

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht UHS-011/2026

CycloPlasma

Nachhaltige Sanierung kontaminierter Holzoberflächen

Durchgeführt im Auftrag der:
Fraunhofer-Zukunftsstiftung
Programm Manager Andreas Dockhorn
Transfermanagerin Pia Schoester

Der Bericht umfasst:
14 Seiten Text,
2 Abbildungen,
7 Tabellen

Mitgewirkt haben:
Frau Andrea Burdack-Freitag
Herr Ralf Kilian
Herr Sebastian Krück
Herr Andreas Schmohl
Herr Christoph Schwitalla

Valley, 27. Mai 2026

Gruppenleiter Analytik und angewandte Sensorik
Dr. rer. nat. Florian Mayer

Dr. rer. nat. Andrea Burdack-Freitag

Zusammenfassung

Im CycloPlasma-Projekt wurde ein Verfahren entwickelt, das sich zur schonenden Sanierung historischer Holz- und Innenraumkonstruktionen eignet, die mit γ -Hexachlorcyclohexan (Lindan), Pentachlorphenol (PCP), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder ähnlichen organischen Schadstoffen belastet sind. Es ist besonders dort sinnvoll, wo die historische Substanz erhalten bleiben soll und gleichzeitig eine wirksame Reduktion der Raumluftbelastung erforderlich ist. Dabei eignet sich Plasma zur wirkungsvollen und schnellen Senkung der Raumluftbelastung, während mit Cyclodextrin (CD) eine quellennahe Bindung schwerflüchtiger Schadstoffe und Unterbindung der Freisetzung aus der Holzmatrix erreicht wird.

Im CycloPlasma Projekt wurde nicht-thermisches Plasma zur aktiven Reinigung der Raumluft mit einer CD-Lasur zur Immobilisierung von Schadstoffen im Holz kombiniert. Dadurch werden Innenraumluft und Schadstoffquelle behandelt, ohne die historische Substanz zu zerstören.

In Laboruntersuchungen zeigte die CD-Beschichtung von gezielt kontaminierten Testhölzern mit sehr hohe Reduktionsraten: Bei Lindan wurde keine Freisetzung mehr nachgewiesen ($< 99\%$), bei PCP wurde die Emission um 97% reduziert. Auch bei PAK und TVOC wurden je nach CD-Rezeptur deutliche Minderungen für 62 bis 85% TVOC-Reduktion und 34 bis 57% PAK-Reduktion erreicht. Insgesamt weist das Verfahren damit eine sehr hohe Wirksamkeit auf.

In Feldversuchen in historischen Objekten lagen die Lindanwerte je nach Verfahren und Zeitpunkt um 76% bis 97% unter dem Ausgangsniveau. Bei PCP wurden Reduktionen von 46% bis 68% erreicht. Für PAK betrug die Reduktion 78% , für TVOC 61% . Dabei wurden nur primär kontaminierte Hölzer behandelt, sekundärbelastete Baustoffe waren nicht Gegenstand der Untersuchung.

Modellrechnungen ergeben für die Wirksamkeit der CD-Beschichtung eine theoretische Langzeitwirkung von über 100 Jahren. Unter realen Nutzungsbedingungen (wie Abrieb, Reinigung, Feuchtwechsel, mechanische Beanspruchung) wird die Wirksamkeit konservativ auf etwa 10 bis 15 Jahre geschätzt. Damit verbindet das Verfahren hohe kurzfristige Reduktionseffekte mit einer sehr guten Langzeitstabilität.

1. Denkmalpflegerischer Hintergrund

Mit Holzschutzmitteln behandelte historische Holzkonstruktionen, Parkettböden und über Teeranstriehe belastete Baustoffe stellen in vielen Denkmalobjekten eine besondere Schadstoffproblematik dar, weil sie einerseits substanzprägend und erhaltenswert sind, andererseits aber über Jahrzehnte organische Kontaminanten in die Innenraumluft abgeben können. Besonders betroffen sind Bauteile aus den 1950er bis 1980er Jahren, in denen Holzschutzmittel mit Lindan (gamma-Hexachlorcyclohexan) und PCP (Pentachlorphenol) sowie bitumen- und teerhaltige Materialien mit PAK (Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) weit verbreitet eingesetzt wurden. Aus denkmalpflegerischer Sicht entsteht daraus ein Zielkonflikt: Der vollständige Ausbau wäre wirksam, würde aber die historische Substanz zerstören; eine reine Abschirmung oder Lüftungsmaßnahme ist oft nur begrenzt nachhaltig.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines Verfahrens, das die historische Bausubstanz erhält und zugleich die Innenraumluft dauerhaft verbessert. Genau an diesem Punkt setzt das CycloPlasma-Projekt an, indem es quellennahe Schadstoffbindung mit direkter Luftreinigung verbindet. Der denkmalpflegerische Mehrwert liegt dabei im weitgehenden Erhalt der Originaloptik und positiver bauphysikalischer Eigenschaften, der geringen Eingriffstiefe (fachgerecht ausgeführte Reversibilität ist möglich) und der Möglichkeit, belastete Objekte weiterhin zu nutzen.

2. Forschungsansatz

Der Forschungsansatz beruht auf der Kombination zweier Wirkprinzipien: Cyclodextrine (CDs) binden und immobilisieren hydrophobe Schadstoffe an oder nahe der Holzoberfläche in der Holzmatrix, während nicht-thermisches Plasma bereits freigesetzte Schadstoffe aktiv in der Raumluft abbaut. Plasma senkt damit aktiv die Raumluftbelastung und ist vor allem als schnell wirksame Maßnahme gegen VOC (flüchtige organische Verbindungen), PCP, Lindan und weitere organische Verbindungen relevant. CDs bilden mit den Schadstoffen Einschlusskomplexe, wodurch deren Mobilität und Emissionsfähigkeit sinken.

Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Methoden besteht darin, dass Schadstoffe in der Holzmatrix nicht nur abgeschottet oder verdünnt werden, sondern gezielt die Emission von der Holzoberfläche durch die CDs unterbunden oder die Raumluftbelastung durch Plasma aktiv behandelt wird. Zudem können je nach Schadstoffprofil beide Verfahren getrennt voneinander oder in Kombination eingesetzt werden. Klassische Verfahren wie Ausbau, Einhausung oder erhöhte Lüftung greifen jeweils nur in Teilaspekte ein und sind in denkmalgeschützten Beständen oft nur eingeschränkt anwendbar. Das CycloPlasma-Konzept ist dagegen als substanzschonende, kombinierte Sanierungsstrategie angelegt.

3. Laboruntersuchungen

Im Labor wurde die Wirkung der CDs zunächst an gezielt belasteten Testhölzern (Balsaholz) untersucht, die mit Lindan und PCP dotiert und anschließend thermoextrahiert wurden (siehe Bild 1). Nach dem Auftragen der CD-Schlemme sanken die Emissionen in die Raumluft drastisch: PCP wurde von $218 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um 97 % reduziert, Lindan von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf unterhalb der Nachweisgrenze von $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um mehr als 99 %. Diese Laborwerte zeigen, dass CDs die Diffusion aus der Holzmatrix wirksam bremsen und die Freisetzung in kurzer Zeit stark mindern.

Zusätzlich wurden in eine klimageregelte Emissionsprüfkammer real mit Lindan und PCP kontaminierte Holzbalken getestet, um die Stabilität der Wirkung unter kontrollierten Bedingungen zu prüfen (siehe Bild 2). Nach Erreichen des Emissionsgleichgewichts führte die Beschichtung bei Lindan zu einer sofortigen Absenkung der Luftkonzentration von $0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um etwa 95 % auf $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die sich über mehrere Wochen auf einem niedrigen Niveau stabilisierte. Die Laborergebnisse belegen damit nicht nur eine kurzfristige Wirkung, sondern zeigen eine anhaltende Diffusionshemmung.

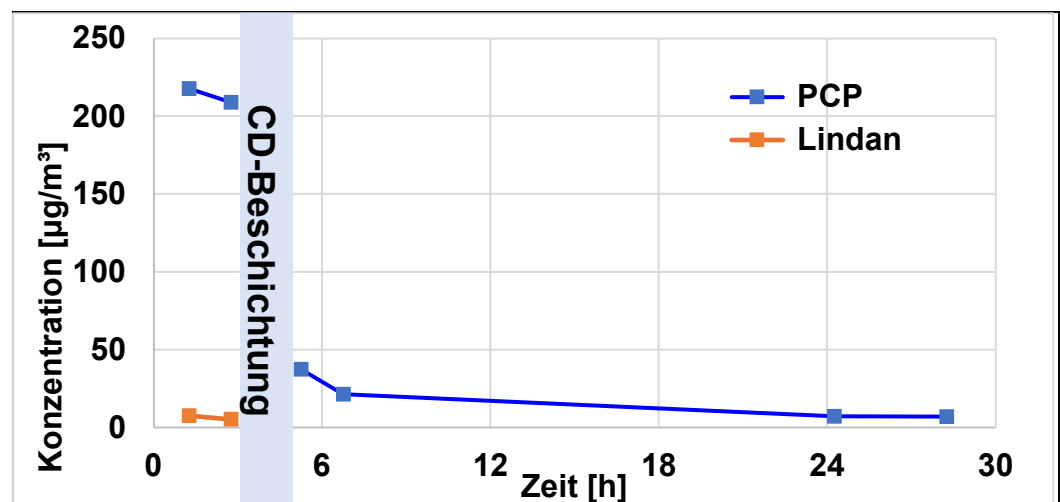


Bild 1: Lindan- und PCP-Reduktion durch Beschichtung mit CDs auf Testhölzern (Verfahren Thermoextraktion)

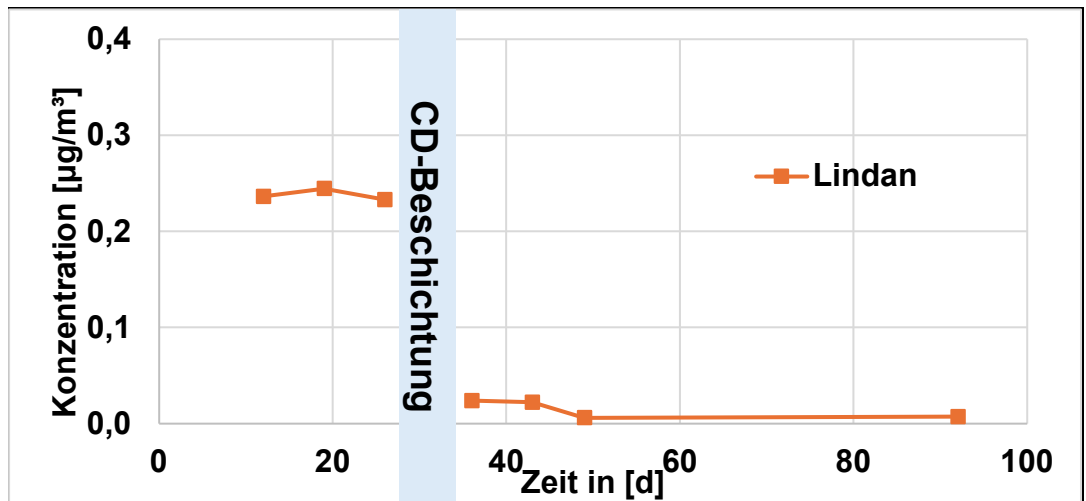


Bild 2: Lindan-Reduktion durch Beschichtung mit CDs auf real kontaminierten Holzbalken (Emissionsprüfkammerverfahren)

Zur Ergänzung der Laboruntersuchungen wurden über real mit PAK kontaminierte Testflächen 1 m³-Kuben gestülpt und mit drei CD-Rezepturen behandelt, um deren Wirksamkeit gegenüber flüchtigen und semivolatilen organischen Kontaminanten unter praxisnahen Bedingungen zu prüfen. Für die Beurteilung wurden TVOC sowie PAK als Naphthalin-Äquivalente vor der Applikation, eine Woche danach, nach ein bis zwei Monaten und nach drei Monaten erfasst (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Untersucht wurden eine 2%-ige CD-Lösung, eine CD-Lasur sowie eine feuchteregulierende CD-Aktivlasur.

Tabelle 1: TVOC-Reduktion in den Kuben (Testflächen, statische Messung)

TVOC [µg/m³]	2 %-ige CD-Lösung	CD-Lasur	Feuchte-regulierende CD-Aktivlasur
Vor Behandlung	759	332	368
1 Woche nach Behandlung	607	248	278
1 – 2 Monate nach Behandlung	658	892	595
3 Monate nach Behandlung	111	127	106
relative Abnahme vor und nach 3 Monaten	85 %	62 %	72 %

Tabelle 2: PAK-Reduktion in den Kuben (Testflächen, statische Messung)

PAK ¹⁾ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2 %-ige CD-Lösung	CD-Lasur	Feuchte-regulierende CD-Aktivlasur
Vor Behandlung	18	70	72
1 Woche nach Behandlung	111	54	44
1 – 2 Monate nach Behandlung	243	247	248
3 Monate nach Behandlung	29	46	31
relative Abnahme vor und nach 3 Monaten	Keine Abnahme	34 %	57 %

1) Als Naphthalin-Äquivalente bestimmt

Die Ausgangskonzentrationen der TVOC lagen bei $759 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Kubus für die 2%-ige CD-Lösung, bei $332 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die CD-Lasur und bei $368 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die feuchtereulierende Aktivlasur. Nach 3 Monaten betrugen die TVOC-Konzentrationen $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$; dies entspricht einer relativen Abnahme gegenüber dem Ausgangswert von 62 % bis 85%.

Bei den PAK lagen die Ausgangskonzentrationen bei $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Kubus für die 2%-ige CD-Lösung, bei $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die CD-Lasur und bei $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die feuchtereulierende Aktivmischung. Nach 3 Monaten wurden $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Daraus ergibt sich für die CD-Lasur eine Reduktion um 34% und für die feuchtereulierende Aktivlasur eine Reduktion um 57%, während für die 2%-ige CD-Lösung im Vergleich zum Ausgangswert keine Abnahme vorlag.

Insgesamt zeigen die Testflächen damit, dass insbesondere die reine CD-Lasur und die feuchtereulierende Aktivlasur eine Minderung der PAK-bezogenen Emissionen bewirken.

4. Feldstudien

Die Felduntersuchungen zu den Holzschutzmitteln Lindan und PCP erfolgten in einem realen, mit Holzschutzmittel kontaminierten Dachstuhl auf dem Gelände des Freilichtmuseums Glentleiten (Thürlmühle, Großweil) und im historischen Marstall des Schlosses Nymphenburg (München) mit einem PAK-belastetem Hirnholzparkett.

Im Marstall wurde die Innenraumluft des Gesamtraums zunächst mit Plasma und später mit der effektivsten CD-Mischung behandelt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Schadstoffreduktion im Marstall (Gesamtraum, dynamische Messung)

CD-Behandlung	TVOC [µg/m³]	% vom Ausgangswert	PAK [µg/m³]	% vom Ausgangswert
Ausgangswert vor Behandlung	41	100%	27	100%
1 Woche nach Behandlung	40	98%	26	96%
2 Monate nach Behandlung	58	141%	41	152%
3 Monate nach Behandlung	34	83%	14	52%
4 Monate nach Behandlung	16	39%	6	22%
Relative Abnahme vor und nach 4 Monaten	61 %		78 %	

Im Marstall stieg die Belastung zunächst vorübergehend an. Erst nach der CD-Anwendung sank die PAK-Belastung deutlich auf etwa 22% des Ausgangswerts, die TVOC-Werte auf etwa 39%. Diese Zwischenzunahme ist plausibel, weil anfangs noch aus belasteten Materialien und Staubfraktionen nachgeliefert wurde, bevor die kombinierte Behandlung die Emissionen nachhaltig senkte. Insgesamt entspricht dies einer PAK-Reduktion von rund 78% gegenüber dem Ausgangszustand. Die TVOC-Werte sanken dort zunächst durch Plasma auf etwa 83% und nach CD auf etwa 39% der Ausgangswerte, also insgesamt um rund 61%.

In der Holzschutzmittel-Studie wurden mehrere Räume unterschiedlich behandelt: nur CD, nur Plasma oder Kombination aus Plasma und CD (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5). In der Thürlmühle lagen die Ausgangskonzentrationen bei 3,7 µg/m³ für Lindan und 2,8 µg/m³ für PCP. Behandelt wurden jeweils alle freiliegenden und damit erreichbaren Teile der primär mit Holzschutzmittel kontaminierten Konstruktionshölzer.

Bei Lindan zeigte sich die stärkste Wirkung in der kombinierten Behandlung. Dort wurden nach sechs Monaten nur noch rund 3% des Ausgangswerts erreicht, und auch nach einem Jahr blieben alle Varianten trotz saisonaler Wiederanstiege deutlich unter dem Ausgangsniveau. Die zwischenzeitlich höheren Werte lassen sich vor allem durch temperaturabhängig steigenden Dampfdruck im Sommer und durch Sekundärkontaminationen aus unbehandelten Materialien erklären, die bei Erwärmung wieder stärker in die Raumluft abgegeben wurden. Insgesamt entspricht das je nach Raum und Zeitpunkt einer Reduktion von etwa 76% bis 85 % (bis 97 % im Winter).

Bei PCP verlief die Abnahme langsamer und wurde teilweise durch Aufwirbelung von belastetem und unbehandeltem Altstaub überlagert. Deshalb konnten die rein mit CD behandelten Räume zunächst sogar vorübergehend erhöhte Werte zeigen, während Plasma und vor allem die kombinierte Behandlung die Raumluft früher stabilisierten. Nach einem Jahr lagen die Konzentrationen je nach Verfahren noch bei etwa 32% bis 54% des Ausgangswerts, also insgesamt 46% bis 61% (bis 68 % im Winter) niedriger als zu Beginn. Da die Balken im Dachstuhl aufgrund der Zugänglichkeit nur zu ca. 2/3 der Fläche behandelt wurden, würde eine vollständige Behandlung der primär kontaminierten Fläche noch niedrigere Werte erwarten lassen.

Tabelle 4: Lindan in der Thürlmühle

Behandlung	Nur CD [µg/m³]	% vom Ausgangswert	Nur Plasma [µg/m³]	% vom Ausgangswert	CD/Plasma [µg/m³]	% vom Ausgangswert
Ausgangswert vor Behandlung (Sommer)	3,7	100%	3,7	100%	3,7	100%
1 Monat nach Behandlung	0,6	16%	1,9	51%	0,75	20%
3 Monate nach Behandlung	0,7	19%	0,5	14%	0,50	14%

6 Monate nach Behandlung (Winter)	0,3	8%	0,3	8%	0,10	3%
1 Jahr nach Behandlung (Sommer)	0,9	24%	0,6	16%	0,55	15%
Relative Abnahme vor und nach 1 Jahr	76 %		84 %		85 %	

Tabelle 5: PCP in der Thürlmühle

Behandlung	Nur CD [µg/m³]	% vom Ausgangswert	Nur Plasma [µg/m³]	% vom Ausgangswert	CD/Plasma [µg/m³]	% vom Ausgangswert
Ausgangswert vor Behandlung (Sommer)	2,8	100	2,8	100%	2,8	100%
1 Monat nach Behandlung	7,7	275%	2,8	100%	4,8	172%
3 Monate nach Behandlung	4,6	164%	1,0	36%	1,05	38%
6 Monate nach Behandlung (Winter)	2,5	89%	1,0	36%	0,95	34%
1 Jahr nach Behandlung (Sommer)	1,5	54 %	1,5	54 %	1,1	39 %
Relative Abnahme vor und nach 1 Jahr	46 %		46 %		61 %	

Der Befund zeigt damit, dass CD vor allem mittelfristig wirkt, während Plasma die anfänglichen Belastungsspitzen besser abfedert und die Kombination beider Verfahren die robusteste Gesamtwirkung erzielt.

5. Berechnungen der Durchbruchzeiten und Ableitung der Langzeitwirkung

Für die Langzeitbewertung wurde die temperaturabhängige Dampfdruckentwicklung mit der Clausius-Clapeyron-Gleichung berechnet. Die Gleichung beschreibt die Temperaturabhängigkeit eines Gleichgewichtsdrucks bei Phasenübergängen und ermöglicht die Berechnung von Dampfdruckkurven. Ausgangspunkt waren Literaturdampfdrucke bei 20 °C von 0,0050 Pa für Lindan und 0,0088 Pa für PCP. Daraus wurden die Werte für 15, 25, 30 und 40 °C extrapoliert. Die berechneten Raumluftkonzentrationen steigen dabei mit der Temperatur deutlich an, was die sommerlichen Wiederanstiege in den Feldmessungen plausibel macht.

Tabelle 6: kalkulierte Durchbruchzeiten von Lindan unter idealisierten Bedingungen

Temperatur [°C]	Ermittelte Konzentrationen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	flächenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ h})$]	Durchbruchzeit [Jahre]
15	3,7	2,2	262
20	(6,8) ¹⁾	4,1	144
25	(12,4) ¹⁾	7,4	79
30	(23,1) ¹⁾	13,9	42
40	(71,1) ¹⁾	42,7	14

1) Die Konzentrationen bei höheren Temperaturen wurden mittels der Clausius-Clapeyron-Gleichung berechnet. Annahme: Dampfdruck bestimmt Erhöhung der Emissionsrate.

Tabelle 7: kalkulierte Durchbruchzeiten von PCP unter idealisierten Bedingungen

Temperatur [°C]	Konzentration in Raumluft [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	flächenspezifische Emissionsrate [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \text{ h})$]	Durchbruchzeit [Jahre]
15	2,8	1,7	318
20	(5,1) ¹⁾	3,0	176
25	(8,9) ¹⁾	5,4	100
30	(15,7) ¹⁾	9,4	57
40	(46,0) ¹⁾	27,6	19

1) Die Konzentrationen bei höheren Temperaturen wurden mittels der Clausius-Clapeyron-Gleichung berechnet. Annahme: Dampfdruck bestimmt Erhöhung der Emissionsrate.

Aus den Modellrechnungen ergeben sich für die reine CD-Beschichtung theoretische Durchbruchzeiten von rund 262 Jahren bei 15 °C, 144 Jahren bei 20 °C, 79 Jahren bei 25 °C, 42 Jahren bei 30 °C und 14 Jahren bei 40 °C für Lindan. Für PCP liegen die entsprechenden Werte bei etwa 318, 176, 100, 57 und 19 Jahren. Diese Werte beschreiben ein idealisiertes Szenario ohne Abrieb, Reinigung, mechanische Beanspruchung oder Feuchtwechsel.

Für den Realfall wird die Wirksamkeit deshalb konservativ auf etwa 10 bis 15 Jahre geschätzt. Diese Begrenzung ist fachlich begründet, weil die Beschichtung im Alltag durch Begehen, Reinigung, mikroskopischen Abrieb und wechselnde Holzfeuchten mechanisch und physikalisch beansprucht wird. Hinzu kommt, dass Sekundärquellen im Raum, etwa belastete nicht behandelte Materialien oder Altstaub, die Gesamtbelastung weiter beeinflussen können. Die realistische Standzeit liegt daher deutlich unter der theoretischen Durchbruchsdauer, aber immer noch in einem für denkmalpflegerische Sanierungen sehr guten Bereich.

6. Diskussion der Wirksamkeit der CD-Beschichtung und der Plasmaanwendung

Die Ergebnisse zeigen, dass CDs allein bereits eine sehr hohe Wirksamkeit entfalten können, wenn die Belastung an der Oberfläche sitzt und die Beschichtung kontinuierlich erhalten bleibt. Besonders im Labor und in den Emissionsprüfkammern wurden Reduktionen im Bereich von etwa 95 % bis nahe 100 % erreicht, vor allem bei Lindan. Im Feld ist die Wirkung naturgemäß schwächer und stärker von Temperatur, Feuchte und Sekundärkontaminationen abhängig, bleibt aber dennoch deutlich und über längere Zeit stabil.

Die Plasmatechnologie hat ihre Stärke vor allem in der schnellen Senkung der Raumluftbelastung. Im Marstall ließ sich mit Plasma bereits eine wesentliche Absenkung der PAK- und VOC-Belastung erzielen, bevor die CD-Mischung die Restemissionen weiter senkte. Im Holzschutzmittelfall stabilisierte Plasma die Luft auch dort, wo CD noch nicht oder nur begrenzt greifen konnte.

Der Unterschied beider Verfahren lässt sich in der Wirkung von raumluftbezogener Dekontamination einerseits und nachhaltiger und quellnaher Emissionskontrolle andererseits beschreiben. Das Plasma reduziert bereits freigesetzte Schadstoffe in der Innenraumluft und wirkt damit ausschließlich auf die aktuelle Exposition und die akute Belastungssituation. CD bindet dagegen Schadstoffe an oder nahe der Holzoberfläche und verringert dadurch die weitere Freisetzung aus der Quelle. Gerade in historischen Objekten mit Primär- und Sekundärkontaminationen ergeben sich daraus besonders wirksame Sanierungsstrategien. Dabei können Plasma und CD einzeln oder in Kombination eingesetzt werden.

Plausibilisiert wurden die Untersuchungen im Marstall durch eine Bewertung der Geruchseindrücke mittels eines naiven Geruchspanels von ca. 30 Personen. Die wahrgenommene Geruchsintensität sank von deutlich störend auf schwach wahrnehmbar, und die Geruchsqualität verschob sich von teerartig, modrig und chemisch, welche geruchlich mit den PAK korrelieren, hin zu weniger aufdringlichen, eher holz- oder textilassozierten Eindrücken, die typisch für den Hirnholzparkett und die darin gelagerten historischen Exponate sind. In denkmalgeschützten Gebäuden ist das nicht nur ein Komfortgewinn, sondern auch ein Hinweis auf die hygienische und funktionale Sanierung des Raums.

7. Fazit

Die Untersuchungen zeigen im Labor sehr hohe Wirksamkeiten: Bei der Thermoextraktion sank die PCP-Emission um etwa 97 %. Lindan wurde nicht mehr nachgewiesen (< 99 % Reduktion). In der Emissionsprüfkammer reduzierte sich Lindan nach der CD-Beschichtung sofort um 95 % und blieb anschließend niedrig.

Ergänzend zeigen die Testflächen auch bei TVOC und PAK deutliche Effekte. Bei der 2%-igen CD-Lösung, der CD-Lasur und der feuchteregulierenden CD-Aktivlasur wurden TVOC-Reduktionen von 85 %, 62 % und 72 % erreicht. Bei den PAK ergaben sich für die CD-Lasur und die feuchteregulierende CD-Aktivlasur Reduktionen von 34 % und 57 %, während die 2%-ige CD-Lösung bei PAK keine Abnahme zeigte.

Für die Feldversuche in der Thürlmühle ergaben sich über das Jahr deutliche Reduktionen der Raumluftkonzentrationen. Bei Lindan lagen die Werte je nach Verfahren und Zeitpunkt um etwa 76% bis 97% unter dem Ausgangsniveau, bei PCP um etwa 46% bis 68%. Die Kombination aus Plasma und CD zeigte dabei die beste und stabilste Gesamtwirkung, während bei PCP einzelne Zwischenanstiege durch Altstaubaufwirbelung auftraten.

Im Gesamtraum des Marstalls zeigte sich über den gesamten Betrachtungszeitraum eine deutliche Abnahme der Schadstoffbelastung, wobei sowohl Plasma als auch CD zur Wirkung beitrugen. Über den Beobachtungszeitraum sank die TVOC-Belastung um 61 % und die PAK-Belastung um 78 %, was die kombinierte Wirksamkeit beider Verfahren im Langzeitverlauf belegt.

Im Feld zeigt sich somit ein konsistentes Muster: Plasma reduziert rasch die Raumluftbelastung und eignet sich als Sofortmaßnahme. CD wirkt eher mittelfristig auf die Quellenfreisetzung und eignet sich als langfristige Maßnahme zur Ursachenbehebung.

Zur Langzeitwirkung ergibt sich im Labor für die CD-Beschichtung eine theoretische Wirksamkeit von über 100 Jahren, weil unter idealisierten Bedingungen nur der stoffliche Durchbruch betrachtet wird. Für den Realfall ist eine deutlich kürzere Standzeit von etwa 10 bis 15 Jahren anzusetzen, da dort zusätzliche Belastungen wie Abrasion, Reinigung, Feuchtwechsel und temperaturbedingte Nachemissionen aus der Holzmatrix wirksam werden. Entsprechend ist im Feld früher mit einem Durchbruch zu rechnen als im Labor, da die Beschichtung dort nicht unter konstanten Idealbedingungen geschützt bleibt und Schadstoffe aus Sekundärquellen zusätzlich nachgeliefert werden können.

8. Literatur

Dekontamination von PCP- und Lindan-belasteten Holzbauteilen durch cyclodextrinbasierte Beschichtungen – Wirkung in Labor-, Feldstudien und Langzeitbewertung der Emissionsreduktion; Andrea Burdack-Freitag, Andreas Schmohl, Christoph Schwitalla; VDI-Fachmedien: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft; 86 (2026), 03 -04; 57 – 63.

Erhöhung des Wasserhaltevermögens und der Löslichkeit von Cyclodextrinen mittels polyvalenter Metallsalze; Andrea Burdack-Freitag, Andreas Schmohl, Christoph Schwitalla, Maximilian Taubenberger, Markus Sailer; Internationales Patent WO2025181356A1. 04.09.2025.

Sanierung des Marstall-Museums im Schloss Nymphenburg: Erfolgreiche Strategien zur Verbesserung der Innenraumluftqualität und Reduktion von Schadstoffen mittels des CycloPlasma-Verfahrens; Andrea Burdack-Freitag, Heinrich Piening, Christoph Schwitalla, Markus Sailer; In: EIPOS-Tagungsband Sachverstand am Bau – Holzschutz; Dresden 19. – 20.06.2025; 130 – 152.

Das CycloPlasma-Verfahren: Dekontamination von Lindan- und PCP-belasteten Holzkonstruktionen mittels Cyclodextrinen und der Plasmatechnologie; Andrea Burdack-Freitag, Ralf Kilian, Markus Sailer, Andreas Schmohl, Christoph Schwitalla, Maria Wimmer; FSU Fachverband Sanierung und Umwelt; Sonderheft Q1/2025; 8 – 12.

Dekontamination zur Erhaltung schadstoffbelasteter Holzbauteile in historischen Gebäuden mittels Cyclodextrine und Plasmatechnologie CycloPlasma; Andrea Burdack-Freitag, Ralf Kilian, Andreas Schmohl, Christoph Schwitalla; IBP-Forschungsbericht UHS-056/2024 im Auftrag der Fraunhofer Zukunftsstiftung, Valley 25.07.2024.