

BEWILLIGUNGSEMPFÄNGER



Diener electronic GmbH & Co. KG / Reker GbR

Abschlussbericht zur Projektphase 1:

Effizienzsteigerung der Abgasreinigung von Prozessgasen in der Chipindustrie mittels einer neuartigen Plasma- Barriereentladung

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 32701/01-21/2,
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verfasser: Christof Diener, Wolfgang Reker

Ebhausen, 1.6.2017

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az 32701/01-21/2		Referat		Fördersumme	
Antragstitel Effizienzsteigerung der Abgasreinigung von Prozessgasen in der Chipindustrie mittels einer neuartigen Plasma-Barriereentladung					
Stichworte					
Laufzeit 15 Monate		Projektbeginn 10.12.2015		Projektende 10.3.2017	
Zwischenberichte		30.6.2016		Projektphase(n) 1	
Bewilligungsempfänger Diener electronic GmbH & Co. KG Nagolder Straße 61 72224 Ebhausen				Tel +49 7458 99931-0 Fax +49 7458 99931-50	
				Projektleitung Christof Diener	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner		Reker GbR Hermannstraße 56a 33813 Oerlinghausen			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Im Rahmen des Projektes sollte eine hocheffiziente Abgasreinigungstechnologie für die Chip-Industrie bzw. ähnliche Anwendungen entwickelt werden, die bessere Reinigungsergebnisse mit einem deutlich reduzierten Energieverbrauch verbindet. Die dort zum prozessieren der Wafer eingesetzten Prozessgase (chlorhaltigen Gase, Perfluorcarbone (CF₄, C₂F₆, C₃F₈) oder Schwefelhexafluorid (SF₆) sowie Stickstofftrifluorid) können im Prozess nicht vermieden werden und müssen daher abgereinigt werden. Durch einen innovativen und hocheffizienten Plasmaprozess als Oberflächenentladung bei niedriger Leistung sollten die Schadgase chemisch aufgespalten werden und zu handhabbaren Wasserstoffverbindungen reagieren, die entsorgt werden können. Die Plasmaentladung sollte bei einem mittleren Druckniveau erfolgen, so dass durch eine verbesserte Pumpenanbindung auf der Vakuumseite eine weitere Energieeinsparung möglich wird. Insbesondere sollte die heute im Prozess der Abgasreinigung stattfindende Erzeugung von NO_x, die sich durch die hohen Prozesstemperaturen zwangsläufig ergibt, verhindert werden. Bisher wurde das NO_x am Ende der Abgasreinigung emittiert.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Die Projektarbeiten wurden im ersten Jahr planungsgemäß durchgeführt. Umfangreiche Entwicklungen fanden zum Grundkonzept für den Vakuumaufbau statt. Hierbei wurden 2 Schwerpunktbereiche bearbeitet, zum einen der konzeptionelle Aufbau mit dem Plasmagenerator (durch die Firma Diener electronic) und zum anderen der allgemeine Vakuumaufbau mit dem nachgeschalteten Wäschersystem (Firma Reker).</p> <p>Das Konzept des HF-Generators mit der Entladungsstrecke und dem Aufbau der Elektroden konnte vollständig erarbeitet werden und diente als Basis für den Aufbau des Versuchstandes. Im Wesentlichen befassten sich die Arbeiten dann mit dem Aufbau des Versuchstandes, zum einen für die Plasmaanlage, zum anderen aber auch grundlegenden Konzepten, um ein effektives und energiesparendes Pumpendesign für den Vakuumbereich aufbauen zu können. Einen Schwerpunkt stellten die Grundentwicklung und der Aufbau eines geeigneten Hochspannungsgenerators für die spezielle Plasma-Entladungskammer dar, die in einem mittleren Druckbereich betrieben wird. Dies führte zu besonderen Anforderungen an Generator und Entladungskammer, die aber gelöst werden konnten.</p> <p>Die Versuchsdurchführung gliederte sich in zwei Phasen, zum einen in die Vorversuche, um grundlegend das Messverfahren und die Auswertung zu testen, und danach die eigentlichen Versuche zur qualitativen und quantitativen Analyse der Umsetzungsgrade in der Plasmakammer. Die wichtige zu ermittelnde Kenngröße ist hierbei die Destruction and Removal Efficiency (DRE), ein Maß dafür, wie viel Prozent des ursprünglich vorhandenen Schwefelhexafluorids umgesetzt werden kann.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Mit dem System konnte aber gezeigt werden, dass **eine Destruction and Removal Efficiency DRE bei SF₆ bis zu 80 %** erreicht werden kann, und das bei einem noch nicht optimalen Wäscherdesign. Das entwickelte Plasmareaktorsystem mit dem Plasmagenerator und der spezifischen Entladungskammer funktionierte gut, das Plasma brennt sehr stabil, auch bei Atmosphärendruck, und erreichte somit die geplanten Ziele des Projektes.

Die DRE wurde im Versuchsbetrieb für sehr niedrige Gasflüsse und damit lange Verweilzeiten in der Plasmakammer bestimmt, ohne Spül-N₂, und unter (geringem) Überdruck. Diese Betriebsbedingungen unterscheiden sich damit von realen Bedingungen, wo die Pumpen mit hohem Spülgas-Fluss fahren. (z. B. Edwards iQDP80 fährt mit 12 slm bei geschlossenem und 47 slm bei geöffnetem Gasballast). Unter realen Bedingungen wird auch ein geringer Unterdruck auf dem Exhaust und damit auch der Plasmakammer gefahren.

Diese Untersuchungen waren mit dem neuen Wäscherdesign direkt im IHP an einer Chip-Prozessieranlage geplant. Aufgrund eines neuen Patents der Firma Edwards, das mit dem geplanten Design verletzt worden wäre (die Kombination der Abgasbehandlung mit Flüssigkeitsringpumpe), konnte der Aufbau des Wäschers nicht mehr erfolgen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Obwohl die technischen Arbeiten zum Plasmagenerator sehr gute Ergebnisse geliefert haben und diese Teilziele vollständig erreicht wurden, war aufgrund des Patents der Firma Edwards ein Aufbau des Gesamtsystems am IHP nicht mehr möglich.

Besonders ärgerlich war die Situation dadurch, dass ein Teil der Entwicklungsarbeiten ja auf ein bereits abgelehntes Patent der Firma Edwards aufbaute, wobei keines der beteiligten Unternehmen davon ausgegangen war, dass ein entsprechendes abgelehntes Patent nochmals eingereicht und dann doch bewilligt wird, insbesondere da die Ablehnung bereits im Jahr 2009 erfolgte.

Fazit

Die im Rahmen des Projektes angegebenen Umweltentlastungen können mit dem Plasmagerät in der im Antrag dargestellten Größenordnung erreicht werden. Hinsichtlich der Verwertung und Umsetzung der Ergebnisse hat eine vorsichtige Kontaktaufnahme mit der Firma Edwards hinsichtlich möglicher Lizenzierungen der Pumpentechnologie keine Annäherung ergeben.

Im Wesentlichen mag es darin begründet sein, dass die Firma Reker und die Firma Edwards in Teilen direkte Wettbewerber am Markt sind. Aus diesem Grund ist leider auch eine direkte Verwertung im geplanten Umfeld von Chipfabriken nicht mehr möglich, da das gesamte Konzept auf dem Einsatz dieser (nun im Rahmen der Abgasreinigung patentrechtlich geschützten) speziellen Pumpentechnologie basiert, denn nur so lässt sich ein kompaktes und kostengünstiges Wäscherdesign realisieren.

Zum Ende des Projektes wurden aufgrund der Problematik, dass im Umfeld von Chipfabriken mit dieser Technologie keine direkte Verwertung möglich ist, alternative Anwendungen für den Plasmareaktor untersucht. Ein typisches großes Problem stellen Lösemittlemissionen im Umfeld von Reinigungsanlagen dar. Erste Versuche haben dabei gezeigt, dass ohne große Optimierung gängige Lösemittel schon zu 70–75 % in der Plasmakammer umgesetzt werden können.

Insofern soll das Plasmareaktorsystem dahingehend weiterentwickelt werden, dass statt der aufwendigen SF₆-Gase aus der Chipproduktion auch Lösemittel, wie sie in gängigen Industrieprozessen auftreten, reaktiv umgesetzt werden können. Auch hier erfolgt die Reinigung der Abgase derzeit i. Allg. über Brenner, die eine thermische Umsetzung ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLOTT.....	1
1. ZUSAMMENFASSUNG	5
2. EINLEITUNG	6
3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE	10
4. FAZIT	22
5. LITERATURVERZEICHNIS	23

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Fluidplan des neuartigen Abgasreinigungssystems	8
Abb. 2: Versuchsstand mit Plasma-Entladungskammer	10
Abb. 3: Steuerung der Gasmengen und der Leistung am Versuchsstand.....	11
Abb. 4: Versuchsstand mit dem Wasserwäscher und dem neuen Vakuumkonzept (links oben: Leistung der Pumpe mit dem neuen Konzept, links unten mit dem alten Konzept)	12
Abb. 5: Plasmaentladung bei atmosphärischen Druckverhältnissen	13
Abb. 6: Aufbau und Flusschema für die Vorversuche	14
Abb. 7: Aufbau für die Vorversuche (mit Sicherheitsflasche und Gaswaschflasche mit Fritte am Ausgang)	15
Abb. 8: Erste Ergebnisse der Vorversuche	16
Abb. 9: Erste Ergebnisse der Vorversuche - Nebelbildung oberhalb der Lauge	16
Abb. 10: Testaufbau mit Waschsäule für quantitative Messungen	17
Abb. 11: Messung des Ausgangsflusses (ab t=4,5 h wird der Plasmareaktor zugeschaltet)	18
Abb. 12: Messung des Ausgangsflusses (ab t=4,2 h wird der Plasmareaktor zugeschaltet)	19

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Übersicht typischer Messwerte bei den Versuchen	18
--	----

Formelverzeichnis:

Formel 1	$SF_6 + 4 H_2 \rightarrow H_2S + 6 HF$	14
Formel 2	$SF_6 + 4 H_2 \rightarrow H_2S + 6 HF$	19
Formel 3	$SF_6 + H_2 \rightarrow SF_4 + 2 HF$	19
Formel 4	$SF_4 + 6 NaOH \rightarrow Na_2SO_3 + 4 NaF + 3 H_2O$	20

1. Zusammenfassung

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden zwei Schwerpunktbereiche bearbeitet, zum einen der konzeptionelle Aufbau mit dem Plasmagenerator (durch die Firma Diener electronic) und zum anderen der allgemeine Vakuumaufbau mit dem nachgeschalteten Wäschersystem (Firma Reker), deren Reinigungseffizienz in umfangreichen Versuchen erprobt wurde.

Das Konzept des HF-Generators mit der Entladungsstrecke und dem Aufbau der Elektroden konnte vollständig erarbeitet werden und diente als Basis für den Aufbau des Versuchstandes. Im Wesentlichen befassten sich die Arbeiten dann mit dem Aufbau des Versuchstandes, zum einen für die Plasmaanlage, zum anderen aber auch grundlegenden Konzepten, um ein effektives und energiesparendes Pumpendesign für den Vakuumbereich aufbauen zu können. Einen Schwerpunkt stellten die Grundentwicklung und der Aufbau eines geeigneten Hochspannungsgenerators für die spezielle Plasma-Entladungskammer dar, die in einem mittleren Druckbereich betrieben wird. Dies führte zu besonderen Anforderungen an Generator und Entladungskammer, die aber gelöst werden konnten.

Die Versuchsdurchführung gliederte sich dann in zwei Phasen, zum einen in die Vorversuche, um grundlegend das Messverfahren und die Auswertung zu testen, und danach die eigentlichen Versuche zur qualitativen und quantitativen Analyse der Umsetzungsgrade in der Plasmakammer. Die wichtige zu ermittelnde Kenngröße war hierbei die Destruction and Removal Efficiency (DRE), ein Maß dafür, wie viel Prozent des ursprünglich vorhandenen Schwefelhexafluorids SF₆ umgesetzt werden kann.

Mit dem System konnte gezeigt werden, dass **eine Destruction and Removal Efficiency DRE bei SF₆ bis zu 80 %** erreicht werden kann, und das bei einem noch nicht optimalen Wäscherdesign. Das entwickelte Plasmareaktorsystem mit dem Plasmagenerator und der spezifischen Entladungskammer funktionierte gut, das Plasma brennt sehr stabil, auch bei Atmosphärendruck, und erreichte somit die geplanten Ziele des Projektes.

Aufgrund eines neuen Patents der Firma Edwards, das mit dem geplanten Design verletzt worden wäre (die Kombination von Abgasbehandlung mit Flüssigkeitsringpumpe), konnte der Aufbau des Wäschers nicht mehr erfolgen und somit ist auch die Verwertung des Systems in der Chip-Industrie nicht möglich.

Daher wurden alternative Anwendungen für den Plasmareaktor untersucht. Ein typisches großes Problem stellen Lösemittlemissionen im Umfeld von Reinigungsanlagen dar, die sich prinzipiell auch mit dem Plasmasystem bearbeiten lassen. Hier sind aber noch weitergehende Untersuchungen nötig, das Verfahren funktioniert aber auch dort.

Die Projektarbeiten wurden gemeinsam mit der Firma Reker aus Oerlinghausen durchgeführt und wurden von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 32701/01-21/2 gefördert.

2. Einleitung

In der Chipindustrie werden zum Prozessieren der Wafer vielfältige Prozessgase eingesetzt. Neben chlorhaltigen Gasen werden insbesondere auch Perfluorcarbone (CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8) oder Schwefelhexafluorid (SF_6) sowie Stickstofftrifluorid NF_3 in großen Mengen eingesetzt. Diese Prozessgase sind bei der Bearbeitung der Silizium-Wafer absolut notwendig und dienen oft als Precursor für atomares Fluor, das für die vielfältigen Ätz- und Reinigungsaufgaben genutzt wird. Zusätzlich kann auch als Beiprodukt während der Rekombination der angeregten Perfluorcarbone in der Reaktionskammer NO_x entstehen.

Aus verschiedenen Untersuchungen war weiterhin bekannt, dass bei einfachen Plasmaätzen nur 20-40 % der Perfluorcarbone während des Ätz-Prozesses der Wafer verbraucht werden. Hier sind inzwischen verbesserte Verfahren bekannt („remote plasma“). Mit „remote plasma“ werden bis zu 99% umgesetzt und die Abgasreinigung muss sich im Wesentlichen um F_2 kümmern sowie um SF_6 , CF_4 und C_2F_6 , die müssen weithin behandelt werden.

Das verbleibende Restgas kann dann mithilfe von Vakuumpumpen aus der Prozesskammer abgesaugt werden. Danach muss dieses Abgas entsprechend behandelt werden, um korrosive und giftige bzw. klimaschädliche Anteile zu eliminieren. Die meisten der verwendeten Gase weisen darüber hinaus ein hohes Treibhausgaspotenzial auf. Beispielsweise wirkt SF_6 als Treibhausgas 23.500-mal so stark wie Kohlendioxid!

Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Reinigung zur Verfügung, wobei mit Abstand am häufigsten heute so genannte Brenner-Wäscher Verfahren eingesetzt werden, bei denen die Abgase mit einer thermischen Flamme behandelt und die hierbei entstehenden Reaktionsprodukte in einem Wäscher ausgewaschen werden.

Obwohl diese Verfahren prinzipiell funktionieren ergeben sich doch einige grundlegende Nachteile insbesondere hinsichtlich des energetischen Aufwandes der Abgasbehandlung. Die thermische Verbrennung erzeugt relativ viel CO_2 (es werden ca. 30 m^3 CH_4 pro Reinigungseinheit und pro Tag verbrannt, dabei entstehen pro Abgasreinigung ca. 22 t CO_2 pro Jahr) was zu einer deutlichen Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades führt.

Aufgrund der hohen Temperaturen von bis zu 1500 °C in der Flammenzone, die für die Umsetzung der Schadgase notwendig ist, wird ein großer Teil des Stickstoffs zu NO_x oxidiert, das wiederum in die Atmosphäre entlassen wird (das Global Warming Äquivalent beträgt für NO_x 265).

Weiterhin benötigen diese Prozesse einen relativ hohen Volumenstrom zur Verdünnung der Gase im Abgas. Dies erfolgt durch zusätzliches Einblasen von Stickstoff in die Vakuumpumpe (bis zu 300 slm (Standard Liter pro Minute) bei 4 Einlässen in der Abgasreinigung) und auch nach der Vakuumpumpe. Zusätzlich werden in die meisten Abgasreinigungen noch die Einlässe aus verschiedenen Gründen mit Stickstoff beaufschlagt. Hierdurch benötigt jede Vakuumpumpe ca. 1kW zusätzliche Leistung, die eingespart werden könnte, wenn der Volumenstrom entsprechend reduziert werden kann.

Dazu sind noch Einsparungen bei der Rohrbegleitheizung möglich, die ca. 300 W – 1000 W pro Meter an elektrischer Leistung erfordert. Diese ist nötig um die Kondensation der Schadgase im System nach der Vakuumpumpe zu verhindern.

Im Rahmen des Projektes sollte daher ein neuartiger, integrierter prozesstechnischer Ansatz entwickelt werden, der unter Berücksichtigung plasmaphysikalische Anforderungen zu einem energetisch optimierten Reinigungsprozess für Gase, wie sie speziell im Bereich der Chipindustrie anfallen, führt.

Die energetischen Vorteile sollten dabei durch mehrere Entwicklungen erreicht werden. Durch eine optimierte Prozessführung auf der Basis eines strömungsoptimierten Plasmareaktors mit Barriereentladung kann einerseits der Stickstoff-Volumenstrom in der gesamten Abgasbehandlungsanlage deutlich reduziert werden. Hierdurch können kleinere Vakuumpumpen eingesetzt werden, die wiederum einen deutlich geringeren Energieverbrauch aufweisen.

Im Gegensatz zu den bisher eingesetzten Mikrowellenplasmen sollte im vorliegenden Projekt ein Plasma eingesetzt werden, das im mittleren bis niedrigen Frequenzbereich angeregt wird. Der Vorteil liegt hier insbesondere darin, dass ein stabiles Plasma erreicht werden kann, auch wenn die Umgebungsbedingungen sich stärker ändern. (Hier sind Mikrowellenplasmen sehr empfindlich, so dass z.B. die Konversionseffizienz für Perfluorcarbone sehr stark von den Prozessbedingungen abhängt).

Ein wichtiges Einsatzfeld für das hocheffiziente Reinigungssystem war der Bereich der Halbleiterindustrie. Hier finden sich auf der einen Seite sehr reaktive und toxische Gase im Prozess und auf der anderen Seite eine starke Häufung von Vakuumpumpen, sodass durch die neue Prozessführung und die Entwicklung des neuen Plasmagenerators punktuell eine große Energieeinsparung erreicht werden kann. Aus diesem Grund sollte auch die grundlegende Demonstration des Vorhabens im Bereich der Halbleiterindustrie in Zusammenarbeit mit dem weltweit führenden IHP Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik erfolgen.

Grundsätzlich eignet sich das Plasmaverfahren mit leichten prozesstechnischen Anpassungen auch für andere Reinigungsaufgaben im Bereich der Gasreinigung. Hier bestehen interessante Ansätze, um bestehende Konzepte atmosphärischer Plasmaanlagen oder auch Niedertemperatur-Plasmaanlagen, die heute bereits für spezifische Luftreinigung eingesetzt werden, zumindest teilweise zu substituieren. Auch hier gilt der Vorteil, dass durch die spezielle Elektrodengeometrie und die spezifische Ansteuerung der Plasmaentladung sehr großflächige Entladungsbereiche und lange Entladungswege generiert werden können, die auch bei niedriger Plasmaleistung und -temperatur zu langen Reaktionszeiten und somit zu einer guten Umsetzung der Schadstoffe in den zu reinigenden Gasen ermöglichen. Typische Anwendungen liegen in der Abreinigung von VOC oder Aerosolen in Industriellen Abgasen. Die hiermit erreichbaren Energieeinsparungen werden ggf. nicht so hoch wie im Bereich der Halbleiterindustrie sein, bieten aber trotzdem ein interessantes Anwendungsgebiet.

Die Projektarbeiten sind in zwei Phasen untergliedert. In der **Phase I** sollte der Plasmareaktor mit dem Generator entwickelt werden.

Mit diesem System sollte der Reinigungsprozess an einem Schadgas untersucht und die Funktion des Verfahrens demonstriert werden. Aus praktischen Überlegungen heraus sollten die Arbeiten mit SF₆ an einem Kanal beginnen, da SF₆ die höchsten Anforderungen hat und sich die Ergebnisse gut auf die anderen Gase übertragen lassen. Im ersten Schritt sollte die Machbarkeit nachgewiesen werden und gezeigt werden, dass das Verfahren alle notwendigen Tests besteht (DRE (DestRuction Efficiency), MTBF (Meant Time Between Failure), MTTR (Mean Time To Repair), MTTA (Mean Time To Assist), etc.).

In der **Phase II**, die in einem separaten Antrag bearbeitet werden sollte, war geplant, die Anlage für weitere Gase zu qualifizieren. Hier sollten dann auch die Ätzgase CF₄, C₂F₆ und NF₃ getestet und das Reinigungsverfahren hierfür weiterentwickelt werden. Dazu kommen dann auch die Gase aus dem CVD Bereich. Diese Gase enthalten zum Teil nicht unwesentliche Partikelströme, die den Plasmaprozess beeinflussen. Hier gilt es die MTBF und die MTTR genau zu analysieren (die DRE ist immer zu erfüllen) und die Anlage daraufhin zu

entwickeln. Das größte Risiko besteht hier in der Möglichkeit, dass die Anlage zu schnell "zu geht" und dadurch ausfällt.

In der hier betrachteten Phase I sollten sich die Entwicklungen mit einer neuartigen Plasmakammer und der Entladungsgeometrie befassen, die mit einer dielektrisch behinderten Entladung arbeitet, bei der die Entladungstrecken mäanderförmige ausgeführt sind. Durch die strömungstechnisch optimierte Gasführung sollte eine lange Interaktionszeit des Abgases mit dem Plasma erzielt werden. Weiterhin konnte durch die Auslegung der Entladungskammer eine stabile Entladung auch mit geringen eingekoppelt Energien erreicht werden. Erste Vorüberlegungen hatten gezeigt, dass der Abgas-Volumenstrom bis ca. 70slm Gesamtfluss betragen kann.

Die Prozessführung, sollte sich dabei vollständig von allen bisher am Markt erhältlichen Systemen unterscheiden. Insbesondere ist die hier eingekoppelte Energie nicht ausreichend, um die Gase direkt zu zerlegen, wodurch auch die Temperaturen im Reaktionsraum niedriger sind und somit keine oder nur geringen Mengen von NO_x erzeugt werden.

Der hier verfolgte Prozess basierte primär auf einer Anregung der Gase mit Plasmen im kHz-Bereich mit reduzierter Leistungsdichte, so dass im Gegensatz zur Mikrowellenentladung das Abgas nur schwach ionisiert ist. Der Druckbereich sollte dabei zwischen einem Atmosphärenplasma und einer typischen Niederdruckplasmaentladung bei ca. 500 mbar liegen. So kann der Druckbereich entsprechend adaptiert werden, dass die Kompression des Prozessgases aus der Produktionsanlage durch die erste Vakuumpumpe geringer ausfällt und damit zusätzlich Energie einspart wird.

In der Plasmakammer sollte dann das SF_6 mit H_2 gemischt in die Plasmaentladung eingebracht werden. Durch die gewählten Plasmaparameter bei einem mittleren Entladungsdruck mit der Oberflächenentladung kann eine Plasmatemperatur von ca. 200- 600 °C erreicht werden. Dies genügt um durch Anregung der Ausgangsmoleküle diese umzusetzen zu H_2S und HF. Die Gase sollten dann in einem nachgeschalteten Aktivkohlefilter mit CaCO_3 und Al_2O_3 gebunden bzw. neutralisiert werden. In der letzten Stufe sollte dann noch ein Nasswäscher zum Einsatz kommen. (siehe Abb. 1) Das geplante Prozessbild ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

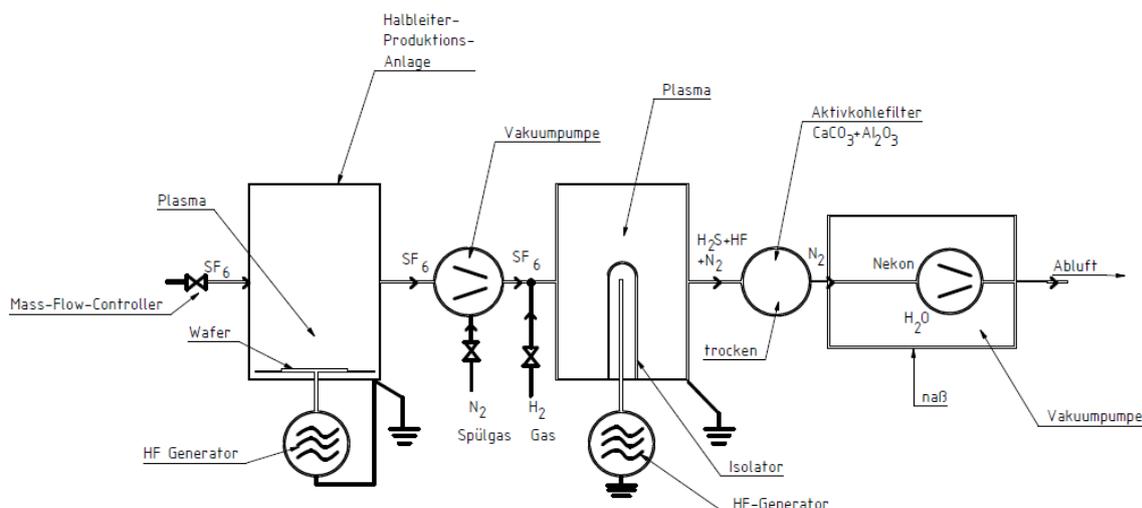


Abb. 1: Fluidplan des neuartigen Abgasreinigungssystems

Ein wichtiger Prozessparameter war dabei die Verweilzeit der Gasmoleküle in der Plasmakammer. Bedingt durch die geringere Leistung musste für die vollständige Umsetzung der Prozessgase eine ausreichende Verweilzeit berücksichtigt werden. Dadurch, dass die Plasmaentladung über eine keramische Oberfläche erfolgte, sollte eine Art katalytischer Effekt erzielt werden. So kann beispielsweise aus der Keramikoberfläche kurzfristig Sauerstoff für die Umsetzungsreaktionen bereitgestellt werden.

Durch diesen neuartigen Ansatz sollten deutlich geringere Plasmaleistungen gegenüber den bestehenden Systemen benötigt werden. Die Abschätzungen gingen von einer Plasmaleistung von nur noch 1000 W bei einer Anregungsfrequenz von 80 kHz aus.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Projektarbeiten konzentrierten sich zu Beginn auf die Anlagentechnik und den Plasmagenerator, dem zentralen Entwicklungspunkt. Umfangreiche Entwicklungen fanden dabei zum Grundkonzept für den Vakuumaufbau statt. Hierbei wurden 2 Schwerpunktbereiche bearbeitet, zum einen der konzeptionelle Aufbau mit dem Plasmagenerator (durch die Firma Diener electronic) und zum anderen der allgemeine Vakuumaufbau und der speziellen Pumpentechnik mit dem nachgeschalteten Wäschersystem (Firma Reker).

HF-Generator

Das Konzept des HF-Generators mit der Entladungsstrecke und dem Aufbau der Elektroden konnte vollständig erarbeitet werden und diente als Basis für den Aufbau des Versuchstandes. Im Wesentlichen befassten sich die Arbeiten dann mit dem Aufbau des Versuchstandes, zum einen für die Plasmaanlage, zum anderen aber auch grundlegenden Konzepten, um ein effektives und energiesparendes Pumpendesign für den Vakuumbereich aufbauen zu können.

Einen Schwerpunkt stellten die Grundentwicklung und der Aufbau eines geeigneten Hochspannungsgenerators für die spezielle Plasma-Entladungskammer dar, die in einem mittleren Druckbereich betrieben wird. Dies führt zu besonderen Anforderungen an Generator und Entladungskammer. Hier konnte ein System mit einer maximalen Leistung von 1000 W bei einer maximalen Ausgangsspannung ca. 7000 V realisiert werden. Als Entladungsfrequenz wurden 80 kHz gewählt. Zur Anpassung der Leistung ist das System mit einer Stromregelung ausgestattet. Oben auf dem Generator ist die Plasma-Entladungskammer integriert. Das System ist in der folgenden Abb. 2 nochmals dargestellt.



Abb. 2: Versuchstand mit Plasma-Entladungskammer

Mithilfe umfangreicher Steuer- und Regelelementen lässt sich die Leistung, der Gasfluss und der Zulauf unterschiedlicher Gase in einem großen Bereich regeln. Dies ist wichtig, um später die geplanten umfangreichen Versuche möglichst einfach durchführen zu können. Die Gaszuführung und der Transport in den Entladungskanal erfolgt mithilfe einer Membranpumpe, um auch korrosive Gase verarbeiten zu können (siehe Abb. 3).

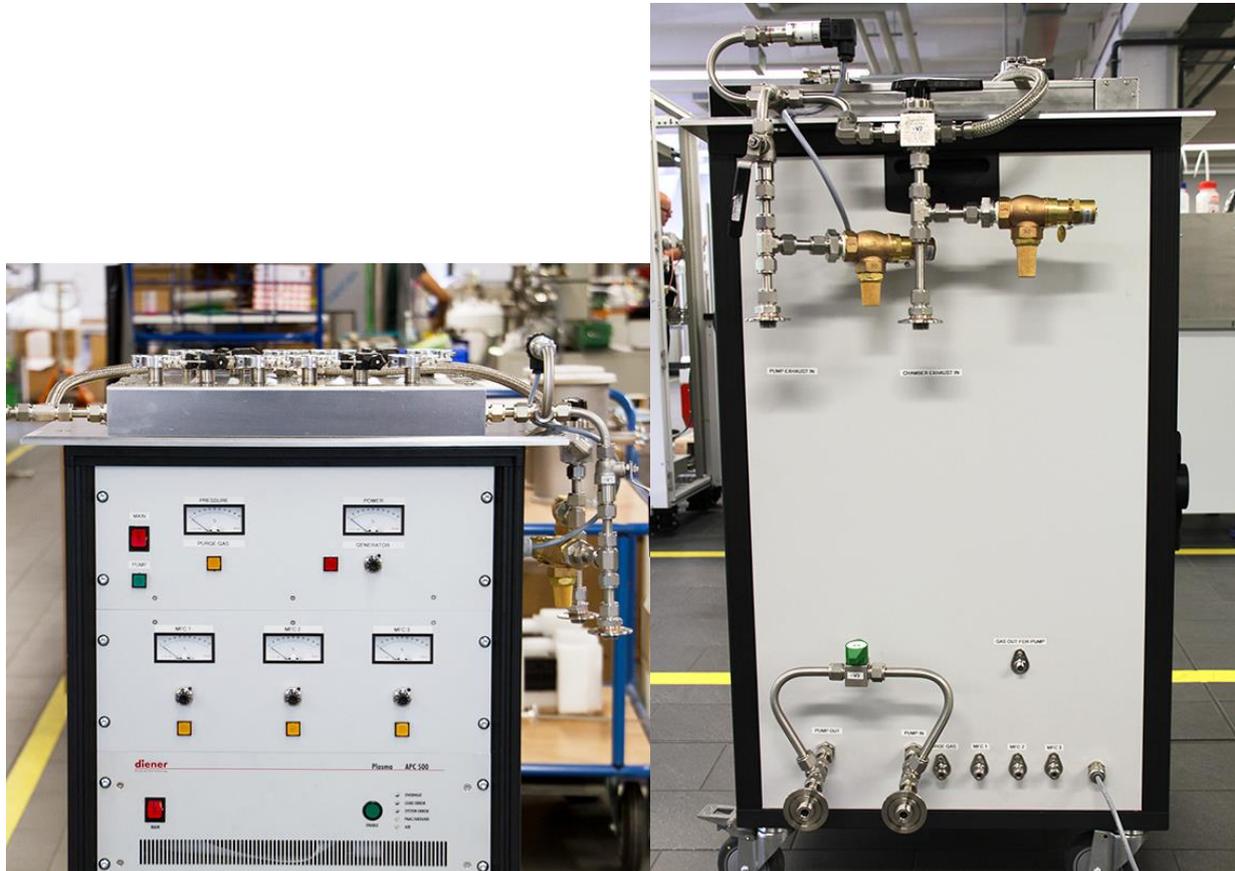


Abb. 3: Steuerung der Gasmengen und der Leistung am Versuchsstand

Wäschersystem

Im Weiteren befassten sich die Arbeiten dann parallel mit der gesamten Auslegung und Anpassung der Wasserbehandlung hinter dem Plasmasystem. Insbesondere wurde untersucht welche Anpassungen notwendig waren und wie ein optimales Pumpendesign aufgebaut werden kann. Die Arbeiten konnten im Wesentlichen abgeschlossen werden.

Im Bereich der Wasserbehandlung wurden ebenfalls grundlegende Voruntersuchungen mit einem Testaufbau umgesetzt. Diese liefen beim IHP in Frankfurt/Oder, aber noch ohne die Plasmaanlage.

Ein wesentlicher Ansatz des Projektes um den Energieverbrauch zu reduzieren, lag darin, das Druckniveau, das in der Vakuumpumpe aufgebaut werden muss, zu reduzieren und diesen Druckaufbau mit einer deutlich effizienteren Pumpentechnologie umzusetzen. Die Vorversuche zeigen dabei, dass der Vordruck durchaus 400 - 500 mbar erreichen kann, wo die trocken laufenden Vakuumpumpen noch mit guter Effizienz betrieben werden können. Hierzu wurden grundlegende Konzeptstudien durchgeführt, wobei ein Testaufbau mit einem speziellen Pumpenkonzept, einer sogenannten Wasserringpumpe, realisiert wurde.

Dabei hat sich gezeigt, dass dieses Konzept prinzipiell funktioniert (siehe Abb. 4), bei einer höheren Partikelbelastung aber Probleme auftreten können. Insbesondere werden bei Metallätz-Prozessen, beispielsweise Fotolackreste als Partikel mittransportiert und können zu einer Funktionseinschränkung führen.

Daher wurde ein weiteres Systemkonzept untersucht, mit dem auf Basis eines klassischen Venturi-Systems unter Einsatz einer Hochdruckpumpe, die bei extrem geringen Wassermengen von maximal 1 l/min arbeitet, sich aber nicht bewährte.

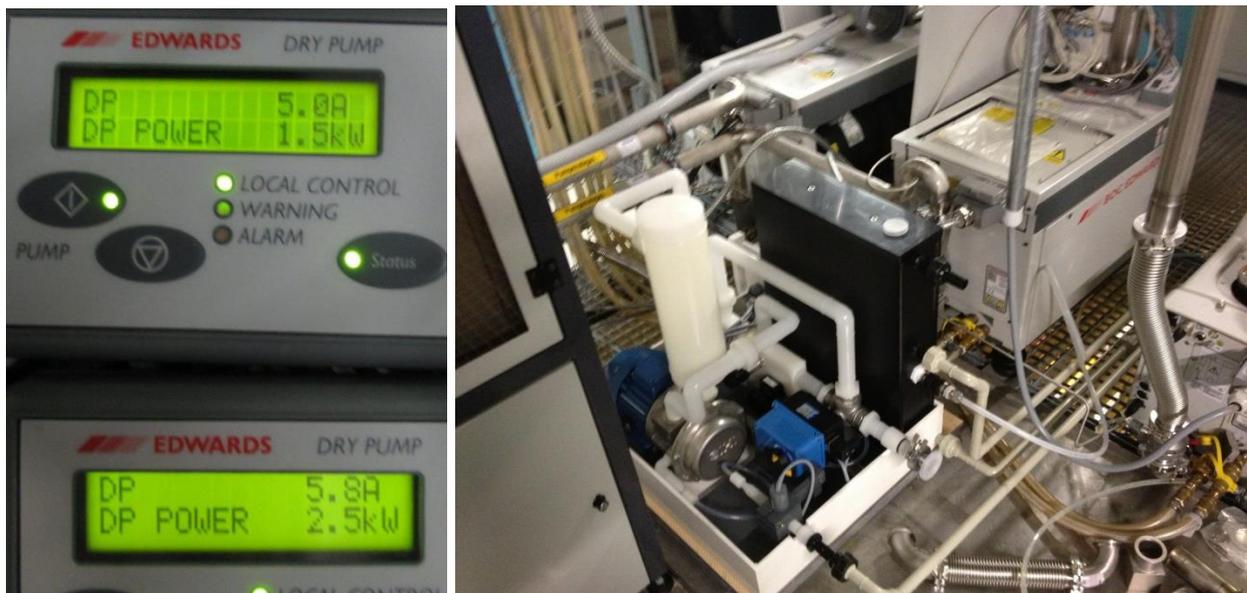


Abb. 4: Versuchsstand mit dem Wasserwäscher und dem neuen Vakuumkonzept (links oben: Leistung der Pumpe mit dem neuen Konzept, links unten mit dem alten Konzept)

Entladungskammer mit Prozessreaktor

Im weiteren Vorgehen war geplant, sobald die Plasmaanlage stabile Entladungszustände ermöglicht, mit den ersten Versuchen zur Behandlung von SF_6 zu beginnen. Es konnte in der ersten Projektphase schon ein Plasma gezündet werden, sodass gezeigt werden konnte, dass mit dem neuartigen Entladungsdesign auch eine stabile Plasmaentladung möglich ist (siehe Abb. 5). Der Reaktor war für diesen Versuch noch geöffnet und das Plasma wurde bei Atmosphärendruck gezündet.

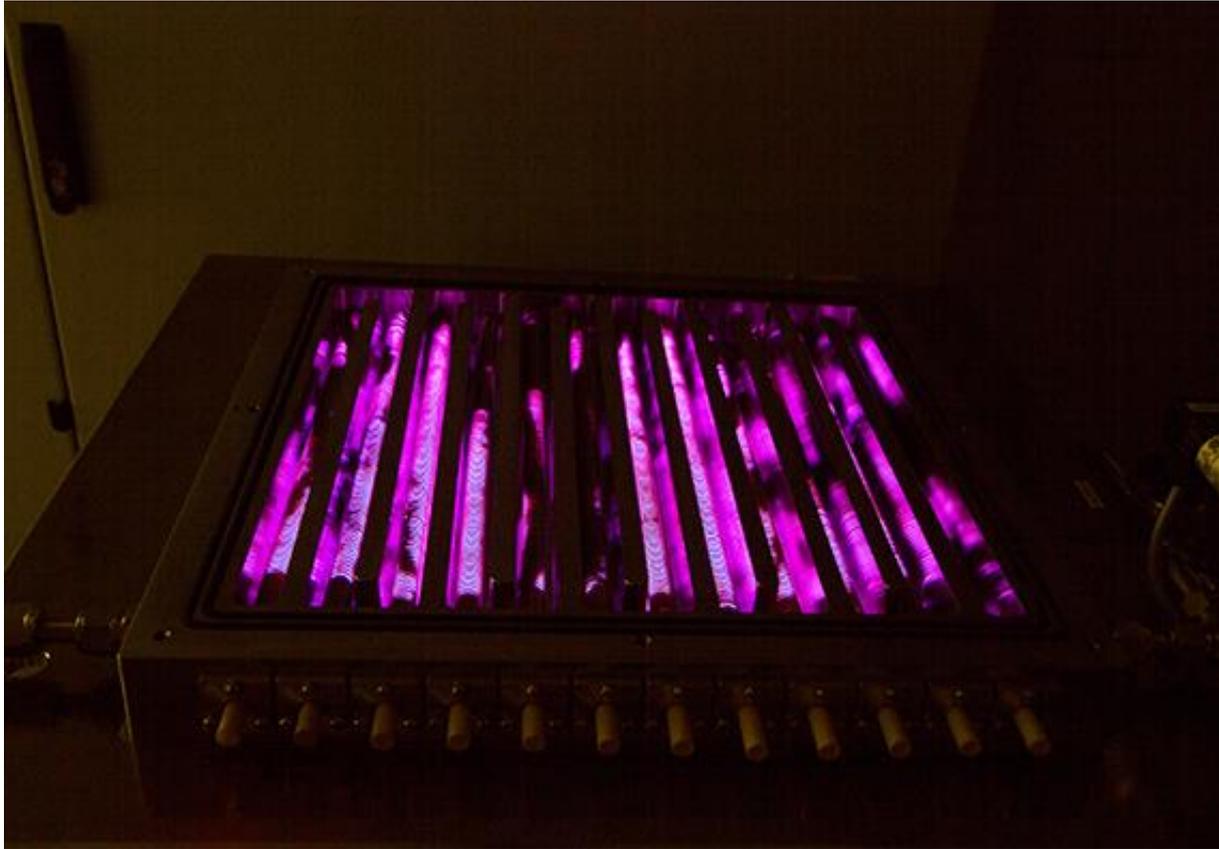


Abb. 5: Plasmaentladung bei atmosphärischen Druckverhältnissen

Im Verlauf des Projektes zeigte sich dann, dass die gewählte Keramik, mit der die Plasmastrecke aufgebaut war, zu Undichtigkeiten führte und daher verschiedene Verbesserungen durchgeführt werden mussten. Insbesondere mussten aufwendige Dreh- und Frästeile hergestellt werden, um eine durchgängige Dichtigkeit im gesamten Reaktor sicherzustellen. Die Dichtigkeit war eine wesentliche Voraussetzung, da die Umsetzung fluorhaltiger Gase einen 100 %igen Abschluss des Reaktionsraums bedingt.

Im Weiteren erfolgte dann noch die Optimierung der Entladung, sodass eine gleichmäßige und stabile Entladungssituation auch bei Atmosphärendruck erreicht werden konnte. Für den ursprünglich geplanten Einsatz im Bereich bei 500 mbar Druck verbessern sich die Verhältnisse, sodass wenn bei Atmosphärendruck ein stabiles Plasma gezündet werden kann, dieses auf jeden Fall auch geringeren Drucken zur Verfügung steht. Nach Abschluss der vorbereitenden Arbeiten erfolgte der Aufbau des finalen Systems, mit dem dann die Tests durchgeführt werden sollten.

Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung gliederte sich in zwei Phasen, zum einen in die Vorversuche, um grundlegend das Messverfahren und die Auswertung zu testen, und danach die eigentlichen Versuche zur qualitativen und quantitativen Analyse der Umsetzungsgrade in der Plasmakammer. Die wichtige zu ermittelnde Kenngröße ist hierbei die Destruction and Removal Efficiency (DRE), ein Maß dafür, wie viel Prozent des ursprünglich vorhandenen Schwefelhexafluorids umgesetzt werden kann. Da grundlegend bisher keine Erkenntnisse darüber existierten, nach welchen Reaktionsgleichungen in dem speziellen Plasmaregime

eine solche Umsetzung erfolgt, fanden zuerst grundlegende Vorversuche statt. Mit diesen sollte geklärt werden, ob die erwartete Umsetzung von SF_6 mit H_2O entsprechend der Reaktionsgleichung (idealisierte Summenformel)



erfolgt. In der zweiten Stufe sollte dann überprüft werden, ob für die Destruction and Removal Efficiency (DRE) ein Wert bestimmt werden kann. Für die Vorversuche wurde ein Aufbau ähnlich dem folgenden Schema gewählt.

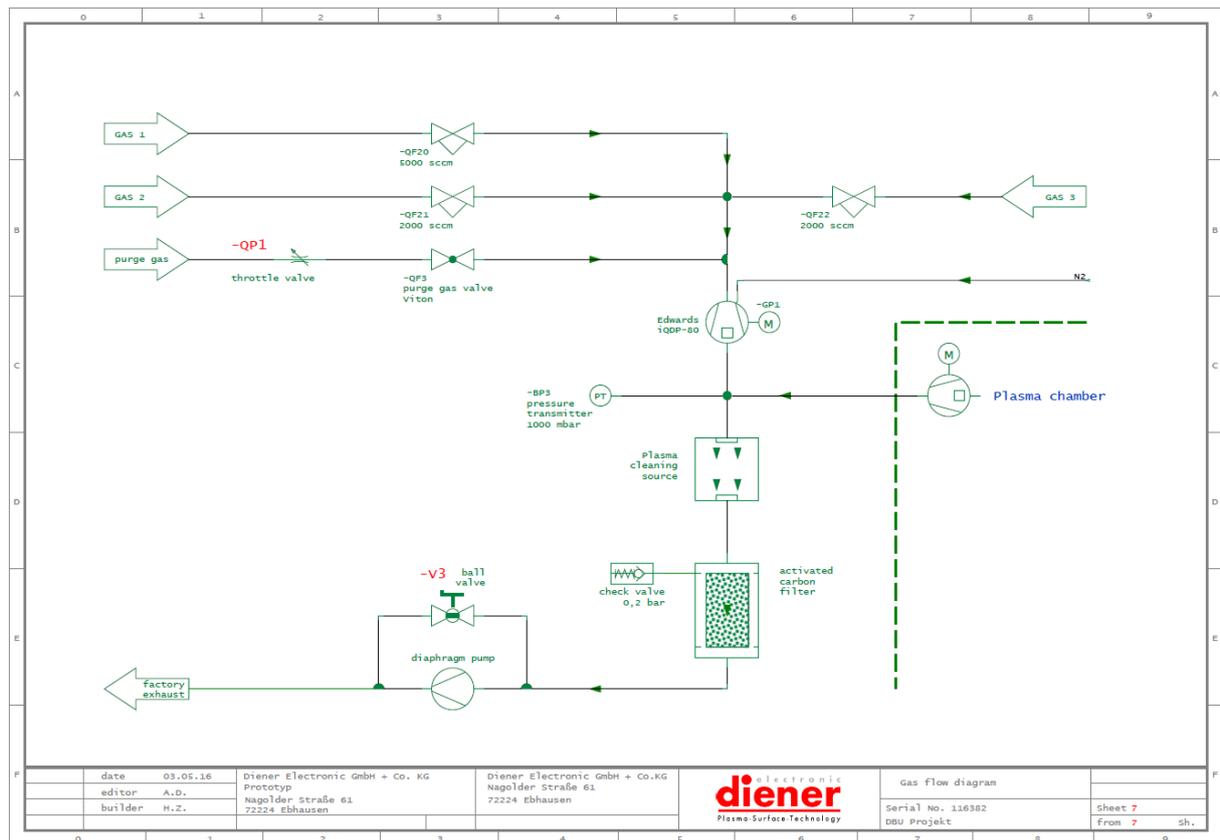


Abb. 6: Aufbau und Flussschema für die Vorversuche

Hierfür wurden 3 Mass-flow-Controller am Eingang eingesetzt, die auf 5 Sl/m (Standardliter pro Minute) N_2 kalibriert waren. Mit diesem wurden die Flussraten von SF_6 , H_2 und dem Spülgas N_2 ermittelt.



Abb. 7: Aufbau für die Vorversuche (mit Sicherheitsflasche und Gaswaschflasche mit Fritte am Ausgang)

Da die verwendeten Mass-flow-Controller für H_2 kein stabiles Regelverhalten zeigten und der Gaskorrekturfaktor für Wasserstoff für die Mass-flow-Controller nicht genau bekannt ist, wurden die Versuche mit Formiergas gefahren. Hierbei wurde ein Stickstoff- zu Wasserstoffverhältnis von 90 : 10 eingestellt, anstatt mit reinem Wasserstoff zu arbeiten. Hiermit ergab sich ein Verhältnis von SF_6 zu H_2 von 1 : 4 bei einem Gesamtfluss von ca. 2,5 Sl/m.

Für die ersten Versuche wurde der Fluorwasserstoff mithilfe von Drägerröhrchen bestimmt, während Schwefelwasserstoff aufgrund seiner geringen Nachweisgrenze auch für die Vorversuche durch Geruch am Ausgang des Plasmareaktors nachweisbar war. Für den Nachweis wurde mit Indikator versetzte Natronlauge (Phenolphthalein) in der Gaswaschflasche nachgewiesen. (Abb. 8). In der Gaswaschflasche ist eine Natronlauge bekannter Konzentration vorgelegt, sodass sich aus der Zeit bis zur Entfärbung bzw. bis zum Umschlagen des Indikators eine quantitative Abschätzung der umgesetzten Gase ergibt und daraus die Destruction and Removal Efficiency (DRE) berechnet werden kann.

Die berechnete DRE lag mit 6,2 % deutlich zu niedrig. Das Problem konnte dahingehend analysiert werden, dass eine Gaswaschflasche ohne Fritte verwendet werden musste, denn in den Vorversuchen hatte sich die Fritte in der Gaswaschflasche kurz nach Einschalten des Generators zugesetzt, sodass sich ein Druck am Ausgang der Vakuumpumpe aufgebaut hat, der dann zum Abschalten der Pumpe führte. Der Verzicht auf die Fritte führt dann dazu, dass

HF und H₂S durch die Lauge durchschlagen, was an der Nebelbildung oberhalb der Lauge (Abb. 9) zu erkennen ist.



Abb. 8: Erste Ergebnisse der Vorversuche



Abb. 9: Erste Ergebnisse der Vorversuche - Nebelbildung oberhalb der Lauge

Grundsätzlich konnte aber gezeigt werden, dass das Verfahren prinzipiell funktioniert, sodass dann in der zweiten Stufe Versuche mit einer Waschsäule und einem Mass-flow-Controller am Ausgang für die quantitative Bestimmung des Gasflusses durchgeführt werden konnten. Der Versuchsaufbau ist in den folgenden Schemadarstellungen und den Bildern nochmals dargestellt. (Abb. 10)

Ausgehend von der idealen Reaktionsgleichung (S. 15) kann mit der Waschsäule (Natronlauge) davon ausgegangen werden, dass eine fast vollständige Umsetzung der Endprodukte mit der Natronlauge erfolgt. Mithilfe einer quantitativen Gasmessung hinter der Waschsäule und am Ausgang des Plasmareaktors kann bei idealen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass der Fluss auf 0 zurückgeht bzw. bei einem bestehenden Restfluss nach dem Wäscher eine DRE < 100 % existiert, die entsprechend berechnet werden kann. Um eine vollständige Umsetzung zu garantieren, wurde die Waschsäule als dünnes Rohr aufgebaut, das mit einer Füllhöhe von ca. 1,8 m mit verdünnter Natronlauge befüllt war.

Hinter der Waschsäule war eine Trockenflasche zum Schutz des MFCs am Ausgang zusätzlich integriert.



Abb. 10: Testaufbau mit Waschsäule für quantitative Messungen

Die ersten Versuche mit diesem Versuchsaufbau zeigten ein eher träges Verhalten, wobei ein nur geringer maximaler Gasfluss bezogen auf das Volumen des Systems realisiert werden konnte. Hierbei zeigte sich, dass ein Druckaufbau im System notwendig war, um das Gas durch den MFC am Ausgang zu treiben. Der erforderliche Überdruck war dabei abhängig vom Gasfluss und nimmt mit steigendem Fluss zu, was auf einen Strömungswiderstand deutet. Bei den durchgeführten Versuchen lag dieser notwendige Überdruck im Bereich von 0,25 bis ca. 0,5 bar und wurde mit einem Manometer am Eingang der Waschsäule überwacht. Zuerst erfolgte dann noch die Berechnung des Gaskorrekturfaktors für SF_6 zu H_2 , der für eine 1 : 4- SF_6/H_2 -Mischung 0,67 beträgt. Im Verlauf der ersten Versuche zeigte sich dann, dass im System verschiedene Lecks aufgetreten waren, die erst beseitigt werden mussten, was sich an einem im Vergleich zur Eingangsflussrate geringeren Ausgangsflussrate zeigte.

Im Verlauf der ersten Versuche kam es dann wieder zu Lecks oben an der Säule, was schlussendlich auf ein Versagen der Klebeverbindung zwischen Kleinflansch mit Rohransatz und der PMMA-Säule zurückzuführen war.

Aus diesem Grund wurde eine neue Waschsäule aufgebaut, wobei die Säule selbst hier als PVC-Schlauch umgesetzt wurde, der mit entsprechenden Schlauchschellen und Stopfen eine dichte Verbindung des Gesamtsystems ermöglichte. Klebeverbindungen wurden hier bewusst vermieden. Diese Säule erwies sich dann als hinreichend dicht und auch nach längerem Betrieb wurden die erwarteten Flüsse am Ausgang mit dem MFC gemessen. Im Weiteren mussten während der ersten Versuchsphasen noch zusätzliche Modifikationen am Versuchsaufbau umgesetzt werden. Ein Hauptpunkt war die Installation einer Heizung an der Reaktionskammer, die später mit einem Sollwert von 60 °C betrieben wurde. Hintergrund ist hier, dass die Kondensation von Fluorwasserstoff sicher vermieden werden musste. Der Siedepunkt des Fluorwasserstoffs liegt laut Literatur bei 19,5 °C unter Normalbedingungen. Unter Zugrundelegung der Gasgleichungen berechnet sich dann die Siedepunkttemperatur auf 25,6 °C bei 1,25 bar und 31 °C bei 1,5 bar. Die Heizung selbst ist dabei nur zum Anfang

erforderlich, da mit dem Einschalten des Generators sehr schnell ein Temperaturanstieg auf über 60 °C erfolgt, durch die in der Reaktionskammer deponierte Energie.

Die Messungen wurden mit folgenden Gasflüssen (Verhältnis SF₆ : H₂ 1:4, Gesamtfluss 131 sccm, berechneter Gaskorrekturfaktor GCF für SF₆/H₂ 1:4 0,67, erwarteter Fluss am Ausgang bei abgeschaltetem Generator der PRK 98%) durchgeführt:

Tabelle 1: Übersicht typischer Messwerte bei den Versuchen

		Fluss	GCF	Fluss
		[%]		[sccm]
MFC1	SF ₆	50%	0,26	26
MFC2	H ₂	52%	1,01	105
MFC4	SF ₆ +H ₂ 1:4	98%	0,67	131

Im Folgenden ist beispielhaft eine Messkurve dargestellt:

Spülen des Systems erfolgte mit 200 sccm N₂, Dauer ca. 1.5 h, bis der Endwert am Ausgangs-MFC erreicht wird. Dann wurde SF₆/H₂ im Verhältnis 1:4 mit Gesamtfluss ca. 130 sccm zugeschaltet. Der Fluss am Ausgang sinkt ab, weil jetzt zunächst ca. 130 sccm N₂ am Ausgang ankommen (das entspricht bei dem 200 sccm MFC am Ausgang einem Fluss von 65%), nach 4.5 h wird der erwartete Endwert für den SF₆/H₂-Gasfluss am Ausgangs-MFC (Fluss beträgt mit dem für 1:4 SF₆/H₂ berechnetem GCF von 0.67 98%) erreicht. Dann wird der Generator eingeschaltet und Gasfluss am Ausgang geht auf ca. 27% zurück, was auf eine DRE von rund 75% schließen lässt.

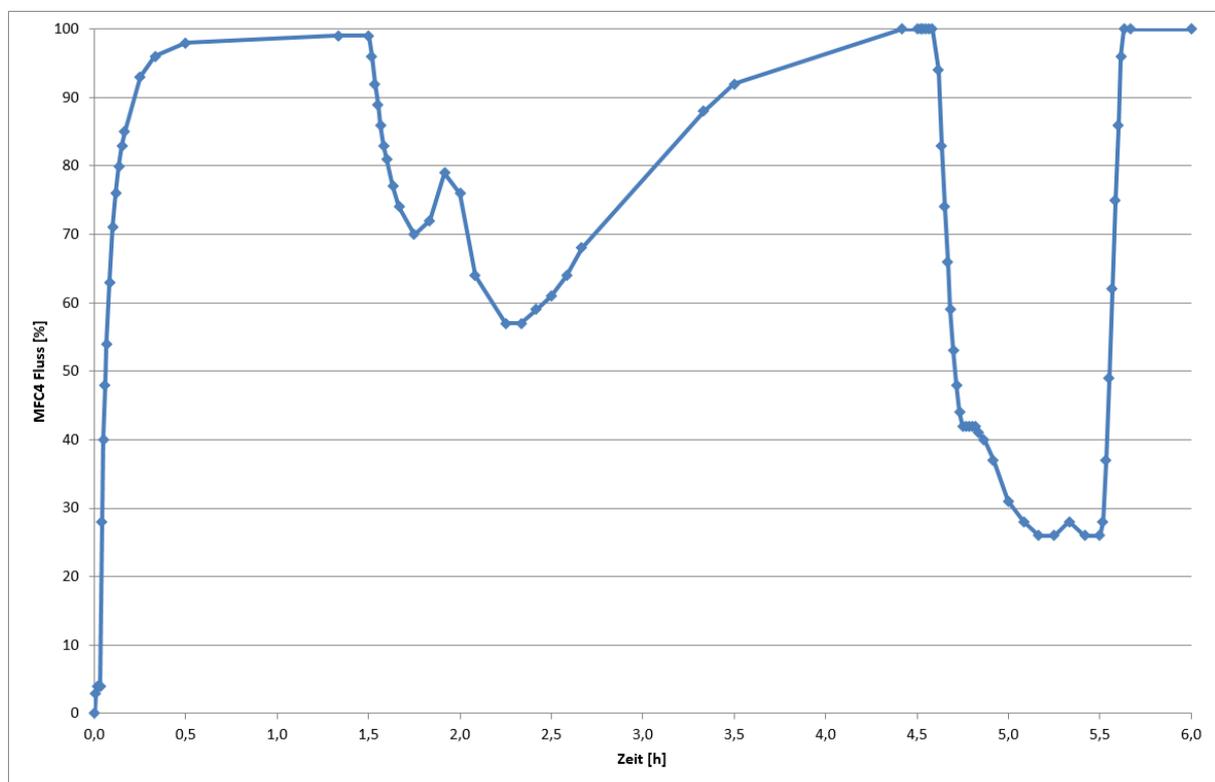


Abb. 11: Messung des Ausgangsflusses (ab t=4,5 h wird der Plasmareaktor zugeschaltet)

Beispielhaft ist ein weiterer Versuch dargestellt, bei dem eine DER von rund 80% erreicht wurde. Bei diesem Versuch wurde eine Messung der Fluorwasserstoff-Konzentration am Ausgang der Waschsäule mit Dräger-Röhrchen durchgeführt. Die Konzentration lag bei unter 0.5 ppm, das heißt, der Fluorwasserstoff wird in der Waschsäule vollständig abgeschieden und schlägt nicht durch und die durch den am Ausgang gemessenen Fluss bestimmte DRE ist damit nicht zu niedrig.

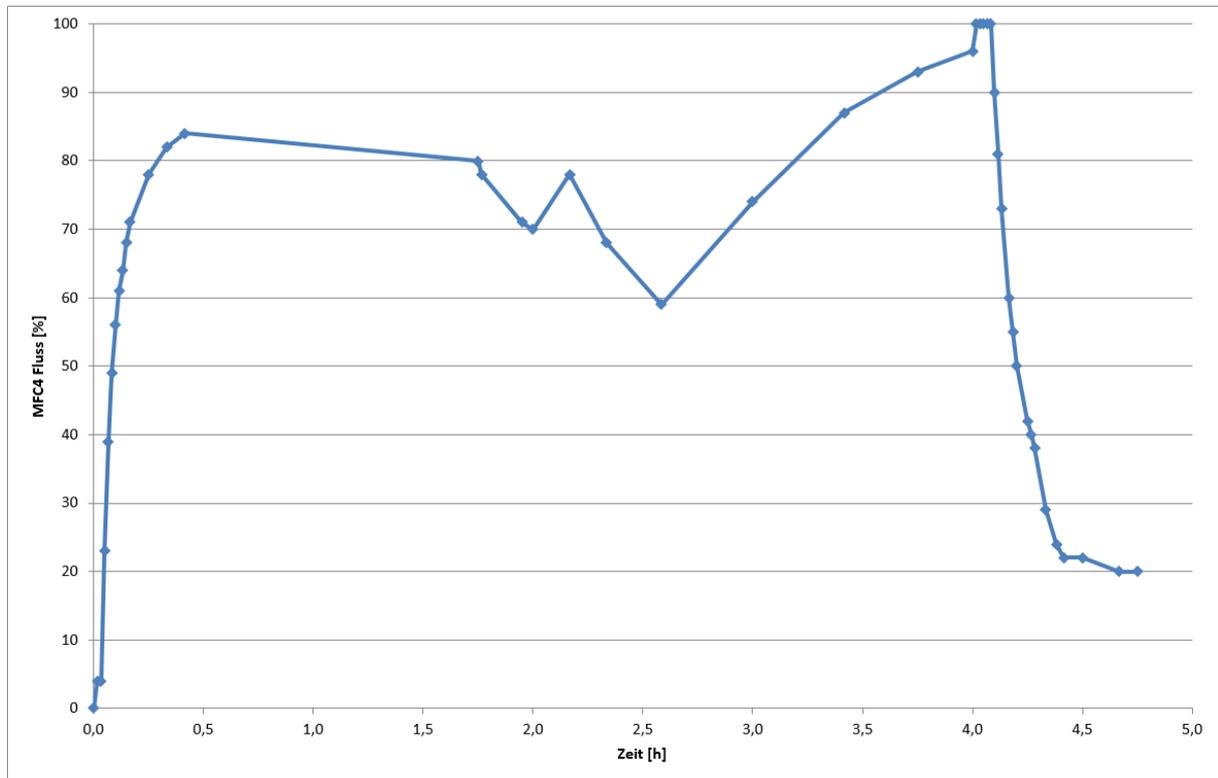


Abb. 12: Messung des Ausgangsflusses (ab $t=4,2$ h wird der Plasmareaktor zugeschaltet)

Zusammenfassung & Diskussion

Die Destruction and Removal Efficiency DRE wurde bestimmt durch Entfernung der bei der Umsetzung von SF_6 mit H_2 entstehenden sauren Gase, die in einer mit Lauge befüllten Waschsäule ausgewaschen werden. Durch Messung des Gasflusses am Ausgang der Waschsäule konnte für eine 1:4 SF_6/H_2 -Mischung mit einem Gesamtfluss von ca. 130 sccm eine DER reproduzierbar über viele Versuche von 75 – 80% erreicht werden.

Die DRE wurde dabei unter der Annahme berechnet, dass das SF_6 vollständig zu H_2S und HF umgesetzt wird:



Zu erwarten ist, dass die Umsetzung zumindest teilweise unvollständig abläuft, zum Beispiel nur bis zum Schwefeltetrafluorid:



Das dabei entstehende Schwefeltetrafluorid hydrolysiert in der Waschlauge wahrscheinlich unter Bildung von Sulfit und Fluorid:



und wird dadurch aus dem Abgas entfernt.

SF₆ und H₂ werden bei der Bildung vom Schwefeltetrafluorid im Verhältnis 1 : 1, nicht 1 : 4, umgesetzt, der dadurch nicht umgesetzte Wasserstoff erhöht den Fluss am Ausgangs-MFC und die aus dem Fluss am Ausgangs-MFC abgeschätzte DRE ist daher eher zu niedrig.

Die DRE wurde im Versuchsbetrieb für sehr niedrige Gasflüsse und damit lange Verweilzeiten in der Plasmakammer bestimmt, ohne Spül-N₂, und unter (geringem) Überdruck. Diese Betriebsbedingungen unterscheiden sich damit von realen Bedingungen, wo die Pumpen mit hohem Spülgas-Fluss fahren. (z. B. Edwards iQDP80 fährt mit 12 slm bei geschlossenem und 47 slm bei geöffnetem Gasballast). Unter realen Bedingungen wird auch ein geringer Unterdruck auf dem Exhaust und damit auch der Plasmakammer gefahren.

Diese Untersuchungen waren mit dem neuen Wäscherdesign direkt im IHP an einer Chip-Prozessieranlage geplant. Aufgrund der im folgenden Kapitel dargestellten Patentproblematik konnte der Aufbau des Wäschers nicht mehr erfolgen.

Mit dem System konnte aber gezeigt werden, dass **eine Destruction and Removal Efficiency DER bei SF₆ bis zu 80 %** erreicht werden kann, und das bei einem nicht optimalen Wäscherdesign. Das entwickelte Plasmareaktorsystem mit dem Plasmagenerator und der spezifischen Entladungskammer funktionierte gut, das Plasma brennt sehr stabil, auch bei Atmosphärendruck, und erreichte somit die geplanten Ziele des Projektes.

Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung und Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes angegebenen Umweltentlastungen können mit dem Plasmagerät in der im Antrag dargestellten Größenordnung erreicht werden. Hinsichtlich der Verwertung und Umsetzung der Ergebnisse hat eine vorsichtige Kontaktaufnahme mit der Firma Edwards hinsichtlich möglicher Lizenzierungen der Pumpentechnologie keine Annäherung ergeben. Das Patent umfasst die Kombination von Abgasbehandlung mit Flüssigkeitsringpumpe, einem der grundlegenden Ansätze des hier verfolgten Weges. Dieses Patent war bereits vor Jahren abgelehnt worden, so dass die Nutzung dieser Kombination unkritisch erschien.

Im Wesentlichen mag es darin begründet sein, dass die Firma Reker und die Firma Edwards in Teilen direkte Wettbewerber am Markt sind. Aus diesem Grund ist leider auch eine direkte Verwertung im geplanten Umfeld von Chipfabriken nicht mehr möglich.

Zum Ende des Projektes wurden aufgrund der Problematik, dass im Umfeld von Chipfabriken mit dieser Technologie keine direkte Verwertung möglich ist, alternative Anwendungen für den Plasmareaktor untersucht. Ein typisches großes Problem stellen Lösemittlemissionen im Umfeld von Reinigungsanlagen dar. Erste Versuche haben dabei gezeigt, dass ohne große Optimierung gängige Lösemittel schon zu 70–75 % in der Plasmakammer umgesetzt werden können.

Insofern soll das Plasmareaktorsystem dahingehend weiterentwickelt werden, dass statt der aufwendigen SF₆-Gase aus der Chipproduktion auch Lösemittel, wie sie in gängigen Industrieprozessen auftreten, reaktiv umgesetzt werden können. Auch hier erfolgt die Reinigung der Abgase oft über Brenner, die eine thermische Umsetzung ermöglichen.

Hier werden derzeit umfangreiche Versuche durchgeführt um das Verfahren in dieser Richtung zu modifizieren. Eine erste Kontaktaufnahme mit potenziellen Anwendern hat ein großes Interesse gezeigt.

4. Fazit

In der ursprünglichen Planung war dann vorgesehen, einen Testaufbau direkt beim IHP für die Vor-Ort-Versuche in der Demonstrationsanlage aufzubauen. Im Zuge der Vorbereitungen zu diesen Arbeiten wurde allerdings ein altes Patent der Firma Edwards, das bereits im Jahre 2009 in den USA und der EU abgelehnt worden war, aus für die Projektpartner nicht nachvollziehbaren Gründen doch bewilligt. Hierbei handelt es sich um ein Patent, das sich auf eine spezielle Flüssigkeitsringpumpe bezieht, die die Firma Reker eigentlich für den geplanten Aufbau des Wäschersystems einsetzen wollte. Dies ist erst im Rahmen einer Ende 2016 routinemäßig durchgeführten Patentrecherche aufgefallen.

Das Ziel war hier ja, durch die Druckerhöhung hinter der Vakuumpumpe eine kleinere Pumpe einsetzen zu können und so eine zusätzliche Energieeinsparung zu erreichen. Anfang des Jahres 2017 waren die Projektpartner dann vor die Entscheidung gestellt, entweder ein Patent der Firma Edwards zu verletzen und den vollständigen Versuchsaufbau ans IHP zu liefern oder diesen Teil der Arbeiten abubrechen.

Da die Firma Edwards ein regelmäßiger Gast am IHP ist, konnten beide Partner dieses Risiko nicht eingehen, insbesondere da auch eine spätere Vermarktung genau dieses Konzeptes aufgrund der Patenterteilung nun nicht mehr möglich war. Obwohl die technischen Arbeiten zum Plasmagenerator sehr gute Ergebnisse geliefert haben und diese Teilziele vollständig erreicht wurden, war nun ein Aufbau des Gesamtsystems nicht mehr möglich. Besonders ärgerlich war die Situation dadurch, dass ein Teil der Entwicklungsarbeiten ja auf ein bereits abgelehntes (und keinesfalls innovatives) Patent der Firma Edwards aufbaute, wobei keines der beteiligten Unternehmen davon ausgegangen war, dass ein entsprechendes abgelehntes Patent nochmals eingereicht und dann doch bewilligt wird, insbesondere da die Ablehnung bereits im Jahr 2009 erfolgte. [Smith]

Das gesamte Konzept basiert aber auf dem Einsatz dieser speziellen Pumpentechnologie, denn nur so lässt sich ein kompaktes und kostengünstiges Wäscherdesign realisieren.

5. Literaturverzeichnis

[Smith] US Patent Nr. 8.647.580 B2: J. R. Smith; A. J. Seeley: Gas Abatement