE-H ₂ O	1	0,169	0,183	0,16	0,136	2,17	2,164	2,16	2,109	1,26	1,274	4,579
SB	250	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,172	0,212	0,17	0,154	2,088	2,145	2,22	2,094	1,328	1,26	4,572
SB	250	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,176	0,193	0,167	0,153	2,089	2,178	2,19	2,1	1,323	1,247	4,585
SB	250	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,17	0,208	0,17	0,14	2,102	2,163	2,17	2,063	1,323	1,256	4,619
SB	250	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	3	0,163	0,195	0,163	0,138	2,127	2,138	2,185	2,127	1,329	1,297	4,588
SB	250	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,153	0,19	0,156	0,126	2,124	2,177	2,187	2,1	1,323	1,249	4,599
SB	250	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,158	0,188	0,168	0,136	2,113	2,173	2,189	2,152	1,313	1,248	4,592
SB	250	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,156	0,198	0,165	0,123	2,127	2,165	2,229	2,074	1,268	1,263	4,584
SB	250	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,133	0,187	0,162	0,141	2,134	2,17	2,236	2,206	1,288	1,248	4,515
SB	250	Referenz	MW	0,270	0,314	0,290	0,251	2,102	2,172	2,218	2,106	1,278	1,236	4,601
SB	250	Referenz	SA	0,005	0,009	0,006	0,002	0,017	0,004	0,005	0,008	0,013	0,003	0,004
SB	300	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,155	0,201	0,176	0,132	2,079	2,135	2,183	2,089	1,313	1,28	4,622
SB	300	1x 20 min VE-H ₂ O	1	0,17	0,196	0,19	0,14	2,092	2,157	2,188	2,07	1,318	1,258	4,618

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
SB	300	1x 60 min VE-H2O	1	0,18	0,196	0,177	0,146	2,1	2,134	2,163	2,098	1,324	1,279	4,581
SB	300	12x 5 min VE-H2O	2	0,158	0,183	0,17	0,16	2,129	2,247	2,209	2,079	1,168	1,258	4,479
SB	300	1x 20 min H2O pH 12	1	0,183	0,215	0,206	0,143	2,1	2,159	2,209	2,087	1,285	1,25	4,565
SB	300	1x 20 min H2O pH 2	2	0,198	0,211	0,186	0,148	2,103	2,168	2,194	2,112	1,305	1,26	4,602
SB	300	1x 5min H2O2 0,5 %	3	0,169	0,242	0,183	0,151	2,098	2,129	2,175	2,076	1,316	1,302	4,611
SB	300	1x 5min H2O2 3 %	3	0,182	0,221	0,194	0,152	2,111	2,166	2,187	2,053	1,294	1,25	4,561
SB	300	1x 5 min KMnO4 0,5 %	1	0,161	0,186	0,172	0,139	2,121	2,136	2,197	2,125	1,314	1,28	4,573
SB	300	1x 5 min KMnO4 3 %	1	0,177	0,217	0,18	0,137	2,094	2,143	2,179	2,015	1,324	1,284	4,638
SB	300	1x 5 min NaBH4 0,5 %	3	0,171	0,196	0,182	0,145	2,116	2,135	2,173	2,122	1,292	1,299	4,612
SB	300	1x 5min NaBH4 3 %	3	0,154	0,198	0,173	0,133	2,092	2,144	2,174	2,099	1,332	1,3	4,603
SB	300	Referenz	MW	0,286	0,332	0,311	0,246	2,097	2,175	2,212	2,108	1,283	1,239	4,607
SB	300	Referenz	SA	0,005	0,007	0,006	0,004	0,004	0,014	0,005	0,017	0,010	0,006	0,010
AVW	150	1x 5 min VE-H2O	1	0,135	0,164	0,136	0,13	2,057	2,138	2,178	1,977	1,331	1,331	4,558
AVW	150	1x 20 min VE-H2O	1	0,135	0,172	0,153	0,129	2,055	2,108	2,162	2,092	1,351	1,298	4,546
AVW	150	1x 60 min VE-H2O	1	0,152	0,168	0,15	0,124	2,081	2,121	2,241	2,041	1,321	1,241	4,563
AVW	150	12x 5 min VE-H2O	1	0,111	0,138	0,137	0,101	2,053	2,079	2,127	2,008	1,321	1,544	4,604
AVW	150	1x 20 min H2O pH 12	1	0,135	0,171	0,137	0,131	2,076	2,116	2,156	2,067	1,317	1,317	4,631
AVW	150	1x 20 min H2O pH 2	2	0,129	0,164	0,161	0,134	2,102	2,114	2,142	2,073	1,337	1,309	4,601
AVW	150	1x 5min H2O2 0,5 %	1	0,141	0,164	0,14	0,122	2,07	2,131	2,157	2,04	1,343	1,289	4,638
AVW	150	1x 5min H2O2 3 %	1	0,142	0,176	0,155	0,114	2,056	2,124	2,166	2,059	1,346	1,286	4,644
AVW	150	1x 5 min KMnO4 0,5 %	1	0,136	0,176	0,159	0,114	2,019	2,1	2,181	2,019	1,373	1,292	4,644
AVW	150	1x 5 min KMnO4 3 %	1	0,128	0,169	0,144	0,105	2,055	2,125	2,136	2,053	1,334	1,282	4,692
AVW	150	1x 5 min NaBH4 0,5 %	3	0,129	0,164	0,144	0,116	2,022	2,1	2,158	2,052	1,375	1,304	4,656

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
AVW	150	1x 5min NaBH4 3 %	1	0,111	0,164	0,149	0,081	2,043	2,114	2,15	2,059	1,34	1,289	4,586
AVW	150	Referenz	MW	0,236	0,268	0,254	0,208	2,076	2,146	2,210	2,060	1,314	1,245	4,627
AVW	150	Referenz	SA	0,002	0,002	0,003	0,002	0,006	0,008	0,031	0,024	0,014	0,030	0,028
AVW	250	1x 5 min VE-H2O	1	0,143	0,194	0,165	0,155	2,064	2,09	2,175	2,079	1,332	1,276	4,609
AVW	250	1x 20 min VE-H2O	1	0,158	0,235	0,184	0,153	2,126	2,103	2,229	2,076	1,283	1,27	4,483
AVW	250	1x 60 min VE-H2O	1	0,159	0,184	0,179	0,147	2,183	2,182	2,201	2,182	1,248	1,249	4,568
AVW	250	12x 5 min VE-H2O	3	0,112	0,444	0,07	0,127	2,033	2,019	2,102	2,277	1,326	1,276	4,438
AVW	250	1x 20 min H2O pH 12	3	0,166	0,241	0,206	0,169	2,118	2,13	2,216	2,08	1,325	1,209	4,592
AVW	250	1x 20 min H2O pH 2	1	0,141	0,201	0,186	0,16	2,082	2,149	2,17	2,164	1,276	1,275	4,546
AVW	250	1x 5min H2O2 0,5 %	1	0,148	0,249	0,172	0,144	2,124	2,119	2,199	2,069	1,318	1,27	4,59
AVW	250	1x 5min H2O2 3 %	1	0,094	0,161	0,143	0,19	2,001	2,13	2,164	2,088	1,364	1,296	4,567
AVW	250	1x 5 min KMnO4 0,5 %	3	0,16	0,205	0,192	0,154	2,09	2,126	2,147	2,088	1,301	1,296	4,637
AVW	250	1x 5 min KMnO4 3 %	2	0,157	0,272	0,179	0,126	2,013	2,112	2,125	2,056	1,346	1,288	4,625
AVW	250	1x 5 min NaBH4 0,5 %	1	0,116	0,174	0,148	0,13	2,05	2,046	2,124	2,065	1,379	1,33	4,631
AVW	250	1x 5min NaBH4 3 %	1	0,141	0,205	0,19	0,119	2,025	2,119	2,134	2,285	1,402	1,25	4,653
AVW	250	Referenz	MW	0,270	0,317	0,298	0,245	2,052	2,126	2,162	2,092	1,323	1,283	4,664
AVW	250	Referenz	SA	0,002	0,002	0,002	0,004	0,005	0,012	0,006	0,014	0,010	0,006	0,001
AVW	300	1x 5 min VE-H2O	1	0,143	0,171	0,138	0,134	2,057	2,122	2,161	2,023	1,327	1,254	4,647
AVW	300	1x 20 min VE-H2O	1	0,164	0,201	0,171	0,154	2,057	2,114	2,176	2,041	1,342	1,275	4,597
AVW	300	1x 60 min VE-H2O	1	0,163	0,168	0,159	0,151	2,049	2,148	2,162	2,068	1,319	1,257	4,622
AVW	300	12x 5 min VE-H2O	1	0,154	0,197	0,179	0,126	2,052	2,062	2,1	2,011	1,32	1,294	4,58
AVW	300	1x 20 min H2O pH 12	1	0,167	0,193	0,177	0,15	2,048	2,108	2,145	2,111	1,338	1,286	4,624
AVW	300	1x 20 min H2O pH 2	1	0,166	0,196	0,185	0,144	2,056	2,124	2,144	2,132	1,315	1,264	4,563

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
AVW	300	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	3	0,155	0,189	0,18	0,147	2,061	2,135	2,159	2,129	1,331	1,264	4,589
AVW	300	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	3	0,154	0,2	0,177	0,135	2,043	2,12	2,162	2,126	1,332	1,273	4,579
AVW	300	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	2	0,169	0,19	0,192	0,15	2,04	2,092	2,157	2,066	1,331	1,292	4,607
AVW	300	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	3	0,16	0,185	0,164	0,158	2,042	2,105	2,144	2,088	1,318	1,298	4,62
AVW	300	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,06	0,195	0,152	0,124	1,978	2,069	2,135	2,044	1,362	1,289	4,611
AVW	300	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,11	0,173	0,135	0,118	2,033	2,108	2,149	2,067	1,335	1,293	4,636
AVW	300	Referenz	MW	0,262	0,303	0,283	0,241	2,065	2,148	2,178	2,119	1,307	1,263	4,645
AVW	300	Referenz	SA	0,005	0,010	0,004	0,004	0,017	0,016	0,006	0,029	0,007	0,003	0,015
FK	450	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,203	0,175	0,2	0,183	2,03	2,097	2,146	2,089	1,35	1,344	4,695
FK	450	1x 20 min VE-H ₂ O	1	0,178	0,173	0,167	0,137	2,013	2,071	2,136	2,009	1,395	1,349	4,696
FK	450	1x 60 min VE-H ₂ O	1	0,224	0,214	0,211	0,149	2,013	2,065	2,144	2,041	1,384	1,383	4,663
FK	450	12x 5 min VE-H ₂ O	1	0,165	0,194	0,158	0,125	2,036	2,049	2,124	2,079	1,377	1,364	4,67
FK	450	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,207	0,216	0,226	0,176	2,057	2,074	2,146	2,031	1,377	1,345	4,7
FK	450	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,215	0,236	0,229	0,162	2,032	2,096	2,138	2,119	1,356	1,347	4,693
FK	450	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,188	0,199	0,195	0,181	2,032	2,074	2,125	2,085	1,39	1,348	4,697
FK	450	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,2	0,209	0,197	0,162	2,025	2,075	2,167	2,05	1,372	1,345	4,673
FK	450	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,196	0,225	0,211	0,154	2,038	2,097	2,174	2,071	1,364	1,299	4,685
FK	450	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,243	0,247	0,232	0,176	2,074	2,085	2,148	1,994	1,351	1,314	4,713
FK	450	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,187	0,183	0,212	0,132	2,017	2,072	2,142	2,013	1,374	1,349	4,707
FK	450	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,21	0,209	0,233	0,179	2,01	2,096	2,174	2,06	1,377	1,339	4,692
FK	450	Referenz	MW	0,342	0,358	0,363	0,309	2,071	2,162	2,231	2,176	1,308	1,246	4,614
FK	450	Referenz	SA	0,004	0,007	0,005	0,012	0,011	0,024	0,019	0,013	0,015	0,024	0,021
COPW	160	1x 5 min VE-H ₂ O	1	0,124	0,161	0,15	0,134	2,096	2,2	2,224	2,072	1,274	1,254	4,576

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
COPW	160	1x 20 min VE-H2O	1	0,16	0,191	0,157	0,15	2,129	2,208	2,189	2,076	1,243	1,254	4,597
COPW	160	1x 60 min VE-H2O	1	0,169	0,197	0,172	0,132	2,117	2,141	2,19	2,102	1,314	2,141	4,619
COPW	160	12x 5 min VE-H2O	1	0,141	0,159	0,161	0,132	2,099	2,153	2,226	2,154	1,294	1,182	4,505
COPW	160	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,141	0,191	0,165	0,135	2,037	2,122	2,157	2,023	1,35	1,298	4,669
COPW	160	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,157	0,19	0,16	0,145	2,123	2,201	2,219	2,107	1,277	1,251	4,585
COPW	160	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,141	0,186	0,152	0,121	2,095	2,16	2,198	2,051	1,309	1,264	4,627
COPW	160	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,156	0,17	0,121	0,073	2,058	2,156	2,136	1,981	1,312	1,285	4,7
COPW	160	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,116	0,152	0,17	0,109	2,063	2,141	2,174	2,217	1,324	1,294	4,615
COPW	160	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,127	0,176	0,141	0,103	2,075	2,12	2,159	2,028	1,319	1,279	4,622
COPW	160	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,152	0,174	0,154	0,106	2,076	2,173	2,196	2,068	1,321	1,264	4,6
COPW	160	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,134	0,192	0,135	0,115	2,083	2,186	2,213	2,134	1,306	1,225	4,603
COPW	160	Referenz	MW	0,255	0,303	0,277	0,232	2,087	2,169	2,200	2,093	1,282	1,252	4,629
COPW	160	Referenz	SA	0,001	0,003	0,005	0,006	0,009	0,009	0,010	0,010	0,008	0,010	0,007
COPW	300	1x 5 min VE-H2O	1	0,168	0,201	0,182	0,174	2,09	2,179	2,153	2,079	1,273	1,292	4,606
COPW	300	1x 20 min VE-H2O	1	0,18	0,191	0,188	0,143	2,093	2,14	2,197	2,076	1,311	1,295	4,545
COPW	300	1x 60 min VE-H2O	1	0,185	0,192	0,162	0,159	2,098	2,131	2,171	2,069	1,34	1,288	4,614
COPW	300	12x 5 min VE-H2O	1	0,13	0,147	0,14	0,11	2,005	2,086	2,135	2,017	1,351	1,281	4,633
COPW	300	1x 20 min H ₂ O pH 12	1	0,19	0,218	0,192	0,165	2,063	2,131	2,171	2,075	1,325	1,301	4,641
COPW	300	1x 20 min H ₂ O pH 2	2	0,159	0,194	0,174	0,168	2,073	2,198	2,209	2,091	1,293	1,235	4,624
COPW	300	1x 5min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	0,174	0,206	0,178	0,152	2,074	2,145	2,214	2,189	1,336	1,256	4,608
COPW	300	1x 5min H ₂ O ₂ 3 %	1	0,179	0,197	0,161	0,14	2,121	2,152	2,157	2,147	1,281	1,308	4,61
COPW	300	1x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	0,168	0,203	0,178	0,154	2,087	2,146	2,187	2,069	1,307	1,283	4,631
COPW	300	1x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	0,152	0,184	0,159	0,126	2,084	2,119	2,164	2,067	1,33	1,297	4,702

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (horiz)1	Pt-Pt (horiz)2	Pt-Pt (horiz)3	Pt-Pt (horiz)4	Pt-Pt (horiz)5	Pt-Pt (horiz)6	Pt-Pt (horiz)7
COPW	300	1x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	0,138	0,191	0,158	0,129	2,058	2,137	2,212	2,209	1,296	1,342	4,565
COPW	300	1x 5min NaBH ₄ 3 %	1	0,161	0,185	0,171	0,141	2,073	2,147	2,181	2,012	1,314	1,316	4,637
COPW	300	Referenz	MW	0,281	0,321	0,311	0,266	2,080	2,168	2,182	2,093	1,293	1,278	4,625
COPW	300	Referenz	SA	0,007	0,003	0,006	0,008	0,009	0,007	0,021	0,017	0,016	0,017	0,008

c. Einfluss der Behandlungsverfahren

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
VDA	160	1 x 5 min VE-H2O	1	-0,145	-0,131	-0,129	-0,126	0,002	-0,003	-0,029	-0,035	0,035	0,031	0,013
VDA	160	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,103	-0,124	-0,127	-0,099	0,007	-0,008	0,002	0,005	0,023	0,038	-0,006
VDA	160	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,126	-0,113	-0,119	-0,115	-0,008	-0,028	-0,026	-0,066	0,035	0,054	0,040
VDA	160	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,151	-0,156	-0,147	-0,139	0,038	-0,011	-0,013	0,046	0,013	0,040	-0,030
VDA	160	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,124	-0,124	-0,107	-0,093	0,020	-0,008	-0,008	-0,024	0,023	0,031	0,015
VDA	160	1 x 20 min H ₂ O pH 2	1	-0,134	-0,130	-0,129	-0,111	-0,007	-0,011	-0,005	-0,001	0,032	0,035	-0,004
VDA	160	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,100	-0,110	-0,117	-0,100	0,004	-0,016	0,015	-0,021	0,027	0,041	-0,019
VDA	160	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,128	-0,147	-0,127	-0,108	0,011	-0,004	-0,006	-0,013	0,043	0,018	0,036
VDA	160	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,128	-0,141	-0,135	-0,138	0,026	-0,028	-0,018	0,020	0,018	0,038	0,009
VDA	160	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,133	-0,129	-0,142	-0,128	-0,006	-0,004	-0,008	-0,020	0,031	0,034	-0,015
VDA	160	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,140	-0,136	-0,134	-0,118	0,012	-0,015	0,013	0,045	0,034	0,032	-0,013
VDA	160	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,138	-0,139	-0,133	-0,117	-0,004	-0,002	-0,013	0,026	0,026	0,053	-0,014
VDA	160	Referenz	SA	0,004	0,002	0,004	0,001	0,004	0,017	0,013	0,026	0,012	0,008	0,008
VDA	250	1 x 5 min VE-H2O	1	-0,119	-0,129	-0,146	-0,147	0,005	-0,010	0,005	-0,040	0,044	0,017	0,034
VDA	250	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,130	-0,123	-0,124	-0,114	0,015	0,007	-0,007	-0,021	0,015	0,029	0,011
VDA	250	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,116	-0,127	-0,143	-0,123	-0,002	-0,007	-0,016	-0,057	0,013	0,036	0,037
VDA	250	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,170	-0,177	-0,170	-0,131	-0,001	0,000	-0,025	-0,046	0,033	0,045	0,002
VDA	250	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,114	-0,113	-0,137	-0,100	0,011	-0,008	-0,049	0,009	0,022	0,065	0,009
VDA	250	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,128	-0,129	-0,126	-0,111	0,025	0,015	0,017	0,043	0,000	0,004	-0,018
VDA	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,121	-0,111	-0,125	-0,123	-0,004	-0,005	-0,004	-0,026	0,011	0,036	0,033
VDA	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,108	-0,113	-0,133	-0,114	0,010	0,005	0,006	-0,005	0,020	0,007	0,014
VDA	250	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,148	-0,146	-0,140	-0,142	0,013	-0,003	-0,002	-0,012	0,029	0,031	-0,005

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
VDA	250	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,124	-0,146	-0,143	-0,122	-0,005	0,010	0,001	0,028	0,025	0,022	-0,002
VDA	250	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,128	-0,108	-0,130	-0,132	0,003	-0,002	-0,015	0,000	0,027	0,052	0,008
VDA	250	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,114	-0,109	-0,144	-0,135	0,017	0,011	0,006	-0,008	0,009	0,031	0,008
VDA	250	Referenz	SA	0,004	0,004	0,003	0,000	0,002	0,002	0,011	0,013	0,005	0,017	0,010
VDA	300	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,125	-0,132	-0,138	-0,117	-0,005	-0,001	0,006	-0,024	0,035	0,019	0,021
VDA	300	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,122	-0,155	-0,155	-0,139	0,010	-0,003	0,032	-0,046	0,031	-0,006	0,038
VDA	300	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,118	-0,142	-0,155	-0,104	-0,009	-0,010	0,010	0,015	0,058	0,017	0,008
VDA	300	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,183	-0,203	-0,206	-0,185	-0,011	-0,021	-0,006	-0,049	0,055	0,020	0,001
VDA	300	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,118	-0,145	-0,147	-0,121	0,014	-0,014	0,027	0,032	0,029	0,034	-0,001
VDA	300	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,129	-0,139	-0,140	-0,129	0,013	0,028	0,035	0,006	0,005	0,009	-0,003
VDA	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,115	-0,143	-0,123	-0,117	-0,001	0,003	0,021	-0,013	0,029	0,024	-0,002
VDA	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,133	-0,132	-0,129	-0,130	0,010	0,006	0,054	-0,013	0,023	-0,004	-0,004
VDA	300	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,160	-0,165	-0,146	-0,140	0,001	0,005	-0,003	0,017	0,035	0,014	-0,006
VDA	300	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,117	-0,145	-0,140	-0,127	0,043	0,030	0,045	0,017	-0,002	0,006	-0,035
VDA	300	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,134	-0,139	-0,142	-0,122	0,019	0,006	0,069	0,004	0,005	0,009	-0,053
VDA	300	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,120	-0,135	-0,141	-0,116	0,023	0,002	0,016	0,005	0,018	0,029	-0,004
VDA	300	Referenz	SA	0,003	0,003	0,003	0,004	0,013	0,002	0,004	0,015	0,005	0,004	0,011
TB	170	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,109	-0,104	-0,119	-0,106	0,034	-0,008	0,015	0,011	-0,002	0,013	-0,058
TB	170	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,116	-0,105	-0,120	-0,097	0,008	-0,042	-0,021	-0,013	0,016	0,061	-0,029
TB	170	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,117	-0,114	-0,108	-0,082	-0,003	-0,023	0,050	-0,018	0,050	-0,005	-0,078
TB	170	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,138	-0,129	-0,128	-0,102	0,004	0,011	-0,006	0,008	0,001	-0,021	-0,093
TB	170	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,100	-0,099	-0,095	-0,089	-0,008	-0,037	0,018	0,040	0,033	0,030	-0,047
TB	170	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,116	-0,111	-0,105	-0,095	0,008	-0,015	0,009	0,047	0,009	0,039	-0,051

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
TB	170	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,115	-0,116	-0,113	-0,094	0,011	-0,032	-0,025	-0,032	0,041	0,046	0,007
TB	170	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,099	-0,111	-0,121	-0,118	0,022	-0,006	0,022	0,014	0,027	0,009	-0,041
TB	170	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,121	-0,119	-0,122	-0,124	0,012	-0,009	-0,024	-0,059	0,033	0,015	-0,007
TB	170	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,127	-0,129	-0,124	-0,109	-0,017	-0,036	-0,032	-0,003	0,050	0,057	-0,017
TB	170	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,126	-0,139	-0,133	-0,110	0,015	-0,034	-0,011	-0,030	0,040	0,035	-0,043
TB	170	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,139	-0,155	-0,145	-0,127	0,011	-0,027	-0,024	-0,027	0,043	0,031	-0,010
TB	170	Referenz	SA	0,004	0,005	0,005	0,008	0,008	0,005	0,003	0,020	0,010	0,002	0,002
TB	250	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,106	-0,108	-0,128	-0,098	0,002	-0,015	-0,027	-0,016	0,013	0,050	-0,022
TB	250	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,121	-0,126	-0,140	-0,107	0,026	-0,010	0,013	0,026	0,013	0,037	-0,048
TB	250	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,109	-0,131	-0,115	-0,103	-0,014	-0,070	-0,046	-0,022	0,059	0,082	-0,038
TB	250	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,123	-0,145	-0,156	-0,117	0,013	-0,074	-0,022	-0,034	0,027	0,065	-0,059
TB	250	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,107	-0,099	-0,118	-0,100	0,006	-0,023	0,029	-0,008	0,025	0,037	-0,046
TB	250	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,128	-0,139	-0,145	-0,115	0,008	-0,045	-0,009	-0,008	0,030	0,065	-0,027
TB	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,120	-0,124	-0,135	-0,107	0,001	0,010	0,000	-0,036	0,019	0,011	-0,021
TB	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,120	-0,115	-0,135	-0,103	-0,003	-0,058	-0,031	-0,020	0,042	0,066	0,003
TB	250	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,152	-0,132	-0,152	-0,116	-0,022	-0,046	-0,019	0,070	0,060	0,054	-0,041
TB	250	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,138	-0,109	-0,132	-0,101	-0,036	-0,032	-0,020	-0,021	0,016	0,051	-0,033
TB	250	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,141	-0,137	-0,131	-0,110	-0,006	-0,047	-0,031	-0,012	0,041	0,070	0,000
TB	250	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,118	-0,128	-0,138	-0,096	0,014	-0,034	0,009	-0,012	0,017	0,061	-0,046
TB	250	Referenz	SA	0,004	0,003	0,002	0,004	0,008	0,007	0,016	0,012	0,005	0,016	0,014
TB	300	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,091	-0,106	-0,127	-0,101	-0,006	-0,033	0,005	0,006	0,035	0,022	-0,007
TB	300	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,109	-0,110	-0,123	-0,109	-0,014	-0,054	0,019	-0,004	0,059	0,018	-0,049
TB	300	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,098	-0,119	-0,102	-0,103	-0,001	-0,034	0,003	0,085	0,021	0,022	-0,010

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
TB	300	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,116	-0,142	-0,153	-0,115	0,030	-0,070	-0,005	0,024	0,014	0,014	-0,095
TB	300	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,094	-0,096	-0,138	-0,102	-0,012	-0,035	0,014	0,027	0,049	0,017	-0,031
TB	300	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,118	-0,130	-0,121	-0,099	0,000	-0,034	0,031	0,008	0,037	0,022	-0,049
TB	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,094	-0,113	-0,121	-0,108	-0,008	-0,039	0,036	-0,008	0,042	0,003	-0,036
TB	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	2	-0,098	-0,118	-0,128	-0,094	-0,003	-0,028	-0,002	-0,011	0,035	0,038	-0,023
TB	300	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,106	-0,119	-0,143	-0,107	-0,027	-0,034	-0,032	-0,014	0,039	0,040	-0,061
TB	300	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,113	-0,128	-0,147	-0,118	-0,027	-0,040	-0,029	-0,006	0,045	0,026	-0,017
TB	300	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,120	-0,129	-0,141	-0,118	0,014	-0,024	0,002	0,010	0,028	0,026	-0,014
TB	300	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,107	-0,118	-0,138	-0,107	0,007	-0,038	0,023	0,036	0,041	0,006	-0,037
TB	300	Referenz	SA	0,009	0,009	0,004	0,007	0,010	0,014	0,005	0,023	0,009	0,005	0,005
SB	170	1 x 5 min VE-H2O	1	-0,127	-0,119	-0,120	-0,108	0,013	0,019	0,000	-0,008	0,010	0,012	-0,030
SB	170	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,125	-0,117	-0,120	-0,092	-0,026	-0,009	-0,005	-0,011	0,046	0,014	-0,058
SB	170	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,113	-0,130	-0,101	-0,091	-0,040	-0,025	-0,055	-0,036	0,049	0,034	-0,016
SB	170	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,123	-0,155	-0,147	-0,103	-0,015	0,012	-0,087	-0,016	0,049	0,005	-0,024
SB	170	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,097	-0,100	-0,107	-0,092	-0,024	-0,034	-0,027	-0,041	0,051	0,049	0,001
SB	170	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,115	-0,110	-0,105	-0,097	-0,006	-0,013	-0,035	-0,019	0,027	0,045	0,006
SB	170	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,098	-0,100	-0,114	-0,095	0,004	-0,015	-0,063	-0,072	0,026	0,051	0,005
SB	170	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,103	-0,115	-0,125	-0,111	0,001	-0,003	0,007	-0,023	0,035	0,015	-0,028
SB	170	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,113	-0,131	-0,142	-0,112	-0,019	-0,028	-0,045	-0,016	0,049	0,053	-0,015
SB	170	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,133	-0,118	-0,122	-0,108	-0,024	-0,010	-0,059	-0,004	0,036	0,050	0,028
SB	170	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,131	-0,135	-0,116	-0,114	-0,023	0,002	-0,012	-0,012	0,021	0,009	-0,030
SB	170	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,110	-0,122	-0,116	-0,099	-0,017	-0,024	-0,045	-0,022	0,043	0,054	0,036
SB	170	Referenz	SA	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,009	0,017	0,010	0,014	0,006

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
SB	250	1 x 5 min VE-H2O	1	-0,098	-0,117	-0,130	-0,111	0,003	-0,014	-0,011	-0,008	0,041	0,021	-0,015
SB	250	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,113	-0,125	-0,126	-0,118	-0,005	-0,019	0,000	0,032	0,026	0,027	-0,041
SB	250	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,103	-0,119	-0,135	-0,115	-0,025	-0,043	-0,041	0,021	0,070	0,045	-0,023
SB	250	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,101	-0,131	-0,130	-0,115	0,068	-0,008	-0,058	0,003	-0,018	0,038	-0,022
SB	250	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,098	-0,102	-0,120	-0,097	-0,014	-0,027	0,002	-0,012	0,050	0,024	-0,029
SB	250	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,094	-0,121	-0,123	-0,098	-0,013	0,006	-0,028	-0,006	0,045	0,011	-0,016
SB	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,100	-0,106	-0,120	-0,111	0,000	-0,009	-0,048	-0,043	0,045	0,020	0,018
SB	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	3	-0,107	-0,119	-0,127	-0,113	0,025	-0,034	-0,033	0,021	0,051	0,061	-0,013
SB	250	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,117	-0,124	-0,134	-0,125	0,022	0,005	-0,031	-0,006	0,045	0,013	-0,002
SB	250	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,112	-0,126	-0,122	-0,115	0,011	0,001	-0,029	0,046	0,035	0,012	-0,009
SB	250	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,114	-0,116	-0,125	-0,128	0,025	-0,007	0,011	-0,032	-0,010	0,027	-0,017
SB	250	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,137	-0,127	-0,128	-0,110	0,032	-0,002	0,018	0,100	0,010	0,012	-0,086
SB	250	Referenz	SA	0,005	0,009	0,006	0,002	0,017	0,004	0,005	0,008	0,013	0,003	0,004
SB	300	1 x 5 min VE-H2O	1	-0,131	-0,131	-0,135	-0,114	-0,018	-0,040	-0,029	-0,019	0,030	0,041	0,015
SB	300	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,116	-0,136	-0,121	-0,106	-0,005	-0,018	-0,024	-0,038	0,035	0,019	0,011
SB	300	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,106	-0,136	-0,134	-0,100	0,003	-0,041	-0,049	-0,010	0,041	0,040	-0,026
SB	300	12 x 5 min VE-H2O	2	-0,128	-0,149	-0,141	-0,086	0,032	0,072	-0,003	-0,029	-0,115	0,019	-0,128
SB	300	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,103	-0,117	-0,105	-0,103	0,003	-0,016	-0,003	-0,021	0,002	0,011	-0,042
SB	300	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,088	-0,121	-0,125	-0,098	0,006	-0,007	-0,018	0,004	0,022	0,021	-0,005
SB	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	3	-0,117	-0,090	-0,128	-0,095	0,001	-0,046	-0,037	-0,032	0,033	0,063	0,004
SB	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	3	-0,104	-0,111	-0,117	-0,094	0,014	-0,009	-0,025	-0,055	0,011	0,011	-0,046
SB	300	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,125	-0,146	-0,139	-0,107	0,024	-0,039	-0,015	0,017	0,031	0,041	-0,034
SB	300	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,109	-0,115	-0,131	-0,109	-0,003	-0,032	-0,033	-0,093	0,041	0,045	0,031

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
SB	300	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	3	-0,115	-0,136	-0,129	-0,101	0,019	-0,040	-0,039	0,014	0,009	0,060	0,005
SB	300	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	3	-0,132	-0,134	-0,138	-0,113	-0,005	-0,031	-0,038	-0,009	0,049	0,061	-0,004
SB	300	Referenz	SA	0,005	0,007	0,006	0,004	0,004	0,014	0,005	0,017	0,010	0,006	0,010
AVW	150	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,101	-0,104	-0,118	-0,078	-0,019	-0,008	-0,032	-0,083	0,017	0,086	-0,069
AVW	150	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,101	-0,096	-0,101	-0,079	-0,021	-0,038	-0,048	0,032	0,037	0,053	-0,081
AVW	150	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,084	-0,100	-0,104	-0,084	0,005	-0,025	0,031	-0,019	0,007	-0,004	-0,064
AVW	150	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,125	-0,130	-0,117	-0,107	-0,023	-0,067	-0,083	-0,052	0,007	0,299	-0,023
AVW	150	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,101	-0,097	-0,117	-0,077	0,000	-0,030	-0,054	0,007	0,003	0,072	0,004
AVW	150	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,107	-0,104	-0,093	-0,074	0,026	-0,032	-0,068	0,013	0,023	0,064	-0,026
AVW	150	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,095	-0,104	-0,114	-0,086	-0,006	-0,015	-0,053	-0,020	0,029	0,044	0,011
AVW	150	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,094	-0,092	-0,099	-0,094	-0,020	-0,022	-0,044	-0,001	0,032	0,041	0,017
AVW	150	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,100	-0,092	-0,095	-0,094	-0,057	-0,046	-0,029	-0,041	0,059	0,047	0,017
AVW	150	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,108	-0,099	-0,110	-0,103	-0,021	-0,021	-0,074	-0,007	0,020	0,037	0,065
AVW	150	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	3	-0,107	-0,104	-0,110	-0,092	-0,054	-0,046	-0,052	-0,008	0,061	0,059	0,029
AVW	150	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,125	-0,104	-0,105	-0,127	-0,033	-0,032	-0,060	-0,001	0,026	0,044	-0,041
AVW	150	Referenz	SA	0,002	0,002	0,003	0,002	0,006	0,008	0,031	0,024	0,014	0,030	0,028
AVW	250	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,127	-0,123	-0,133	-0,090	0,012	-0,036	0,013	-0,013	0,009	-0,007	-0,055
AVW	250	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,112	-0,082	-0,114	-0,092	0,074	-0,023	0,067	-0,016	-0,040	-0,013	-0,181
AVW	250	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,111	-0,133	-0,119	-0,098	0,131	0,056	0,039	0,090	-0,075	-0,034	-0,096
AVW	250	12 x 5 min VE-H ₂ O	3	-0,158	0,127	-0,228	-0,118	-0,019	-0,107	-0,060	0,185	0,003	-0,007	-0,226
AVW	250	1 x 20 min H ₂ O pH 12	3	-0,104	-0,076	-0,092	-0,076	0,066	0,004	0,054	-0,012	0,002	-0,074	-0,072
AVW	250	1 x 20 min H ₂ O pH 2	1	-0,129	-0,116	-0,112	-0,085	0,030	0,023	0,008	0,072	-0,047	-0,008	-0,118
AVW	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,122	-0,068	-0,126	-0,101	0,072	-0,007	0,037	-0,023	-0,005	-0,013	-0,074

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
AVW	250	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,176	-0,156	-0,155	-0,055	-0,051	0,004	0,002	-0,004	0,041	0,013	-0,097
AVW	250	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	3	-0,110	-0,112	-0,106	-0,091	0,038	0,000	-0,015	-0,004	-0,022	0,013	-0,027
AVW	250	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	2	-0,113	-0,045	-0,119	-0,119	-0,039	-0,014	-0,037	-0,036	0,023	0,005	-0,039
AVW	250	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,154	-0,143	-0,150	-0,115	-0,002	-0,080	-0,038	-0,027	0,056	0,047	-0,033
AVW	250	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,129	-0,112	-0,108	-0,126	-0,027	-0,007	-0,028	0,193	0,079	-0,033	-0,011
AVW	250	Referenz	SA	0,002	0,002	0,002	0,004	0,005	0,012	0,006	0,014	0,010	0,006	0,001
AVW	300	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,119	-0,132	-0,145	-0,107	-0,008	-0,026	-0,017	-0,096	0,020	-0,009	0,002
AVW	300	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,098	-0,102	-0,112	-0,087	-0,008	-0,034	-0,002	-0,078	0,035	0,012	-0,048
AVW	300	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,099	-0,135	-0,124	-0,090	-0,016	0,000	-0,016	-0,051	0,012	-0,006	-0,023
AVW	300	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,108	-0,106	-0,104	-0,115	-0,013	-0,086	-0,078	-0,108	0,013	0,031	-0,065
AVW	300	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,095	-0,110	-0,106	-0,091	-0,017	-0,040	-0,033	-0,008	0,031	0,023	-0,021
AVW	300	1 x 20 min H ₂ O pH 2	1	-0,096	-0,107	-0,098	-0,097	-0,009	-0,024	-0,034	0,013	0,008	0,001	-0,082
AVW	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	3	-0,107	-0,114	-0,103	-0,094	-0,004	-0,013	-0,019	0,010	0,024	0,001	-0,056
AVW	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	3	-0,108	-0,103	-0,106	-0,106	-0,022	-0,028	-0,016	0,007	0,025	0,010	-0,066
AVW	300	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	2	-0,093	-0,113	-0,091	-0,091	-0,025	-0,056	-0,021	-0,053	0,024	0,029	-0,038
AVW	300	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	3	-0,102	-0,118	-0,119	-0,083	-0,023	-0,043	-0,034	-0,031	0,011	0,035	-0,025
AVW	300	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,202	-0,108	-0,131	-0,117	-0,087	-0,079	-0,043	-0,075	0,055	0,026	-0,034
AVW	300	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,152	-0,130	-0,148	-0,123	-0,032	-0,040	-0,029	-0,052	0,028	0,030	-0,009
AVW	300	Referenz	SA	0,005	0,010	0,004	0,004	0,017	0,016	0,006	0,029	0,007	0,003	0,015
FK	450	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,139	-0,183	-0,163	-0,126	-0,041	-0,065	-0,085	-0,087	0,042	0,098	0,081
FK	450	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,164	-0,185	-0,196	-0,172	-0,058	-0,091	-0,095	-0,167	0,087	0,103	0,082
FK	450	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,118	-0,144	-0,152	-0,160	-0,058	-0,097	-0,087	-0,135	0,076	0,137	0,049
FK	450	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,177	-0,164	-0,205	-0,184	-0,035	-0,113	-0,107	-0,097	0,069	0,118	0,056

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
FK	450	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,135	-0,142	-0,137	-0,133	-0,014	-0,088	-0,085	-0,145	0,069	0,099	0,086
FK	450	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,127	-0,122	-0,134	-0,147	-0,039	-0,066	-0,093	-0,057	0,048	0,101	0,079
FK	450	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,154	-0,159	-0,168	-0,128	-0,039	-0,088	-0,106	-0,091	0,082	0,102	0,083
FK	450	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,142	-0,149	-0,166	-0,147	-0,046	-0,087	-0,064	-0,126	0,064	0,099	0,059
FK	450	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,146	-0,133	-0,152	-0,155	-0,033	-0,065	-0,057	-0,105	0,056	0,053	0,071
FK	450	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,099	-0,111	-0,131	-0,133	0,003	-0,077	-0,083	-0,182	0,043	0,068	0,099
FK	450	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,155	-0,175	-0,151	-0,177	-0,054	-0,090	-0,089	-0,163	0,066	0,103	0,093
FK	450	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,132	-0,149	-0,130	-0,130	-0,061	-0,066	-0,057	-0,116	0,069	0,093	0,078
FK	450	Referenz	SA	0,004	0,007	0,005	0,012	0,011	0,024	0,019	0,013	0,015	0,024	0,021
COPW	160	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,131	-0,142	-0,127	-0,098	0,009	0,031	0,024	-0,021	-0,008	0,002	-0,053
COPW	160	1 x 20 min VE-H ₂ O	1	-0,095	-0,112	-0,120	-0,082	0,042	0,039	-0,011	-0,017	-0,039	0,002	-0,032
COPW	160	1 x 60 min VE-H ₂ O	1	-0,086	-0,106	-0,105	-0,100	0,030	-0,028	-0,010	0,009	0,032	0,889	-0,010
COPW	160	12 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,114	-0,144	-0,116	-0,100	0,012	-0,016	0,026	0,061	0,012	-0,070	-0,124
COPW	160	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,114	-0,112	-0,112	-0,097	-0,050	-0,047	-0,043	-0,070	0,068	0,046	0,040
COPW	160	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,098	-0,113	-0,117	-0,087	0,036	0,032	0,019	0,014	-0,005	-0,001	-0,044
COPW	160	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,114	-0,117	-0,125	-0,111	0,008	-0,009	-0,002	-0,042	0,027	0,012	-0,002
COPW	160	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,099	-0,133	-0,156	-0,159	-0,029	-0,013	-0,064	-0,112	0,030	0,033	0,071
COPW	160	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,139	-0,151	-0,107	-0,123	-0,024	-0,028	-0,026	0,124	0,042	0,042	-0,014
COPW	160	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,128	-0,127	-0,136	-0,129	-0,012	-0,049	-0,041	-0,065	0,037	0,027	-0,007
COPW	160	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,103	-0,129	-0,123	-0,126	-0,011	0,004	-0,004	-0,025	0,039	0,012	-0,029
COPW	160	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,121	-0,111	-0,142	-0,117	-0,004	0,017	0,013	0,041	0,024	-0,027	-0,026
COPW	160	Referenz	SA	0,001	0,003	0,005	0,006	0,009	0,009	0,010	0,010	0,008	0,010	0,007
COPW	300	1 x 5 min VE-H ₂ O	1	-0,113	-0,120	-0,129	-0,092	0,010	0,011	-0,029	-0,014	-0,020	0,014	-0,019

Sorte	Grammatur	Behandlung	Probe	Pt-Pt (vert)1	Pt-Pt (vert)2	Pt-Pt (vert)3	Pt-Pt (vert)4	Pt-Pt (ho-riz)1	Pt-Pt (ho-riz)2	Pt-Pt (ho-riz)3	Pt-Pt (ho-riz)4	Pt-Pt (ho-riz)5	Pt-Pt (ho-riz)6	Pt-Pt (ho-riz)7
COPW	300	1 x 20 min VE-H2O	1	-0,101	-0,130	-0,123	-0,123	0,013	-0,028	0,015	-0,017	0,018	0,017	-0,080
COPW	300	1 x 60 min VE-H2O	1	-0,096	-0,129	-0,149	-0,107	0,018	-0,037	-0,011	-0,024	0,047	0,010	-0,011
COPW	300	12 x 5 min VE-H2O	1	-0,151	-0,174	-0,171	-0,156	-0,075	-0,082	-0,047	-0,076	0,058	0,003	0,008
COPW	300	1 x 20 min H ₂ O pH 12	1	-0,091	-0,103	-0,119	-0,101	-0,017	-0,037	-0,011	-0,018	0,032	0,023	0,016
COPW	300	1 x 20 min H ₂ O pH 2	2	-0,122	-0,127	-0,137	-0,098	-0,007	0,030	0,027	-0,002	0,000	-0,043	-0,001
COPW	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	1	-0,107	-0,115	-0,133	-0,114	-0,006	-0,023	0,032	0,096	0,043	-0,022	-0,017
COPW	300	1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	1	-0,102	-0,124	-0,150	-0,126	0,041	-0,016	-0,025	0,054	-0,012	0,030	-0,015
COPW	300	1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	1	-0,113	-0,118	-0,133	-0,112	0,007	-0,022	0,005	-0,024	0,014	0,005	0,006
COPW	300	1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	1	-0,129	-0,137	-0,152	-0,140	0,004	-0,049	-0,018	-0,026	0,037	0,019	0,077
COPW	300	1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	1	-0,143	-0,130	-0,153	-0,137	-0,022	-0,031	0,030	0,116	0,003	0,064	-0,060
COPW	300	1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	1	-0,120	-0,136	-0,140	-0,125	-0,007	-0,021	-0,001	-0,081	0,021	0,038	0,012
COPW	300	Referenz	SA	0,007	0,003	0,006	0,008	0,009	0,007	0,021	0,017	0,016	0,017	0,008

d. Einfluss des Flächengewichts und der Papiersorten

Mittelwerte aus den vertikalen Messwerten 1 bis 4 (Relieffhöhe)

	VDA	VDA	VDA	TB	TB	TB	SB	SB	SB	AVW	AVW	AVW	FK	COPW	COPW
	160	250	300	170	250	300	170	250	300	150	250	300	450	160	300
	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²
1 x 5 min VE-H2O	0,133	0,135	0,128	0,110	0,110	0,106	0,118	0,114	0,128	0,100	0,118	0,126	0,153	0,125	0,113
1 x 20 min VE-H2O	0,113	0,123	0,143	0,110	0,123	0,113	0,113	0,121	0,120	0,094	0,100	0,100	0,179	0,102	0,119
1 x 60 min VE-H2O	0,118	0,127	0,130	0,105	0,114	0,105	0,109	0,118	0,119	0,093	0,115	0,112	0,144	0,099	0,120
12 x 5 min VE-H2O	0,148	0,162	0,194	0,124	0,135	0,131	0,132	0,119	0,126	0,120	0,158	0,108	0,183	0,119	0,163
1 x 20 min H ₂ O pH 12	0,112	0,116	0,133	0,096	0,106	0,107	0,099	0,104	0,107	0,098	0,087	0,101	0,137	0,109	0,103
1 x 20 min H ₂ O pH 2	0,126	0,124	0,134	0,107	0,132	0,117	0,107	0,109	0,108	0,095	0,110	0,100	0,133	0,104	0,121
1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	0,107	0,120	0,125	0,110	0,121	0,109	0,102	0,109	0,108	0,100	0,104	0,105	0,152	0,117	0,117
1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	0,127	0,117	0,131	0,112	0,118	0,109	0,113	0,117	0,107	0,095	0,135	0,106	0,151	0,137	0,125
1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	0,135	0,144	0,153	0,122	0,138	0,119	0,124	0,125	0,129	0,095	0,105	0,097	0,147	0,130	0,119
1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	0,133	0,134	0,132	0,122	0,120	0,126	0,120	0,119	0,116	0,105	0,099	0,106	0,119	0,130	0,139
1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	0,132	0,125	0,134	0,127	0,130	0,127	0,124	0,121	0,120	0,103	0,140	0,140	0,165	0,120	0,141
1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	0,132	0,126	0,128	0,142	0,120	0,117	0,112	0,126	0,129	0,115	0,119	0,138	0,135	0,123	0,130
Referenz	0,003	0,003	0,003	0,005	0,003	0,007	0,003	0,006	0,006	0,002	0,003	0,006	0,007	0,004	0,006

Mittelwerte aus den horizontalen Messwerten 1 bis 4 (Reliefbreite)

	VDA	VDA	VDA	TB	TB	TB	SB	SB	SB	AVW	AVW	AVW	FK	COPW	COPW
	160	250	300	170	250	300	170	250	300	150	250	300	450	160	300
	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²
1 x 5 min VE-H2O	0,017	0,015	0,009	0,017	0,015	0,013	0,010	0,009	0,026	0,036	0,019	0,037	0,070	0,021	0,016
1 x 20 min VE-H2O	0,005	0,013	0,023	0,021	0,019	0,023	0,013	0,014	0,021	0,035	0,045	0,030	0,103	0,027	0,018
1 x 60 min VE-H2O	0,032	0,021	0,011	0,024	0,038	0,031	0,039	0,033	0,026	0,020	0,079	0,021	0,094	0,019	0,023
12 x 5 min VE-H2O	0,027	0,018	0,022	0,007	0,036	0,032	0,032	0,034	0,034	0,056	0,093	0,071	0,088	0,029	0,070

1 x 20 min H ₂ O pH 12	0,015	0,019	0,022	0,026	0,017	0,022	0,031	0,014	0,011	0,023	0,034	0,024	0,083	0,053	0,021
1 x 20 min H ₂ O pH 2	0,006	0,025	0,020	0,020	0,018	0,018	0,018	0,013	0,009	0,035	0,033	0,020	0,064	0,025	0,017
1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	0,014	0,010	0,009	0,025	0,012	0,023	0,038	0,025	0,029	0,024	0,035	0,012	0,081	0,015	0,039
1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	0,008	0,006	0,021	0,016	0,028	0,011	0,009	0,028	0,026	0,022	0,015	0,018	0,081	0,054	0,034
1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	0,023	0,007	0,006	0,026	0,039	0,027	0,027	0,016	0,024	0,043	0,014	0,039	0,065	0,051	0,014
1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	0,010	0,011	0,033	0,022	0,028	0,025	0,024	0,022	0,040	0,031	0,032	0,033	0,086	0,042	0,024
1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	0,021	0,005	0,024	0,023	0,024	0,013	0,012	0,019	0,028	0,040	0,037	0,071	0,099	0,011	0,050
1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	0,012	0,011	0,011	0,023	0,017	0,026	0,027	0,038	0,021	0,032	0,064	0,038	0,075	0,019	0,028
Referenz	0,015	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,009	0,008	0,010	0,017	0,009	0,017	0,017	0,010	0,014

Mittelwerte aus den horizontalen Messwerten 5 bis 7 (Reliefzwischenräume)

	VDA	VDA	VDA	TB	TB	TB	SB	SB	SB	AVW	AVW	AVW	FK	COPW	COPW
	160	250	300	170	250	300	170	250	300	150	250	300	450	160	300
	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²
1 x 5 min VE-H ₂ O	0,026	0,032	0,025	0,024	0,028	0,021	0,017	0,026	0,029	0,057	0,024	0,010	0,073	0,021	0,018
1 x 20 min VE-H ₂ O	0,022	0,018	0,025	0,035	0,033	0,042	0,039	0,032	0,022	0,057	0,078	0,032	0,090	0,024	0,039
1 x 60 min VE-H ₂ O	0,043	0,029	0,028	0,044	0,060	0,018	0,033	0,046	0,035	0,025	0,068	0,014	0,087	0,311	0,023
12 x 5 min VE-H ₂ O	0,028	0,027	0,025	0,038	0,050	0,041	0,026	0,026	0,087	0,110	0,079	0,036	0,081	0,069	0,023
1 x 20 min H ₂ O pH 12	0,023	0,032	0,022	0,036	0,036	0,032	0,034	0,035	0,018	0,026	0,049	0,025	0,084	0,051	0,024
1 x 20 min H ₂ O pH 2	0,024	0,008	0,006	0,033	0,041	0,036	0,026	0,024	0,016	0,038	0,058	0,030	0,076	0,017	0,015
1 x 5 min H ₂ O ₂ 0,5 %	0,029	0,027	0,019	0,031	0,017	0,027	0,027	0,028	0,033	0,028	0,031	0,027	0,089	0,014	0,027
1 x 5 min H ₂ O ₂ 3 %	0,032	0,014	0,010	0,025	0,037	0,032	0,026	0,042	0,022	0,030	0,050	0,034	0,074	0,045	0,019
1 x 5 min KMnO ₄ 0,5 %	0,022	0,022	0,019	0,018	0,052	0,047	0,039	0,020	0,035	0,041	0,021	0,030	0,060	0,033	0,008
1 x 5 min KMnO ₄ 3 %	0,027	0,017	0,015	0,041	0,033	0,029	0,038	0,019	0,039	0,041	0,022	0,024	0,070	0,024	0,044
1 x 5 min NaBH ₄ 0,5 %	0,026	0,029	0,023	0,039	0,037	0,023	0,020	0,018	0,025	0,050	0,045	0,038	0,087	0,027	0,043
1 x 5 min NaBH ₄ 3 %	0,031	0,016	0,017	0,028	0,041	0,028	0,044	0,036	0,038	0,037	0,041	0,022	0,080	0,026	0,024
Referenz	0,009	0,011	0,007	0,005	0,012	0,007	0,010	0,007	0,009	0,024	0,005	0,008	0,020	0,008	0,014

Anlage 4. Objektdokumentation

a. Fotodokumentation¹³⁹

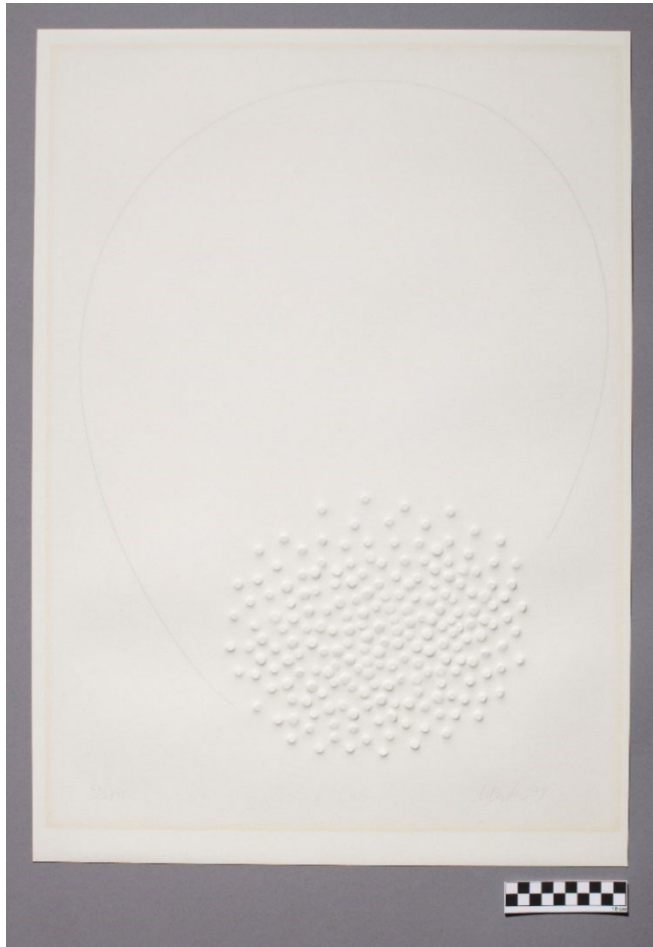


Abb. 18: Gesamtansicht des Objekts recto, Zustand vor der Restaurierung.

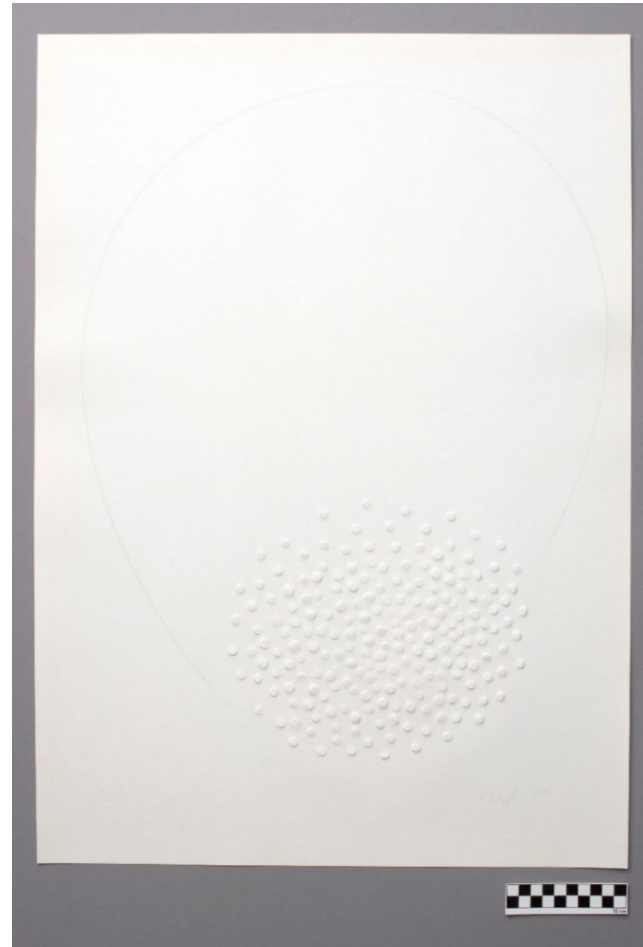


Abb. 19: Gesamtansicht des Objekts recto, Zustand nach der Restaurierung.

¹³⁹ Für die Dokumentation wurden ausschließlich Fotografien von Hanna Freres (TH Köln) verwendet.



Abb. 20: Gesamtansicht des Objekts verso, Zustand vor der Restaurierung.



Abb. 21: Gesamtansicht des Objekts verso, Zustand nach der Restaurierung.



Abb. 22: Detailansicht des Objekts recto, Zustand vor der Restaurierung.



Abb. 23: Detailansicht des Objekts recto, Zustand nach der Restaurierung.

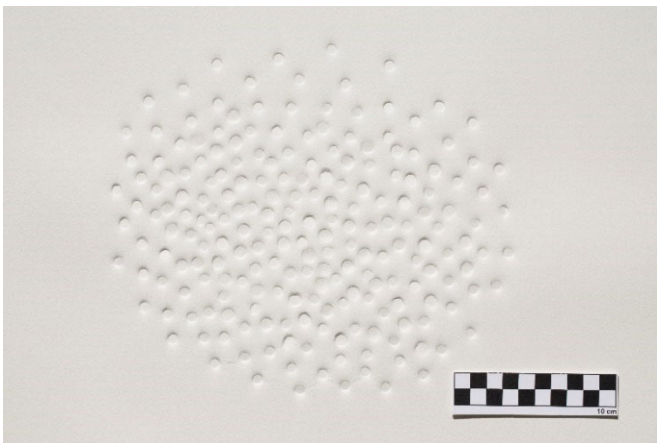


Abb. 24: Detailansicht des Objekts verso, Zustand vor der Restaurierung.

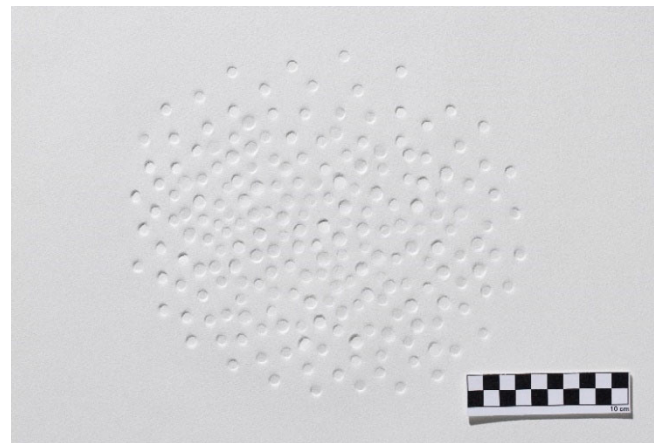


Abb. 25: Detailansicht des Objekts verso, Zustand nach der Restaurierung.

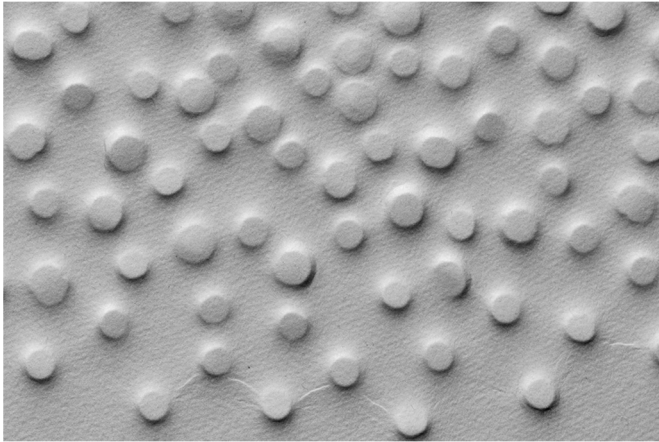


Abb. 26: Detailansicht des Objekts recto (Graustufen), Zustand vor der Restaurierung.

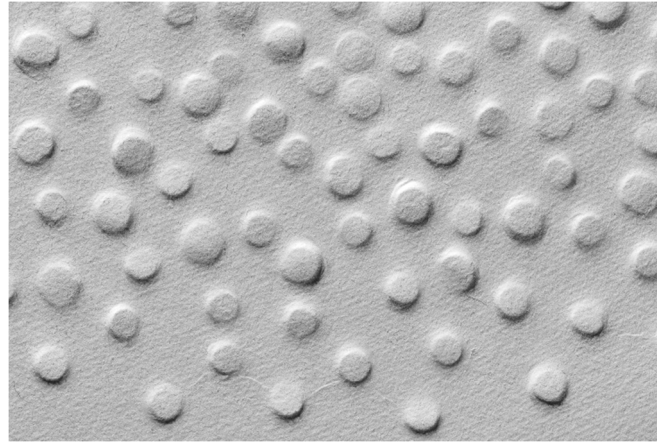


Abb. 27: Detailansicht des Objekts recto (Graustufen), Zustand nach der Restaurierung.

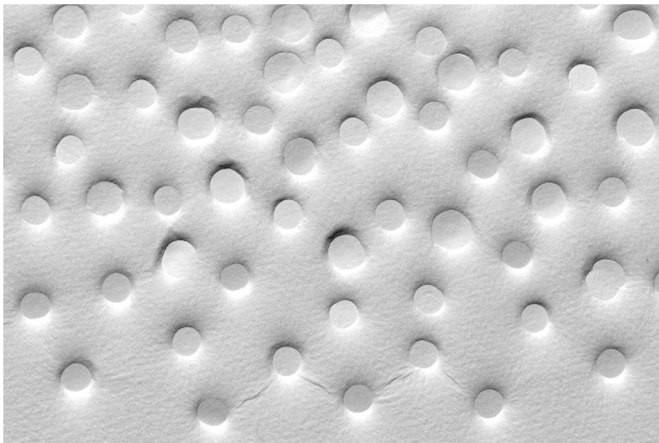


Abb. 28: Detailansicht des Objekts verso (Graustufen), Zustand vor der Restaurierung.

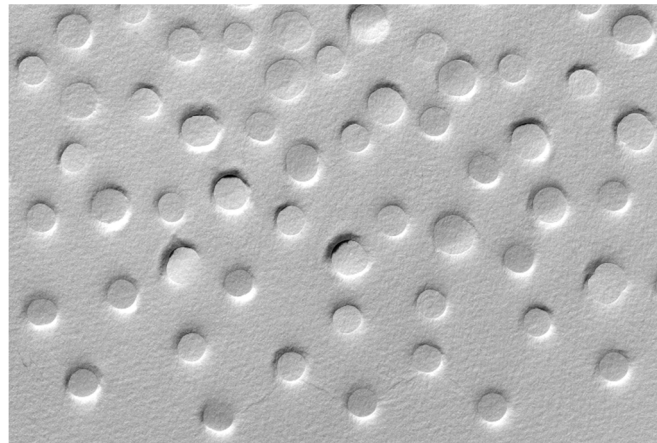


Abb. 29: Detailansicht des Objekts verso (Graustufen), Zustand nach der Restaurierung.

b. Faseranalyse / Faseranfärbung

Die Identifikation und Differenzierung verschiedener Faserarten stützt sich sowohl auf die Auswertung ihrer morphologischen Merkmale als auch auf die Auswertung ihrer Reaktivität mit entsprechenden Färbereagenzien. Das am häufigsten angewendete Färbereagenz für allgemeine Übersichtsbetrachtungen ist die Chlorzinkiodlösung nach Wilhelm Herzberg. Sie dient der Beurteilung der vorliegenden Probe hinsichtlich der Einordnung in eine der drei großen Faserklassen. Verholzte Fasern reagieren auf das Färbereagenz mit einer hellgelben (Holzschliff) bis braungelben Färbung, Zellstoffe zeigen eine blauviolette Färbung, während Hadernfasern eine hellrote bis weinrote Färbung aufweisen.¹⁴⁰

Ausstattung:

Pasteurpipette, Objektträger, Deckgläschen, feines Werkzeug zum Separieren der Fasern, Stereomikroskop

Reagenz:

Hergestellt wird das Färbereagenz aus zwei Lösungen (Lösung A: 20 g Zinkchlorid p. A. ($ZnCl_2$) in 10 ml destilliertem Wasser; Lösung B: 2,1 g Kaliumiodid p. A. (KI) und 0,1 g Iod (I_2) in 5 ml destilliertem Wasser), die miteinander gemischt werden. Dabei entsteht ein Niederschlag, von dem die Lösung getrennt werden muss. Anschließend werden der Lösung einige Iod-Kristalle beigegeben.

Durchführung:

Für die Anwendung der Reagenzien muss eine kleine Probe der zu bestimmen Fasern idealerweise aufgeschlagen, zumindest aber aufgefasert und mit demineralisiertem Wasser benetzt auf einem Objektträger platziert werden.

Für die Faseranfärbung nach Herzberg wird ein Tropfen der Chlorzinkiodlösung auf die Probe aufgetropft. „Das Zinkchlorid bewirkt zunächst eine Quellung der Cellulosefasern. Die Iod-Atome legen sich dann zwischen die langen Ketten der Cellulose-Moleküle und gehen dort einen Komplex ein, der farbig ist.“¹⁴¹ Das Ergebnis der Anfärbung sollte dann unter dem Mikroskop sichtbar sein.

¹⁴⁰ WERTHMANN 1993, S. 66 f.

¹⁴¹ <<https://www.seilnacht.com/Lexikon/nachcell.html>> (08.12.2021).

Auswertung:



Abb. 30: Fasern des Papierträgers nach der Anfärbung mit Chlorzinkiod.

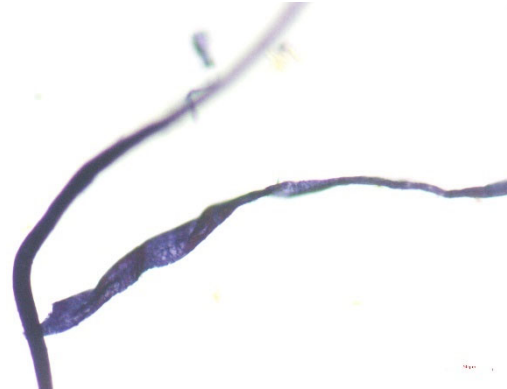


Abb. 31: Fasern des Papierträgers nach der Anfärbung mit Chlorzinkiod. Rechts ist eine Baumwollfaser mit charakteristisch gedrehter Struktur zu erkennen.

Die Anfärbung mit dem Färbereagenz Chlorzinkiod nach Herzberg zeigt, dass es sich um ein aus Zellstofffasern (blauviolette Färbung) bestehendes Faservlies handelt.

c. Test auf Eisen(II)-/Eisen(III)-Ionen

Für den Nachweis von Eisen(II)-/Eisen(III)-Ionen wird ein nicht blutendes Indikatortestpapier verwendet. Dieses enthält den Indikatorstoff Bathophenanthrolin, welcher mit vorhandenen Eisen(II)-Ionen einen intensiv magentafarbenen Komplex bildet. Da der Indikator spezifisch für Eisen(II)-Ionen ist, können in das Indikatorpapier migrierte Eisen(III)-Ionen nur indirekt, durch Zufügung eines Reduktionsmittels, nachgewiesen werden.

Ausstattung:

Indikatorteststreifen¹⁴², VE-Wasser, Ascorbinsäure $C_6H_8O_6$ (Reduktionsmittel), Pipette, metallfreie Pinzette, inerte Kunststoffolie (z.B. Mylar, Melinex), Filterkarton

Durchführung:

Test auf Eisen(II)-Ionen:

Für den Test auf Eisen(II)-Ionen wird das Objekt auf einer sauberen, inerten Unterlage platziert. Mithilfe der Pipette wird ein Tropfen VE-Wasser auf das Indikatortestpapier gegeben. Anschließend wird das Indikatortestpapier mit einem Stück Filterkarton abgetupft, so dass es feucht, jedoch nicht mehr nass ist. Das feuchte Indikatortestpapier wird mithilfe der Pinzette auf die zu testende Stelle platziert und mit einem Stück Kunststoffolie abgedeckt, sowie leicht beschwert. Nach 30 Sekunden wird das Indikatortestpapier wieder vom Objekt entfernt. Der Test ist als positiv zu interpretieren, wenn sich der Indikatorteststreifen magenta verfärbt. Nach spätestens 2-5 Minuten ist das Ergebnis ablesbar.

Test auf Eisen(III)-Ionen:

Für den Test auf Eisen(III)-Ionen werden zunächst alle oben beschriebenen Schritte durchgeführt. Anschließend wird auf den wieder vom Objekt abgenommenen Indikatorteststreifen ein Tropfen 1 %-ige Ascorbinsäure gegeben. Dadurch werden vorhandene Eisen(III)-Ionen zu Eisen(II)-Ionen reduziert, welche wieder einen magentafarbenen Komplex mit dem Indikatorstoff bilden können.

Auswertung:

Mithilfe der beiden Tests konnten im Papierträger des Uecker-Prägedrucks sowohl Eisen(II)- als auch Eisen(III)-Ionen nachgewiesen werden.

¹⁴² Bezugsquelle: Preservation Equipment Ltd., Norfolk, UK