

Reformer-Brennstoffzellen-APU-System für Freizeitfahrzeuge

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 0327770D

Berichtszeitraum: 01.08.2010 - 31.12.2013

Berichtende Institution: Fraunhofer ICT-IMM
Carl-Zeiss-Straße 18-20
55129 Mainz

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Gunther Kolb

Autoren: Dr. Helmut Pennemann
Prof. Dr.-Ing. Gunther Kolb
Dipl.-Ing. Martin Wichert
Dipl.-Ing. Ole Wiborg

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

1 Aufgabenstellung und Planung (Teil I des Schlussberichts)	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2 Verwertung der Ergebnisse und Nachweise	10
2.1 Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	10
2.1.1 Arbeitspaket 4: Entwicklung Reformersystem mit geprägten Blechstrukturen.....	10
2.1.1.1 Entwicklung der Prägestruktur.....	11
2.1.1.2 Reformerentwicklung	13
2.1.1.3 Verdampferentwicklung	14
2.1.1.4 Folgeverbundwerkzeug	16
2.1.2 Arbeitspaket 5: Anpassung des Katalysatorauftrags an geprägte Strukturen inkl. Dauertest	20
2.1.3 Arbeitspaket 6: Entwicklung mikrostrukturierter Kondensator	22
2.1.4 Arbeitspaket 7: Entwicklung kostengünstiger Katalysatorbeschichtungen für Reformer und katalytische Brenner	24
2.1.4.1 Reformerkatalysator	26
2.1.4.2 Verdampferbrenner.....	30
2.1.5 Arbeitspaket 8: Untersuchung des Durchbruchverhaltens der Deionisierungskartusche und des Einflusses von Spuren von Phosphorsäure auf die Komponenten des Reformers... ..	35
2.1.5.1 Versuchsergebnisse	37
2.1.6 Arbeitspaket 9: Aufbau und Erprobung neues Reformersystem	39

2.2	Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	42
2.2.1	Darstellung der wichtigsten Materialkosten	42
2.2.2	Darstellung der wichtigsten Fremdleistungen	43
2.3	Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	44
2.4	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	44
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	45
2.6	Darstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	46

1 Aufgabenstellung und Planung (Teil I des Schlussberichts)

1.1 Aufgabenstellung

Die Truma Gerätetechnik GmbH & Co. KG (Truma) beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Entwicklung eines Flüssiggas-betriebenen Reformer-Brennstoffzellen-APU-(Auxiliary-Power-Unit)-Systems im Leistungsbereich 200-250 W_{el} für die Bordstromversorgung in Freizeitfahrzeugen. In diesem Kontext war es das Ziel des beantragten Fördervorhabens, ein verfahrens- und fertigungstechnisch deutlich vereinfachtes Reformer-Brennstoffzellen-System zu entwickeln mit dem Ziel die Herstellungskosten im Hinblick auf große Stückzahlen zu reduzieren. Die Vereinfachungen sollten vor allem die Hauptsystemkomponenten, d.h. die Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle und das Reformersystem betreffen.

Ausgehend vom Stand der Technik zu Beginn des Projektes beinhaltet die Aufgabenstellung von Fraunhofer ICT-IMM in diesem Projekt, die Entwicklung neuer Fertigungstechniken für mikrostrukturierte Platten als kostengünstigere Alternative zum nasschemischen Ätzen, die Anpassung der Katalysatorauftragung an das durch die neuen Fertigungstechniken angepasste Design der mikrostrukturierten Platten, die Entwicklung eines Kondensators auf der Basis mikrostrukturierter Platten und die Entwicklung neuer Katalysatorformulierungen, die im Vergleich zu den derzeit eingesetzten Formulierungen, eine Kosteneinsparung ermöglichen. Der Schlusspunkt der Entwicklungsarbeiten im Rahmen dieses Projektes war der Aufbau und die Erprobung eines neuen Reformersystems auf der Basis der neu entwickelten Fertigungstechnologie in Kooperation mit dem Projektpartner Truma.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Truma hat sich in 60 Jahren europaweit als einer der führenden Entwickler und Hersteller von Komfortgeräten für Freizeitfahrzeuge (Reisemobile, Caravans), Nutzfahrzeuge und Boote etabliert. Zur Produktpalette des mittelständischen Unternehmens zählen Warmluftheizungen und Warmwasseranlagen auf Flüssiggas-Basis sowie Klimageräte, Rangierhilfen, Energiesysteme und ein umfangreiches Zubehörprogramm. Nicht zuletzt aufgrund hoher Produktqualität, ausgeprägter Innovationsfreude und kundenorientiertem Service erreicht Truma bei Endkunden und Herstellern von Freizeitfahrzeugen eine sehr hohe Marktakzeptanz, die sich bei den meisten Produktgruppen in der Marktführerschaft widerspiegelt. Unter dem Motto „Mehr Komfort für unterwegs“ ist Truma bestrebt, Marktakzeptanz, Produktportfolio und Marktstellung stetig auszubauen.

Seit dem Jahr 2000 beschäftigt sich das Unternehmen mit Fragen der Bordstromversorgung in Freizeitfahrzeugen, speziell mit der Brennstoffzellen-Technologie. Hauptmotivation sind der

wachsende Komfortbedarf und die steigende Anzahl von elektrischen Verbrauchern, die zunehmend eine autarke Verwendung dieser Fahrzeuge einschränken und durch herkömmliche Stromversorgungsmöglichkeiten – Batterie, Photovoltaikanlagen oder Generatoren – nur ungenügend oder mit gravierenden Nachteilen (Gewicht, Lärm, zeit- und witterungsabhängige Verfügbarkeit) kompensiert werden können. Ein Bordstromversorgungssystem auf Brennstoffzellen-Basis vermeidet diese Nachteile und bietet einen deutlich erhöhten Kundennutzen – vor allem bei der Verwendung von Flüssiggas, für das europaweit eine gut ausgebaute Infrastruktur besteht. Zudem verfügt Flüssiggas über eine hohe Energiedichte und ist Anwendern im Freizeitmarkt bestens vertraut.

Fraunhofer ICT-IMM als Projektpartner für die Entwicklung des Flüssiggas-Reformersystems besitzt umfangreiches Know-how in den Bereichen Reformiertechnik, Katalysatorforschung sowie Entwicklung und Bau mikrostrukturierter Reaktoren, Wärmeübertrager und Verdampfer. Der Fokus der Entwicklungsarbeiten liegt dabei auf der Wasserstoffherzeugung für Brennstoffzellen aus verschiedensten Brennstoffen, der Brennstoffzellentechnik, der Wasserstoffinfrastruktur und der Produktion von Biotreibstoffen. ICT-IMM verfügt zudem über zahlreiche Laborversuchsstände, umfangreiche Gasanalysetechnik und Fertigungskapazitäten für Reaktorprototypen mit massenproduktionsfähigen Verfahren wie Katalysatorsiebdruck und Laserschweißen.

Im vom BMWI geförderten Forschungsvorhabens "Reformer-Brennstoffzellen-APU-System für Freizeitfahrzeuge" mit dem Förderkennzeichen 0327770B, war der Fokus auf robuste und serienproduktionstaugliche Fertigungstechniken für das Reformersystems und für die Auftragung der Katalysatoren ausgerichtet. In Zentrum der Bemühungen standen dabei die Fertigungstoleranzen des Vereinzelungsschrittes durch Laserschneiden zu minimieren, um Folgeprobleme beim Aufbau der Reaktoren zu reduzieren. Des Weiteren wurden die Fertigung des Verdampfers und die zum Einsatz kommende Schweißtechnik optimiert.

Nachdem im Vorgängerprojekt die Grundlagen für ein robustes Herstellungsverfahren gelegt wurden, ist der Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens auf die Kostenreduzierung ausgerichtet. Ein erster Schritt in diese Richtung dazu wurde bereits Vorgängerprojekt mit dem Förderkennzeichen 0327770B gemacht. Der Ersatz der Katalysatorauftragung von Hand durch eine halbautomatisierte Auftragung mittels eines Druckverfahrens, erlaubte es, die Herstellungskosten für das Gesamtsystem zu reduzieren. Diesem Gedanken folgend wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Herstellung der strukturierten Platten durch nasschemisches Ätzverfahren beleuchtet und nach Alternativen hin untersucht. Des Weiteren stand die Entwicklung kostengünstigerer Katalysatoren im Mittelpunkt. Im Hinblick die Gesamtgröße des Systems reduzieren zu können, wurde auch die Entwicklung eines mikrostrukturierten Kondensators durchgeführt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß der Zielsetzung sah die Aufgabenstellung für das ICT-IMM schwerpunktmäßig die Identifizierung und Entwicklung geeigneter Fertigungstechniken vor, mit deren Hilfe sich die Herstellungskosten des Gesamtsystems reduzieren lassen. Gemäß dieser Zielsetzung wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

AP4 Entwicklung eines Reformersystems mit geprägten Blechstrukturen (14 PM)

Das bislang genutzte Ätzverfahren für mikrostrukturierte Platten, soll durch ein alternatives Fertigungsverfahren, welches auf den Fertigungsschritten Prägen, Biegen und Stanzen basiert, ersetzt werden. Es wird erwartet, dass sich mit dieser Umstellung die Herstellungskosten für höhere Stückzahlen deutlicher reduzieren lassen als dies beim Ätzprozess möglich ist. Ausgangspunkt soll das sogenannte Faltreaktorkonzept sein. Im Mittelpunkt der Arbeiten stehen die Anpassung des Reaktordesigns an das neue Fertigungsverfahren, die Abstimmung der Reformerfertigung auf die nachfolgenden Herstellungsschritte wie zum Beispiel das Beschichten der Reaktionskanalstrukturen, das Laserschweißen der Einheiten und die Anbindung der Rohrleitungen für die Medienzu- und abführungen an die Reformerkomponenten sowie die Herstellung und das Testen von ersten Mustern. Während die Werkzeuge für einzelne Arbeitsschritte am ICT-IMM entwickelt und auch hergestellt werden sollen, erfolgt die Entwicklung des Folgeverbundwerkzeugs zusammen mit einem externen Partner.

AP5 Anpassung des Katalysatorauftrags an geprägte Strukturen (13 PM)

Eine Änderung der Fertigungstechnik kann zwangsläufige Änderungen oder Anpassungen für die nachfolgenden Schritte nach sich ziehen. In diesem Kontext muss zunächst ein geeigneter Zeitpunkt ermittelt werden, an dem die Auftragung des Katalysators auf die Prägeteile sowie die damit gekoppelten Trocknungs- und Calcinierungsschritte durchgeführt werden. Des Weiteren muss die Auftragung von Katalysatoren mittels Siebdruck, die ursprünglich für geätzte Platten entwickelte wurde, an die Topologie der geprägten Kanalstrukturen angepasst werden.

AP6 Entwicklung mikrostrukturierter Kondensator (6 PM)

Aufbauend auf Vorarbeiten des ICT-IMM zur Entwicklung hocheffizienter kompakter Kondensatoren soll ein Kondensator auf Basis geprägter Strukturen für das APU-System entwickelt werden, der mit geringer Baugröße unter Einsatz kostengünstiger Fertigungsverfahren das Wasser aus den Abluft- und Abgasmedienströmen des Systems zurückgewinnt, um den Einsatz zusätzlichen (extern eingebrachten) Wassers zu minimieren bzw. ganz zu vermeiden. Die Funktionsfähigkeit der Kondensatorprototypen wird am ICT-IMM experimentell verifiziert.

AP7 Entwicklung kostengünstiger Katalysatorbeschichtungen für Reformer und katalytischen Brenner (16PM)

Die im derzeitigen APU-System von Truma eingesetzten Katalysatoren wurden vom ICT-IMM entwickelt. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollen die Herstellungskosten dieser Katalysatoren gesenkt werden, ohne die hohe Aktivität und Stabilität zu beeinträchtigen. Zur Umsetzung dieses Vorhabens sollen die Edelmetallgehalte der existierenden Katalysatorbeschichtungen reduziert bzw. Additive zur Katalysatorformulierung zugegeben werden. Anhand von Testreihen mit mittelfristiger Dauer (ca. 100 h) wird zunächst eine Vorauswahl geeigneter Formulierungen getroffen, während die Langzeitstabilität der kostenoptimierten Katalysatoren dann durch 1000 h Stabilitätstests verifiziert werden soll.

AP8 Untersuchung des Durchbruchverhaltens der Deionisierungskartuschen und des Einflusses von Spuren von Phosphorsäure auf die Komponenten des Reformers (7,5 PM)

Die im Truma-APU-System eingesetzten HT-PEM-MEAs geben Spuren von Phosphorsäure ab, die durch die Rückführung des auskondensierten Wassers in das Reformersystem gelangen würden. Dies wird im System durch Deionisierungskartuschen weitgehend vermieden. Ziel des Arbeitspaketes ist es, zum einen das Durchbruchverhalten dieser Kartuschen zu untersuchen. Zum anderen soll der Einfluss der Phosphorsäure auf die Komponenten des Komplettreformers, d.h. auf den Verdampfer und den Reformer, hinsichtlich Langzeitstabilität und möglicher Korrosionseffekte untersucht werden.

AP 9: Aufbau und Erprobung neues Reformersystem (PM)

Nach erfolgter Umsetzung der in AP 4 beschriebenen Arbeitsschritte wird nach Ende des ersten Projektjahres mit diesem Verfahren der Verdampferbrenner als zweite Komponente des Reformers hergestellt. Im nächsten Schritt erfolgt unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den AP 5 und 7 die Herstellung und eingehende Funktionserprobung einiger kompletter Reformersysteme bei Truma und IMM. Darüber hinaus wird die Langzeitstabilität (1000 h) unter thermischen Wechsellasten untersucht.

Der Projektplan sah für das ICT-IMM folgende Meilensteine vor:

- Vorliegen eines nach dem neuen Fertigungsverfahren hergestellten Reformerreaktors (AP4)
- Vorliegen eines Siebdruckverfahrens für geprägte Strukturen und abgeschlossene Verifizierung der Langzeitstabilität der Beschichtungen (AP5)
- Vorliegen kostenoptimierter und stabiler Katalysatorbeschichtungen (AP7)
- Abschluss 1000-h-Langzeittest des neuen Reformerprototypen (AP8)

Alle Meilensteine wurden erfüllt, wobei der Meilenstein zu Arbeitspaket 8 im Rahmen des Tests des Gesamtsystems bei Truma erfüllt wurde.

Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt drei Mittelumwidmungen beantragt. Die erste Änderung war aufgrund einer Beratungsleistung für die Lasermaterialbearbeitung der geprägten

Platten erforderlich. Eine zweite Umwidmung wurde notwendig, weil bei der Herstellung und Charakterisierung neuer Katalysatorformulierungen Mehrkosten aufgelaufen sind, die in der anfänglichen Planung keine Berücksichtigung gefunden hatten. Die dritte Umwidmung erfolgte aufgrund unerwarteter Schwierigkeiten bei der Entwicklung des Folgeverbundwerkzeugs. Der ursprünglich vorgesehene Partner für die Entwicklung des Werkzeugs hat die Fertigung nach dem Führen von Vorgesprächen aufgrund der Komplexität des Werkzeugs abgelehnt und ICT-IMM auf ein Konstruktionsbüro verwiesen. In der Folge hat das Konstruktionsbüro in enger Abstimmung mit ICT-IMM die Erstellung der technischen Zeichnung übernommen. Die Fertigung des Werkzeugs wurde dann entgegen der ursprünglichen Planung am ICT-IMM durchgeführt. Neben der Mittelumwidmung wurde in diesem Kontext auch eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um insgesamt zwölf Monate beantragt, da im Rahmen der regulären Projektlaufzeit nur eine erste Inbetriebnahme des Folgeverbundwerkzeugs möglich gewesen wäre. Durch die kostenneutrale Verlängerung war es möglich verschiedene Nachbesserungsarbeiten am modular aufgebauten Folgeverbundwerkzeugs vorzunehmen und einen zweiten Testlauf durchzuführen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Rahmen von Bundes- und Landesförderungen (FKZ 0327174 und (FKZ 6298a-IBS/I-9098/04) konnten bei Truma die Grundlagen- bzw. Detailentwicklungsarbeiten für ein flüssiggasbetriebenes Reformer-Brennstoffzellen-APU-System durchgeführt werden. Das Gerät mit einer Leistung von max. 250 W_{el} besteht aus einem Reformersystem auf Basis mikrostrukturierter Komponenten (Dampfreformer, Verdampfer, Shiftstufe), einer Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle und verschiedenen Subsystemen (u.a. Startbrenner, Entschwefelung, Mediendosierung, DC/DC-Wandler, MSR-Technik, Mikroprozessor-Steuerung). Ein erstes Funktionsmuster konnte im Frühjahr 2006 erfolgreich getestet werden, seitdem laufen intensive Entwicklungsanstrengungen für die technische Weiterentwicklung und Reduzierung der Systemherstellungskosten.

Der unmittelbare wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkt für die in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse ist das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unterstützte Fördervorhabens „LPG-APU - Reformer-Brennstoffzellen-APU-System für Freizeitfahrzeuge“ mit dem Förderkennzeichen 0327770A. Dieses Projekt hat maßgeblich dazu beigetragen die bereits im Vorfeld entwickelten Komponenten und Fertigungstechnologien zur Serienreife zu bringen. Im Hinblick auf die Katalysatorbeschichtung wurde der Siebdruck als geeignete Auftragungstechnik identifiziert und die hier aufzutragenden Katalysatorsysteme in geeigneter Weise optimiert. Für die Verbindungstechnik der aus einem Plattenstapel bestehenden Reaktoren wurde eine robuste Laserschweißtechnik identifiziert und erfolgreich getestet. Darüber hinaus konnte auch der Fertigungsprozess der Mikrokanäle des Verdampfers optimiert werden. Nach Etablierung der Fertigungstechnologien für die Serienfertigung richtet sich der Fokus dieses Forschungsvorhabens in erster Linie auf die Reduzierung der Herstellungskosten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die im Rahmen des Projektes vorgesehenen Entwicklungsarbeiten wurden immer mit Blick auf das gemeinsam entwickelte Gesamtsystem durchgeführt. Entsprechend erfolgten alle Detailschritte der Weiterentwicklung in enger Absprache und Kooperation mit dem Projektpartner Truma. Des Weiteren waren gemeinsame Projekttreffen in Mainz und Putzbrunn sehr hilfreich, den aktuellen Stand der Arbeiten im Auge zu behalten und zukünftige Arbeitsschritte abzustimmen. Die gute Zusammenarbeit zwischen beiden Projektpartnern zeigte sich insbesondere in den Arbeitspaketen, in denen die Partner entweder auf Know-how oder technische Komponenten des anderen Partners angewiesen waren, um die eigenen Arbeiten fortsetzen zu können. Dieses traf insbesondere auf die Entwicklung des Folgeverbundwerkzeugs, dem Langzeittest für die Deionisierungskartuschen und dem Aufbau der neuen Gesamtsysteme zu.

2 Verwertung der Ergebnisse und Nachweise

2.1 Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

2.1.1 Arbeitspaket 4: Entwicklung Reformersystem mit geprägten Blechstrukturen

Reformersysteme bestehen aus mikrostrukturierten Wärmetauscherplatten, die je nach Anwendung unterschiedlich aufgebaut sein können, jedoch immer auch Kanalstrukturen enthalten. Wenn es sich um Reaktionskanäle handelt, werden diese nach der Strukturierung mit Katalysatoren beschichtet. Sollen lediglich einzelne Funktionsmuster oder kleinerer Serien hergestellt werden, so sind Fertigungsverfahren mit einer hohen Flexibilität gefragt, um schnell Änderungen umsetzen zu können. Daher werden für auch kleinere Serien die Platten mittels nasschemischen Ätzen und dem Einsatz von Laserstrahlung strukturiert und in Form geschnitten. Sollen jedoch die Reformersysteme in die Produktion hoher Stückzahlen überführt werden, lassen die Herstellungsdauer und somit auch die Stückkosten aufgrund der materialspezifischen Dauer dieser Verfahren nur wenig senken. Sollen Kanalplatten wirtschaftlich hergestellt werden, bieten sich Blechumformverfahren in einem Verbundwerkzeug an. Die Teile werden in einem fortlaufenden Blechstreifen nach und nach mehreren Bearbeitungsschritten (Prägen, Biegen und Stanzen) unterzogen. So entstehen dann im Takt der Presse die Bleche, die anschließend nur noch beschichtet, gestapelt und verschweißt werden müssen.

Das bereits im Vorfeld entwickelte Falтреaktorkonzept konnte als Ausgangspunkt für die Arbeiten in diesem Projekt genommen werden, musste jedoch umfassend angepasst werden. Die in diesem Projekt entwickelten Varianten des Reformierreaktors und des Verdampfers aus umgeformten Blechen sollten möglichst einfach in das bestehende Reformer-Brennstoffzellen-System VeGA eingebaut und getestet werden können. Damit ist vorausgesetzt, dass sie in ihrer Form und Größe nicht wesentlich von den aktuell verwendeten Reaktoren abweichen. So wurde ein dickeres Ausgangsmaterial als in bei den Vorversuchen eingesetzt, damit es möglich war, tiefere Strukturen zu prägen und größere Kanalvolumen zu generieren. Nur so konnten in den Reaktoren mit umgeformten Blechen vergleichbare Katalysatorbeladungen und Druckverluste erzielt werden. Vorteil der überarbeiteten Kanalgeometrie war zudem ein verbessertes Umformverhalten, so dass Kraft für die Prägung aufgebracht werden musste. Auf diese Weise konnte für die anstehenden Prägeversuche eine kleinere, kostengünstigere Kniehebelpresse eingesetzt werden und zudem wird es zukünftig möglich sein, mit diesem Verfahren auch großflächigere Bleche noch wirtschaftlich zu strukturieren.

Überarbeitet wurde zudem auch die Faltechnik, die noch nicht auf die Herstellung in einem Folgeverbundwerkzeug angepasst wurde. Des Weiteren musste die Wellenstruktur, durch eine Neugestaltung der Biegeelemente, beidseitig für die anschließende Beschichtung mit Katalysatorsuspension zugänglich gemacht werden.

2.1.1.1 Entwicklung der Prägestruktur

Der erste Entwicklungsschritt auf dem Weg zum Faltreaktor war die Ausarbeitung einer geeigneten Prägestruktur. Hierzu wurden unterschiedliche Kanalstrukturen in zwei verschiedene Blechstärken geprägt und im Anschluss mit Katalysator beschichtet. Die verwendeten Prägewerkzeuge bestanden jeweils aus einem oberen und unteren Aktivteil, die über individuell angepasste Unterbauplatten in einer Presse bei der Firma Gräbener Pressensysteme GmbH eingebaut werden konnten (Abb. 1). Zunächst wurden hier rechteckige Bleche mit Kanalstruktur versehen, um Erkenntnisse über das Umformverhalten (erforderliche Kraft u.ä.) zu erhalten. Die Prägewerkzeuge konnte im Anschluss auch dazu verwendet werden die Bleche des ersten Faltreformers zu strukturieren (vgl. Meilenstein C).



Abb. 1: Werkzeugunterteil (l.); Prägeversuch in Kniehebelpresse GK 360

Abb. 2 zeigt eines der rechteckigen Testbleche der ersten Versuchsreihe. Umgeformt wurde nur der mittlere Bereich, während die Seitenflügel nicht verformt wurden. Die Kerben links und rechts dienten der Positionierung des Blechs innerhalb des Werkzeugs.

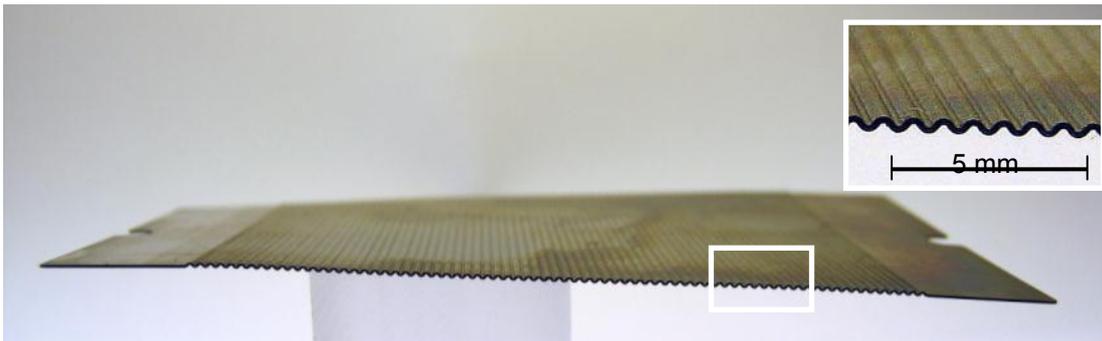


Abb. 2: Seitenansicht einer geprägten Stahlfolie (32 t Presskraft)

Bei allen geprägten Folien war eine leichte Windung um die Längsachse (Helix) zu beobachten. Da diese Torsion auf eine ungleichmäßige Ausformung der Prägestruktur hindeutete, wurden die Topografie von Folien und Werkzeug analysiert. Um die Abformqualität bei unterschiedlicher Pressenkraft beurteilen zu können, wurde die Strukturtiefe in der Mitte und am Rand (Kanalende) untersucht. Abb. 3 zeigt die Kanaltiefen der Folien, die mit unterschiedlicher Presskraft geprägt wurden und vergleicht sie mit Geometrie des Werkzeugs. So ließ sich zeigen, dass bis zu einer Presskraft von 84 t die Abformqualität der Folien immer weiter anstieg. Besonders stark veränderte sich die Kanaltiefe in der Strukturmitte bei zunehmender Presskraft. Das auch die Windung der Bleche mit zunehmender Presskraft schwächer wurde, deutete darauf hin, dass sich die Torsion auf eine ungleich verteilte Materialverformung innerhalb der Struktur zurückführen ließ.

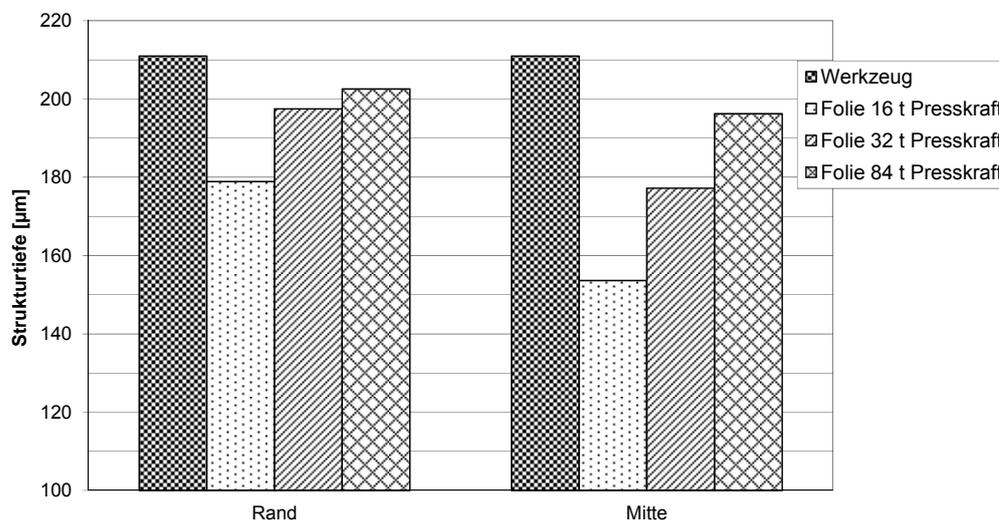


Abb. 3: Strukturiefen von Folien und Werkzeug

Aus den Prägeversuchen konnte neben der benötigten Umformkraft auch der elastische Anteil der Umformung ermittelt werden. Zudem ergaben sich wichtige Erkenntnisse über die Verjüngung des Blechs durch eine Materialbewegung aus dem Randbereich hinein in die Prägestruktur. Bei der

Entwicklung der endgültigen Kanalstruktur wurde versucht, diese Effekte durch Anpassen der Prägestruktur zu minimieren.

Mit den Probeblechen konnten zudem weitere Schritte der Reaktorherstellung getestet werden. So konnten sowohl die Reinigungsschritte im Vorfeld der Beschichtung durchgeführt werden als auch das Auftragen des Katalysators. Nach der Calcinierung konnten so die Qualität der Beschichtung und die zu erwartende Katalysatorbeladung eines Blechs bestimmt werden. Diese Informationen flossen in die weitere Entwicklung der Faltreformer bzw. Verdampfer ein.

2.1.1.2 Reformerentwicklung

Da die Herstellung des ersten Faltreformers aus diversen manuellen Arbeitsschritten bestand, wurde in Absprache mit der Truma die Form des Reaktors auf eine rechteckige Grundfläche reduziert. Diese Vereinfachung war besonders für die Entwicklung der Biegeschritte notwendig, da hier die rechtwinkligen Kanten die Bearbeitung der Bleche stark erleichterten. Entscheidend war es, nach dem erfolgreichen Aufbau der ersten Reformer die Reaktorform in das Folgeverbundwerkzeug zu integrieren, die aktuell im Brennstoffzellensystem verwendet wird.

Neben den mikrostrukturierten Blechen für die Reformier- bzw. Brennebenen mussten weitere Bleche zur Trennung der Ebenen und zum Aufheizen („Start-up“) hergestellt werden. Die Bleche, die die Reaktionsebenen voneinander zu trennen, wurden als einfache Stanzteile entworfen. Die Kreuzströmer-Bleche, die für das Aufheizen der Reaktoren benötigt wurden, bestanden aus einer Kammstruktur, die ebenfalls umgeschlagen werden musste. Auch wenn die Kontur aller Bleche in dieser Entwicklungsphase mittels Drahterosion geschnitten wurde, so wurde darauf geachtet, dass sie auch gestanzt werden können. Auf diese Weise können alle benötigten Bleche mit den bereits etablierten Bearbeitungsverfahren Stanzen, Biegen und Prägen hergestellt werden. Im Einzelnen waren dies:

- das Trennblech → Stanzen
- das Deckelblech → Stanzen
- das Reformierblech → Stanzen, Biegen und Prägen
- das Brennerblech → Stanzen, Biegen und Prägen
- das Kreuzstromblech → Stanzen und Biegen

Die Trennfolien wurden in derselben Blechstärke wie die Reformer- und Brennerfolien ausgeführt. Die Deckel- und Bodenbleche bestanden jeweils aus 1 mm starkem Material.

Wie bereits erwähnt wurden durch die Faltoptionen keine Kanäle abgedeckt, so dass die Katalysatorbeschichtung komplett nach Abschluss der Blechbearbeitung erfolgen konnte. Entlang der Biegeachsen wurden die seitlichen Flügel derart umgebogen, dass die überstehenden Blechteile deckungsgleich auf die innenliegende Struktur gebogen werden konnte. Der beim Prägeprozess entstandene Absatz am Rand der Kanalstruktur wurde dabei durch den umgebogenen Flügel

aufgefüllt. Die lagenweise notwendigen Ein- und Auslaufstrukturen entstanden erst durch alternierendes Stapeln der Brenner- bzw. Reformier-Bleche mit einem unstrukturierten Trennblech. Das Reformer-Blech besitzt einen identischen Aufbau. Die seitlichen Flügel sitzen lediglich an der gegenüberliegenden Randseite der Folie. Die Kreuzstrombleche zum Vorheizen der Komponente mit den heißen Abgasen eines Oberflächenbrenners werden durch ein seriell kombiniertes Stanz- und Biegeverfahren hergestellt. Um auf diesem Weg den Druckverlust zu verringern, wurden zwei dieser Kreuzstrombleche als Sandwich gegeneinander gesetzt und so der Kanalquerschnitt vergrößert.

Die folgende Abbildung (Abb. 4) zeigt die einzelnen Module und das in diesem Vorhaben angefertigte Biegewerkzeug. In diesem Werkzeug konnten sowohl die Reformer-/Brennerbleche als auch die Kreuzstrombleche in einem dreistufigen Prozess gebogen werden. Die dabei geforderte Präzision ergibt sich aus dem anschließenden Stapel- und Schweißprozess, bei dem die Biegefalze unzureichend gebogener Bleche aus dem Laserfokus gelangen würden und so nicht ausreichend aufgeschmolzen werden würden. Die Folge wären Undichtigkeit oder Rissanfälligkeit der verschweißten Reaktoren. Es konnte bestimmt werden, dass die Biegetoleranz in etwa der halben Blechstärke entspricht.

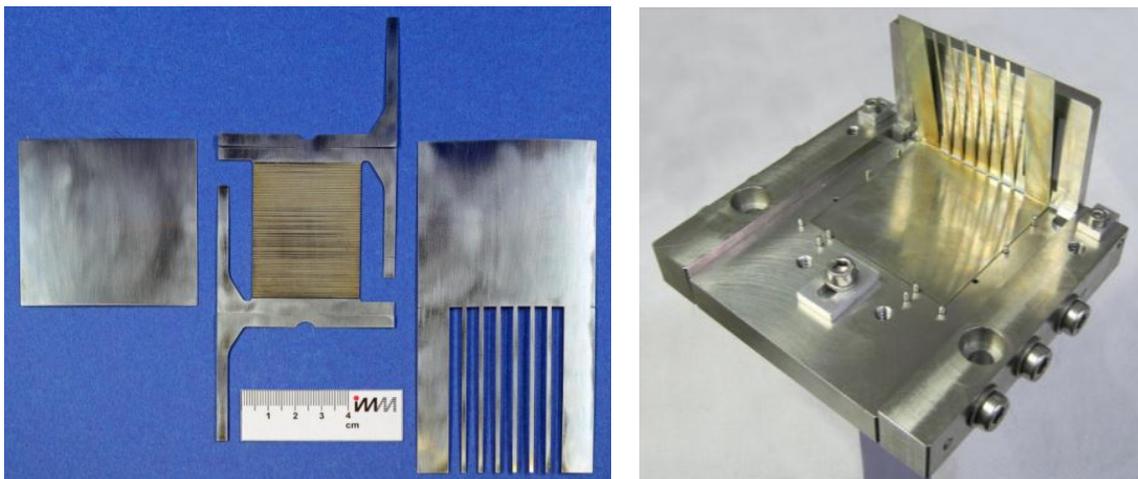


Abb. 4: Trenn-, Reformier- und Kreuzstromblech (l.); Biegewerkzeug (r.)

2.1.1.3 Verdampferentwicklung

Während der Reformer wie beschrieben aus gefalteten Blechen aufgebaut wurde, wurde der Verdampfer aus geprägten Blechen ohne seitliches Umschlagen des Materials aufgebaut. Stattdessen sollten die Rahmenteile als separate Elemente beim Stapeln der Reaktoren hinzugefügt werden. Dies hat zur Folge, dass sich die Anzahl der Bleche in einem Stapel gegenüber der gefalteten Varianten erhöht und den Aufbau und das Schweißen dadurch etwas aufwendiger macht.

Gleichzeitig bietet es aber den Vorteil, dass die Werkzeuge der Serienfertigung wesentlich einfacher und kostengünstiger aufgebaut werden können, da ohne Umschlagen der Bleche drei Bearbeitungsschritte (Folgen) im Verbundwerkzeug entfallen. Da jeder Rahmen aus zwei oder mehr Teilen bestand, die einzeln nur sehr schwer beim Stapeln in Position zu halten waren, mussten diese über außenliegende Anbindung bis zum Schweißen miteinander verbunden werden (Abb. 5). Nach dem Fixieren der Bleche mit dem Laser wurden die Anbindungen mechanisch abgetrennt. Im Anschluss konnte der Stapel im Anschluss flächig verschweißt werden.

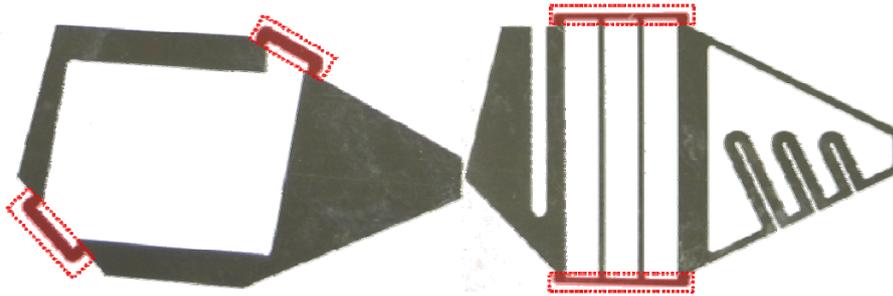


Abb. 5: Äußere Anbindung der Blechrahmen (Markierung)

Die für die Dampfüberhitzung und Propanverbrennung benötigten Kanalstrukturen wurden erneut wellenförmig geprägt. Bei dem ersten Versuchen zur Entwicklung der Reformerbleche wurde beim Prägen noch Material aus dem Randbereich in die Wellenstruktur gezogen und so kam es zu einer Einschnürung der Bleche im Bereich der Prägung. Ist das Blech um den Wellenstruktur herum „offen“, wie etwa die Brenner-Ebene des Verdampfers (Abb. 6 r.), so ließe sich die Formänderung durch eine breite Stanzkontur ausgleichen. Da das Blech der Dampfüberhitzung auf einer Seite geschlossen ist, würden durch ein Einschnüren der Prägezone Spannungen in das Blech induzieren und es würde ggf. deformiert werden. Diese Bleche ließen sich nicht stapeln. Bei der Entwicklung der Verdampfer wurde daher die Wellenstruktur weiter optimiert, um den Materialfluss zu minimieren.



Abb. 6: Geprägtes Dampfüberhitzer- (l.) und Brennerblech (r.)

Form und Größe der Verdampfer aus umgeformten Blechen gleichen denen der konventionell gefertigten Verdampfer soweit, dass alle Rohranbindung der aktuellen Produktion übernommen werden konnten. Ein Einbau in das bestehende Brennstoffzellensystem ist somit leicht möglich. Zwei Reformer-Systeme, bestehend aus einem Reformer und einem Verdampfer, wurden am ICT-IMM aufgebaut und für die weiteren Tests an Truma geliefert (Abb. 7).

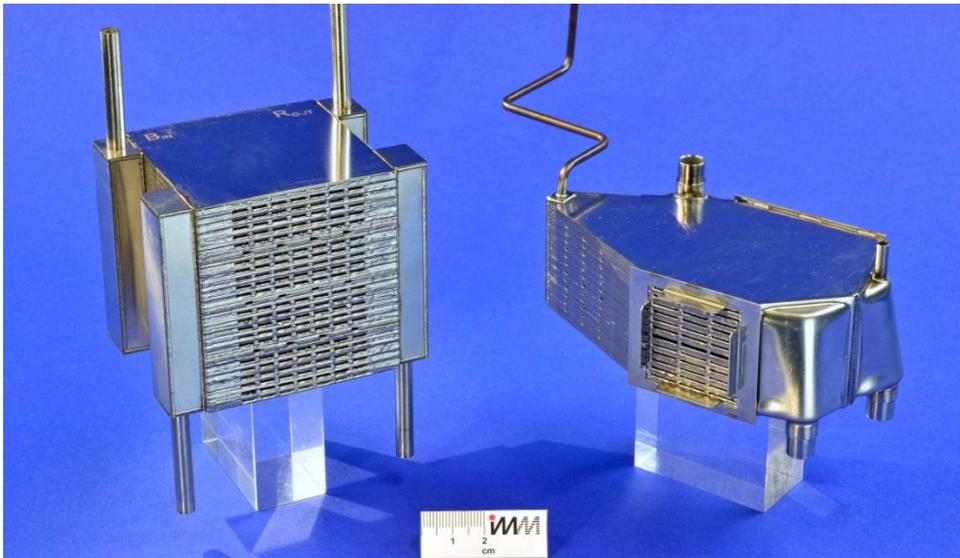


Abb. 7: Reformer (l.) und Verdampfer (r.) aus umgeformten Blechen

2.1.1.4 Folgeverbundwerkzeug

Anhand des Faltreformers mit vereinfachter, rechteckiger Form (Meilenstein C) konnten ein Fertigungskonzept entwickelt und die Funktion anhand von Tests bestätigt werden. Nun wurde im letzten Berichtszeitraum die Form der Reaktoren auf das Design der aktuell im Brennstoffzellensystem VeGA eingesetzten Reformer angepasst. Diese Anpassung stellt sicher, dass der Einbau in das bestehende Reformersystem ohne größeren Aufwand möglich ist. Dazu wurden sowohl die wabenförmige Grundform als auch die Höhe der Reaktoren übernommen. Da die Leistungsdichte geprägter Reformer noch ca. 15% geringer ausfiel, musste die Grundfläche entsprechend vergrößert werden.

In Zusammenarbeit mit dem beauftragten Konstruktionsbüro wurde zunächst ein Methodenplan erarbeitet (Abb. 8), in dem die nötigen Bearbeitungsschritte (Folgen) im Werkzeugs festgelegt wurden. Dabei konnten alle Anforderung an das fertige Bauteil im Folgeverbund umgesetzt werden. Der Methodenplan wurde mit der Erstellung eines Streifenbildes abgeschlossen. Das Streifenbild detaillierte noch einmal alle Umform- und Stanzabläufe im CAD.

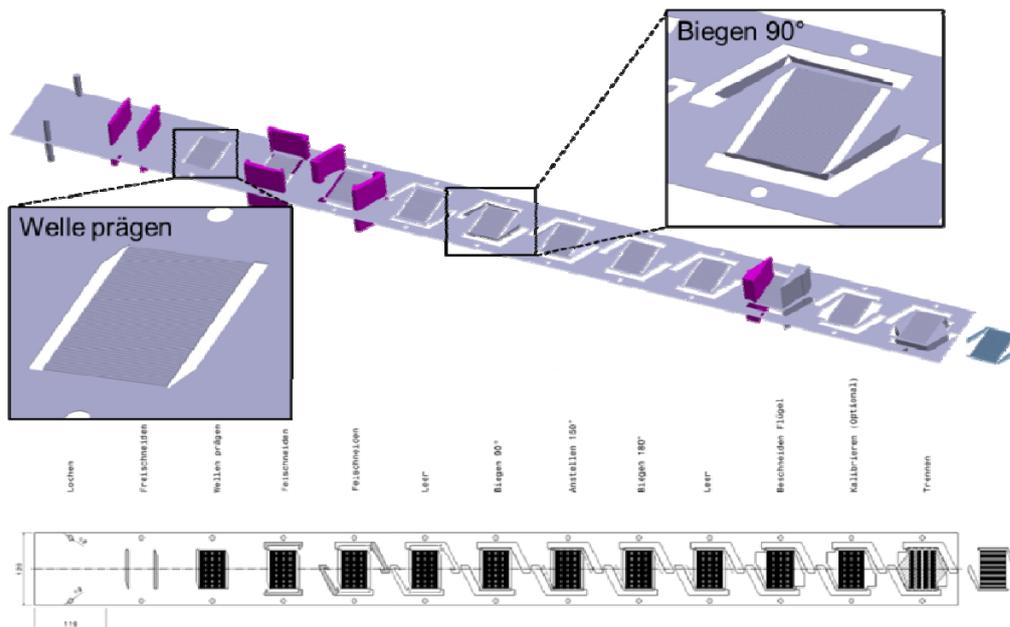


Abb. 8: Streifenbild

Basierend auf dem Streifenbild wurde anschließend das gesamte Werkzeug konstruiert. Die Aktivteile wurden auf drei Einschübe aufgeteilt, damit die Funktion der Abschnitte vor dem Einbau in die Presse einzeln getestet werden konnte (Abb. 9). Während sich die Länge des Werkzeugs aus dem Vorschub und der Anzahl der Folgen ergab, wurden die Höhe und die Breite an die Presse angepasst, auf der das Werkzeug laufen sollte. Die Maße des Werkzeugs beliefen sich so auf 1470 x 450 x 600 mm.

Die Fertigung des Werkzeugs konnte weitgehend am ICT-IMM durchgeführt werden. Lediglich die durchgehenden Grundplatten sowie die Platten der Säulenführung wurde aufgrund ihrer Größe von Zulieferern hergestellt. Als Material für die Grundplatten des Folgeverbundwerkzeugs sowie für die Hauptplatten der Säulengestelle wurde ein unlegierter Baustahl gewählt, der sich wegen guter Zerspanbarkeit und Formstabilität im Werkzeugbau bewährt hat. Die mechanische Bearbeitung dieser Platten wurde an Dienstleister übergeben, denen es möglich war die teils über einen Meter langen Platten mittels Brennscheiden und CNC-Fräsen mit der geforderten Präzision herzustellen. Einzelne Durchbrüche, die auf diese Weise nicht gefertigt werden konnten, wurden im Anschluss am ICT-IMM funkenerosiv geschnitten. Hierfür wurden vom Dienstleister nach Absprache lediglich die Startbohrungen gesetzt.

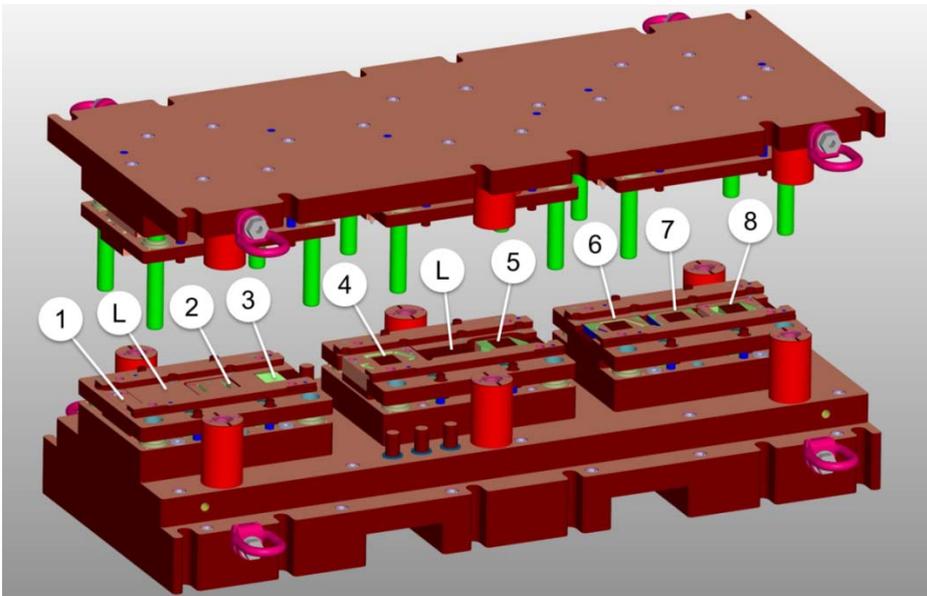


Abb. 9: CAD-Modell Folgeverbundwerkzeug

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------|
| (1) Sucherlöcher schneiden | (6) Anstellen 130° |
| (2) Freischneiden des Prägebereichs | (7) Drücken 180° |
| (3) Prägeeinheit | (8) Innenkontur schneiden |
| (4) Außenkontur schneiden | (L) Leerfolge |
| (5) Biegen 90° | |

Alle Teile des Werkzeugs, die unmittelbar mit der Bandführung und Blechumformung zu tun haben, wurden aus einem legierten Kaltarbeitsstahl hergestellt, der aufgrund seiner gute Maßhaltigkeit und Zähigkeit eingesetzt wurde. Die Scheid- und Biegeelemente, die im Produktionsbetrieb den höchsten mechanischen Belastungen ausgesetzt werden, wurden zudem gehärtet. Die hauseigene EDM-Abteilung des ICT-IMM hat die Schneidstempel und –matrizen gefertigt. Aufgrund der geringen Blechstärke wurde hier ein Schnittspalt von umlaufend 20 µm eingestellt. Die Führung der Scheidstempel im Werkzeugoberteil wurde entsprechend enger toleriert. Damit der Blechabfall in den Schneidmatrizen nicht verkantet und selbstständig aus dem Werkzeug fällt, wurden Schneidkonturen nach unten geweitet. In den darunterliegenden Platten wurden entsprechen größere Durchbrüche geschnitten, damit der der Abfall ungehindert weiter zum Abfallloch der Presse befördert werden konnte.

Auf einer Servopresse der Firma Biebertaler Stanz- und Umformtechnik konnte eine erste Ausprobe des Folgeverbundwerkzeugs erfolgen (Abb. 10 und Abb. 11 l.). Hierbei konnte bereits die Funktion aller Folgen gezeigt werden. Nach dem Einrichten konnte im halbautomatischen Betrieb der Presse ca. 100 Bleche hergestellt werden (Abb. 11 r.). Lediglich die geforderte Strukturtiefe konnte hier noch nicht erreicht werden, da die zylindrischen Distanzen noch nicht auf ihr endgültiges Maß gebracht

worden waren. Zudem wurden die Bleche mit zunehmender Betriebsdauer nicht mehr zuverlässig gefaltet. Bei etwa einem Viertel der Bleche wurden die angestellten Laschen anstatt nach innen wieder nach außen gedrückt. Als Gegenmaßnahme wurden die Biegeschrägen im Stempel abgeflacht und die Aufnahmestruktur auf diese Weise breiter gemacht. In einem zweiten Probelauf funktionierten die Biegeschritte zuverlässig. Lediglich die Prägetiefe musste in weiterer Feinabstimmung des Werkzeugs angepasst werden.



Abb. 10: Werkzeugtest (Fa. Biebertaler Stanz- und Umformtechnik)

Auch wenn zum Zeitpunkt des Berichts die gewünschte Kanaltiefe noch nicht erreicht werden konnte, so konnte doch die generelle Funktion des Folgeverbundwerkzeugs bestätigt und die Überführung des Faltreaktorkonzepts in die Serienfertigung gezeigt werden.

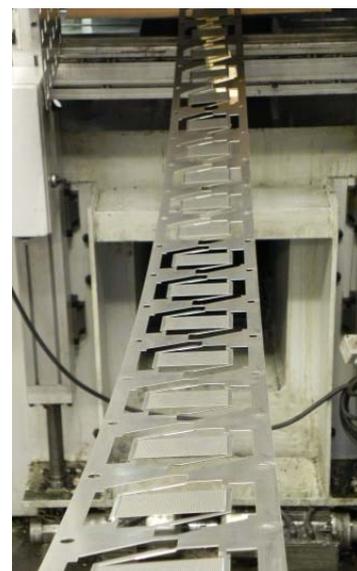


Abb. 11: Aufgespanntes Werkzeug (l.); fertige Teile im Stanzstreifen (r.)

2.1.2 Arbeitspaket 5: Anpassung des Katalysatorauftrags an geprägte Strukturen inkl. Dauertest

Für die Beschichtung der geprägten Kanalstrukturen wurde eine Adapterplatte entwickelt, die über vorhandene Spannsysteme auf der Siebdruckmaschine montiert werden kann (Abb. 12). Die Platte ist so gestaltet, dass das zu bedruckende Blech an geometrischen Strukturen ausgerichtet werden kann (Abb. 13; rote Markierung) und die Oberseite der Platte bündig mit dem Blech abschließt. Die in die Adapterplatte integrierte Unterdruckspannvorrichtung (Abb. 13; gelbe Markierung) zieht das Blech plan an und hält es während der Bedruckung in Position. Dafür ist es nötig, dass das Blechformteil später im Folgeverbundwerkzeug nicht vereinzelt wird, sondern im Rest des Blechstreifens angebunden bleibt. An diesem Rahmen, der eigentlich zum Stanzabfall gehört, wurden die Umformteile auf der Siebdruckmaschine ausgerichtet. Zudem boten die Rahmen die nötige Fläche, um mittels Unterdruck das Blech während des Druckvorgangs in Position zu halten. Um die optimale Größe des Rahmens zu wählen, musste ein Kompromiss aus maximaler Haltekraft und minimalem Materialabfall gewählt werden.

Für eine wirtschaftliche Beschichtung in Serienfertigung ist es nötig, mehrere Bleche in einem Arbeitsschritt gleichzeitig mit Katalysator bedrucken zu können. Dies ist dann möglich, wenn nach der Blechbearbeitung mehrere Formteilen innerhalb eines Blechstreifens belassen werden. Auf diese Weise muss nicht jedes Formteil einzeln ausgerichtet werden.



Abb. 12: Siebdruckmaschine

Die Anbindung an den Rahmen muss in der Produktion so gestaltet sein, dass sie den Querkräften beim Siebdruck standhält und nach der Calciniierung die bedruckten Bleche mit vertretbarem Aufwand herausgetrennt werden können. Für die ersten Versuche wurde diese Anbindung noch über Schweißpunkte (Laser) erzeugt. Im Folgeverbundwerkzeug wird diese Anbindung ausgeschnitten.

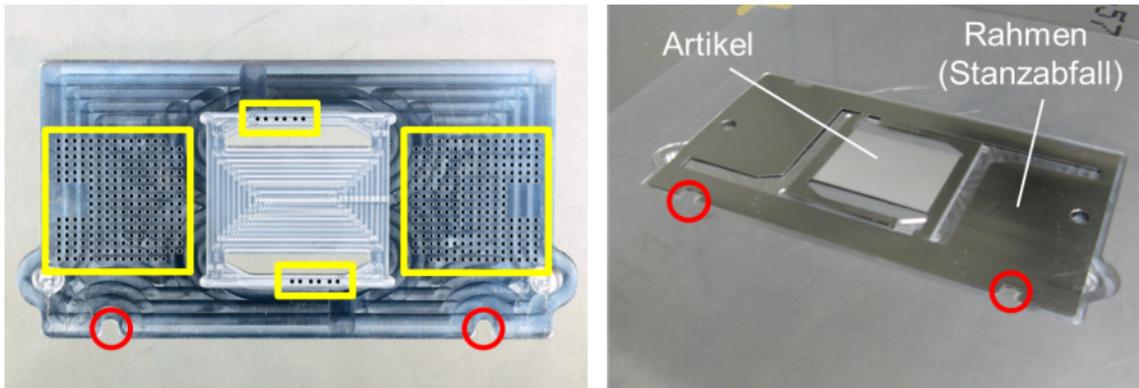


Abb. 13: Spannvorrichtung der Adapterplatte (l.); eingelegtes Blech (r.)

Nach dem Beschichten und Kalzinieren der Bleche kann das Blech mit einem einfachen Werkzeug aus dem Rahmen gelöst werden. Die aktuell verwendeten Bleche mit geätzten Mikrostrukturen werden durch einen Laserstrahl aus dem Nutzen geschnitten. Das unter Druck in die Schmelzzone eingeblasene Inertgas kann einen unerwünschten Katalysatorabtrag verursachen. Auch hier ergeben sich für die Umformtechnik Vorteile, da das Heraustrennen der Bleche wesentlich schonender für die Beschichtung wäre.

Bereits durch das Einlegen der Bleche in die Vakuum-Spannvorrichtung wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen. Zum einen konnte die für das Bedrucken der Kanäle geforderte Positioniergenauigkeit über die Rahmen erreicht werden und zum anderen war die Haltekraft ausreichend groß, um die Rahmenbleche während des Bedruckens in Position zu halten.

Die Druckversuche wurden mit der Standardsiebdrucksuspension des Reformerbrennerkatalysators durchgeführt. Zur Identifizierung geeigneter Druckbedingungen wurden unterschiedliche Anpressdrücke in Kombination mit mehreren Siebdruckformdistanzen und Druckgeschwindigkeiten getestet. Des Weiteren wurden unter anderem das Rakelprofil und die Rakelhärte variiert.

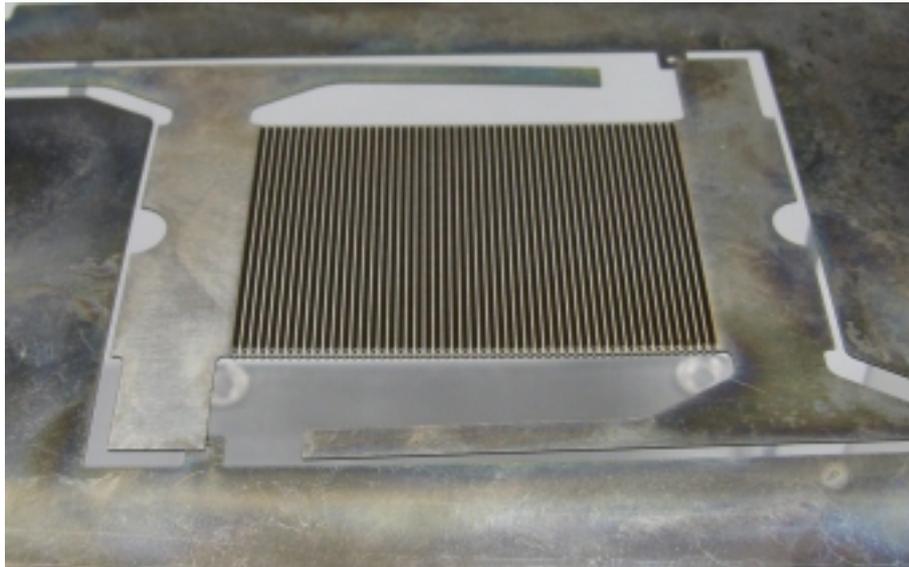


Abb. 14: Einwandfreien Beschichtung auf einer geprägten Reaktionsplatte.

Mit Hilfe voroptimierter Druckparameter ließen sich die wellenförmigen Kanäle mit der Suspension vollständig auffüllen. Allerdings war anfänglich ein Überdrücken des Substrates zu beobachten, welches sich insbesondere durch eine Beschichtung der am linken und rechten Rand liegenden Wellenberge äußerte. Eine Reduzierung des Anpressdruckes war in diesem Zusammenhang nicht zielführend. Letztlich gelang durch eine geeignete Anpassung der Parameter den Pastenfluss zu optimieren und einwandfreie Katalysatorbeschichtungen auf die Kanalstrukturen geprägter Reaktionsplatten aufzutragen (Abb. 14).

Nach dem Kalzinieren der mittels Siebdruck mit Katalysator beschichteten Reaktionsplatten wurde in monatlichen Abständen ein Abblasetest durchgeführt, mit dem die Haftfestigkeit der Katalysatorschicht geprüft wurde. Auch nach mehreren Monaten konnte kein Gewichtsverlust infolge des Haftfestigkeitstests festgestellt werden.

2.1.3 Arbeitspaket 6: Entwicklung mikrostrukturierter Kondensator

Abb. 15 zeigt den Kondensator, der am ICT-IMM für die Kondensationsaufgabe des Truma-Systems ausgelegt und gefertigt wurde. Es handelt sich dabei um einen geprägten Plattenstapel, der im Kreuzstrom durch ein Gebläse gekühlt wird. Der Kondensator wurde am ICT-IMM mit dem hauseigenen Laser verschweißt. Der Plattenstapel des Kondensators hat eine Länge von 148 mm, bei einer Breite von 40 mm und einer Höhe von 44 mm, was ca. 30% des Platzbedarfes entspricht, den der von Truma aktuell verwendete konventionelle Kondensator beansprucht.

Die Auslegungsrechnung ging von folgenden Daten aus: Für die Kühlluft wurde ein Normvolumenstrom von 1000 L/min berechnet, die Kühlluft wird dabei von 20 °C auf 35 °C erwärmt.

Der Druckverlust auf der Kühlluftseite beträgt nur 3 mbar. Die erforderliche Leistungsaufnahme des Ventilators für die Bereitstellung der Kühlluft wurde zu 7 W (angenommener Wirkungsgrad: 70 %) berechnet. Dieser Wert war nicht vorgegeben, sondern wurde rechnerisch unter Annahme idealer Bedingungen (keine Wärmeverluste) ermittelt. Das Prozessgas bestand aus 35,5 L/min Luft mit einem Wassergehalt von 23,8 Vol.%, die auf 42 °C abgekühlt werden soll. Die Kondensationsleistung beträgt somit 320 W bei einem Kondensatmassenstrom von 290 g/h. Abb. 15 zeigt ein CAD Modell des Kondensators mit Anschlüssen und Gebläse zur Bereitstellung der Kühlluft. In dem gezeigten Aufbau sind die Anschlüsse aus Kunststoff gefertigt, um den Kondensator thermisch zu entkoppeln, damit die Verluste zu minimieren und somit eine Wärmebilanzierung zu ermöglichen.

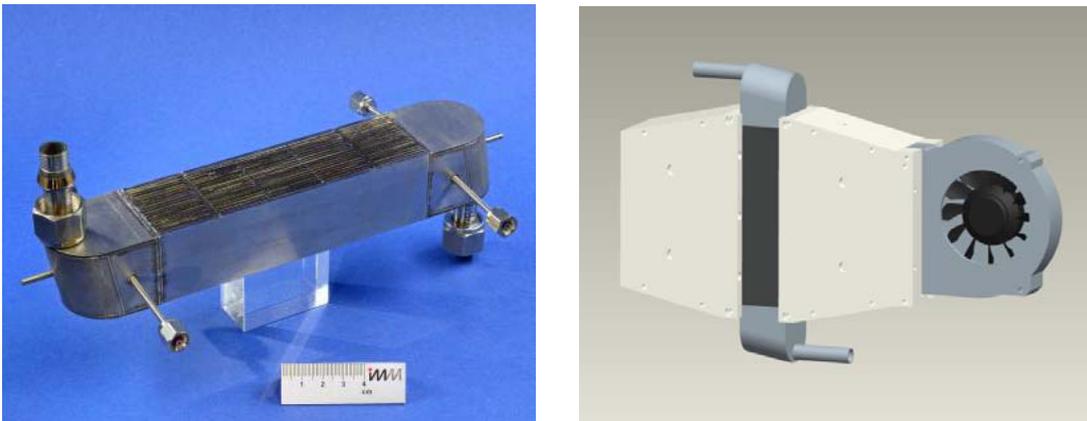


Abb. 15: Kondensator: Foto (l.) und CAD-Bild mit Anschlüssen und Gebläse (r.)

Ein Luftstrom wird mittels eines thermischen Massendurchflussreglers dosiert und durch einen elektrischen Gasheizer auf die gewünschte Temperatur erwärmt. Parallel dazu wird über einen druckbeaufschlagten Vorratsbehälter mittels eines weiteren thermischen Massendurchflussreglers ein Wasserstrom dosiert und einem Verdampfer zugeführt. Das durch Mischen beider Ströme entstehende überhitzte Luft-/Wasserdampfgemisch wird so eingestellt, dass es von Temperatur, Wassergehalt und Wärmekapazitätsstrom dem Strom entspricht, der im System der Firma Truma dem Kondensator zugeführt wird (Anoden- und Kathodenabgas).

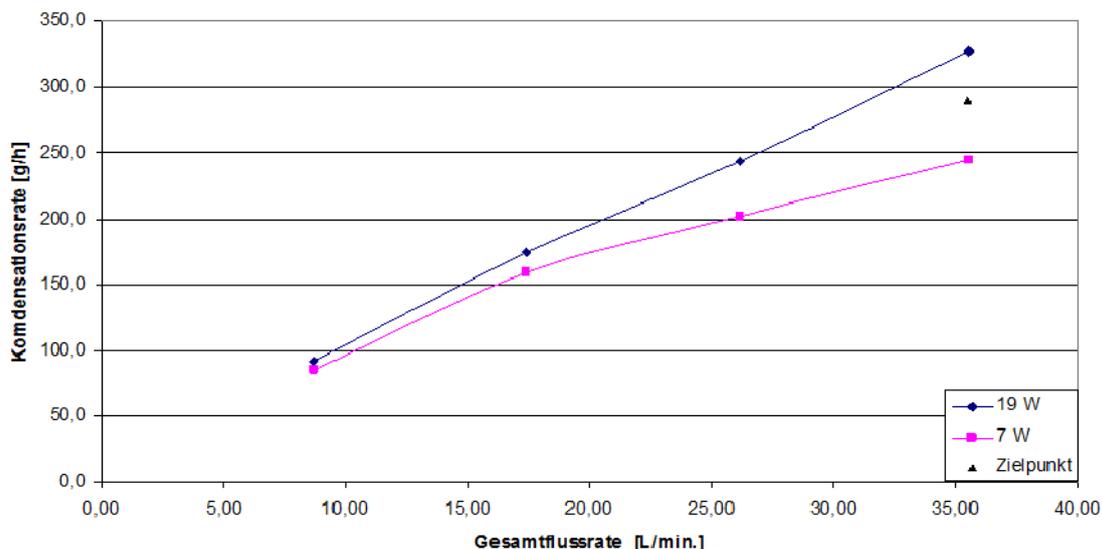


Abb. 16: Kondensatstrom in Abhängigkeit vom Volumenstrom feuchter Heißluft

Das zweiphasige Gemisch aus feuchter Luft und flüssigem Wasser wird dann durch einen Auffangbehälter geleitet, um die auskondensierte Wassermenge zu bestimmen, wobei darauf zu achten ist, die Kondensationsleistung des Kondensators nicht zu verfälschen. Die Kühlluftversorgung erfolgt durch ein Gebläse des Typs, wie er in der APU eingesetzt wird und das von Truma bereitgestellt wurde. Somit konnte sichergestellt werden, dass die Kühlleistung realistisch war.

Der Kondensator wurde bei zwei Leistungsstufen des Ventilators getestet, indem die Kondensatmenge in Abhängigkeit vom Volumenstrom der feuchten Heißluft bestimmt wurde. In Abb. 16 ist zu erkennen, dass mit der geringeren Leistung von 7 W die erwünschte Kondensatmenge nicht auskondensiert werden konnte. Bei einer Gebläseleistung von 19 W wurde hingegen mehr als die erwünschte Kondensatmenge auskondensiert. Der Kühlvolumenstrom betrug hier 750 L/min bei einem Druckverlust von 2,93 mbar, was den Auslegungsrechnungen nahe kommt. Aus dem Diagramm geht zudem hervor, dass der für das APU System erforderliche Kondensatstrom mit dem Kondensator bei einer Leistungsaufnahme von weniger als 19 W zu erreichen ist.

2.1.4 Arbeitspaket 7: Entwicklung kostengünstiger Katalysatorbeschichtungen für Reformer und katalytische Brenner

Für die Entwicklung der kostengünstigeren Katalysatorbeschichtungen wurden zwei Versuchsanlagen aufgebaut, mit deren Hilfe die Katalysatortests durchgeführt wurden. Die erste Versuchsanlage wurde für das Reformieren von Propan aufgebaut. Ein Verfahrensfleißbild der Versuchsanlage ist in Abb. 17 gezeigt. Wasser wurde durch einen thermischen Massendurchflussregler in einen Verdampfer

geleitet. In diesem wurde es durch elektrische Energie (Heizpatronen) verdampft. Der Wasserdampf wurde dann mit dem Propan gemischt, das durch einen zweiten thermischen Massendurchflussregler zugeführt wurde. Das Gasmischung konnte dann entweder am Reaktor vorbei im Bypass geleitet werden oder durch den Reaktor, der ebenfalls elektrisch beheizt war. Die Messung des Bypass ist wichtig für die Kontrolle der Dosier- und Analysengeräte. Bei den eingesetzten Reaktoren handelte es sich um mikrostrukturierte Testreaktoren, die ebenfalls elektrisch beheizt wurden. Der Katalysator lag dabei, genau wie im späteren Reformer, als Beschichtung vor. Für jeden getesteten Katalysator wurde ein neuer (allerdings einfach aufgebaut) Reaktor hergestellt. Das Produktgas, das hauptsächlich aus Wasserstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, Kohlenmonoxid, nicht umgesetztem Propan und Spuren von Methan bestand, wurde dann alternativ in den on-line GC (s. Abb.16) geleitet oder über eine Kühlfalle zum Mikro-GC, da letzterer Wasser nur in Mengen bis 5 Vol.% messen konnte.

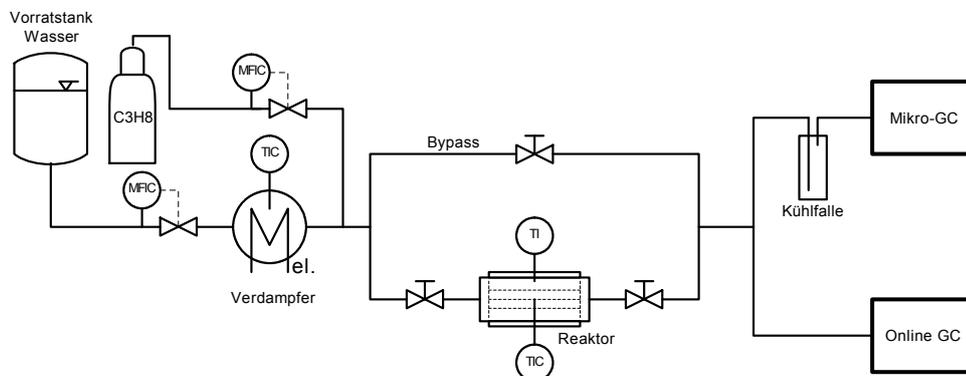


Abb. 17: Fließbild der Versuchsanlage für die Propanreformierung.

Eine weitere Versuchsanlage wurde für die katalytische Verbrennung von Propan aufgebaut. Das Verfahrensfließbild dieser Versuchsanlage ist in Abb. 18 gezeigt. Bei dieser wurden Luft und Propan durch je einen thermischen Massendurchflussregler dosiert und dann gemischt. Anschließend wurde das Gasmischung entweder am Reaktor vorbei im Bypass oder durch den elektrisch beheizten Reaktor geleitet. Die Zusammensetzung des Eduktgasmischung sowie des Produktgases wurde mit einem on-line GC analysiert.

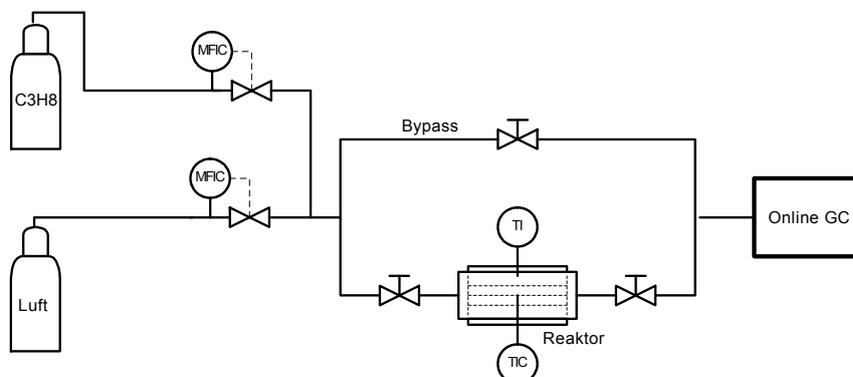


Abb. 18: Fließbild der Versuchsanlage für die katalytische Verbrennung von Propan.

2.1.4.1 Reformerkatalysator

Zur Kostenreduzierung des Reformerkatalysators wurde zunächst versucht, nicht die Formulierung sondern die aufgetragene Masse des Katalysators zu reduzieren. Dafür wurde ein Testreaktor mit 30 % der Menge des Katalysators (in der Herstellungsprozedur analog dem aktuell angewendeten Siebdruckverfahren) beschichtet, um die Grenze der Belastbarkeit des Katalysators besser ausloten zu können. Der Reaktor wurde bei teilweisem Umsatz (86 %) für eine Dauer von 200 h betrieben, ohne ein Anzeichen von Desaktivierung zu zeigen. Dann wurde der Durchfluss des Propan/Wasserfeeds (Steam to Carbon: 4.0) reduziert, um die Volume Hourly Space Velocity (VHSV) zu bestimmen, bei der der Katalysator gerade noch vollen Umsatz zeigt. Die Ergebnisse (**Abb. 19**) haben gezeigt, dass der Katalysator bereits nahe der maximalen Belastbarkeit betrieben wird und daher durch die bloße Reduzierung der Katalysatormasse keine Kosteneinsparung erfolgen kann.

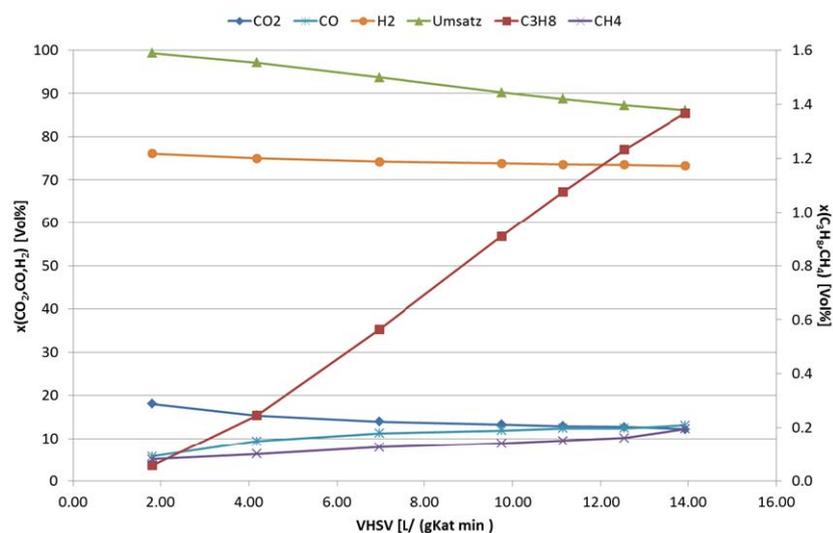


Abb. 19: Abhängigkeit des Umsatzes und der Produktzusammensetzung vom Feedvolumenstrom ausgedrückt als Volume Hourly Space Velocity (VHSV) für den Reformerkatalysator #1.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden sieben weitere Katalysatoren mit dem bislang eingesetzten Edelmetallgehalt hinsichtlich ihrer VHSV verglichen. Für die Katalysatoren ließen sich zwar unterschiedliche Maximalwerte für die VHSV finden, allerdings war keiner dieser Werte so hoch, dass sich daraus eine signifikante Kosteneinsparung ableiten ließ.

Während die bisher untersuchten Katalysatorschichten auf der Basis kommerzielle Katalysatorpulver zweier Anbieter basierten, wurden die nachfolgend diskutierten Katalysatoren durch eine Imprägnierung eines Aluminiumoxids selbst hergestellt. Insgesamt kamen zwei edelmetallhaltige Precursor zum Einsatz, die in drei Konzentrationsstufen aufgebracht wurden, wobei die höchste Konzentrationsstufe der Edelmetallkonzentration der kommerziellen Katalysatoren entspricht. In den anderen Stufen wurde die Edelmetallkonzentration um 50 % bzw. um 80 % reduziert. Diese

resultierenden sechs Katalysatoren wurden bei drei VHSV-Werten untersucht. Der kleinste Wert entspricht dabei der Belastung, die im derzeitigen Brennstoffzellensystem VeGA zur Anwendung kommt. Bei der zweiten Einstellung wird diese Belastung verdoppelt und bei der dritten verdreifacht. Für alle Katalysatoren wurde bei einfacher Belastung ein vollständiger Umsatz erreicht. Bei doppelter Belastung konnten nur noch die Katalysatoren mit einer nicht reduzierten Edelmetallkonzentration das Propan vollständig umsetzen. Bei den Katalysatoren mit einer um 50 % reduzierten Edelmetallkonzentration wurde dagegen nicht umgesetztes Propan in einer Konzentration von 15 und 320 ppm gefunden. Bei einer weiteren Steigerung des VHSV-Wertes setzte sich dieser Trend fort. Bei allen sechs Katalysatoren wurde in einem über 300 h Stunden dauernden, mittelfristigen Stabilitätstest keine Desaktivierung beobachtet. Beispielhaft seien die Katalysatoren #9 und #10 mit einer um 50 und 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration gezeigt (**Abb. 20** und **Abb. 21**).

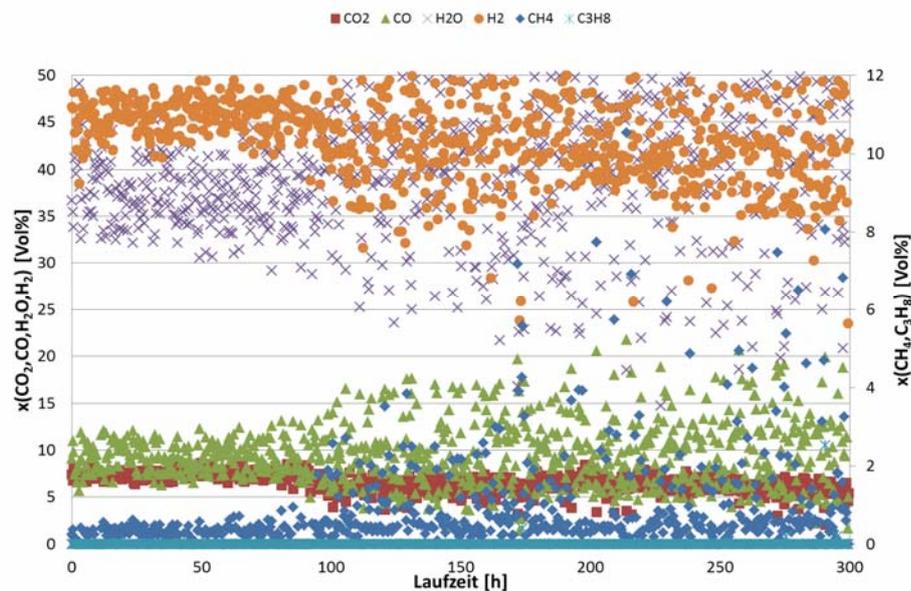


Abb. 20: Mittelfristiger Stabilitätstest für den Katalysator #9 mit einer um 50 % reduzierten Edelmetallkonzentration.

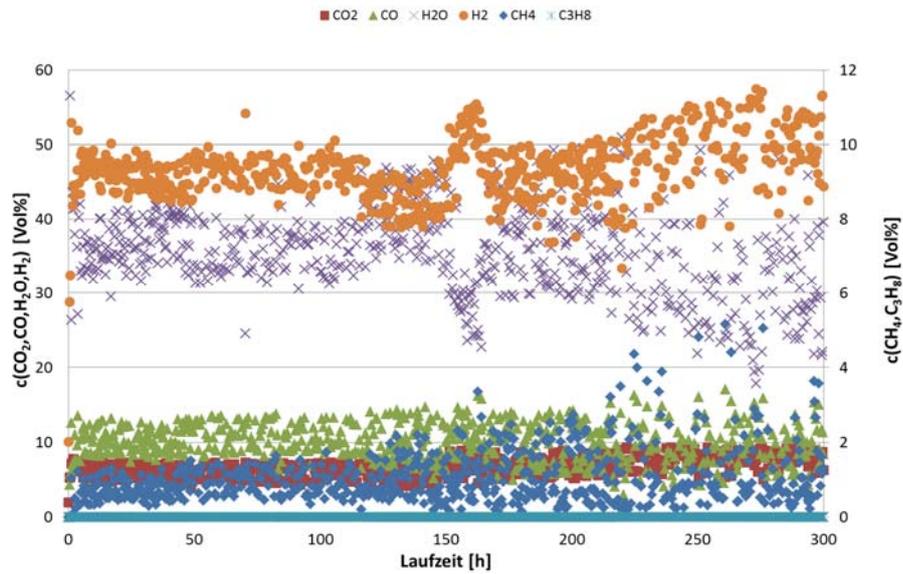


Abb. 21: Langzeittest für den Katalysator #10 mit einer um 20 % reduzierten Edelmetallkonzentration.

In weiteren Versuchen wurden die vier Katalysatoren mit einer um 50 % und 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration mit einem Oxid dotiert. Der Umsatz aller Katalysatoren war bei einer einfachen VHSV nach 1000 h immer noch vollständig. Die Unterschiede zu den nicht dotierten Katalysatoren waren marginal. Entsprechend wurden bei einer Erhöhung des VHSV-Wertes ebenfalls Propankonzentrationen im ppm-Bereich gefunden.

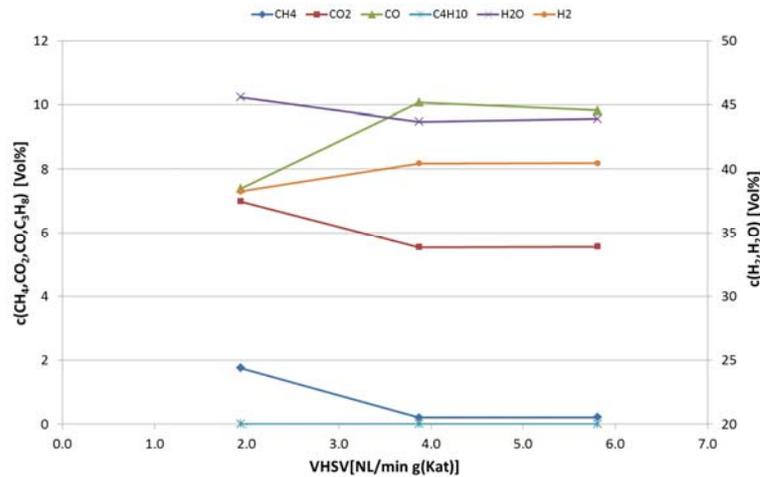


Abb. 22: Abhängigkeit des Umsatzes und der Produktzusammensetzung vom Feedvolumenstrom ausgedrückt als Volume Hourly Space Velocity (VHSV) für den Reformerkatalysator #19.

Im nächsten Schritt wurde zwei Katalysatoren mit einer um 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration hergestellt, die zusätzlich noch mit 10 % und 15 % eines Übergangsmetalls imprägniert wurden. Der

Langzeittest beider Katalysatoren zeigte nach einer kurzen Einlaufphase, dass für eine Dauer von über 1000 h ein vollständiger Propanumsatz erreicht werden konnte. Des Weiteren zeigte der Belastungstest, dass beide Katalysatoren auch bei einem doppelten und dreifachen VHSV-Wert einen vollständigen Umsatz erreichen konnten (**Abb. 22**). In der Folge wurde der Schwierigkeitsgrad des Langzeittests erhöht. Die Reaktionstemperatur der üblicherweise bei 750 °C durchgeführten Reformierungsreaktion wurde zu Beginn, in der Mitte und am Ende bei 650 °C der Laufzeit jeweils für ca. 100 h auf 650 °C reduziert. Unter diesen Testbedingungen wurde mit dem Katalysator #20 das beste Ergebnis erzielt. Über die gesamte Versuchsdauer, d.h. auch während der 650 °C-Phasen, wurde ein vollständiger Umsatz erreicht (**Abb. 23**).

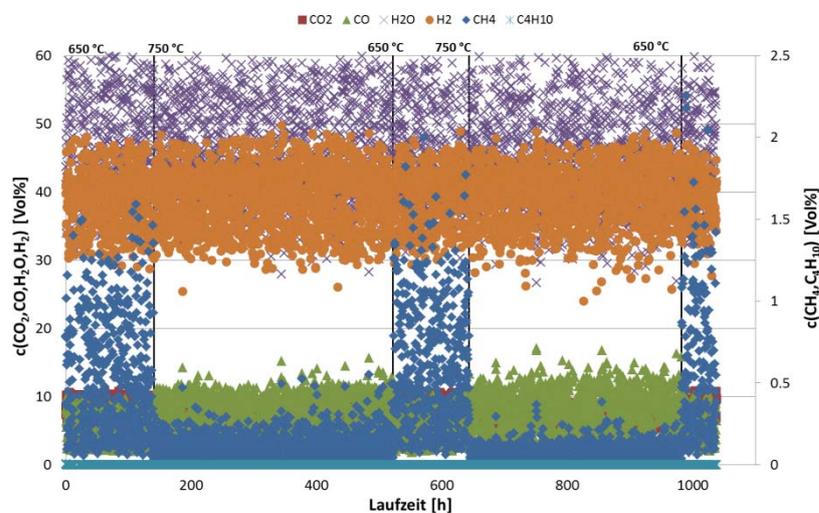


Abb. 23: Langzeittest für den Katalysator #20 mit einer um 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration und eine Übergangsmetallgehalt von 15 %.

Abschließend wurden ausgehend von Katalysator #19 mit einer um 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration und einer Übergangsmetallkonzentration von 10 % drei weitere Katalysatoren durch Dotierung mit unterschiedlichen Oxiden präpariert. Diese Katalysatoren wurden ebenfalls unter erhöhten Schwierigkeitsgrad für 1000 h getestet. Die Ergebnisse dieses Langzeittests zeigen jedoch, dass die Dotierung mit den Oxiden in keinem Fall zu einer weiteren Verbesserung der Leistungsfähigkeit geführt hat.

Neben der Kostenreduzierung wurde auch der Einfluss von Phosphorsäure und des Acetates auf den Reformer untersucht werden. Dazu wurde im Anschluss an einen erfolgreichen 1000 h-Test dieselbe Katalysatorformulierung unter identischen Bedingungen mit 2,5 ppm Phosphat und 30 ppm Acetat im zugeführten Wasser getestet. Es zeigte sich, dass auch unter diesen Bedingungen für weitere 350 h ein konstant vollständiger Umsatz des Propans erzielt werden konnte. Die Phosphorsäure und das Acetat haben somit keinen Einfluss auf die Performance des Katalysators.

2.1.4.2 Verdampferbrenner

Für die katalytische Verbrennung des Propans wurde ein spezielles Versuchsprotokoll entwickelt, um die Stabilität der Kaltstartfähigkeit zu untersuchen. Hierzu wurde für jeden der getesteten Katalysatoren im frischen Zustand, d.h. ohne Reduzierung oder Oxidation bei drei Reaktionstemperaturen (250 °C, 300 °C und 400 °C) der Propanumsatz bestimmt. Diese Testreihe wurde nach ca. 24 und nach ca. 90 Stunden Betrieb bei einer Reaktionstemperatur 750 °C wiederholt. Der für den Vergleich der Kaltstartfähigkeit herangezogene Propanumsatz für verschiedene Katalysatoren bei 250 °C ist in **Abb. 24** gezeigt.

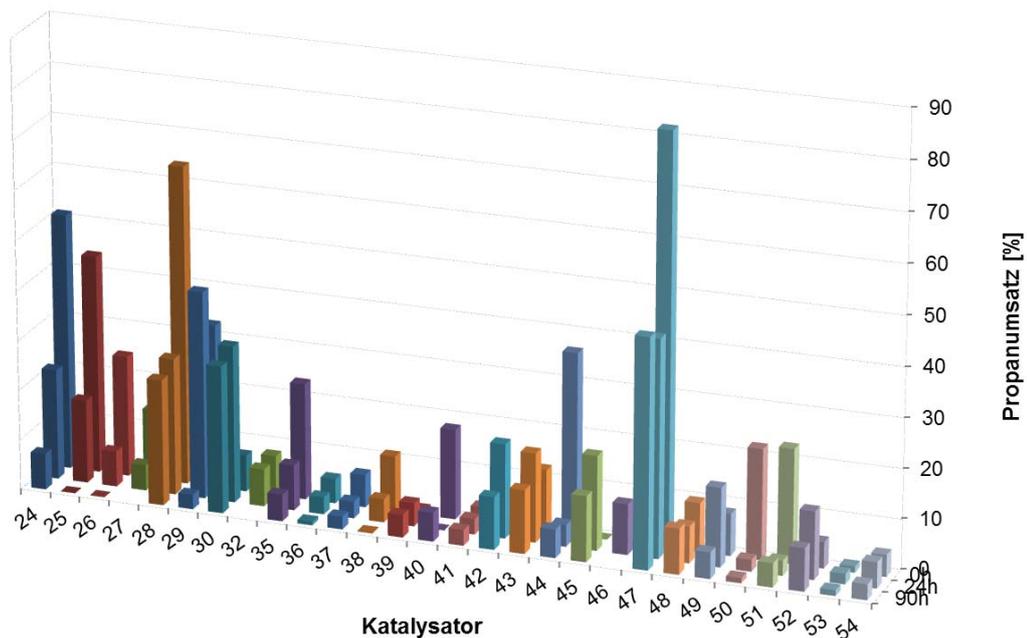


Abb. 24: Vergleich der Kaltstartfähigkeit anhand des Propanumsatzes bei einer Reaktionstemperatur von 250 °C.

Ausgangspunkt dieses Vergleichs ist der Katalysator 24, der bislang als Standardkatalysator im Brennstoffzellensystem VeGA eingesetzt wurde. Um den Propanumsatz dieses Katalysators bei dieser relativ niedrigen Temperatur zu übertreffen, wurden in der Folge eine Reihe kommerzieller Katalysatoren getestet. Anschließend wurden diese kommerziellen Katalysatoren zusätzlich mit verschiedenen Additiven imprägniert. Diese Vorgehensweise erwies sich zunächst für den Katalysator #28 als aussichtsreich. In der Folge wurde versucht eigene Brennerkatalysatoren mittels einer Imprägnierung von Aluminiumoxid herzustellen. Aus den anfänglichen Versuchen resultierten Katalysatoren, die entweder über eine zu geringe Aktivität verfügten oder bei denen die Kaltstartfähigkeit innerhalb eines kurzen Zeitraums stark abnahm. Von allen selbst hergestellten Katalysatoren erfüllte nur der Katalysator #47 die Anforderungen. Im Vergleich zum Katalysator 24

wurde beim Katalysator #47 nicht nur zu Beginn ein höherer Propanumsatz erzielt, sondern auch der Propanumsatz nach 90 h auf einem deutlich höheren Niveau stabilisiert.

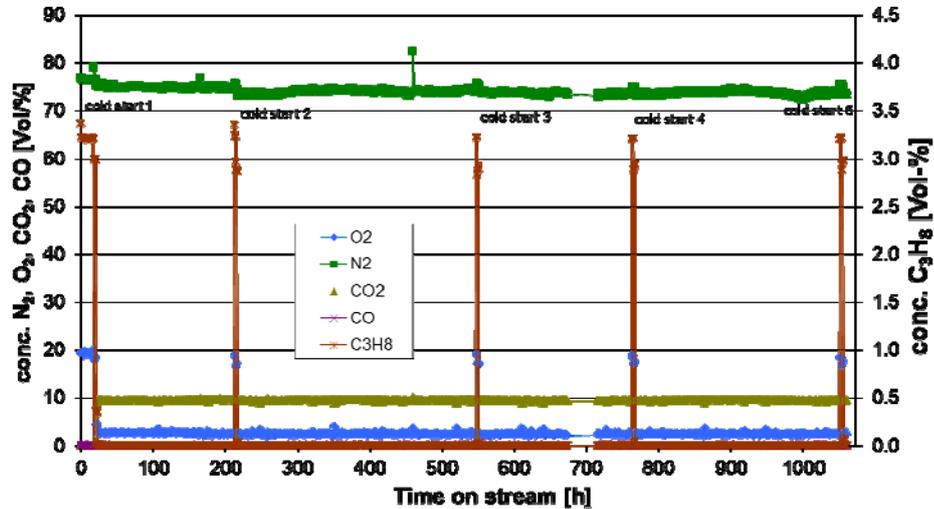


Abb. 25: Langzeittest eines Verdampferbrennerkatalysators mit einem um etwa 60 % reduzierten Edelmetallgehalt.

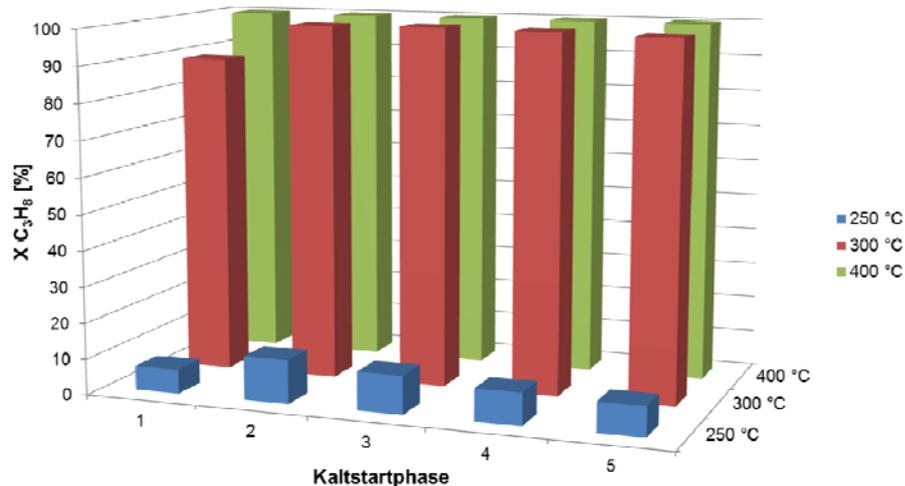


Abb. 26: Propanumsätze der Kaltstartsequenzen während eines Langzeittests mit einem Verdampferbrennerkatalysator, dessen Edelmetallgehalt um etwa 60 % reduziert wurde.

Ausgehend von Katalysator #47 wurden weiteren Katalysatoren hergestellt wobei der Fokus nun auf die Absenkung des Edelmetallgehaltes ausgerichtet war. In einem ersten Schritt wurde der Edelmetallgehalt um etwa 60 % reduziert. Der Langzeittest mit diesem Katalysator ist in **Abb. 25** gezeigt. Über die Testdauer wurden fünf Kaltstartsequenzen verteilt, bei denen die Reaktionstemperatur auf 250 °C, 300 °C und 400 °C abgesenkt wurde, um dann bei diesen Temperaturen den Propanumsatz zu bestimmen. Nach jeder Kaltstartsequenz wurde die Reaktortemperatur wieder auf die eigentliche Betriebstemperatur erhöht. Der Umsatz des Propans

von jeder Kaltstartsequenz ist zur besseren Übersicht in **Abb. 26** dargestellt. In einem zweiten Schritt wurde der Edelmetallgehalt um etwa 80 % reduziert. Die Versuchsergebnisse dieses Katalysators sind in **Abb. 27** und **Abb. 28** zusammengefasst.

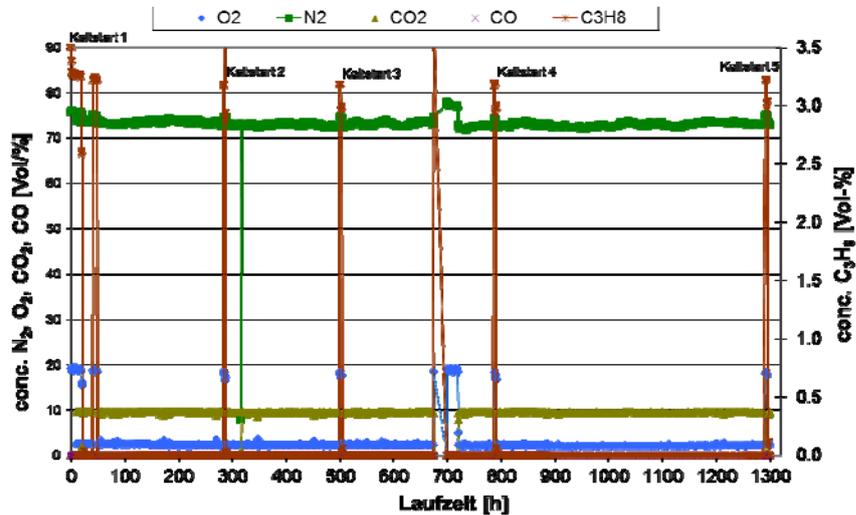


Abb. 27: Langzeittest eines Verdampferbrennerkatalysators mit einem um etwa 80 % reduzierten Edelmetallgehalt.

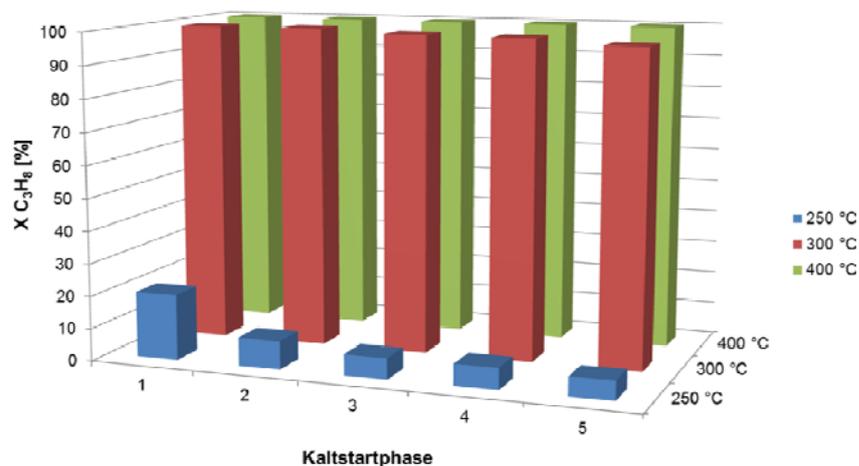


Abb. 28: Propanumsätze der Kaltstartsequenzen während eines Langzeittests mit einem Verdampferbrennerkatalysator, dessen Edelmetallgehalt um etwa 80 % reduziert wurde.

Beide Katalysatoren wiesen während der gesamten Versuchsdauer von über 1000 h ein stabiles Verhalten bei Betriebstemperatur auf. Während der Kaltstartphasen zeigte sich insbesondere bei 250 °C, dass durch die Reduzierung des Platingehaltes auch die Kaltstartfähigkeit dieser Brennerkatalysatoren im Vergleich zu Katalysator #47 vermindert wurde. Während der Propanumsatz bei dem Katalysator mit einem um etwa 60 % reduzierten Edelmetallgehalt über die Versuchsdauer konstant blieb, war der Umsatz beim Katalysator mit einem um etwa 80 % reduzierten

Edelmetallgehalt zunächst rückläufig stabilisierte sich dann aber auf einem niedrigem Niveau. Bei höheren Temperaturen von 300 °C und 400 °C wurde hingegen wie beim Katalysator #47 ein nahezu vollständiger Propanumsatz erreicht. Insgesamt war die Kaltstartfähigkeit beider Katalysatoren im Vergleich zum derzeitig verwendeten Katalysator zwar etwas niedriger, sie reichte aber dennoch aus, um diese Katalysatoren für einen Einsatz im Brennstoffzellensystem VeGA in Betracht zu ziehen.

Beim derzeitig verwendeten Reformierungskatalysator handelt es sich um ein kommerziell verfügbares Produkt. Der Gesamtanteil der aktiven Metallspezies dieses Katalysators beläuft sich auf 5 %. Mit dem Ziel die Katalysatorkosten zu reduzieren wurden nun ausgehend von diesem Katalysator eigene Katalysatorformulierungen hergestellt und getestet. Die Herstellung erfolgte durch Imprägnierung des vorbereiteten Trägermaterials mit zwei unterschiedlichen Metallverbindungen (Precursor-I und Precursor-II). Der aufgetragene Metallgehalt wurde variiert und betrug 1 %, 2 % und 5 %. Um das Einsparpotential zu ermitteln wurde nun der Bezugspreis des kommerziellen Produktes (5 % Me Standard) in Bezug zu den Beschaffungskosten der Ausgangskemikalien und den Herstellungskosten der Eigenentwicklungen gesetzt. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in **Abb. 29** gezeigt, wobei die Kosten des derzeitig verwendeten Katalysators (5 % Me Standard) als Referenzwert dienen.

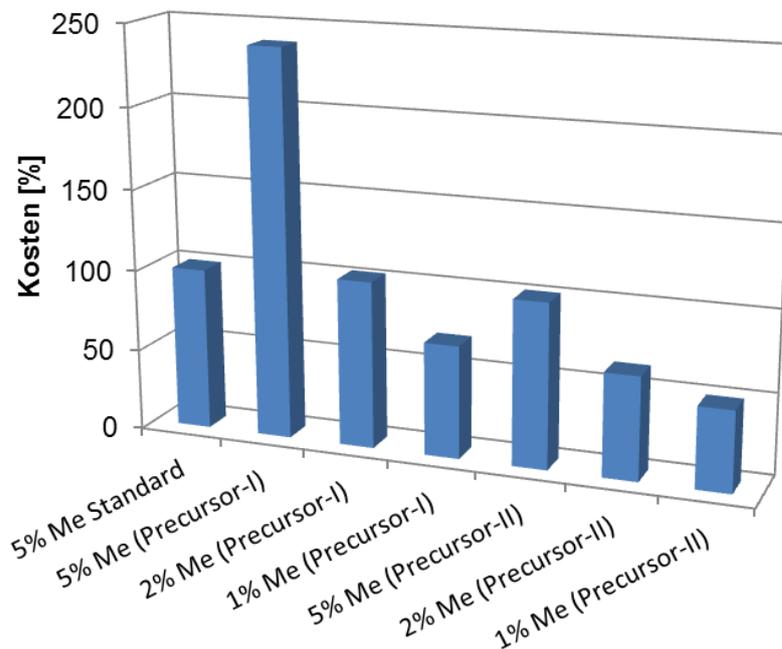


Abb. 29: Kostenvergleich für verschiedene Reformerkatalysatoren.

Die Kostenanalyse zeigt, dass die Gesamtkosten maßgeblich vom verwendeten Precursor abhängen. Ausgehend von dem relativ kostenintensiven Precursor-I, steigen die Katalysatorkosten unter Beibehaltung einer Katalysatorkonzentration von 5 % zunächst stark an. Erst bei einer Absenkung des Metallgehaltes von 5 % auf 1 % ergibt sich eine Kostenersparnis, die sich auf ca. 30 % beläuft.

Im Unterschied dazu lässt sich mit dem kostengünstigeren Precursor-II ein Katalysator mit einem Metallgehalt von 5 % herstellen, dessen Gesamtkosten nur unwesentlich von denen des kommerziellen Katalysators abweichen. Entsprechend lassen sich durch eine Absenkung der Gesamtkonzentration der Metallspezies auf 2 % und 1 % Einsparpotentiale von 35 % und 50 % realisieren.

Beim Verdampferbrennerkatalysator kommt bereits eine selbst hergestellte Katalysatorformulierung zum Einsatz. Entsprechend wirkt sich eine Reduzierung des Gesamtanteils der aktiven Metallspezies nur unwesentlich auf die Herstellungskosten aus. Vornehmlich hängen die Gesamtkosten nur von den Beschaffungskosten der Ausgangschemikalien ab. In **Abb. 30** sind die Ergebnisse des Kostenvergleichs von Verdampferbrennerkatalysatoren mit unterschiedlichen Gesamtmetallkonzentrationen zusammengefasst. Der derzeitigen verwendeten Katalysator (5 % Me Standard) dient als Referenzwert.

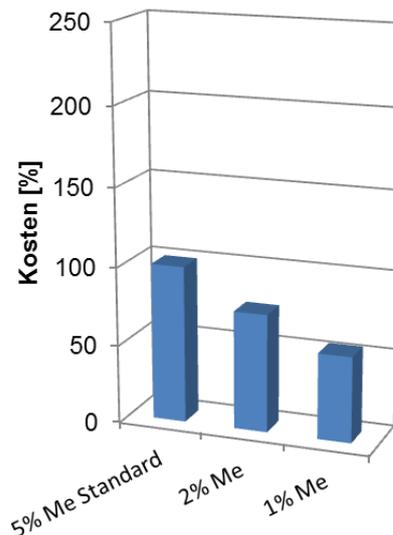


Abb. 30: Kostenvergleich für verschiedene Verdampferbrennerkatalysatoren.

Gemäß der Kostenanalyse lassen sich die Gesamtkosten des Verdampferbrennerkatalysators durch eine Absenkung des Metallgehaltes von 5 % auf 2 % bzw. 1 % um etwas weniger als 25 % bzw. 45 % reduzieren.

2.1.5 Arbeitspaket 8: Untersuchung des Durchbruchverhaltens der Deionisierungskartusche und des Einflusses von Spuren von Phosphorsäure auf die Komponenten des Reformers

Zur Untersuchung des Verhaltens der Deionisierungskartuschen, welche der Brennstoffzelle vorgeschaltet sind, wurde am ICT-IMM eine Testanlage aufgebaut. Hierzu wurden fünf Deionisierungskartuschen parallel auf ihre Langzeitstabilität untersucht. Jede der Kartuschen sollte in diesem Test mit der Laufzeit von 1000 Stunden bei einem Durchfluss von 300 ml/h Probenlösung unterzogen werden. Damit ergab sich ein Gesamtvolumen von 300 Litern Probenlösung, die mindestens durch eine Kartusche gepumpt wurden. Die Probenlösung wurde zudem auf eine Temperatur von ca. 40 °C aufgeheizt.

Die Anlage bestand aus folgenden Komponenten, die vom Projektpartner zur Verfügung gestellt wurden:

- fünf Magnet-Membran-Dosierpumpen von KNF
- eine Steuerung für die Pumpen von National Instruments inklusive Stromversorgung und LabView Steuerungssoftware
- fünf Probenkanister aus Kunststoff mit einem Fassungsvermögen von 4 Liter
- mehrere Deionisierungskartuschen zum Testen
- diverse Kleinteile wie Schläuche und Anschlussstücke sowie Ersatzkanister

Aufbauend auf diesen Komponenten entstand das verwendete Setup. Die vom Projektpartner zur Verfügung gestellte Steuerung für die Pumpen wurde mit der Leitfähigkeitsmessung in einem gemeinsamen Gehäuse integriert. Zusätzlich wurde eine Steuerung mit fünffach Temperaturregler und leistungsfähiger Stromversorgung für die 20 Heizfolien konstruiert.

Um einen Langzeittest ohne große Unterbrechungen zu ermöglichen, wurde ein Kunststofftank mit dem Fassungsvermögen von 1000 Litern mit der Testlösung aus Millipore-Wasser und Testkonzentrat befüllt. Im Laufe des Versuchs muss der Tank einmal nachgefüllt werden. Aus dem 1000 Liter-Tank wurde die Probenlösung mittels einer HPLC-Pumpe von Techlab Instruments in einen 25 Liter fassenden Vorratsbehälter aus Kunststoff gepumpt, welcher von drei Heizmanschetten mit je 500 W beheizt wurde. Der 25 Liter-Vorratsbehälter verfügte über einen Überlauf, über den die Probenlösung zurück in den 1000 Liter-Tank geführt wurde. Die HPLC-Pumpe wurde dabei mit einem Volumenstrom betrieben, der etwas höher lag als die Summe der Volumenströme der fünf Magnet-Membran-Pumpen. Damit ergibt sich ein permanentes Pumpen im Kreislauf um ein Vorheizen der gesamten 1000 Liter nicht notwendig zu machen, da nur der 25 Liter-Vorratsbehälter mit 1500 W beheizt werden musste (**Abb. 31**).



Abb. 31: Testanlage mit 25 l Vorratsbehälter (l.) und 1000 l Tank (r.)

Aus dem 25 Liter-Vorratsbehälter wurde die Probenlösung mittels Schläuchen zu den Magnet-Membran-Pumpen geführt. Diese pumpen die Lösung direkt in die Deionisierungskartuschen, welche in die 4 Liter Probenkanister eingesetzt waren. Um die Temperaturvorgabe zu erfüllen, wurden die Kanister jeweils mit vier Heizfolien auf ca. 40°C beheizt. Außerdem waren die fünf Probenkanister mit je einem Leitfähigkeits- & Temperatursensor der Firma Greisinger als auch mit je einem Thermoelement für die Temperaturregelung bestückt. (Abb. 32)

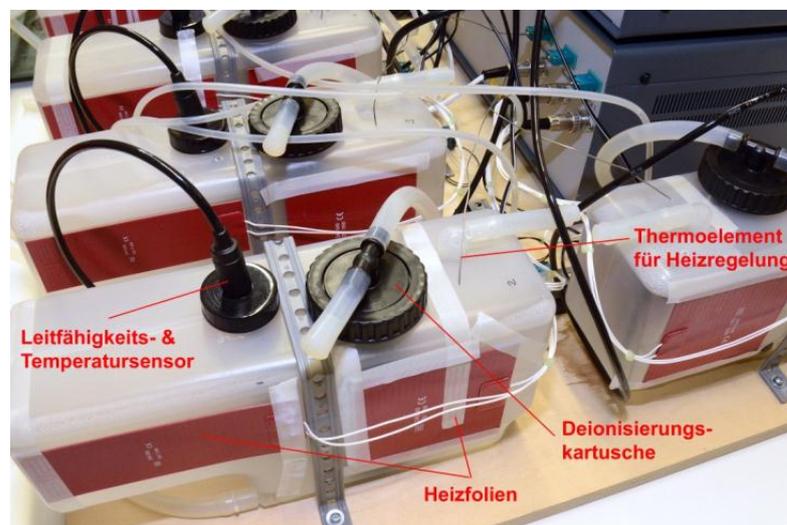


Abb. 32: Probenkanister (4 l) mit Kartuschen, Sensoren und Heizfolien

Über je einen Überlauf an jedem Probenkanister wurde das durch die Deionisierungskartuschen gereinigte „Abwasser“ über Silikonschläuche in einen Kunststoffkanister geleitet. Am Boden dieses Kanisters befand sich eine Bilgenpumpe, die mit einem Schwimmschalter versehen war und bei Überschreitung eines bestimmten Füllstandes des Kanisters die Probenlösung dem Hausabwasser

zuführte. Um die Versuchszeit zu halbieren, sollten die eingesetzten Magnet-Membran-Pumpen doppelt so hohe Flussrate fördern, wie sie im VeGA-System vorzufinden sind. Alle Pumpen erreichten unterschiedliche maximale Durchflussraten, die sich über die Versuchsdauer zudem weiter reduzierten. Um die Tests vergleichbar zu machen, wurde das Durchbruchverhalten dieser Kartuschen anstatt auf die Betriebszeit auf die geförderte Wassermenge bezogen.

Hinsichtlich der Truma-Proben, deren Leitfähigkeit nach dem Kartuschen-Durchbruch im Bereich von 30-45 μS lag, wurden Vorversuche mit unterschiedlicher Reihenfolge der Zugabe von CO_2 , Phosphat und Acetat durchgeführt, um den Ursprung der Leitfähigkeit zu identifizieren. Die Vorversuche zeigten, dass hauptsächlich die Anionen Acetat und Phosphat für die Höhe der Leitfähigkeit verantwortlich waren. Kationen als Gegenionen wurden nicht nachgewiesen. Aus diesem Grund könnten die Kationen Protonen sein, da auch viele Truma-Proben im Bereich von $\text{pH} = 5-6$ lagen. Deswegen wurde nach Rücksprache mit Truma die Probe für den Langzeitversuch mit Essigsäure und Phosphorsäure vorbereitet. Sulfat wurde nicht zugesetzt, da dessen Ursprung auf eine Verunreinigung der Probenbehälter zurückgeführt wurde.

Die Leitfähigkeit der durch die Kartuschen gereinigten Probenlösung lag vor dem Versagen der Kartuschen bei ca. 1 - 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nachdem ein Ansteigen der Leitfähigkeit festgestellt wurde, wurde die erste Probe (A) genommen und die zweite (Probe B) nach Erreichen der Sättigungsphase, was bei ca. 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ der Fall war.

2.1.5.1 Versuchsergebnisse

Bei **Kartusche 1/5 BWT** konnte ein Anstieg der Leitfähigkeit nach einem dosierten Volumen von 216,5 l beobachtet werden. Nach weiteren 91,6 l war die Sättigungsphase erreicht. (Abb. 33). Das angestrebte Gesamtvolumen von 300 l wurde bei dieser Kartusche somit erreicht.

Bei **Kartusche 2/5 GWT** begann der Anstieg der Leitfähigkeit nach einer gereinigten Wassermenge von 233,5 l. Nach insgesamt 350 l war die Sättigungsphase erreicht. Diese Kartusche konnte somit 17% mehr Wasser aufbereiten als es der Vorgabe entsprach.

Bei der im Vorfeld eingefrorenen **Kartusche 3/5 BWT** wurde bereits nach 170 l ein beginnendes Versagen festgestellt. Die Sättigungsphase wurde aber auch hier erst nach 300 l dosiertem Gesamtvolumen erreicht. Somit waren die Bedingungen auch hier erfüllt.

Ebenfalls im Vorfeld der Versuche eingefroren wurde **Kartusche 4/5 GWT**. Bei ihr wurde nach 139 l prozessiertem Wasser ein Anstieg der Leitfähigkeit festgestellt. Nach weiteren 66 l war die Sättigung bereits erreicht, was mit nur etwa 68 % der festgesetzten Menge die schlechteste Performance aller Kartuschen bedeutete.

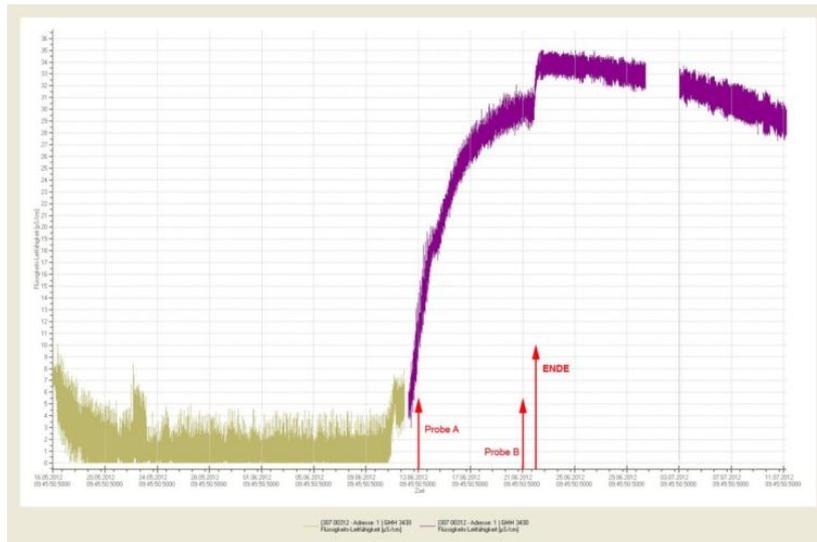


Abb. 33: Leitfähigkeitsverlauf von Kartusche 1/5 BWT

Kartusche 5/5 BWT war in ihrer Leistung mit Kartusche 3/5 BWT (eingefroren) vergleichbar. Sowohl der Anstieg der Leitfähigkeit nach 169 l als auch der Beginn des Versagens nach insgesamt 308 l Wasser nahezu identisch.

Eine zusätzlich zu den Leitfähigkeitsmessungen erfolgte zweimalig die IC Analyse des Abwassers aller Kartuschen ergab, dass beim Kartuschendurchbruch zunächst nur ein Durchbruch des Acetats zu beobachten war, nicht jedoch des Phosphates.

2.1.6 Arbeitspaket 9: Aufbau und Erprobung neues Reformersystem

Für den abschließenden Funktionstest eines im Rahmen von Arbeitspaket 4 entwickelten Reformierreaktors wurde eine Versuchsanlage aufgebaut (Abb. 34 und Abb. 35). Die Vorheizung des Reaktors erfolgt hier nicht mittels eines Homogenbrenners wie in der VeGA, sondern mittels eines elektrisch betriebenen Luftheizers. Wenn der Reaktor die Betriebstemperatur erreicht hat, wird auf der Reformerseite des Wärmetauschers/Reaktors Wasserdampf und Flüssiggas dosiert, auf der Brennerseite erfolgt die Energieversorgung wie in der VeGA durch katalytische Verbrennung von Flüssiggas. Die Dosierung der Edukte erfolgt durch thermische Massendurchflussregler, eine Datenerfassung zeichnet die wesentlichen Betriebstemperaturen und -drücke auf. Die Analyse der Reformer- und Brennerprodukte erfolgt durch ein on-line-GC bzw. durch einen Abgasanalysator.

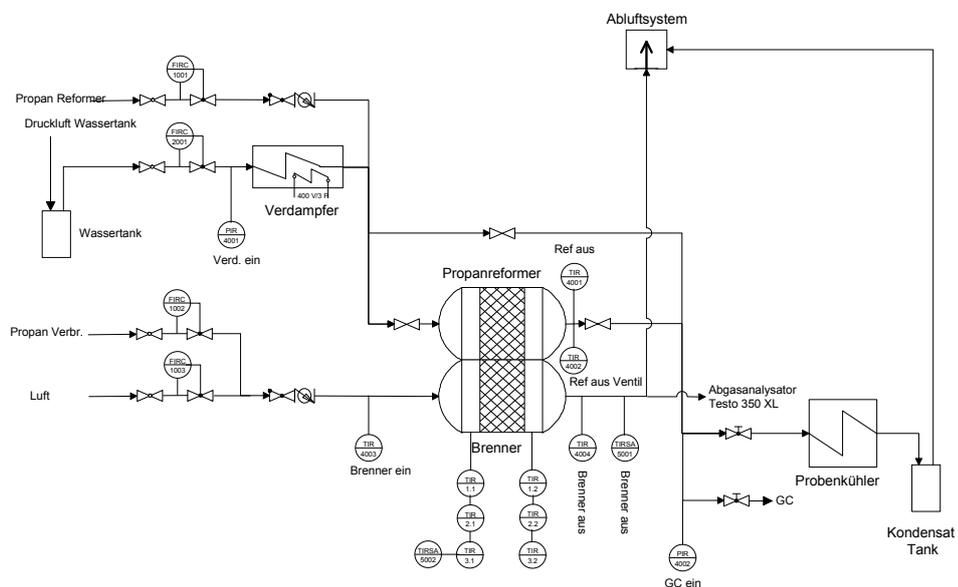


Abb. 34: Verfahrensfliessbild der Versuchsanlage für den Funktionstest des geprägten Reformers.

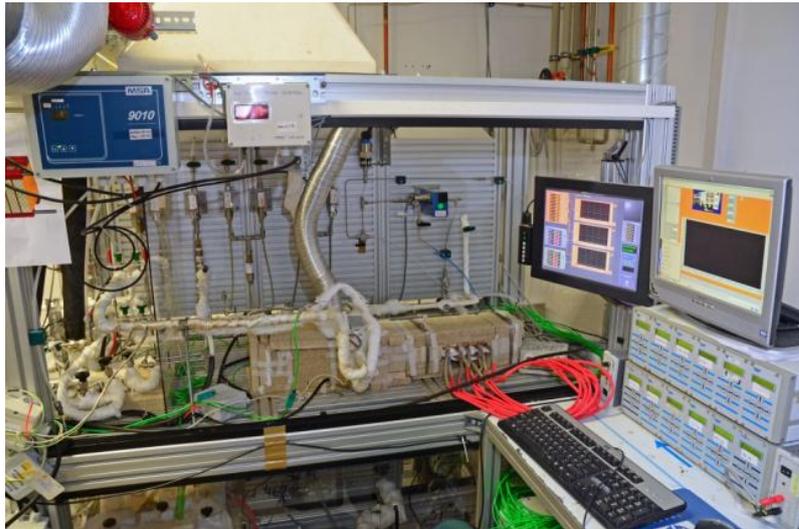


Abb. 35: Versuchsanlage für den Funktionstest des geprägten Reformers. Der Reaktor ist bereits eingebaut und isoliert.

Der Funktionstest umfasste die Einstellung verschiedener Lastniveaus, wobei der Lastpunkt für 100% der bekannten maximalen Volume Hourly Space Velocity (VHSV) entsprach, welche wiederum auf Basis der in den Reaktor eingebrachten Katalysatormasse berechnet wurde. In Abb. 36 wurde der Umsatz gegen die Lastniveaus aufgetragen.

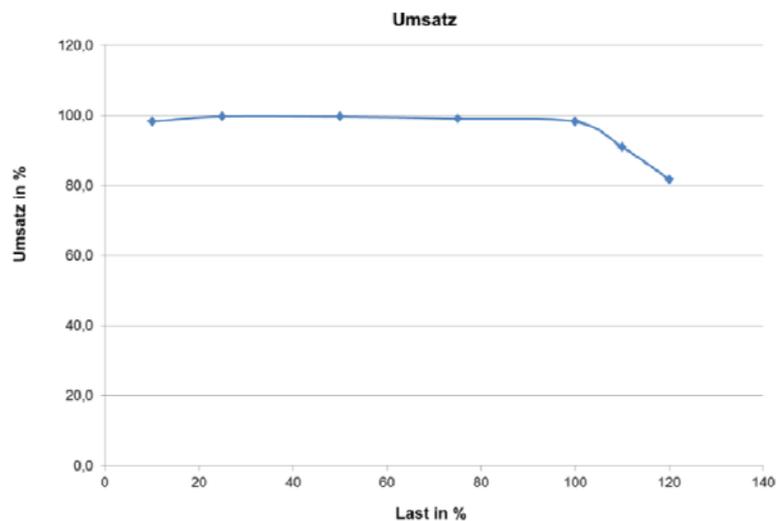


Abb. 36: Propanumsatz mit dem geprägten Reformer in Abhängigkeit vom Lastniveau.

Während der Propanumsatz bei einer Last von 10 % etwas unterhalb von 100 % lag, konnte dieser in der Folge bei höheren Lastniveaus vervollständigt werden. Wie aufgrund der maximalen Volume Hourly Space Velocity zu erwarten war, begann der Umsatz ab einer Last von 100 % Last einzubrechen.

Eine Analyse des aus dem Reformer kommenden wasserstoffhaltigen Produktgases zeigte, dass sich die Konzentrationen von Wasserstoff und Kohlenmonoxid mit zunehmender Last zunächst geringfügig erhöhten (Abb. 37). Ab dem Lastniveau von 100 % nahm die Konzentration von Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid infolge des unvollständigen Umsatzes erwartungsgemäß wieder ab. Insgesamt zeigte der Reformer das erwartete Verhalten, was auf eine gute Gleichverteilung des Feeds in den Kanälen des Reaktors schließen lässt.

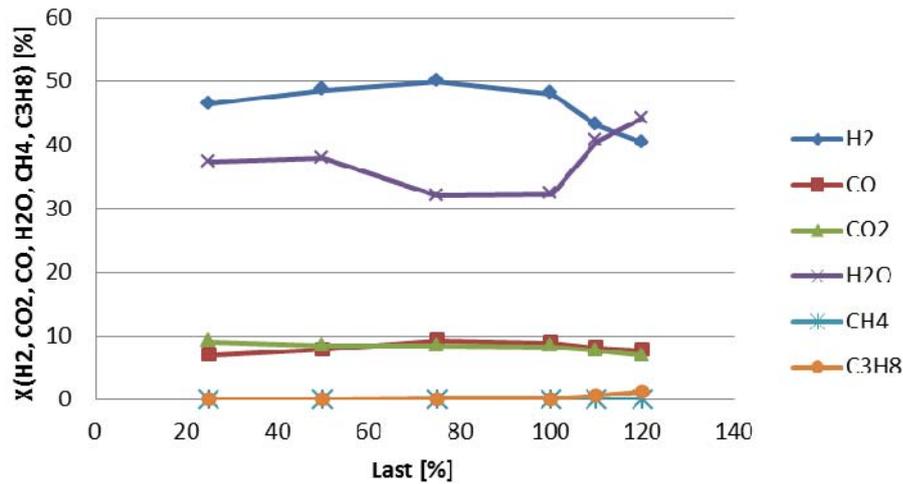


Abb. 37: Gaszusammensetzung des Reformates in Abhängigkeit von der Last.

Im Rahmen dieses Funktionstests konnte gezeigt werden, dass der auf geprägte Reaktionsplatten basierende Reformierreaktor bezüglich der Leistung und der Gaszusammensetzung den Anforderungen entsprach. Die Arbeiten zur Untersuchung der Langzeitstabilität und das Start-Stopp-Verhalten des Reformers wurden vom Projektpartner TRUMA durchgeführt.

2.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.2.1 Darstellung der wichtigsten Materialkosten

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für Materialkosten, die den Wert von 1000 € überschreiten sind in Tab. 1 aufgelistet. Die Positionen mit den laufenden Nummern 5, 7, 13 und 15 betreffen Bestellungen von Rohrverbinder, wie zum Beispiel gerade Fittings, Winkel- und T-Stücke, Filter, Ventile, Kugelhähne und Kapillarrohr. Die vorgenannten Teile wurden zum Aufbau der Teststände benötigt und zum Fertigen der Anschlüsse für Reaktoren verwendet, in denen die Katalysatoraktivität getestet wurde.

Tab. 1. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für Materialkosten, die den Wert von 1000 € überschreiten.

laufende Nummer	Beleg-Nummer	Belegdatum
1	20110231	27.01.2011
2	20111406	10.05.2011
3	20111650	26.05.2011
4	20111801	10.06.2011
5	20111862	31.05.2011
6	20112067	04.07.2011
7	20112068	04.07.2011
8	20112441	04.08.2011
9	20112504	08.08.2011
10	20112642	09.08.2011
11	20112858	29.08.2011
12	20114189	29.11.2011
13	20120210	23.01.2012
14	20120859	09.03.2012
15	20120927	12.03.2012
16	20122060	12.06.2012
17	20120322	31.01.2012
18	20121413	17.04.2012
19	20121436	24.04.2012
20	20121615	01.05.2012
21	20130373	24.01.2013
22	20130707	22.02.2013
23	20131073	11.03.2013
24	20131074	19.03.2013
25	20131736	22.04.2013

Bei den Positionen mit den laufenden Nummern 3, 4, 6, 8, 10 und 14 handelt es sich um Materialien, die zum Betreiben der Teststände erforderlich waren. Die Heizpatronen und die Heizschnüre wurden zum Beheizen der Rohrleitungen des Teststands benötigt und mit den Thermoelementen wurden die Temperaturen des Reaktors und der Zuleitungen überwacht. Bei Position 14 handelt es sich um das Material für die Steuerung, die für den Test der Deionisierungskartuschen benötigt wurde.

Bei den Positionen mit den laufenden Nummern 12 und 17-20 sowie 9 und 16 handelt es sich um Chemikalienbestellungen sowie Laborbedarf. Die Chemikalien wurden für die Herstellung der Katalysatoren benötigt und der Laborbedarf für die Herstellung der Katalysatorpulver bzw. der Katalysatorschichten. Bei Position 9 handelt es sich um einen Schwingungsdämpfer für die Siebmaschine sowie die Umrüstung eines vorhandenen Ofens damit dieser Anschluss für die Calcinierung von Siebdruckkatalysatoren genutzt werden konnte. Bei der Position 16 handelt es sich um Laborbedarf für das Mahlen und Sieben der Katalysatorpulver.

Für die Herstellung der Reaktoren sowie des Folgeverbundwerkzeuges wurden verschiedene Halbzeuge (Positionen mit den laufenden Nummern 1, 2 und 22-25) und Werkzeug zum Fräsen und Schneiden (Positionen mit den laufenden Nummern 11 und 21) beschafft.

2.2.2 Darstellung der wichtigsten Fremdleistungen

Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für Fremdleistungen, die den Wert von 1000 € überschreiten sind in Tab. 2 aufgeführt. Für die während der Projektlaufzeit aufgetretenen Schwierigkeiten beim Laserschweißen wurde eine externe Beratungsfachkraft mit über 20-jähriger Erfahrung hinzugezogen (Positionen mit den laufenden Nummern 1 und 2).

Tab. 2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises für Fremdleistungen, die den Wert von 1000 € überschreiten.

laufende Nummer	Beleg-Nummer	Belegdatum
1	20103670	01.01.2011
2	20114121	01.01.2012
3	20130265	23.01.2013
4	20131622	16.04.2013
5	20135145	18.12.2013

Bei der Position mit der laufenden Nummer 3 handelt es sich um Kosten, die durch die Konstruktion des Folgeverbundwerkzeuges durch einen externen Dienstleister entstanden sind. Die Positionen mit

den laufenden Nummern 4 und 5 betreffen Kosten, die infolge der Prägeversuche und Montagearbeiten mit dem Folgeverbundwerkzeug aufgelaufen sind.

2.3 Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei dem APU-System von Truma handelt es sich um eine komplette Neuentwicklung. Neben der zuvor erläuterten Notwendigkeit der autarken Bordstromversorgung machen es die nationalen und internationalen Aktivitäten im Brennstoffzellen-Sektor, speziell die in letzter Zeit allgemeine stärkere Fokussierung auf Kleinsysteme bzw. APU-Anwendungen auch im Bereich Freizeitfahrzeuge, für Truma unerlässlich, die Marktposition für das eigene Brennstoffzellensystem VeGA zu sichern. In diesem Kontext ist eine Reduzierung der Herstellungskosten unabdingbar.

Das Konsortium Truma/ICT-IMM besaß die für eine fokussierte Projektdurchführung erforderliche interdisziplinäre und komplementäre Struktur. Jeder Partner hat einen unverzichtbaren Beitrag zum Erreichen der Projektziele geleistet. Keiner der Partner wäre in der Lage gewesen, eine solche Entwicklung im eigenen Haus mit den eigenen inhaltlichen und finanziellen Möglichkeiten durchzuführen. Des Weiteren bestand beim geförderten Vorhaben durch den wissenschaftlich-technischen Innovationsgrad ein erhebliches Risiko, was letztendlich mit der Bindung erheblicher Ressourcen einhergeht. Um dieses Risiko abzupuffern war eine öffentliche Co-Finanzierung essentiell. Außer auf der Grundlage der bewilligten Förderung und unter Berücksichtigung der verfügbaren Eigenmittel der Partner hätte kurz- bis mittelfristig keine Möglichkeiten bestanden, dieses Vorhaben umzusetzen.

2.4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Rahmen dieses Fördervorhabens erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse in den Bereichen der Reaktor- und Kondensatorfertigung, der Katalysatorbeschichtung, der Katalysatorformulierung und die experimentelle Charakterisierung von Deionisierungskartuschen und Reformersystemen haben einen unmittelbaren oder mittelbaren Nutzen für das von Truma kommerzialisierte Brennstoffzellensystem VeGA.

Die Entwicklung der Fertigung von mikrostrukturierten Reaktionsplatten mittels eines Folgeverbundwerkzeugs (Arbeitspaket 4) erlaubt bei Produkten mit einer hohen Stückzahl eine deutliche Reduzierung der Herstellungskosten. Diese Reduzierung beruht zum einen auf einen geringeren Materialverbrauch, da durch den sonst üblichen Ätzschrift kein Material aufgelöst wird und zum anderen lassen sich pro Zeiteinheit höhere Stückzahlen realisieren. Über das Brennstoffzellensystem VeGA hinaus ist dieser Fertigungsansatz auch für die Herstellung von

Bauteilen anderer Reaktoren und Wärmetauscher von ICT-IMM nutzbar und gibt ganz allgemein einen Ausblick auf die Optionen zur kostengünstigen Herstellung von mikrostrukturierten Reaktoren.

Komplementär zur Fertigung der mikrostrukturierten Reaktionsplatten wurden in diesem Fördervorhaben auch die Parameter der Auftragung von Katalysatorschichten mittels eines Druckverfahrens an die Topologie der durch den Prägeschritt hergestellten Kanalstrukturen angepasst (Arbeitspaket 5). Damit ist sichergestellt, dass für den Fall einer Umstellung des Fertigungsverfahrens auch für die Katalysatorbeschichtung ein geeignetes Auftragungsverfahren zur Verfügung steht.

Die kostengünstigeren Katalysatorformulierungen, die im Rahmen dieses Fördervorhabens in Arbeitspaket 7 entwickelt wurden, können kurzfristig in das derzeitige Brennstoffzellensystem VeGA übernommen werden. Ein erster Schritt dazu sieht den Aufbau von Feldtestgeräten vor, mit denen die neuen Katalysatoren unter realen Bedingungen getestet werden können. Im Rahmen eines bilateralen Projektes zwischen Truma und ICT-IMM sind bereits Reformer und Verdampfer mit den kostengünstigeren Katalysatoren beschichtet worden. Sofern einsetzbar, könnten diese neuen Katalysatoren auch für andere Entwicklungsvorhaben, die nicht auf den Brennstoff Propan beruhen, von Interesse sein.

Der mikrostrukturierte Kondensator, der im Arbeitspaket 6 entwickelt und getestet wurde, kann aufgrund der Komplexität nicht einfach in das derzeitige Brennstoffzellensystem VeGA übernommen werden. Erst nach einem Redesign mit dem Ziel die Gesamtgröße des Brennstoffzellensystems zu reduzieren, wäre der Kondensator einsetzbar. Nichtsdestotrotz können sein Konstruktionsprinzip sowie das genutzte Fertigungsverfahren für die Einwerbung weiterer Entwicklungsvorhaben im Bereich Klimatechnik genutzt werden.

Die Ergebnisse der in den Arbeitspaketen 8 und 9 durchgeführten Tests sind für das derzeitige Brennstoffzellensystem VeGA unmittelbar von Nutzen. Während die Ergebnisse der Deionisierungsversuche direkt für ein verbessertes Wassermanagement verwendet werden konnten, waren die Ergebnisse mit den Gesamtsystemen, die auf der neuen Fertigungstechnologie basieren, hilfreich um das Potential für weitere Kostenreduzierungen auszuloten. Für zukünftige Entwicklungsvorhaben, die auch dieser Fertigungstechnologie verwenden, stellt die erfolgreiche Umsetzung in diesem Fördervorhaben ein Machbarkeitsnachweis dar.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der mobilen Stromerzeugung mit Hilfe von Brennstoffzellen sind verschiedene Unternehmen und Institute aktiv. Eine Übersicht über die eingesetzte Technologie und den Stand der Entwicklung ist in **Tab. 3** zusammengefasst.

Tab. 3. Übersicht über den Stand der Entwicklung bei den mobilen Stromerzeugern.

Unternehmen	Zelle	Brennstoff	Größe [W]	Stand
Ensystems GmbH	HT-PEM	Flüssiggas	200	Neugründung 2013 nach Insolvenz
New GmbH	Enerday SOFC	Flüssiggas	500	Übernahme ElringKlinger 2014 durch
IKTS Fraunhofer	SOFC	Flüssiggas	100	Feldtests in 2014
eZelleron	SOFC	Flüssiggas	50-100	Feldtests in 2015
Serenergy	HT-PEM	Methanol	350-5000	verkaufsfähiges Gerät
Worgas		Metallpulver	100	unbekannt
Smart Fuel Cell AG	DMFC	Methanol	25-90	verkaufsfähiges Gerät

2.6 Darstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

O'Connell , M., Kolb, G., Schelhaas, K.-P., Wichert, M., Tiemann, D., Pennemann, H., Zapf, R.; "Towards mass production of microstructured fuel processors for application in future distributed energy generation systems: A review of recent progress at IMM", Chem. Eng. Res. Design 90, (2012) pp. 11-18.

3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Werkzeugunterteil (l.); Prägeversuch in Kniehebelpresse GK 360	11
Abb. 2: Seitenansicht einer geprägten Stahlfolie (32 t Presskraft)	12
Abb. 3: Strukturtiefen von Folien und Werkzeug	12
Abb. 4: Trenn-, Reformier- und Kreuzstromblech (l.); Biegewerkzeug (r.)	14
Abb. 5: Äußere Anbindung der Blechrahmen (Markierung).....	15
Abb. 6: Geprägtes Dampfüberhitzer- (l.) und Brennerblech (r.).....	15
Abb. 7: Reformer (l.) und Verdampfer (r.) aus umgeformten Blechen.....	16
Abb. 8: Streifenbild	17
Abb. 9: CAD-Modell Folgeverbundwerkzeug.....	18
Abb. 10: Werkzeugtest (Fa. Biebertaler Stanz- und Umformtechnik).....	19
Abb. 11: Aufgespanntes Werkzeug (l.); fertige Teile im Stanzstreifen (r.).....	20
Abb. 12: Siebdruckmaschine	20
Abb. 13: Spannvorrichtung der Adapterplatte (l.); eingelegtes Blech (r.)	21
Abb. 14: Einwandfreien Beschichtung auf einer geprägten Reaktionsplatte.....	22
Abb. 15: Kondensator: Foto (l.) und CAD-Bild mit Anschlüssen und Gebläse (r.)	23
Abb. 16: Kondensatstrom in Abhängigkeit vom Volumenstrom feuchter Heißluft	24
Abb. 17: Fließbild der Versuchsanlage für die Propanreformierung.....	25
Abb. 18: Fließbild der Versuchsanlage für die katalytische Verbrennung von Propan.	25
Abb. 19: Abhängigkeit des Umsatzes und der Produktzusammensetzung vom Feedvolumenstrom ausgedrückt als Volume Hourly Space Velocity (VHSV) für den Reformerkatalysator #1.	26
Abb. 20: Mittelfristiger Stabilitätstest für den Katalysator #9 mit einer um 50 % reduzierten Edelmetallkonzentration.	27
Abb. 21: Langzeittest für den Katalysator #10 mit einer um 20 % reduzierten Edelmetallkonzentration.	28
Abb. 22: Abhängigkeit des Umsatzes und der Produktzusammensetzung vom Feedvolumenstrom ausgedrückt als Volume Hourly Space Velocity (VHSV) für den Reformerkatalysator #19.	28
Abb. 23: Langzeittest für den Katalysator #20 mit einer um 80 % reduzierten Edelmetallkonzentration und eine Übergangsmetallgehalt von 15 %.....	29

Abb. 24: Vergleich der Kaltstartfähigkeit anhand des Propanumsatzes bei einer Reaktionstemperatur von 250 °C.	30
Abb. 25: Langzeittest eines Verdampferbrennerkatalysators mit einem um etwa 60 % reduzierten Edelmetallgehalt.	31
Abb. 26: Propanumsätze der Kaltstartsequenzen während eines Langzeittests mit einem Verdampferbrennerkatalysator, dessen Edelmetallgehalt um etwa 60 % reduziert wurde.	31
Abb. 27: Langzeittest eines Verdampferbrennerkatalysators mit einem um etwa 80 % reduzierten Edelmetallgehalt.	32
Abb. 28: Propanumsätze der Kaltstartsequenzen während eines Langzeittests mit einem Verdampferbrennerkatalysator, dessen Edelmetallgehalt um etwa 80 % reduziert wurde.	32
Abb. 29: Kostenvergleich für verschiedene Reformerkatalysatoren.	33
Abb. 30: Kostenvergleich für verschiedene Verdampferbrennerkatalysatoren.	34
Abb. 31: Testanlage mit 25 l Vorratsbehälter (l.) und 1000 l Tank (r.).....	36
Abb. 32: Probenkanister (4 l) mit Kartuschen, Sensoren und Heizfolien.....	36
Abb. 33: Leitfähigkeitsverlauf von Kartusche 1/5 BWT.....	38
Abb. 34: Verfahrensfließbild der Versuchsanlage für den Funktionstest des geprägten Reformers.	39
Abb. 35: Versuchsanlage für den Funktionstest des geprägten Reformers. Der Reaktor ist bereits eingebaut und isoliert.....	40
Abb. 36: Propanumsatz mit dem geprägten Reformer in Abhängigkeit vom Lastniveau.	40
Abb. 37: Gaszusammensetzung des Reformates in Abhängigkeit von der Last.....	41

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Reformer-Brennstoffzellen-APU-System für Freizeitfahrzeuge; Teilvorhaben: Massenfertigungstaugliches Reformersystem	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Helmut Pennemann Dr. Stefan Neuberg Dr.-Ing. Gunther Kolb Dipl.-Ing. Martin Wichert Dipl.-Ing. Ole Wiborg	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2013
	6. Veröffentlichungsdatum 26.08.2014
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer ICT-IMM Carl-Zeiss-Straße 18-20 55129 Mainz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 0327770D
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53170 Bonn	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 37
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) O'Connell , M., Kolb, G., Schelhaas, K.-P., Wichert, M., Tiemann, D., Pennemann, H., Zapf, R.; "Towards mass production of microstructured fuel processors for application in future distributed energy generation systems: A review of recent progress at IMM", Chem. Eng. Res. Design 90, (2012) pp. 11-18.	
18. Kurzfassung Nachdem im Vorgängerprojekt die Grundlagen für ein robustes Herstellungsverfahren gelegt wurden, ist der Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens auf die Kostenreduzierung ausgerichtet. Ein erster Schritt in diese Richtung dazu wurde bereits Vorgängerprojekt mit dem Förderkennzeichen 0327770B gemacht. Der Ersatz der Katalysatorauftragung von Hand durch eine halbautomatisierte Auftragung mittels eines Druckverfahrens, erlaubte es, die Herstellungskosten für das Gesamtsystem zu reduzieren. Diesem Gedanken folgend wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Herstellung der strukturierten Platten durch nasschemisches Ätzverfahren beleuchtet und nach Alternativen hin untersucht. Des Weiteren stand die Entwicklung kostengünstigerer Katalysatoren im Mittelpunkt. Im Hinblick die Gesamtgröße des Systems reduzieren zu können, wurde auch die Entwicklung eines mikrostrukturierten Kondensators durchgeführt. Ziel weiterer Arbeiten war es, zum einen das Durchbruchverhalten von Deionisierungskartuschen zu untersuchen und zum anderen wurde der Einfluss der Phosphorsäure auf die Komponenten des Komplettreformers, d.h. auf den Verdampfer und den Reformer, hinsichtlich Langzeitstabilität und möglicher Korrosionseffekte untersucht.	
19. Schlagwörter APU, Freizeitfahrzeuge, Propanreformer, Katalysatorbeschichtung, Folgeverbundwerkzeug	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN intended	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Reformer-based fuel cell-APU-system for recreational vehicles Sub-project: Serial production-ready reformer system	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Helmut Pennemann Dr. Stefan Neuberg Prof. Dr.-Ing. Gunther Kolb Dipl.-Ing. Martin Wichert Dipl.-Ing. Ole Wiborg	5. end of project Decembre 2013
	6. publication date intended
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer ICT-IMM Carl-Zeiss-Straße 18-20 55129 Mainz	9. originator's report no.
	10. reference no.
	11. no. of pages 50
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 37
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) O'Connell , M., Kolb, G., Schelhaas, K.-P., Wichert, M., Tiemann, D., Pennemann, H., Zapf, R.; "Towards mass production of microstructured fuel processors for application in future distributed energy generation systems: A review of recent progress at IMM", Chem. Eng. Res. Design 90, (2012) pp. 11-18.	
18. abstract The prior project has laid the foundations for robust manufacturing methods of micro-structured plates and coating techniques for serial production. This research project put an emphasis on cost reduction. Currently the plates for catalyst coating are made by wet chemical etching. As this is a slow procedure that allows no further time and cost reduction, this research project was focused on developing alternative manufacturing processes that are suitable for high volume production. Further topics concerning cost reduction were the development of more cost-efficient catalysts and a micro-structured condenser. Further work was done to examine the service life of deionization cartridges and to examine the influence of phosphoric acid on the component of a reformer system i.e. evaporator and reformer regarding long time stability and potential corrosion effects.	
19. keywords APU, recreational vehicles, propane reformer, catalyst coating, progressive die, follow-on die	
20. publisher	21. price