



Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Stöstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)

Development of an innovative, semi-automated demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners, edges and impurities for nuclear facilities

E. Rentschler¹, S. Gentes¹, M. Villinger², K. Heppler², J. Greb³, S. Stemmler⁴

¹ KIT, Institut für Technologie und Management im Baubetrieb RKKB, Karlsruhe, Baden-Württemberg, Deutschland

² Hochschule Konstanz, Labor für Maschinenkonstruktion und Produktentwicklung, Konstanz, Baden-Württemberg, Deutschland

³ Contec Maschinenbau & Entwicklungstechnik GmbH, Alsdorf/Sieg, Rheinland-Pfalz, Deutschland

⁴ SAT Kerntechnik GmbH, Worms, Rheinland-Pfalz, Deutschland



Dekontaminationsarbeiten werden beim Rückbau im kerntechnischen Bereich durchgeführt, um eine Kontaminationsfreiheit der zu bearbeitenden Bauwerksbereiche zu erreichen. Hierbei liegt die Schwierigkeit nicht in den leicht zugänglichen Großflächen, sondern in der Dekontamination komplexer Formen, wie z.B. den Ecken- und Kantenbereichen. Je nach Reaktortyp müssen neben dem Reaktorgebäude auch das Maschinenhaus sowie andere Gebäudestrukturen dekontaminiert werden, bevor diese konventionell zurückgebaut werden dürfen. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da eine Vielzahl komplexer Wandstrukturen vorliegt. Beispiele hierfür sind Wandvorsprünge und Rücksprünge, Kragplatten und Konsolen, Unterzüge, Vertiefungen, Durchführungen, versetzte Wände, Trennfugen und Aussparungen, welche zahlreiche Ecken und Innenkanten mit sich bringen.

Zwar gibt es für die Dekontamination ebener Betonoberflächen einige Werkzeuge und Verfahren die anwendbar sind, diese sind jedoch nur sehr bedingt für die Ecken- und Innenkantendekontamination geeignet. Daher werden diese Bereiche derzeit mit handgeführten Werkzeugen aus dem Bereich des konventionellen Rückbaus bearbeitet und dekontaminiert. Um die Staubemissionen zu reduzieren, den Arbeitsschutz sicherzustellen und eine Kontaminationsverschleppung zu verhindern, müssen diese Geräte mit einem zusätzlichen Absaugsystem verwendet werden. Diese Kombination aus der Verwendung schwerer handgeführter Werkzeuge und externen Absaugsystemen in schwer zugänglichen Bereichen macht die Dekontamination zu einer herausfordernden und anstrengenden Aufgabe.

Das Ziel des Forschungsprojekts EKONT, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, ist es, einen innovativen, teilautomatisierten Demonstrator für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Die Leistungsparameter der realisierten Demonstratoren wie z.B. Vorschubgeschwindigkeit, Abtragtiefe pro Arbeitsgang, Oberflächenrauigkeit, Schwingungsgesamtwerte sowie Reaktionskräfte und -momente, wurden dann wissenschaftlich untersucht, um die relevanten Leistungsparameter der entwickelten Demonstratoren zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand zur Untersuchung und Auswertung verschiedener Dekontaminationsmethoden/-werkzeuge geplant und aufgebaut. Im Anschluss an die Tests unter Laborbedingungen konnten außerdem praktische Versuche vor Ort im Kernkraftwerk durchgeführt werden, wodurch ein erstes Meinungsbild der Anwender eingeholt werden konnte.

Versuchsaufbau

Ziel des Versuchsaufbaus ist eine realitätsnahe Abbildung des Werkzeugeingriffs in die Störstelle zu schaffen. Dafür werden Prototypen an einer Werkzeughalterung befestigt, welche über eine Kraft- und Moment-Messdose an einer Lineareinheit befestigt ist. Die Werkzeugführung wird über zwei baugleiche, seitliche Schlittenkonstruktionen in den Rahmenteilen und eine dazwischen aufgehängte Lineareinheit realisiert. Die gesamten Schlitten können in der Z-Achse verschoben und über Schraubverbindungen in der gewünschten Position kraftschlüssig mit dem Rahmen verbunden werden. Innerhalb der Schlitten sind Kardangelenke über Kettenzüge in der Y-Achse frei positionierbar. Auch diese Höhenverstellung ist über Schrauben kraftschlüssig mit dem Schlitten verbunden. Die Kardangelenke ermöglichen eine Y- und Z-Rotation der Lineareinheit auf beiden Seiten des Rahmens. Die X-Rotation wird über eine halbkreisförmige Aufhängung der Kardangelenke erreicht. Diese Aufhängung kann von null bis über 90° in jeder Position über eine Schwalbenschwanznut verdreht und mit Flügelschrauben befestigt werden. Fig. 1 zeigt die entsprechenden Achsen der Werkzeugführung. Kardangelenke beziehungsweise Gelenke und Gelenkwellen allgemein „können Drehmomente auch zwischen winklig zueinander stehenden Wellen übertragen“. Somit besteht eine fester Kraft- und Momentfluss von der Wirkstelle (Werkzeugaufnahme) über die Lineareinheit, die Kardangelenke und Schlitten bis hin zum Rahmen.

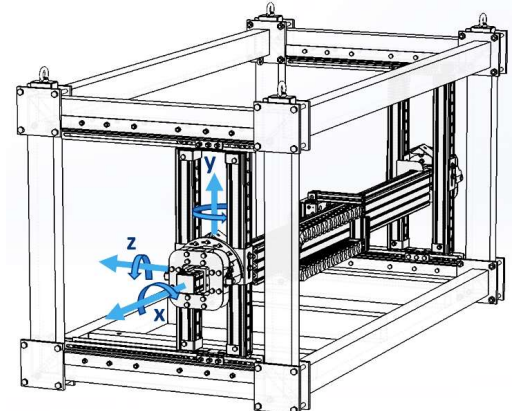


Fig. 1: Versuchsaufbau

Durch die unabhängige Verstellung der Schlitten links und rechts im Rahmen kann die Lineareinheit sowohl rotatorisch als auch translatorisch frei im Rahmen des Prüfstands positioniert werden. Zusammengefasst kann man sagen, dass durch die Werkzeugführung jegliche, relevante axiale Kontur im Prüfstand abgefahren werden kann.

Um die Abtragqualität und das abgetragene Volumen zu bestimmen, erfasst ein Laserscanner die Innenkanten-Kontur vor und nach der Bearbeitung. Zeitgleich werden Vibrations- und Schallpegelmessungen vorgenommen. Außerdem wird die Staubpartikelkonzentration während der Versuchsdurchführung gemessen. Im Anschluss an den jeweiligen Versuch werden Staubproben auf ihre Partikelgröße und Zusammensetzung untersucht.

Somit können die verschiedenen Geräte, Prozesse und Prototypen unter identischen Bedingungen und nur geringen Störeinflüssen vergleichbar betrachtet werden.

Schneidprozesse und Abtragprinzipien

Neben den gängigen Verfahren werden neue Schneidprozesse eingeführt und untersucht. Diese basieren zum Großteil auf Frässscheiben, die nebeneinander angeordnet einen sog. Stufenfräser bilden. Durch diesen Aufbau kann effektiv in die Kanten eingedrungen und kontaminiertes Material abgetragen werden. Außerdem können neben den Kanten auch Risse bearbeitet werden, in die die Kontamination tiefer eingedrungen ist, als an den übrigen Stellen der Wand.

Von verschiedenen Drehrichtungen der einzelnen Frässscheiben wurde sich eine Reaktionskraft-Reduktionen an der Wirkstelle und somit Reaktionsmoment-Reduktionen für den Anwender oder die fernmanipulierende Trägermaschine erhofft. Außerdem entstehen, insbesondere beim mittig gegenläufigen Stufenfräser, hohe Relativgeschwindigkeiten an der Wirkstelle, wodurch gute Bearbeitungsergebnisse erzielt werden. Zudem sollte dadurch das abgetragene Material feiner zerkleinert werden, damit es besser absaugbar und förderfähig ist.

Ein weiteres Abtragprinzip ist der oszillierende Abtrag mittels undefinierter Schneiden. Auf ein Werkzeug werden hierzu Industriediamanten oder Hartmetallplättchen aufgelötet. Dieses wird anschließend an einem Multitool befestigt und in Schwingung versetzt. Dieses Verfahren war besonders für die lokale Dekontamination von Hot-Spots angedacht und kann auch für feinere Nacharbeiten und die Eckendekontamination verwendet werden. Fig. 2 zeigt die verschiedenen Prozesse und Prinzipien schematisch auf.

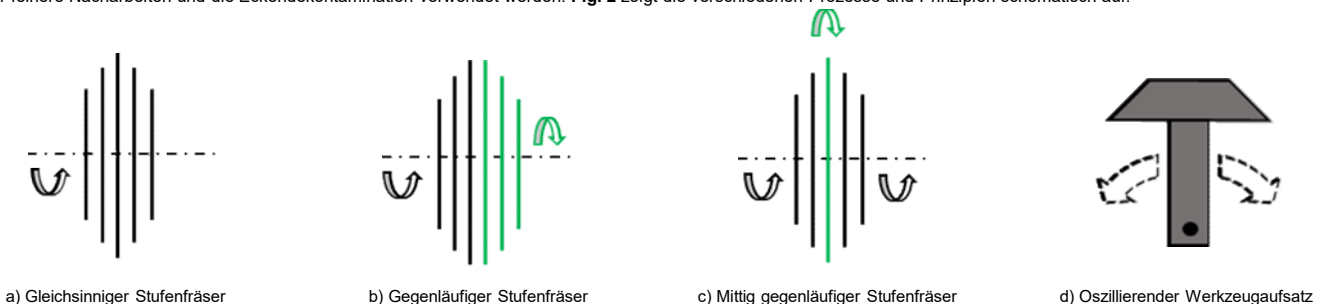


Fig. 2: Schneidprozesse

Prototypen

Für jeden Schnittprozess wurden Prototypen entwickelt und gebaut. In anschließenden Testreihen konnten sowohl die Ergonomie als auch verschiedene Parameter für ferromanipulierte Anwendungen und die Abtrags-Qualität und -Effektivität untersucht werden. Die folgende Grafik zeigt die ersten Prototypen, die im Rahmen des Projektes gebaut wurden. Auf Grundlage der Daten und Messergebnisse sollen diese Prototypen im bereits laufenden EKONT-2 Projekt weiterentwickelt und verbessert werden.



Gleichsinniger Stufenfräser (VM1)

Der gleichsinnige Stufenfräser ähnelt dem klassischen Aufbau eines Winkelschleifers am meisten. Fünf Frässhelmen werden aufgereiht und deren Durchmesser so gewählt, dass sich ein 90° Schneidwinkel ergibt. Durch einen geringen Scheibenabstand brechen die Betonstege in den Zwischenräumen automatisch ab und werden abgetragen. Durch ein Metallgehäuse mit integriertem Griff ist der Prototyp sicher in der Handhabung und leicht zu verwenden.

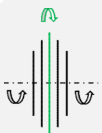
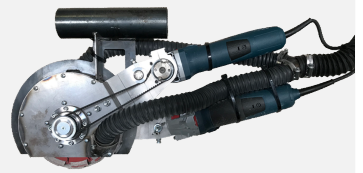
Aufgrund des hohen Drehimpulses durch die hohen, sich in Rotation befindlichen Massen ist bei der Bedienung ein deutlicher gyroskopischer Effekt zu spüren. Dies hat sowohl positive als auch negative Folgen. Wie bei einem normalen Gyroskop auch, können die rotierenden Massen den Materialeingriff stabilisieren und somit die Führung des Stufenfräses für den Bediener erleichtern. Allerdings sorgt der Start des Prototyps für ein gewisses Eigenleben, da bei der Beschleunigung der Massen sich die Drehachse erst ausrichtet. Diese Drehachse passend an die Innenkante auszurichten, bedarf einer gewissen Handkraft.



Gegenläufiger Stufenfräser (VM2)

Um die Reaktionskräfte und Reaktionsmomente zu senken und dem hohen Drehimpuls des ersten Prototyps entgegenzuwirken wurden beim zweiten Prototyp gegenläufige Frässhelmen realisiert. Durch zwei Antriebe und entsprechende Riementriebe werden die linken drei Frässhelmen im Vergleich zu den rechten drei in der entgegengesetzten Drehrichtung angetrieben.

Konstruktionsbedingt werden hier sechs anstelle von fünf Frässhelmen verwendet. Dies sorgt für einen breiteren Abtrag. Allerdings fehlt dem zweiten Prototyp dadurch seine Führungsscheibe, die den Schnitt zentriert. Durch die Drehrichtungsumkehr (links-rechts) und dem Hebelarm zwischen den Kraftangriffspunkten der Frässhelmen entsteht ein leicht höheres Drehmoment um die Y-Achse als bei Prototyp eins. Bei der Messung des Vorversuchs wurde mit einem Vorschub von 10 mm/s und einer Eindringtiefe von ca. 10 mm verfahren. Auffällig ist, dass die Kräfte und Momente ebenfalls im Rahmen sind und betragsmäßig ähnlich hoch ausfallen wie bei Prototyp eins. Die Reaktionskraft in Vorschubrichtung erfährt bei Prototyp zwei einen Vorzeichenwechsel und wirkt nun entgegen der Vorschubrichtung, was durch die gegenläufige Drehrichtung zu begründen ist.



Mittig gegenläufiger Stufenfräser (VM3)

Prototyp drei, der mittig gegenläufige Stufenfräser, vereint die Erfahrungen aus Prototyp eins und zwei. Durch eine Getriebebelösung kann die mittlere Frässhelme im Vergleich zu den äußeren Frässhelmen in die entgegengesetzte Drehrichtung angetrieben werden. Dabei wird nur ein Antrieb verwendet. Die mittlere Scheibe dient zusätzlich der Zentrierung des Schnitts.

Um die Drehrichtungsänderung der mittleren Frässhelme bei geringem Bauraum mit einem Antrieb realisieren zu können, wurde eine kompakte Getriebebelösung entwickelt. Dieses neuartige Getriebe besteht aus drei Planetensätzen mit festen Planetenradträgern, die gleichzeitig als Gehäuse fungieren. Die Drehrichtungsumkehr wird erreicht indem beim mittleren Planetensatz statt drei einzelnen Planetenrädern drei Planetenradpaare eingesetzt werden. Der Leistungsfluss verläuft vom Antrieb (Sonnenrad) über die Planetenräder und die Hohlräder auf die entsprechend radial montierten Frässhelmen. Die eigentliche Leistungsverzweigung erfolgt vom Sonnenrad auf die verschiedenen Planetenräder.

Aufgrund des modularen Gehäuseaufbaus kann das Grundprinzip des Antriebs und der Drehrichtungsänderung axial und radial skaliert werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für Schneidprozesse sowohl im kerntechnischen als auch im konventionellen Anwendungsbereich. Denkbar sind beispielsweise neuartige Fräswalzen in Asphaltfräsen, die die Abtragleistung erhöhen und den Verschleiß verringern könnten. Das Getriebe wurde beim DPMA zum Patent angemeldet.



Oszillierender Werkzeugaufsatz (VM4)

Als weiteres Abtragprinzip wurden mit der Unterstützung von Bosch Power Tools oszillierende Werkzeugaufsätze für ein Multifunktionsstool entwickelt. Diese werden mit einer speziellen Starlock-max-Schnittstelle (Bosch) am Multi-Tool befestigt.

Die Werkzeugaufsätze sind für Innenkanten und für aufeinander laufende Innenkanten (Ecken) konzipiert. Um den oszillierenden Antrieb des Multi-Tools nicht zu überlasten, dürfen die Aufsätze ein gewisses Massenträgheitsmoment nicht überschreiten. Dies schränkt die Konstruktionsmöglichkeiten ein. Mit Hilfe von dünnem Federstahl und einer etwas stärkeren Werkzeugschneidspitze, die mit Industriediamanten beschichtet werden, konnten die Aufsätze dennoch realisiert werden.

In den Versuchen wurden verschiedene Industriediamant-Korngrößen und deren Eignung für den oberflächlichen Betonabtrag getestet.



Praxisversuche vor Ort im Kernkraftwerk

Um die entwickelten Versuchsmuster nach der wissenschaftlichen Betrachtung und Erprobung im Versuchsstand auch in der Praxis zu testen, konnten Versuche vor Ort im Kernkraftwerk Obrigheim durchgeführt werden. Der aufwendige Genehmigungsprozess und die Versuche selbst, wurden dabei vom Projektpartner SAT Kerntechnik GmbH und deren Mitarbeiter durchgeführt.

Im Fokus dieser Versuche stand insbesondere die Gewinnung von Erfahrungsberichten der ausführenden Arbeiter. Außerdem sollten unerwartete Probleme und Schwierigkeiten aufgedeckt werden die bei der Konstruktion der Versuchsmuster nicht berücksichtigt wurden und in den Laborversuchen nicht aufgetreten sind.

Alle vier Versuchsmuster wurden nach den durchgeführten Versuchen in den drei Bereichen Ergonomie, Leistung und Oberflächenqualität bewertet. Die expliziten Ergebnisse können dabei aus der nebenstehenden Tabelle entnommen werden.

Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass alle Versuchsmuster ihren Zweck erfüllen konnten und es keine Ausfälle der Technik gab. Was in der Planung zuvor jedoch nicht stark genug gewichtet wurde, ist die Ergonomie der Geräte. Besonders das Gewicht spielt eine wichtige Rolle wenn es darum geht wie benutzerfreundlich das Gerät ist. Daher soll insbesondere an dieser Thematik weiter gearbeitet werden und die übrigen Erfahrungen weiter genutzt werden. Zu diesem Zweck wurde bereits ab dem 01.07.2023 das Folgeprojekt EKONT-2 begonnen, in dessen Rahmen die Versuchsmuster weiterentwickelt werden sollen.

		Ergonomie	Leistung	Oberflächenqualität
Stufenfräser	VM 1	Gut	Sehr gut	Restpartikel in unebener Oberfläche
	VM 2	Zu hohes Eigengewicht		
	VM 3			
Hochfrequentes Raspeln	VM 4	Gut	Zu gering	Sehr gut