

intelli engineering GmbH

und

Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik der  
Technischen Universität Braunschweig

## **Entwicklung eines foulingresistenten Wärmeübertragers zum Einsatz von Biogas in Mikro-Blockheizzentralen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ29108-24/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Jürgen Weiser, Dipl.-Ing. Sebastian Grahn (intelli engineering)  
und  
Dr. Wolfgang Augustin, Dipl.-Ing. Steffi Höft (ICTV, TU Braunschweig)

April 2014

06/02		<b>I. PROJEKTKENBLATT</b>			 <b>DBU</b>	
		der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>				
Az	<b>29108</b>	Referat	<b>24</b>	Fördersumme	<b>300.000 €</b>	
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung eines foulingresistenten Wärmeübertragers zum Einsatz von Biogas in Mikro-Blockheizkraftwerken</b>				
<b>Stichworte</b>						
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
	<b>2 Jahre</b>	<b>1.8.2011</b>				
	Zwischenberichte	12/2011	06/2012	12/2012	06/2013	
<b>Bewilligungsempfänger</b>	intelli engineering GmbH Steinfeldstraße 2 39179 Barleben				Tel	039203 / 958 0
					Fax	039203 / 958 19
					Projektleitung	Dr. J. Weiser
					Bearbeiter	S. Grahn
<b>Kooperationspartner</b>	Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik (ICTV) Technische Universität Braunschweig 38106 Braunschweig					
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>						
<p>Die dezentrale Mini- und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gewinnt aufgrund der Forderung effizienter Energienutzung immer mehr an Bedeutung, wobei das volle Potential zur Umweltentlastung nur durch Verwendung von Brennstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe möglich ist.</p> <p>Bislang spielt der Einsatz von erneuerbaren Energien, insbesondere der Einsatz von Biogas im Bereich der Mikro-KWK nur eine untergeordnete Rolle, da die damit verbundenen Probleme schwer in den Griff zu bekommen sind. Bei der Verbrennung biogener Brennstoffe treten vermehrt Schadstoffe und Problemkomponenten im Abgas auf, was zu einer Belagbildung im nachgeschalteten Wärmeübertrager mit deutlicher Verschlechterung des Wirkungsgrades bei hohem Wartungs- bzw. Reinigungsaufwand führt. Dieses sogenannte Fouling stellt das entscheidende Innovationshemmnis für die Nutzung von Biogas als Brennstoff dar.</p>						
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>						
<p>Die intelli engineering GmbH hat in Kooperation mit der TU Braunschweig einen hocheffizienten Wärmeübertrager entwickelt, bei dem die bei der Verbrennung von Biogas entstehenden Rückstände nicht oder nur gering an der Wärmeübertragerwand anhaften und der somit der für den Einsatz in biogasbetriebenen Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungen geeignet ist.</p> <p>Das Kooperationsprojekt besteht aus zwei Teilvorhaben. Das Teilprojekt „Entwicklung und Erprobung eines Low-Fouling Wärmeübertragers“ ist Aufgabe der intelli engineering GmbH und umfasst die konstruktive Umsetzung sowie die betriebstechnischen Möglichkeiten zur Foulingminderung, die Prototypen- und Funktions-musterbeschaffung einschließlich der Beschichtung zur Foulingminderung mit Prüfstandsarbeiten am Gesamtsystem Blockheizkraftwerk (BHKW). Die intelli engineering GmbH führt dazu die Versuche mit den optimierten Wärmeübertragern am BHKW mit Biogas durch. Der Anteil des ICTV beinhaltet die Unterstützung bei der wärme- und strömungstechnischen Auslegung, die Untersuchung verschiedener Beschichtungen zur Foulingminderung einschließlich konstruktiver und betriebstechnischer Möglichkeiten zur Foulingminderung und die Auswahl des Beschichtungsmaterials. Im Versuch werden unterschiedliche Beschichtungen getestet. Die experimentellen Arbeiten bilden zusammen mit der wärme- und strömungstechnischen Auswertung der Versuche am Gesamtsystem die Grundlage für Entwurf, Test, Modellierung und Optimierung des neuen verschmutzungs-resistenten Wärmeübertragers. Die numerische Strömungssimulation in Kombination mit experimentellen Befunden zum zeitlichen und örtlichen Belagabbau sollen Hinweise für das Design des Neuapparates liefern.</p>						
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>						

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Die beiden auf unterschiedlichen Ansätzen beruhenden und getesteten Prototypen für foulingoptimierte Wärmeübertrager erreichten den gleichen thermischen Wirkungsgrad mit dem Intelli-Heimkraftwerk wie die Serien-Wärmeübertrager. Im Vergleich zu diesen sind beide Prototypen jedoch beschichtbar und außerdem einfach mechanisch und chemisch zu reinigen. Mit weiteren konstruktiven Optimierungen kann der Wirkungsgrad im Vergleich zur aktuellen Variante sogar noch gesteigert werden. Dazu bieten beide Wärmetauscher auch noch Potential zu Kostenreduzierung im Vergleich zur Serienkonfiguration. Vor allem der Serienentwurf mit dem geänderten Zylinderkopf besitzt für das Intelli-Heimkraftwerk sehr viel Potential und wird bei der Weiterentwicklung berücksichtigt. Neben den geringeren Herstellungskosten gegenüber einem schweren Gussteil könnten mit dem Einsatz pro Gerät auch etwa 10 kg Aluminium eingespart werden.

Die Versuchsreihen zu unterschiedlichen Beschichtungen im Labor und im Abgasstrang des BHKW's in der Biogasanlage in Ebendorf haben gezeigt, dass die untersuchten Beschichtungen gute Antifouling-Eigenschaften besitzen. Besonders erfolgversprechend sind dabei siliziumhaltige Beschichtungen. Im Vergleich zum Serienwärmeübertrager konnte die Belagbildung an beiden Prototypen durch die Beschichtung und Konstruktion deutlich reduziert werden. Durch die erzielten Ergebnisse besteht nun die Möglichkeit, mit optimierten Brennwertwärmeübertragern eine Brennwertnutzung auch für biogasbetriebene BHKW's aller Leistungsklassen, bei reduziertem Wartungsaufwand und leichter Reinigbarkeit in der industriellen Umsetzung zu realisieren. Der Wirkungsgrad der Kraft-Wärme-Koppelung kann dadurch weiter gesteigert und Primärenergie eingespart werden. Würde bei nur 10% der in 2013 Deutschland installierten Biogas-BHKW (Gesamtwärmemenge von ca.  $2,1 \cdot 10^6$  MWh) der thermische Wirkungsgrad durch Nutzung des Brennwerteffektes um 10% erhöht, ergäben sich gegenüber der Erzeugung der gleichen Wärmemenge mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen von mehr als 50.000 Tonnen pro Jahr.

Trotz der notwendigen Verlängerung des Projektes und der zwei gebauten Prototypen konnte das Projekt im Rahmen des bewilligten Budgets realisiert werden. Die Verlängerung des Projektes erfolgte kostenneutral.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Wissenschaftliche Kommunikation: Die Ergebnisse aus dem Projekt werden durch Vorträge, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und im Internet (Webseiten der Projektpartner) bekannt gemacht. Von Bedeutung sind persönliche Kontakte der Projektpartner zu möglichen Kunden und Betreibern von BHKWs sowie mit Biogaserzeugern. Vorträge sind geplant auf den Fachtagungen ProcessNet-Jahrestreffen 2014, ProcessNet-Fachausschuss „Wärme- und Stoffübertragung“ 2015 und auf der Fachmesse „Achema 2015“ sowie auf der internationalen Konferenz „Fouling and Cleaning in Heat Exchangers 2015“ geplant. Die erlangten Kenntnisse fließen in den alle zwei Jahre (nächster Termin im 9/2014) an der TU Braunschweig stattfindenden GVT-Hochschulkurs „Fouling in Wärmeübertragern“ ein. Des Weiteren ist eine gemeinsame Publikation in der Zeitschrift „Chemie-Ingenieur-Technik“ in Arbeit.

## ***Fazit***

Im Rahmen des Forschungsvorhabens haben die Projektpartner zwei unterschiedliche foulingoptimierte Wärmeübertrager für Mikro-BHKW's entwickelt und erfolgreich im Feldversuch mit Biogas getestet.

Derzeit gibt es Anbahnungsgespräche für ein mögliches weiteres anwendungsorientiertes Forschungsprojekt mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg, das sich mit der Vergasung von Gärresten von Biogasanlagen beschäftigt. Die Nutzung solcher Gase in einem BHKW stellt ähnliche oder z.B. aufgrund enthaltenen Teers sogar höhere Anforderungen. Es ist zu erwarten, dass sich die im Projekt gewonnenen Erfahrungen der Beschichtbarkeit von Wärmeübertragern auf die Lösung solcher Aufgabenstellungen bis zur industriellen Umsetzung übertragen lassen.

## II. INHALTSVERZEICHNIS

I.	PROJEKTKENBLATT	2
II.	Inhaltsverzeichnis	4
III.	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
IV.	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	8
V.	Zusammenfassung	9
VI.	Einleitung	10
1.	Teilprojekt 1: „Entwicklung und Erprobung eines Low-Fouling-Wärmeübertragers“ (intelli engineering)	11
1.1.	Übersicht und Zusammenfassung	11
1.2.	Grundlagen von Wärmeübertragern zur Brennwertnutzung	12
1.3.	Entwicklung der Funktionsmuster	13
1.3.1.	Funktionsmuster 1 „Rippenplattenwärmeübertrager“	14
1.3.2.	Funktionsmuster 2 „Rippenrohrwendel“	18
1.4.	Funktionstest auf dem Prüfstand	22
1.5.	Versuche zur Belagbildung mit einem biogasbetriebenen iHKW	28
1.5.1.	Versuchsaufbau mit verschiedenen Wärmeübertragern	30
1.5.2.	Versuchsplan und Zwischenergebnisse	34
1.5.3.	Abgasuntersuchung im Biogasbetrieb	37
2.	Teilprojekt2 „ Wärme- und Strömungstechnische Auslegung der Wärmeübertrager und experimentelle Untersuchungen zur Foulingminderung mit Beschichtungen“ (ICTV)	40
2.1.	Grundlagen der Wärmeübertragung und Fouling	40
2.2.	Bilanzierung des aktuellen Wärmeübertragers	42
2.3.	Laborversuche Belagbildung	45
2.3.1.	Analyse realer Ablagerungen	56
2.4.	Feldversuche mit dem iHKW in der Biogasanlage Ebendorf	59
VII.	Fazit	65
VIII.	Literaturverzeichnis	66
IX.	Anhang	68

### III. VERZEICHNIS VON BILDERN UND TABELLEN

Abbildung 1:	Brennwertwärmeübertrager Prototyp 1 und 2 als CAD-Zusammenbau am intelli Heimkraftwerk	11
Abbildung 2:	Grundarten von Wärmeübertragern	12
Abbildung 3:	Grundbauformen von Wärmeübertragern	12
Abbildung 4:	Einbausituation Serien-Wärmeübertrager	13
Abbildung 5:	Explosionsansicht Rippenplatten-Wärmeübertrager mit Grundaufbau	14
Abbildung 6:	CFD-Rechnung Rippenanordnung in Reihe (links) und versetzt (rechts)	15
Abbildung 7:	Anordnung der Rippen auf der Rippenplatte (links) und Rippenabmaße (rechts)	16
Abbildung 8:	FEM-Rechnung der Rippenplatte mit 8 (links) und 10 mm Plattenstärke (rechts)	17
Abbildung 9:	CAD-Ansicht IHKW mit Rippenplatten-WÜT im Halbschnitt und isometrischer Ansicht	17
Abbildung 11:	Rippenrohrpaket der Firma Wieland	18
Abbildung 12:	Skizze „Rippenrohrwendelwärmeübertrager“	19
Abbildung 13:	Flansch mit Einzelheiten für den Rohrwendel-WÜT	20
Abbildung 14:	Ausgangsmaterialien zum Bau des Funktionsmusters	20
Abbildung 15:	Funktionsmuster 2 und Montage am Prüfstand	21
Abbildung 16:	Änderungen am Funktionsmuster 2	21
Abbildung 17:	Prüfstandaufbau im AVF	22
Abbildung 18:	Messdaten einer Messung mit dem Rippenrohr-BWÜT mit Regeleingriff	23
Abbildung 19:	Übersicht thermischer Wirkungsgrad mit verschiedenen BWÜT	23
Abbildung 20:	Wärmemengenmessung Rippenrohrwendel einzeln	24
Abbildung 21:	Vergleich der Abgastemperaturspreizung	25
Abbildung 22:	Anschlussflansch Rippenplatten BWT	26
Abbildung 23:	Entwurf eines Serientwurfes mit Rippenrohrwendel-BWÜT	26
Abbildung 24:	Serientwurf Rippenrohrwendel-WÜ	27
Abbildung 25:	ihkw in der Biogasanlage in Ebendorf	28
Abbildung 26:	hydraulische einbindung des ihkw in Ebendorf	29
Abbildung 27:	Fernzugriff mittels VNC-Viewer	29

Abbildung 28:	Versuchsaufbau des Rippenplatten-BWÜT in Ebendorf	30
Abbildung 29:	Beschichtung der Rippenplatten	31
Abbildung 30:	BWÜT "Rippenrohrwendel" für den Feldversuch	32
Abbildung 31:	Versuchsaufbau mit Rippenrohrwendel-BWT in Ebendorf	33
Abbildung 32:	Zwischenbefundung Brennraum nach 200 und 1000Bh	34
Abbildung 33:	Zwischenbefundung Serien-BWÜT nach 200 und 1000 Bh	35
Abbildung 34:	Rippenplatten-BWÜT nach der Demontage	36
Abbildung 35:	Rippenrohr-BWT nach der Demontage	36
Abbildung 36:	Abgasmessung im Biogasbetrieb	37
Abbildung 37:	Verbrennungsgasmessung	38
Abbildung 38:	Abgasmessung Mit Biogas ohne Oxidationskatalysator	39
Abbildung 39:	Temperaturverlauf beim Wärmeübergang durch eine Wand	40
Abbildung 40:	Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand mit Fouling	41
Abbildung 41:	Schnittansicht des Serienwärmeübertragers	42
Abbildung 42:	Wärmeleistung des Abgaswärmeübertragers in Abhängigkeit der Kühlwassertemperatur	44
Abbildung 43:	Fließbild der Laboranlage	45
Abbildung 44:	Aufbau des Modellkühlers, a) Explosionszeichnung, b) Schnitt quer zur Strömungsrichtung	46
Abbildung 45:	Geschwindigkeitsprofil im yz-Schnitt	47
Abbildung 46:	Über den Querschnitt gemittelte Temperatur entlang der Kanallänge	48
Abbildung 47:	Temperaturprofil im yz-Schnitt	48
Abbildung 48:	Phasendiagramm von Kohlenstoffschichten	49
Abbildung 49:	Rauheiten der untersuchten Oberflächen	50
Abbildung 50:	Die freie Oberflächenenergie der untersuchten Oberflächen nach dem Modell von Owens, Wendt, Rabel, Kaebler und dem Lifshitz-van der Waals Acid-Base Modell nach van Oss, Caudhury und Good	51
Abbildung 51:	Die Komponenten der freien Oberflächenenergienach dem Modell von Owens, Wendt, Rabel, Kaebler und dem Acid-Base Modell nach van Oss, Good und Caudhury	51
Abbildung 52:	Aggregatzustand des Glycerins über der Temperatur bei Betriebsbedingungen	53

Abbildung 53:	Foulingwiderstände für Versuchsreihe 2, Gastemperatur 100 °C, Zugabe des Glycerin-Wasser-Gemisches	54
Abbildung 54:	Massen der Ablagerungen, gewogen nach Versuchsdurchführung	54
Abbildung 55:	SEM-Aufnahme einer Rußprobe, Vergrößerung 500-fach	56
Abbildung 56:	Exemplarische Rußanalyse mittels EDX	57
Abbildung 57:	links: Einbau der Foulingproben am 14.11.2012, Mitte: Befundung nach 5 Wochen, rechts: Ausbau nach 13 Wochen	58
Abbildung 58:	Aufgetrennter Wärmeübertrager 1 nach 1000 Betriebsstunden	59
Abbildung 59:	Ablagerungen am Gaseintritt (links) und gasaustritt (rechts)	60
Abbildung 60:	REM-Aufnahme der Ablagerung am Gaseintritt (links) und gasaustritt (rechts)	60
Abbildung 61:	Oberflächenanalyse mittels EDX am Gaseintritt (links) und Gasaustritt (rechts)	60
Abbildung 62:	WÜT 2 nach Versuchsende Seite 1 (links) und Seite 2 (rechts)	61
Abbildung 63:	REM-Aufnahme der unbeschichteten Oberfläche (links) und der mit SiO <sub>2</sub> beschichteten Oberfläche (rechts)	62
Abbildung 64:	Oberflächenanalyse mittels EDX der unbeschichteten Oberfläche (links) und der mit SiO <sub>2</sub> beschichteten Oberfläche (rechts)	62
Abbildung 65:	WÜT 3 nach Versuchsende, Gaseintritt rechts	63
Abbildung 66:	REM-Aufnahme der Oberfläche am Gaseintritt (links) und gasaustritt (rechts)	63
Abbildung 67:	Oberflächenanalyse mittels EDX am Gaseintritt (links) und gasaustritt (rechts)	64
Tabelle 1:	Zusätzliche Anhaltspunkte zum Wärmeübergang	43
Tabelle 2:	Effektivität der Anlage	44
Tabelle 3:	Elementverteilung der Ablagerung auf unbeschichteter Oberfläche	62
Tabelle 4:	Elementverteilung der Ablagerung auf der mit SiO <sub>2</sub> beschichteten Oberfläche	63
Tabelle 5:	Elementverteilung der Ablagerung am Gaseintritt	64
Tabelle 6:	Elementverteilung der Ablagerung am Gasaustritt	64

#### **IV. VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN UND DEFINITIONEN**

AFM	Rasterkraftmikroskop (Atomic Force Microscope)
AVF	Aussen-Versuchsfeld (Prüfstand der intelli engineering GmbH)
BHKW	Blockheizkraftwerk
DLC	Diamond Like Carbon (amorphe Kohlenstoffschicht)
iHKW	intelli-Heimkraftwerk (spezifische Bezeichnung des verwendeten Mikro-BHKW)
BWÜT	Brennwert-Wärme-Übertrager
WÜT	Wärmeübertrager
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PWM	Pulse-Weiten-Modulation
RP-BWÜT	Rippenplatten-Brennwertwärmeübertrager
RRW-BWÜT	Rippenrohrwendel-Brennwertwärmeübertrager
HMI	Human-Machine Interaction (Mensch-Computer-Interaktion)



## V. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Projektes wurden umfangreiche Untersuchungen und Laborversuche zur Foulingminderung durch das ICTV durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Beschichtungen und konstruktive Maßnahmen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Beschichtungen auf Silizium-Basis die besten Ergebnisse zeigen.

Auf der Basis dieser Untersuchungen wurden zwei verschiedene Wärmetauscher-Prototypen beschichtet. Die Low-Fouling-Wärmeübertrager wurden durch die intelli engineering GmbH entwickelt und getestet. Es handelt sich bei den Prototypen um einen teilbaren Rippenplatten-Wärmeübertrager und um einen Rippenrohrwendel-Wärmeübertrager. Beide Prototypen erreichen vergleichbare thermische Leistungsdaten wie der kompakte Serienwärmeübertrager.

Die Wärmeübertrager wurden an einem mit biogasbetriebenem intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> jeweils 1000 Stunden getestet und anschließend analysiert. Beide Prototypen zeigen deutlich weniger Ablagerungen als der Serienwärmeübertrager.

## **VI. EINLEITUNG**

Der Markt der dezentralen Mini- und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gewinnt aufgrund der Forderung nach einer effizienteren Energienutzung immer mehr an Bedeutung. Dabei ist die von der Industrie angebotene Produktpalette in diesem Segment überschaubar. Nur wenige Hersteller wagen sich in den Bereich der Kleinstanlagen und bieten dann meist Standardlösungen für fossile Energieträger an. Das volle Potential zur Umweltentlastung kann jedoch erst erschlossen werden, wenn der in diesen Anlagen eingesetzte Brennstoff auf Basis nachwachsender Rohstoffe gewonnen wird.

Die direkte Nutzung von erneuerbaren Energien, insbesondere der Einsatz von Biogas, spielt bisher im Bereich der Mikro-KWK eine untergeordnete Rolle, da die damit verbundenen Probleme schwer in den Griff zu bekommen sind. Dazu treten bei der Verbrennung biogener Brennstoffe vermehrt Schadstoffe und Problemkomponenten im Abgas auf, die zu einer Belagbildung im nachgeschalteten Wärmeübertrager führen. Die dabei auftretenden Verschmutzungen der wärmeübertragenden Flächen, das sogenannte Fouling, stellen das entscheidende Innovationshemmnis für die Nutzung von Biogas als Brennstoff dar. Das Fouling gilt es daher durch geeignete Maßnahmen zu minimieren, so dass ein wartungsarmer Dauerbetrieb über Jahre möglich wird. Um diese Innovationslücke zu schließen, hatte die intelli engineering GmbH das Ziel in Kooperation mit der Technischen Universität Braunschweig einen hocheffizienten Wärmeübertrager zu entwickeln, der für den Einsatz in biogasbetriebenen Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungen geeignet ist.

## 1. TEILPROJEKT 1: „ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINES LOW-FOULING-WÄRMEÜBERTRAGERS“ (INTELLI ENGINEERING)

Die intelli engineering GmbH beschäftigte sich in diesem Vorhaben mit der Konzeption, Konstruktion und Erprobung eines Low-Fouling Brennwertwärmeübertragers für den Betrieb von kleinen BHKW's mit Biogas. Dabei steht besonders die Reduzierung der Belagbildung durch konstruktive und oberflächentechnische Maßnahmen im Vordergrund. Der Wärmeübertrager soll dazu eine leichte Reinigung ermöglichen oder bei geringen Stückkosten einfach zu wechseln sein.

### 1.1. ÜBERSICHT UND ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes entwickelte die intelli engineering GmbH zwei foulingoptimierte Brennwertwärmeübertrager (BWÜT) als Prototypen für das intelli Heimkraftwerk®.

Beide Prototypen wurden umfassend hinsichtlich ihrer thermischen Leistungsfähigkeit getestet und im Feldtest mit dem aktuellen Serien-Wärmeübertrager in Bezug auf die Belagbildung im Biogasbetrieb verglichen. In Abbildung 1 sind beide Prototypen als CAD-Zusammenbau dargestellt.

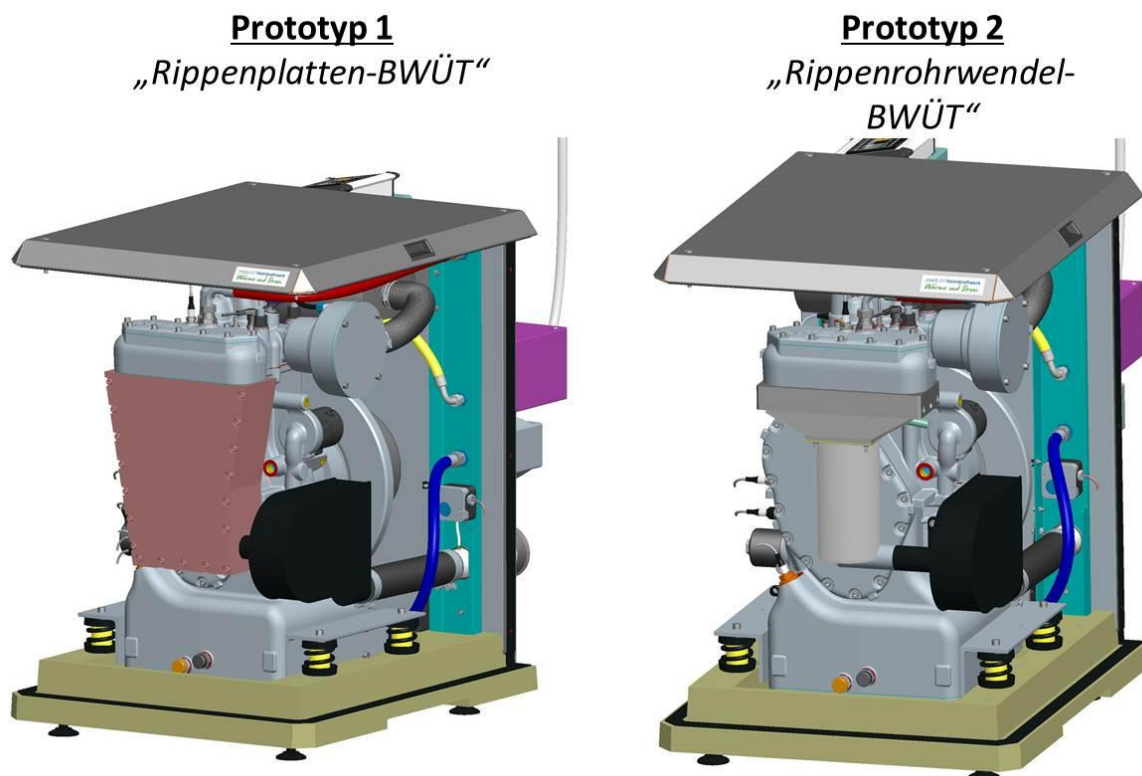


ABBILDUNG 1: BRENNWERTWÄRMEÜBERTRAGER PROTOTYP 1 UND 2 ALS CAD-ZUSAMMENBAU AM INTELLI HEIMKRAFTWERK

Bei dem ersten Prototyp handelt es sich um einen mittig teilbaren Rippenplatten-Brennwertwärmeübertrager (RP-BWÜT). Prototyp 2 ist als Rippenrohrwendel-Brennwertwärmeübertrager (RRW-BWÜT) ausgeführt. Beide Varianten erreichten schon im Prototypenstadium fast die hohe thermische Effektivität des Serien-Brennwertwärmeübertragers.

## 1.2. GRUNDLAGEN VON WÄRMEÜBERTRAGERN ZUR BRENNWERTNUTZUNG

Wärmeübertrager lassen sich nach ihrer geometrischen Ausführung und der Stoffführung in 3 Grundarten unterscheiden, wie Abbildung 2 zeigt.

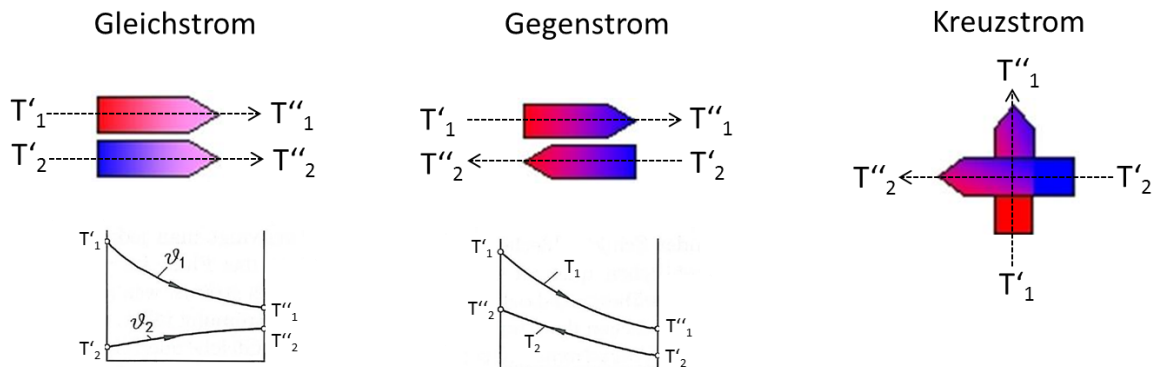


ABBILDUNG 2: GRUNDARTEN VON WÄRMEÜBERTRAGERN

Die Wärmeleistung von Gegenstromwärmeübertrager ist bei gleicher Wärmeübertragungsfläche am größten. Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen nur das Gegenstromprinzip verfolgt.

Dazu lassen sich Wärmeübertrager auch nach der technischer Grundausführung einteilen. In Abbildung 3 sind verschiedene Grundbauformen dargestellt.

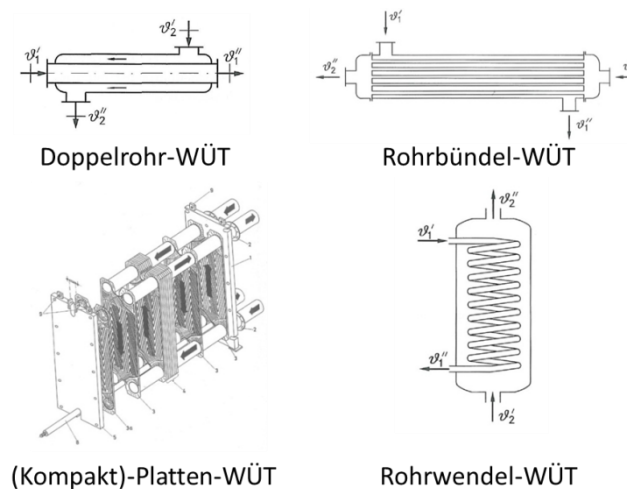


ABBILDUNG 3: GRUNDBAUFORMEN VON WÄRMEÜBERTRAGERN

Bei Brennwertnutzung kondensiert das im Abgas gasförmige Wasser aus und die Enthalpiewärme der Phasenumwandlung kann als „Brennwertwerteffekt“ genutzt werden. Das freiwerdende Kondenswasser schlägt sich im BWÜT nieder und hat in der Regel einen leicht sauren pH-Wert von pH3-5. Die Materialien, die unmittelbar mit dem Kondensationswasser in Berührung kommen, müssen aus korrosionsfreien Werkstoffen (Al-Legierungen oder Cr-Ni-Stahl) bestehen. Dazu sind zur optimalen Übertragung der Wärme Werkstoffe mit einem hohen Wärmeleitkoeffizienten vorzuziehen.

### 1.3. ENTWICKLUNG DER FUNKTIONSMUSTER

Bei der Entwicklung des Low-Fouling-Wärmeübertragers standen folgende Anforderungen im Vordergrund:

- Einsatz am intelli-Heimkraftwerk®
- Vergleichbare thermische Leistungswerte wie der Serien-WÜT mit Brennwertnutzung
- Möglichkeit zur Beschichtung der gaseitigen Wärmeübertragerfläche
- Reinigungsmöglichkeit bzw. Austauschbarkeit der Wärmeübertragerflächen
- Einfache und kostengünstige Herstellung

Der aktuell im iHKW eingesetzte Wärmeübertrager ist in Abbildung 4 im verbauten Zustand dargestellt.



**ABBILDUNG 4: EINBAUSITUATION SERIEN-WÄRMEÜBERTRAGER**

Es wird schnell deutlich, dass der Bauraum für die Neukonstruktion stark eingeschränkt ist. Auf der Gaseintrittsseite (oben) sind die Anschlussbedingungen durch den Zylinderkopfflansch fest vorgegeben. Der Gasaustritt wird durch den speziellen Schalldämpfer im iHKW definiert. Zu den anderen Seiten ist der Bauraum durch die Verkleidung und den Motorblock des iHKW beschränkt. Dazu muss der Wärmeübertrager die Aufnahme des Katalysators übernehmen und den Rücklauf- und Abgastempersensor aufnehmen.

Die Konzeption der Prototypen erfolgt auf der Basis der Bilanzierung des aktuellen Serienbrennwertwärmeübertragers. Dieser erreicht auf sehr kompaktem Bauraum eine hohe Wärmeauskoppelung aus dem Abgas. Die Bilanzierung und Beschreibung des Serien-BWÜT's ist in Kap. 2.2 beschrieben.

Eine Anforderungsliste für die Neukonstruktion des Wärmeübertragers ist im Anhang A 1 enthalten.

Nach der Bewertung verschiedener Lösungsvarianten wurden zwei Zielvarianten zur Konstruktion der Prototypen ausgewählt. Die Bewertungsmatrix ist ebenfalls im Anhang A 2 zu finden.

### 1.3.1. FUNKTIONSMUSTER 1 „RIPPENPLATTENWÄRMEÜBERTRAGER“

Der Grundaufbau des Rippenplatten-Brennwert-Wärmeübertrager (RPWÜ) ist in Abbildung 5 dargestellt.

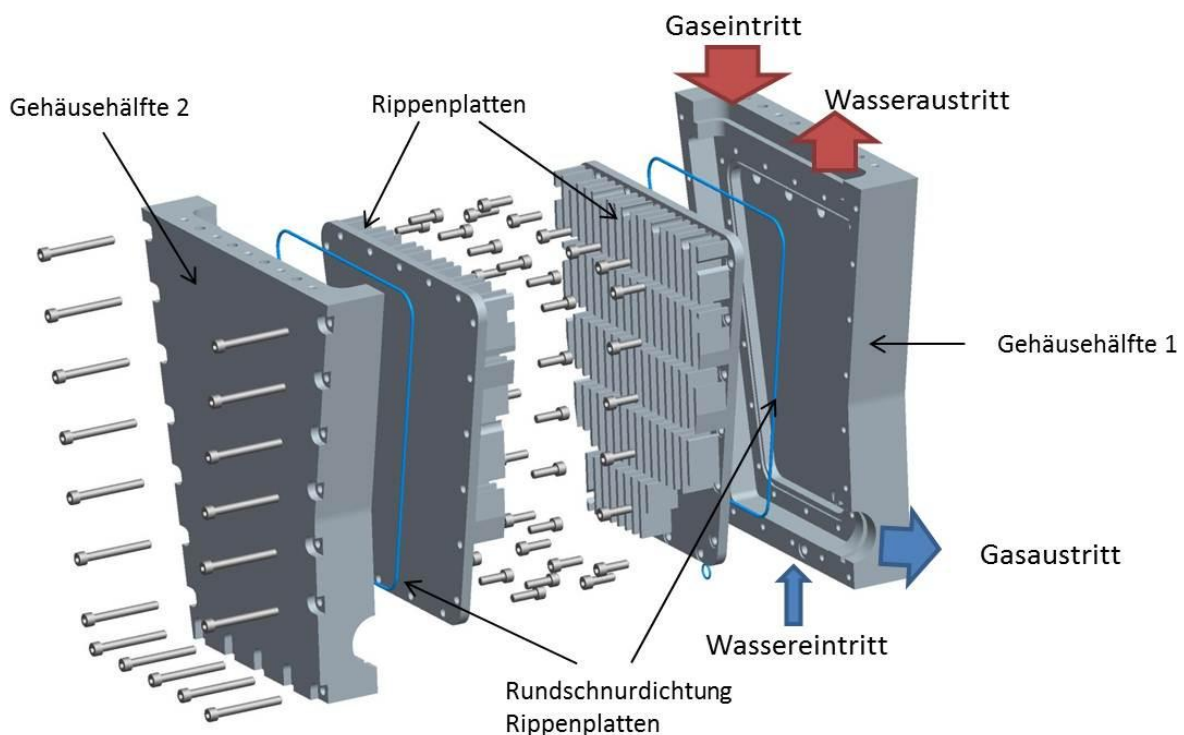


ABBILDUNG 5: EXPLOSIONANSICHT RIPPENPLATTEN-WÄRMEÜBERTRAGER MIT GRUNDAUFBAU

Der Wärmeübertrager besteht aus zwei mittig teilbaren Gehäusehälften. In jede Gehäusehälfte wird eine Rippenplatte geschraubt. Die Rippen sind auf der Abgasseite angeordnet und vergrößern dort die Wärmeübertragungsfläche und den Wärmeübergang. Das Kühlwasser strömt auf der Rückseite der Rippenplatte entlang aufsteigend in den Zylinderkopf.

Die Gehäusehälften werden mit einem Flächendichtmittel gegeneinander und gegen das Abgas abgedichtet. Die Rippenplatten werden mit einer 3 mm Rundschnur-Dichtung abgedichtet. Der Prototyp wird als Aluminium-Frästeil ausgeführt.

Für eine kostengünstige Serienlösung können die Hälften des Wärmeübertragers auch urformtechnisch hergestellt werden. Dabei können die Hälften jeweils als komplettes Gussteil im Sandguss oder die jeweils äußere Gehäusehälfte und die Rippenplatte getrennt z.B. als Kokillen oder Druckgussbauteil hergestellt werden. Auch sind Hybridbauweisen möglich.

## Auslegung der Rippen

Zur Optimierung der Wärmeauskopplung aus dem Abgas muss die Fläche des Wärmeübertragers und der Wärmeübergang möglichst maximiert werden. Diese Anforderungen stehen jedoch im Zielkonflikt mit dem verfügbarem Bauraum und dem Druckverlust, der durch wärmeübergangsgünstige Turbulenzen entsteht. Zur Optimierung der Rippenanzahl für das Funktionsmuster wurden an der TU Braunschweig CFD-Berechnungen mit parallelen und versetzten Rippen durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Fluent-Rechnung.

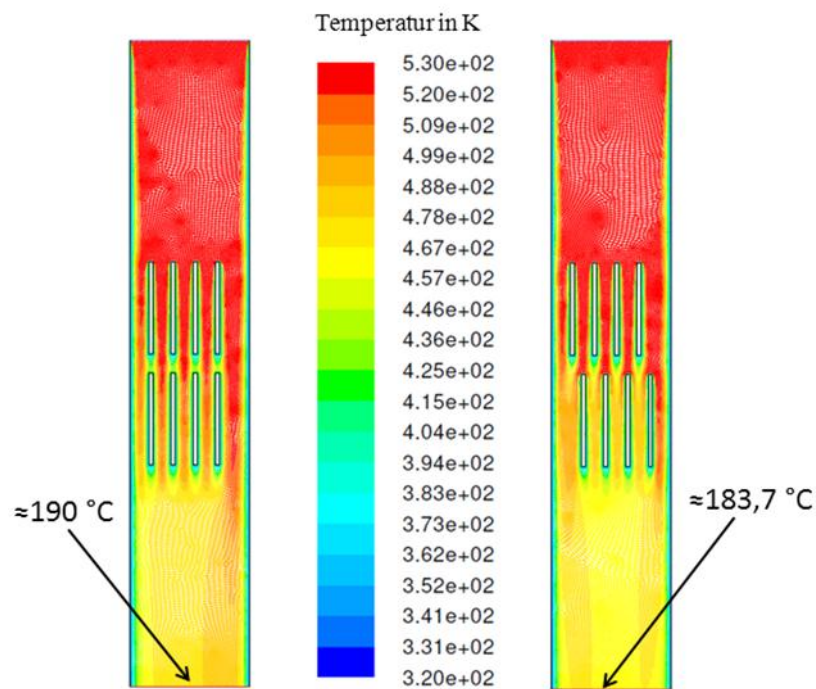


ABBILDUNG 6: CFD-RECHNUNG RIPPENANORDNUNG IN REIHE (LINKS) UND VERSETZT (RECHTS)

Mit der versetzten Rippenanordnung ist eine um 6 Grad geringere Gasaustrittstemperatur und damit eine höhere Wärmeauskopplung möglich. Für die Anordnung der Rippen auf der Rippenplatte wird dementsprechend eine versetzte Anordnung in 5 Ebenen gewählt. Die Anordnung und Rippenabmessungen zeigt Abbildung 7.

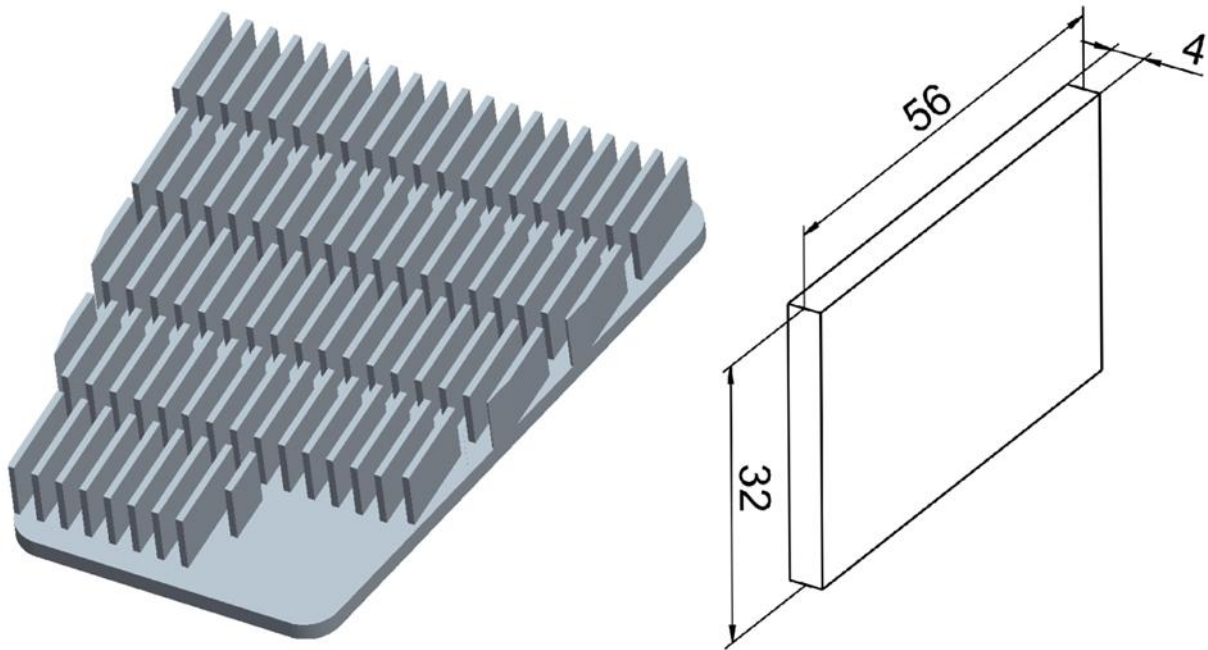


ABBILDUNG 7: ANORDNUNG DER RIPPEN AUF DER RIPPENPLATTE (LINKS) UND RIPPENABMAßE (RECHTS)

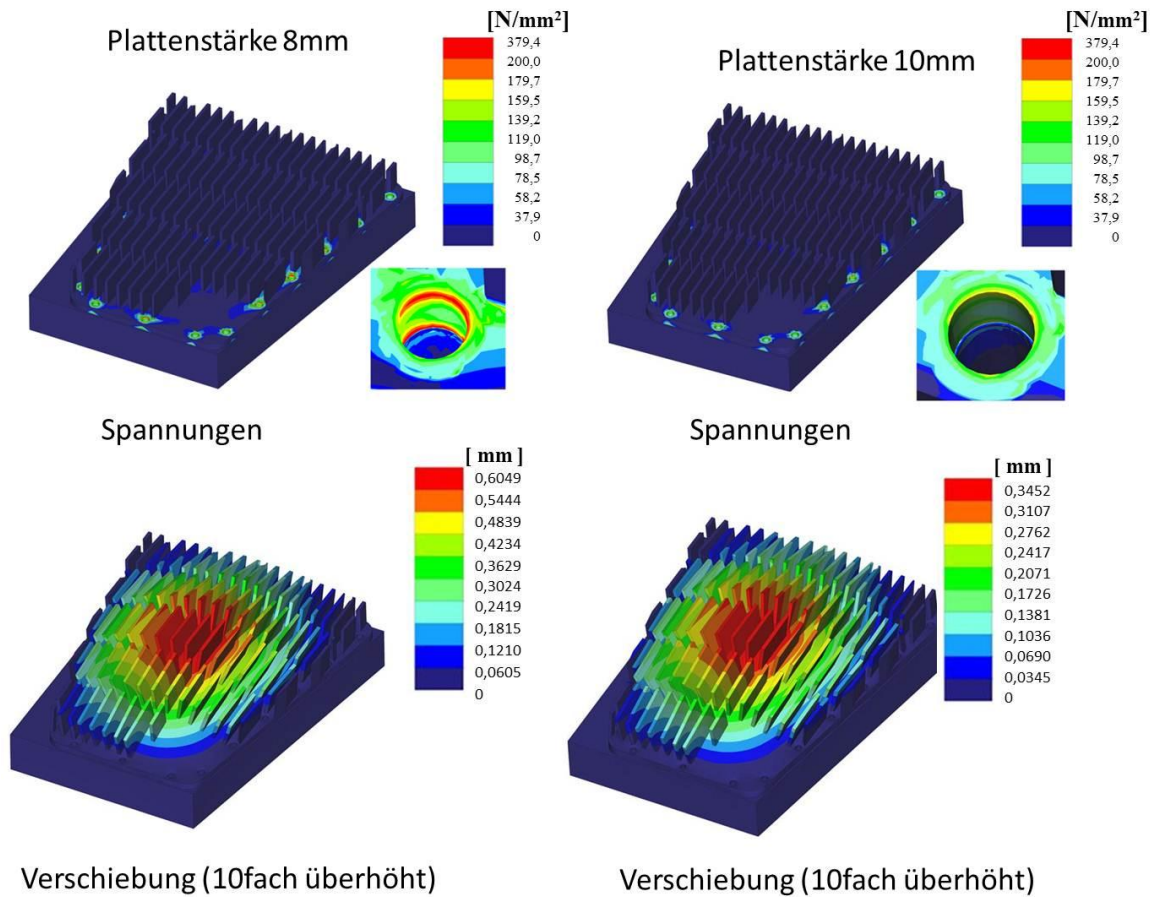
Die Rippen der gegenüberliegenden Platte greifen in die Zwischenräume der anderen Platte. Damit wird eine hohe Turbulenz und ein guter Wärmeübergang erzeugt. Mit beiden Rippenplatten wird eine Gesamtwärmeübertragerfläche auf der Abgasseite von ca.  $0,754 \text{ m}^2$  geschaffen.

### Nachrechnung der Rippenplatten

Die Rippenplatten werden im Betrieb durch den Wasserdruck belastet. Im iHKW ist ein maximaler Kühlwasserdruck von 3,5 bar zulässig. Mit einer FEM-Analyse wurde untersucht, ob die Bauteilspannungen unterhalb der zulässigen Streckgrenze von Aluminium (ca.  $200 \text{ N/mm}^2$ ) bleiben. Ferner wurde überprüft, ob es zu einer Berührung der beiden Rippenplatten durch die Durchbiegung kommen kann. Im ersten Entwurf war die Plattenstärke mit 8mm unterdimensioniert. Bei der FEM-Rechnung mit 4 bar Wasserdruck kommt es zu einer zu großen Durchbiegung der Platte im mittleren Bereich. Dieses würde zu einer Berührung beider Platten führen. Dazu sind die Bauteilspannungen im Bereich der Durchgangsbohrungen zu hoch. Mit einer Erhöhung der Plattenstärke auf 10mm wurde die Verschiebung der Platte halbiert und es kommt zu keiner Berührung der Platten im Betrieb untereinander. Dazu bleiben die Spannungen im Bereich der Durchgangsbohrungen im zulässigen Bereich. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse beider Rechnungen dargestellt.

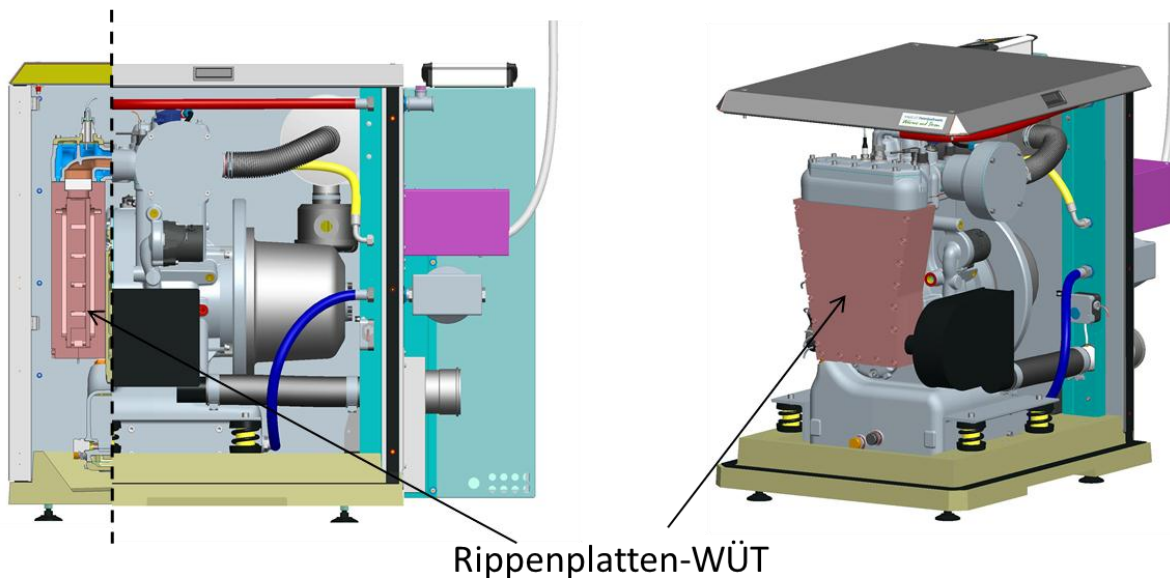
Die Fertigung der Einzelteile des Rippenplattenwärmeübertragers erfolgte in der TC TECNO CENTER GmbH in Schönebeck (Elbe).





**ABBILDUNG 8: FEM-RECHNUNG DER RIPPENPLATTE MIT 8 (LINKS) UND 10 MM PLATTENSTÄRKE (RECHTS)**

In Abbildung 9 ist die endgültige Variante der Funktionsmuster 1 im Zusammenbau im CAD dargestellt. Auf dieser Basis erfolgte die Fertigung.



**ABBILDUNG 9: CAD-ANSICHT IHKW MIT RIPPENPLATTEN-WÜT IM HALBSCHNITT UND ISOMETRISCHER ANSICHT**

### 1.3.2. FUNKTIONSMUSTER 2 „RIPPENROHRWENDEL“

Wärmetauscher auf der Basis hoch- und mittelberippter Rohre zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauform und eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Dazu sind Rippenrohre in unterschiedlichster Form und mit verschiedenen Oberflächenbehandlungen als Standardlösung verfügbar.

Die Firma Wieland Werke AG aus Ulm ist einer der führenden Anbieter von Hochleistungs-Rippenrohren aus Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen.

Der Kontakt zur Firma Wieland wurde durch die TU Braunschweig hergestellt und die Wieland stellte ein Rippenrohrpaket für den Bau eines Prototypen und eines Funktionsmuster zur Verfügung. Der Rippenrohr-Doppelwendel ist in Abbildung 10 oben dargestellt. Das Bild zeigt zudem unten den Vorschlag einer WÜT-Konstruktion der Firma Wieland.

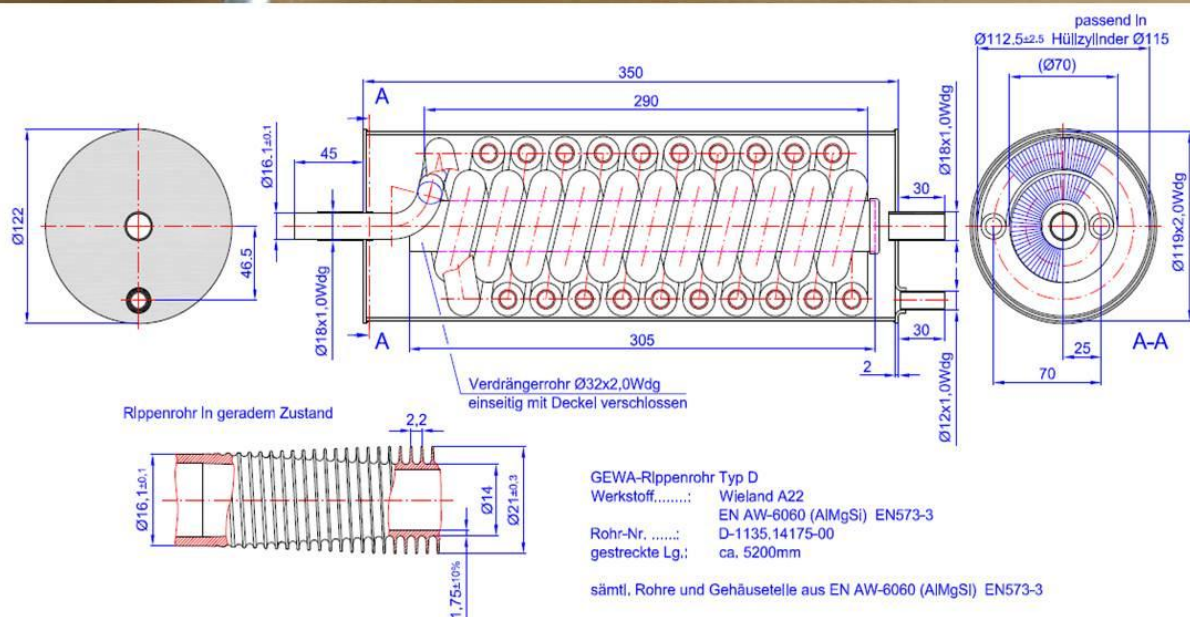


ABBILDUNG 10: RIPPENROHRPAKET DER FIRMA WIELAND

Um das Rippenrohrwendel als Wärmeübertrager am ihkw zu verwenden, muss ein komplett neues Konzept entwickelt werden. Zum einem muss die Abgasführung vom rechteckigen Querschnitt im Zylinderkopf auf sehr kurzer Strecke auf den runden Anschluss des Rippenrohrwendels geändert werden. Dazu muss in diesem Bereich das Kühlwasser, was den gesamten Abgasraum umschließt, in das Rippenrohr geführt werden. Das Wasser kann auch nicht mehr außen um das Abgas geführt werden, sondern muss innen vom Abgas umströmt werden. Abbildung 11 zeigt eine erste Skizze des Funktionsmusters.

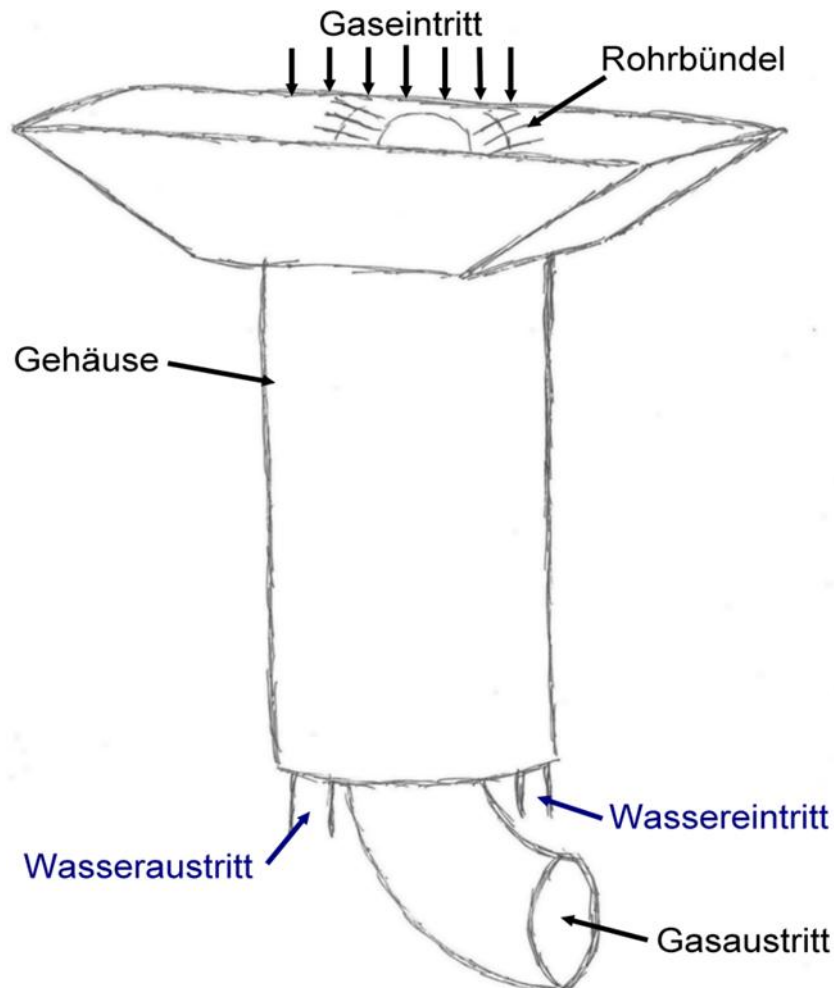
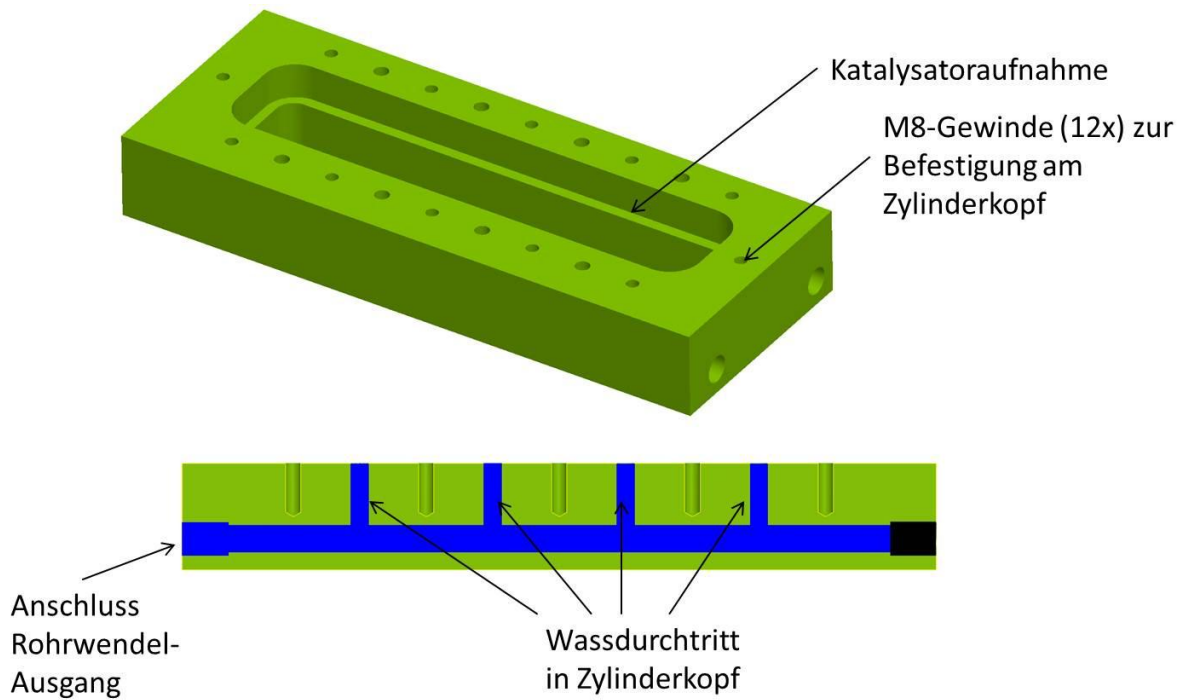


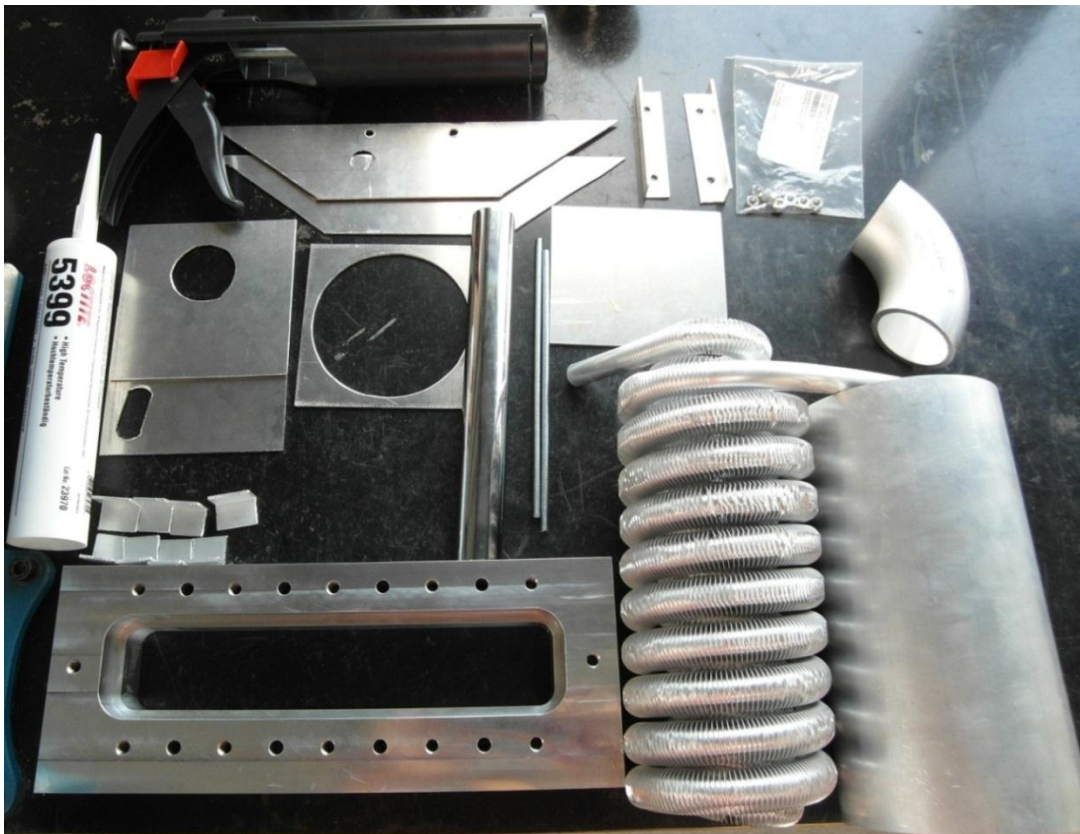
ABBILDUNG 11: SKIZZE „RIPPENROHRWENDELWÄRMEÜBERTRAGER“

Wie in der Skizze zu sehen, soll das Abgas durch eine Art Trichter auf den runden Querschnitt gelenkt werden. Im Anschluss an die Rohrwendel wird die Abgasumlenkung durch einen Rohrkrümmer realisiert. Als Anbindung an den Zylinderkopf und zur Katalysatoraufnahme dient ein Flansch. Dieser führt das Wasser aus der Rohrwendel in den Zylinderkopf. Der Flansch (Abbildung 12) wurde als 3D-Modell konstruiert und durch die TU Braunschweig gefertigt.

Die Fertigung der restlichen Bauteile für das Funktionsmuster mit der Rippenrohrwendel erfolgte etwas unkonventionell durch den Nachbau der Skizze in Abbildung 11 aus 2mm Aluminium-Blech. Die einzelnen Zuschnitte (Abbildung 13) wurden mit einem Hochtemperaturkleber Loctite 5399 zusammengefügt.

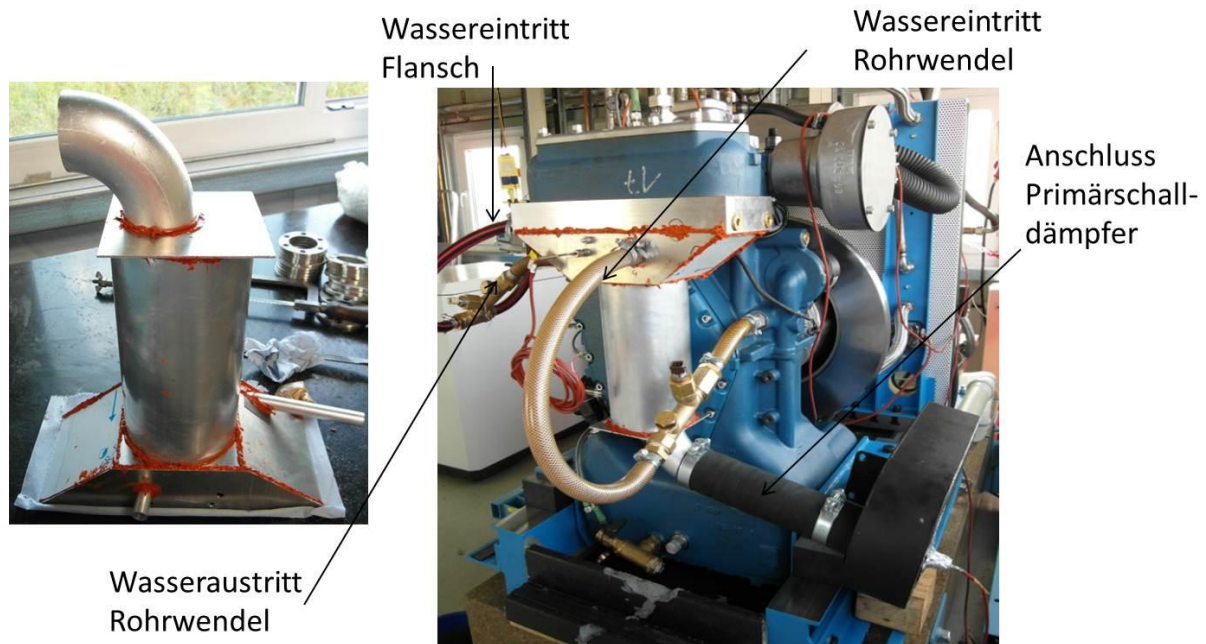


**ABBILDUNG 12: FLANSCH MIT EINZELHEITEN FÜR DEN ROHRWENDEL-WÜT**



**ABBILDUNG 13: AUSGANGSMATERIALIEN ZUM BAU DES FUNKTIONSMUSTERS**

Den fertig zusammengeklebten Prototypen zeigt Abbildung 14 links. Da das Rohrwendel nur über Rohrstützen am Wasserein- und -austritt verfügt, muss der hydraulische Anschluss zum BHKW über eine Schlauch-Schelle-Verbindung realisiert werden. Die Einleitung des erwärmten Wasser in den Zylinderkopf erfolgt im Flansch.

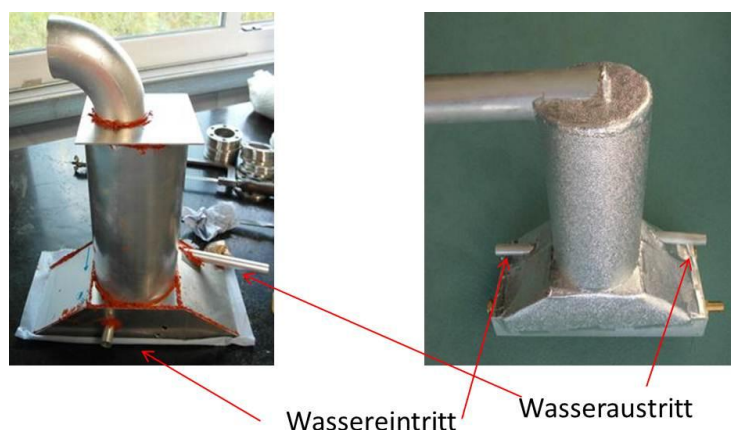


**ABBILDUNG 14: FUNKTIONSMUSTER 2 UND MONTAGE AM PRÜFSTAND**

Die Anbindung des Primärabgasschalldämpfers stellte sich durch eine Höhendifferenz von ca. 70 mm zwischen den Schalldämpfereingang und den Austritt am Bogen des Funktionsmusters als problematisch heraus. Der Abgasschlauch ist sehr steif und kann nicht weit genug auf den Abgasbogen geschoben werden. Damit ist nur eine Anbindung wie im Bild ersichtlich möglich. Mit diesem Prüfstands Aufbau konnten erste befeuerte Versuche gefahren werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass es an den geklebten Verbindungsstellen schnell zu Gasundichtigkeiten kommt. Für weitere Untersuchungen musste das Funktionsmuster verbessert werden. Dazu wurden folgende Änderungen durchgeführt:

- Verschweißen der Einzelbleche
- Wassereintritt wird um 90° gedreht
- Abgasaustritt durch gerades Rohr

Nach dem Zusammenschweißen der Einzelteile in der Schweißtechnischen Lehranstalt Magdeburg gGmbH wurde eine mit Aluminium kaschierte Polystyrol-Isolierung auf dem Prototyp aufgebracht. Abbildung 15 zeigt die Änderungen im Vergleich.



**ABBILDUNG 15: ÄNDERUNGEN AM FUNKTIONSMUSTER 2**

## 1.4. FUNKTIONSTEST AUF DEM PRÜFSTAND

Der Funktionstest der Wärmeübertrager-Funktionsmuster erfolgte im Außen-Versuchsfeld (AVF) der intelli engineering GmbH. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Abbildung 16. Die BWÜT werden an einem mit Erdgas betriebenen und zusätzlicher Messtechnik ausgerüstetem intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> betrieben. Bei den Versuchsreihen wird thermische Gesamtleistung  $P_{th}$  des BHKW's gemessen und der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  nach folgender Formel berechnet:

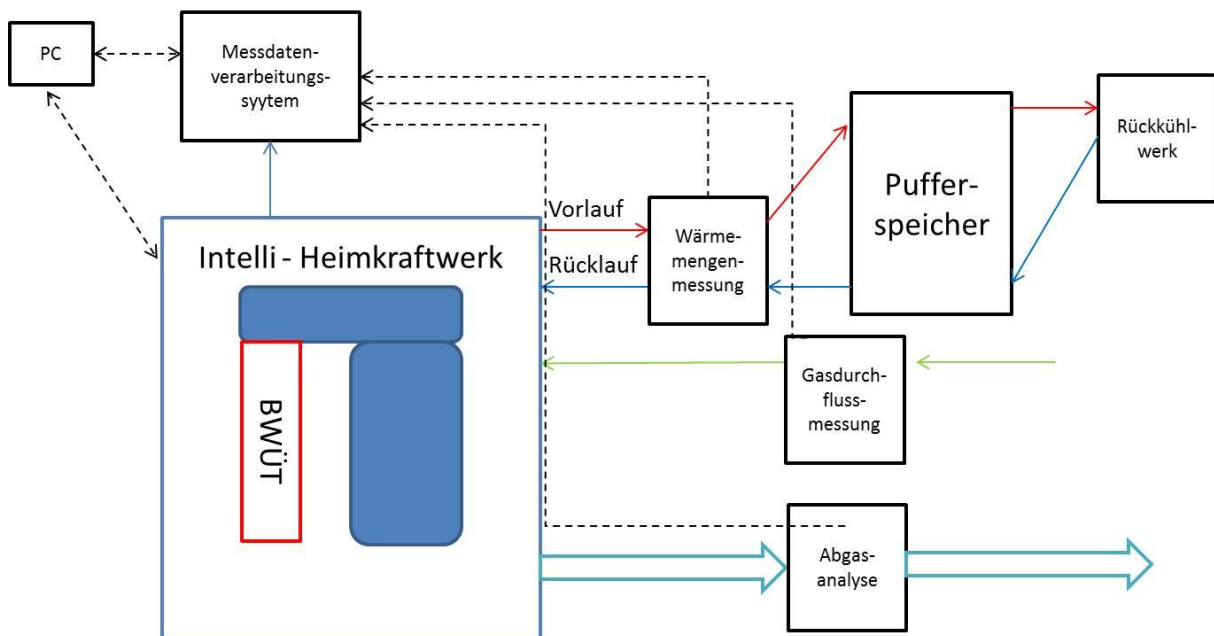
$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{Gas}}$$

Die eingesetzte Gasenergie  $P_{Gas}$  berechnet sich aus dem gemessenen Gasdurchfluss  $\dot{V}_{Gas}$  und dem unterem Heizwert von Erdgas und  $H_i = 9,8 \text{ kWh}/\text{m}^3$  (wird als konstant angenommen) nach:

$$P_{Gas} = H_i * \dot{V}_{Gas}$$

Die elektrische Leistung wird durch das iHKW konstant geregelt. Dies funktioniert über die PWM-Regelung des Gasventils. Damit kann das iHKW eine konstante elektrische Leistung auch bei schwankenden Umgebungsbedingungen (z.B. Gasqualität, Luftdruck, Ölzustand usw.) im wirkungsgradgünstigen ungedrosselten Betrieb erreichen. Dazu regelt das BHKW die Vorlauftemperatur auf konstant 90°C über die PWM-Ansteuerung der Ladepumpe. Damit ist das iHKW in der Lage, mit variablerer Rücklauftemperatur betrieben zu werden.

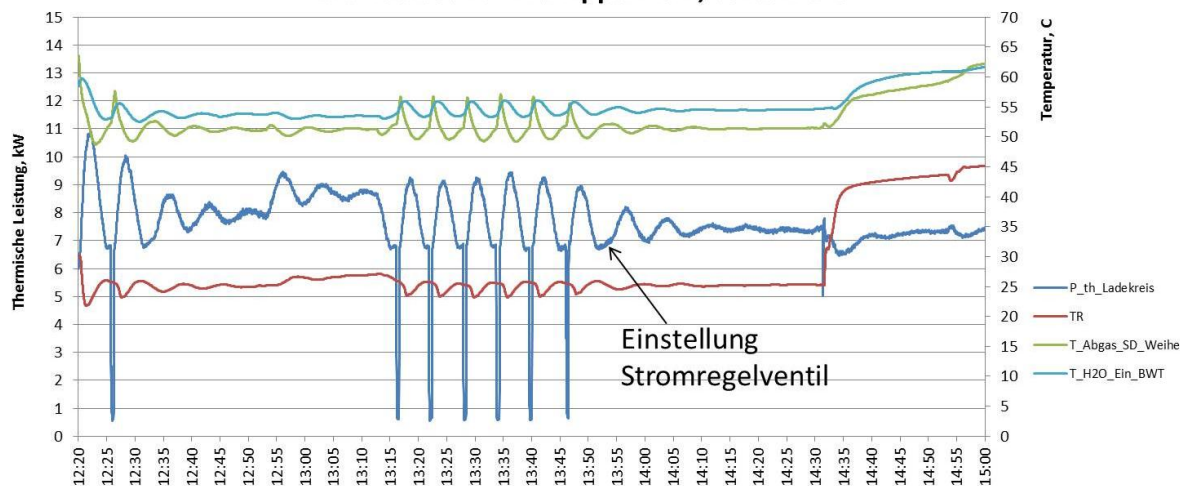
**Prüfstandsaufbau „Heizungsprüfstand“  
im Aussen-Versuchsfeld**



**ABBILDUNG 16: PRÜFSTANDAUFBAU IM AVF**

Für die Messung wird für jeden Messpunkt jeweils ein stationärer Betriebspunkt eingestellt. Dazu wird der Vorlaufvolumenstrom mittels eines Stromregelventils manuell soweit gedrosselt, bis die Ladepumpe durchgängig fördert und nicht pulsierend betrieben wird. In Abbildung 17 wird die Notwendigkeit und Auswirkung der Einstellung des Rücklaufes sichtbar.

Nach dem Drosseln des Stromregelventils stellt sich eine konstante thermische Leistung ein.  
**Wärmetauscher mit Rippenrohr, 05.03.2013**

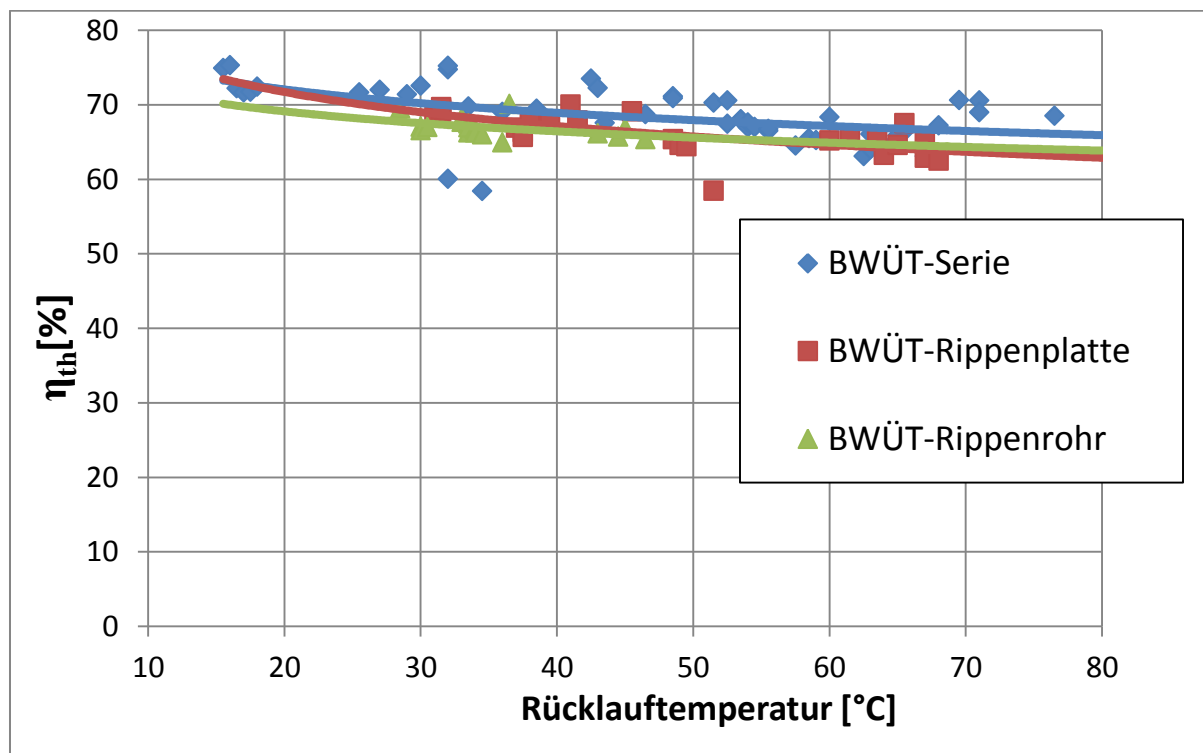


**ABBILDUNG 17: MESSDATEN EINER MESSUNG MIT DEM RIPPENROHR-BWÜT MIT REGELEINGRIFF**

Bei den Versuchsreihen wurden folgende Parameter variiert, um die Funktionsmuster möglichst breitbandig zu untersuchen:

- Rücklaufemperatur  $T_R$  (ca. 25...75°C)
- Elektrische Sollleistung  $P_{el}$  (2...3kW)
- Abgastemperatur nach Auslass durch Zündzeitpunktverstellung  $T_{aus1}$  (ca. 300...450°C)

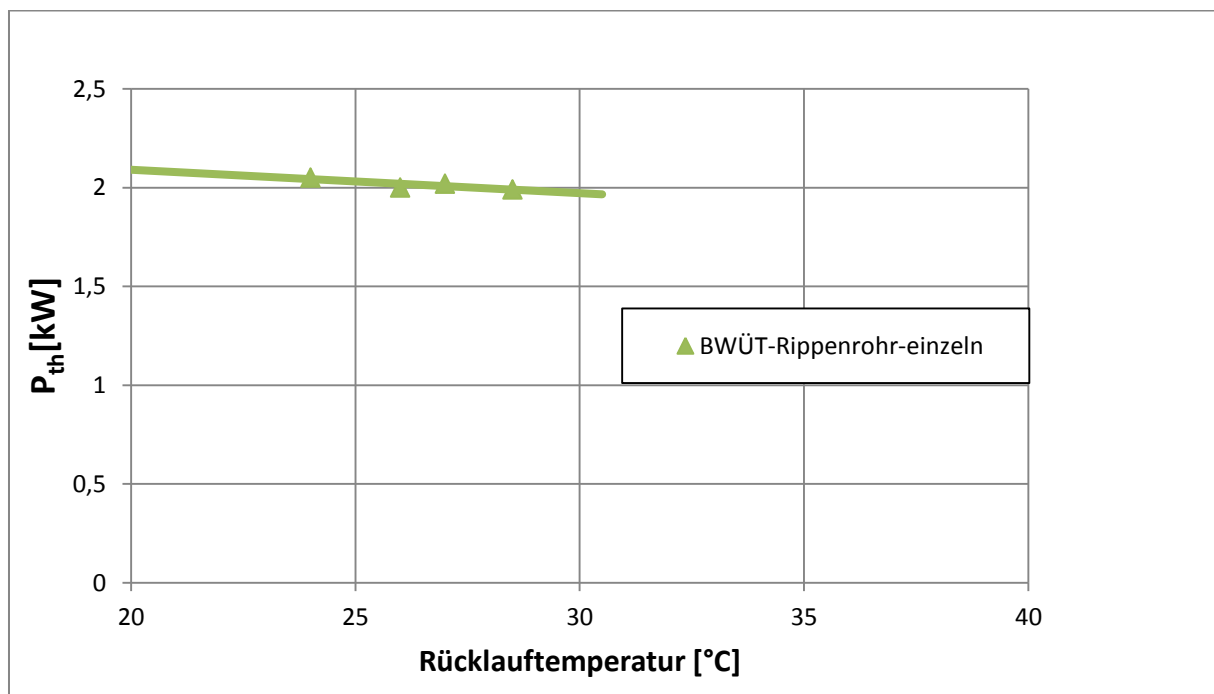
Dazu wurden die beiden Funktionsmuster nicht nur untereinander, sondern mit einem Serien-BWÜT verglichen. In Abbildung 18 ist ein Vergleich des thermischen Wirkungsgrades der Wärmeübertrager über der Rücklaufemperatur dargestellt.



**ABBILDUNG 18: ÜBERSICHT THERMISCHER WIRKUNGSGRAD MIT VERSCHIEDENEN BWÜT**

Es wird deutlich, dass das iHKW mit den drei verschiedenen Wärmeübertragern jeweils einen ähnlichen Wirkungsgrad erreicht. Im Vergleich liegt der Serien-BWÜT auf dem höchsten Niveau. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die prototypische Anbindung der Funktionsmuster einen höheren Wärmeverlust an die Umgebung bedeutet. Weiterhin hat sich bei den Messreihen gezeigt, dass alle Wärmeübertrager bei Parametervariationen ein vergleichbares Verhalten zeigen. Damit sind beide Funktionsmuster für den Einsatz im Feldtest geeignet.

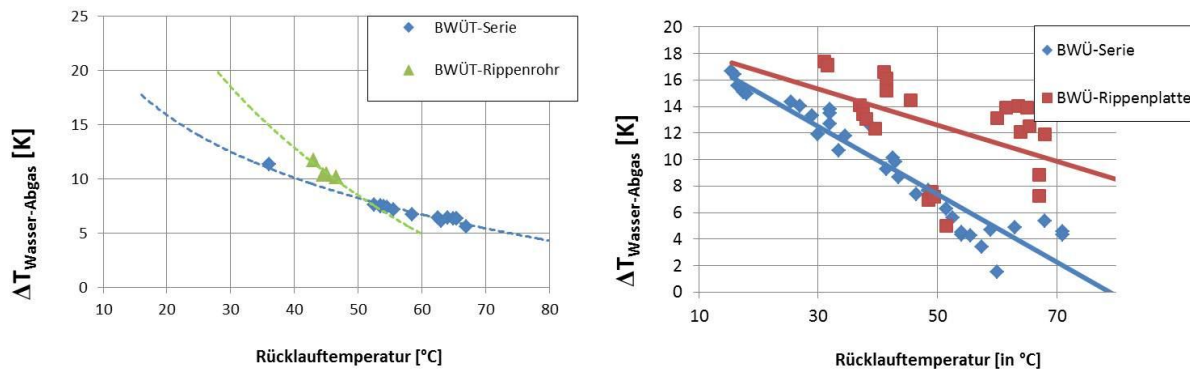
Da das Funktionsmuster 2 das Rücklaufwasser mit einem Schlauch in den Flansch am Zylinderkopf leitet, kann dort die Temperatur gemessen und die reine thermische Leistung des Rippenrohrwendels bestimmt werden. Wie aus Abbildung 19 ersichtlich, erreicht die Rippenrohrwendel mit ca. 2 kW eine vergleichbare Leistung, wie in der Bilanzierung für den Serien-BWÜT berechnet.



**ABBILDUNG 19: WÄRMEMENGENMESSUNG RIPPENROHRWENDEL EINZELN**

Ein wichtiges Kriterium für die Effektivität ist die Temperaturdifferenz zwischen Wassereintritt- ( $T_R$ ) und Abgasaustrittstemperatur ( $T_{A,n_{BWT}}$ ). Je geringer die Temperaturdifferenz ist, desto effektiver ist die Wärmeauskoppelung aus dem Abgas. In Abbildung 20 ist der Vergleich der Temperaturdifferenz der beiden Funktionsmuster mit dem Serien-WÜ bei verschiedenen Messungen dargestellt.





**ABBILDUNG 20: VERGLEICH DER ABGASTEMPERSPREIZUNG**

Der Serien-BWÜT hat im Vergleich die geringste Temperaturdifferenz. Der Unterschied liegt in der Konstruktion der Prototypen begründet. Durch die obere Zuführung des Rücklaufes beim Rippenrohrwendel hat das Wasser beim Abgasaustritt eine höhere Temperatur. Der Rippenrohr-BWÜT arbeitet nicht vollständig nach dem Gegenstromprinzip.

Beim Rippenplatten BWÜ liegt der Grund in der Wasserführung des Funktionsmusters. Das Rücklaufwasser wird durch zwei Bohrungen direkt in die beiden Wasserkammern geführt und verbleibt nur sehr kurz im unteren Teil des BWÜT. Im Serien-BWÜT wird der Abgasausgang deutlich besser vom kalten Wasser umspült, und dementsprechend kann das Abgas weiter abgekühlt werden. Insgesamt sind die Unterschiede der Wärmeübertrager untereinander nur sehr gering.

### Zusammenfassung und Beurteilung der Funktionsmuster

Der Rippenrohr-WÜT und der Rippenrohrwendel-WÜT zeigen bereits als Prototyp ähnliche Leistungswerte, wie der Serien-WÜT, bieten jedoch die Vorteile der Beschichtbarkeit und sind bei Bedarf einfach zu Reinigen.

Im Funktionstest sind jedoch auch konstruktive Mängel an beiden Prototypen aufgefallen, die im weiteren Entwicklungsprozess verbessert werden sollten.

### Der Rippenplatten-BWÜT

Prinzipbedingt ist dieser BWÜT mittig teilbar. Die Abdichtung der beiden Gehäusehälften und der Rippenplatten zeigte im Test keine Probleme und war auch mehrfach sogar mit derselben Rundschnur möglich. Jedoch wäre eine Demontagehilfe oder Abdrückbohrung sinnvoll, um die Teile nach langer Betriebszeit einfach voneinander trennen zu können. Als Problematisch stellt sich jedoch der Entfall von 2 Befestigungsschrauben zum Zylinderkopf dar. Abbildung 21 zeigt den Anschlussflansch des Funktionsmusters von der Zylinderkopfseite. Man erkennt, dass die 2 rot dargestellten zusätzlichen Befestigungsbohrungen in der ausgeführten Variante nicht vorhanden sind, da sie genau in der Trennfuge liegen würden. Dadurch kam es in diesem Bereich häufig zu Undichtigkeiten. Durch den Einsatz von Flüssigdichtmittel und höherem Anzugsmoment für die restlichen Schrauben, konnte der Wärmeübertrager in den Versuchen verwendet werden. Für die Serienlösung wäre es zweckmäßig, die Teilung des BWÜT asymmetrisch auszuführen (Im Bild rot skizziert).

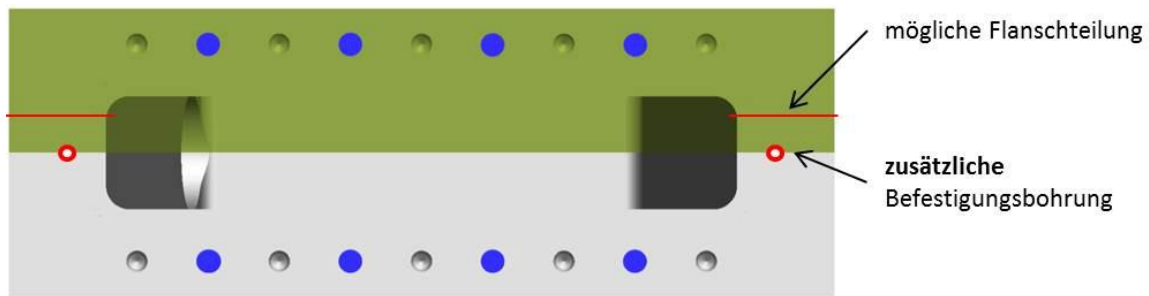


ABBILDUNG 21: ANSCHLUSSFLANSCH RIPPENPLATTEN BWT

### Der Rohrwendel-BWÜT

Dieser Prototyp hat neben der schon benannten Verletzung des Gegenstromprinzips noch weitere Schwachstellen, die konstruktiv verbessert werden müssen. Problematisch war vor allem die Befestigung des Rücklaufschlauches auf dem Rohrstutzen. Hier muss eine sichere Verschraubung vorgesehen werden.

Dazu muss bei diesem Wärmeübertragertyp eine gute Isolierung des äußeren Abgasführungsrohres vorgesehen werden, da prinzipbedingt kein außenliegender Wassermantel zur Isolierung vorhanden ist.

### Serienentwurf eines Rippenrohrwendel-BWÜT's mit geänderten Zylinderkopf am iHKW

Um das Potential der Rippenrohrwendel voll zu nutzen, wurde eine Konzeptstudie entworfen. Bei diesem Konzept wurden der Zylinderkopf und der Primärwärmeübertrager des intelligenten Heimkraftwerkes® geändert. Damit wird ein runder Flanschanschluss für den Rippenrohrwendel-BWÜT realisiert. Abbildung 22 zeigt den Aufbau.

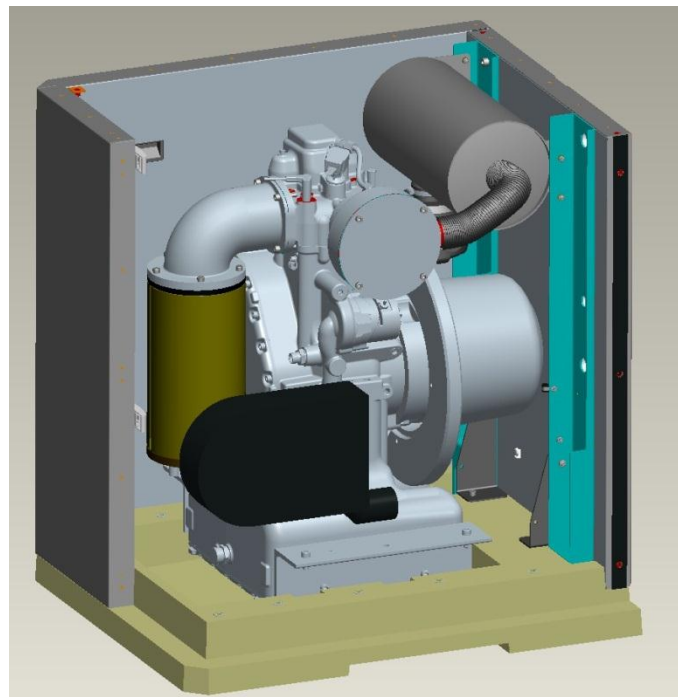


ABBILDUNG 22: ENTWURF EINES SERIENENTWURFES MIT RIPPENROHRWENDEL-BWÜT

Der Zylinderkopf ist deutlich kürzer und der Primärwärmeübertrager wird über einen Flansch an den Zylinderkopf geschraubt. Der Primärwärmeübertrager ist als doppelwandiges 90° Rohrelement ausgeführt. Der Primärwärmeübertrager dient ebenfalls zur Aufnahme eines runden Katalysatorelementes. Dieses kann damit wirkungsgradgünstig nah am Auslass positioniert werden. Die prinzipielle Wasserführung im iHKW bleibt erhalten. Die Vermischung des inneren Motorkreislaufes und des externen Kreislaufes findet weiterhin im Primär-WÜ, also jetzt im Doppelrohr statt. Der Primärschalldämpfer muss nur leicht an diese Änderungen angepasst werden. Für diesen Wärmeübertrager wird eine einfache Rohrwendel anstatt der Doppelrohrwendel verwendet. Dadurch kann die WÜT nach dem Gegenstromprinzip arbeiten. Abbildung 23 zeigt die Details der Lösung.

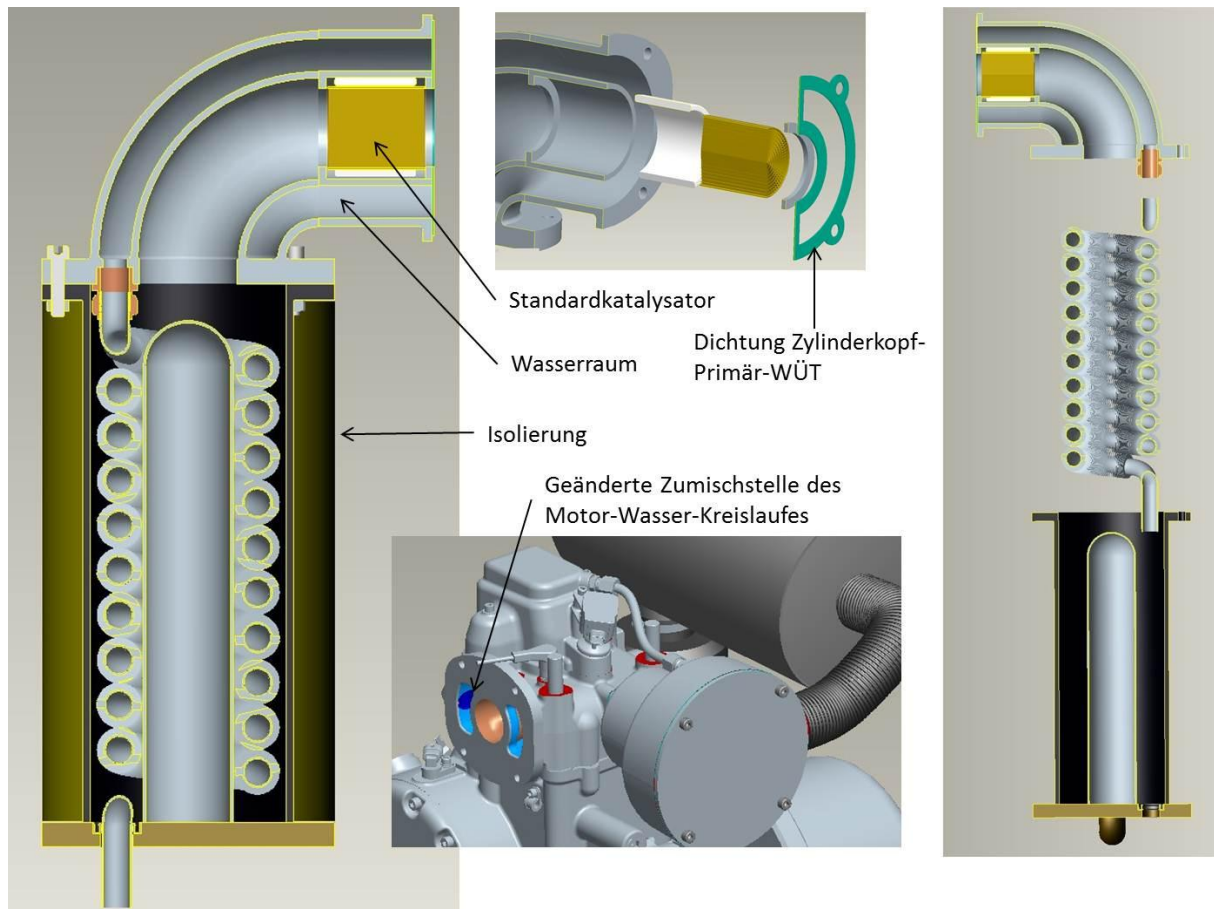


ABBILDUNG 23: SERIENENTWURF RIPPENROHRWENDEL-WÜ

## 1.5. VERSUCHE ZUR BELAGBILDUNG MIT EINEM BIOGASBETRIEBENEM iHKW

Mit freundlicher Genehmigung der Firma ABO Wind AG konnten in der Biogasanlage in Ebendorf bei Magdeburg ein intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> installiert werden, das mit dem dort erzeugten Biogas betrieben wird. Das iHKW wird in der Entschwefelungshalle betrieben und die Abwärme zur Beheizung der Rohgasentschwefelung genutzt.



**ABBILDUNG 24: iHKW IN DER BIOGASANLAGE IN EBENDORF**

Abbildung 24 zeigt das dort aufgestellte iHKW. Bei diesem Gerät handelt es sich um Serien-iHKW „VEG 1.2“.

Da Biogas durch den hohen CO<sub>2</sub>-Anteil einen deutlich niedrigeren Heizwert als Erdgas besitzt, muss mehr Gas durch die Venturidüse der Verbrennungsluft zugeführt werden. Dazu wurden die Gaszuführbohrungen der Düse um ca. 60% erweitert. Damit läuft das intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> mit der elektrischen Sollleistung von 2,6 kW. Dass die Hydraulik des BHKW's in die hydraulische Anlage der Biogasanlage integriert wurde, machte zu Testbeginn Probleme. Das iHKW wurde durch die viel stärkeren Pumpen der dortigen Anlage rückwärts durchspült. Mit dem Einbau einer hydraulischen Weiche und einer zusätzlichen Wasserpumpe konnte das iHKW in den Feldtest gehen. Die hydraulische Einbindung zeigt Abbildung 25.

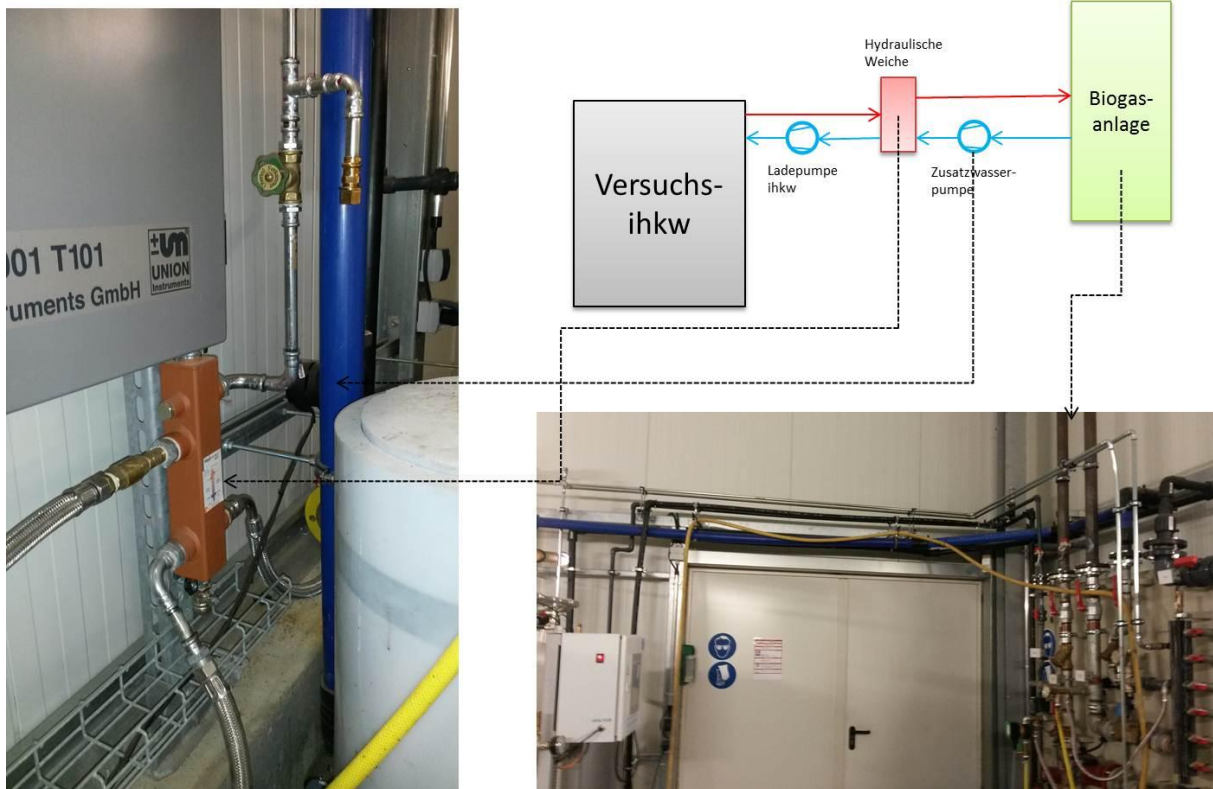


ABBILDUNG 25: HYDRAULISCHE EINBINDUNG DES IHKW IN EBENDORF

Um eine hohe Laufzeit des iHKW's zu erreichen, wurde die Ein- und Ausschalttemperatur in der Steuerung so gewählt, dass das BHKW möglichst rund um die Uhr durchläuft. Weiterhin wurde das iHKW mit einem Fernwartungsrouter versehen, um ständig Zugriff auf das Gerät zu haben. Abbildung 26 zeigt die HMI-Oberfläche des iHKW per Fernzugriff. Damit ist ein vollständiger Zugriff auf das Gerät und die Datenbanken möglich.

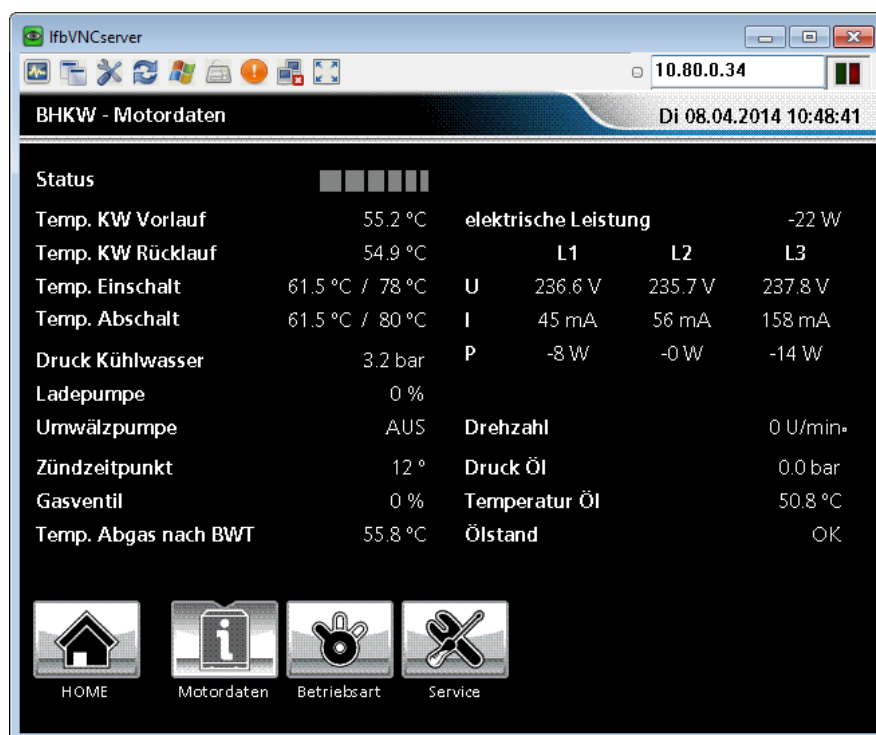


ABBILDUNG 26: FERNZUGRIFF MITTELS VNC-VIEWER

## 1.5.1. VERSUCHSAUFBAU MIT VERSCHIEDENEN WÄRMEÜBERTRAGERN

### Versuchsaufbau Serien-BWÜT

Der Aufbau entspricht der Serienkonfiguration des intelli Heimkraftwerkes mit einer geänderten Venturidüse.

### Versuchsaufbau Rippenplatten-BWÜT

Der Versuchsaufbau des Rippenplatten-BWÜ ist in Abbildung 27 dargestellt. Zum Anschluss des Rücklaufs an Wärmeübertrager wird ein Panzerschlauch verwendet. Der Rücklauftemperatursensor wird als Anlegefühler am Eintrittsfitting des Prototyps ausgeführt. Zur Abdichtung des BWÜT zum Zylinderkopf wurde das Flächendichtmittel „Loctite 5399“ verwendet. Weitere Änderungen zum Serienbetrieb waren nicht notwendig.

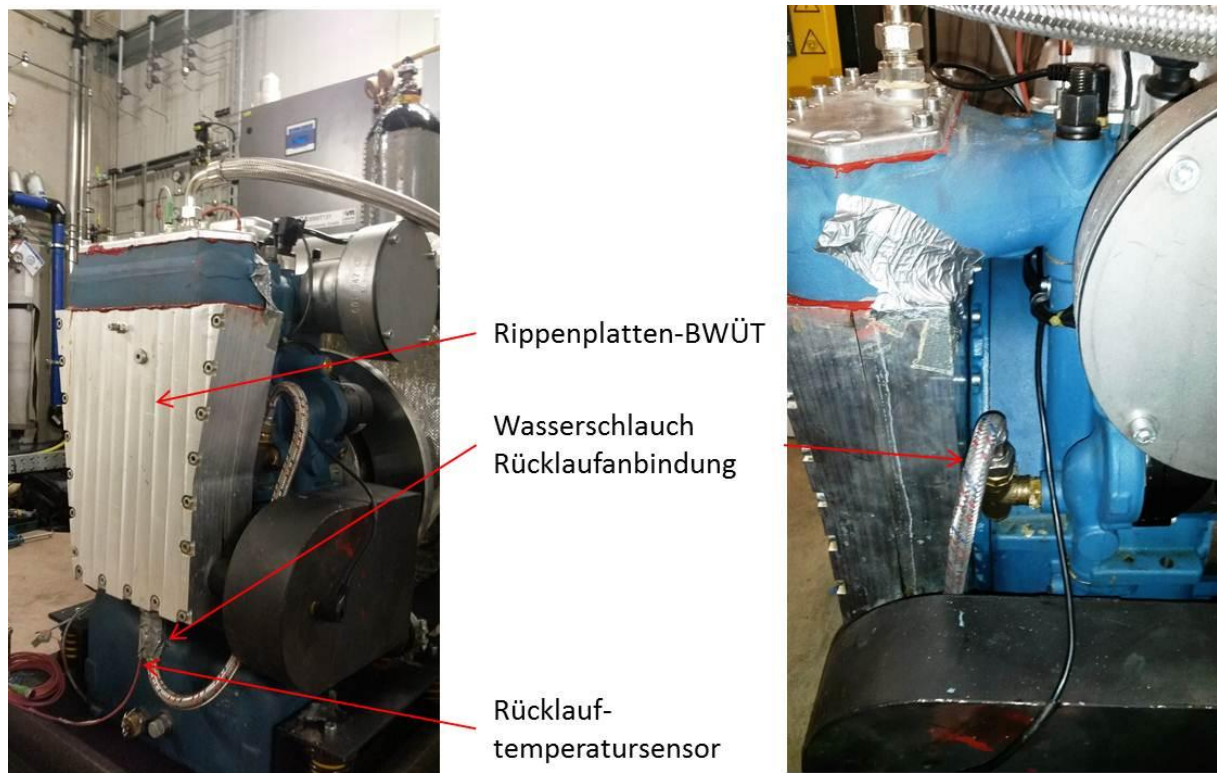


ABBILDUNG 27: VERSUCHSAUFBAU DES RIPPENPLATTEN-BWÜT IN EBENDORF

### Beschichtung der Rippenplatten

Die Rippenplatten wurden vor dem Einbau des Funktionsmusters mit verschiedenen Beschichtungen versehen. Die Beschichtung entspricht den Empfehlungen der TUBS aus den durchgeführten Laborversuchen. Abbildung 28 zeigt die beschichteten Platten vor dem Zusammenbau des BWÜT.

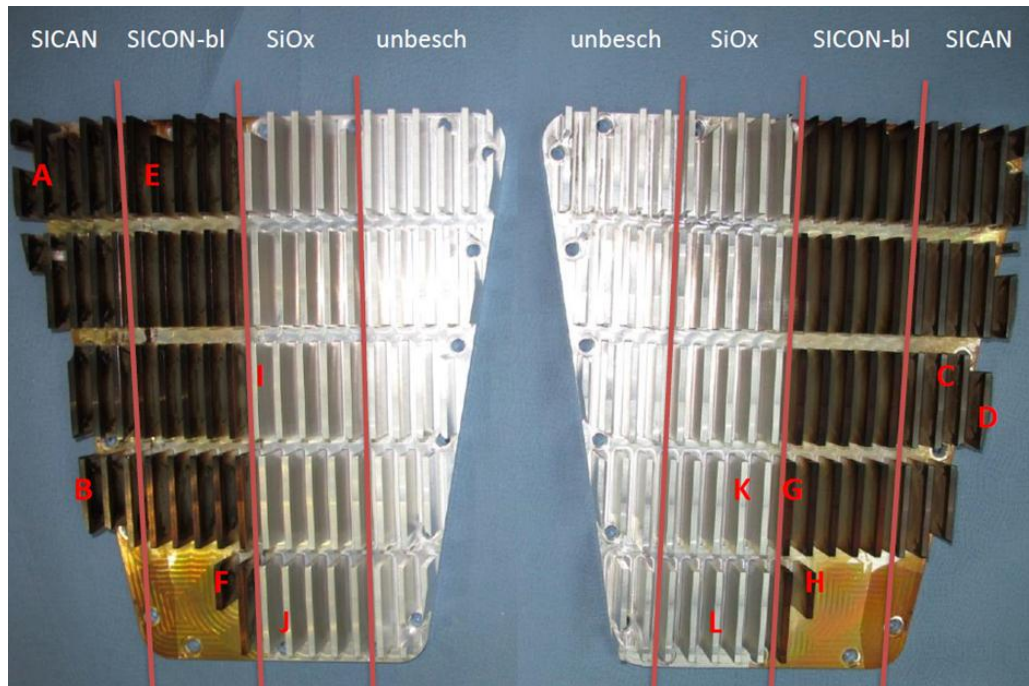
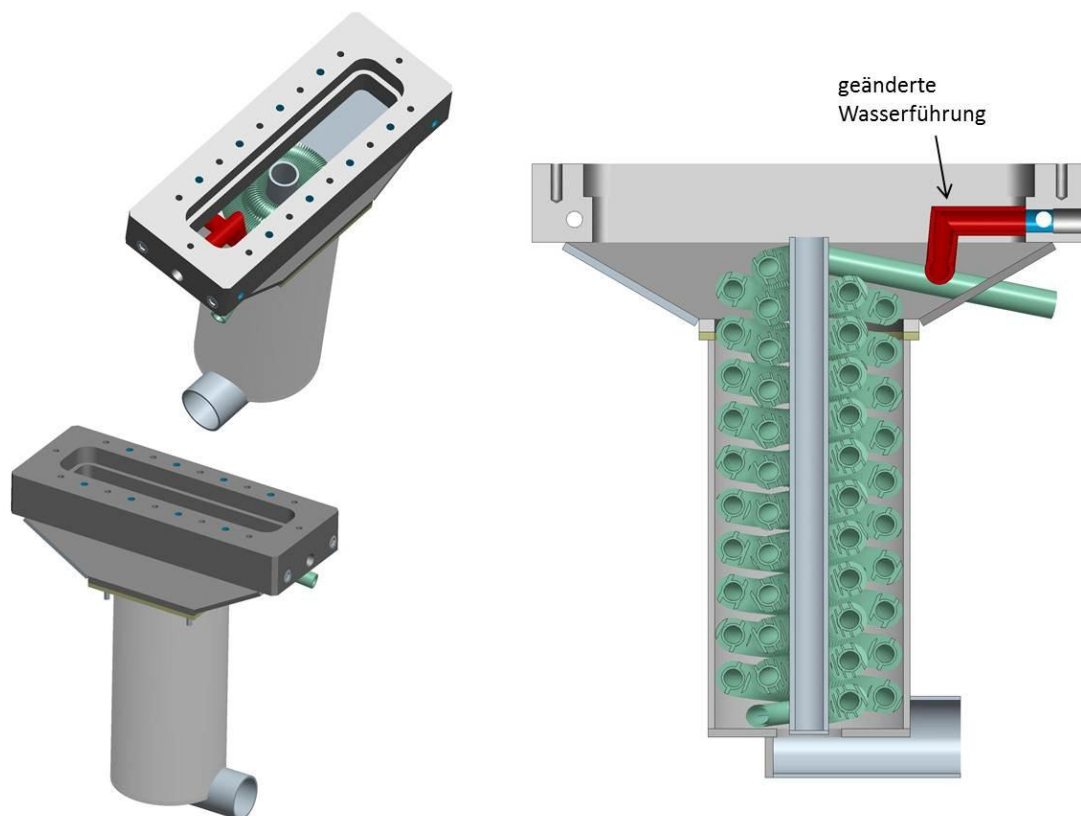


ABBILDUNG 28: BESCHICHTUNG DER RIPPENPLATTEN

### Versuchsaufbau Rippenrohrwendel

Für die Versuchsreihe wurde aus dem Funktionsmuster 2 der Prototyp 2 „Rippenrohrwendel“ mit einer beschichteten Doppelrohrwendel entwickelt. Neben der Beschichtung des Rippenrohres, wurde auch die Wasserführung im Flansch geändert. Das Wasser wird jetzt im inneren des Prototyps in den Flansch geleitet. Damit ist kein zusätzlicher äußerer Schlauch notwendig.

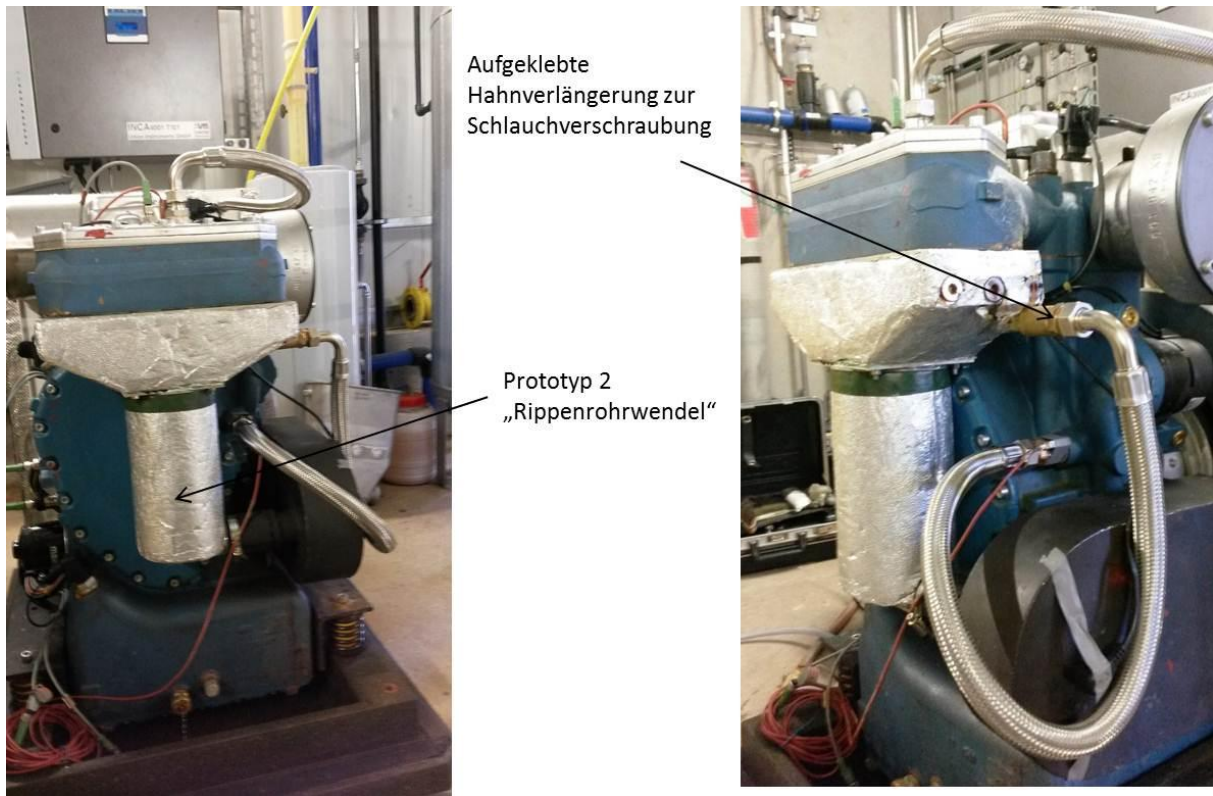


**ABBILDUNG 29: BWÜT "RIPPENROHRWENDEL" FÜR DEN FELDVERSUCH**

Die Details der Variante des Prototyps 2 für die Feldversuche zeigt Abbildung 29.

Durch das Aufkleben einer Rohrverlängerung konnte der Rücklaufanschluss so geändert werden, dass ein Panzerschlauch verwendet werden kann. Abbildung 30 zeigt den Versuchsaufbau in Ebendorf.





**ABBILDUNG 30: VERSUCHSAUFBAU MIT RIPPENROHRWENDEL-BWT IN EBENDORF**

## 1.5.2. VERSUCHSPLAN UND ZWISCHENERGEBNISSE

### Versuchsplan

In den Feldtests wurde jeder Wärmeübertrager ca. 1000 Bh am Biogas-ihkw betrieben. Im Anschluss wurde der Wärmeübertrager demontiert und in der TU-Braunschweig analysiert.

Das intelli Heimkraftwerk® und die Wärmeübertrager werden in regelmäßigen Abständen kontrolliert und es wurden endoskopische Aufnahmen vom Innenraum gemacht.

Die Wärmeübertrager wurden in folgender Reihenfolge getestet:

1. Serienwärmeübertrager
2. Prototyp 1 „Rippenplatte“
3. Prototyp 2 „Rippenrohrwendel“

### Zwischenergebnisse

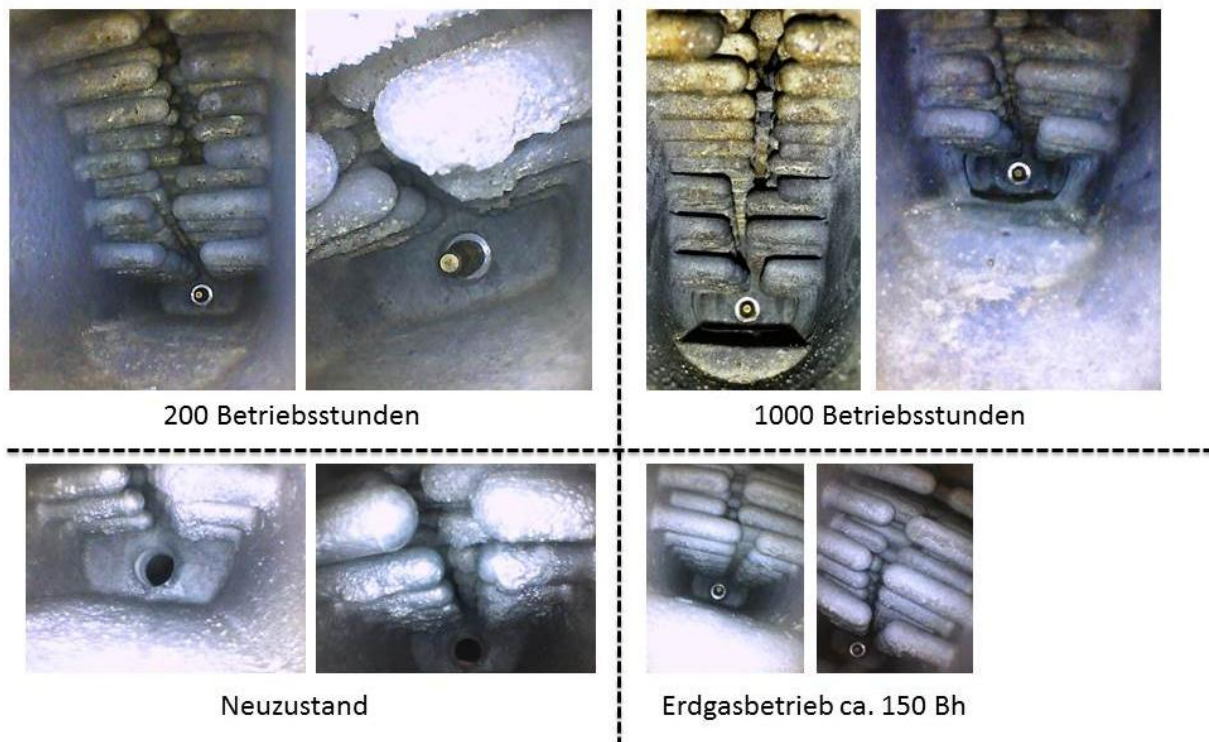
Um erste Erkenntnisse über den Belagbildungsprozess und das Verhalten des Verbrennungsmotors im Biogasbetrieb zu bekommen, wurde der Serien-BWÜT alle 200 Bh untersucht. In Abbildung 31 sind die Befundungsergebnisse nach 200 und 1000 Bh dargestellt. Im ersten Bild ist jeweils der Brennraum mit Kolben, Ventilen, der Zündkerze sowie dem Einlassventil abgebildet. Auffälligkeiten sind bei beiden Untersuchungen nicht festzustellen. Der Brennraum zeigt normale Ablagerungen und es ist kein erhöhter Verschleiß nach 1000 Bh erkennbar. Der Betrieb mit Biogas hat demzufolge keine signifikanten Auswirkungen auf den Brennraum.

#### Befundung Brennraum im Biogasbetrieb



ABBILDUNG 31 ZWISCHENBEFUNDUNG BRENNRAUM NACH 200 UND 1000BH

### Befundung Serienwärmeübertrager im Biogasbetrieb

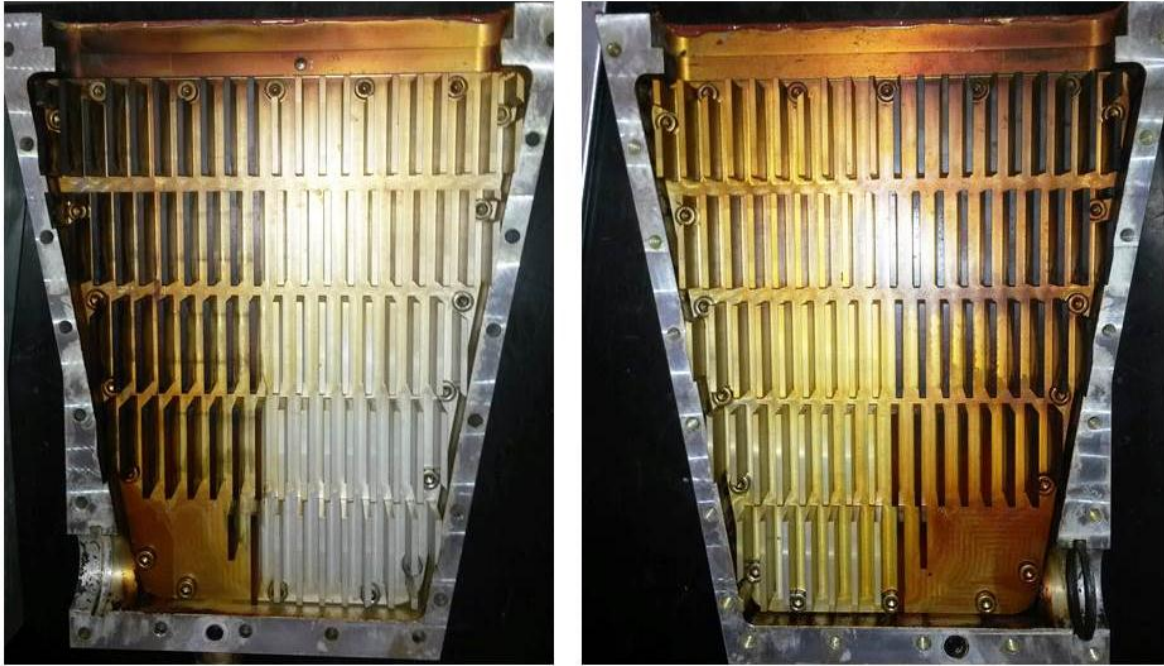


**ABBILDUNG 32: ZWISCHENBEFUNDUNG SERIEN-BWÜT NACH 200 UND 1000 BH**

Bei der Befundung des Serienbrennwertwärmeübertragers ist zuerst festzustellen, dass sich an den Pins und an den Wänden gelbliche Ablagerungen gebildet haben (siehe Abbildung 32). Diese sind höchstwahrscheinlich auf den höheren Schwefelgehalt im Brenngas zurückzuführen. Im Vergleich mit dem Erdgas-BWÜ sind die Ablagerungen deutlich sichtbar. Weiterhin ist keine deutliche Veränderung in der Belagbildung nach 200 und 1000Bh bei Befundung auf den ersten Blick feststellbar.

In den anderen Befundungen war nicht mehr Belag als in den dargestellten Bildern zu erkennen. Deshalb wurde auf eine weitere Befundung im 200 Bh Rhythmus für die folgenden Prototypen verzichtet. Ferner sind die Prototypen mittels Endoskop nicht so gut zu beurteilen. Bei einer Demontage der Funktionsmuster, zur Zwischenbefundung der Belagbildung würde die Gefahr bestehen, das Kühlwasser über die Wärmeübertragerflächen läuft, und die Belagbildung dadurch bei der Befundung gestört wird.

In der Abbildung 33 ist der Rippenplatten-BWÜT nach Demontage dargestellt.



**ABBILDUNG 33: RIPPENPLATTEN-BWÜT NACH DER DEMONTAGE**

An den Rippenplatten ist keine Belagbildung auch im unbeschichteten Bereich mit dem bloßen Auge sichtbar. Wahrscheinlich liegt der Grund in der glatten Oberfläche durch die Bearbeitung der Platten.

Den Rippenrohrwendel-BWÜT nach dem 1000 Bh Testlauf zeigt Abbildung 34. Auch an diesem BWÜT ist keine deutliche Foulingbildung erkennbar.

Die genauen Ergebnisse der Untersuchung der Belagbildung sind in 2.3 beschrieben.



**ABBILDUNG 34: RIPPENROHR-BWÜT NACH DER DEMONTAGE**

Der Rippenrohrwendel-Prototyp hat im Versuch 936 Stunden absolviert, bevor es demontiert wurde. Abbildung 34 zeigt den Prototyp nach dem Ausbau.

### 1.5.3. ABGASUNTERSUCHUNG IM BIOGASBETRIEB

Um den Einfluss des Biogasbetriebs auf die Abgasbestandteile des iHKW zu untersuchen, wurde eine Abgasuntersuchung im Betrieb durchgeführt. In Abbildung 35 sind die TA-Luft relevanten Abgasbestandteile bei verschiedenen Zündzeitpunkten dargestellt. Durch den höheren  $\text{CO}_2$ -Anteil des Luft-Kraftstoff-Gemisches sinkt der  $\text{NO}_x$ -Wert des Abgases mit dem Serien-Zündzeitpunkt auf weniger als die Hälfte des zulässigen Wertes. Dadurch ist es möglich, den Zündzeitpunkt wirkungsgradgünstig in Richtung „früh“ zu verstellen. Damit sinkt der Gasverbrauch bei konstanter elektrischer Leistung.

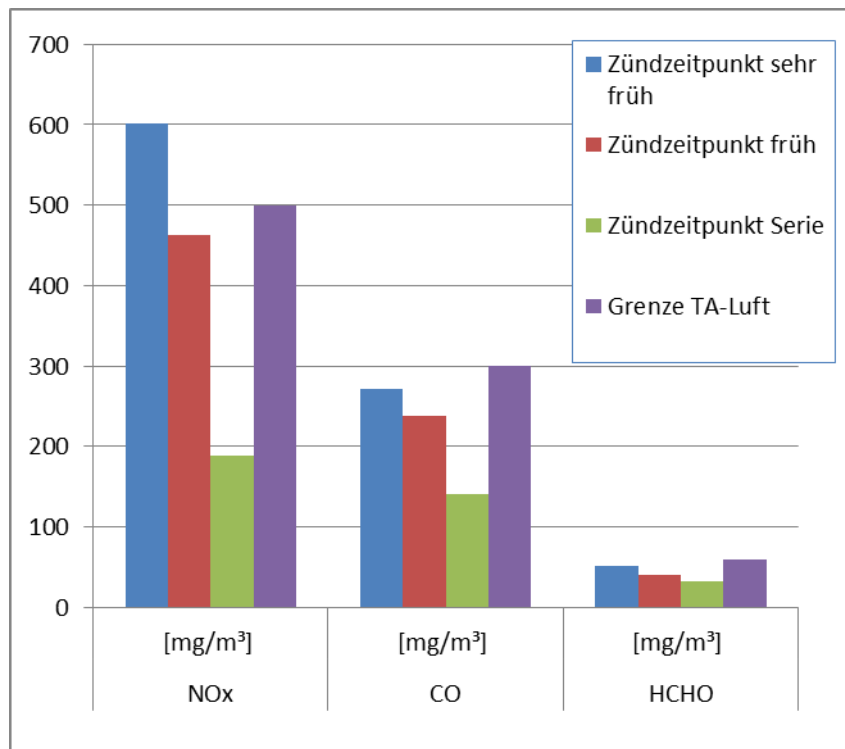
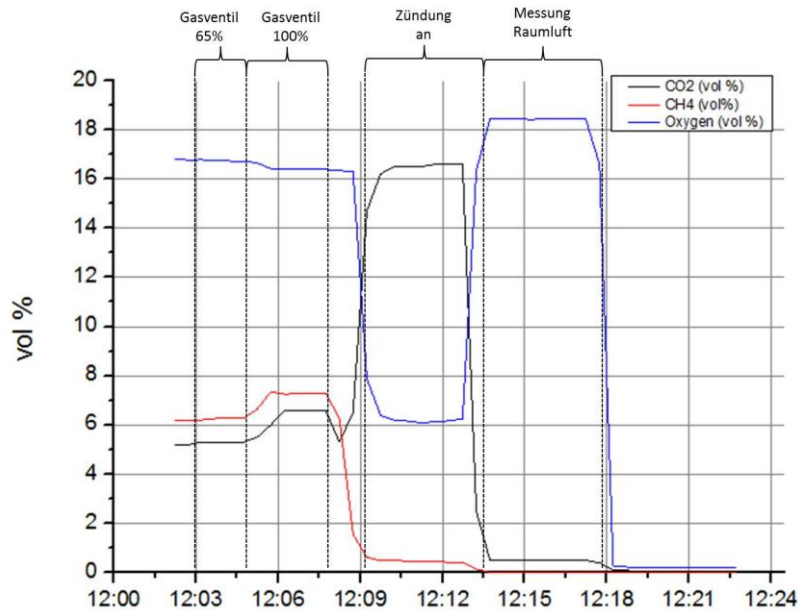


ABBILDUNG 35: ABGASMESSUNG IM BIOGASBETRIEB

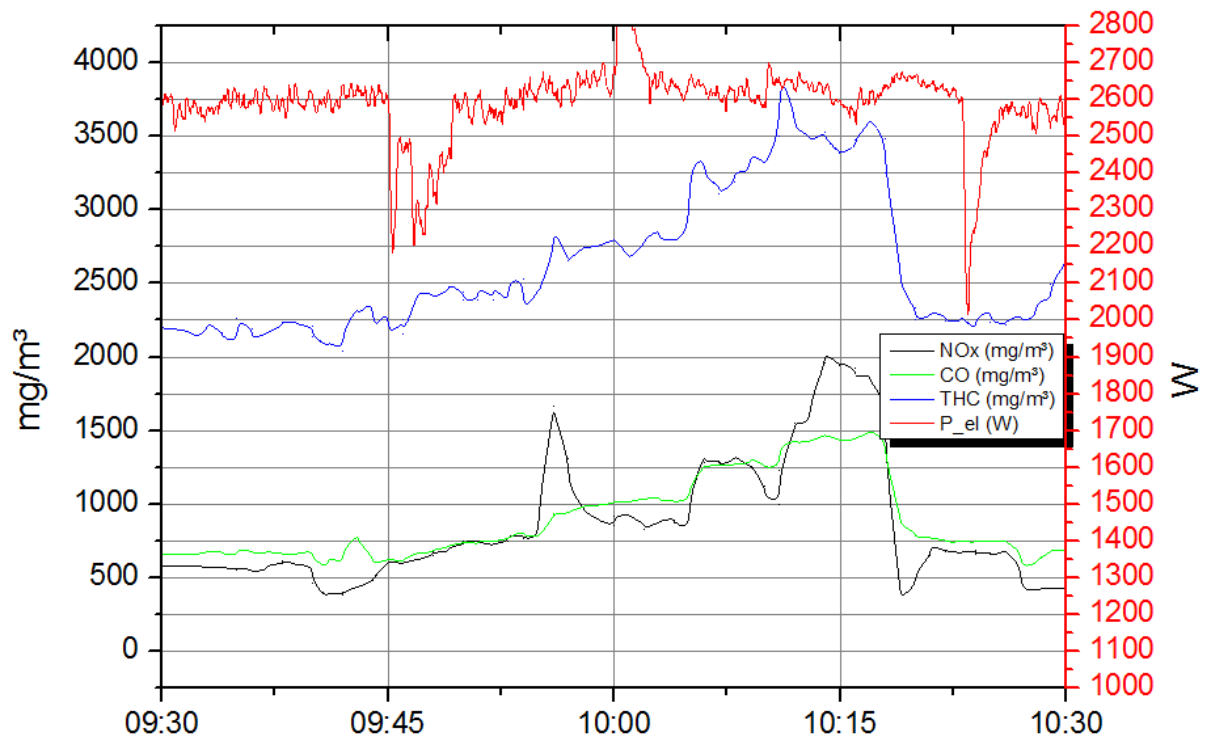
Bei den Abgasmessungen betrug der  $\text{CH}_4$ -Anteil des Biogases ca. 54% und der  $\text{CO}_2$ -Anteil lag bei ca.45%. In Abbildung 36 sind die Gasbestandteile  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{O}_2$  in „vol %“ auf trockenes Gas bezogen dargestellt.



**ABBILDUNG 36: VERBRENNUNGSGASMESSUNG**

Die Gasmessung erfolgte mit deaktivierter Zündung in der Abgasstrecke. Die Gasventileinstellung 65% entspricht einer elektrischen Leistung von ca. 2000W und 100% Gasventileinstellung entsprechen 2800W. Durch den hohen CO<sub>2</sub>-Anteil im Biogas beträgt der Anteil im Gemisch ca. 5-7%. Durch diesen hohen Inertgasanteil ändert sich die Verbrennung im Zylinder. Die Verbrennung läuft langsamer ab und die Spitzentemperaturen im Zylinder sinken. Dies führt zu der gemessenen Reduzierung der Stickoxidbildung.

Für eine genauere Untersuchung wurde eine Abgasmessung ohne Oxidationskatalysator durchgeführt. Dabei wurde der Zündzeitpunkt variiert, um das Verhalten der Abgaswerte zu beurteilen. Abbildung 37 zeigt den Trendverlauf der Messung. Auffällig ist der im Vergleich hohe Anteil der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (THC). Die Ursache liegt in der geänderten Verbrennung durch den höheren CO<sub>2</sub>-Anteil. Mit einer Anpassung der Kolbenmulde kann die Verbrennung jedoch leicht wieder an den gewünschten schnellen Ablauf angepasst werden.



**ABBILDUNG 37: ABGASMESSUNG MIT BIOGAS OHNE OXIDATIONSKATALYSATOR**

Bereits bei dem Funktionstest der Prototypen auf dem Prüfstand zeigten sich keine Unterschiede in den Abgaswerten der Wärmeübertrager untereinander, was jedoch auch nicht zu erwarten war.

## 2. TEILPROJEKT2 „ WÄRME- UND STRÖMUNGSTECHNISCHE AUSLEGUNG DER WÄRMEÜBERTRAGER UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR FOULINGMINDERUNG MIT BESCHICHTUNGEN“ (ICTV)

Das ICTV führt in diesem Teilprojekt Untersuchungen zur Minderung des Fouling durch verschiedene Beschichtungen durch. Die Beschichtungen werden experimentell getestet und mit wärme- und strömungstechnischen Analysen ergänzt. Aus diesen Versuchen werden die Beschichtungen für den Feldtest der Wärmeübertrager ermittelt. Dazu unterstützt das ICTV bei der theoretischen Auslegung der Wärmeübertrager-Prototypen. Weiterhin wertet das ICTV die Wärmeübertrager nach dem Feldtest aus.

### 2.1. GRUNDLAGEN DER WÄRMEÜBERTRAGUNG UND FOULING

In den meisten technischen Anwendungen, in denen Wärme von einem Fluid 1 auf ein Fluid 2 übertragen wird, sind diese durch eine Wand voneinander getrennt. Dabei wird Wärme konvektiv von Fluid 1 zur Wandoberfläche und auf der anderen Seite von der anderen Wandoberfläche auf Fluid 2 übertragen, während die Wärme innerhalb der Wand durch Wärmeleitung transportiert wird.

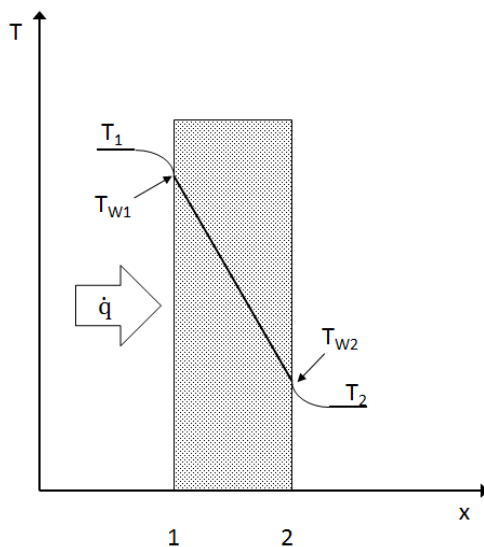


ABBILDUNG 38: TEMPERATURVERLAUF BEIM WÄRMEÜBERGANG DURCH EINE WAND

In Abbildung 38 ist der Temperaturverlauf bei der Wärmeübertragung durch eine ebene Wand der Dicke  $\delta$  dargestellt. Die beiden Fluidtemperaturen sind hierbei mit  $T_1$  und  $T_2$ , die entsprechenden Wandtemperaturen mit  $T_{w1}$  und  $T_{w2}$  bezeichnet. Die konvektiven Wärmestromdichten von Fluid zu Wand und Wand zu Fluid werden mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$\dot{q}_{\text{konv1}} = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{w1}) \quad \text{und} \quad \dot{q}_{\text{konv2}} = \alpha_2 \cdot (T_{w2} - T_2)$$

Die Wärmestromdichte infolge der Wärmeleitung kann mit den beiden Wandtemperaturen, dem Wärmeleitwiderstand des Wandmaterials  $\lambda$  und der Dicke der Wand folgendermaßen bestimmt werden:

$$\dot{q}_{\text{leit}} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_1 - T_2)$$



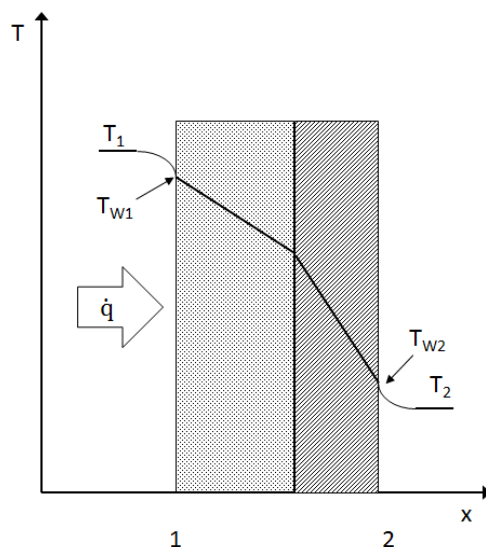
Ist der Wärmeübergang stationär und ist die Wand eben, so sind die Wärmestromdichten überall gleich. Man kann somit durch Kombination der Gleichungen die Wandtemperaturen eliminieren und erhält folgenden Zusammenhang:

$$\dot{q} = k \cdot (T_1 - T_2)$$

Mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten k:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Bildet sich nun an einer (oder beiden) der wärmeübertragenden Flächen der Wand eine feste Schicht unerwünschter Ablagerungen, so wird dieser Prozess als Fouling bezeichnet. Je nach System kann es unterschiedliche Mechanismen als Ursache geben. Nach Epstein<sup>1</sup> werden Kristallisationsfouling, Biofouling, Reaktionsfouling, Korrosionsfouling und Partikelfouling voneinander unterschieden, wobei mehrere Mechanismen gleichzeitig auftreten können. Wie in Abbildung 39 dargestellt, bildet die Foulingschicht mit der Dicke  $\delta_f$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$  einen zusätzlichen Wärmeleitwiderstand.



**ABBILDUNG 39: TEMPERATURVERLAUF BEIM WÄRMEDURCHGANG DURCH EINE EBENE WAND MIT FOULING**

Wird angenommen, dass sich der Flächeninhalt der wärmeübertragenden Wand zum Fluid 2 nicht ändert, kann der thermische Foulingwiderstand mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$R_f = \frac{1}{k_f} - \frac{1}{k_0}$$

Mit Hilfe der oben stehenden Gleichungen wurde der Foulingwiderstand zur Versuchsauswertung berechnet.

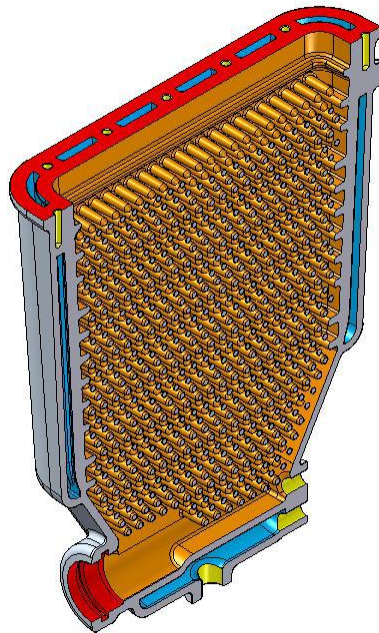
<sup>1</sup> N. Epstein, *Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5x5 Matrix*, Heat Transf. Eng. 4 (1983) 1, 43-56

## 2.2. BILANZIERUNG DES AKTUELLEN WÄRMEÜBERTRAGERS

Die Wärmeleistung des  $\mu$ -BHKWs wird im Wesentlichen durch die Kühlung des Motors zur Stromerzeugung und die Abgaswärme erzeugt. Dabei wird das Kühlwasser in zwei Kreisläufen geführt, welche durch eine hydraulische Weiche miteinander verbunden sind und von denen einer die Abgaswärme aufnimmt. Dadurch ist es kaum möglich, die beiden Kreisläufe getrennt voneinander zu bilanzieren. Der äußere Kreislauf kühlt zuerst den Generator und danach das Abgas und strömt dann mit dem inneren Kreislauf zusammen. Für folgende Bilanzierung des Wärmeübertragers (WÜ) zur Nutzung der Abgaswärme sollen folgende Annahmen getroffen werden:

- Die Wärme wird ohne Verluste vom Abgas auf das Kühlwasser übertragen
- Die Temperatur des Wassers wird innerhalb des WÜs um 4 K erhöht

Der ursprünglich konzipierte Wärmeübertrager besteht aus einem kurzen flachen Hohlkörper aus Aluminiumguss, dessen Innenfläche mit zahlreichen Ausprägungen, sogenannten Pins aufwändig strukturiert ist. Das Abgas wird auf der Innenseite geführt und strömt vom Kopf des WÜs nach unten. Das Kühlwasser wird in einem äußeren Mantel im Gegenstrom geführt und umschließt den gasdurchströmten Raum fast vollständig. Im Strömungskanal wird das Abgas von etwa 280 °C auf bis zu 40 °C abgekühlt.



**ABBILDUNG 40: SCHNITTANSICHT DES SERIENWÄRMEÜBERTRAGERS**

Abbildung 40 zeigt den WÜ im Schnitt. Dabei ist es für die Effizienz von entscheidender Bedeutung, mit welcher Vorlauftemperatur das Kühlwasser in den WÜ eintritt. Bei einer großen Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Kühlwasser kann eine größere Wärmemenge übertragen werden. Zusätzlich kondensiert bei der Unterschreitung einer bestimmten Temperatur im Abgas vorhandener Wasserdampf an den Wänden des WÜs und die somit nutzbare Kondensationsenthalpie geht als sogenannter Brennwerteffekt in die Gesamtbilanz ein. Im Rahmen des Projektes wurde zuerst berechnet, bei welchen Temperaturen wie viel Wärme bereitgestellt werden kann, um somit Anhaltspunkte für die optimale Betriebsweise und gestellte Anforderungen für die neue Wärmeübertragergeometrie zu erhalten.

Die durch die Pins stark vergrößerte Oberfläche auf der Gasseite beträgt 0,755 m<sup>2</sup>. Dem gegenüber hat die Wasserseite eine relevante Wärmeübertragungsfläche von 0,247 m<sup>2</sup>. Die Pins vergrößern nicht nur die Oberfläche des Wärmeübertragers, sie verengen auch den Gasraum, lenken den Gasstrom ständig um und erhöhen dadurch die Turbulenz, was zu einer besseren Wärmeübertragung führt. Große Nachteile dieser Geometrie sind die Unzugänglichkeit der inneren Wärmeübertrageroberfläche und die daraus resultierende schlechte Reinigbarkeit sowie nicht mögliche Beschichtbarkeit der Oberfläche.

Für die folgende Bilanzierung wird eine Wassereintrittstemperatur von 35 °C festgelegt. Die Erwärmung des Wassers beträgt, wie oben angenommen 4 K. Außerdem kann angenommen werden, dass die Temperatur des austretenden Abgases ca. 5 K über der Kühlwassereintrittstemperatur liegt. Dieser Werte wurde in mehreren Messungen bestätigt. Der Abgasmassenstrom, der bei der Verbrennung entsteht, beträgt 6,3 g/s. Alle weiteren Daten sind im Anhang A 3 zusammengefasst und tabellarisch dargestellt.

Es handelt sich bei dem zu untersuchenden Apparat um einen Gegenstromwärmeübertrager. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz mit den oben genannten Ausgangswerten beträgt 61 K. Das Abkühlen des Abgases wurde mithilfe des Fließbildsimulationsprogramms CHEMCAD simuliert. Der vom Abgas abgegebene Wärmestrom und die Kondensationsrate für den Brennwerteffect wurden berechnet und können für die Bilanzierung verwendet werden. Das im Programm verwendete Abgas besteht aus:

- Wasserdampf: 0,08 kg/kg Gesamt
- Kohlenstoffdioxid: 0,128 kg/kg Gesamt
- Sauerstoff: 0,072 kg/kg Gesamt
- Stickstoff: 0,72 kg/kg Gesamt

Bei der Kühlung dieses Modellabgases von 280 auf 40 °C muss ein Wärmestrom von 2,14 kW abgeführt werden. Weiterhin ergeben sich daraus die Werte in Tabelle 1.

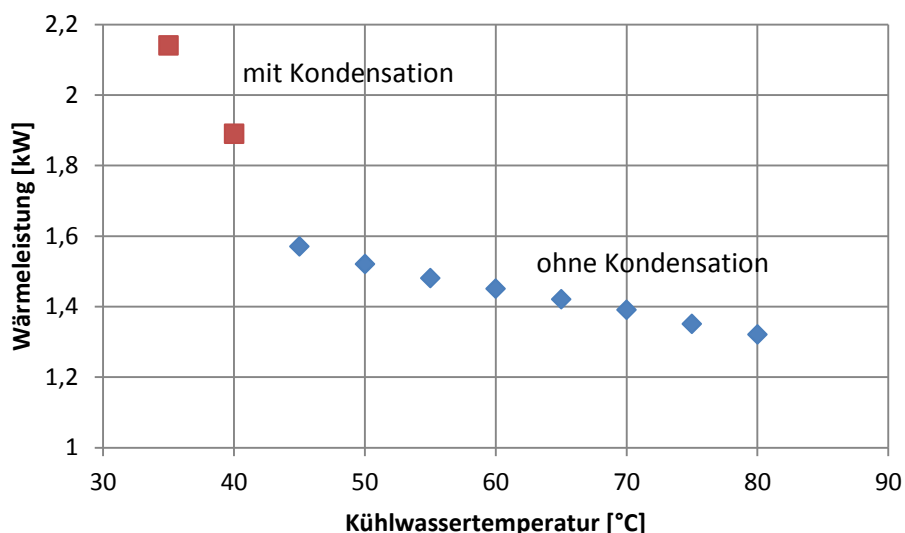
**TABELLE 1: ZUSÄTZLICHE ANHALTSPUNKTE ZUM WÄRMEÜBERGANG**

	Formelzeichen	Wert	Einheit
Wasserseite	$Re_{KW}$	570	-
	$\alpha_{Wasser}$	340	W/m <sup>2</sup> K
	$\dot{m}_{Wasser}$	460	kg/h
Gasseite	$Re_{Gas}$	1860	-
	$\alpha_{Abgas}$	57	W/m <sup>2</sup> K
	$\dot{m}_{Abgas}$	6,3	g/s
Wärmedurchgangskoeffizient	k	48	W/m <sup>2</sup> K

Die Reynoldszahlen auf beiden Seiten liegen im Übergangsbereich. Dennoch ist der wasserseitige Wärmeübergang ca. zehn Mal besser als auf der Gasseite. Das heißt, dass der gasseitige Wärmeübergang trotz starker Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche durch Pins und die dadurch entstehenden Turbulenzen den größten Wärmeübertragungswiderstand darstellt. Eine theoretische Betrachtung der Oberflächentemperatur der Pins hat allerdings die hohe Effizienz bestätigen können. So liegt diese auch an den Spitzen der Pins nur

wenig über der Wandtemperatur in den Tälern und besitzt somit eine ausreichend hohe Differenz zur Abgastemperatur (Darstellung der Oberflächentemperaturen im Anhang). Der Wärmeleitwiderstand durch die Wand beträgt 0,2 % des Gesamtwiderstandes und ist damit zu vernachlässigen.

Die Bilanzierung wurde weiterhin für verschiedene Kühlwassertemperaturen in Intervallen von 5 K durchgeführt. Dabei wird die Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades der Anlage von der Vorlauftemperatur des Wassers deutlich. In Abbildung 41 ist der jeweils durch Simulation ermittelte Wärmestrom über der Kühlwassertemperatur aufgetragen:



**ABBILDUNG 41: WÄRMELEISTUNG DES ABGASWÄRMEÜBERTRAGERS IN ABHÄNGIGKEIT DER KÜHLWASSESTEMPERATUR**

Es sind deutlich zwei Bereiche zu erkennen. Unterhalb einer Kühlwassertemperatur von 45 °C findet Kondensation statt. Der Brennwerteffekt führt zu einer stark verbesserten Ausnutzung der Abgaswärme. Oberhalb von 45 °C kann allein die Wärme auf das Wasser übertragen werden, die durch die Abkühlung des Abgases von 280 °C auf Kühlwassertemperatur plus 5 K frei wird.

Wird dieser Effekt auf die gesamte Wärmeeistung der Anlage bezogen, sinkt diese um ca. 10 % bei einer Erhöhung der Vorlauftemperatur des Kühlwassers von 35 auf 80 °C. Die genauen Werte können aus Tabelle 2 entnommen werden:

**TABELLE 2: EFFEKTIVITÄT DER ANLAGE**

Kühlwassertemperatur [°C]	Wärmeeistung aus dem Abgas [kW]	Gesamte Wärmeeistung [kW]
35	2,14	8,74
40	1,89	8,49
45	1,57	8,17
50	1,52	8,12
60	1,45	8,05
70	1,39	7,99
80	1,32	7,92

## 2.3. LABORVERSUCHE BELAGBILDUNG

### Aufbau der Versuchsanlage

Die Laborversuche wurden mithilfe einer Versuchsanlage durchgeführt, die es erlaubt, neben unterschiedlichen Betriebsparametern auch die Eigenschaften der wärmeübertragenden Oberfläche durch den Austausch von Probepplatten einzustellen. In Abbildung 42 ist der Aufbau der Anlage als Fließbild schematisch dargestellt.

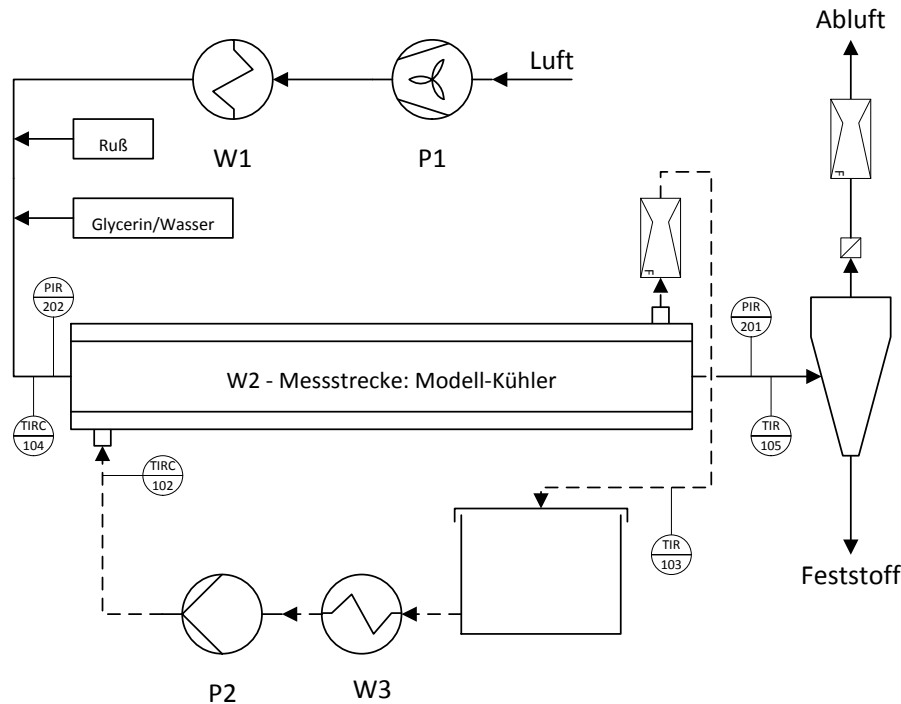


ABBILDUNG 42: FLIEßBILD DER LABORANLAGE

Zu Anfang wird mithilfe eines Gebläses P1 Luft aus der Umgebung angesaugt. Diese wird mit Heizkerzen W1 definiert erhitzt und anschließend mit Ruß und einem Wasser-Glycerin-Gemisch beaufschlagt. Das nun entstandene Modellabgas wird in der Messstrecke W2 gekühlt und nach einer Reinigung im Zyklon wieder der Umgebung zugeführt. Die Zusammensetzung des Abgases wurde aus folgenden Gründen gewählt:

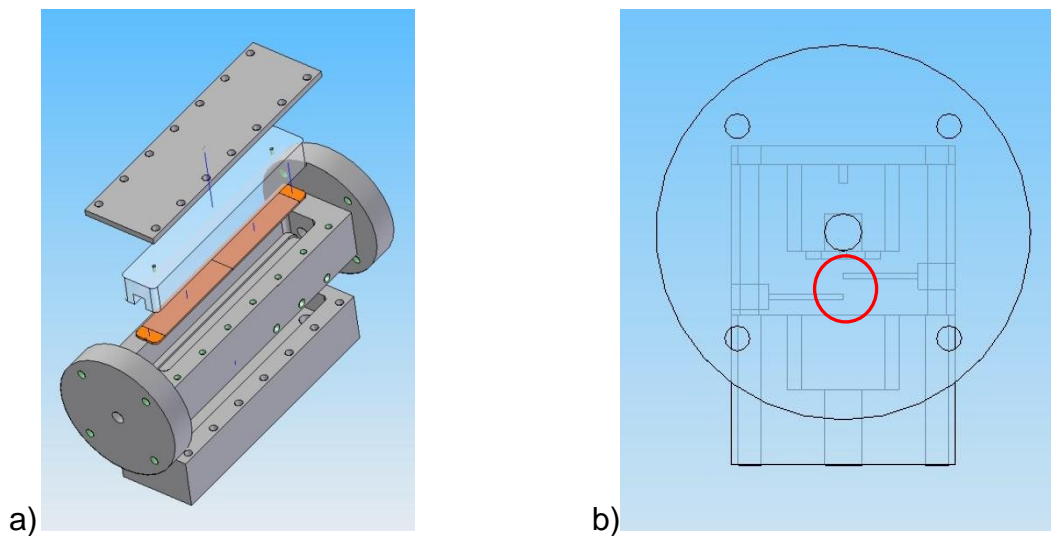
- Ruß ist der Hauptbestandteil partikulärer Ablagerungen in Abgassystemen
- Wasserdampf kondensiert bei Temperaturen unter 50 °C aus, was neben dem erwünschten Brennwerteffekt auch zu verändertem Foulingverhalten führt
- Glycerin simuliert unverbrannte Kohlenwasserstoffe im Abgas

Der Aufbau der Versuchsanlage wurde noch während des Projektes immer wieder leicht verändert. So wurden zu Beginn neue Drucksensoren für eine exakte Bestimmung des Differenzdrucks und des Absolutdrucks in der Anlage beschafft. Des Weiteren wurde im letzten Quartal 2012 ein neuer Versuchskanal konstruiert und in Betrieb genommen, der den Wechsel beschichteter Oberflächen und die Messung des lokalen Wärmeübergangs erlaubt. Gleichzeitig musste ein neues Drehkolbengebläse beschafft werden, welches den sich langsam aufbauenden Gegendruck in der Anlage überwinden kann. Dies war mit dem vorhandenen Seitenkanalgebläse nicht möglich. Der über die Versuchsdauer steigende Druckverlust

in der Anlage, der auch ein wichtiger Parameter zur Detektion des Foulings ist, führte zu einem Abfall des Luftvolumenstroms bis hin zum Ausfall des vorhandenen Gebläses. Eine Versuchsdurchführung unter konstanten Bedingungen war somit ohne das Drehkolbengebläse nicht möglich.

### Aufbau der Messstrecke

Bei der Messstrecke bzw. dem Modellkühler handelt es sich um einen Kanal mit quadratischem Querschnitt. Die Oberfläche der wärmeübertragenden Wand ist austauschbar. Damit besteht die Möglichkeit beschichtete und unbeschichtete Probenplatten einzusetzen. Des Weiteren wurde die wärmeübertragende Wand mit drei Thermoelementpaaren ausgestattet, die an drei Punkten die Bestimmung des spezifischen Wärmestroms ermöglichen. Abbildung 43 zeigt den Aufbau des Kanals im Detail.



**ABBILDUNG 43: AUFBAU DES MODELLKÜHLERS, A) EXPLOSIONSZEICHNUNG, B) SCHNITT QUER ZUR STRÖMUNGSRICHTUNG**

Die Explosionszeichnung in Abbildung 43 a) zeigt ein dreidimensionales Bild des gesamten Modellkühlers. Unten befindet sich der Kanal für die fluidische Kühlung. Es wird so viel Kühlflüssigkeit durch den Kanal geleitet, dass sich die Temperatur nicht messbar verändert. Damit kann eine konstante Temperatur der Kühlflüssigkeit angenommen werden. Darüber befindet sich das Gehäuse des Kanals, welches über Flansche mit der Anlage verbunden ist. Man kann an der Seite drei Bohrungen erkennen, die für die Thermoelementpaare vorgesehen sind. In Orange sind die eingesetzten Probenplatten gekennzeichnet. Diese werden mithilfe des durchsichtig dargestellten Einsatzes gehalten und mit dem Deckel von oben fixiert. Dieser dichtet außerdem den Kanal nach außen hin ab. Der in Abbildung 43 b) dargestellte Schnitt soll zeigen, wie die Thermoelemente in der wärmeübertragenden Wand eingelassen sind. Es befinden sich an drei Stellen zwei Thermoelemente (roter Kreis). Die Spitzen sind jeweils in der Mitte des Kanals 5,5 mm übereinander angeordnet. Die Messung der Temperaturdifferenz in der Wand ermöglicht die Berechnung des lokalen Wärmestroms, der Wandtemperaturen auf Gas- und Kühlseite sowie die Wärmeübergänge auf beiden Seiten. Außerdem kann über die zeitliche Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Foulingwiderstand und damit der Foulingverlauf bestimmt werden.

Vor und nach der Messstrecke befinden sich Drucksensoren und Thermoelemente zur Bilanzierung von Gas- und Kühlseite sowie zur integralen Überwachung des Foulingverlaufes.

Zusätzlich wurde der Strömungsverlauf durch die Messstrecke mithilfe des CFD-Programms Fluent der Firma Ansys simuliert. Dafür wurde der gesamte Kanal, also auch die festen Bauteile und die fluidische Kühlung, in die Simulation einbezogen, wodurch die Wärmeleitung in den Wänden mit berücksichtigt werden konnte. Im Folgenden sollen die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Vorversuchen verglichen werden.

In Abbildung 44 ist das Geschwindigkeitsprofil der Gasströmung im Modellkühler dargestellt. Die Luft strömt von rechts nach links. Die Geschwindigkeit variiert von 2,53 m/s direkt an der Wand (hellblau) bis 60,3 m/s (orange) am Austritt. Es sind am Eintritt der Messstrecke ein Abbremsen der Luftströmung und am Austritt eine Beschleunigung zu erkennen, was mit einer Querschnittserweiterung und -verengung aufgrund des Wechsels von rundem auf quadratischem Querschnitt geschieht. An den Rändern ist die Geschwindigkeit deutlich geringer als in der Kernströmung, obwohl es sich bei einer Reynoldszahl von  $3,3 \cdot 10^4$  um eine vollturbulente Strömung handelt. Das Geschwindigkeitsprofil ist trotz der Störungen am Anfang und am Ende des Kanals gleichmäßig.

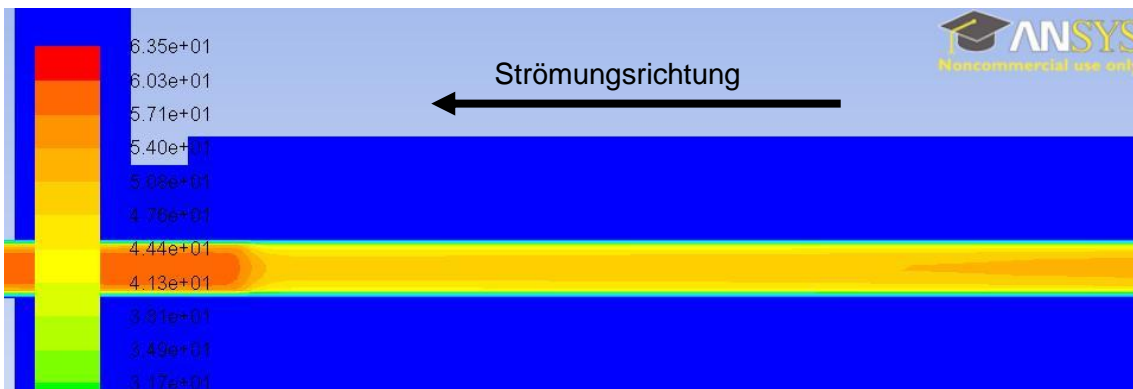
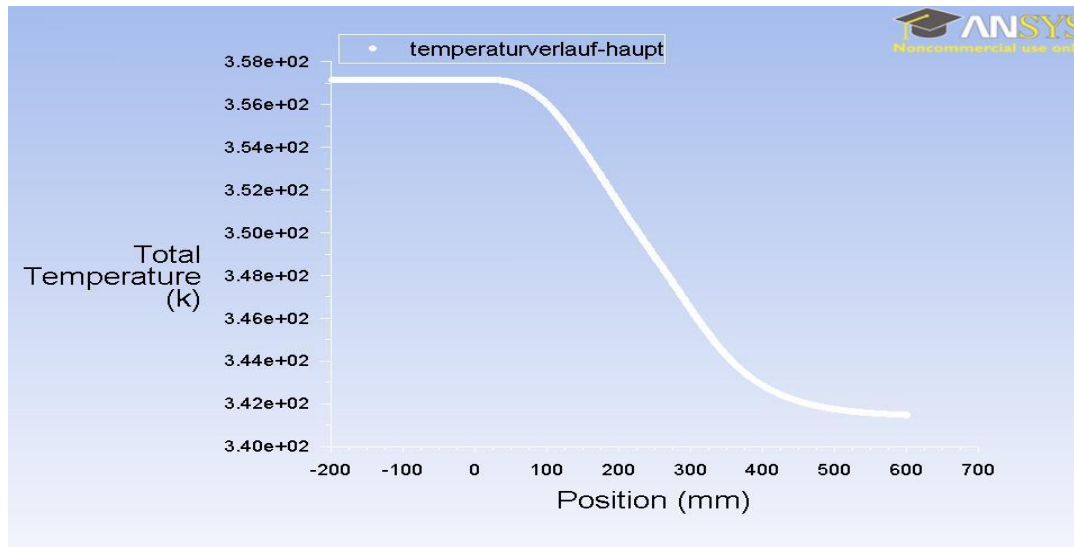


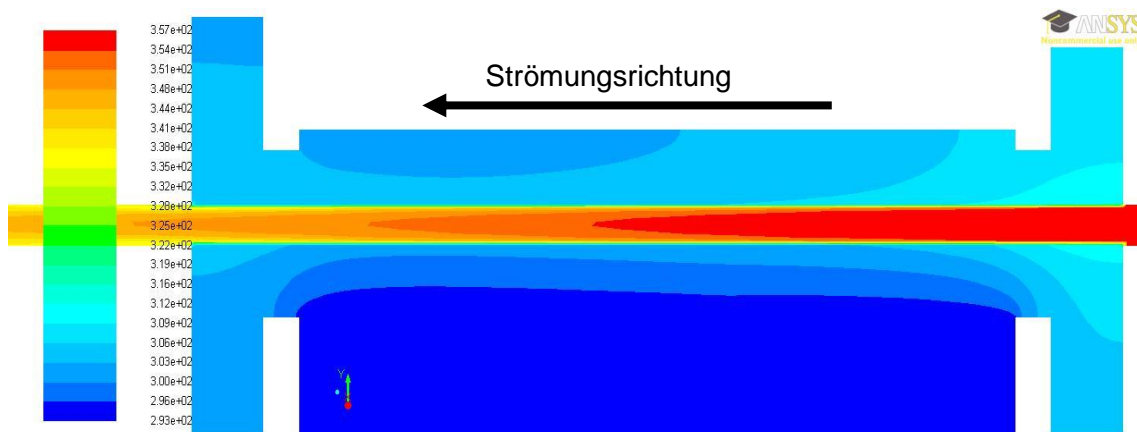
ABBILDUNG 44: GESCHWINDIGKEITSPROFIL IM YZ-SCHNITT

Der Temperaturverlauf der Simulation kann direkt mit den experimentellen Daten korreliert werden. Die Temperatur am Einlass betrug bei den Vorversuchen zur Bilanzierung des Messkanals  $80\text{ °C}$  und nahm dann über die Länge des Kanals um  $14\text{ K}$  ab. Das Kühlwasser hatte eine konstante Temperatur von ca.  $20\text{ °C}$ . Diese Werte wurden als Randbedingungen für die Simulation verwendet. Sowohl die Simulation als auch die Vorversuche wurden mit unbelasteter trockener Luft durchgeführt, weshalb keine Kondensation auftritt. In Abbildung 45 ist der Temperaturverlauf über der Kanallänge aufgetragen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur im Kanal linear abfällt, die Luft also gleichmäßig abgekühlt wird. Am Ende des Kanals ist die Temperatur mit  $70\text{ °C}$  noch  $4\text{ K}$  über der im Versuch ermittelten Temperatur. Allerdings kann auch von größeren Wärmeverlusten am realen Kanal ausgegangen werden, weil das Aluminium des Modellkühlers die Wärme trotz einer Isolierung aus Steinwolle in alle Richtungen nach außen leitet.



**ABBILDUNG 45: ÜBER DEN QUERSCHNITT GEMITTELTE TEMPERATUR ENTLANG DER KANALLÄNGE**

Das Temperaturprofil in Abbildung 46 (Strömungsrichtung von rechts nach links) zeigt neben der Temperaturverteilung in der Luftströmung auch die Temperaturverteilung im Aluminiumkörper und im Wasser. Der Block unterhalb der Messstrecke ist vollkommen dunkelblau. Hier befindet sich die fluidische Kühlung, die sowohl im Experiment als auch in der Simulation keine messbaren Temperaturunterschiede zwischen Ein- und Ausgang aufweist. Hierdurch kann eine konstante Kühlwassertemperatur angenommen werden. Dieses Vorgehen erschien für die Auswertung der Ergebnisse sinnvoll, da aus Vorversuchen bekannt ist, dass die Bilanz zwischen Gas- und Flüssigkeitsseite aufgrund hoher Wärmeverluste nicht zu schließen ist, bzw. vom Modellabgas ca. drei Mal mehr Wärme abgegeben als durch das Kühlwasser aufgenommen wird.



**ABBILDUNG 46: TEMPERATURPROFIL IM YZ-SCHNITT**

## Beschichtungen

Für Laborversuche wurden neben Edelstahl noch fünf weitere Oberflächen untersucht. Der verwendete Edelstahl (St 1.4301) war auch das Substrat für die Beschichtungen DLC (Diamond Like Carbon), F-DLC (Fluor-dotiertes DLC), SICAN (Silizium-dotiertes DLC), SICON® (Silizium- und Sauerstoff-dotiertes DLC) und SiO<sub>2</sub>. Der Name "Diamond Like Carbon" gibt bereits einen Hinweis auf die Eigenschaften des Materials. Es handelt sich um eine sehr harte amorphe Kohlenwasserstoffschicht, die aufgrund ihrer Zusammensetzung Eigenschaften zwischen denen von Diamant, Graphit und Polymer besitzt. Auf molekularer Ebene sind so-



wohl  $sp^2$ - als auch  $sp^3$ -hybride Verbindungen vorhanden. Wie in Abbildung 47 (DLC hier mit a-C:H bezeichnet) dargestellt, kann durch Variation des Kohlenstoff- bzw. des Wasserstoffgehaltes eingestellt werden, in welche Richtung diese Eigenschaften tendieren sollen. Je mehr  $sp^3$ -Verbindungen und weniger Wasserstoff beispielsweise vorhanden sind, desto härter also diamantähnlicher wird das Material. Aufgrund ihrer hohen Härte und guter Abriebfestigkeit werden diese Beschichtungen zurzeit vor allem für tribologische Anwendungen eingesetzt. Sie werden aber wegen ihrer chemischen Resistenz, guter Wärmeleitfähigkeit und Antihafteigenschaften immer häufiger im Bereich der Verfahrenstechnik genutzt. Einen weiteren Vorteil bringt die Dotierung der Beschichtungen mit verschiedenen Elementen. So können z.B. die Härte und die Benetzungseigenschaften der Beschichtungen zusätzlich variiert werden.

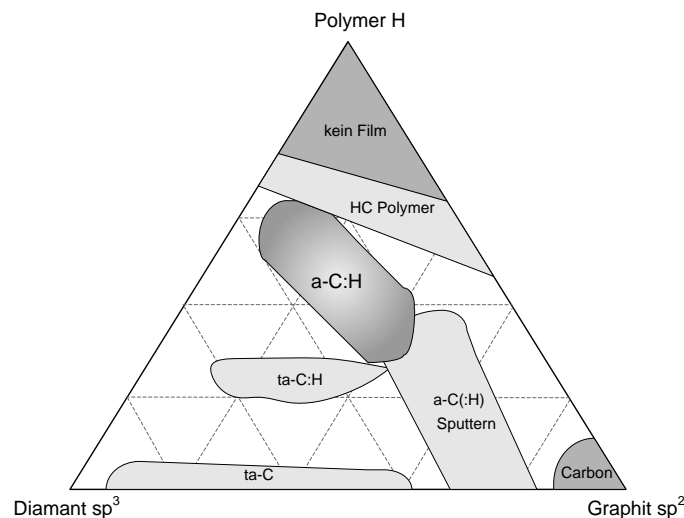


ABBILDUNG 47: PHASENDIAGRAMM VON KOHLENSTOFFSCHICHTEN<sup>2</sup>

Neben der Foulingversuche wurden auch Messungen zur Ermittlung der Rauheit und der spezifischen freien Oberflächenenergie der Beschichtungen durchgeführt.

### Rauheit

Die Rauheit wurde mithilfe eines AFM (Atomic Force Microscope, Rasterkraftmikroskop) ermittelt. Dabei wurden mehrere Stellen auf einer Probe angefahren und jeweils eine Fläche von  $100 \times 100 \mu\text{m}$  abgetastet. Die Rauheit dieser Fläche wurde dann mit der Auswertesoftware des AFM (DME Igloo Stage) berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können aus Abbildung 48 entnommen werden. Es wurden drei der verschiedenen Rauheitsparameter ausgewählt und dargestellt.  $S_y$  ist dabei die maximale Rautiefe (Peak-Peak Height). Sie beschreibt die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Messpunkt der abgetasteten Fläche.  $S_{10z}$ , die "Ten Point Height Roughness", gibt die Differenz der Mittelwerte der fünf höchsten Spitzen und der fünf tiefsten Täler wieder. Die mittlere Rautiefe  $S_a$  ist definiert als der Mittelwert der Höhenabweichungen von einer definierten Mittelebene.

Die Beschichtungen sind sehr konturnah und sollten keinen großen Unterschied zur Referenz Edelstahl zeigen. Die Werte für  $S_y$  und  $S_{10z}$  verändern sich von Probe zu Probe in ganz ähnlichem Maße. Ihre Aussagen sollten laut Definition auch ähnlich sein. Beide Werte schwanken von der "rausten" zur "glattesten" Probe um ca.  $0,6 \mu\text{m}$ , was bei einer maximalen Rautiefe von  $1,8 \mu\text{m}$  einem Drittel entspricht. Allerdings kann schon ein kleiner Kratzer genau

<sup>2</sup> J. Robertson, *Amorphous carbon cathodes for field emission display*, Thin Solid Films, 296 (1997), 61-65

an der gescannten Stelle große Schwankungen verursachen. Insgesamt schwanken die Werte um diejenigen der Edelstahloberfläche.

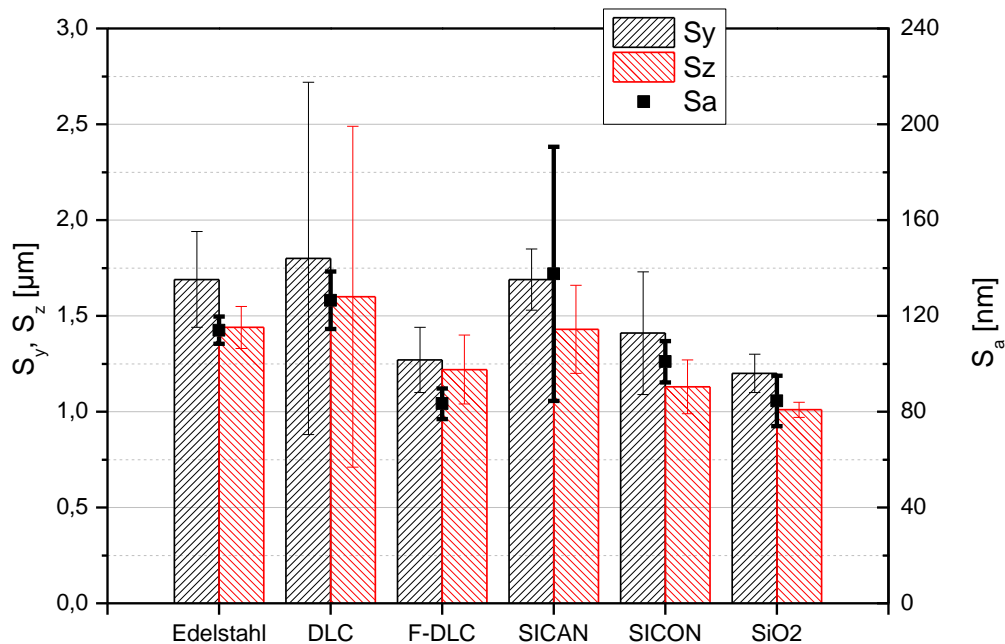


ABBILDUNG 48: RAUHEITEN DER UNTERSUCHTEN OBERFLÄCHEN

### spezifische Freie Oberflächenenergie

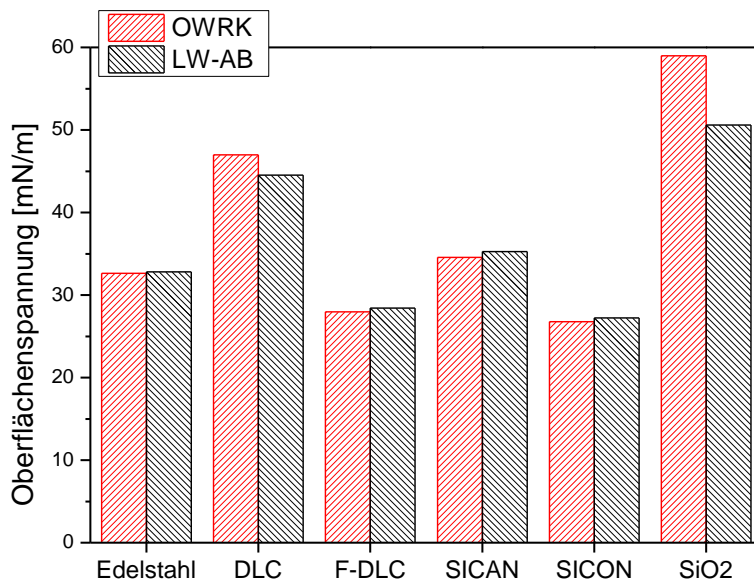
Die freie Oberflächenenergie der Probenplatten wurde mit der dynamischen Kontaktwinkelmessung zwischen definierten Flüssigkeiten und der Oberfläche der Proben bestimmt. Dafür wurde ein optisches Kontaktwinkelmessgerät (Kontaktwinkelmesssystem DSA 100) der Firma Krüss verwendet. Es wurden destilliertes Wasser, Ethylenglykol, Dijodmethan, 1-Bromnaphthalin und Formamid als Testflüssigkeiten verwendet. Die Auswertung der erfolgten Messungen wurde nach zwei Methoden durchgeführt. Zum einen das Verfahren nach Owens, Wendt, Rabel und Kaeble (OWRK)<sup>3</sup>, welche die freie Oberflächenenergie in einen dispersen und einen polaren Anteil unterteilt. Dieser Ansatz ist sehr einfach, da im Grunde nur zwei Testflüssigkeiten notwendig sind, und findet sehr häufig Anwendung in Literatur und Industrie. Des Weiteren wurden die Kontaktwinkelmessungen mit dem Lifshitz-van der Waals Acid-Base-Modell (LW-AB) nach van Oss, Caudhury und Good (vOCG)<sup>4</sup> ausgewertet. Hierbei wird die freie Oberflächenenergie in die Lifshitz-van der Waals Wechselwirkungen, bestehend aus dispersen, dipolaren und induzierten dipolaren Wechselwirkungen, und dem Acid-Base-Teil, welcher alle Donator-Akzeptor Beziehungen wie zum Beispiel Wasserstoffbrücken berücksichtigt. Zur Bestimmung der drei Anteile der Oberflächenspannung werden mindestens drei Testflüssigkeiten benötigt.

Die beiden Auswertungen ergaben nur leicht unterschiedliche Ergebnisse für die freie Oberflächenenergie. Allerdings gilt dies nicht für SiO<sub>2</sub>. Die freie Oberflächenenergie betrug nach OWRK 59,0 mN/m während die Auswertung nach der LW-AB mit 50,6 mN/m einen fast 15 %

<sup>3</sup> D. Owens and R. Wendt, *Estimation of the free surface energy of polymers*, J. Appl. Polym. Sci., 13 (1969), 1741-1747

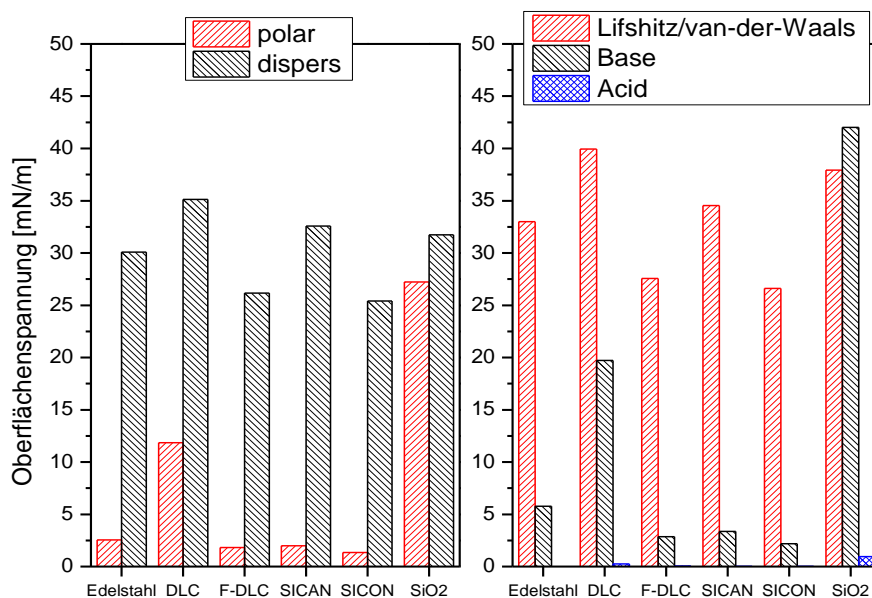
<sup>4</sup> C.J. Oss et al., *Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems*, Chem. Rev. 88 (1988), 927-941

geringeren Wert ergab. Die Werte sind in folgendem Säulendiagramm (Abbildung 49) dargestellt:



**ABBILDUNG 49: DIE FREIE OBERFLÄCHENERGIE DER UNTERSUCHTEN OBERFLÄCHEN NACH DEM MODELL VON OWENS, WENDT, RABEL, KAEBLE UND DEM LIFSHITZ-VAN DER WAALS ACID-BASE MODELL NACH VAN OSS, CAUDHURY UND GOOD**

Beide Methoden enthalten wie oben beschrieben weitere Informationen. So ergeben sich für die beiden Auswertungen die einzelnen Anteile der freien Oberflächenenergien in Abbildung 49. Es fällt auf, dass der polare Anteil und der Base-Anteil bei SiO<sub>2</sub> besonders hoch sind im Gegensatz zu allen anderen Beschichtungsmaterialien. Es ist anzunehmen, dass diese Beschichtung ein deutlich anderes Foulingverhalten zeigt als die restlichen Oberflächen. Des Weiteren besitzt DLC sowohl einen höheren polaren als auch einen höheren Base-Anteil als die übrigen Beschichtungen.



**ABBILDUNG 50: DIE KOMPONENTEN DER FREIEN OBERFLÄCHENERGIENACH DEM MODELL VON OWENS, WENDT, RABEL, KAEBLE UND DEM ACID-BASE MODELL NACH VAN OSS, GOOD UND CAUDHURY**

### **Betriebs- und Randbedingungen der Laborversuche**

Die Anlage kann dank des neuen Gebläses bei einer sehr großen Spanne von Volumenströmen von 8 bis 120 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h betrieben werden. Außerdem sind durch die Heizung bestehend aus einer Haupt- und Zusatzheizung Temperaturen bis 800 °C möglich. Die Kühlung kann auf einem Temperaturniveau von 20 °C bis zu 1,4 kW Wärme abführen. Für die Versuche wurde ein Luftvolumenstrom von 10 m<sup>3</sup>/h ausgewählt. Der Abgasvolumenstrom im Wärmeübertrager des  $\mu$ -BHKW pulsiert, da es sich um einen Ein-Zylinder-Motor handelt. Es ist also davon auszugehen, dass das Abgas kurzzeitig deutlich schneller strömt als für die Bilanzierung angenommen. Die tatsächliche Geschwindigkeit konnte allerdings nicht ermittelt werden.

Der Dispergierer, der den Ruß mit Hilfe von Druckluft in das System bringt, kann mit Kolben verschiedener Größen ausgestattet und somit je nach Anwendung mit einer unterschiedlichen Menge befüllt werden. Je größer der Kolben im Durchmesser ist, desto größer ist die Rußmenge, die maximal gefördert werden kann. Desto größer werden aber auch die Teilmengen in denen der Ruß im Kolben abgetragen wird. Die Rußmenge für die hier durchgeführten Versuche betrug jeweils 0,67 g/h. Eine Schlauchpumpe fördert das Glycerin-Wasser-Gemisch mit einem Flüssigkeitsvolumenstrom von 4,2 ml/h hinter der Rußzugabe in die Luftströmung. Es wird angenommen, dass sich am Einlass bildende Flüssigkeitstropfen von der starken Luftströmung mitgerissen und so fein zerstäubt werden. Wie im Folgenden dargestellt, verdampfen die feinen Tröpfchen sofort bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen.

Mithilfe einer Prozesssimulation in CHEMCAD wurde ermittelt, bei welchen Temperaturen das Glycerin-Wasser-Gemisch in welcher Phase vorliegt. Für die Berechnung wurde angenommen, dass die Luft bei 20 °C und mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % aus der Umgebung angesaugt wurde. Des Weiteren wurde ein Überdruck von 50 mbar in der Anlage anhand von Vorversuchen festgelegt. Wie bereits beschrieben, wird das Gemisch mit einem Volumenstrom von 4,2 ml/h dem System zugeführt. Die Verfahrenssimulation ergab für Glycerin den in Abbildung 51 dargestellten Verlauf. Das Diagramm für Wasser hat einen ähnlichen Verlauf mit geringeren Zahlenwerten aber den gleichen Temperaturen und wird daher nicht gezeigt. Das Gemisch ist bei einer Temperatur über 77 °C vollständig gasförmig. Unterhalb dieser Temperatur beginnt es zu kondensieren. Es ist damit sichergestellt, dass das Glycerin-Wasser-Gemisch am Eingang des Modellwärmeübertragers (100 °C; 200 °C) gasförmig vorliegt und an der Wärmeübertragerwand (ca. 35 bis 45 °C) auskondensiert.

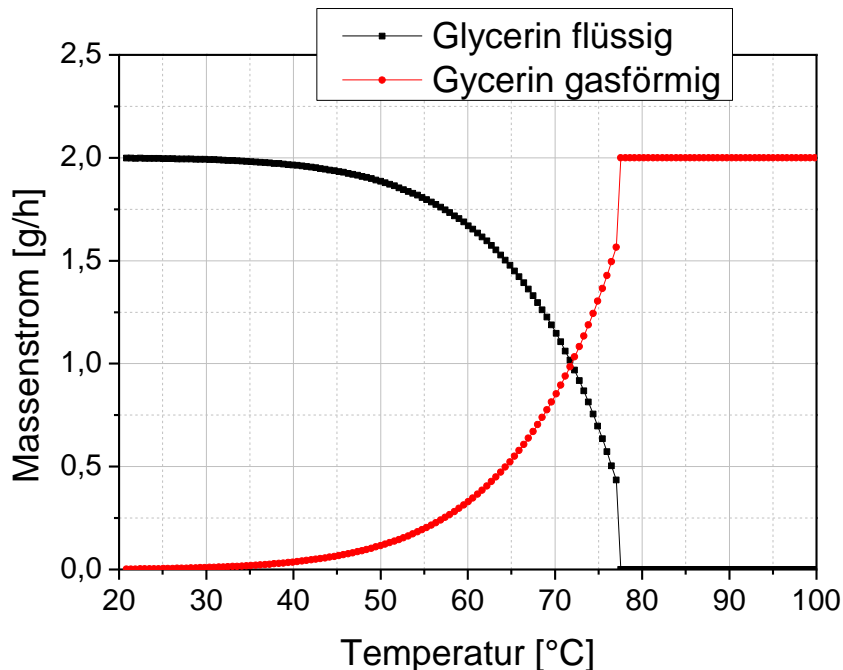


ABBILDUNG 51: AGGREGATZUSTAND DES GLYCERINS ÜBER DER TEMPERATUR BEI BETRIEBSBEDINGUNGEN

### Ergebnisse der Foulingversuche

Es wurden verschiedene Versuchsreihen zur Untersuchung des Foulingverhaltens der genannten Oberflächen durchgeführt. Dafür wurden zuerst trockene Versuche gefahren, bei denen allein Ruß im Modellabgas dispergiert wurde. Das Gas hatte eine Temperatur von 100 °C beim Einströmen in die Messstrecke. Die Ablagerungen dieser Versuchsreihe waren sehr gering. Es konnte kein Foulingwiderstand berechnet werden, da durch die Thermoelemente in der Wand des Modellkühlers keine signifikante Änderung gemessen wurde. Die Proben wurden gewogen, um die jeweiligen Massen der Ablagerungen festzustellen. Die hier ermittelten Werte liegen im Milligrammbereich, wobei F-DLC und SiO<sub>2</sub> mit über 0,005 g die höchsten Foulingmassen besaßen. SICAN hatte scheinbar unter trockenen Bedingungen die besten Foulingeigenschaften, da die Foulingmasse mit 0,0001 g kaum messbar war. Alle Messergebnisse wurden im Anhang tabellarisch zusammengefasst.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Eingangstemperatur ebenfalls auf 100 °C geregelt. Es wurde zusätzlich zum Ruß das Glycerin-Wasser-Gemisch (s. oben) eingebracht. Die hierbei entstandenen Ablagerungen machten eine Berechnung des Foulingwiderstandes mit Hilfe der Temperaturmessungen in der Wand des Modellkühlers möglich. Der Foulingwiderstand ist in Abbildung 52 in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt. Die Verläufe der sogenannten Foulingkurven sind typisch für partikuläre Ablagerungen. Die Kurven steigen plötzlich an, entweder direkt am Anfang oder zeitverzögert, verlaufen dann fast linear, flachen nach einer gewissen Zeit ab und nähern sich einem Grenzwert an. Auch hier wurde nach Abschluss eines Versuchs jeweils die Masse der entstandenen Ablagerung bestimmt. Diese sind in Abbildung 53 aufgetragen. Werden die beiden Grafiken bzw. die darin gezeigten Ergebnisse miteinander verglichen, wird deutlich, dass diese übereinstimmen und sich ihre Aussagen gegenseitig stützen. Es fällt auf, dass die Referenzprobe Edelstahl die höchste Belagbildung aufweist. Alle Beschichtungen scheinen gute Antifoulingeneigenschaften zu

besitzen, vor allem diejenigen, die Silizium enthalten. SICON® und SiO<sub>2</sub> sind sich chemisch gesehen recht ähnlich, da beide Sauerstoff und Silizium enthalten. Die spezifische freie Oberflächenenergie von SiO<sub>2</sub>, das sich hier als beste Beschichtung herausgestellt hat, beinhaltet gegenüber allen anderen Beschichtungen einen sehr großen polaren bzw. Base-Anteil. Eine Hypothese ist, dass der hohe polare Anteil, welcher gleichzeitig einen kleinen Wasserkontaktwinkel, also eine hohe Hydrophilie, bedeutet, Wasserdampf an der Oberfläche der Beschichtung schneller auskondensieren lässt. Der dabei entstehende Flüssigkeitsfilm kann eine hemmende Wirkung auf die Anlagerung des hydrophoben Rußes haben. Dieser grundsätzliche Zusammenhang muss in weiteren Versuchen und mit weiteren Analysen untersucht werden.

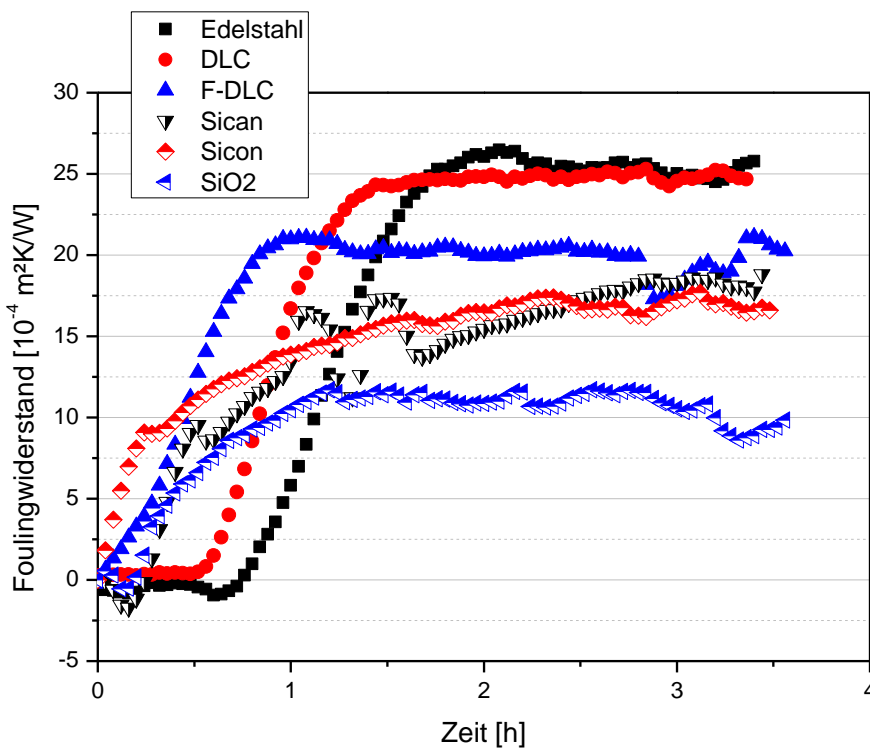


ABBILDUNG 52: FOULINGWIDERSTÄNDE FÜR VERSUCHSREIHE 2, GASTEMPERATUR 100 °C, ZUGABE DES GLYCERIN-WASSER-GEMISCHES

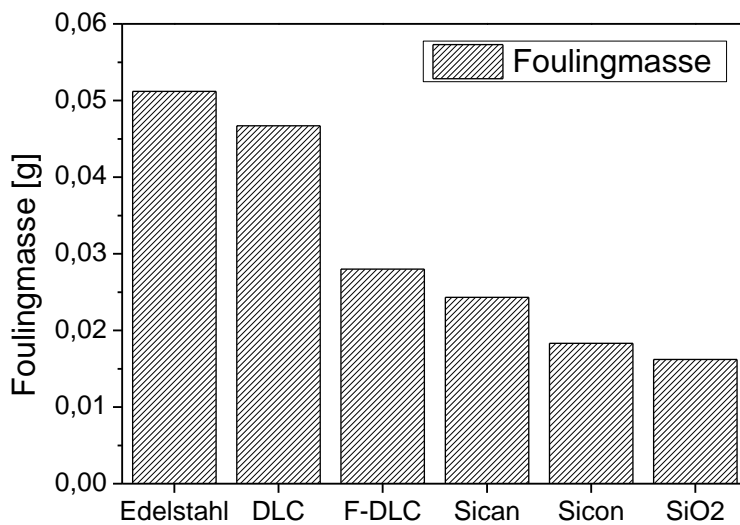


ABBILDUNG 53: MASEN DER ABLAGERUNGEN, GEWOGEN NACH VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In einer dritten Versuchsreihe wurde auch das Glycerin-Wasser-Gemisch aufgegeben, aber die Eintrittstemperatur am Wärmeübertrager wurde auf 200 °C erhöht. Die Foulingwiderstandsmessungen ergaben wie schon bei den trocken durchgeführten Versuchen keine signifikanten Änderungen. Außerdem sind die nach den Versuchen ermittelten Foulingmassen in der gleichen Größenordnung wie diejenigen der trockenen Versuche (s. Anhang). Die Wandtemperatur im Modellkühler sollte allerdings eine Kondensation des Flüssigkeitsgemisches im Messkanal ermöglichen. Eventuell sind die Kondensationsraten trotzdem so gering und die Kondensation in der Kernströmung zu schwach, um eine Ablagerung von Ruß und Flüssigkeit zu begünstigen.

### **Ergebnisse der Reinigungsversuche**

Die Abreinigung der Probenplatten nach den Versuchen stellte keinerlei Problem dar. Die Reinigung wurde mit Ethanol durchgeführt. Dabei konnte mit einer Spritzflasche die Fouling-schicht rückstandslos abgelöst werden. Danach wurden die Proben mit Isopropanol abgewischt, um gleichbleibende Ausgangsbedingungen für jeden Versuch zu gewährleisten. Vor einem erneuten Einsatz in der Versuchsanlage wurden die Proben noch einmal mit Isopropanol behandelt.

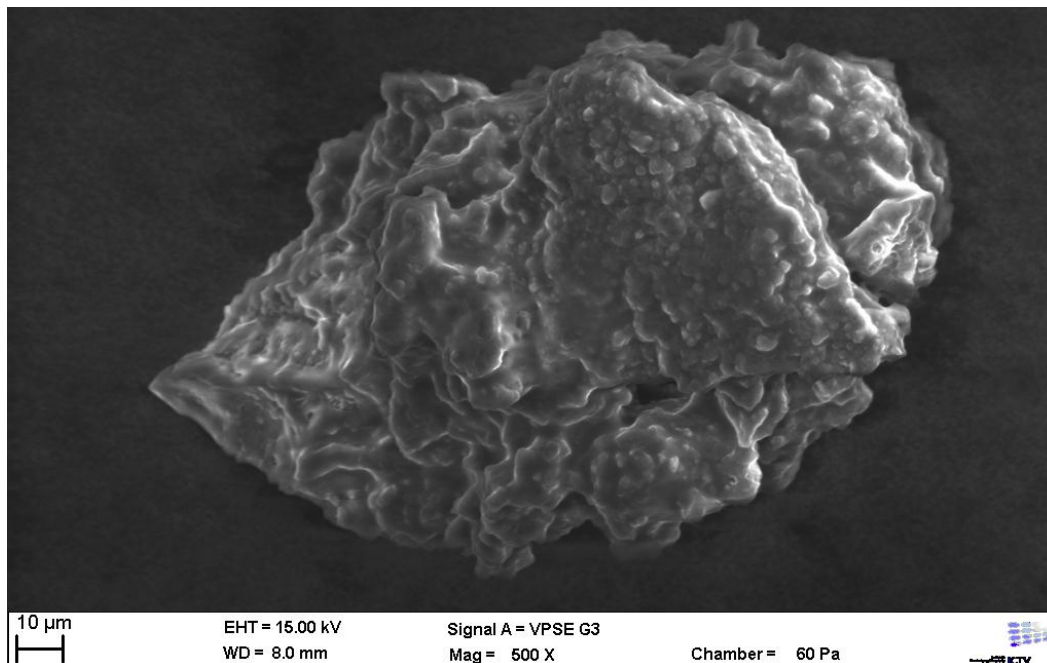
Aufgrund der einfachen Reinigbarkeit wurden keinerlei Vergleichsversuche durchgeführt. Es ist nicht davon auszugehen, dass sich die Reinigungszeit von Probe zu Probe messbar unterscheidet.

### 2.3.1. ANALYSE REALER ABLAGERUNGEN

#### Rußablagerungen im Schornstein

Die Betreiber des Biogas-Blockheizkraftwerkes Ebendorf in der Nähe von Magdeburg gestattete bei Stillstand die Entnahme von Rußproben aus dem Abluftschornstein. Es handelt sich hierbei um eine dünne, dunkelbraune Ablagerung an der Wand des Rohres.

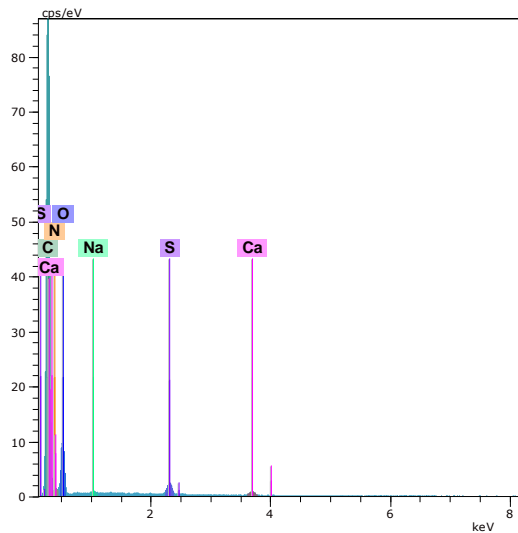
Die entnommenen Beläge wurden mithilfe eines Sekundärelektronenmikroskops (SEM) und der Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht. Die nur sehr kleinen Probenmengen erlaubten keine weitergehenden Analysen mit anderen Methoden. Die atomare Zusammensetzung konnte aber mit dem EDX aufgezeigt werden.



**ABBILDUNG 54: SEM-AUFNAHME EINER RUßPROBE, VERGRÖßERUNG 500-FACH**

Abbildung 54 zeigt einen Teil einer Belagschicht bei 500-facher Vergrößerung. Es ist zu erkennen, dass es sich um eine kompakte zusammenhängende Masse bzw. Schicht handelt und nicht um lose Partikel im Mikro- und Nanometerbereich. Möglicherweise sind die Rußpartikel durch Sinterprozesse zusammengewachsen, was aber laut Literatur nur bei Temperaturen oberhalb von 650°C erfolgt (Abd-Elhady 2007). Laut EDX-Analyse besitzt das oben gezeigte Partikel folgende elementare Zusammensetzung:





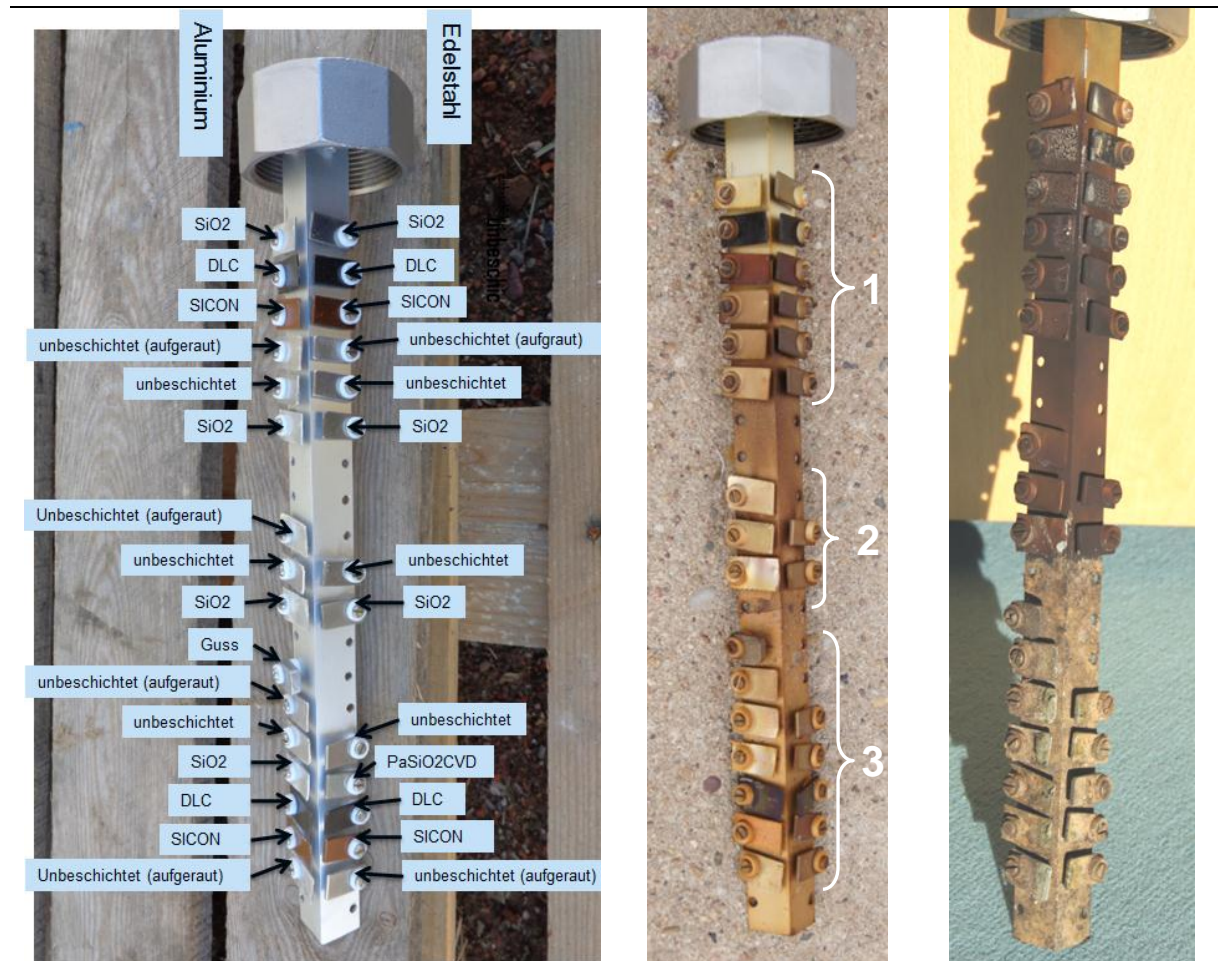
El OZ	norm. C [Gew.%]	Atom. C [At.%]	Fehler [Gew.%]
C 6	71,41	77,66	7,92
O 8	26,24	21,43	3,41
S 16	1,28	0,52	0,08
Na 11	0,19	0,11	0,04
Ca 20	0,87	0,28	0,06
Summe	100	100	

**ABBILDUNG 55: EXEMPLARISCHE RUBANALYSE MITTELS EDX**

Natrium kann durch Berührung mit der Haut in die Proben gelangt sein. Der Anteil von Natrium in den Proben ist jeweils sehr klein. Schwefelverbindungen sind immer ein Bestandteil von nicht oder nicht vollständig entschwefeltem Biogas. In welcher Verbindung sich der Schwefel in den Ablagerungen befindet, konnte mit dem EDX nicht bestimmt werden. Auch kann Wasserstoff mit dem EDX nicht detektiert werden, da erst Elemente mit einer Ordnungszahl größer 4 erkannt werden. Es wurden weitere Proben untersucht. Diese zeigen ähnliche Ergebnisse, sodass sich hier auf ein exemplarisches Ergebnis beschränkt wurde.

### Verschmutzung von eingebrachten Probepplatten

Im Biogas-BHKW Ebendorf wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. So konnte ein Probenhalter radial in den Abgasstrom eingebracht werden, auf dem sich beschichtete und unbeschichtete Materialproben befinden. Zu sehen sind die Anordnung der Proben und deren Zustand zu verschiedenen Zeitpunkten in Abbildung 56. Ganz links sind darin der Neuzustand der Probepplatten und die Bezeichnung der einzelnen Proben beschrieben. Auf der einen Seite des eingebrachten Profils befinden sich Aluminium- und auf der anderen Seite Edelstahl-Substrate jeweils mit und ohne Beschichtungen. Außerdem sind drei Bereiche zu erkennen, in denen sich die Proben wiederholen. Es wurde damit gewährleistet, dass jede der Proben in jeder radialen Temperaturzone des Schornsteins zu finden ist. Ganz rechts ist der Zustand der Proben nach dem Ausbau zu sehen. Man erkennt deutlich eine Abgrenzung zwischen zwei Zonen. Der obere Teil des Probenhalters war in einen Stutzen am Schornstein und nur der untere hellere Teil war tatsächlich in den Abgasstrom eingelassen. Dadurch kommt es, dass sich am unteren Teilstück stärkere Ablagerungen gebildet haben. Die Analyse der einzelnen Proben zeigte aber auch eine Anlagerung von Abgaskomponenten auf den oberen Probestücken.



**ABBILDUNG 56: LINKS: EINBAU DER FOULINGPROBEN AM 14.11.2012, MITTE: BEFUNDUNG NACH 5 WOCHEN, RECHTS: AUSBAU NACH 13 WOCHEN**

Alle Proben wurden vom Profil entfernt und jede einzeln mit Hilfe eines Digitalmikroskops, eines Sekundärelektronenmikroskops (SEM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht. Es wurden Fotos von jedem Plättchen gemacht (Anhang A 4) und visuell ausgewertet. Bei den außen liegenden Proben (Abschnitt 1), die weder dem Abgasstrom noch hohen Temperaturen ausgesetzt waren, sehen die Beschichtungen aus, als würden sie sich teilweise ablösen. Auch fällt auf, dass die jeweils nebeneinander angebrachten Platten aus Aluminium und Edelstahl einander sehr ähneln, was sehr wahrscheinlich an der jeweils gleichen Beschichtung bzw. Behandlung der beiden Proben liegt. Die Beläge, die sich an den innenliegenden Probepplatten gebildet haben, besitzen eine deutlich hellere gräuliche Verfärbung als es bei den in Abschnitt eins und zwei befindlichen Proben der Fall ist. Diese Entwicklung scheint erst im Zeitraum zwischen der 6. und 13. Woche eingetreten zu sein, da die Befundung nach 5 Wochen keine farblichen Unterschiede der drei Bereiche ergeben hat. In keinem der drei Abschnitte sind Ablösungen oder Abplatzungen der Beschichtungen auf den Fotos erkennbar. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die hohe Temperatur im Schornstein keine der Beschichtungen angegriffen hat.

Bei der Untersuchung der elementaren Zusammensetzung der Oberflächen wurde eine sehr starke Schwefelbeladung ermittelt, wobei alle Proben diesen hohen Schwefelanteil aufweisen. Es ist also anzunehmen, dass sich Abgasbestandteile entlang des Stutzens nach außen bewegt und dort niedergeschlagen haben. In Abschnitt 3 ist der Atomanteil von Schwefel insgesamt höher. Es ist nicht wahrscheinlich, dass zu jedem Zeitpunkt eine so hohe Schwefelbelastung im Schornstein auftritt (s. „Rußablagerungen im Schornstein“). Es muss hier zu

einer Fehlfunktion der Entschwefelung gekommen sein, weshalb kurzfristig deutlich veränderte Bedingungen im Abgasstrom herrschten. Diese könnten als eine Art Worst-Case-Szenario besonders starkes Fouling auf den eingebrachten Proben verursacht haben.

Mit dem Digitalmikroskop wurde die Schichtdicke der Beläge bestimmt. Dafür wurde mit einer Klinge ein Teil des Belages abgetragen, sodass die darunter befindliche Oberfläche zu sehen war. Aluminium ist sehr weich, weshalb wahrscheinlich nicht nur die Foulingschicht sondern auch Substrat abgetragen wurde. Die Ergebnisse für die Aluminiumproben sind nicht logisch und werden daher als nicht auswertbar angegeben. Die Schichtdicken für die Stahlsubstrate sind im Anhang A 5 mit aufgeführt. Es wurde jeweils an mehreren Stellen gemessen und in der Tabelle nur der kleinste und der größte gemessene Wert für die Schichtdicke der Foulingschicht dokumentiert. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Proben in Abschnitt 3 dickere Ablagerungsschichten aufweisen. Auch kann grundsätzlich ein Anstieg der Schichtdicke von außen nach innen festgestellt werden. Die Schichten sind insgesamt sehr inhomogen. Allerdings konnte man auf Abschnitt 3 mit bloßem Auge dickere Beläge erkennen, was auch durch die Messungen bestätigt wurde.

## 2.4. FELDVERSUCHE MIT DEM IHKW IN DER BIOGASANLAGE EBENDORF

Im Biogas-Blockheizkraftwerkes Ebendorf wurde ein  $\mu$ -BHKW direkt mit dem dort erzeugten Biogas betrieben. Dabei wurden drei verschiedenen Wärmeübertrager für jeweils ca. 1000 Betriebsstunden eingesetzt, der ursprüngliche Serien-Wärmeübertrager mit der Stiftstruktur auf der Gasseite (WÜT 1), der Prototyp 1 mit beschichteten Rippen (WÜT 2) und der Prototyp 2 einem hochberippten Rohrwendel (WÜT 3), bei dem das Gas auf der Außenseite geführt wird. WÜT 1 war unbeschichtet, auf WÜT 2 waren unterschiedliche DLC-Schichten aufgebracht und WÜT 3 war mit einer auf  $\text{SiO}_2$  basierten Beschichtung beschichtet.

### Wärmeübertrager 1 „Serien-Brennwertwärmeübertrager“

In Abbildung 57 erkennt man eine starke Ablagerung, insbesondere am Gaseintritt haben sich im Strömungsschatten der Stifte strömungsgünstige Strukturen gebildet. In den ersten zwei Dritteln des Apparates sind die Ablagerungen bräunlich bis schwarz (siehe Abbildung 58 links), im unteren Teil gelblich bis weiß (siehe Abbildung 58 rechts).

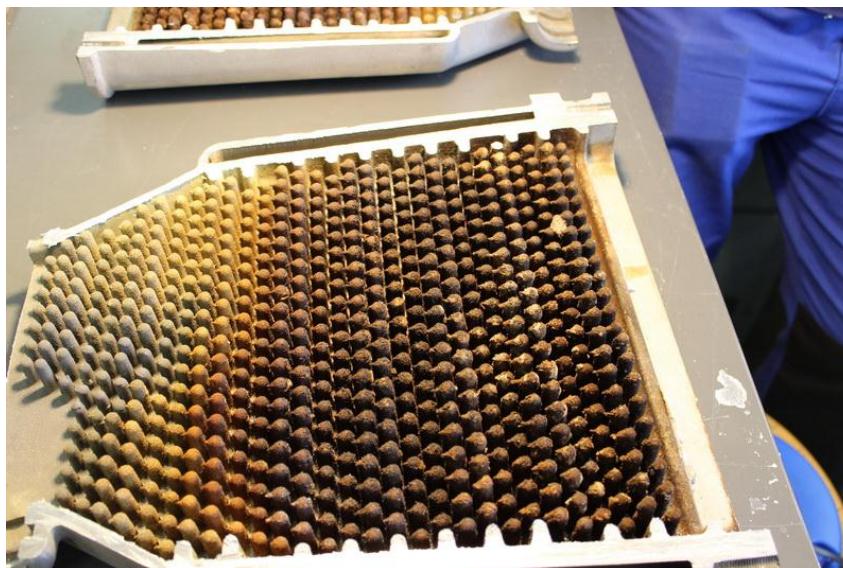
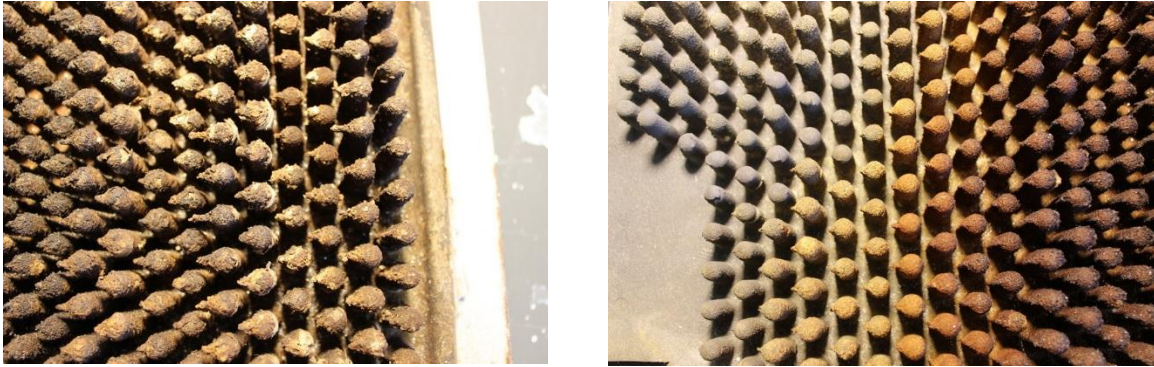
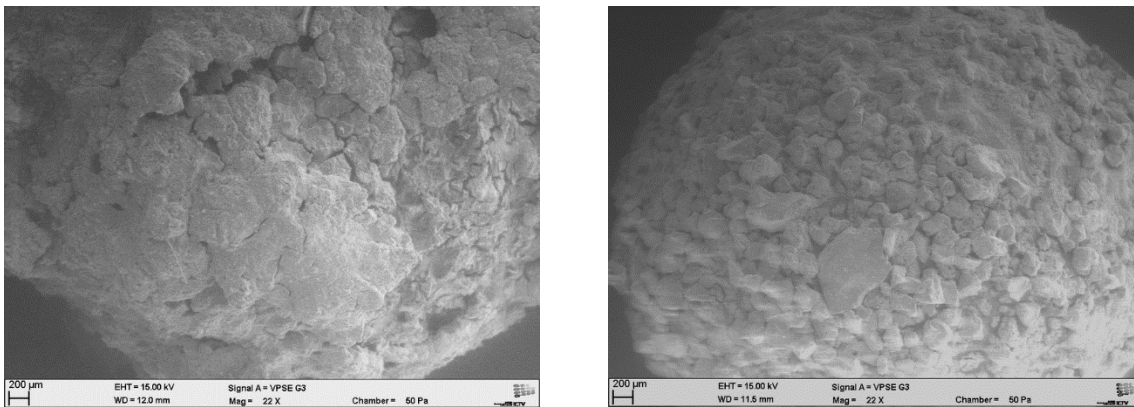


ABBILDUNG 57: AUFGETRENNTER WÄRMEÜBERTRAGER 1 NACH 1000 BETRIEBSSTUNDEN



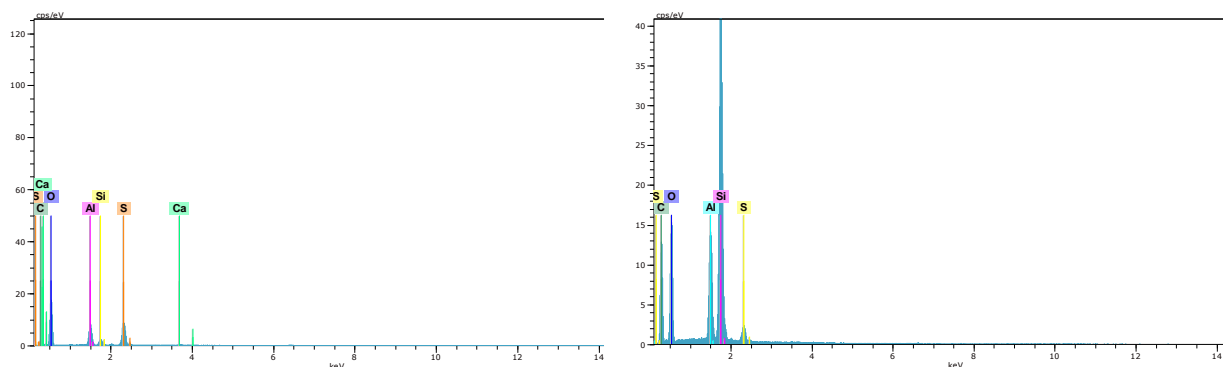
**ABBILDUNG 58: ABLAGERUNGEN AM GASEINTRITT (LINKS) UND GASAUSTRITT (RECHTS)**

Die in Abbildung 59 dargestellten REM-Aufnahmen zeigen im Bereich des Gasaustrittes eine körnige Struktur mit Partikelgrößen  $>100\ \mu\text{m}$ . Im Gaseintritt, d.h. im Bereich hoher Temperaturen, tritt die gleiche Grundstruktur auf, die Partikel bilden aber größere Agglomerate, die „verschmiert“ erscheinen. Dies kann entweder durch eine zusätzliche abgelagerte Komponente oder durch einen Sinterprozess entstanden sein.



**ABBILDUNG 59: REM-AUFNAHME DER ABLAGERUNG AM GASEINTRITT (LINKS) UND GASAUSTRITT (RECHTS)**

Der große Anteil an Kohlenstoff und Sauerstoff bei der Oberflächenanalyse deutet darauf hin, dass die Ablagerungen zum Großteil aus Ruß bestehen. Am Gaseintritt findet sich noch ein größerer Anteil Schwefel und zu einem geringeren Anteil Silizium. Der Anteil dieser Elemente tritt am Gasaustritt im umgekehrten Verhältnis auf (siehe Abbildung 60). Dies kann neben dem Temperatureinfluss die Veränderung der Färbung der Ablagerung erklären.



**ABBILDUNG 60: OBERFLÄCHENANALYSE MITTELS EDX AM GASEINTRITT (LINKS) UND GASAUSTRITT (RECHTS)**

**TABELLE 3: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNGEN AM GASEINTRITT**

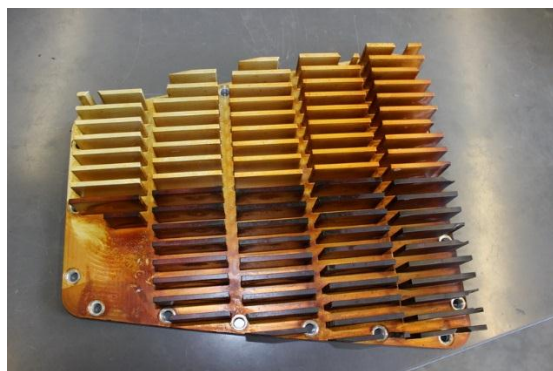
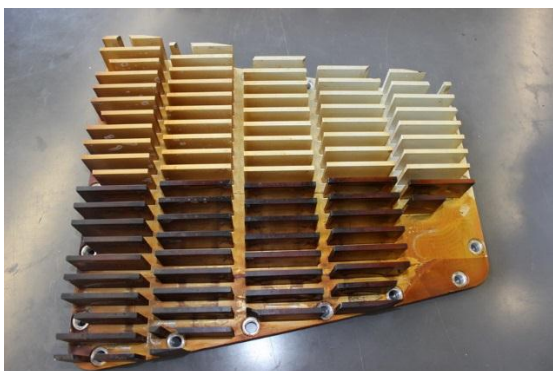
El	OZ	Serie	unn. C [Gew. %]	norm. C [Gew. %]	Atom. C [At. %]	Fehler (1 Sigma) [Gew. %]
C	6	K-Serie	21,91	22,00	30,53	3,29
O	8	K-Serie	53,60	53,82	56,08	6,27
Al	13	K-Serie	8,08	8,11	5,01	0,40
Si	14	K-Serie	2,31	2,32	1,38	0,13
S	16	K-Serie	12,30	12,35	6,42	0,46
Ca	20	K-Serie	1,40	1,40	0,58	0,08
Summe:			99,60	100,00	100,00	

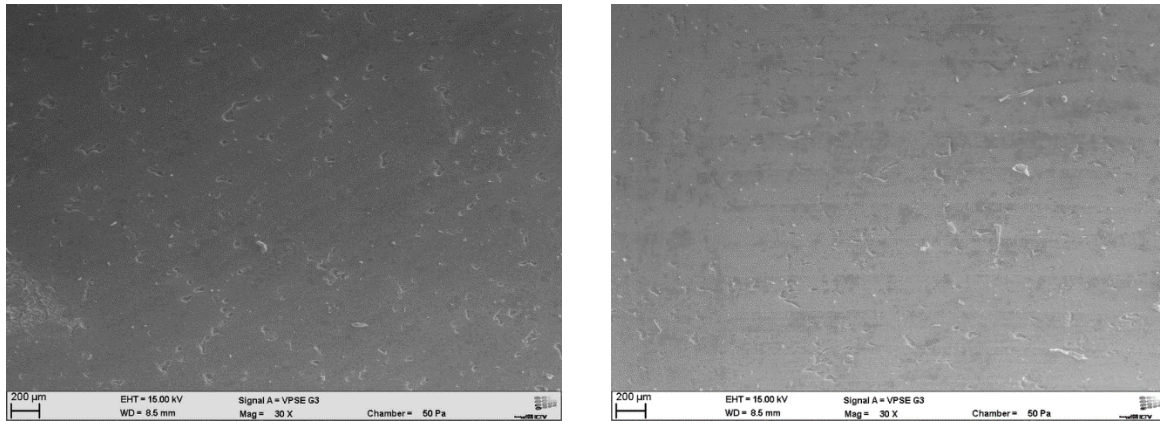
**TABELLE 4: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNG AM GASAustrITT**

El	OZ	Serie	unn. C [Gew. %]	norm. C [Gew. %]	Atom. C [At. %]	Fehler (1 Sigma) [Gew. %]
C	6	K-Serie	62,70	47,10	59,97	8,12
O	8	K-Serie	36,27	27,25	26,04	4,58
Al	13	K-Serie	6,99	5,25	2,98	0,35
Si	14	K-Serie	25,39	19,07	10,38	1,08
S	16	K-Serie	1,76	1,32	0,63	0,09
Summe:			133,11	100,00	100,00	

### Wärmeübertrager 2: Prototyp 1 „Rippenplatten-Brennwert-Wärmeübertrager“

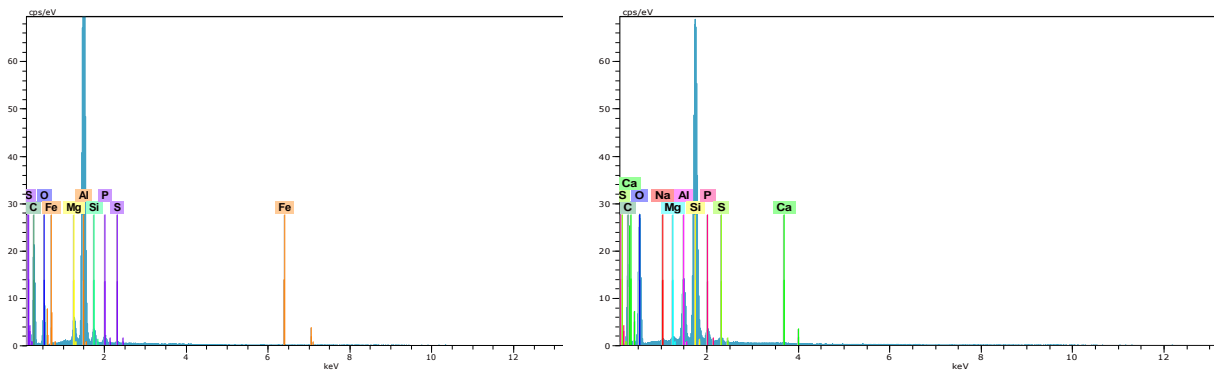
In Abbildung 61 sind die beiden Seiten des teilweise beschichteten Apparates abgebildet. Die Verfärbungen sind hauptsächlich durch die unterschiedlichen Beschichtungen begründet. Exemplarisch wird im Folgenden nur der unbeschichtete und der mit SiO<sub>2</sub> beschichtete Bereich betrachtet. Die Aussagen sind auf alle weiteren Beschichtungen übertragbar. Bei visueller Inspektion und auf den in Abbildung 62 dargestellten REM-Aufnahmen sind keine signifikanten Ablagerungen zu erkennen.

**ABBILDUNG 61: WÜT 2 NACH VERSUCHSENDE SEITE 1 (LINKS) UND SEITE 2 (RECHTS)**



**ABBILDUNG 62: REM-AUFNAHME DER UNBESCHICHTETEN OBERFLÄCHE (LINKS) UND DER MIT SiO<sub>2</sub> BESCHICHTETEN OBERFLÄCHE (RECHTS)**

Die Oberflächenanalytik bestätigt die Aussage, dass keine großen Ablagerungen aufgetreten sind. Auf der unbeschichteten Probe findet sich ein geringer Anteil Silizium. Der hohe Siliziumanteil der zweiten Probe spiegelt das Material der Beschichtung wider (siehe Abbildung 63).



**ABBILDUNG 63: OBERFLÄCHENANALYSE MITTELS EDX DER UNBESCHICHTETEN OBERFLÄCHE (LINKS) UND DER MIT SiO<sub>2</sub> BESCHICHTETEN OBERFLÄCHE (RECHTS)**

**TABELLE 5: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNG AUF UNBESCHICHTETER OBERFLÄCHE**

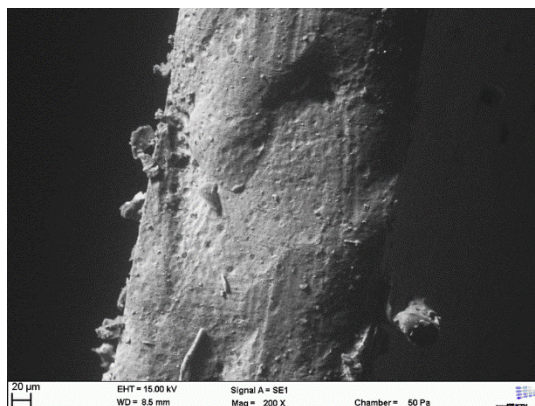
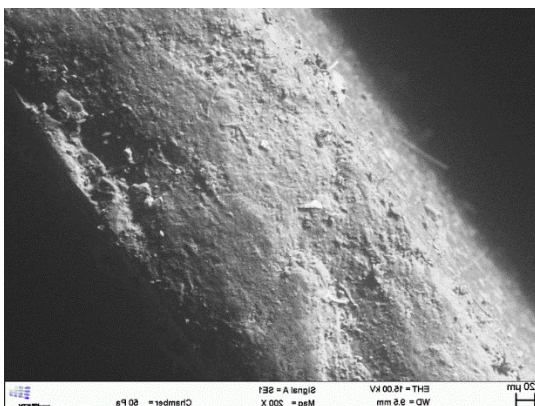
El	OZ	Serie	unn. C [Gew. %]	norm. C [Gew. %]	Atom. C [At. %]	C Fehler (1 Sigma) [Gew. %]
C	6	K-Serie	83,94	55,85	70,25	10,71
O	8	K-Serie	20,06	13,35	12,61	2,84
Mg	12	K-Serie	2,16	1,44	0,90	0,15
Al	13	K-Serie	40,45	26,91	15,07	1,90
Si	14	K-Serie	1,89	1,26	0,68	0,11
P	15	K-Serie	1,03	0,69	0,34	0,07
S	16	K-Serie	0,25	0,17	0,08	0,04
Fe	26	K-Serie	0,50	0,33	0,09	0,06
Summe:			150,30	100,00	100,00	

**TABELLE 6: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNG AUF DER MIT SiO<sub>2</sub> BESCHICHTETEN OBERFLÄCHE**

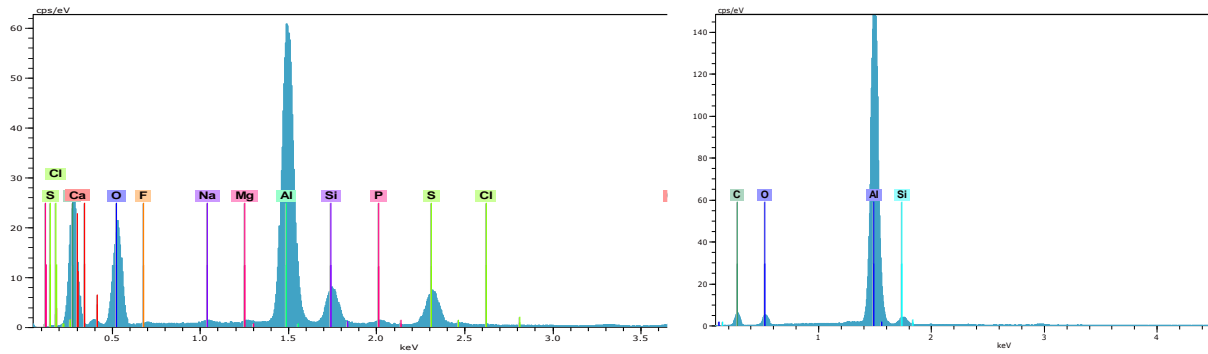
EL OZ	SERIE	UNN. C	NORM. C	ATOM. C	FEHLER (1 SIGMA)
[Gew. %]	[Gew. %]	[At. %]			[Gew. %]
C 6	K-Serie	50,78	42,01	54,69	6,76
O 8	K-Serie	37,43	30,97	30,27	4,66
Na 11	K-Serie	0,17	0,14	0,10	0,04
Mg 12	K-Serie	0,28	0,23	0,15	0,04
Al 13	K-Serie	4,42	3,66	2,12	0,24
Si 14	K-Serie	25,50	21,10	11,75	1,09
P 15	K-Serie	1,48	1,22	0,62	0,09
S 16	K-Serie	0,64	0,53	0,26	0,05
Ca 20	K-Serie	0,17	0,14	0,05	0,04
Summe:		120,85	100,00	100,00	

### Wärmeübertrager 3: Prototyp 2 „Rippenrohrwendel-Brennwertwärmeübertrager“

Der in Abbildung 64 dargestellte Rippenrohrapparat weist keine makro- und mikroskopisch erkennbaren Ablagerungen auf. Am Gaseintritt zeigt sich eine Verfärbung bis zu circa 1/3 der Länge.

**ABBILDUNG 64: WÜT 3 NACH VERSUCHSENDE, GASEINTRITT RECHTS****ABBILDUNG 65: REM-AUFNAHME DER OBERFLÄCHE AM GASEINTRITT (LINKS) UND GASAUSTRITT (RECHTS)**

Am Gaseintritt findet sich eine gewisse Menge Schwefel, was die Veränderung der Färbung der erklären könnte. Wahrscheinlicher ist der Temperatureinfluss.



**ABBILDUNG 66: OBERFLÄCHENANALYSE MITTELS EDX AM GASEINTRITT (LINKS) UND GASAUSTRITT (RECHTS)**

**TABELLE 7: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNG AM GASEINTRITT**

El	OZ	Serie	unn. C [Gew. %]	norm. C [Gew. %]	Atom. C [At. %]	Fehler (1 Sigma) [Gew. %]
C	6	K-Serie	68,05	51,75	64,01	8,48
O	8	K-Serie	33,92	25,79	23,95	4,28
F	9	K-Serie	0,58	0,44	0,34	0,18
Na	11	K-Serie	0,25	0,19	0,12	0,05
Mg	12	K-Serie	0,12	0,09	0,06	0,03
Al	13	K-Serie	20,31	15,44	8,50	0,97
Si	14	K-Serie	3,18	2,42	1,28	0,16
P	15	K-Serie	0,39	0,30	0,14	0,04
S	16	K-Serie	3,77	2,87	1,33	0,16
Cl	17	K-Serie	0,08	0,06	0,02	0,03
Ca	20	K-Serie	0,88	0,67	0,25	0,06
Summe:			131,51	100,00	100,00	

**TABELLE 8: ELEMENTVERTEILUNG DER ABLAGERUNG AM GASAUSTRITT**

El	OZ	Serie	unn. C [Gew. %]	norm. C [Gew. %]	Atom. C [At. %]	Fehler (1 Sigma) [Gew. %]
C	6	K-Serie	36,76	34,21	51,78	5,86
O	8	K-Serie	9,22	8,58	9,75	1,51
Al	13	K-Serie	58,86	54,77	36,90	2,75
Si	14	K-Serie	2,61	2,43	1,57	0,15
Summe:			107,45	100,00	100,00	



## VII. FAZIT

Im Rahmen des Forschungsvorhabens haben die Projektpartner zwei foulingoptimierte Wärmeübertrager für  $\mu$ -BHKW's entwickelt und erfolgreich im Feldversuch mit Biogas getestet. Die gebauten Prototypen erreichen den gleichen thermischen Wirkungsgrad mit dem Intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> wie der Serie-Wärmeübertrager. Im Vergleich zu diesem sind beide Prototypen jedoch beschichtbar und außerdem einfach mechanisch und chemisch zu reinigen. Mit weiteren konstruktiven Optimierungen kann der Wirkungsgrad im Vergleich zur aktuellen Variante sogar noch gesteigert werden. Dazu bieten beide Wärmeübertrager auch noch Potential zu Kostenreduzierung im Vergleich zur Serienkonfiguration. So bietet vor allem der Serienentwurf mit dem geänderten Zylinderkopf für das Intelli-Heimkraftwerk<sup>®</sup> sehr viel Potential und wird bei der Weiterentwicklung berücksichtigt. Neben den geringeren Herstellungskosten gegenüber einem schweren Gussteil könnten mit dem Einsatz pro Gerät auch etwa 10 kg Aluminium eingespart werden.

Die Versuchsreihen zu unterschiedlichen Beschichtungen im Labor und im Abgasstrang des BHKW's in der Biogasanlage in Ebendorf haben gezeigt, dass alle Beschichtungen gute Antifouling-Eigenschaften haben. Besonders erfolgversprechend sind dabei siliziumhaltige Beschichtungen. Im Vergleich zum Serienwärmeübertrager konnte die Belagbildung an beiden Prototypen durch die Beschichtung und Konstruktion deutlich reduziert werden. Damit scheint ein Einsatz von Brennwertwärmeübertrager für biogasbetriebenen Klein-BHKW's möglich.

Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können auch auf andere BHKW's übertragen werden. Bislang sind bei biogasbetriebenen BHKW die Abgastemperaturen oft sehr hoch, so dass viel Wärme ungenutzt in die Umwelt geleitet wird. Durch die erzielten Ergebnisse besteht nun die Möglichkeit, mit optimierten Brennwertwärmeübertragern eine Brennwertnutzung auch für biogasbetriebene BHKW's aller Leistungsklassen, bei reduziertem Wartungsaufwand und leichter Reinigbarkeit in der industriellen Umsetzung zu realisieren. Der Wirkungsgrad der Kraft-Wärme-Koppelung kann dadurch weiter gesteigert und Primärenergie eingespart werden. Würde bei nur 10% der in 2013 Deutschland installierten Biogas-BHKW (Gesamtwärmemenge von ca.  $2,1 \cdot 10^6$  MWh) der thermische Wirkungsgrad durch Nutzung des Brennwerteffektes um 10% erhöht, ergäben sich gegenüber der Erzeugung der gleichen Wärmemenge mit fossilen Brennstoffen wie Erdgas vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen von mehr als 50.000 Tonnen pro Jahr

Die erzielte deutliche Reduzierung der Belagbildung des BHKW's mit Biogasbetrieb kann auch für den Betrieb mit anderen Gassorten genutzt werden, z.B. in mit Deponiegas oder Klärgas betriebenen Blockheizkraftwerken. Derzeit gibt es Anbahnungsgespräche für ein mögliches weiteres anwendungsorientiertes Forschungsprojekt mit dem Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg, das sich mit der Vergasung von Gärresten von Biogasanlagen beschäftigt. Die Nutzung solcher Gase in einem BHKW stellt ähnliche oder z.B. aufgrund enthaltenen Teers sogar höhere Anforderungen. Es ist zu erwarten, dass sich die im Projekt gewonnenen Erfahrungen der Beschichtbarkeit von Wärmeübertragern auf die Lösung solcher Aufgabenstellungen bis zur industriellen Umsetzung übertragen lassen.

## VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 1
- [2] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 28
- [3] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 10
- [4] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 4
- [5] Baehr, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.D., Stephan, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. K.: Wärme- und Stoffübertragung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 2
- [6] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 11
- [7] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S.11
- [8] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 105
- [9] Baehr, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.D., Stephan, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. K.: Wärme- und Stoffübertragung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 4
- [10] Wagner, Dipl.-Ing. W.: Wärmeaustauscher. 4. Aufl. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG 2009, S. 12
- [11] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 102
- [12] Reisner, K.: Fachwissen Kältetechnik für industrielle und gewerbliche Praxis. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG 2002, S. 106
- [13] Baehr, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.D., Stephan, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. K.: Wärme- und Stoffübertragung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 39
- [14] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 102
- [15] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006, S. 73
- [16] Schmitz, K. W., Koch, G.: Kraft-Wärme-Kopplung. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1996, S.47
- [17] Kaltschmitt, Dr.-Ing. M., Fischer, Dr.-Ing. J., Langnickel, Dipl.-Ing. U.: Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. 2002, S. 13
- [18] Kaltschmitt, Dr.-Ing. M., Fischer, Dr.-Ing. J., Langnickel, Dipl.-Ing. U.: Bioenergieträger in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. 2002, S. 14 ff.
- [19] Suttor, W., Müller, A.: Das Mini-Blockheizkraftwerk. 2. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH 2000, S. 12
- [20] ASUE: Kraft-Wärme-Kopplung - Energie sparen, Umwelt schonen. Essen: Vulkan-Verlag GmbH 1995, S. 49 und 88

- [21] Schmitz, K. W., Koch, G: Kraft-Wärme-Kopplung. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1996, S.5
- [22] Wagner, Dipl.-Ing. W.: Wärmeaustauscher. 4. Aufl. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG 2009, S. 11
- [23] Baehr, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.D., Stephan, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. K.: Wärme- und Stoffübertragung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008, S. 46 ff.
- [24] Geitmann, S.: Erneuerbare Energien & Alternative Kraftstoffe. 2. Aufl. Kremen: Hydrogeit Verlag 2005, S.180
- [25] Wagner, Dipl.-Ing. W.: Lufttechnische Anlagen. Würzburg: Vogel Verlag und Druck GmbH & Co. KG 1997, S. 25
- [26] Cerbe, Prof. Dr.-Ing.: Grundlagen der Gastechnik. 5. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1999, S. 5
- [27] ASUE, div. Autoren: Kompendium Gas-Brennwerttechnik. Essen: Vulkan-Verlag 1994, S. 7
- [28] ASUE, div. Autoren: Kompendium Gas-Brennwerttechnik. Essen: Vulkan-Verlag 1994, S. 7
- [29] Geitmann, S.: Erneuerbare Energien & Alternative Kraftstoffe. 2. Aufl. Kremen: Hydrogeit Verlag 2005, S. 148
- [30] VDI-Gesellschaft-Energietechnik, VDI-Berichte 2046: Blockheizkraftwerke 2008. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2008, S. 54
- [31] Wagner, Dipl.-Ing. W.: Wärmeaustauscher. 4. Aufl. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG 2009, S. 39
- [32] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007, S. 227
- [33] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007, S. 227
- [34] ASUE: Kompendium Gas-Brennwerttechnik. Essen: Vulkan-Verlag 1994, S. 14
- [35] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007, S. 232
- [36] EUROPA FACHBUCHREIHE für metallische Berufe: Fachkunde Metall. 54. Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG. 2003, S. 220
- [37] Goldau, Prof. Dr.-Ing. H.: Skript Fertigungstechnik 1, Grundlagen der Spannungstechnik, Beschichtungen. Fachhochschule Magdeburg Sommersemester 2011, S.3
- [38] laut Wieland Werke AG
- [39] EUROPA FACHBUCHREIHE für metallische Berufe: Fachkunde Metall. 54. Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG. 2003, S. 213

**IX. ANHANG****ANHANG A 1: ANFORDERUNGSLISTE**

Seite 1 von 2		<b><u>Anforderungsliste</u></b> für Brennwertwärmetauscher	
Änderungsdatum	F/W	Beschreibende Aussagen	Verantwortlicher
<b>Geometrie</b>			
18.06.2012	F	Einhaltung des vorhandenen Bauraums: 470x620x160mm (HxBxT)	intelli
18.06.2012	F	Anschluss an den Abgaskrümmer	intelli
18.06.2012	F	Anschluss an den Schalldämpfer	intelli
18.06.2012	F	Einbau des vorhandenen Katalysators	intelli
18.06.2012	F	Gasseitige Wärmeübergangsfläche $\geq 0,75 \text{ m}^2$	intelli
<b>Wirtschaftlichkeit</b>			
18.06.2012	W	Herstellungskosten von maximal 2000 €	intelli
18.06.2012	W	Materialkosten von maximal 200 €	intelli
18.06.2012	W	Verwendung von Standardbauteilen (z.B. Rohrwendel etc.)	intelli
<b>Materialanforderungen</b>			
18.06.2012	F	Werkstoffe, die eine hohe chemische Beständigkeit gegenüber saurem Kondensat aufweisen	intelli
18.06.2012	F	Korrosionsfestes Material für das Kühlwasser	intelli
18.06.2012	F	Verwendung von hitzebeständigen Materialien (Dichtungen, Kleber)	intelli
18.06.2012	W	Werkstoffe, die das Kondensat wenig belasten	intelli
<b>Montage</b>			
18.06.2012	W	Gute Demontage zum Recycling	intelli
18.06.2012	F	Montage von Sensoren für Wassereintritt und -austritt, Abgaseintritt und -austritt	intelli

Seite 2 von 2		<b>Anforderungsliste</b> für Brennwertwärmetauscher	
Änderungsdatum	F/W	Beschreibende Aussagen	Verantwortlicher
<b>Physikalische Anforderungen</b>			
18.06.2012	F	Geringer Druckverlust auf der Wasserseite: $\Delta p_{\max}=100$ mbar	intelli
18.06.2012	W	Geringer Druckverlust auf der Gasseite $\Delta p_{\max}=200$ mbar	intelli
18.06.2012	W	Bildung von vielen Verwirbelungen bzw. Turbulenzen	intelli
18.06.2012	F	Nutzung des Brennwerteffekts	intelli
<b>Anforderungen zur Fouling-Minimierung</b>			
18.06.2012	F	Totwinkel und Ecken, an denen sich Fouling ablagern kann sind zu vermeiden	intelli
18.06.2012	W	Möglichkeit der Pa-CVD-Beschichtung (Einhaltung von Beschichtungsverhältnissen)	intelli

**ANHANG A 2: BEWERTUNGSMATRIX DER BRENNWERTWÄRMEÜBETRAGER**

Bewertungskriterien	Gewichtung	Variante 1 Rippenplatte	Variante 2 Rohrbündel	Variante 3 Rohrwendel	Variante 4 Rippenrohr	Gesamt
<b>Technik</b>	<b>10</b>					
Funktionserfüllung	40%	3	3	4	4	
Realisierbarkeit	20%	3	1	3	1	
Platzbedarf	25%	2	3	3	4	
Beschichtbarkeit	5%	4	3	2	2	
Stabilität	10%	4	3	2	3	
	$\Sigma$	<b>2,9</b>	<b>2,6</b>	<b>3,25</b>	<b>3,2</b>	<b>4</b>
<b>Ergonomie</b>	<b>2</b>					
Gewicht	100%	2	2	3	3	
	$\Sigma$	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Wartung</b>	<b>3</b>					
Demontierbarkeit	60%	4	2	2	1	
Reinigungsmöglichkeit	40%	3	4	1	2	

	$\Sigma$	<b>3,6</b>	<b>2,8</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>4</b>
<b>Sicherheit</b>	<b>3</b>					
<b>Betriebssicherheit</b>	100%	3	3	2	2	
	$\Sigma$	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>Kosten</b>	<b>3</b>					
<b>Materialkosten</b>	20%	2	3	3	3	
<b>Fertigungskosten</b>	80%	3	3	3	3	
	$\Sigma$	<b>2,5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Gesamtpunkte</b>	$\Sigma$	<b>60,3</b>	<b>56,4</b>	<b>58,3</b>	<b>57,2</b>	<b>84</b>
	%	<b>71,7</b>	<b>67,1</b>	<b>69,4</b>	<b>68,1</b>	<b>100</b>

<b>Bewertungs-kriterium</b>	<b>Variante 1: Rippenplatte</b>	<b>Variante 2: Rohrbündel</b>	<b>Variante 3: Rohrwendel</b>	<b>Variante 4: Rippenrohr</b>
Funktions-erfüllung	+ ausreichende Übertragungs-fläche	+ ausreichende Übertragungs-fläche	+ größere gas-seitige Wärme-übertragungsflä-che als gefordert	+ größere gas-seitige Wärme-übertragungsflä-che als gefordert
Realisier-barkeit	+ Teile lassen sich gut herstel-len	- aufwendige Teile - keinen Partner der es herstellen könnte	+ Rippenpaket liegt vor + einfaches Blechgehäuse	- Rohre nicht in beliebigen Län-gen verfügbar
Platzbedarf	+/- passt in den vorgegebenen Bauraum	+ kann durch Wahl von Struk-turrohren ver-kleinert werden	+/- passt in den vorgegeben Bauraum	+ geringer Platzbedarf
Beschicht-barkeit	+ Rippenplatten gut beschichtbar	+/- Rohre nicht gut beschichtbar	+/- wird noch untersucht (TU Braunschweig)	- schlecht be-schichtbar, we-gen hoher Rip-pen
Stabilität	+ stabil, Gussteil	+ stabil	- Bleche	- Bleche
Gewicht	- sehr schwer	- schwer	+ leicht	+ leicht
Demontier-barkeit	+ ausgezeichnet, durch viele Schrauben-verbindungen	+ Hauptteile mit Schrauben ver-bunden - Rohre sind auf der Rohrplatte verschweißt	+ Rippenpaket gut austauschbar - Gehäuse muss geschweißt wer-den	- nur geschweiß-te Verbindungen
Reinigungs-möglichkeit	+ dank guter Demontier-barkeit	+ Rohre lassen sich gut reinigen	- Rippenpaket lässt sich schlecht reinigen	- Rohre sind schlecht zu rei-nigen

Materialkosten	- viel Grundmaterial	+ Standardrohre	+ gering	+ gering
Fertigungskosten	+ gut als Guss- teil fertigbar - viel Material	+ Rohre mit Rohrboden ver- schweißen	+ Gehäuse wird aus Blechen geschweißt oder gegossen	+ Gehäuse wird geschweißt oder gegossen

**Legende:** 4=sehr gut 3=gut 2=ausreichend  
1=gerade noch ausreichend 0=ungenügend

### ANHANG A 3: BILANZIERUNG

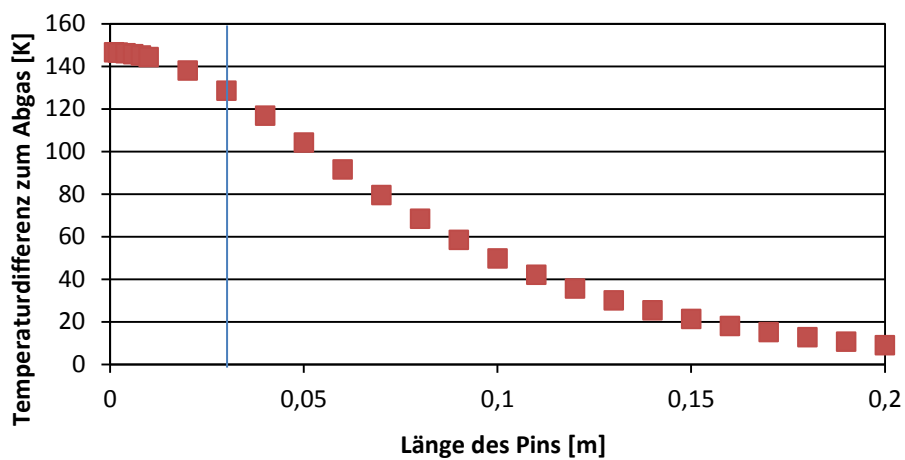
Werte zur Bilanzierung des zu ersetzenden Wärmeübertragers mit einer Kühlwassertemperatur von 35 °C

<b>Fall – Kühlwasser mit 35 °C</b>			
Vorlauftemperatur Kühlwasser	$T_{\text{wasser,ein}}$	35	°C
Abgastemperatur ein	$T_{\text{abgas,ein}}$	280	°C
Abgastemperatur aus	$T_{\text{abgas,aus}}$	40	°C
Abgasmassenstrom	$m_{\text{gas}}$	6,3	g/s
Wärmeübertragerfläche gasseitig	$A_{\text{gas}}$	0,755	m <sup>2</sup>
Wärmeübertragerfläche KW-seitig	$A_{\text{Wasser}}$	0,247	m <sup>2</sup>
Vom Generator erzeugter Wärmestrom	$Q_{\text{Generator}}$	0,4	kW
Gesamtwärmeleistung des $\mu$ -BHKW	$Q_{\text{Gesamt}}$	8,74	kW
Vom Abgas abgegebener Wärmestrom	$Q_{\text{WÜ}}$	2,14	kW
Eintrittstemperatur des KW in den WÜ	$T_{\text{wasser,ein,WÜ}}$	35,75	°C
Austrittstemperatur des KW aus dem WÜ	$T_{\text{wasser,aus,WÜ}}$	39,75	°C
Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	$\Delta T_m$	58,50	K
Wärmedurchgangskoeffizient	$k$	48,45	kW/m <sup>2</sup> K
Spezifische Wärmekapazität von Wasser	$c_{p\text{gemittelt}}$	4193,710149	J/kgK
Massenstrom des Kühlwassers	$m_{\text{wasser}}$	0,127560049	kg/s
		459,216178	kg/h
Wärmeleitfähigkeit von Wasser	$\lambda_{\text{gemittelt}}$	0,622	W/mK
Dichte von Wasser	$\rho_{\text{mittel}}$	993,726161	kg/m <sup>3</sup>
Dynamische Viskosität von Wasser	$\eta_{\text{mittel}}$	$7,08 \cdot 10^{-04}$	Ns/m <sup>2</sup>
Kinematische Viskosität von Wasser	$\nu_{\text{mittel}}$	$7,12 \cdot 10^{-07}$	m <sup>2</sup> /s
Hydraulischer Durchmesser Wasser	$d_h = 2s$	0,0205	m

Reynoldszahl Wasserseite	Re	569,788	
Nusseltzahl Wasserseite	Nu	11,235	
Prandtlzahl Wasserseite	$Pr_{\text{gemittelt}}$	4,772	
Wärmeübergangskoeffizient Wasserseite	$\alpha_{\text{Wasser}}$	340,894	W/m <sup>2</sup> K
Dicke der wärmeübertragenden Wand	$s_{\text{Wand}}$	0,00885	m
Wärmeleitfähigkeit von Aluminium	$\lambda_{\text{Aluminium}}$	204	W/mK

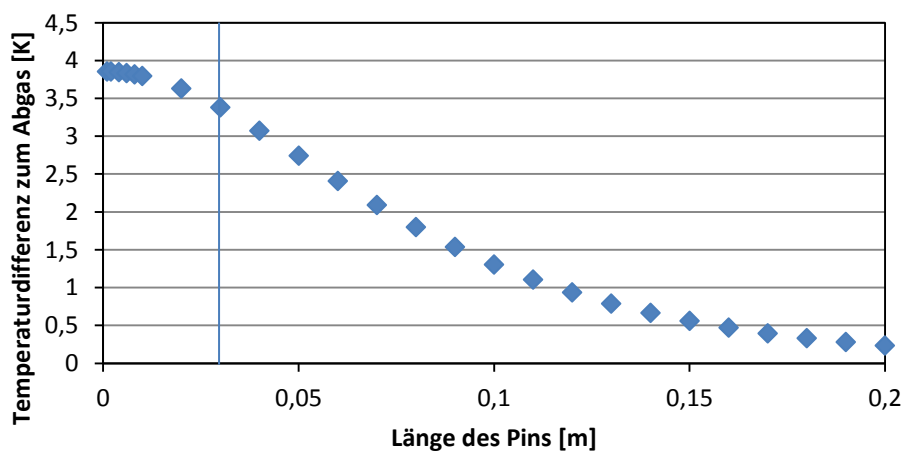
Oberflächentemperaturen im Wärmeübertrager

### Oben (heiß)



Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der Pins und der Abgastemperatur am Abgas-Einlass über der Länge der Pins

### Unten (kalt)



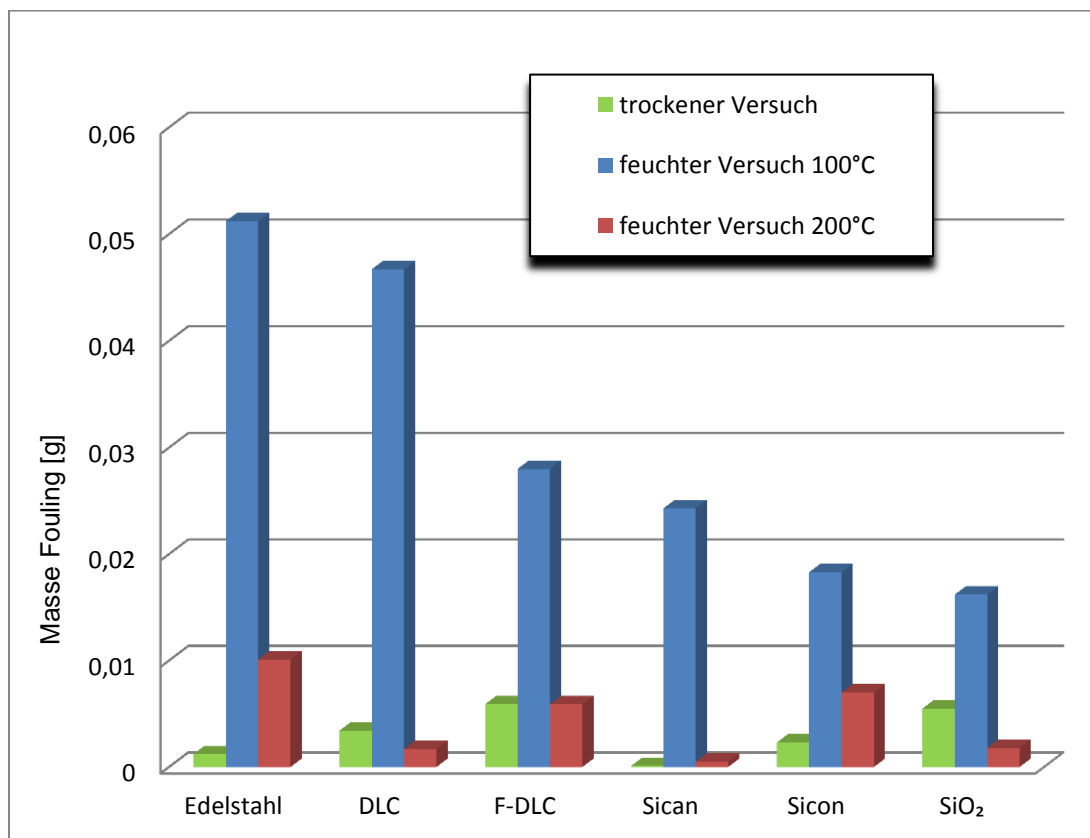
Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der Pins und der Abgastemperatur am Abgas-Auslass über der Länge der Pins



## ANHANG A 4: ERGEBNISSE DER FOULINGVERSUCHE

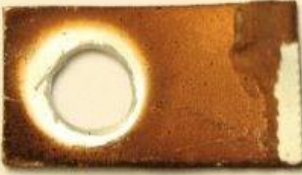














## Massen der Foulingschichten













Probe	100 °C, trocken [g]	100 °C, Glycerin-Wasser-Gemisch [g]	200 °C, Glycerin-Wasser-Gemisch [g]
Edelstahl	0,0012	0,0512	0,0101
DLC	0,0034	0,0467	0,0017
F-DLC	0,0059	0,028	0,0059
Sican	0,0001	0,0243	0,0005
Sicon	0,0023	0,0183	0,007
SiO <sub>2</sub>	0,0055	0,0162	0,0018




Foulingmassen der drei Versuchsreihen

## ANHANG A 5: FOTOS ALLER PROBENPLÄTTCHEN AUS DEM FOULINGVERSUCH IM BHKW EBENDORF

	Aluminium	Edelstahl	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]	S-Gehalt [Atom-%]
<b>Abschnitt 1</b>				
SiO <sub>2</sub> (außen)			Stahl: 8,9-15,4	Alu: 7,28 Stahl: 4,78
DLC			Stahl: 7,2-8,7	Alu: 6,45 Stahl: 3,78
SICON®			Stahl: 8,9-20,8	Alu: 4,15 Stahl: 4,34
Unbeschichtet, rau			Stahl: 20,9- 112,0	Alu: 5,04 Stahl: 9,57
Unbeschichtet			Stahl: 13,9- 37,7	Alu: 7,60 Stahl: 9,26
SiO <sub>2</sub> (innen)			Stahl: 26,0- 60,3	Alu: 6,11 Stahl: 6,23
<b>Abschnitt 2</b>				
Unbeschichtet, rau				Alu: 3,77
Unbeschichtet			Stahl: 3,6-20,0	Alu: 5,79 Stahl: 5,46

SiO <sub>2</sub>			Stahl: 4,2-12,2	Alu:  Stahl: 3,46
Abschnitt 3				
Guss				Alu: 10,13
Unbeschichtet, rau (außen)				Alu: 10,71
Unbeschichtet			Stahl: 11,9	Alu: 11,54 Stahl: 5,38
SiO <sub>2</sub>			Stahl: 18,8- 81,9	Stahl: 9,04
DLC			Stahl: 14,3- 50,6	Alu: 8,20 Stahl: 2,66
SICON®			Stahl: 47,5- 58,7	Alu: 10,13 Stahl: 5,48

Unbeschichtet, rau (innen)			Stahl: 10,4- 23,2	Alu: 10,71 Stahl: 12,67
----------------------------	---	--	-------------------------	----------------------------------