

## ABSCHLUSSBERICHT 2024

**DBU-PROJEKT AZ.37258/01**

**„TESTEN UND OPTIMIEREN SPEZIFISCHER ADSORBENZIE  
FÜR DIE PRÄVENTIVE BEHANDLUNG  
VON HEIMTÜCKISCHEN KUNSTSTOFFEN“  
(TESSA)**

Antragsteller und Mittelempfänger:

Deutsches Bergbau-Museum Bochum

Leibniz-Forschungsmuseum für Georessourcen

Gefördert durch: Deutsches Bundesstiftung Umwelt

AutorInnen: Cristian Mazzon, Elena Gómez Sánchez,

Forschungsbereich Materialkunde, Deutsches Bergbau-Museum  
Bochum

Projektleitung: Dr. Elena Gómez Sánchez

Kooperationspartner: Dr. Jost Kames, Dr. Anne Lippert, artemis control  
AG

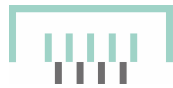
Datum: 31.10.2024

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



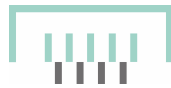
## KURZFASSUNG DES BERICHTS

Im Rahmen des Projekts TESSA wurde die Spezifität kommerzieller Sorbenzien gegenüber zwei unterschiedlichen Analyten-Typen – Säuren und Weichmachern – untersucht, die aus sogenannten „heimtückischen Kunststoffen“ wie Celluloseacetat (CA) und Cellulosenitrat (CN) emittieren. Ziel war es, spezifische Sorbenzien zu identifizieren, die präferiert Säuren aufnehmen und dabei die Emission von Weichmachern möglichst unberührt lassen. Ein modellbasierter Versuchsaufbau ermöglichte es, Essigsäure und Dimethylphthalat (DMP) aus CA sowie Salpetersäure und Kampfer aus CN zu analysieren.

Die methodische Vorgehensweise umfasste drei Schritte: (1) das Aussetzen von Sorbenzien an gasförmigen Emissionen aus Kunststoffproben, (2) die Extraktion der Sorbate mittels Lösungsmittelbehandlung und (3) die quantitative Analyse der extrahierten Substanzen durch Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GCMS) und Ionenchromatographie (IC). Die entwickelte Methodik lieferte grundlegende Erkenntnisse, zeigte jedoch auch Einschränkungen, insbesondere bei Sorbenzien mit geringer Rückgewinnungsrate der Analyten.

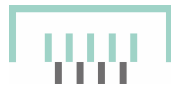
Die Ergebnisse mit natürlich gealterten CA zeigen, dass die meisten getesteten Sorbenzien sowohl Essigsäure als auch DMP aufnehmen. Dabei wurden gängige (wie z.B. Aktivkohle und Molekularsiebe 4 Å) und prospektive Materialien wie das MOF-MILL-100 untersucht. Die Sorbenzien Poly-A (Ionenaustauscher) und Natriumbicarbonat (auf Stahlgitter aufgetragen) zeigten eine hohe Spezifität für Essigsäure und eine vergleichsweise geringe Aufnahme von DMP.

Obwohl es nachgewiesen ist, dass das Entweichen von Weichmachern in musealen Kontext die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffobjekten negativ beeinflusst, bleibt unklar, inwiefern der Einsatz unspezifischer Sorbenzien langfristig negative Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen haben kann. Angesichts dieser unzureichenden Datenlage bietet die Identifikation und Anwendung spezifischer Sorbenzien einen präventiven Ansatz. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden und gewonnenen Erkenntnisse stellen eine Basis für weiterführende Forschungsarbeiten dar, um die Wirksamkeit und Langzeitwirkung der spezifischen Sorbenzien umfassend zu untersuchen.

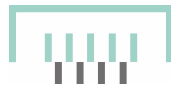


## INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung des Berichts.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungen .....	8
1. Anlass und Zielsetzung des Projekts.....	9
1.1 Kontext.....	9
1.2 Sorbenzien in Museen .....	10
1.3 Ziele.....	11
2 Projektübersicht: Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden.....	12
3 Ergebnisse.....	13
3.1 Methodenentwicklung.....	14
3.1.1 Auswahl der Sorbenzien .....	14
3.1.2 Auswahl der natürlich gealterten Testobjekte .....	18
3.1.2.1 Untersuchungen der Homogenität des Celluloseacetat Tonbandes .....	19
3.1.3 Methode zum Aussetzen von Sorbenzien an Emissionen.....	20
3.1.3.1 Methode zum Aussetzen von Sorbenzien an Analyten: Gasförmiges Aussetzen und Aussetzen durch Spiken .....	22
3.1.3.2 Methode zum Aussetzen von Sorbenzien an Emissionen aus natürlich gealtertes Material .....	22
3.1.4 Methode zur Extraktion von Sorbate aus Sorbenzien und Probenvorbereitung .....	24
3.1.5 Ionenchromatographie (IC) – Methode zur quantitativen Analyse von Essigsäure und Salpetersäure.....	26
3.1.6 Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) – Methode zur quantitativen Analyse von Weichmacher.....	28
3.1.7 Bestimmung der Rückgewinnung von Analyten aus den Sorbenzien.....	33



3.1.7.1	Rückgewinnung von gasförmig ausgesetzten DEP .....	34
3.1.7.2	Rückgewinnung von gespikten DMP .....	34
3.1.7.3	Rückgewinnung von gespikten Essigsäure .....	35
3.1.7.4	Rückgewinnung von gespikten Kampfer .....	36
3.1.7.5	Rückgewinnung von gasförmig ausgesetzten Kampfer .....	37
3.1.7.6	Vergleich zwischen Rückgewinnung von gespikten und gasförmig ausgesetzten Kampfer .....	39
3.2	Ergebnisse zur Spezifität kommerzieller Sorbenzmittel .....	41
4	Diskussion .....	44
5	Öffentlichkeitsarbeit .....	45
6	Fazit und Ausblick .....	46
7	Literatur .....	48
Anhang	.....	49



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Allgemeiner Prozessmethodik .....	13
Abbildung 2: Links und Mitte: Tonband aus CA; rechts: CN-Platte (Sammlung F. Waentig, TH Köln) © C. Mally .....	18
Abbildung 3: Nach einem Tag mit dem CN-Material (senkrechter Streifen) im geschlossenen Gefäß wechselt die Farbe des A-D Strips von blau nach gelb (gelbe Farbe sichtbar auf der inneren Seite des Streifens, welcher waagrecht auf dem Gefäßboden liegt) © C. Mally.....	19
Abbildung 4: Aufbau <b>1</b> nach Tabelle 3 in einem Headspace-Gefäß (blau: Weichmacher-Lösung, schwarze Partikel am Boden des Gefäßes: pulverförmiges Sorbenz) .....	22
Abbildung 5: Aufbau nach 3 (Tabelle 3) für das Aussetzen von Sorbenzien an Emissionen aus einem natürlich gealterten Celluloseacetat-Tonband. Das Endstück des Tonbands steckt in einem (im Bild schwer erkennbaren) Mikroeinsatz. © C. Mazzon. ....	23
Abbildung 6: Exsikkator mit aufgerollten Edelstahlgitter für das Aussetzen von Sorbenzien an natürlich gealtertem Material aus Celluloseacetat (Tonband).....	24
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Extraktionsprozesses, nachdem das Sorbenz ausgesetzt wurde.....	25
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Probenvorbereitung für die Analyse.....	26
Abbildung 9: Darstellung der gemessenen Menge an AA als Funktion der Standardkonzentration des Analyten.....	27
Abbildung 10: Beispiel für ein Chromatogramm der Standardlösung, die Kampfer mit einer Nennkonzentration von 27 mg/l enthält. ....	30
Abbildung 11: Darstellung der Fläche des Analytenstandards (Kampfer) als Funktion der Konzentration des Analytenstandards..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abbildung 12: Schematische Darstellung des gesamten Prozesses, anhand des Beispiels des Spiken von Analyten (Aufbau <b>2</b> , Tabelle 3).....	32
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Probenvorbereitung für die GCMS- und IC-Analyse.....	33
Abbildung 14: Quantifizierung des extrahiertes DMP für jedes Sorptionsmittel. Jede Spalte entspricht der Summe der für alle Extrakte.....	35
Abbildung 15: Quantifizierung des extrahiertes AA und Ac für jedes Sorbenz. Jede Spalte entspricht der Summe der AA und Ac Extrakte.....	36
Abbildung 16: Prozent der Rückgewinnung an gespikten Kampfer nach Extraktion der Sorbenzien.....	36
Abbildung 17: Prozent der Rückgewinnung an Kampfer (gasförmiges Aussetzen) nach Extraktion der Sorbenzien,.....	38

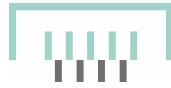
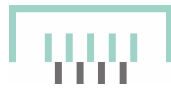


Abbildung 18: Vergleich der Rückgewinnung von gespikten (blau) und gasförmig ausgesetzten Kampfer (grau).....39

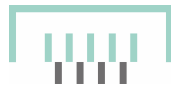
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Rohwerte der extrahierten Analyte (DEP und gesamt-Essigsäure) aus natürlich gealterten CA für jedes Sorptionsmittel. Spezifische Sorbenzien befinden sich in den „Tälern“. 42

Abbildung 20: Gegenüberstellung der anhand der Rückgewinnungsfaktoren korrigierten Werten der extrahierten Analyte (DEP und Gesamt-Essigsäure) aus natürlich gealterten CA für jedes Sorptionsmittel. Spezifische Sorbenzien befinden sich in den „Tälern“. \*Der hier dargestellte DMP-Wert für MOF wurden aufgrund der Diskrepanz zwischen den Spike- und Realergebnisse nicht korrigiert (s. Text).....43



## TABELLENVERZEICHNIS

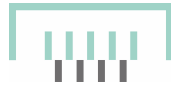
Tabelle 1: In Rahmen des Projektes definierte Kunststoff-Modelle.....	12
Tabelle 2: Für Celluloseacetat und –nitrat ausgewählte Sorbenzien und deren physikalischen Eigenschaften. V: Voruntersuchungen (nach 3.1.3.1), R: Untersuchungen mit natürlich gealtertem Material (nach 3.1.3.1 und 3.1.3.2).....	16
Tabelle 3: Aussetzen von Sorbenzien zu den Analyten und natürlich gealterten Materialien. Auflistung der unterschiedlichen, im Projekt im Einsatz gekommenen, Aufbauten. * Die Rückgewinnung gibt Aufschluss über den Anteil an Sorbenzien, welche nicht durch Extraktion zurückgewonnen werden konnte (s. Text). .....	20
Tabelle 4: Kalibrierstandardkonzentrationen und Kalibrierergebnis.....	27
Tabelle 5: Ergebnisse der Kalibrierkurven, LOD, LOQ und Bestimmungskoeffizient (t1-Exposition).....	30
Tabelle 6: Dokumentation des Geruchs beim Öffnen der Gefäße am Ende der Aussetzungsperiode (Kampfer in DCM-Lösung).....	38



## ABKÜRZUNGEN

AA:	Essigsäure (aus dem Englischen <i>Acetic Acid</i> )
Ac:	Acetat
Act-Ch:	Aktivkohle
Ar-Card:	Archivkarton
CA:	Celluloseacetat
CN:	Cellulosenitrat
CS-SIII:	Carbosieve S-III
CP-B:	Carbopack B
CP-X:	Carbopack X
CX-1003:	Carboxen 1003
DMP:	Dimethylphthalat
GCMS:	Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie
IC:	Ionenchromatographie
KCplus:	KCplus 30x60 (Aktivkohle)
MOF:	MOF-MILL-100 (Fe)
MS-4Å:	Molecular sieves 4Å (Zeolite)
Na-Bi:	Natriumbicarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ )
Na-Hy:	Natriumhydroxid (NaOH)
Poly-M:	Polymer-M (MBIX2-Gel)
Poly-A:	Polymer-A (AnIX4-Gel)
TEA:	Triethanolamin





# 1. ANLASS UND ZIELSETZUNG DES PROJEKTS

## 1.1 KONTEXT

Die letzten zwei Jahrhunderte wurden, seit der Entwicklung erster gummiartiger Kunststoffe von Charles Goodyear im Jahre 1839, durch die Verwendung von Kunststoffen bedeutend geprägt und sind mittlerweile aus unserem industriellen, privaten und kulturellen Leben nicht mehr wegzudenken. Aus diesem Grund sind unter musealen Sammlungsgegenständen immer häufiger kunststoffbasierte Kulturgüter vorzufinden.

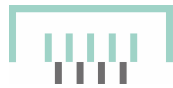
Der Erhalt und die Konservierung dieser musealen Kulturgüter stellen Museen aktuell und in der nahen Zukunft vor Herausforderungen. Die inhärente Instabilität bestimmter Kunststoffe führt zu einem mittelfristigen Zerfall der Objekte, welche dann zunehmend für die Öffentlichkeit verloren gehen. Diesem Zerfall zu begegnen ist daher eine wichtige Zukunftsfrage im Umgang mit musealen Artefakten aus polymeren Materialien.

Das Deutsche Bergbau-Museum Bochum, Leibniz Forschungsmuseum für Geo-Ressourcen (DBM), als weltweit größtes Bergbaumuseum seiner Art, hat museale Objekte des industriellen Kulturerbes in seiner Obhut, unter denen Kunststoffe weit verbreitet sind [1]. Im Rahmen des KUR-Projektes<sup>1</sup> „Antiaging für Kulturgut mit Elastomeranteile“, welches 2007-2011 unter der Federführung des DBM lief, sind viele der Probleme mit Polymerwerkstoffen, die in technischen Museen typischerweise auftreten, aufgefunden worden. Darunter auch eine spezielle Gruppe von Kunststoffen, welche Museen aller Welt vor Herausforderungen stellen. Vulkanisierter Kautschuk, Cellulosederivate wie Cellulosenitrat (CN) und Celluloseacetat (CA), und Polyvinylchlorid (PVC) können im Laufe derer Degradationsprozesse Stoffe ausgasen, die entweder direkt, oder nach Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit [2], zur Entstehung korrosive Substanzen (Schwefelsäure, Salpeter- bzw. Essigsäure, Salzsäure) in der Luft führen kann. Die Lokalisierung dieser Art von Kunststoffen, auch „malignant plastics“ (böartige, heimtückische Kunststoffe) genannt, ist daher von großer Bedeutung für den Erhalt ganzer Sammlungskonvolute.

Der Anteil an „heimtückischen Kunststoffen“ am DBM kann einigermaßen abgeschätzt werden. Ermöglicht wird dies durch eine stichprobenartige Bestandsaufnahme welche im Rahmen des von der RAG Stiftung geförderten Projekts „Bewahrung gefährdeter Zeitzeugen des Steinkohlenbergbaus in den Musealen Sammlungen des DBM/montan.dok und vernetzten Einrichtungen. Bestandsaufnahme, Zerfallsmechanismen und Konservierungsstrategien am Beispiel von polymeren Materialien“ 2019-2020

---

<sup>1</sup>[https://www.kulturstiftung-des-bundes.de/de/projekte/erbe\\_und\\_vermittlung/detail/antiaging\\_fuer\\_kulturgut\\_mit\\_elastomeranteilen.html](https://www.kulturstiftung-des-bundes.de/de/projekte/erbe_und_vermittlung/detail/antiaging_fuer_kulturgut_mit_elastomeranteilen.html)



durchgeführt wurde. Im Laufe der Bestandsaufnahme sind „heimtückische Kunststoffe“ als ein beträchtlicher Anteil der Sammlung aufgefallen. Für ein Industriemuseum ist ein hoher Anteil dieser Kunststoffe erwartungsgemäß.

Als problematisch erweisen sich aufgrund ihrer Verbreitung insbesondere Kautschuk und PVC. Der Anteil an PVC macht allein 12% der untersuchten Kunststoffteile (Objektteile) aus. Mit CN und CA zusammen beträgt der Gesamtanteil ungefähr 18% der untersuchten Kunststoffteile. Schwerer lässt sich allerdings der Anteil an vulkanisiertem Kautschuk bestimmen. 223 von 689 (32%) untersuchten Objektteilen konnten mittels FTIR nicht identifiziert werden. Eine bereits festgestellte Problematik bezüglich der Identifizierung von Elastomeren mittels FTIR [1] legt nahe, dass sich viele Elastomere unter diesen nicht identifizierbaren Objekten befinden. Der Anteil an „heimtückischen Kunststoffen“ am DBM lässt sich somit auf mindestens ein Fünftel unter den Kunststoffmaterialien abschätzen. Diese Abschätzung ist aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik als eine Mindestangabe bzw. als eine vorsichtige Schätzung zu verstehen, soll aber als erste Annäherung dienen um ein Bild vom Ausmaß der Schadgas-Problematik am DBM zu bekommen. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass in anderen Museen mit Exponaten aus oder mit Kunststoffmaterialien ähnliche Werte vorhanden sein könnten [3].

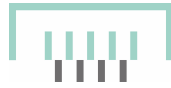
## 1.2 SORBENZIEIN IN MUSEEN

Ungeschützt sind Museumsobjekte aus den sogenannten „heimtückischen Kunststoffen“ eine potenzielle Gefahr für sich selbst, andere Objekte und Museumsmitarbeiter\*innen. Die Ausgasungen, welche zwangsläufig auch in die Umgebungsluft gelangen, sind schädlich für die Atemwege<sup>2</sup> und können zusätzlich in der Nähe gelagerte Museumsgegenstände wie z.B. Objekte metallischer Beschaffenheit schaden. Bei Berührung von kontaminierten Museumsobjekten kann es durch den niedrigen pH-Wert und das hohe Oxidationspotential dieser Schadstoffe zu Verätzungen kommen. In der Regel versuchen Museen durch den flächendeckenden Einsatz von passiven Adsorptionsmitteln, sogenannter Adsorbentien, die schädlichen Stoffe aus der Umgebungsluft zu entfernen.

Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass gängige Adsorbentien schädliche Gase aus der Umgebungsluft entziehen können, jedoch auch Weichmacher, Kunststoffbestandteile welche für den Erhalt bestimmter Objekte entscheiden sein können [4]. In wie fern dies den langfristigen Erhalt von Museumsobjekten beeinflussen kann, ist nicht geklärt. Potenziell könnte sich jedoch der flächendeckende Einsatz von „unspezifischen“ Adsorbentien negativ auf den Objektbestand auswirken.

---

<sup>2</sup> <https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>



Es gibt zwar eine Fülle von Informationen über die Alterungsmechanismen von Kunststoffen zur Vorhersage ihrer Lebensdauer, jedoch nur wenige von Anwendungen, bei denen das Verhalten polymerer Werkstoffe über einen längeren Zeitraum – wie es beispielsweise bei einer musealen Verwahrung erforderlich ist – untersucht werden muss.<sup>3</sup> Die Vorhersage des Verhaltens von Kunststoffen in diesen Zeiträumen ist daher nur im Rahmen von konservierungswissenschaftlicher Forschung zu beantworten und lässt sich nicht einfach aus den vorhandenen Informationen ableiten. Hier sind langfristig angesetzte Experimente nötig, um den Einfluss von typischen Sorbenzien, beispielsweise auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen, über einen längeren Zeitraum zu untersuchen.

Derzeit befinden sich viele Sorbenzien auf dem Markt, von denen nur wenige dahingehend untersucht wurden, ob sie „spezifisch“ sind und somit korrosive Emissionen sammeln, ohne den Weichmachergehalt der Kunststoffe zu beeinflussen [4]. In dieser Situation erscheint es ratsam, ein Vorsichtsprinzip anzuwenden, bis sich klärt, wie die „unspezifischen Sorbenzien“ die Langzeitstabilität von unterschiedlichen Kunststoffobjekten beeinflusst. Die große Auswahl an Sorbenzien unterschiedlicher Chemie, welche auf dem Markt zur Verfügung stehen, ist jedoch eine gute Voraussetzung für die Suche nach „spezifischer Sorbenzien“.

### 1.3 ZIELE

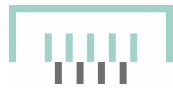
Dieses Forschungsprojekt setzt genau an dieser Entwicklungsfrage an. Im Rahmen des Projektes wurden kommerzielle Sorptionsmittel hinsichtlich ihrer spezifischen Wirksamkeit untersucht, mit dem Ziel, diese für den Anwendungsbereich in Museen zu optimieren. Durch die Entwicklung einer Strategie zum Schutz von Objekten und Menschen vor den Folgen anthropogener Immissionen, trägt das Projekt zur Bewahrung und Sicherung national wertvoller Kulturgüter bei.

Die Hauptziele des Projektes sind:

- Die Spezifität unterschiedliche kommerzielle Materialien gegenüber typischer Säure (idealerweise hoch) und Weichmacher (idealerweise niedrig) aus „heimtückischen Kunststoffen“ zu untersuchen.
- Die Entwicklung eines Prototyps aus den identifizierten spezifischen Sorbenzien zur Anwendung in Museum.

---

<sup>3</sup> Eine Ausnahme bilden Forschungsbereiche, die sich mit Mikroplastik befassen; diese befassen sich jedoch mit der Alterung unter Witterungsbedingungen - im Boden, im Meerwasser etc.



Die Arbeiten im Projekt wurden anhand zweier definierter Modelle durchgeführt, Celluloseacetat (Essigsäure und Diethylphthalat) und Cellulosenitrat (Salpetersäure und Kampfer). Dabei handelt es sich um zwei der am gefährdetsten und weit verbreiteten polymeren Materialien in Museen.

## 2 PROJEKTÜBERSICHT: DARSTELLUNG DER ARBEITSSCHRITTE UND DER ANGEWANDTEN METHODEN

Das Hauptziel des Projekts ist es, die relative Affinität verschiedener Sorbenzien gegenüber zwei unterschiedlichen Arten von Analyten zu untersuchen. Dazu gehören einerseits aus Kunststoff stammende Degradationsprodukte wie Säuren sowie korrosive oder oxidierende Substanzen und andererseits Weichmacher. Sorbenzien, die spezifisch auf Abbauprodukte ausgerichtet sind, könnten eine sicherere Option für die Aufbewahrung „heimtückischer Kunststoffe“ darstellen und werden daher präventiv zu empfehlen. Um die Leistung der Sorbenzien in diesem Sinne vergleichen zu können, ist es notwendig die Menge zu bestimmen, die sie von beiden Analyten-Typen aufnehmen. Um diese Fragestellung analysierbar zu machen, wurden zwei unterschiedliche, auf die wesentlichen Bestandteile reduzierte Systeme als Modell definiert (Tabelle 1). Diese erforderten die Quantifizierung vier verschiedener Analyten:

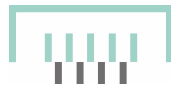
Tabelle 1: In Rahmen des Projektes definierte Kunststoff-Modelle

	vom Kunststoff stammende Ausgasungen	
„Heimtückischer Kunststoff“	Degradationsprodukte (direkte oder indirekte)	Weichmacher
Celluloseacetat (CA)	Essigsäure (AA)	Dimethylphthalat (DMP)
Cellulosenitrat (CN)	NO <sub>2</sub> , Salpetersäure	Kampfer

Jedes Material setzt auch weitere Verbindungen frei. Eine quantitative Bestimmung war im finanziellen und zeitlichen Rahmen des Projektes nur für die o.g. Analyten möglich.

Um die Spezifität der unterschiedlichen Sorbenzien untersuchen zu können mussten folgende Methodiken entwickelt werden:

- 1) Einen apparativen Aufbau um Sorbenzien an Emissionen auszusetzen (3.1.3),
- 2) eine Methode zur Desorption der dadurch aufgenommenen Analyten (Sorbate) aus den Sorbenzien (angepasst an den Sorptionsmechanismus des jeweiligen Sorbenz) (3.1.4),



- 3) eine Analysemethode zur quantitativen Erfassung der extrahierten Sorbate von Interesse, nämlich schädlicher Gase und Weichmacher (3.1.5 bzw. 3.1.6).

Nach der Methodenoptimierung und dem Testen unterschiedlicher Analysetechniken, wie zuvor in den Zwischenberichten beschrieben, erfolgte die Extraktion der im Schritt 1) in den Sorptionsmitteln gesammelten Emissionen. Diese wurden im Schritt 2) durch Lösungsmittelbehandlung gelöst. Darauf folgte Schritt 3) mit der Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GCMS-) und Ionenchromatographie (IC-) Analyse, für die quantitative Bestimmung von Weichmacher und Säure. Dies bildet den allgemeinen Workflow der angewandten Methoden im Projekt ab (Abbildung 1).

Die Grundlagen dieser Methoden basieren auf ausgewerteten Literaturdaten und vorhergegangenen Untersuchungen. Für eine Liste und Diskussion der hierfür ausgewerteten Literatur, wird die Leserschaft auf die Publikationen im Abschnitt 5 verwiesen.

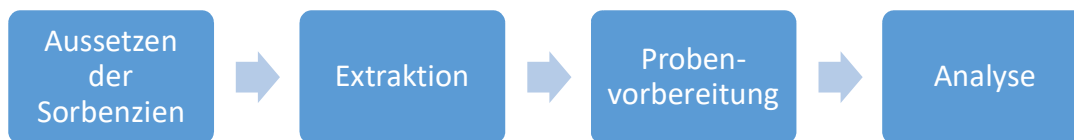


Abbildung 1: Allgemeiner Prozessmethodik

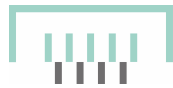
### 3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse des Projektes werden hier in zwei Typen aufgeteilt:

- a) Methodische Ergebnisse (3.1),
- b) Befunde zur Spezifität von kommerziellen Sorbenzien auf Grundlage der zwei untersuchten Modelle (Spezifität Säure vs. Weichmacher in CA und CN; 3.2)

Der hohe methodische Aufwand und die damit einhergehenden Methodenanpassungen, welche sich aus den Ergebnissen ergaben, erforderten eine Beschränkung auf die Modelle CA und CN. Für CN liegen im Moment erstmals Teilergebnisse vor, die unten präsentiert werden. Die Analysen dazu werden außerhalb des Projektzeitraums abgeschlossen.

Aufgrund des begrenzten Umfangs dieses Berichts können nicht alle Einzelheiten der entwickelten Methodik ausführlich dargestellt werden. Es wurde daher eine Auswahl relevanter Aspekte getroffen, um die zentralen Ergebnisse und Erkenntnisse zu präsentieren.



## 3.1 METHODENENTWICKLUNG

Die Ergebnisse werden unten nach dem Schema der Abbildung 1 wiedergegeben. Davor werden die Sorbenzien (3.1.1) und die natürlich gealterten Materialien (3.1.2), die für die Versuche benutzt wurden, kurz vorgestellt. Am Ende dieses Abschnitts wird die Rückgewinnung der Analyten von Interesse durch Extraktion aus den Sorbenzien thematisiert (3.1.7).

### 3.1.1 AUSWAHL DER SORBENZINIEN

Eine möglichst breite Auswahl an Sorbenzien unterschiedlicher Typen wurden gewählt, um die Wahrscheinlichkeit solche mit geeigneter Spezifität zu erhalten, zu erhöhen. Die Auswahl an Sorbenzien beinhaltet die folgenden Materialgruppen:

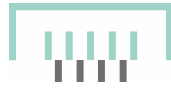
- anorganische oder kohlenstoffbasierte Molekularsiebe
- graphitisierte Kohlenstoffe
- Polymere (Ionenaustauscher)
- Laugen
- Metal-Organic Frameworks (MOF, im deutschen: Metallorganische Gerüste)

Diese Auswahl bildet eine Bandbreite der auf dem Markt zugänglichen Sorbenzien für die oben genannten Ziel-Analyte dar.

Die Auswahl der Sorbenzien basiert auf den Ausgasungen, welche nach Literatur für die ausgewählte Modelle (CA, CN) zu erwarten sind (Tabelle 1). Dabei sollen die Degradationsprodukte (Essigsäure bzw. Salpetersäure und  $\text{NO}_2$ ) vom Sorbenz aufgenommen werden, wobei die Weichmacher eine unerwünschte Aufnahme darstellen würde.

Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurden unterschiedliche Sorptionsmaterialien für die Voruntersuchungen ausgewählt. Tabelle 2 zeigt alle berücksichtigten Sorbenzien, ihre physikalischen Eigenschaften, und in welchen Untersuchungen sie im Projekt Anwendung fanden. Auf Basis der Voruntersuchungen an einer Vielzahl von Sorbenzien wurden in den Untersuchungen mit natürlich gealtertem Material ausschließlich die vielversprechendsten ausgewählt. Da Archivkarton überaus häufig für die Aufbewahrung von Objekten genutzt wird, wurde deren Fähigkeit, die Analyte von Interesse aufzunehmen, mit untersucht. Dieses Material wurde bereits in früheren Studien hinsichtlich seines Sorptionsverhaltens untersucht. [4].

Die Diversität der ausgewählten Sorbenzien erforderte im Projekt unterschiedliche Handhabung der Materialien an entscheidenden Stellen. Diese Faktoren haben immer wieder ein Überarbeiten der Projektplanung erforderlich gemacht von denen einige unten näher erläutert werden:



- Während die meisten Sorbenzien als Pulver oder Kügelchen vorlagen und als solche direkt benutzt werden konnten, mussten die Laugen in Lösungen gebracht werden, welche dann an Edstahlgitter appliziert und ausgetrocknet wurden [5]<sup>4</sup>. Dadurch konnte eine große Oberfläche, für das Aussetzen der Laugen, erstellt werden. Erste Tests für NaOH und NaHCO<sub>3</sub> zeigten, dass deren Oberfläche als Pellets zu schnell gesättigt wurde und sie dadurch eine geringe Effizienz aufwiesen.
- Die unterschiedlichen Sorptionsmechanismen der Sorptionsmittel erfordern unterschiedliche Extraktionsmethoden. Für die meisten Sorbenzien, deren Verhalten hauptsächlich auf eine physikalische Interaktion zwischen Sorbenz und Sorbat basiert, wurde eine Lösungsmittlextraktion (Feststoff-Flüssig) durchgeführt (s. Abschnitt 3.1.4). Für die Laugen, bei denen die erwartete Spezifität von der Chemisorption abhängig ist - eine chemische Interaktion zwischen Sorbenz und Sorbat- wurden die auf dem Gitter applizierten Laugen nach einer DCM (Dichlormethan)-Extraktion in Wasser aufgelöst. Im Gegensatz dazu war eine basische Behandlung für die Ionenaustauschmaterialien Poly-M und Poly-A erforderlich.
- Durch die unterschiedlichen Sorptionsmechanismen wurden manche Analyten in unterschiedlicher chemischer Form aufgenommen. Dies war besonders für Essigsäure der Fall, die mit unterschiedlichen Anteilen sowohl als Essigsäure (AcOH) als auch als Acetat (AcO<sup>-</sup>) von den unterschiedlichen Sorbenzien aufgenommen wurde. So war eine gesonderte Extraktion der Sorbenzien in wässriger Lösung nötig, da chemisorbiertes Acetat sich, anders als AcOH, nicht in DCM lösen lässt. Die Tatsache, dass für die Rückgewinnung von Essigsäure und Acetat ein anderes Extraktionsverfahren erforderlich war, bedeutete einerseits einen zusätzlichen Arbeitsaufwand, ermöglichte aber andererseits, die separate Untersuchung der chemisorptiven Eigenschaften der Sorptionsmittel.

---

<sup>4</sup> Das Prozedere zur Anwendung einer Laugenlösung in einem Gitter ist nach dieser Quelle online frei zugänglich und kann benutzt werden, um für die Produktion eines Laugen-basiertes Sorbenz herzustellen: [https://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/monitoring.pdf](https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/monitoring.pdf) (zuletzt am 31.10.2024 besucht). Im Rahmen des Projektes wurden 20%-ige Lösungen in destilliertes Wasser vorbereitet.



Tabelle 2: Für Celluloseacetat und -nitrat ausgewählte Sorbenzien und deren physikalischen Eigenschaften. V: Voruntersuchungen (nach 3.1.3.1), R: Untersuchungen mit natürlich gealtertem Material (nach 3.1.3.2).

Art des Sorbenz	Handelsname	Polarität	Wasseraffinität	Spezif. Oberfläche (m <sup>2</sup> /g)	Max. Arbeitstemp. (°C)	Sorbate	Preis	Praktikabilität der Anwendung in Museen	Anwendung im Projekt			
									V		R	
									CA	CN	CA	CN
<b>Molekularsiebe (anorganisch oder kohlenstoffbasiert)</b>	Molekularsieb 4Å (Zeolite)	hoch	hoch	500-800	<400	x	€	sehr gut	x	x		
	Carbosieve S-III	niedrig	niedrig - mittel	975	>400	C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> n-Alkane	€€€	sehr gut	x			
	Carboxen 1003	niedrig	niedrig - mittel	1000	>400	C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> n-Alkane	€€€	sehr gut	x			
<b>Graphitisierte Carbon Blacks</b>	Aktivkohle	mittel	hoch	500-1200	>400	C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub> n-Alkane	€	sehr gut	x	x		
	KCplus 30x60 (Aktivkohle) <sup>1</sup>	x	x	x	x	x	€	sehr gut	x			
	Carbopack B	niedrig	niedrig	100	>400	C <sub>5</sub> -C <sub>12</sub> n-Alkane	€€€	sehr gut	x			
	Carbopack X	niedrig	niedrig	260	>400	C <sub>3</sub> -C <sub>9</sub> n-Alkane	€€€	sehr gut	x			
<b>Polymere</b>	Polymer-M <sup>1</sup>	niedrig - mittel	niedrig - mittel	x	x	x	€€	sehr gut	x	x	x	x
	Polymer-A <sup>1</sup>	niedrig - mittel	niedrig - mittel	x	x	x	€€	sehr gut	x			



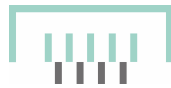


<b>Laugen</b>	Natriumhydrogen- carbonat (NaHCO <sub>3</sub> )	hoch	hoch	x	<270 <sup>5</sup>	x	€	sehr gut	x	x	x	x
	Natriumhydroxid (NaOH)	hoch	hoch	x	<323 (mp)	x	€	niedrig <sup>3</sup>	x	x		
	Triethanolamin	hoch	hoch	x	(bp: 335; mp: 21)		€	sehr gut		x		x
<b>Cellulose basiert</b>	Archivkarton	x	x	x	<270	x	€	sehr gut	x	x	x	x
<b>MOF</b>	MOF-MILL-100 <sup>2</sup>		hoch	1000- 10000			€€€	sehr gut	x	x	x	x

<sup>1</sup>artemis control AG; <sup>2</sup>MOF aus dem EU-Projekt NEMOSINE<sup>6</sup> (2nd generation MOF, based on MILL-100 [6]), von Prof. Dr. Bertrand Lavédrine freundlicherweise zur Verfügung gestellt, Muséum National d'Histoire Naturelle (Centre de recherche sur la conservation); <sup>3</sup>ätzender Stoff.

<sup>5</sup> <https://www.carlroth.com/de/de/natriumsalze-na/natriumhydrogencarbonat/p/6885.1>

<sup>6</sup> <https://nemosineproject.eu/>



### 3.1.2 AUSWAHL DER NATÜRLICH GEALTERTEN TESTOBJEKTE

Zu Forschungszwecken sammelt der Forschungsbereich Materialkunde seit 2015 natürlich gealterte Referenzmaterialien von Kunststoffen. In dieser Sammlung befinden sich unterschiedliche historische, nicht museale Tonbänder in unterschiedlichsten Erhaltungszuständen. Tonbänder mit intensiver olfaktorischer Wahrnehmung (cf. Vinegar Syndrome [7]), wurden bezüglich ihrer Zusammensetzung mittels ATR-FTIR und Thermodesorption-GCMS (TD-GCMS) untersucht. So konnten mehrere Tonbänder aus CA (Abbildung 2) ausfindig gemacht werden und die vorhandenen Weichmacher (u.a. Dimethylphthalat) identifiziert werden.

Historisches CN (Abbildung 2) wurde freundlicherweise von Prof. Dr. Friederike Waentig (TH Köln) zur Verfügung gestellt, dessen Zusammensetzung ebenfalls mittels ATR-FTIR bestätigt wurde. Das Vorhandensein von Kampfer als Weichmacher konnte ebenfalls mittels TD-GCMS belegt werden. Die verfügbare Materialmenge hat die Auswahl derjenigen Sorbenzien, die einer Testung unterzogen werden konnten, limitiert.

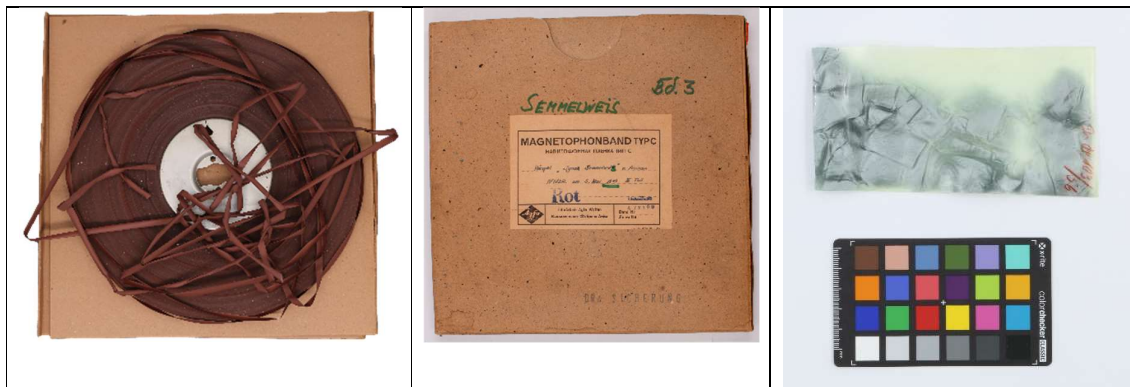


Abbildung 2: Links und Mitte: Tonband aus CA; rechts: CN-Platte (Sammlung F. Waentig, TH Köln) © C. Mally

Voraussetzung für die Eignung der Materialien für die Experimente war ihre Fähigkeit, Säure auszugasen. Dies wurde anhand A-D Strips<sup>7</sup> in einem einfachen Aufbau für beide Materialien getestet und bestätigt (Abbildung 3).

<sup>7</sup> [https://filmcare.org/ad\\_strips](https://filmcare.org/ad_strips), zuletzt besucht am 30.10.24.

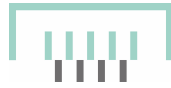


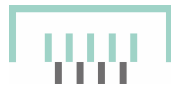
Abbildung 3: Nach einem Tag mit dem CN-Material (senkrechter Streifen) im geschlossenen Gefäß wechselt die Farbe des A-D Strip von blau nach gelb (gelbe Farbe sichtbar auf der inneren Seite des Streifens, welcher waagrecht auf dem Gefäßboden liegt) © C. Mally.

### 3.1.2.1 UNTERSUCHUNGEN DER HOMOGENEITÄT DES CELLULOSEACETAT TONBANDES

Natürlich gealterte Materialien sind heterogene Objekte, welche im Verlauf des Alterungsprozesses häufig lokale chemische Unterschiede aufweisen können. Dies stellt eine Herausforderung für Studien dar, die auf vergleichbare Proben angewiesen sind.

Während die natürlich gealterte CN-Platte in sehr kleine Späne mechanisch zerkleinert und dadurch homogenisiert werden konnte, konnte das CA-Tonband als ganzes unzerkleinertes Band genutzt werden. Die Komparabilität der Materialien für die Anforderungen der Fragestellung wurde anhand einer Substudie belegt. Hier wurden die Ausgasungen zweier 60 cm langen Probenstücke aus den jeweiligen Enden des 10 m langen Tonbandfragments verglichen, die für die gesamten Untersuchungen benutzt wurden. Die Untersuchung wurde mit nur einem Sorbenz durchgeführt. Die Auswahl fiel auf CX-1003, da in den Vortests beobachtet wurde, dass dieser Sorbenz hohe Mengen an Phthalaten aufnehmen kann. Diese Kombination erlaubte einen sehr kurzen Versuchszeitraum von einem Monat und ermöglichte durch das hohe Aufnahmevermögen eine dennoch hohe Empfindlichkeit. Der Versuchsaufbau erfolgte nach der im Abschnitt 3.1.3.2 beschriebenen Methode.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Vergleichbarkeit in der DMP-Aufnahme (22.5 mg/L für 200-260 cm und 19.6 mg/L für 1000-1060 cm). Die Untersuchungen im Abschnitt 3.1.3.2 wurden mit dem Material zwischen 260 cm und 1000 cm des Tonbands durchgeführt.



### 3.1.3 METHODE ZUM AUSSETZEN VON SORBENZIEREN AN EMISSIONEN

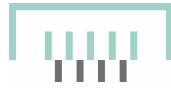
Ein zentraler Schritt im Rahmen des Projekts war die Exposition der Sorbenzien gegenüber den Analyten. Dieser Prozess wurde in vier verschiedenen Versuchsaufbauten mit jeweils spezifischen Zielsetzungen durchgeführt (s. Tabelle 3).

*Tabelle 3: Aussetzen von Sorbenzien zu den Analyten und natürlich gealterten Materialien. Auflistung der unterschiedlichen, im Projekt im Einsatz gekommenen, Aufbauten. \* Die Rückgewinnung gibt Aufschluss über den Anteil an Sorbenzien, welche nicht durch Extraktion zurückgewonnen werden konnte (s. Text).*

Nr.	Kurzname	Methode	Zweck
1	Gasförmiges Aussetzen	Die Sorbenzien werden in einem geschlossenen Raum dem Analyten ausgesetzt	Untersuchung der Rückgewinnung* für leicht verdampfbare Analyten (Kampfer, AA)
2	Aussetzen durch Spiken	Analytlösung wird in der Oberfläche des Sorbenz aufgespritzt	Untersuchung der Rückgewinnung* für wenig verdampfbare Analyten (DMP, HNO <sub>3</sub> ) <sup>8</sup>
3	Aussetzen von natürlich gealtertem	Die Sorbenzien werden in einem geschlossenen Raum natürlich gealterten Kunststoffen ausgesetzt	Untersuchung der Spezifität der Sorbenzien ggü. realem Material, welches beide Analyten ausstößt
4	Material	Wie 3, mit Prototyp	Untersuchung der Effektivität der Prototypen ggü. realem Material und in realen Bedingungen

Aufbauten 1 und 2 (Tabelle 3) werden in Abschnitt 3.1.3.1 näher erläutert, Aufbauten 3 und 4 in Abschnitt 3.1.3.2. Die Expositionen wurden in deaktivierten und verschließbaren Glasfläschchen durchgeführt. Die Notwendigkeit für unterschiedliche Methoden innerhalb des Projektes, ergab sich teilweise aus den unterschiedlichen Expositionsversuchen, um die Rückgewinnung abzuschätzen. Die Rückgewinnung gibt Aufschluss über den Anteil an Sorbat, welches nicht mittels Extraktion zurückgewonnen werden kann. Im Idealfall werden die Sorptionsmittel natürlich gealtertem Material ausgesetzt, so dass die beobachtete

<sup>8</sup> Vorhanden als 65% wässrige Lösung, was im Rahmen der Experimente zu langsamem Verdampfen führte.

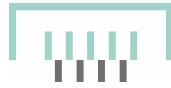


Leistung so gut wie möglich den realen Bedingungen entspricht. Die Emissionen von Objekten sind komplex und setzen sich typischerweise aus mehr als zwei Verbindungen zusammen. Dies führt beispielsweise zur Konkurrenz um die verfügbaren Sorptionsstellen. In einer solchen, die Realität adäquat abbildenden Umgebung, ist jedoch die exakte Menge jedes emittierten Analyten unbekannt. In diesem Fall könnte eine geringe Menge an extrahiertem Sorptionsmittel zwei Gründe haben: a) Der Analyt wurde nicht an das Sorptionsmittel sorbiert - was Gegenstand der vorliegenden Studie ist - oder b), dass er zwar sorbiert wurde, die Extraktionsmethode aber nicht in der Lage war den gesamten sorbierten Analyten zu lösen. Dies kann z.B. aufgrund einer irreversiblen Wechselwirkung zwischen Sorbat und Sorptionsmittel vorliegen und muss bekannt sein, um die Spezifität dementsprechend korrigieren zu können.

Um die Menge an Sorbenzien, welche mit der in diesem Projekt gewählten Methode nicht extrahiert werden konnten, abzuschätzen, wurde ein Aufbau entwickelt, bei dem eine bekannte Menge des Analyten den Sorbenzien ausgesetzt wurde. Dadurch war es möglich, die Analyt-Rückgewinnungsrate der Sorptionsmittel zu ermitteln. Dies hätte alternativ durch eine quantitative Untersuchung des gasförmigen Analyten erfolgen können wurde jedoch als nicht zielführend erachtet, da es in unserem Fall die Verwendung zusätzlicher Sorptionsmittel impliziert hätte, welche mit den untersuchten Sorptionsmitteln um die Analyten hätten konkurrieren können.

Dabei stellt Aufbau 1 die bevorzugte Methode dar, um die Rückgewinnung zu untersuchen, da er den tatsächlichen Bedingungen im Prozess am nächsten kommt (der Analyt interagiert in der Gasphase durch Ad-, Ab- oder Chemisorption mit dem Sorbenz). Im Gegensatz dazu ist das Aufsprühen des aufgelösten Analyten direkt auf das Sorbenz nicht realistisch und kann zudem zu Interaktionen zwischen den Substanzen führen, die in der realen Situation nicht auftreten würden. Obwohl das gasförmige Aussetzen von Sorbenzien zu den Analyten (Aufbau 1 in Tabelle 3) den idealen Prozess abbildet, war es in der Praxis nicht immer möglich auf diese Weise zu verfahren. Grund dafür war die geringe Konzentration einiger Analyte in der Gasphase, was zu sehr langen Aussetzungszeiten und somit zu starken Verspätungen im Projektlauf geführt hätte (3.1.7.1). Dieses Verfahren hat sich als praktikabel für sehr volatile Verbindungen (Kampfer und Essigsäure) bewährt, aber nicht für DMP und Salpetersäure. Im letzteren Fall wäre z.B. eine Quelle an  $\text{NO}_2$  nötig gewesen, damit Salpetersäure sich direkt in der Gasphase nach Reaktion mit Luftfeuchte bildet. Dies war aus zeitlichen-, sicherheits- und apparativen Gründen im Rahmen des Projektes nicht möglich.

Für Kampfer konnten die Aufbauten 1 und 2 (Tabelle 3) verglichen werden, was relevante Beobachtungen ermöglichte. Diese werden unter 3.1.7.6 vorgestellt und im Abschnitt 4 weiter diskutiert.



### 3.1.3.1 METHODE ZUM AUSSETZEN VON SORBENZIEN AN ANALYTEN: GASFÖRMIGES AUSSETZEN UND AUSSETZEN DURCH SPIKEN

Der Aufbau dieser Methoden wird im folgendem Anhand des Beispiels für den Analyten Kampfer beschrieben. Zunächst wurde eine bekannte Menge des Sorptionsmittels gewogen und in ein Headspace-Glasgefäß gegeben, mit Ausnahme von Na-Bi, Na-Hy und Triethanolamin (TEA), welche zuvor in Lösung bekannter Konzentration auf ein Edstahlgitter aufgetragen wurden. Dieser Versuch wurde für jedes Sorbenzien-Analyt-Paar separat durchgeführt.

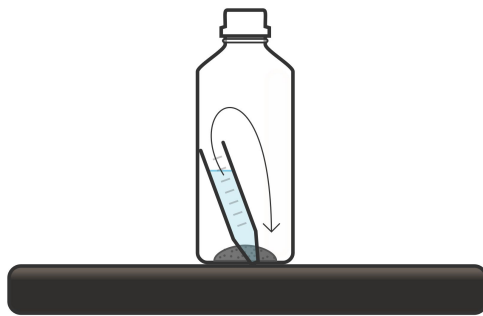


Abbildung 4: Aufbau 1 nach Tabelle 3 in einem Headspace-Gefäß (blau: Weichmacher-Lösung, schwarze Partikel am Boden des Gefäßes: pulverförmiges Sorbenz)

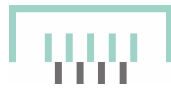
Für die Exposition wurden zwei unterschiedliche Methoden verwendet:

- a) Eine definierte Menge Kampfer, gelöst in DCM (blaue Lösung in Abbildung 4), wurde mithilfe eines Mikroeinsatzes in ein Glasfläschchen gegeben. Dies ermöglichte die Freisetzung von Kampfer als Gas, das anschließend vom Sorptionsmittel sorbiert wurde (Aufbau 1 in Tabelle 3).
- b) Einige Mikroliter einer Kampferlösung mit definierter Konzentration wurden auf das Sorptionsmittel aufgesprüht (Aufbau 2 in Tabelle 3, Abbildung 12, Schritt II).

Bevor der Extraktionsschritt (3.1.4) eingeleitet wurde, wurde entweder in a) einige Minuten nach dem Verdampfen des Spike-Lösungsmittels oder in b) bis zum vollständigen Verdampfen der Lösung gewartet.

### 3.1.3.2 METHODE ZUM AUSSETZEN VON SORBENZIEN AN EMISSIONEN AUS NATÜRLICH GEALTERTES MATERIAL

Eine bestimmte Menge (150 mg) Sorptionsmittel wurden auf den Boden des Reagenzglases gegeben, in welches ein 20 cm langes Tonbandstück mithilfe eines Mikroeinsatzes in das Reagenzglas gesetzt wurde



(Abbildung 5). Auf diese Weise konnte ein direkter Kontakt zwischen Tonbandmaterial und Sorptionsmittel vermieden werden. Insgesamt wurden drei Probensätze vorbereitet, die nach unterschiedlichen Expositionszeiten geöffnet wurden. Die Expositionszeiten sind wie folgt gewählt worden: Einen Monat (ein Satz mit Vortest) drei Monate und sechs Monate (je zwei Sätze, für Duplikatsmessungen). In diesem Bericht wird nur auf die Ergebnisse der sechsmonatigen Exposition eingegangen.



Abbildung 5: Aufbau nach 3 (Tabelle 3) für das Aussetzen von Sorbenzien an Emissionen aus einem natürlich gealtertem Celluloseacetat-Tonband. Das Endstück des Tonbands steckt in einem (im Bild schwer erkennbaren) Mikroeinsatz. © C. Mazzon.

### 3.1.3.3 METHODE ZUM AUSSETZEN VON SORBENZIEEN AN EMISSIONEN AUS NATÜRLICH GEALTERTEM MATERIAL ZUR TESTUNG DER PROTOTYPEN

Das Aussetzen beider Materialien fand aufgrund ihrer Form in unterschiedlicher Weise statt. Dank der hohen Oberfläche des Tonbands, konnten die Sorbenzien des Tonbands wie in Abbildung 6 ausgesetzt werden. Das Tonband wurde dabei auf einem Edstahlgitter aufgerollt. Die CN Platten wurden verkleinert, homogenisiert und in einem ähnlichen Aufbau den Sorbenzien ausgesetzt.

Um eine für Museen realistischere Situation zu simulieren, wurden die Prototypen mit dem jeweiligen Sorptionsmittel und dem natürlich gealtertem Material in Exsikkatoren für einen definierten Zeitraum ausgesetzt. Die Innenoberflächen der Exsikkatoren wurden dabei stets mit einem Silylierungsreagenz deaktiviert.

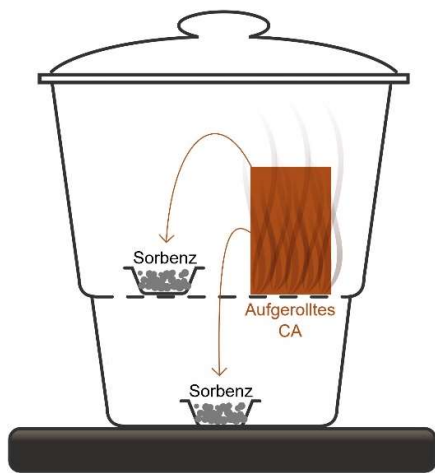
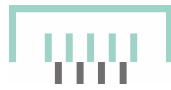


Abbildung 6: Exsikkator mit aufgerollten Edelstahlgitter für das Aussetzen von Sorbenzien an natürlich gealtertem Material aus Celluloseacetat (Tonband).

### 3.1.4 METHODE ZUR EXTRAKTION VON SORBATEN AUS SORBENZ IEN UND PROBEVORBEREITUNG

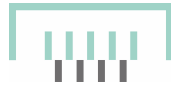
Die Extraktion definiert sich in verschiedenen Lösungsvorgängen, durch welche die sorbierten Analyte (Sorbat) durch das Lösungsmittel aus dem Sorbenz bzw. einer flüssigen Phase gelöst werden. Eine schematische Darstellung der Extraktionsmethode ist in Abbildung 7 dargestellt.

Am Ende der Aussetzungsperiode wurden die Sorbenzien in ein Reagenzglas überführt, mit 4 mL Dichlormethan (DCM) versetzt und mit einem Glasstopfen verschlossen. Während der 24 h Extraktionsphase wurde das Reagenzglas manuell gelegentlich geschüttelt. Im Anschluss wurde das DCM und der darin gelöste Analyt (Extrakt I) Spritzenfilter mit einer Porengröße von 0,22 µm filtriert um Verunreinigungen bzw. Verstopfungen der Analysegeräte vorzubeugen. Ein Extrakt-Aliquot wurde anschließend in ein GC-Fläschchen überführt, um die Quantifizierung der extrahierten Analyten durchzuführen. Für die weiteren Extraktionen wurde die zuvor beschriebene Methodik angewendet, so dass am Ende drei Extrakte entstanden sind.

Nach dem die drei Extraktionen erstellt wurden, wurde das Lösemittel beim geöffneten Gefäß verdampft. Das daraus resultierende trockene Sorbenz wurde dann für die Säureanalyse mit Milli-Q-Wasser behandelt. Diese Lösung wurde durch einen Spritzenfilter filtriert und anschließend in den Autosampler des IC-Geräts überführt.

Für die Bestimmung von Essigsäure war im Rahmen dieser Studie für bestimmte Sorbenzien ein zusätzlicher Schritt (eine zusätzliche Extraktion) erforderlich. Abhängig von der Art der eingesetzten Sorbenzien kann Essigsäure (AA) entweder in Gasform als a) Essigsäure (Adsorption) oder b) Acetat (Ac, Chemisorption) aufgenommen werden. Wird Essigsäure ausschließlich in Form von Adsorption aufgenommen (Fall a), sollte





die vorhandene Essigsäure im ersten Extraktionsschritt des Sorbenzien mit DCM vollständig in Lösungsmittel gelöst werden. Anhand einer Flüssig/Flüssig-Extraktion (DCM/H<sub>2</sub>O) mit anschließender IC-Analyse der wässrigen Phase, kann die adsorbierte Essigsäure als solche quantitativ bestimmt werden (Abbildung 8). Voraussetzung ist, dass Essigsäure beim ersten Extraktionsschritt vollständig in DCM gelöst ist. Da chemisorbiertes Acetat aber nicht von DCM gelöst wird, sind andere Extraktionsmethoden erforderlich. Die gesamte Menge an sorbierter Essigsäure, sowohl als Essigsäure (Adsorption) als auch als Acetat (Chemisorption), kann nur bestimmt werden, wenn auch die Menge an Acetat welche durch Chemisorption entstanden ist, nachweislich quantifiziert werden kann. Essigsäure, die dadurch in Acetat umgewandelt worden ist, wurde mittels Fest-Flüssig-Extraktion nach der Extraktion der Weichmacher bestimmt. So konnte nicht nur die vollständige Rückgewinnung von Essigsäure und Acetat möglich gemacht, sondern auch die Chemisorptionsfähigkeit der unterschiedlichen Sorptionsmittel untersucht werden.

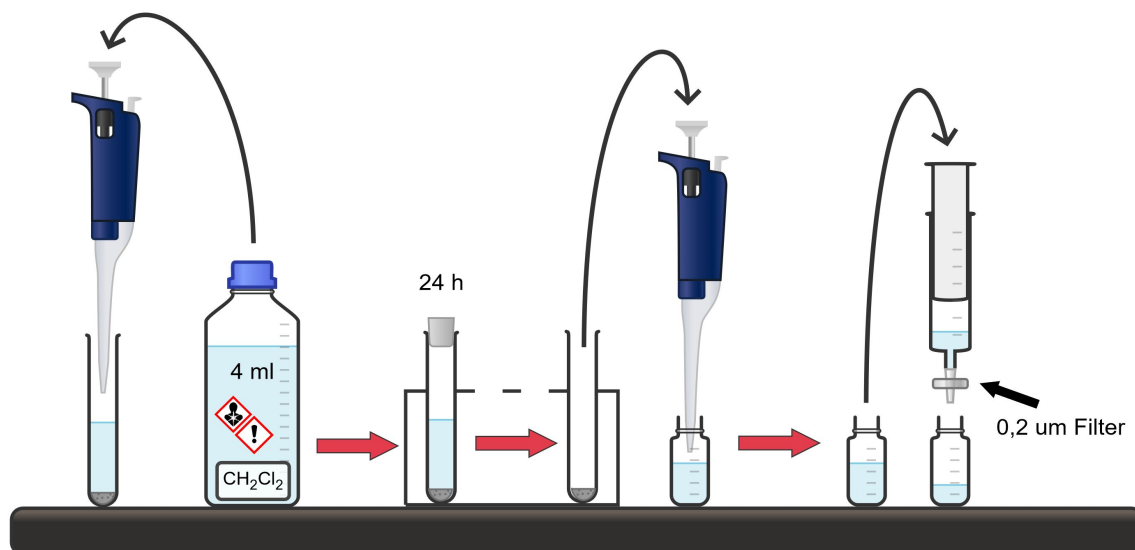


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des Extraktionsprozesses, nachdem das Sorbenz ausgesetzt wurde.

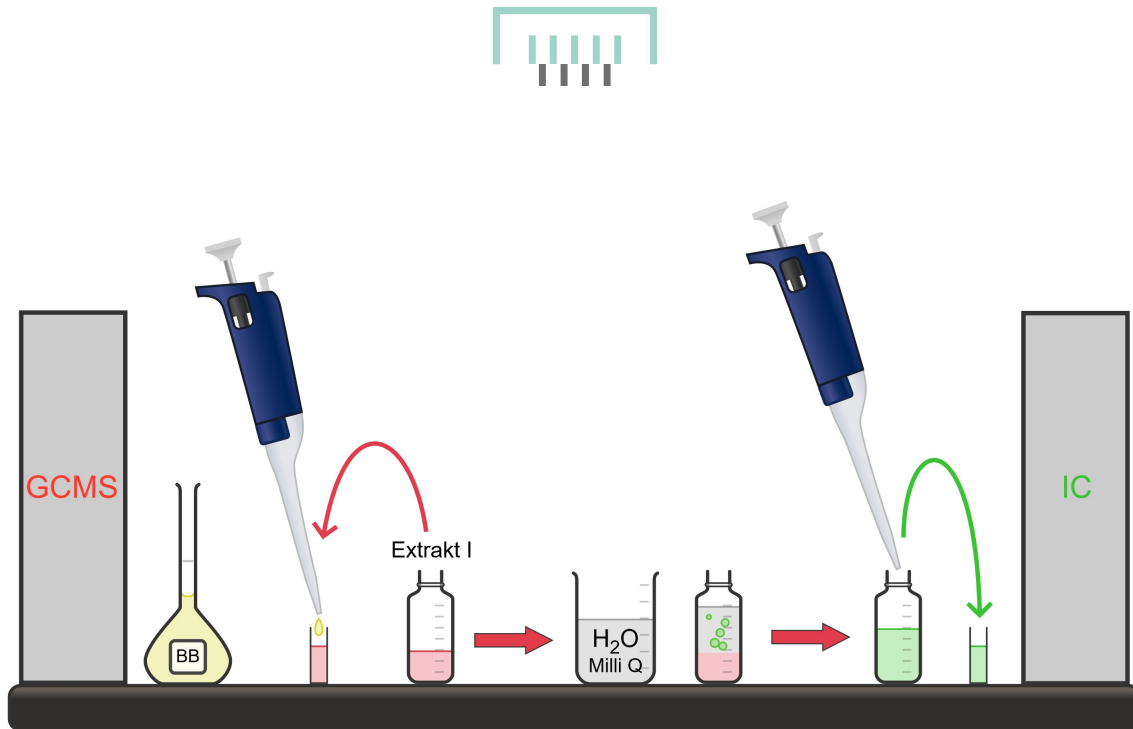
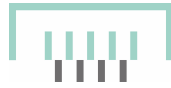


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Probenvorbereitung für die Analyse.

### 3.1.5 IONENCHROMATOGRAPHIE (IC) – METHODE ZUR QUANTITATIVEN ANALYSE VON ESSIGSÄURE UND SALPETERSÄURE

Essig- und Salpetersäure wurden Mittels Ionenchromatographie (IC) analysiert. Im Folgenden wird die Methodik der quantitativen Bestimmung von Essigsäure als Acetat beschrieben.

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Standardanalysen dargestellt. Hierbei wurde eine Kalibrierungskurve erstellt, indem die gemessene Analytmenge aus den Standards gegen die theoretisch vorgegebene Analytmenge aufgetragen wurde. Die Kalibrierungskurve enthält den für die Analysen innerhalb des Projekts üblichen Wertebereich von 0,5–100 mg/l. Die Ergebnisse zeigen in diesem Bereich ein lineares Verhältnis zwischen den theoretischen und experimentellen Konzentrationen sowie einen Bestimmungskoeffizienten ( $R^2$ ), der Quantifizierungen innerhalb des Konzentrationsbereichs ermöglicht. Tabelle 4 zeigt die Konzentrationen der Kalibrierungsstandards, der Kalibrierungsergebnisse, die Ergebnisse für LOD, LOQ, die Kalibrierkurven und den Bestimmungskoeffizienten für Essigsäure.



### Kalibrierkurve für Essigsäure

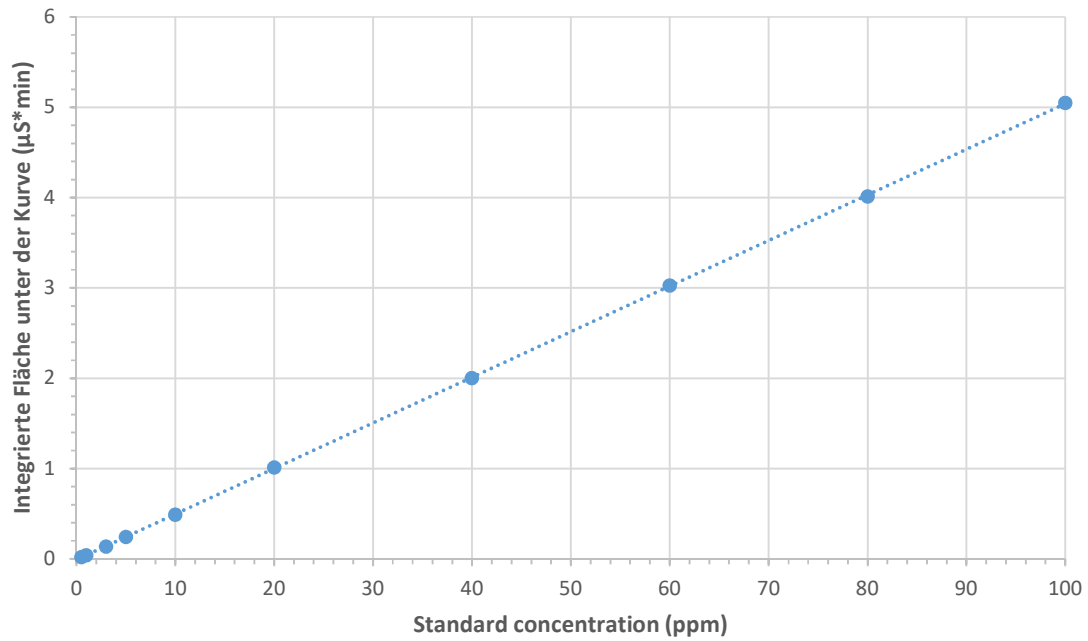


Abbildung 9: Darstellung der gemessenen Menge an AA als Funktion der Standardkonzentration des Analyten

Tabelle 4: Kalibrierstandardkonzentrationen und Kalibrierergebnis.

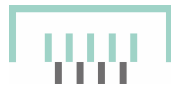
Theoretische Menge in ppm	
I	II
III	IV
V	VI
VII	VIII
IX	X
0,5	1
3	5
10	20
40	60
80	100

AA	Gemessene Menge in ppm									
	0,56	1,01	2,89	5,02	9,92	20,24	39,84	60,15	79,67	100,20

Kalibrierergebnis						
Punkte	b	m	LOD	LOQ	R <sup>2</sup>	
10	0,01	0,05	0,26	0,80	0,9999	



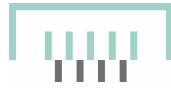
### 3.1.6 GASCHROMATOGRAPHIE-MASSENSPEKTROMETRIE (GC-MS) – METHODE ZUR QUANTITATIVEN ANALYSE VON WEICHMACHER

GCMS wurde für die Analyse der Weichmacher (DMP und Kampfer) angewendet. Damit quantitative Analysen für die im Projekt zu untersuchenden Analyte möglich sind, musste hier ebenso eine Messmethodik sowie eine Kalibrierung erstellt werden. Hier wird im Folgenden der Prozess anhand des Beispiels Kampfer dargestellt. Der Prozess lässt sich in seiner Art auch auf DMP anwenden.

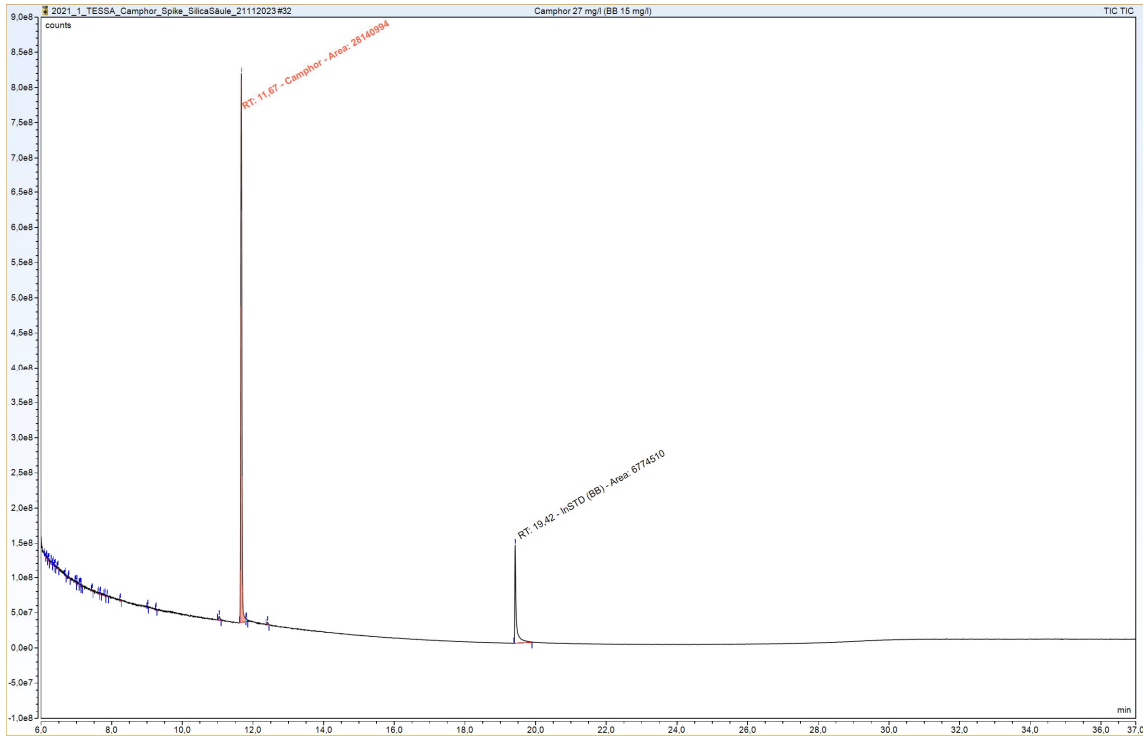
Zunächst wurde eine Kampfer-Standard-Stammlösung (Standard A) mit einer Nennkonzentration von 300 ppm in DCM (Supelco, SupraSolv®, ≥ 99,9%) erstellt. Aus der Standard A Lösung wurde eine Verdünnungsreihe erstellt. Diese Reihe von Arbeitsstandardlösungen wurde mit Nennkonzentrationen von 30; 27; 24; 21; 18; 15; 12,9; 6; 3; 1,5 und 0,5 ppm in 25-ml-Messkolben verdünnt. Als interner Standard wurde Benzylbenzoat (BB, Carl Roth, >99%) gewählt. Es hat sich gezeigt, dass BB unter den, in dieser Methode verwendeten, Bedingungen nicht mit dem Analyten von Interesse interferiert (Abbildung 10). Dieser wurde zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit allen Proben (Standard und reale Proben) hinzugefügt. Der interne Standard wurde als Stammlösung (Standard BB), mit einer Konzentration von 1500 ppm, angesetzt. Eine definierte Menge (10 µl) der BB-Stammstandardlösung wurde zu 990 µl Standardlösungen hinzugefügt, um eine Endkonzentration von 15 ppm zu erhalten.

Die verschiedenen Proben (Extrakte) aus dem Extraktionsprozess wurden ebenfalls mit dem internen Standard BB angereichert. In einem Autosamplerfläschchen wurden 990 µl der Probe pipettiert und anschließend mit 10 µl einer BB-Stammstandardlösung versetzt. Die Berechnung der Weichmacherkonzentrationen in den Proben erfolgte auf der Grundlage der Kalibrierkurven. Um die Genauigkeit zu gewährleisten, wurden alle Proben und Kalibrierungsproben mit einem Multipette® E3x und Xplorer (Eppendorf®) Dosiersystem hergestellt.

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die für die Analyse der Standards erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Durch individuelle Aufzeichnung der Fläche des Analytenstandards als Funktion deren Konzentration wurden externe Kalibrierkurven erstellt. Für Kampfer wurden lineare Kurven mit Bestimmungskoeffizienten ( $R^2$ ) von 0,998 erzielt. Anhand der Kalibrierkurven konnten die Nachweisgrenze (Limit of detection, LOD), die die kleinste Menge des Analyten in der Probe darstellt, die nachgewiesen, aber nicht unbedingt genau quantifiziert werden kann, und die Bestimmungsgrenze (Limit of quantification, LOQ), die die geringste Menge des Analyten definiert, die mit angemessener Genauigkeit gemessen werden kann, ermittelt werden:



$LOD = 3,3 \sigma/m$  und  $LOQ = 10 \sigma/m$   
( $\sigma$  = Standardabweichung,  $m$  = Steigung der Kalibrierkurve)



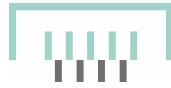


Abbildung 10: Beispiel für ein Chromatogramm der Standardlösung, die Kampfer mit einer Nennkonzentration von 27 mg/l enthält.

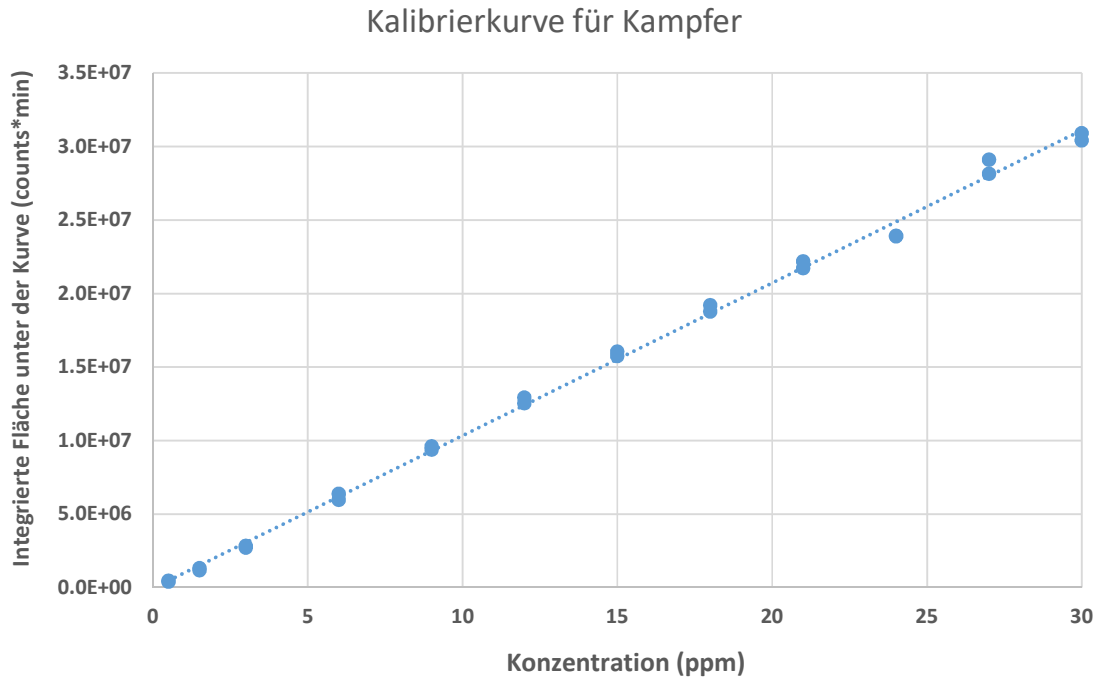
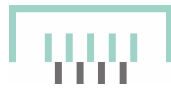


Abbildung 11: Darstellung der Fläche des Analytenstandards (Kampfer) als Funktion der Konzentration des Analytenstandards

Die Ergebnisse von LOD, LOQ, Kalibrierkurven und Bestimmungskoeffizient sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Kalibrierkurven, LOD, LOQ und Bestimmungskoeffizient (t1-Exposition).

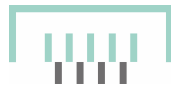


Probenname	Fläche (counts)		Nennkonzentration (ppm)	Gemessene Konzentration (ppm)
	Kampfer			
Std. 1	462110		0,5	0,49
	393434		0,5	0,43
Std. 2	1323328		1,5	1,32
	1183701		1,5	1,19
Std. 3	2702281		3	2,65
	2834572		3	2,78
Std. 4	5963025		6	5,79
	6367352		6	6,18
Std. 5	9375527		9	9,08
	9598834		9	9,29
Std. 6	12520506		12	12,10
	12923039		12	12,49
Std. 7	16048409		15	15,50
	15732375		15	15,20
Std. 8	19205418		18	18,54
	18765388		18	18,12
Std. 9	22181427		21	21,40
	21722250		21	20,96
Std. 10	23930952		24	23,09
	23894075		24	23,05
Std. 11	28140994		27	27,14
	29096280		27	28,06
Std. 12	30912741		30	29,81
	30422182		30	29,34

Analyt	<i>b</i>	<i>m</i>	LOQ (ppm)	LOD (ppm)	$R^2$
Kampfer	-50841	1038684	1,67	0,55	0,998

### ZUSAMMENFASSENDES EXPERIMENTELLES SCHEMA

Zusammenfassend wird hier die allgemeine Methodik zur Vorbereitung und Behandlung der Sorbenzien erläutert:



- a) Eine bekannte Menge des Sorptionsmittels (I) wurde gewogen und in ein Headspace-Glasgefäß gegeben, mit Ausnahme bestimmter Basen (Na-Bi, Na-Hy) und Triethanolamin (TEA), die zuvor in Lösung bekannter Konzentration auf ein Edelmetallgitter aufgetragen wurden.
- b) Exposition der Sorbenzien zur Ausgasung nach einer der vier Aufbauten (1, 2, 3 oder 4) in Tabelle 3.
- c) Erste DCM-Extraktion: einige Minuten nach dem Verdampfen des Spikes-Lösungsmittels in a) bzw. nach vollständigem Verdampfen der Lösung in b) wurden 4 ml DCM hinzugefügt (III), um die Analyten aus dem Sorptionsmittel zu extrahieren. Das Lösungsmittel blieb 24 Stunden im Kontakt mit dem Sorbenz (IV).
- d) Filtration und Re-Extraktion: Das Extrakt wurde durch einen PTFE-Filter filtriert (V-VI), um Reste der Sorbenzien zu separieren. Weitere 4 ml frisches DCM wurden für eine zweite und eine dritte Extraktion hinzugefügt, gefolgt von erneuter Filtration (III-IV), so dass nach dieser Methodik insgesamt drei DCM-Extrakte erstellt worden sind.
- e) Quantifizierung der Weichmacher: Aliquote der Extrakte aus d) wurden für die Flüssig-GCMS-Analyse vorbereitet (3.1.6; VII).
- f) Quantifizierung der Säure: Das DCM wurde eingedampft und die Sorbenzien einer abschließenden Fest/Flüssig-Extraktion mit 4 mL Milli-Q-Wasser unterzogen. Die Säureanalyse wurde mittel IC durchgeführt. (3.1.5; VIII).

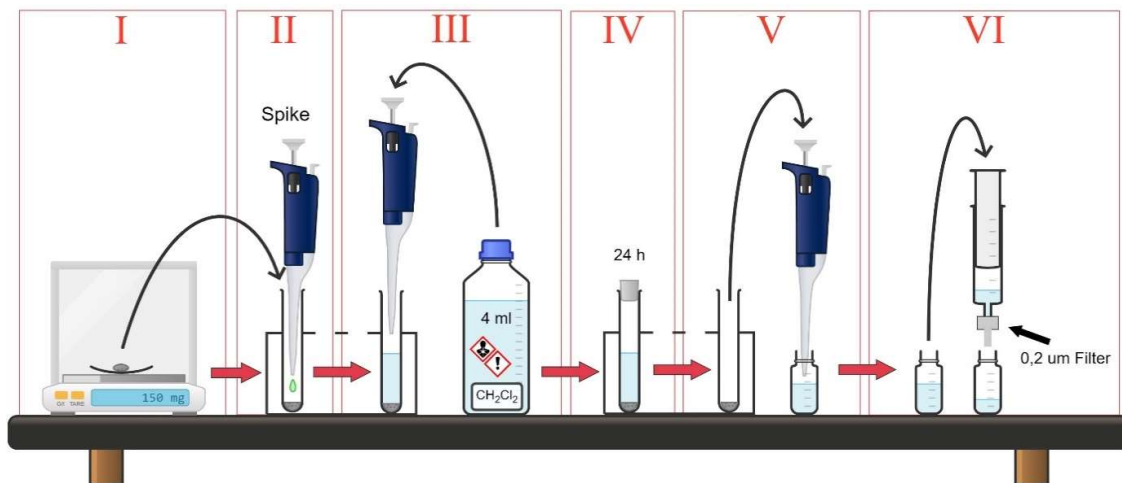


Abbildung 12: Schematische Darstellung des gesamten Prozesses, anhand des Beispiels des Spikes von Analyten (Aufbau 2, Tabelle 3).



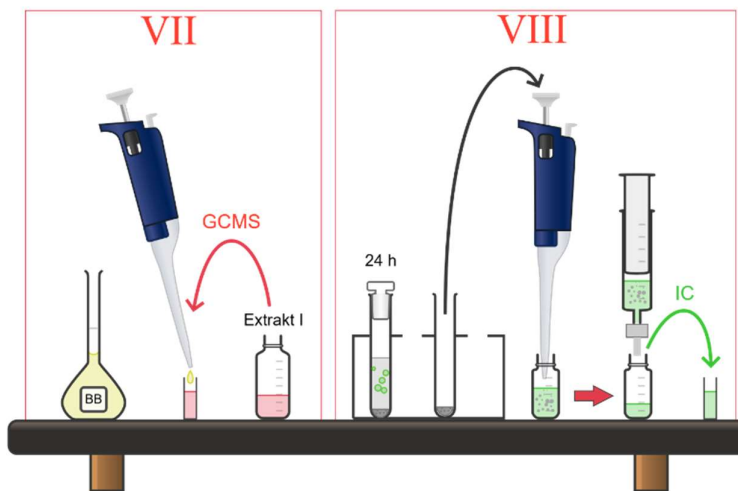
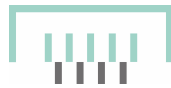


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Probenvorbereitung für die GCMS- und IC-Analyse.

### 3.1.7 BESTIMMUNG DER RÜCKGEWINNUNG VON ANALYTEN AUS DEN SORBENZIEEN

Da nicht jeder Sorptionsprozess reversibel ist, war es notwendig abzuschätzen, ob die Extraktion der Sorbate aus den Sorbenzien quantitativ erfolgt ist. Durch irreversible Interaktionen zwischen Sorbat und Sorbenz lässt sich nicht immer die gesamte sorbierte Menge wieder zurückgewinnen. Die Menge des irreversibel gebundenen Sorbats kann indirekt als Differenz zwischen der ursprünglich exponierten Analytmenge und der zurückgewonnenen Menge ermittelt werden. Dies kann anhand des Aufbaus 1 in Tabelle 3 (Verfahren wird genauer unter 3.1.3.1 a) erläutert) durchgeführt werden, was, wie bereits erwähnt, sich nicht für alle Analyte anwenden ließ.

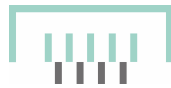
Daher wurden alternativ nach 3.1.3.1 b) Sorbenzien mit bekannten Mengen der jeweiligen Analyten gespiked, und die Sorbenzien wie unter 3.1.4 beschrieben extrahiert.

Die Rückgewinnung für den gasförmigen ausgesetzten Analyten lässt sich wie folgt definieren:

$$\text{Rückgewinnung in \%} = 100 \times \frac{\text{(extrahierte Analytmenge)}}{[(\text{ausgesetzte Analytmenge}) - (\text{in Mikroviaal zurückgebliebene Analytmenge})]}$$

Die Rückgewinnung für die gespiked Analyten lässt sich wie folgt definieren:

$$\text{Rückgewinnung in \%} = 100 \times \frac{\text{(extrahierte Analytmenge)}}{\text{(gespiked Analytmenge)}}$$



Der Nenner in beiden Gleichungen stellt die theoretische Menge des Analyten dar, die bei vollständiger Rückgewinnung zu erwarten wäre. An dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass die Rückgewinnung der gespikten Analyten nicht die reale Situation widerspiegelt, da der Analyt nicht gasförmig aufgenommen wird. Stattdessen wird er in einem anderen Aggregatzustand und in einer vergleichsweise hohen Konzentration auf das Sorbens „aufgezwungen“. Dadurch können Prozesse bzw. Reaktionen auftreten, die nicht den Bedingungen eines gasförmigen Exponierens entsprechen.

Unten werden die Ergebnisse der Rückgewinnungswerte vom DMP aus den verschiedenen Sorbenzien beschrieben.

### 3.1.7.1 RÜCKGEWINNUNG VON GASFÖRMIG AUSGESETZTEN DEP

Zuerst wurde der präferierte Aufbau 1 (Tabelle 3) getestet. Dafür wurde eine viermonatige Untersuchung angesetzt, in dem die Sorbenzien bekannten Mengen des Analyten (10 µL DEP in Mikroeinsatz) separat ausgesetzt wurden (doppelte Ausführung). Am Ende des Zeitraums wurden die Sorbenzien extrahiert. Dabei konnte DEP analytisch nicht bestimmt werden.<sup>9</sup> Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das Spiken (nächster Abschnitt) eingeführt.

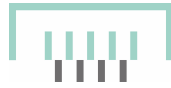
### 3.1.7.2 RÜCKGEWINNUNG VON GESPIKTEN DMP

Die Ergebnisse der in den Extrakten zurückgewonnenen Mengen an DMP nach dem Spiken (Aufbau 2 Tabelle 3) für jedes Sorptionsmittel sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen das gute Potenzial des gewählten Lösungsmittels - wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß für die verschiedenen Sorptionsmittel - bei der Extraktion der Weichmacher aus den verschiedenen Sorptionsmitteln. Bei DMP lagen die prozentualen Wiederfindungsraten für alle Sorptionsmittel über 75 %, mit Ausnahme von Poly-M und MOF, wo die Wiederfindungsrate 35 % bzw. 14 % betrug. Dieses Experiment wurde mit allen Analyten (Tabelle 1) durchgeführt. Damit die Ergebnisse der Spezifität aus den unterschiedlichen Sorbenzien untereinander vergleichbar sind, wird eine Korrektur mit den hier erstellten Werte angestrebt; später wird es näher darauf eingegangen (Abschnitt 3.2).

Ebenfalls gilt zu beachten, dass beim Lösen von  $\text{NaHCO}_3$  und  $\text{NaOH}$  in Wasser, sowohl für DMP als auch für Kampfer (3.1.7.4), die Lösung klar war. Es konnten auch keine unlöslichen Bestandteile festgestellt werden.

---

<sup>9</sup> Im Gegensatz dazu konnten Phthalate im Hauptexperiment nach 1, 3 und 6 Monaten nachgewiesen werden. Dies deutet darauf hin, dass das Verhalten der Phthalate als reine Substanz und als Bestandteil im CA unterschiedlich ist.



### 3.1.7.3 RÜCKGEWINNUNG VON GESPIKTES ESSIGSÄURE

In diesem Fall fiel die Rückgewinnung über 75% für alle Sorbenzien außer für CS-SIII, CX-1003, Act-Ch und KCPlus, sodass für diese Sorbenzien die Ergebnisse zur Spezifität nur qualitativ betrachtet werden sollen (s. Abschnitt 3.2).

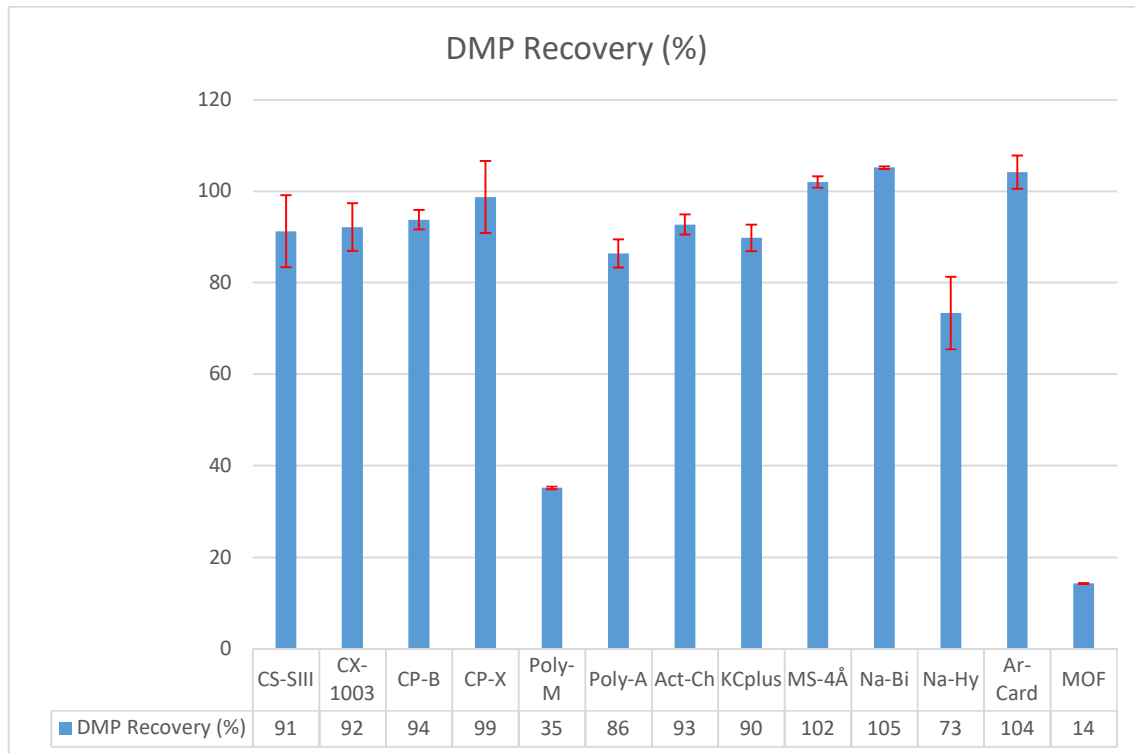


Abbildung 14: Quantifizierung des extrahiertes DMP für jedes Sorptionsmittel. Jede Spalte entspricht der Summe aller Extrakte.

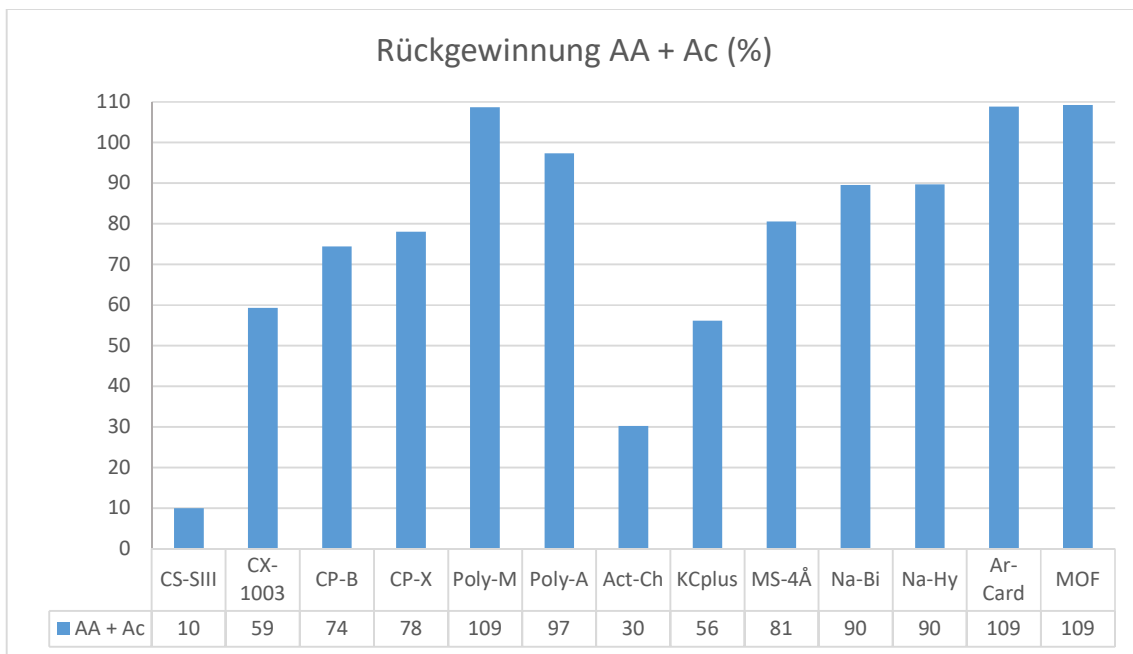
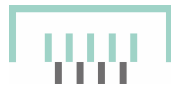


Abbildung 15: Quantifizierung des extrahiertes AA und Ac für jedes Sorbenz. Jede Spalte entspricht der Summe der AA und Ac Extrakte.

### 3.1.7.4 RÜCKGEWINNUNG VON GESPIKTEN KAMPFER

Für das Spiken von Sorbenzien mit Kampfer wurde die gleiche Methodik wie für DMP verwendet. Eine definierte Menge (10 µl) einer Kampferlösung (10.000 mg/l in DCM) wurde auf die Sorbenzien gesprüht. Das Extraktionsverfahren ist dasselbe wie im Abschnitt 3.1.4 beschrieben. Die Menge an Kampfer, welche aus den Sorbenzien extrahiert wurde, ist quantitativ bestimmt worden und in Abbildung 16 dargestellt.

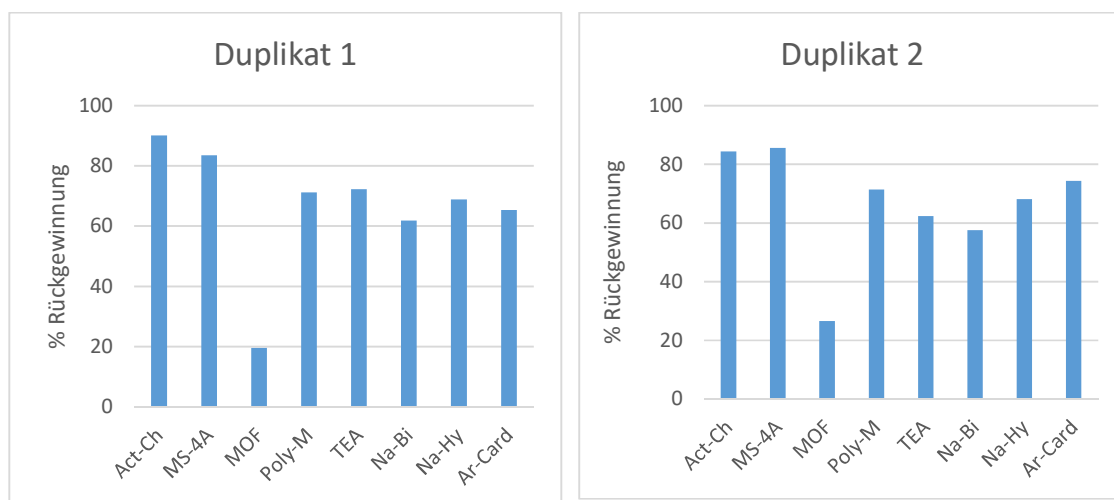
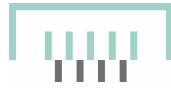


Abbildung 16: Prozent der Rückgewinnung an gespikten Kampfer nach Extraktion der Sorbenzien (Doppelversuch).



Im Chromatogramm der Kampfer-Spikes der Laugen wurden keine Verbindungen nachgewiesen, die direkt auf Wechselwirkungen zwischen Kampfer und der Lauge hinweisen könnten. Die Anzahl der getesteten Sorbenzien musste aufgrund der begrenzten Menge an geeignetem, natürlich gealtertem Material, die für die in Abschnitt 3.1.3.2 beschriebene Experimente benutzt wurden (Ergebnisse zu sehen in 3.2), eingeschränkt werden. Daher wurden diese Voruntersuchungen auch nur mit den vielversprechendsten Sorbenzien durchgeführt.

### 3.1.7.5 RÜCKGEWINNUNG VON GASFÖRMIG AUSGESETZTEN KAMPFER

Da Kampfer schneller als DMP in die Gasphase übergeht, konnte in diesem Fall das gasförmige Aussetzen durchgeführt werden. Hierbei wurden die Sorbenzien dem Analyten aber als DCM-Lösung in einem geschlossenen Vial für vier Wochen ausgesetzt. Dabei wurde eine Kampferlösung in DCM in einem kleinen Mikroinsert im Vial hinzugefügt (100 uL einer 10.000 mg/L Lösung). Es wurden folgende Parameter quantitativ bestimmt:

- Die Menge an Kampfer, welche aus den Sorbenzien extrahiert wurde.
- Die Menge an Kampfer, welche in den Mikroinsert noch übriggeblieben ist.

Die Rückgewinnung wurde so formuliert:

$$\text{Rückgewinnung in \%} = 100 \times \frac{\text{(extrahierte Analytmenge)}}{\text{[(Ausgesetzte Analytmenge) - (in Mikroinsert zurückgebliebene Analytmenge)]}}$$

Die Rückgewinnung wurde auch hier in einem Doppelversuch untersucht. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse pro Sorbenz dargestellt. Daraus ergibt sich ein Rückgewinnungsfaktor für die Hauptuntersuchungen mit natürlich gealterten CN welcher belastbarer ist als der, durch das Spiken ermittelte Rückgewinnungsfaktor (da Aussetzen-Methode vergleichbarer).

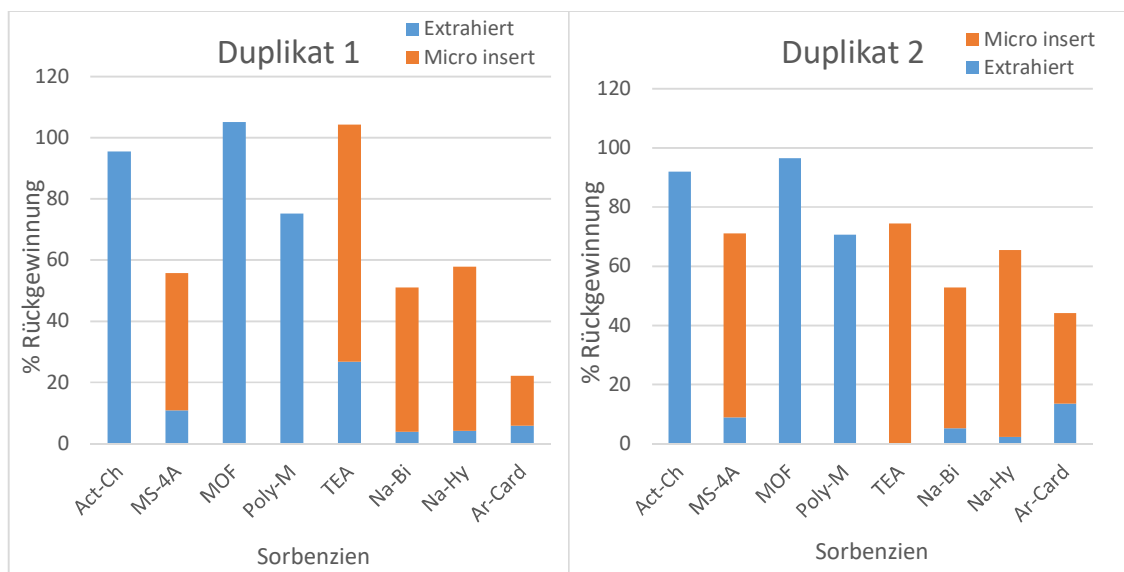
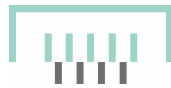


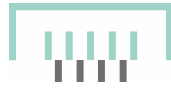
Abbildung 17: Prozent der Rückgewinnung an Kampfer (gasförmiges Aussetzen) nach Extraktion der Sorbenzien.

Für manche Sorbenzien ergibt sich eine große Differenz bis zu 100%. Dadurch stellt sich die Frage, wo sich der restliche Kampfer-Anteil befindet. Die Menge an Kampfer die sich in der Gasphase befindet (und somit durch das Öffnen des Vials verloren gehen kann), scheint für die verschiedenen Sorbenzien unterschiedlich zu sein. In der

Tabelle 6 wurde dokumentiert, ob beim Öffnen des Vials am Ende des Experiments ein starker Geruch wahrnehmbar war.

Tabelle 6: Dokumentation des Geruchs beim Öffnen der Gefäße am Ende der Aussetzungsperiode (Kampfer in DCM-Lösung).

Sorbenz	Geruch
Aktivkohle	Kein
Molekularsiebe 4A	Kein
MOF	Kein
Poly-M	Kein
TEA	TEA Geruch (ungewiss, ob weiterer Geruch auch vorhanden)



NaHCO <sub>3</sub>	Stark nach Kampfer
NaOH	Stark nach Kampfer
Archival Cardboard	Stark nach Kampfer

### 3.1.7.6 VERGLEICH ZWISCHEN RÜCKGEWINNUNG VON GESPIKTEN UND GASFÖRMIG AUSGESETZTEN KAMPFER

Der Vergleich beider Untersuchungen für Kampfer ist in der Grafik unten zu sehen. Dargestellt wird:

- Blau: Rückgewinnung von Kampfer in Bezug auf gespikter Menge.
- Grau: Rückgewinnung von Kampfer in Bezug auf die Menge, die ausgesetzt wurde aber am Ende des Experimentes nicht mehr im Mikroeinsatz war.

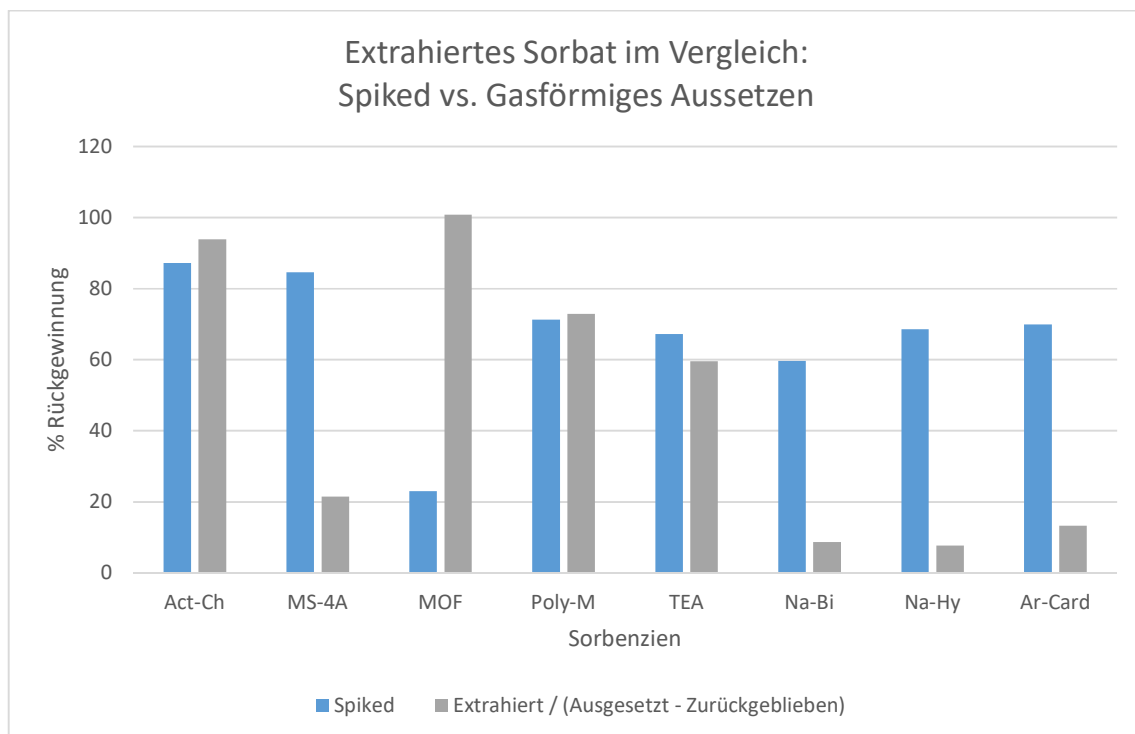


Abbildung 18: Vergleich der Rückgewinnung von gespikten (blau) und gasförmig ausgesetzten Kampfer (grau).

Nach dieser Beobachtung scheint es, bezüglich der Kampfer-Sorption, drei Gruppen an Sorbenzien zu geben:

- Gruppe A: Sorbenzien, für die die Menge an zurückgewonnenen Kampfer ähnlich in beiden Experimenten ist
  - o Aktivkohle



- Poly-M
- Triethanolamin

Hier konnten sowohl die Rückgewinnungsfaktoren vom Spiken als auch vom gasförmigen Aussetzen für die Korrektur der Werte aus den CN ausgesetzten Untersuchungen (Hauptuntersuchung) benutzt werden. Dies gilt vor allem für Aktivkohle und Poly-M, welche einen Rückgewinnungsfaktor von > 75% aufweisen.

- **Gruppe B:** Sorbenzien, für die die Menge an zurückgewonnenen Kampfer beim gasförmigen Aussetzen kleiner ist als beim Spiken
  - NaHCO<sub>3</sub>
  - NaOH
  - Molekularsiebe 4 Å
  - Archival cardboard
- **Gruppe C:** Sorbenzien, für die die Menge an zurückgewonnenen Kampfer beim gasförmigen Aussetzen größer ist als beim Spiken
  - MOF

Für diesen Sorbenz soll der Spike-Korrekturfaktor nicht angewendet werden; hier scheint eine schnelle Reaktion zwischen gespikten Kampfer und MOF stattzufinden.

Die Ergebnisse der Gruppe B sind unerwartet. Hier sind vor allem die Ergebnisse für MS-4A, NaHCO<sub>3</sub> und NaOH von Bedeutung für diese Studie. Dabei wurde weniger Kampfer nach gasförmigem Aussetzen als nach dem Spiken nachgewiesen. Das könnte bedeuten, dass:

- a) NaHCO<sub>3</sub> und NaOH Kampfer irreversibel binden,
- b) Kampfer in der Gasphase bleibt und beim Öffnen des Vials entweicht,
- c) Beide Prozesse mit unterschiedlichem Ausmaß gleichzeitig stattfinden.

Der Fakt, dass nur 21% Kampfer zurückgewonnen werden konnte und dass am Ende der Untersuchungen Kampfer olfaktorisch nicht wahrgenommen werden konnte lassen vermuten, dass MS-4A in der Gruppe B am meisten Kampfer irreversibel aufgenommen hat. Nach dem Öffnen der Vials mit den Sorbenzien NaHCO<sub>3</sub>, NaOH und Archival Cardboard, war jedoch ein intensiver Geruch festzustellen. Aufgrund dieser Beobachtungen und der Tatsache, dass in der Hauptuntersuchung eine Größenordnung weniger DMP bei den Laugen als bei den anderen Sorbenzien festgestellt wurde, ist bei diesen drei Sorbenzien hauptsächlich die Situation b) anzunehmen.

Es gilt bei diesem Vergleich zusätzlich zu beachten, dass in den Spike-Untersuchungen die Extraktion direkt nach dem Spike-Vorgang durchgeführt wurde. Wohingegen beim gasförmigen Aussetzen, die Extraktion





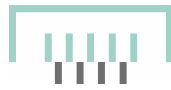
nach vier Wochen Exposition durchgeführt wurde. In der Hauptuntersuchung wurden die Sorbenzien mehrere Monate ausgesetzt [max. 6 (CA) bzw. 4 (CN) Monate].

### 3.2 ERGEBNISSE ZUR SPEZIFIZITÄT KOMMERZIELLER SORBENZMITTEL (CELLULOSEACETAT)

Die Spezifität der Sorbenzien für das Modell Celluloseacetat (DMP vs. Essigsäure) nach dem Aufbau 3 (Tabelle 3) kann anhand der Abbildung 15 (Rohwerte) und Abbildung 16 (korrigierte Werte unter Berücksichtigung des Rückgewinnungsfaktors aus den Spike-Untersuchungen) dargestellt werden. In diesen Grafiken werden die extrahierten Mengen an DMP und Gesamt-Essigsäure gegenübergestellt. Sorbenzien mit einer hohen Spezifität befinden sich in den Tälern der Darstellung. Obwohl sich die beiden Grafiken, insbesondere für bestimmte Sorbenzien, unterscheiden, bleiben die grundlegenden Aussagen, die daraus abgeleitet werden können, konsistent. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Darstellungen ableiten:

Unter Berücksichtigung des Projektziels, ein Sorptionsmittel zu finden, das in der Lage ist Essigsäure aufzunehmen, ohne DMP als typischen Weichmacher aus CA aufzunehmen, scheinen die beiden Ionenaustauscherharze Poly-M und Poly-A diese Anforderung am besten zu erfüllen. Denn die Menge des sorbierten DMP ist am geringsten, während die Menge der sorbierten Essigsäure die höchste unter allen untersuchten Sorptionsmitteln ist. Werden die Ergebnisse der Rückgewinnung der Analyten nach den Spike-Vorgängen mitberücksichtigt, so scheint Poly-A die beste Option zu sein. Nachweislich wurde für mit DMP gespicktes Poly-M eine Rückgewinnung von nur unter 40 % erzielt. Dies bedeutet, dass die Menge an DMP, die von Poly-M zurückgehalten wird, groß sein kann. Wie bereits erwähnt, ist das Spiken nicht die ideale Methode zur Bewertung der Rückgewinnung; demnach sollten Ergebnisse in diesem Kontext lediglich als Hinweis oder Warnung betrachtet werden. In Anbetracht der aktuellen Wissenslage und aus den Grenzen der Methode, welche keine quantitative Extraktion der Analyten zulässt, wird Poly-M als potenzielles spezifisches Sorptionsmittel für Museumsobjekte aus Celluloseacetat ausgeschlossen. In dieser Hinsicht ist Poly-A, mit Rückgewinnungen von DMP von über 70 %, die sicherere Option von beiden.

Rückgewinnungsquoten fielen für DMP nur noch für MOF unter 75% (14%). Hier ist die Diskrepanz zwischen den Spike- und Realergebnissen sehr hoch. Während nach dem Spiken nur 14% DMP zurückgewonnen wurde, konnte nach der Exposition mit natürlich gealtertem Material durchaus eine beträchtliche Menge an DMP bestimmt werden. Dieser Wert liegt in der Bandbreite der zurückgewonnenen DMP-Menge für die andere Sorbenzien, für die, laut der Spike-Untersuchungen, eine Rückgewinnung von über 75% zu erwarten ist. Die Ähnlichkeit der Werte deutet darauf hin, dass MOF gasförmiges DMP aufnehmen kann und dass dieser Analyt sich durchaus mit der angewendeten Methodik zurückgewonnen



werden lässt. Eine auf die Basis der Spike-Rückgewinnung kalkulierter Korrekturfaktor würde zu einer Überschätzung des aufgenommenen DMP führen, weshalb in Abbildung 20 auf die Anwendung der 14%igen-Korrektur verzichtet wurde.

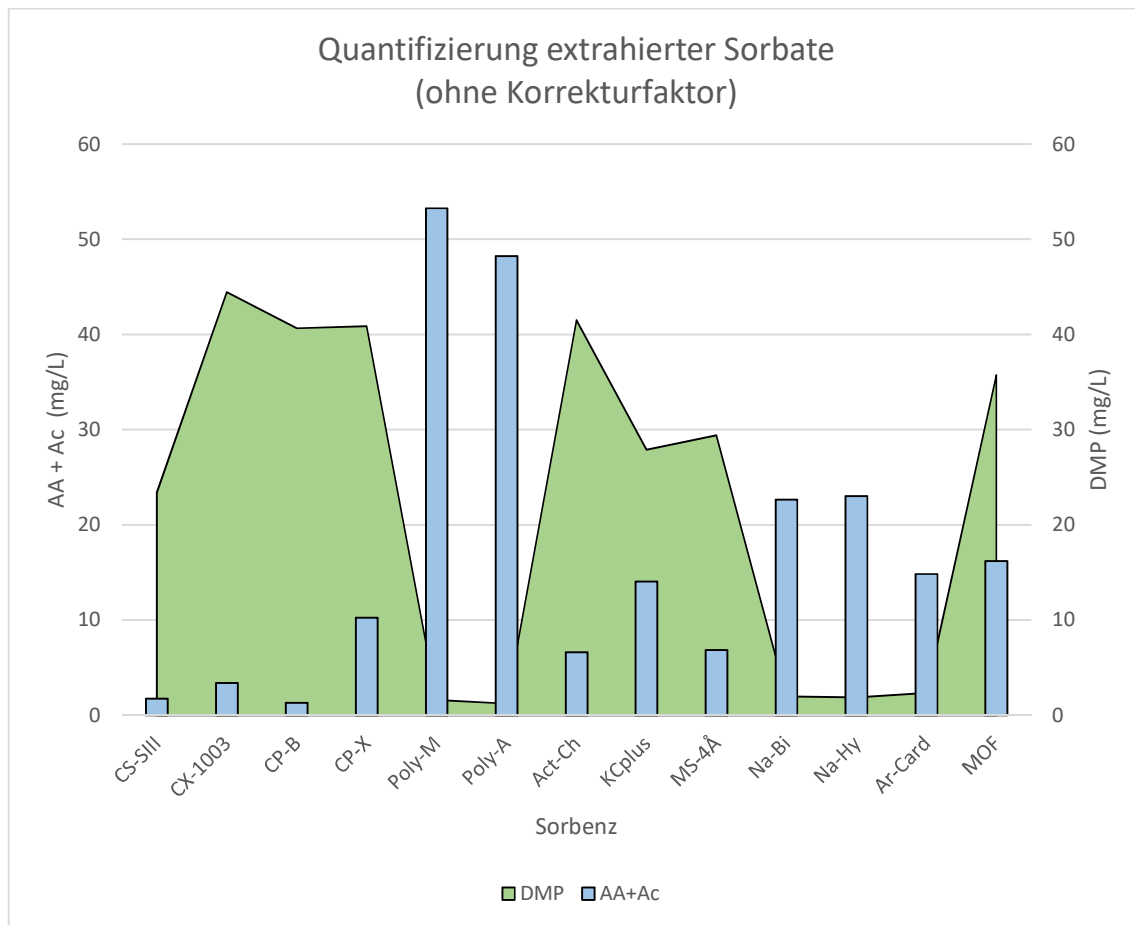
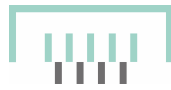


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Rohwerte der extrahierten Analyte (DEP und gesamt-Essigsäure) aus natürlich gealterten CA für jedes Sorptionsmittel. Spezifische Sorbenzien befinden sich in den „Tälern“.

Typische Sorbenzien, insbesondere Molekularsiebe (ob anorganisch oder kohlenstoffbasiert) und graphitisierte Carbon Blacks, nehmen deutlich mehr DMP auf als Poly-A und Poly-M. Die beiden graphitisierten Carbon Blacks (CP-X und CP-B) und die beiden Kohlenstoffmolekularsiebe (CS-SIII und CX-1003) zeigten eine hohe DMP- und eine geringe AA-Sorption. Vorab soll allerdings berücksichtigt werden, dass die AA-Rückgewinnungsquoten für CS-SIII, CX-1003, Act-Ch und KCPlus unter 70% fielen. Die genannten Materialien sind ohnehin in den Untersuchungsbedingungen und innerhalb des



Untersuchungszeitraums für unsere Zwecke nicht geeignet, gerade weil alle vier eine hohe DMP-Aufnahme aufweisen.

Die Laugen (Na-Bi und Na-Hy) sind insgesamt die nächstbesten Sorbenzienoption. Wie Poly-A und Poly-M, nehmen sie nicht nur Essigsäure (in deren Fall als Acetat) auf, sondern auch kaum Weichmacher, was mit ihrem Sorbenzmodus (Chemisorption) gut übereinstimmt. Sie stellen eine sehr kostengünstige, jedoch apparativ etwas aufwendigere Lösung dar. Sie müssen zunächst in Wasser gelöst und anschließend nach der Zugabe von Diethylenglykol auf ein inertes Trägermaterial, wie ein Stahlgitter, aufgetragen werden.

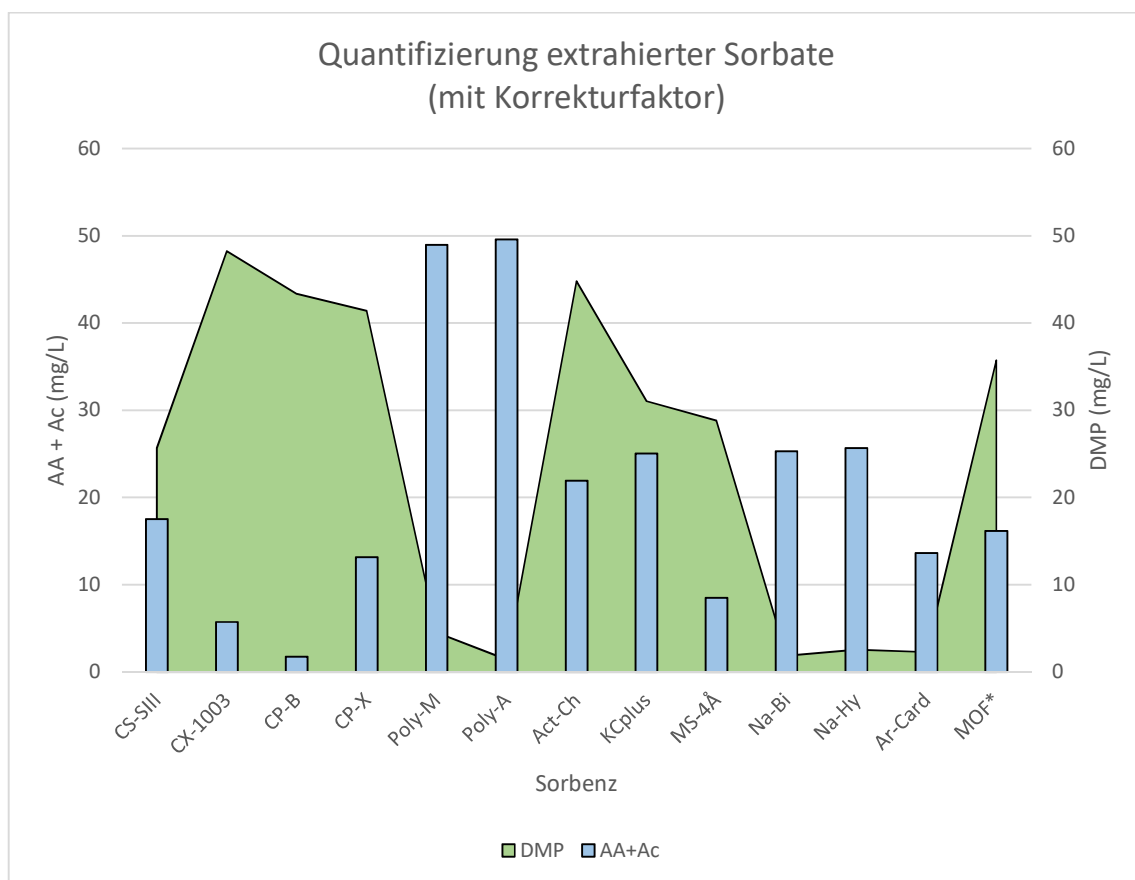
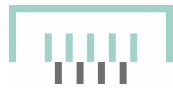


Abbildung 20: Gegenüberstellung der anhand der Rückgewinnungsfaktoren korrigierten Werten der extrahierten Analyte (DEP und Gesamt-Essigsäure) aus natürlich gealterten CA für jedes Sorptionsmittel. Spezifische Sorbenzien befinden sich in den „Tälern“. \*Der hier dargestellte DMP-Wert für MOF wurden aufgrund der Diskrepanz zwischen den Spike- und Realergbenisse nicht korrigiert (s. Text).

Es wurde im Laufe der Untersuchungen festgestellt, dass NaOH und NaHCO<sub>3</sub> allerdings im Stande sind kleine Mengen Phthalate in Phthalsäure umzuwandeln. In der GCMS-Analyse der CA-Hauptuntersuchung konnte, für NaHCO<sub>3</sub> und NaOH, neben kleiner Mengen an DMP, ebenfalls Phthalsäure nachgewiesen



werden. Phthalsäure entsteht aus der basisch katalysierte Hydrolysereaktion der Estergruppen. Für  $\text{NaHCO}_3$  zeigte der Phthalsäure-Peak geringere Intensitäten als der DMP-Peak. Im  $\text{NaOH}$ -Chromatogramm war er genauso hoch wie der DMP-Peak, was sich durch die höhere Basizität von  $\text{NaOH}$  erklären lassen könnte. Quantitativ waren die ermittelten DMP-Mengen für beide Laugen mit 1.9-2.5 ppm jedoch mindestens eine Größenordnung kleiner als für jede anderen Sorbenz. Ausgenommen sind Poly-A und Poly-M, welche ähnliche Werte wie die der beiden Laugen gezeigt haben. Somit bilden alle vier Sorbenzien eine bessere Alternative als die anderen untersuchten Sorbenzien. Phthalsäure könnte bei den Materialien Poly-A und Poly-M ebenfalls entstehen. Aufgrund der basischen Behandlung während der Extraktion der Sorbate konnte Phthalsäure nicht quantitativ analysiert werden, weshalb weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Obwohl der Vergleich zwischen dem Aussetzen des Analyten (Kampfer) in Gasform vs. Spike-Methode eine niedrige Rückgewinnung von Natriumhydrogencarbonat und Natriumhydroxid gezeigt hat, ist dies nicht unbedingt auf eine irreversible Interaktion zwischen Sorbat und Sorbenz zurückzuführen. Ein beträchtlicher Anteil an Kampfer bleibt möglicherweise in der Gasphase.

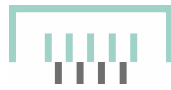
Die Rückgewinnung von Essigsäure (AA oder Ac) aus Sorbenzien, auf der Grundlage eines realitätsnahen Prozess nach 3.1.3.1 a), wird vorsorglich außerhalb des Projektzeitraums untersucht. Ziel der Untersuchungen ist es die Rohdaten, wie sie in Abbildung 19 dargestellt sind, zu korrigieren. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die vier potenziellen Sorbenzien gelegt. Diese Ergebnisse sollen, zusammen mit denen des Modells für Cellulosenitrat, in die geplante Publikation aufgenommen werden.

Der begrenzte Untersuchungszeitraum von sechs Monaten macht eine Langzeitstudie erforderlich, um belastbarere Aussage über einen längeren Zeitraum zu ermöglichen.

## 4 DISKUSSION

Die wichtigsten Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes sind, dass kommerzielle Sorbenzien unterschiedliche Spezifitäten hinsichtlich der Aufnahmefähigkeit von Weichmachern zeigen. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die meisten getesteten Sorbenzien – darunter sowohl gängige, in Sammlungen üblicherweise genutzte Sorbenzien als auch prospektive Materialien wie das hier untersuchte MOF-MILL-100 – Weichmacher aufnehmen. Im Rahmen des Projekts war es anhand der erstellten Methodik möglich, ein gewisses Spektrum an vorhandenen Sorbenzien hinsichtlich ihrer Spezifität zu untersuchen.

Beschränkungen der Methodik beziehen sich auf die Sorbenz-Analyt-Paare, bei denen die Rückgewinnung des Analyten aus dem Sorbenz niedrig ausgefallen ist. Hierbei konnte nicht die gesamte Menge Analyt aus dem Sorbenzien extrahiert werden, weshalb es nicht möglich war die Spezifität hinreichend bestimmen zu



können. Unter diesen Umständen wäre eine Datenkorrektur anhand von Rückgewinnungswerten nach dem gasförmigen Aussetzen des Analyten notwendig. Daher wurden Sorbenzien, bei denen eine solche Korrektur nötig ist, nicht abschließend bewertet.

Für CA konnte dies vor allem für den Sorbenzien Poly-M, nach Extraktion mit DMP, beobachtet werden. Bei Essigsäure/Acetat zeigten die meisten gängigen Sorbenzien eine Rückgewinnung von < 75%. Diese Rückgewinnungsrate erschwert eine belastbare Aussage; allerdings zeigten diese Sorbenzien aufgrund vergleichbarer höherer Anteile an sorbiertem DMP eine niedrige Eignung als spezifische Sorbenzien.

Anhand dieser Methodik ist es möglich spezifische Sorbenzien zu identifizieren, die Essigsäure aufnehmen können und vergleichsweise weniger DMP sorbieren als gängige Sorbenzien.

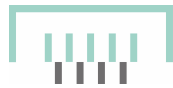
Unter diesen Umständen, erfüllen insbesondere der Ionenaustauscher Poly-A und die Lauge Natriumbicarbonat (auf Stahlgitter), die Anforderungen. In wie weit die Spezifität nach längeren Perioden erhalten bleibt, soll ebenfalls in Langzeitstudien untersucht werden. Ebenso muss das Entstehen von Phthalsäure in den Poly-A Proben unter Langzeitlagerung von natürlich gealterten Celluloseacetat quantifiziert werden.

Aufgrund des hohen methodischen Aufwands und den unterschiedlichen methodischen Anpassungen, die im Rahmen der Projektplanung aufgrund laufender Ergebnisse erforderlich wurden, mussten die untersuchten Modelle auf zwei beschränkt werden (CA und CN). Aus diesem Grund konnten die Arbeiten an den Prototypen nur teilweise innerhalb des zeitlichen Rahmens des Projekts durchgeführt werden; die Messungen zu diesen Versuchen sind noch im Gange.

Die Ergebnisse wurden im regelmäßigen Austausch mit unserem Partner (artemis control AG), welcher einen Teil der Sorbenzien für diese Studie zu Verfügung gestellt hat, im Detail diskutiert, insbesondere mit Jost Kames und Anne Lippert. Dadurch ließ sich die Methodik kontinuierlich verbessern. Die Diskussionen halfen ebenfalls, die Grenzen der Methoden zu identifizieren und fundierte Ansätze für eine Fortsetzung der Forschungsvorhaben sowie für die Bearbeitung noch offener Fragestellungen zu entwickeln. Der Methodenansatz wurde auch mit den Konservierungswissenschaftlern/innen Anna Laganà, Joy Mazurek und Michael Schilling, des Getty Conservation Institute (Los Angeles), diskutiert.

## 5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Neben den Publikationen in peer-reviewed Journalen zur entwickelten Methodik und zur Spezifität von Sorbenzien für die Lagerung von CA und CN, welche im Laufe 2025 erscheinen sollen, wurde bereits ein Ausstellungsbereich im Sinne dieses Projekts vorbereitet. Ziel ist es die Notwendigkeit von Projekten wie diesem, auch der nicht-Fachöffentlichkeit, zu vermitteln. Eine Ausstellungsvitrine, welche gleichzeitig als Versuchsaufbau für lange Testzeiträume dient, informiert Besuchende in der Dauerausstellung (siehe



Anhang). Die Vitrine ist bestückt mit Sorbenzien und Museumsobjekten aus CA. Ab 2025 sollen die Ergebnisse auf Tagungen mit der Zielgruppe KonservierungswissenschaftlerInnen / RestauratorInnen präsentiert werden.

## 6 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Projekt wurde die Spezifität kommerzieller Sorbenzien anhand von verschiedenen Modellen untersucht. Die Spezifität wurde als präferierte Aufnahmefähigkeit der Sorbenzien von Säure gegenüber Weichmacher definiert, welche aus sogenannten „heimtückischen Kunststoffen“ ausgasen. Untersucht wurden, stellvertretend für die „heimtückische Kunststoffe“, zwei Säure-Weichmacher-Paare.

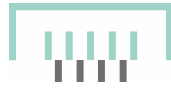
Anhand eines modellbasierten Versuchsaufbaus, wurden Essigsäure und DMP aus CA, sowie Salpetersäure und Kampfer aus CN untersucht.

Um die Leistung der Sorbenzien definieren zu können, war es notwendig die Menge des Sorbats quantitativ zu analysieren. Diese definiert sich in zwei Typen von Analyten (Degradationsprodukte bzw. Säure vs. Weichmacher). Die Arbeit und insbesondere die initiale Phase des Projekts, war geprägt durch intensive Methodenentwicklung. Diese Methoden ermöglichten neue Erkenntnisse hinsichtlich der Fragestellung und zeigten im Verlauf auch die Grenzen der Methode.

Durch Methodenoptimierung und dem Erarbeiten unterschiedlicher Techniken (siehe Zwischenberichte), wurde ein Workflow etabliert. Die in dem Schritt 1) den emittierenden CA ausgesetzten Sorbenzien, wurden nach Schritt 2) extrahiert. Die Extraktion dieser Sorbate wurde mittels Lösungsmittelbehandlung durchgeführt. Im Schritt 3) fand die GCMS- und IC-Analyse, für die quantitative Bestimmung von Weichmacher und Säure statt. Dies stellt die Grundlegende, im Projekt angewandte, Methodik dar (Abbildung 1).

Die Vorgehensweise ermöglichte, unter gewissen methodischen bedingten Einschränkungen, eine selektive Untersuchung unterschiedlicher kommerzieller Sorbenzien hinsichtlich der Aufnahmefähigkeit von Emissionen aus den sogenannten „heimtückischen Kunststoffen“. Vorsorglich wurde bei der Identifizierung von potenziellen spezifischen Sorbenzien nur solche in Betracht gezogen, die bei den Voruntersuchungen eine hohe Rückgewinnungsquote gezeigt haben.

Fragen zur Anwendbarkeit der identifizierten selektiven Sorbenzien (Erforderlichkeit der Erneuerung unter Museumsbedingungen bzw. Regenerierbarkeit) sollen Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Die Frage nach den quantitativen Auswirkungen von „nicht spezifischen“ Sorbenzien auf die physikalischen Eigenschaften der Objekte und deren Weichmacher-Bestandteile, war nicht Teil dieses Forschungsprojektes und soll ebenso in Langzeitstudien untersucht werden.



Die Projektergebnisse zeigen, dass Weichmacher aus den Objekten austreten können und von Sorbenzien aufgenommen werden können. Dies hat potentiell negative Auswirkungen auf die Langlebigkeit und Eigenschaften des Objekts. Durch Auswahl von alternativen spezifische Sorbenzien, kann hier ein präventiver und nachhaltiger Ansatz angeboten werden.



## 7 LITERATUR

- [1] T. Krieg, C. Mazzon, und E. Gómez-Sánchez, „Material Analysis and a Visual Guide of Degradation Phenomena in Historical Synthetic Polymers as Tools to Follow Ageing Processes in Industrial Heritage Collections“, *Polymers*, Bd. 14, Nr. 1, S. 121, Dez. 2021, doi: 10.3390/polym14010121.
- [2] E. Paolin und M. Strlič, „Volatile Organic Compounds (VOCs) in Heritage Environments and Their Analysis: A Review“, *Appl. Sci.*, Bd. 14, Nr. 11, Art. Nr. 11, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14114620.
- [3] B. Lavédrine, A. Fournier, G. Martin, und Collectif, *Preservation of Plastic Artefacts in Museum Collections*. Paris: Comité des travaux historiques et scientifiques - CTHS, 2012.
- [4] Y. Shashoua, M. Schilling, und J. Mazurek, „The effectiveness of conservation adsorbents at inhibiting degradation of cellulose acetate“, in *ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15–19 September 2014*, J. Bridgland, Hrsg., Paris: International Council of Museums, 2014, S. 9.
- [5] C. M. Grzywacz, *Monitoring for gaseous pollutants in museum environments*. in *Tools for conservation*. Los Angeles, Calif: Getty Conservation Institute, 2006.
- [6] K. Dedecker u. a., „Metal-Organic Frameworks for Cultural Heritage Preservation: The Case of Acetic Acid Removal“, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Bd. 10, Nr. 16, S. 13886–13894, Apr. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b02930.
- [7] N. S. Allen, M. Edge, J. H. Appleyard, T. S. Jewitt, C. V. Horie, und D. Francis, „Degradation of historic cellulose triacetate cinematographic film: the vinegar syndrome“, *Polym. Degrad. Stab.*, Bd. 19, Nr. 4, S. 379–387, 1987.





## ANHANG

## DIE GUTEN INS TÖPFCHEN, DIE SCHLECHTEN INS KRÖPFCHEN

### WAS HILFT GEGEN „HEIMTÜCKISCHE KUNSTSTOFFE“?

„Heimtückische Kunststoffe“ gefährden kulturell bedeutende Objekte und Menschen, die in Museen arbeiten. Helfen könnten Sorptionsmittel, also Mittel, die „schädlichen Ausgasungen“ anziehen. Forschende des Deutschen Bergbau-Museums Bochum versuchen, solche Mittel zu finden.

Aber warum eigentlich? Und was genau sind „heimtückische Kunststoffe“?



Objekte altern und zerfallen mit der Zeit. In Kunststoffen befinden sich beispielsweise Weichmacher, die früher oder später austreten. Ein neuer Material ist weich und elastisch, ein alter jedoch hart und spröde.



Manche Objekte aus Kunststoffen geben aber auch andere Stoffe ab wie Salz-, Essig-, Salpeter bzw. Schwefelsäure. Diese sind schädlich für das Objekt und für Menschen. Daher werden sie „heimtückische Kunststoffe“ genannt.



Womöglich gibt es jedoch Mittel, die nur diese schädlichen Dämpfe anziehen und binden. Forscher:innen des Deutschen Bergbau-Museums Bochum suchen daher nach spezifischen Sorptionsmitteln. Sie sollen nur die schlechten Dämpfe anziehen.



Museen wie das Deutsche Bergbau-Museum Bochum sammeln und bewahren kulturelle Objekte. Sie versuchen, den Zerfall von Objekten aufzuhalten oder zu verlangsamen. Auch in vielen Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten sollen Besuchende sich diesen Objekten ansehen können.



Es gibt jedoch Mittel, die diese schädlichen Dämpfe anziehen und binden. Diese Mittel werden Sorptionsmittel genannt. Sie ziehen aber auch die Weichmacher an, die eigentlich im Kunststoff bleiben sollen. Das Objekt zerfällt also noch schneller.



Auf jeder Ebene der Vitrine befindet sich ein Mittel zusammen mit einem Abschnitt aus dem Tonband. Das Tonband gast Essigsäure aus, es besteht also aus „heimtückischen Kunststoffen“. Der blaue Kontrollstreifen verfärbt sich in Kontakt mit Säure. Grün bedeutet, es ist etwas Säure in der Luft und das Objekt könnte Schaden nehmen. Ist der Streifen gelb, befindet sich sehr viel Säure in der Luft. Das Objekt könnte beginnen zu zerfallen und die Handhabung könnte gefährlich sein.

#### DAS PROJEKT

Das Deutsche Bergbau-Museum Bochum ist eines von acht Leibniz-Forschungsmuseen. Zu den Kernaufgaben eines Museums, Sammeln, Bewahren und Ausstellen, gehört auch das Forschen. Einer von den vielen Forschungsbereichen des Museums ist die Materialkunde und Konservierungsforschung, die sich mit dem Erhalt von Kulturgütern befasst.

Forschende des Bereichs versuchen in dem Projekt TESSA („Testen und Optimieren Spezifischer Adsorbentien für die Präventive Behandlung von Heimtückischen Kunststoffen“) Mittel gegen „heimtückische Kunststoffe“ zu finden. Diese Kunststoffe bilden Gase, die für die Objekte sowie für Menschen gefährlich sein können. Ziel ist es einen Stoff zu finden, der die Dämpfe anzieht und bindet.

Das Projekt wird gefördert von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und unterstützt von der artemis control AG.



Link zu YouTube:  
A-D-Strips im Gebrauch  
in einem Filmarchiven.



DEUTSCHES  
BERGBAU-MUSEUM  
BOCHUM



artemis control

KONTAKT  
Dr. Elena Gómez Sánchez, Elena.GomezSanchez@bergbaumuseum.de (Projektleitung)  
M. Sc. Cristian Mazzon, Cristian.Mazzon@bergbaumuseum.de

PROJEKTRÄGER  
Deutsches Bergbau-Museum Bochum Leibniz-Forschungsmuseum für Georessourcen  
bei der DMT-Gesellschaft für Lehre und Bildung mbH,  
Forschungsbereich Material- und Konservierungswissenschaften

LAUFZEIT  
01.05.2021 bis 01.09.2024

FÖRDERUNG  
DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, <https://www.dbu.de>

KOOPERATION  
artemis control AG, [www.artemis-control.com](http://www.artemis-control.com)