Luft- und Thermotechnik Bayreuth GmbH (LTB GmbH) Markgrafenstraße 4 95497 Goldkronach

# Entwicklung und Erprobung von Abgasreinigungskonzepten für Trockner von Automobilkarosserien mit verringertem Primärenergieeinsatz unter weitgehender Beibehaltung vorhandener Anlagentechnologien (2. Phase)

## Kurztitel: Abgasreinigung Automobillackierung

Abschlussbericht zur zweiten Phase eines Entwicklungsprojektes, gefördert unter Aktenzeichen 26471-22 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Otto Carlowitz (TU Clausthal, vormals CUTEC-Institut GmbH) Karl-Heinz Dammeyer (CUTEC-Institut GmbH) Ingo Jahns (Volkswagen AG) Olaf Neese (CUTEC-Institut GmbH) Lukasz Piech (CUTEC-Institut GmbH) Bernd Schricker (LTB GmbH)

Goldkronach, Januar 2013

## 1. Projektkennblatt

11/95								
	Projektkennblat	t						
Deutso	der chen Rundesstiftur	na Umwelt						
		ig ennion						
Az 26471-22	Referat <b>22/2</b>	Fördersumme	Phase 2: 182.133,00 €					
			Gesamt: 575.353,00 €					
Antragstitel	Entwicklung und Erprok Automobilkarosserien m Beibehaltung vorhander ckierung	oung von Abgasreinigungsko it verringertem Primärenergie 1er Anlagentechnologien – A	onzepten für Trockner von einsatz unter weitgehender bgasreinigung Automobilla-					
Stichworte	Abgasreinigung, Automo Klimaschutz, Katalysato	billackierung, TNV, Erdgase r, Emission, Energie, Bilanz, <i>I</i>	insparung, CO <sub>2</sub> -Minderung, Abgas, Abluft, Abwärme					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)					
19 Monate	01.02.2011	31.08.2012	2 / 2					
Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzberic	ht						
Bewilligungsempfänge	r Luft- und Thermotechr	ik Bayreuth GmbH	Tel 09273/500-0					
	Markgrafenstr.4		Fax 09273/500-111					
	9549/ Goldkronach		Projektleitung					
			DrIng. B. Schricker					
			Dr. Ing B. Schricker					
Kooperationspartner	CUTEC-Institut GmbH.	Clausthal-Zellerfeld: Volks	wagen AG. Wolfsburg					
Zielsetzung und Ar	nlass des Vorhabens							
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b> Bei der Endbehandlung von Automobilkarosserien werden die verschiedenen aufgebrachten Lack- schichten in Durchlauftrocknern getrocknet. Während des Prozesses fallen unterschiedliche, mit orga- nischen Lösungsmitteln beladene Abluftströme an, die in Thermischen Nachverbrennungsanlagen (TNV) behandelt werden. Der Wärmestrom aus dem Reingas der TNV wird schließlich zum Beheizen der Trockner genutzt. Allerdings sind zur Zerstörung der Schadstoffe in der TNV höhere Temperaturen notwendig als zur Deckung des Wärmebedarfs in den Trocknern erforderlich wäre. Im Rahmen des Vorhabens sollen daher katalytische Stufen (einschließlich prozessspezifischer Opfersorbentien) zum nachträglichen Einbau in das TNV-System entwickelt, erprobt und im Rahmen einer Demonstration validiert werden. Die Arbeitstemperatur der TNV kann damit gesenkt und verbliebene Schadstoffe mit der katalytischen Stufe zerstört werden. Damit ergibt sich insgesamt eine energetische Optimierung und drastische Einsparung von Primärenergie für die TNV und eine entsprechende Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen. Die Lackschicht auf einer Automobilkarosserie besteht aus mehreren Teilschichten, der kathodischen Tauchlackierung (KTL), dem Füller, dem Unterbodenschutz (UBS), dem Basecoat (BC, farbgebend) und dem Clearcoat (CC, Glanz). KTL, Füller, UBS sowie BC/CC verfügen jeweils über eine Kombination Trockner/Nachverbrennung.								
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden Das Vorhaben wurde in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase wurden Wärmegleichgewichte ermittelt und die Randbedingungen für die katalytische Stufe ermittelt. Auf dieser Basis erfolgte eine Auswahl an geeigneten Katalysatoren und Opfersorbentien, die zunächst in Versuchsanlagen unter realen Bedingungen getestet wurden. Die erste Phase des Vorhabens konzentrierte sich auf die Teil- lackschiehten BC/CC. Füller und LIPS, websi biofür die ersten Haunteutführungen implementiert								

worden sind. In der zweiten Phase ist die kathodische Tauchlackierung (KTL) bezüglich Wärmegleichgewichtseinstellung und Katalysatornachrüstung untersucht worden. Bezüglich des Katalysatoreinsatzes begrenzte sich diese Phase auf längere Tests im Versuchsstadium. Hauptausführungen wurden im Decklack-, Füller- und UBS-Bereich implementiert, (noch) nicht für KTL-Linien.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt O An der Bornau 2 O 49090 Osnabrück O Tel 0541/9633-0 O Fax 0541/9633-190 O http://www.dbu.de

#### Ergebnisse und Diskussion

Das Vorhaben hat gezeigt, dass durch Reaktionstemperaturabsenkung in den TNV-Anlagen erhebliche Erdgasmengenströme eingespart werden können. Beim Kooperationspartner Volkswagen, Wolfsburg wurden bei Decklackanlagen Potenziale bis zu etwa 40 %, bei Füller- und KTL-Anlagen etwa 20 % und bei UBS-Linien bis zu 40 % ermittelt. Mit Hilfe von Analysen des in den katalytischen Stufen nachzubehandelnden Abgases sowie Tests unterschiedlicher Katalysatoren in Versuchsanlagen konnte ermittelt werden, dass mit einer irreversiblen Katalysatordeaktivierung durch einen Mix von Spurenstoffen, insbesondere metallische Spurenstoffe (Decklack) und siliziumorganische Verbindungen (Füller) zu rechnen ist, diese jedoch im Fall von Decklack-, UBS- und Füllerlinien relativ langsam voranschreitet, so dass sich hier eine katalytische Stufe lohnt. Zwischenzeitlich sind 12 Decklack-, 8 Füllerund 3 UBS-Linien als Vollstromanlagen ausgerüstet worden. Die ermittelten Einsparpotenziale an Erdgas konnten verifiziert werden, wobei die Emissionswerte insbesondere bezüglich Kohlenstoffmonoxid drastisch und Stickoxiden deutlich gesenkt werden konnten. Die Emissionswerte an organisch gebundenem Kohlenstoff sind sehr niedrig und unterschreiten die Emissionsbegrenzungen ebenfalls deutlich.

Im Falle von KTL-Anlagen ist ein abschließendes Statement noch nicht möglich. Tests in einer Versuchsanlage haben gezeigt, dass ein Opferkatalysator auf metalloxidischer Basis recht schnell deaktivierte (Gifte: Schwefel und Phosphor), ein nachgeschalteter Edelmetallkatalysator durchgehend seine Oxidationsperformance behielt. Endgültige Aussagen können nur an einer Vollstromanlage bei dauerhaft abgesenkter Reaktionstemperatur in der TNV-Brennkammer gewonnen werden.

#### Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die bisherigen Ergebnisse sind bereits durch Vorträge vor einschlägigem Fachpublikum und zugehörige Veröffentlichungen publiziert. Zusätzlich fließen die Erkenntnisse über den Projektpartner CUTEC in die Lehre der TU Clausthal ein.

#### Fazit

Nachträglich in bestehende TNV-Anlagen eingebaute Katalysator-Stufen können den Primärenergiebedarf von Thermischen Nachverbrennungsanlagen drastisch senken und dabei die geforderten Reingaswerte deutlich unterschreiten. Dabei ist ein auf die spezifische energetische Situation bei dem Verbund von Abluftreinigungs- und Trocknungsanlagen in der Automobilindustrie abgestimmtes System notwendig. Dies erfordert eine genaue Analyse der Randbedingungen und den Einsatz darauf abgestimmter Katalysatoren / Opferschichten.

Das Vorhaben hat insgesamt noch weitergehende Effekte hervorgerufen:

- Die Branche des Lackieranlagenbaus wurde nachhaltig angeregt, sich mit der Thematik der Energieeffizienz auseinanderzusetzen.
- Es wurden weitere Vorhaben initiiert und erfolgreich umgesetzt, z. B. die bedarfsabhängige Abgasvolumenstromabsenkung für Trockner.
- Die Ausgründung der CVET Clausthaler Verfahrens- und Energietechnik GmbH aus der CUTEC-Institut GmbH basiert wesentlich mit auf den Erkenntnissen aus diesem Vorhaben.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt O An der Bornau 2 O 49090 Osnabrück O Tel 0541/9633-0 O Fax 0541/9633-190 O http://www.dbu.de

# 2. Inhaltsverzeichnis

-	Projektkennblatt4							
2. Inhaltsverzeichnis	6							
3. Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen und Grafiken	7							
4. Verzeichnis von Tabellen	8							
5. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	8							
6. Zusammenfassung	11							
7. Hauptteil								
7.1 Einführung und Aufgabenstellung								
7.2 Ermittlung des Wärmegleichgewichts und des Einsparpotenzials								
7.2.1 Auslegungszustand	17							
7.2.2 Ausgangszustand auf der Basis von Messwerten	17							
7.2.3 Berechnung des Einsparpotenzials bei Temperaturabsenkung	J 19							
7.3 Inhaltsstoffbezogene Untersuchungen Kathodische Tauchlackierun	g 21							
7.3.1 Abgasanalysen KTL	22							
7.3.2 Betrieb der Versuchsanlage und zugehörige Ergebnisse KTL	25							
7.4 Katalysatoranalytik								
7.4.1 Analysenergebnisse Decklack, Vollstrom								
7.4.2 Analysenergebnisse Füller, Vollstrom								
7.4.3 Analysenergebnisse Füller, Versuchsanlage								
7.4.4 Analysenergebnisse KTL, Versuchsanlage								
7.5 Betriebserranrungen mit vollstromanlagen								
7.5.1 Messtechnische Untersuchungen an Vollstromanlagen (9/20	(11)							
7.5.3 Konstruktive Hinweise zur Ausführung von Vollstromanlager	1 (7/2012) 30 1							
7.5.4 Fazit Vollstromanlagen								
7.6 Überwachung der Reingaskonzentrationen								
7.6.1 Summarische Erfassung der Qualität des Reingases								
7.6.2 Lösungsansatz für eine kontinuierliche, betriebstechnische Ü	Jberwachung 41							
7.6.3 Eigenüberwachung CO- und org. C-Konzentrationen; Kataly	satorformular 42							
8. Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens	43							
8.1 Technologische Bewertung	43							
8.2 Ökonomische Bewertung und patentrechtliche Situation	44							
8.3 Ökologische Bewertung / Umweltentlastung	45							
9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	46							
10. Fazit und Ausblick								
11. Literaturverzeichnis	50							
12. Anhänge								
12.1 Anhangverzeichnis Tabellen								
12.2 Anhangverzeichnis Bilder								

# 3. Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen und Grafiken

Nr.	Bezeichnung	Seite
7.1-1	Typischer Aufbau einer Karosserielackierung	13
7.1-2	Vorwiegend in der Automobilindustrie eingesetzte Systemtechnik Lack- trockner/Abgasreinigung	14
7.1-3	Absenkung der TNV-Temperatur und Katalysatornachrüstung	16
7.2.2-1	Zeitliche Verläufe gemessener Temperaturen an einem KTL- Trocknersystem bei einer TNV-Regeltemperatur von 715 °C	17
7.2.2-2	Energiefließbild des KTL-Trockners im gemessenen Istzustand (Mes- sung, Volllastbetrieb)	18
7.2.3-1	Erdgasbedarf und Temperaturverläufe im Reingasweg des KTL- Trocknersystems in Abhängigkeit von der TNV-Regeltemperatur	20
7.3.1-1	Abhängigkeit der Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)	24
7.3.1-2	Abhängigkeit der CO-Konzentration und der NOx-Konzentration als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)	24
7.3.2-1	KARLOS-Versuchsanlage im CUTEC-Institut (links) und vor Ort bei der Volkswagen AG (rechts)	25
7.3.2-2	Versuchsanlage KARLOS zur katalytischen Abluftbehandlung	26
7.3.2-3	Katalysatorraum (oben links), Eindichtung der Katalysatoren (oben rechts), Einbau fertiges Katalysatorpaket (unten rechts), Katalysator- deckel an der Versuchsanlage mit Messstutzen (unten links)	26
7.3.2-4	Versuchsanlage KARLOS; Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, zwi- schen den Katalysatorlagen und im Reingas als Funktion der Zeit	27
7.3.2-5	Abhängigkeit des Umsatzes an Kohlenstoffmonoxid von der Katalysa- torbetriebszeit (KTL-Trockner)	28
7.3.2-6	Zustand der Katalysatorlagen nach Ende der Betriebszeit innerhalb der Versuchsanlage KARLOS. Blick auf die erste (links) und zweite (rechts) Katalysatorlage	29
7.4.2-1	Oberflächenverlust und deaktivierende Elemente, Füller 2, Strang 1, Mai 2010	30
7.5.1-1	Verlauf der Reingaskonzentration nach Katalysator der Anlage Deck- lack 2, Strang 1 als Funktion der Zeit (Basis: ausgewählte, repräsenta- tive Daten aus Bild 7.3.3-7 des Berichtes zu Phase 1 und Tabelle 7.5.1-1)	34
7.5.1-2	Beispielhafter Vergleich des Abbaus von org. C und CO an den Voll- stromanlagen UBS 3, FÜ1STR2 und FÜ2STR1	35
7.5.2-1	Ablagerungen auf Katalysatoren an Füllerlinie 3, Strang 1	36
7.5.2-2	Füller 3, Strang 1, Roh und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysatoreintrittstemperatur	37

Nr.	Bezeichnung	Seite
7.5.2-3	Füller 3, Strang 1, Querschnittsmessung nach 3. Katalysatorlage, Roh- und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysato- reintrittstemperatur	38
7.5.3-1	Aufbau einer Katalysatorlage (Prinzip)	38
7.6.2-1	Vergleich der mit konventioneller Messtechnik ermittelten Konzentrati- onsverläufe an CO und org. C mit dem Ausgangssignal der WT SYS- CO-Sonde	41

## 4. Verzeichnis von Tabellen

Nr.	Bezeichnung	Seite
7.2.3-1	Zusammenfassung charakteristischer berechneter Bilanzdaten des KTL-Trocknersystems bei Variation der TNV-Regeltemperatur	19
7.3.1-1	Messwerte in einer Zusammenstellung aus der Messkampagne 26 28.06.2012	23
7.3.2-1	Versuchsanlage KARLOS an der KTL-Linie, Halle 9	27
7.5.1-1	Überblick zu den an Vollstromanlagen im Zeitraum August / September 2011 erhaltenen Messdaten (Unten: Katalysatorampel)	33

# 5. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Zeichen/ Symbol	Dimension	Erläuterung
A	[m <sup>2</sup> ]	Wärmeübertragerfläche
Cp	[kJ/(kg K)]	Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)
DL		Decklack
Fü		Füller
h	[kJ/kg]	Spezifische Enthalpie
H	[kW]	Enthalpiestrom
ΔĤ	[kW]	Enthalpiestromdifferenz
k	$[W/(m^2 K)]$	Wärmedurchgangskoeffizient
Kat		Katalysator
KNV		Katalytische Nachverbrennung
KTL		Kathodische Tauchlackierung
ṁ	[kg/h]	Massenstrom
Δρ	[Pa]	Differenzdruck, Druckverlust
$\dot{Q}_{_V}$	[kW],	Wärmestrom (z.B. Transmissionsverlust)

Zeichen/ Symbol	Dimension	Erläuterung
RG	[h⁻¹]	Raumgeschwindigkeit; Quotient aus Abgasvolumenstrom im Norm- zustand [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h] und Katalysatoreinbauvolumen [m <sup>3</sup> ]
RNV		Regenerative Nachverbrennung
S	[m]	Wanddicke
Т	[°C]	Temperatur
$\Delta T$	[°C]	Temperaturdifferenz
TNV		Thermische Nachverbrennung
α	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmeübergangskoeffizient
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Wand
η	[%]	Wirkungsgrad, Abbaugrad
$\Sigma$ org. C	[mg/m <sup>3</sup> ]	organisch gebundener Kohlenstoff

Indizes	Erläuterung
0	Opferschicht im Katalysator (Metalloxid)
1 bzw. 2	Erste bzw. zweite Lage im Oxidationskatalysator (Edelmetall)
10 bzw. A10	Trocknersystem
11 bzw. A11	Eintrittsschleuse
12 bzw. A12	Aufheizzone (1)
13 bzw. A13	Aufheizzone (2)
14 bzw. A14	Haltezone (1)
15 bzw. A15	Haltezone (2)
16 bzw. A16	Austrittsschleuse
20 bzw. A20	Thermische Nachverbrennung (TNV- System)
21 bzw. D21	Brennkammer
22 bzw. W22	Wärmeübertrager W22 (Abluftrekuperator, Abluftvorwärmer)
30 bzw. A30	Abhitzenutzung
31 bzw. W31	Wärmeübertrager W31 (Aufheizzone)
<i>32</i> bzw. <i>W32</i>	Wärmeübertrager W32 (Aufheizzone)
<i>33</i> bzw. <i>W33</i>	Wärmeübertrager W33 (Aufheizzone)
34 bzw. W34	Wärmeübertrager W34 (Aufheizzone)
35 bzw. <i>W</i> 35	Wärmeübertrager W35 (Haltezone)
36 bzw. <i>W36</i>	Wärmeübertrager W36 (Haltezone)
36 bzw. W37	Wärmeübertrager W37 (Frischluftrekuperator)
AbL	Abluft
Abl_v	Abluftvorwärmung

Indizes	Erläuterung						
aus	Austritt						
Br	Brennstoff (zugeführter Brennstoff im TNV-System)						
by	Bypass						
ein	Eintritt						
FrL	Frischluft (zum Frischluftrekuperator; aus Kabinen und Kühlzone)						
Kar	Karosserien + SKID						
Lm	Lösungsmittel (verdampfe flüchtige Bestandteile des Lackes)						
Rg	Reingas						
UmG	Umgas (im Kreislauf geführte Umgasströme)						
UmL	Umluft (im Kreislauf geführte Umluftströme)						
V	Verluste, Transmissionsverluste						
Vd	Verdampfung						
wü	Wärmeübertrager						

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes sind Randbedingungen erarbeitet und realisiert worden, die es erlauben, an vorhandenen Trocknern hinter Automobillackieranlagen, die mit thermischen Nachverbrennungsanlagen ausgerüstet sind und gleichzeitig die Trockner mit Prozesswärme versorgen, den Brennstoffbedarf signifikant zu senken und die Emissionen an toxischen Stoffen (CO, org. C, NO<sub>x</sub>) deutlich zu verringern. Die Untersuchungen während beider Vorhabensphasen erstreckten sich über

- Decklacklinien
- Füllerlinien
- Unterbodenschutzlinien
- Linien der kathodischen Tauchlackierung (KTL-Linien)

im Werk Wolfsburg der Volkswagen AG.

Die Ergebnisse beider Projektphasen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch Absenkung der Reaktionstemperatur in der TNV bis zum sogenannten Wärmegleichgewicht (Wärmebereitstellung durch die TNV entspricht der Wärmeabnahme im Trockner) lassen sich im Decklack- und Unterbodenschutzbereich bis zu etwa 40 % an Brennstoffzufuhr zur TNV, im Füller- und KTL-Bereich um etwa 20 % einsparen.
- Da der Ausbrand in einer TNV sich mit sinkender Reaktionstemperatur verschlechtert (org. C und CO steigen), ist eine Nachoxidation erforderlich, die in Form von katalytischen Stufen realisiert wurde, weil sie prinzipiell einen angemessenen apparativen und investiven Aufwand erfordert.
- Analysen des durch den Katalysator zu behandelnden Abgases bei abgesenkter Reaktionstemperatur im TNV-Brennraum, langfristig angelegte Versuchsserien mit Katalysatortestanlagen sowie Erfahrungen mit 23 Vollstromanlagen haben gezeigt, dass die Katalysatoren
  - o in Decklackanlagen einem moderaten
  - o in Fülleranlagen einem höheren
  - o in Unterbodenschutzanlagen einem niedrigeren und
  - o in KTL-Anlagen einem höheren

Deaktivierungsrisiko ausgesetzt sind. Nach bisherigen Erfahrungen mit Versuchsund insbesondere Vollstromanlagen liegt die (derzeitige) Katalysatorstandzeit für Füllerlinien bei etwa 2 Jahren und für Decklack- und Unterbodenschutzlinien bei mindestens 3 Jahren. Die Implementation einer Vollstromanlage in einer KTL-Linie steht noch aus, so dass eine abschließende Aussage nicht möglich ist.

 Als Einbauort für die 23 implementierten Vollstromkatalysatoranlagen (12 Decklack, 8 Füller, 3 Unterbodenschutz entsprechend einer eingesparten Feuerungswärmeleistung von ca. 7 Megawatt) hat sich die Position hinter dem TNV-Kompaktgerät, bestehend aus Brennkammer und Abluftvorwärmrekuperator, bzw. hinter der ersten Wärmeauskopplungszone für den Trockner bewährt. Die ursprünglich angedachte Positionierung am Ende des TNV-Brennraumes (in diesem Fall wird kein separates Katalysatorgehäuse benötigt) erfordert ein spezielles Brennerverhalten (homogenes Temperatur-, Konzentrations- und Strömungsfeld im TNV-Brennraum sowie eine moderate Temperaturregelcharakteristik), das jedoch durch die vorhandenen Brenner nicht ausreichend abgebildet werden konnte. Allerdings ist diese Lösung grundsätzlich realisierbar, wie eine Versuchskampagne in der Technikums-TNV der CUTEC unter Beweis gestellt hat.

- Die bei Volkswagen implementierten Katalysatorstufen führen während des Lifecycle im Mittel zu einer deutlichen Unterschreitung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionswerte an Kohlenstoffmonoxid (0,10 g/m<sup>3</sup>), org. gebundenem Kohlenstoff (50 mg/m<sup>3</sup> für katalytische Nachverbrennungsanlagen) sowie NO<sub>x</sub> (als NO<sub>2</sub>; 0,10 g/m<sup>3</sup>).
- Die Kapitalrückflusszeit für die Katalysatoren (ohne Gehäuse) erstreckt sich über einen Zeitraum von 0,5 Jahren bis zu 1 Jahr, so dass der Einbau sich als wirtschaftlich erweist und daher als attraktiv einzustufen ist.

Neben diesen unmittelbaren Ergebnissen der ersten Phase des Vorhabens lassen sich die folgenden weiteren, sogenannten mittelbaren Ergebnisse ableiten:

- Das Vorhaben hat der Branche der Automobillackierer (Planer, Anlagenbauer, Anlagenbetreiber) bedeutende Impulse vermittelt, über Technologien im Zusammenhang mit der Verminderung des Primärenergiebedarfes nicht nur nachzudenken, sondern auch praktikable Ansätze anzubieten. Im Konzern der Volkswagen AG besteht nunmehr generell das Bestreben, die Energieeffizienz der Automobilproduktion deutlich zu erhöhen und den fahrzeugspezifischen Primärenergieverbrauch deutlich zu senken.
- Die entwickelte anlagentechnische Lösung verbreitet sich in Ansätzen schon über die Marke Volkswagen hinaus in den Volkswagenkonzern und von dort hin zu anderen Automobilfabriken sowie Zulieferern. Dazu tragen im Rahmen dieses Berichtes zitierte, einschlägige Vorträge und Veröffentlichungen wesentlich bei.
- Für die am Vorhaben Beteiligten Luft- und Thermotechnik Bayreuth (LTB) und CUTEC eröffnen sich einerseits neue Märkte (LTB) und andererseits Ansätze für neue Forschungsvorhaben (CUTEC).
- Aus diesem Forschungs- und Entwicklungsprojekt sind weitere entstanden, u.a. ein Vorhaben [Zim10], das sich die lastabhängige Abluftvolumenstromreduzierung zum Ziel gesetzt hat. Der technologische Ansatz hat im Volkswagenwerk Emden seine Funktionalität nachgewiesen, hat zu Einsparungen an Erdgas von 27% an einer Decklacklinie geführt, ist kompatibel mit der hier entwickelten Lösung und kann daher zusätzlich vorgesehen werden.
- Das Vorhaben bildete in Verbindung mit weiteren die Basis für die Gründung der CVET GmbH, der Clausthaler Verfahrens- und Energietechnik GmbH, die die planerische Seite derartiger Energieeinspartechnologien in Zukunft vorantreiben wird.

## 7. Hauptteil

## 7.1 Einführung und Aufgabenstellung

Der hier vorliegende Bericht baut auf der 1. Phase des Vorhabens auf, in der bereits vier von insgesamt fünf Stufen einer Automobillackierung behandelt worden sind. Insofern ist es zweckmäßig, hier einige Passagen aus dem Bericht der ersten Phase zu übernehmen, damit dieser Bericht für sich verständlich wird. Gemäß **Bild 7.1-1** wird das verzinkte Stahlblech einer Automobilkarosse zunächst phosphatiert, bevor es die erste Lackschicht – den kathodischen Tauchlack – erhält. Es folgen

- der Füller
- der Basislack
- der Klarlack.



Bild 7.1-1: Typischer Aufbau einer Karosserielackierung

Bevor der Füller aufgetragen wird, ist die Aufbringung des Unterbodenschutzes vorgesehen, der aus PVC besteht und in einem separaten Trockner geliert wird. Zählt man die Trockner, die heute insgesamt von einer phosphatierten Rohkarosserie durchlaufen werden, so sind es vier:

- 1. Trockner KTL
- 2. Trockner UBS
- 3. Trockner Füller
- 4. Trockner Basecoat und Clearcoat

Der Basecoat / Clearcoat-Trockner stellt insofern eine Besonderheit dar, als dass eine sogenannte Nass- in Nasslackierung vorgenommen wird, wobei eine Zwischenabsaugung nach Auftragen des Basecoats erfolgt, deren Abgas ebenfalls zur Verbrennung in die TNV gelangt. **Bild 7.1-2** verdeutlicht in einer vereinfachten Weise die Systemtechnik Lacktrockner / Abgasreinigung.



Bild 7.1-2: Vorwiegend in der Automobilindustrie eingesetzte Systemtechnik Lacktrockner/Abgasreinigung

Die lackierten Karosserien werden auf einem Tragegestell (SKID) in den Trockner gefahren und dort einer Wärmebehandlung (Aufheizzone, Haltezone) unterzogen, deren Temperatur-Zeit-Funktion je nach Lackschicht bzw. Substanzauftrag differieren kann. Die aus dem Trocknungsprozess resultierende Abluft wird einer thermischen Nachverbrennung (TNV) zugeführt, in der sie zunächst vorgewärmt (Abluftrekuperator Pos. 3) und anschließend in eine Brennkammer zur Oxidation der VOC-Anteile geführt wird (Pos. 2). Das Reingas aus der Brennkammer (Temperaturniveau i. A. etwa 700 ℃ bis 800 ℃) kühlt sich im Abluftrekuperator ab und versorgt anschließend den Trockner über sog. Umgasrekuperatoren (Pos. 4) und einen Frischluftrekuperator (Pos. 5) mit Prozesswärme. Für die Aufrechterhaltung des Brennkammertemperaturniveaus werden erhebliche Brennstoffmengenströme aufgewendet. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Temperaturniveaus des Reingases am Kamin vielfach deutlich oberhalb des Auslegungswertes liegen (Beispiel: Decklacklinie 1, Strang 1, Volkswagen AG, Wolfsburg. Auslegungstemperatur Reingas 160 ℃; Ist-Temperatur 320 ℃). In Verbindung mit einem Reingasmengenstrom von etwa 10.000 Nm<sup>3</sup>/h ist demnach (nur an einer Linie) eine Erhöhung des Abgasverlustes von etwa 600 kW gegenüber dem Auslegungszustand zu beklagen. Offenbar existiert ein Ungleichgewicht zwischen Wärmeangebot aus der TNV und Wärmeabnahme im Trockner. Es kommt hinzu, dass die TNV-Anlagen teilweise Schwierigkeiten haben, den Emissionswert für Kohlenmonoxid bei moderaten Verbrennungstemperaturen einzuhalten, so dass tendenziell das TNV-Temperaturniveau weiter angehoben werden müsste und folglich sich die Situation noch verschärfen würde. Es entsteht demnach ein Zielkonflikt zwischen der Einhaltung von Emissionswerten und der Energieeffizienz, der im Rahmen des Vorhabens weitmöglichst aufgelöst werden soll.

#### Lösungsansätze

Grundsätzlich sind neben dem im Rahmen des Vorhabens verifizierten Lösungsansatz drei weitere entwickelt worden, die im Abschlussbericht zur Phase 1 ausführlich skizziert wurden [SCJ11], so dass hier nur auf das Verfahren der Temperaturabsenkung eingegangen wird.

#### Absenkung der TNV-Reaktionstemperatur

Im Rahmen des Vorhabens ist die TNV-Reaktionstemperatur abgesenkt worden, um das Wärmeangebot an den Trockner zu verringern und den Brennstoffbedarf der TNV zu minimieren. Dabei bleibt die Strömungs- und Temperaturführung im Trockner völlig unberührt. Dies ist für einen Betrieb ein ganz entscheidendes Argument, denn dadurch bleibt die Produktqualität unverändert. Allerdings verschlechtert sich der Ausbrand der TNV mit abnehmender Reaktionstemperatur erheblich, so dass eine weitere Oxidationsstufe in Form eines Katalysators nachgeschaltet werden muss. Mit einer solchen Lösung gelingt es – wie im Kapitel 7.2 gezeigt wird – den Brennstoffbedarf durch Einstellung des sogenannten "Wärmegleichgewichts"<sup>1</sup> – drastisch zu senken. Allerdings wirft der Einbau eines Katalysators eine Reihe von Fragen auf:

- An welchem Ort soll er eingesetzt werden?
- Ist er in der Lage, in den unterschiedlichen Anwendungen (hier) der Automobilindustrie (Decklack (DL), Kathodische Tauchlackierung (KTL), Unterbodenschutz (UBS), Füller (Fü)) die geforderten Emissionsbegrenzungen sicher zu unterschreiten und wie muss er jeweils beschaffen sein?
- Wie verläuft eine mögliche (und wahrscheinliche) Katalysatordeaktivierung?
- Wie lässt sich eine katalytische Stufe überwachen?

Neben der Einstellung des Wärmegleichgewichts stehen diese Fragen im Rahmen des Vorhabens im Vordergrund, wobei im ersten Teil [SCJ11] Decklack-, Unterbodenschutz- und Fülleranlagen betrachtet wurden.

Anlagen zur kathodischen Tauchlackierung, über die hier im Besonderen berichtet wird, wurden in Phase 2 des Vorhabens separat untersucht, da hier mit kritischen Begleitstoffen zu rechnen ist (siehe auch [Mü09]).

Zur Frage, an welchem Ort der Katalysator eingesetzt werden soll, hat sich die Pos. 2 gemäß **Bild 7.1-3** nach wie vor als zielführend herauskristallisiert. Eine Positionierung hinter dem TNV-Kompaktgerät erweist sich bezüglich Temperaturspitzen bzw. Regelzyklen des Brenners als wesentlich unempfindlicher als eine Positionierung im Brennraum (Pos. 1, Bild 7.1-3).

Zu den Fragen der Katalysatordeaktivierung im Bereich der Kathodischen Tauchlackierung wurde eine Istzustandsaufnahme (Energetik, Begleitstoffe) mit zwei anschließenden Temperaturabsenkungen untersucht. Anschließend werden die Erfahrungen mit einer Versuchsanlagen beschrieben. Hauptausführungen ("Vollstromanlagen") wurden während der Projektlaufzeit (noch) nicht umgesetzt. Allerdings hat dieses – von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte – Vorhaben weitere initiiert bzw. neue Ansätze ausgelöst (z. B. die Absenkung des Abluftvolumenstromes [Zim10], die zusätzlich oder alternativ zu einer deutlichen Energieeinsparung führen können.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Der Begriff "Wärmegleichgewicht" soll hier nicht im streng thermodynamischen Sinne verstanden werden, er soll lediglich charakterisieren, dass bei einer vorhandenen Anlagenkonfiguration Wärmeerzeugung in der TNV und Wärmeabnahme im Trockner im Einklang stehen.



Bild 7.1-3: Absenkung der TNV-Temperatur und Katalysatornachrüstung

Auch für den Bereich Kathodische Tauchlackierung soll erwähnt werden, dass der weit überwiegende Teil der Untersuchungen in einem großen Automobilwerk bei laufender Produktion durchgeführt wurde. Die im wissenschaftlichen Bereich gewünschte und notwendige Stringenz in der Vorgehensweise wird dort vielfach durch nicht vorhersehbare Imponderabilien durchbrochen, so dass nicht jede grundsätzlich mögliche Parameterkombination realisiert werden konnte. Dass dennoch auch die zweite Projektphase als sehr erfolgreich bezeichnet werden kann, ist der Motivation sowie Zähigkeit der Antragsteller und gleichermaßen des beteiligten Automobilunternehmens zu verdanken.

#### 7.2 Ermittlung des Wärmegleichgewichts und des Einsparpotenzials

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle vermerkt, dass das Kapitel 7.2 "Ermittlung des Wärmegleichgewichts und des Einsparpotenzials" aus einem Entwurf der in 2013 erscheinenden Dissertation "Analyse und Erprobung von Konzepten zur Senkung des Primärenergieeinsatzes bei bestehenden Lacktrocknersystemen am Beispiel der Automobilindustrie" von Herrn Dipl.-Ing. Olaf Neese entnommen wurde [Ne13].

Das untersuchte KTL-Trocknersystem wurde nach der in Abschnitt 7.2.1 des Berichtes zur Phase 1 des Vorhabens dargestellten Vorgehensweise bilanziert. Gemäß dem verfahrenstechnischen Fließbild in **Bild A 7.2-1** besteht die Abhitzestrecke des KTL-Trockners aus 6 Umluftaggregaten (W31 bis W36) und dem Frischluftwärmeübertrager W37. Die Aggregate W31 bis W34 sind der Aufheizzone zugeordnet, während die Aggregate W35 und W36 die Haltezone mit Wärme versorgen. Der KTL-Trocknungsprozess benötigt die höchsten Objekttemperaturen (185 ℃) und hat neben der Lackaushärtung auch die Funktion einer Wärmebehandlung zur Steigerung der Festigkeit der Karosserie. Aufgrund der hohen Temperaturen ist die benötigte Heizleistung des Trockners größer als bei den übrigen Lacktrocknern. Eine Be-

sonderheit ergibt sich beim Frischluftwärmeübertrager W37, dem nicht nur Hallenluft sondern auch Abluft der KTL-Tauchkabine zugeführt wird.

#### 7.2.1 Auslegungszustand

Ausgangspunkt der Bilanzierungsrechnungen ist wiederum der Auslegungszustand gemäß der in **Tabelle A 7.2.1-1** zusammengefassten Daten, die der Anlagendokumentation [Dür02] entnommen sind. Das Ergebnis des Bilanzmodells für den Normalbetrieb mit Nennlast (43 Karosserien/h) ist in Tabelle **A 7.2.1-2** enthalten und in **Bild A 7.2.1-1** grafisch dargestellt.

Die höhere Objekttemperatur (185 °C), der große Abluftvolumenstrom (16.000  $m_N^3$ /h) und der Durchsatz von 35 Karosserien/h führt zu einem Gesamtheizenergiebedarf des Trockners von 2023 kW, wovon 651 kW (32 %) auf die Aufheizung der Karosserien entfallen. Dies erfordert einen Reingasenthalpiestrom am TNV-Austritt von 2979 kW (483 °C), der innerhalb der Abhitzestrecke auf 160 °C abgekühlt werden soll (Reingasenthalpiestrom am Kamin: 956 kW) und hat einen projektierten Erdgasverbrauch von 1851 kW zur Folge.

#### 7.2.2 Ausgangszustand auf der Basis von Messwerten

Die zeitlichen Verläufe charakteristischer Temperaturen an der Abhitzestrecke des Trocknersystems sind in **Bild 7.2.2-1** dargestellt. Die Reingastemperaturen am Kamin bewegen sich in einem Bereich von 240 ℃ bis 330 ℃, was ein Einsparpotenzial mit hohem dynamischen Anteil andeutet. Wie schon bei den übrigen untersuchten Trocknersystemen lassen sich unterschiedliche Lastzustände anhand der Spreizung der Reingastemperaturen ablesen und mit Hilfe des Bilanzmodells abbilden. Die Ergebnisse der Berechnungen für den Ausgangszustand im Volllastfall sind der **Tabelle A 7.2.2-1** und dem zugehörigen Energiefließbild **Bild 7.2.2-2** zu entnehmen.



Bild 7.2.2-1: Zeitliche Verläufe gemessener Temperaturen an einem KTL-Trocknersystem bei einer TNV-Regeltemperatur von 715 ℃



Bild 7.2.2-2: Energiefließbild des KTL-Trockners im gemessenen Istzustand (Messung, Volllastbetrieb) Kennwerte: Abluftvolumenstrom: 16.260 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h;

TNV-Regeltemperatur:	715	${\mathfrak C}$
Karosserien (Normalbetrieb):	32,8	1/h

Im Vergleich mit dem Auslegungszustand fällt auf, dass der Wärmebedarf des Trockners mit 1552 kW insgesamt geringer ist als projektiert. Neben dem Aufwand von 396 kW (statt 651 kW) für die Aufheizung der Karosserien sind insbesondere die geringen Transmissionsverluste (158 kW statt 619 kW) hervorzuheben. Bei etwa gleichem Abluftvolumenstrom (16.250 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h) führt dies zu deutlich höheren Kaminverlusten von 1652 kW und einer Kamintemperatur von 269 °C. Die Frischluftmenge ist mit ca. 10.000 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h sehr viel geringer, als projektiert, so dass an der Eintritts- und insbesondere an der Austrittsschleuse größere Anteile an kalter Frischluft angesaugt werden. Dies führt auch zu einer Einschränkung des Einsparpotenzials, da in der letzten Haltezone an W36 mit 180 kW (statt 38 kW) sehr viel mehr Heizenergie benötigt wird. Im Leerlaufbetrieb sinkt der Heizenergiebedarf des Trockners gemäß **Tabelle A 7.2.2-2** und **Bild A 7.2.2-1**weiter auf 1219 kW, was zu einer Kamintemperatur von 331 °C und Reingasverlusten von 2106 kW führt.

#### 7.2.3 Berechnung des Einsparpotenzials bei Temperaturabsenkung

Charakteristische Ergebnisse der Bilanzrechnungen bei Variation der TNV-Regeltemperatur des KTL-Trocknersystems sind in **Tabelle 7.2.3-1** und **Bild 7.2.3-1** für den Volllastfall zusammengefasst.

	Einspar	ootenzial KTL-Trocknersystem VW-Wolfsburg, Halle 9												
		Temperaturen						Erdgas		übertragene Reingaswärme				
	TNV-	T1	T2	Т3	T4	T5	Т8	Т9	Leis-	Einono	Aufhoiz	Halta	Frisch-	
	Regel- temp.	Abluft Eintritt	TNV Brennk	Reing. TNV	Reing. AHZ	Reing. HZ	Reing. Kamin	Frisch- luft	tung TNV	rung	zone	zone	luftreku. (FL-WÜ)	Summe
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	[kW]	[%]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
Temperaturabsenkung 2	575	205	605	424	310	267	173	193	1271	31,2	727	268	584	1580
Temperaturabsenkung	600	205	632	439	337	299	193	214	1372	25,8	654	242	663	1559
Temperaturabsenkung 1	608	205	640	444	346	309	199	221	1404	24,1	630	233	689	1552
Temperaturabsenkung	625	205	658	454	357	320	210	221	1473	20,3	630	233	689	1552
Temperaturabsenkung	650	205	684	470	372	336	226	221	1576	14,7	630	233	689	1552
Temperaturabsenkung	675	205	711	485	388	352	243	221,0	1680	9,1	630	233	689	1552
Temperaturabsenkung	700	205	737	500	404	368	259	221	1785	3,4	630	233	689	1552
Ausgangszustand Voll	715	205	753	510	413	377	269	221	1849	0,0	630	233	689	1552
Ausgangszustand Mittel	715	207	753	511	435	398	292	221	1912	-3,4	508	249	689	1446
Ausgangszustand Leer	715	210	753	514	469	433	331	221	2076	-12,3	305	242	674	1221
Auslegungszustand	750	180	750	483	334	320	160	203	1851	-0,2	949	88	986	2023

Tabelle 7.2.3-1: Zusammenfassung charakteristischer berechneter Bilanzdaten des KTL-Trocknersystems bei Variation der TNV-Regeltemperatur.

Auslegungszustand

Ausgangszustand (Messung bei normal betriebenem Trockner mit Karosserien)

Maximale Absenkung der TNV-Regeltemperatur ohne Verringerung der Frischluftvorwärmung

Maximale Absenkung der TNV-Regeltemperatur mit Verringerung der Frischluftvorwärmung



Bild 7.2.3-1: Erdgasbedarf und Temperaturverläufe im Reingasweg des KTL-Trocknersystems in Abhängigkeit von der TNV-Regeltemperatur

Aus der Einsparpotenzialermittlung lassen sich für das untersuchte KTL-Trocknersystem folgende Erkenntnisse ableiten:

- Bei gleichbleibender Trocknerbeheizung und unveränderter Frischluftvorwärmtemperatur von 221 °C ist eine Absenkung der TNV-Regeltemperatur rechnerisch bis auf 608 °C möglich, bevor der Frischluftvorwärmer W37 seine Leistungsgrenze erreicht. Dies ist mit einer Brennstoffeinsparung von 445 kW (24,1 %) verbunden. Die Ergebnisse der zugehörigen Bilanzrechnungen sind in Tabelle A 7.2.3-1 und Bild A 7.2.3-1 dargestellt. Das Einsparpotenzial ist somit trotz ähnlich hoher Kamintemperaturen (260 °C) geringer als beim Decklacktrockner.
- Die TNV-Regeltemperatur kann bei gleichzeitiger Verringerung der Frischluftvorwärmtemperatur auf 193 °C weiter auf 575 °C abgesenkt werden, was zu einer Brennstoffersparnis von 587 kW (31,2 %) führt. An diesem Betriebspunkt kann das Aggregat W36 gerade noch die geforderte Heizenergie aufbringen. Die Reingastemperatur nach dem ersten Beheizungsaggregat (Katalysatorposition) ist mit 399 °C auch dann noch ausreichend hoch. Die Bilanzergebnisse dieses Betriebspunktes sind in Tabelle A 7.2.3-2, das zugehörige Energiefließbild in Bild A 7.2.3-2 enthalten.
- Die bei dem untersuchten KTL-System rechnerisch erzielbaren Einsparungen beziehen sich auf den vorgefundenen Istzustand mit einer deutlich zu geringen Frischluftmenge und infolgedessen hohen Kaltlufteinträgen an Ein- und Austritt des Trockners. Dies führt dazu, dass die Einstellwerte für Zonentemperaturen und Frischlufttemperatur deutlich über den projektierten Werten liegen. Bei einem fluiddynamisch optimal eingestellten System könnten noch deutlich höhere Einsparungen erzielt werden.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass auch an dem hier untersuchten KTL-Trockner ein erhebliches Einsparpotenzial durch nachträglichen Einbau einer Katalysatorstufe besteht. Allerdings läuft der Trockner derzeit nicht im apparatetechnisch optimalen Zustand (Falschluftansaugung). Vor Implementation einer Katalysatorvollstromanlage sollte der Trockner neu eingestellt werden.

### 7.3 Inhaltsstoffbezogene Untersuchungen Kathodische Tauchlackierung

Zur Erläuterung der Funktion der unterschiedlichen Lackaufträge wird einführend nochmals auf das Bild 7.1-1 verwiesen.

Auf das rohe Karosserieteil - meist bestehend aus verzinktem Stahlblech - wird zunächst zur Verbesserung der Haftfähigkeit des Lackes und zur Erhöhung des Karosserieschutzes eine Zinkphosphatierung appliziert. Sie bildet die Basis für die erste Lackschicht, den kathodischen Tauchlack (KTL), der durch Einfahren der Karosserie in Lackbäder elektrisch unterstützt aufgebracht wird. Die KTL dient im Wesentlichen dem Korrosionsschutz. Es folgen - neben dem Unterbodenschutz (UBS), der hauptsächlich aus PVC besteht und im Rahmen einer Trocknung geliert werden muss - die durch Spritzen aufgetragenen Lackschichten des Füllers zur Erhöhung des Steinschlagschutzes und Vergleichmäßigung des Untergrundes sowie der farbgebende Base Coat (BC) und der den Glanz erzeugende Clear Coat (CC). Dabei bilden BC und CC den sogenannten Decklack. Während KTL, Füller, UBS jeweils separat einem Trocknungs- bzw. Gelierprozess unterzogen werden, erfolgt die Aufbringung des Decklackes meist in einem "nass-in-nass-Prozess", d. h. der BC wird gespritzt und nach einem Zwischentrockner sofort der CC appliziert. Dieser stellt im Gegensatz zu den übrigen Lackschichten ein auf organischen Lösemitteln basiertes System dar, alle anderen sind wasserbasierte Lacksysteme, die nur noch geringere Anteile von VOC<sup>2</sup> beinhalten. Jedoch ist es bislang noch nicht gelungen, die VOC-Anteile soweit zu reduzieren, dass auf ein Abgasbehandlungssystem (hier TNV, siehe Bild 7.1-2) verzichtet werden kann. Dieser Umstand ist den geforderten optischen und den beanspruchungsrelevanten Eigenschaften des Lackes insgesamt geschuldet.

Nachdem im Abschnitt 7.2 die Frage nach den energetischen Einsparpotenzialen durch Absenkung der Reaktionstemperatur näher betrachtet worden ist, soll nun die Problematik der katalytischen Stufe untersucht werden. Dabei stellt sich die Aufgabe, herauszufinden, welche Stoffe den Katalysator irreversibel schädigen können bzw. welcher Katalysator geeignet erscheint. In diesem Kapitel wird daher zunächst das zu verarbeitende Abgas aus der TNV selbst analysiert. Auch spielt das gewählte Reaktionstemperaturniveau in der TNV eine entscheidende Rolle, denn mit sinkender TNV-Temperatur verschlechtert sich der Ausbrand, wobei neben Kohlenmonoxid eine Vielzahl organischer Verbindungen - auch Krebs erzeugende - zu erwarten sind. Weiter ist es notwendig, dass die eingesetzten Brenner zumindest das Methan des Erdgases anoxidieren, denn die für Methan notwendige Oxidationstemperatur im Katalysator ist relativ hoch bzw. liegt i. A. über dem Austrittstemperaturniveau der TNV-Kompaktgeräte und könnte das Konzentrationsniveau an organisch gebundenem Kohlenstoff im Reingas unerwünscht deutlich erhöhen. Nach dieser Analyse des vom Katalysator zu verarbeitenden Abgases wird auf den Betrieb der Versuchsanlage eingegangen, mit Hilfe derer ein Gefühl für das Vergiftungsverhalten der verschiedenen Katalysatoren gewonnen werden soll.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> VOC: <u>Volatile Organic Compounds</u>

### 7.3.1 Abgasanalysen KTL

Es wird vorab vermerkt, dass die nachfolgend dargestellten Analysenergebnisse als exemplarisch, d.h. spezifisch für die gewählte Linie und die zugehörigen Einsatzstoffe anzusehen sind. Gleichwohl können sie als charakterisierend bezeichnet werden.

Im Hinblick auf den Betrieb eines Oxidationskatalysators und eine mögliche irreversible Deaktivierung sind – auch in Anlehnung an Phase 1 des Vorhabens – folgende Komponentengruppen bedeutsam:

- organische Verbindungen aller Art, denn diese muss der Katalysator weitestgehend oxidativ umsetzen
- anorganische Chlor-, Fluor- und Schwefelverbindungen (insbesondere Chlorwasserstoff sowie Schwefeloxide), weil sie i. d. R. deaktivierende Wirkung auf den Katalysator ausüben
- metallische Inhaltsstoffe, die ebenfalls zu einer Katalysatordeaktivierung (Poisoning, Plugging) führen können
- Silizium als Indiz für siliziumorganische Verbindungen im zu verarbeitenden Rohgas, die recht sicher auch zur Katalysatordeaktivierung führen
- Gesamtstaub im Hinblick auf das Katalysatorplugging bzw. Oberflächenabrasion

**Tabelle 7.3.1-1** zeigt charakteristische Werte aus einer Messkampagne vom 26. – 28.06.2012 an der KTL-Linie 2 in Halle 9. Ziel der Messkampagne war es, herauszufinden, mit welchen Stoffen grundsätzlich und insbesondere bei abgesenkter Reaktionstemperatur zu rechnen ist. Im Anhang in **Tabelle A 7.3.1-1** findet sich eine Auflistung der eingesetzten Mess- und Analysentechnik.

Anhand von Tabelle 7.3.1-1 kann Folgendes festgestellt werden:

- Die Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff nimmt erwartungsgemäß mit sinkender Temperatur deutlich zu. Dies gilt auch für Derivate vorwiegend aus dem Erdgas (Methan) wie Formaldehyd und Ameisensäure.
- Wenngleich Toluol und Xylole unterhalb der hier vorhandenen Nachweisgrenze lagen, konnte Benzol in nennenswerten Konzentrationen bei abgesenkter Temperatur detektiert werden. Auch aus diesem Grunde ist die ordnungsgemäße Funktion des Katalysators unabdingbar.
- Anorganische Chlorverbindungen scheinen keine dominante Rolle zu spielen, die ermittelten Konzentrationen liegen jeweils unterhalb der durch unterschiedliche Probenahmezeiten bedingten differierenden Nachweisgrenzen.
- Das Abgas aus der TNV enthält in den drei untersuchten Temperaturbereichen keine nennenswerten Gesamtstaubkonzentrationen. Gleiches gilt für die Konzentrationen an metallischen Inhaltsstoffen.
- Schwefelverbindungen sind zweifellos vorhanden. Während bei 600 °C eine Gesamtschwefelkonzentration von 0,71 mg/m<sup>3</sup> detektiert wurde, konnte bei (715 – 720) °C eine SO<sub>x</sub>-Konzentration von 4,3 mg/m<sup>3</sup> messtechnisch festgestellt werden, weil dort der zunächst organisch gebundene Schwefel als Oxid vorliegt.

Weiter sind bezüglich siliziumorganischer Verbindungen und dem daraus resultierenden Reaktionsprodukt Siliziumdioxid (amorph) Analysen vorgenommen worden. In Abhängigkeit des Probenvolumens und daraus resultierender Nachweisgrenze ergaben sich keine quantifizierbaren Werte.

KTL, Linie 2; 26 28.06.2012									
Massenkonzentration [mg/m <sup>3</sup> ]									
Komponenten	00 ℃	650 °C	715 – 720 ℃						
organisch C-Verbindungen									
Σ org. C	40	15	< 1						
Formaldehyd 1)	16	4	< 1						
Acetaldehyd <sup>1)</sup>	6,6	1,5	< 1						
Aceton	n. n.	n. n.	n. n.						
Propionaldehyd und Acrolein	n. n.	n. n.	n. n.						
Essigsäure 1)	5,3	1,4	2						
Ameisensäure <sup>1)</sup>	5,3	1,5	1,5						
BTXE und and	ere Kohlenwasse	rstoffe							
Benzol	0,24	0,14	< 0,13						
Toluol	< 0,13	< 0,13	< 0,13						
Ethylbenzol	< 0,13	< 0,13	< 0,13						
Xylole ( <u>I</u> someren <u>g</u> emisch, IG)	< 0,26	< 0,26	< 0,26						
2-Butoxyethanol	< 0,35	< 0,35	< 0,35						
1-Butoxy-2-Propanol	< 1,8	< 1,8	< 1,8						
1-Phenoxy-2-Propanol	< 3,7	< 3,7	< 3,7						
n-Butylacetat	< 0,15	< 0,15	< 0,15						
Methoxy-methyethoxy-Propanol (IG)	< 4,0	< 4,0	< 4,0						
Cumol	n. n.	n. n.	n. n.						
Chlor-, Fluor- un	d Schwefelverbir	ndungen							
HCI	< 0,5	< 0,6	< 0,6						
Cl <sub>2</sub>	< 3,5	< 3,4	< 3,3						
HF	n. b.	n. b.	n. b.						
$SO_2 / SO_3$ als $SO_2$	< 0,45	1,8	4,3						
Gesamt-S	0,71	< 0,5	< 0,6						
	Metalle								
Cu	0,03	0,02	0,03						
Ni	0,06	0,03	0,03						
Pb	0,08	0,09	0,13						
Sn	0,16	0,19	0,25						
TI	0,16	0,19	0,25						
Hg	< 3,8 µg/m <sup>3</sup>	< 3,5 μg/m <sup>3</sup>	< 4,5 µg/m <sup>3</sup>						
Siliziumverbindungen									
Si	< 3,4	< 3,0	< 0,8						
Staub									
Staub	0,30	0,21	0,34 / 0,62 2)						
1) FTIR-Messungen in [mg/m <sup>3</sup> ,tr]; 2) Doppelbestimmung n.b.: nicht bestimmt; n. n.: nicht nachweisbar									

Tabelle 7.3.1-1: Messwerte in einer Zusammenstellung aus der Messkampagne 26.-28.06.2012

Ergänzend zu Tabelle 7.3.1-1 sind in den **Bildern 7.3.1-1** und **7.3.1-2** die Verläufe der Restschadstoffkonzentrationen für  $\Sigma$  org. C und CO sowie NO<sub>x</sub> (als NO<sub>2</sub>) aufgetragen. Es wird deutlich, dass

• die Konzentration an org. geb. Kohlenstoff mit sinkender Temperatur signifikant steigt (siehe auch Tab. 7.3.1-1).

- die Konzentration an CO ebenfalls im Intervall von 715 °C auf 650 °C stark ansteigt, dann jedoch bei weiterer Temperaturabsenkung in etwa gleicher Größenordnung verbleibt. Das Verhalten ist von thermischen Nachverbrennungsanlagen durchaus bekannt, die CO-Bildung kann als Zwischenschritt zur vollständigen Oxidation des Kohlenwasserstoffes verstanden werden und erreicht offensichtlich in dem betrachteten Temperaturbereich von 600 °C bis 650 °C ihr Maximum.
- - > der thermische Stickoxidbildungsmechanismus weniger zum Tragen kommt.
  - > mit sinkender Temperatur vermehrt Reduktionsmittel (org. C, CO) vorhanden sind.



Bild 7.3.1-1: Abhängigkeit der Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)



Bild 7.3.1-2: Abhängigkeit der CO-Konzentration und der NO<sub>x</sub>-Konzentration als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)

Weiter sind im Anhang in **Tabelle A 7.3.1-2** bis **7** die Chromatogramme der GC-MS-Analytik als Funktion der Reaktionstemperatur zusammengestellt, auf deren Grundlage die BTXE (Tabelle 7.3.1-1) ermittelt wurden. Es zeigt sich, dass im Fall einer Reaktionstemperatur von 715 °C offenbar der Ausbrand als vollständig zu bezeichnen ist, bei 650 °C und 600 °C ist insbesondere Benzol aufgetreten.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich im Abgas von KTL-Trocknern relevante Mengen an Katalysatorgiften befinden (insbesondere Schwefel bzw. Schwefelverbindungen). Demnach besteht ein höheres Deaktivierungsrisiko für die Katalysatoren.

#### 7.3.2 Betrieb der Versuchsanlage und zugehörige Ergebnisse KTL

Zur Beantwortung der Fragestellung nach den Einsatzmöglichkeiten von Katalysatoren und den erreichbaren Reingaswerten wurde im Rahmen von Voruntersuchungen an einer KTL-Linie der Volkswagen AG eine Versuchsanlage zur katalytischen Abluftbehandlung (KARLOS) installiert und mit zwei Katalysatorlagen mit einem Teilstrom des TNV-Reingases betrieben. Eine relativ lange Betriebszeit war erforderlich, um sicherzustellen, dass Deaktivierungseffekte und andere Einflüsse auf die Katalysatoren mit bewertet werden können.

**Bild 7.3.2-1** zeigt Fotos der Versuchsanlage KARLOS, **Bild 7.3.2-2** das zugehörige vereinfachte Fließschema der Anlage.



Bild 7.3.2-1: KARLOS-Versuchsanlage im CUTEC-Institut (links) und vor Ort bei der Volkswagen AG (rechts)

Die Anlage verfügt über ein Klappensystem, so dass das An- und Abfahren mit Hallenluft über Klappe K-1 ermöglicht wird. Die Abluft wird erst in einem Kreuzstromwärmeübertrager W-1 vorgewärmt und im Anschluss mit Hilfe einer elektrischen Heizung W-2 auf Betriebstemperatur gebracht. Als Sollwert wurde eine Ablufteingangstemperatur am Katalysator K-1a von 350 ℃ gefahren. Der Abluftvolumenstrom wird mittels Staurohr gemessen. Das Gebläse V-1 kann per Frequenzumrichter einen variablen Abluftvolumenstrom fördern, so dass prinzipiell verschiedene Raumgeschwindigkeiten eingestellt werden können. Mit Hilfe der Klappe K-2 kann Kühlluft (Hallenluft) dem Reingas vor dem Gebläse zugegeben werden, damit ein Maximalwert von 180 ℃ (maximale Fluidtemperatur für den Ventilator) nicht überschritten wird.



Bild 7.3.2-2: Versuchsanlage KARLOS zur katalytischen Abluftbehandlung

KARLOS ermöglicht den Einsatz von zwei in Reihe geschalteten Katalysatorschichten. Das gesamte Katalysatorpaket wird in ein Edelstahlgehäuse eingebaut und eingedichtet (siehe **Bild 7.3.2-3**). Zwischen den Schichten wurde eine Messstelle vorgesehen, so dass die Abgaskonzentration nach der 1. Schicht vor Eintritt in die zweite gemessen werden kann.



Bild 7.3.2-3: Katalysatorraum (oben links), Eindichtung der Katalysatoren (oben rechts), Einbau fertiges Katalysatorpaket (unten rechts), Katalysatordeckel an der Versuchsanlage mit Messstutzen (unten links)

Auf Grund bisheriger Deaktivierungserfahrungen (Füllerbereich) sollte auch hier mit dieser zweistufigen Anordnung ein Opferkatalysator in einem mehrmonatigen Versuchszeitraum im KTL-Bereich erprobt werden. Dazu wurden in der ersten Stufe ein Metalloxidkatalysator (Bild 7.3.2-3, schwarzer Katalysator) und in der zweiten Stufe ein Edelmetallkatalysator (Bild 7.3.2-3, heller Katalysator) eingesetzt. **Tabelle 7.3.2-1** beinhaltet spezifische Versuchsdaten.

Katalysator	1. Lage Metalloxid: HC-801, Cu:Mn / 1:1.
	2. Lage Edelmetall: H1010, 1gPt/L.
Art und Maße	Würfel; 150 mm x 150 mm x 150 mm; 200 cpsi
Anzahl Würfel	2 + 2
Anzahl Lagen	2
Volumenstrom	200 m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /h
Raumgeschwindigkeit RG	15.000 h <sup>-1</sup>

Tabelle 7.3.2-1: Versuchsanlage KARLOS an der KTL-Linie, Halle 9

Wie bereits vermerkt, wurde die Versuchsanlage mit einem Teil des Reingases aus der TNV des KTL-Trockners betrieben. Um ein absolut repräsentatives Ergebnis zu erzielen, wäre es notwendig gewesen, die TNV bei abgesenkter Temperatur zu betreiben, zumal nur dann die Stoffe entstehen, die der (spätere) Vollstromkatalysator oxidieren muss. Gleichwohl lassen sich qualitative Erkenntnisse gewinnen. Weiter wird darauf hingewiesen, dass beim Betrieb der TNV hier mit 720 °C Brennkammertemperatur organisch gebundener Kohlenstoff mit dem FID praktisch nicht mehr detektierbar ist und allenfalls Kohlenstoffmonoxid als Restschadstoff anfällt.

**Bild 7.3.2-4** zeigt die Konzentrationsverläufe an Kohlenstoffmonoxid vor, zwischen und nach den Katalysatorlagen der Versuchsanlage KARLOS gleich nach der Versuchsanlageninbetriebnahme.

Auffällig ist, dass die CO-Konzentration zwischen den Katalysatorlagen rasch ansteigt (**Bild 7.3.2-4a**) und bereits in der zweiten Betriebswoche etwa die Eintrittskonzentration erreicht. Offenbar ist die erste Lage sehr schnell deaktiviert worden.



Bild 7.3.2-4a: Versuchsanlage KARLOS; Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, zwischen den Katalysatorlagen und im Reingas als Funktion der Zeit (14.11. - 20.11.2011)



Bild 7.3.2-4b: Versuchsanlage KARLOS; Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, zwischen den Katalysatorlagen und im Reingas als Funktion der Zeit (28.11. - 04.12.2011)

Dies gilt nicht für die zweite Katalysatorlage (Edelmetall). Auch mehr als ein halbes Jahr nach Implementation werden immer noch recht gute CO-Umsätze durchgängig größer 90% erreicht, wie aus **Bild 7.3.2-5** abzulesen ist. Insofern kann ein Nachlassen der Oxidationswirkung zumindest der Edelmetalllage noch nicht festgestellt werden.



Bild 7.3.2-5: Abhängigkeit des Umsatzes an Kohlenstoffmonoxid von der Katalysatorbetriebszeit (KTL-Trockner)

Weiter haben sich auf und in den Katalysatorwaben keine relevanten Beläge gebildet, die auf ein Plugging hindeuten könnten (**Bild 7.3.2-6**). Lediglich einige keramische Bruchstücke be-

finden sich auf der Anströmseite der ersten Katalysatorlage, deren Herkunft jedoch nicht den Abgasinhaltsstoffen zugeordnet werden kann.



Bild 7.3.2-6: Zustand der Katalysatorlagen nach Ende der Betriebszeit innerhalb der Versuchsanlage KARLOS. Blick auf die erste (links) und zweite (rechts) Katalysatorlage

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich offenbar Katalysatorgifte im Abgas befinden, hier wurde insbesondere Schwefel identifiziert (siehe auch Kapitel 7.4.4). Gleichwohl hat die zweite Katalysatorlage praktisch ohne Einbußen Kohlenstoffmonoxid abgebaut. Allerdings wurde die Versuchsanlage nicht mit dem später bei Absenkung der Reaktionstemperatur vorhandenen Abgas und den dann vorkommenden Schadstoffen betrieben. Endgültigen Aufschluss kann nur die versuchsweise Implementation einer Vollstromanlage erbringen, was jedoch im Rahmen des Vorhabens zeitlich nicht mehr realisiert werden konnte.

### 7.4 Katalysatoranalytik

Im Folgenden werden Ergebnisse der Katalysatoranalytik dargestellt, wobei das Ziel darin besteht, festzustellen, wie weit eine Deaktivierung der jeweiligen Katalysatorwaben fortgeschritten und durch welche Stoffe sie verursacht ist. Es wurde als zielführend erachtet, die genutzten Katalysatoren bei den Herstellern analysieren zu lassen, zumal dort eine Beurteilung des Zustandes mit Blick auf die ursprüngliche Ausrüstungsqualität am besten möglich ist. Auch stellte sich die Frage, ob die Möglichkeit besteht, bereits teildeaktivierte Katalysatoren durch Waschung oder nasschemische Aufarbeitung wieder in einem aktiveren Zustand (möglichst Neuzustand) zu versetzen.

### 7.4.1 Analysenergebnisse Decklack, Vollstrom

Grundsätzlich wurde im Rahmen der ersten Phase des Vorhabens anhand von Konzentrationsmessungen ein moderates Deaktivierungsrisiko für Decklackanlagen der Volkswagen AG in Wolfsburg festgestellt (siehe auch Abschnitt 7.5). Der Vollständigkeit halber werden nun noch Ergebnisse einer Katalysatoruntersuchung zur Vollstromanlage "Decklack 2, Strang 1" kurz darstellt. Der Katalysator ging (bei abgesenkter Reaktionstemperatur auf 540°C) im November 2008 in Betrieb, die folgende Untersuchung stammt aus dem Januar 2010 (ca. 13 Monate Betriebszeit) und wurde von der Süd Chemie AG, Bruckmühl (heute Clariant) durchgeführt. Das Katalysatorgehäuse war mit zwei Lagen ausgestattet des Typs EnviCat 2520 (Katalysatorauslegung siehe Bericht zur Phase 1 [SCJ11]). Die in diesem Zusammenhang erstellten EDX-Scans der Katalysatorenoberflächenproben weisen bereits deaktivierende Elemente auf. Zitat aus dem Untersuchungsbericht [SüC10a]: "Unter den Verunreinigungen entfällt der größte Teil auf SiO<sub>2</sub>. Unter den anionisch vorliegenden Elementen wurden P und S in signifikanten Mengen detektiert, beide sind als Katalysatorgifte bekannt. Die geringen Anteile Fe, Ti und Cu deuten auf Ablagerungen von Farbpigmentpartikeln hin".

Auch wurde die spezifische Oberfläche (BET-Methode) der vorderen der beiden Lagen bestimmt. Unter Bezugnahme auf den frischen Vergleichswert für den Katalysator von 16,5 m<sup>2</sup>/g wurden 9,6 g/m<sup>2</sup> ermittelt. Demnach ergibt sich eine Abnahme von etwa 42 %. Gleichwohl war zu verzeichnen, dass der Katalysator insgesamt noch ohne Einbußen oxidierte, so dass eine erhebliche Restlaufzeit verblieben ist (siehe hierzu auch Abschnitt 7.5).

#### 7.4.2 Analysenergebnisse Füller, Vollstrom

Die Analysenergebnisse zu installierten Vollstromanlagen im Füllerbereich beziehen sich auf Berichte der Fa. Süd-Chemie [SüC10b; SüC11; Cla12]. Untersucht wurde die Linie "Füller 2, Strang 1", die mit

- einer Opferlage (Wabe EnviCat 1520)
- zwei Edelmetallagen (Wabe EnviCat 2520)

bestückt war. Der Vollständigkeit halber wird vermerkt, dass der Opferkatalysator vorgeschaltet wurde, um bewusst deaktivierende Bestandteile dort zu oxidieren und die nachfolgenden Edelmetallkatalysatoren als Feinreinigungssystem nutzen zu können.



Bild 7.4.2-1: Oberflächenverlust<sup>3</sup> und deaktivierende Elemente<sup>4</sup>, Füller 2, Strang 1, Mai 2010

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> BET-Methode (N<sub>2</sub>-Absorption bei 78 K);

**Bild 7.4.2-1** zeigt den Oberflächenverlust der jeweiligen Lagen und die im Januar 2010 (nach einer Laufzeit von etwa 11 Monaten) detektierten Bestandteile, die als deaktivierende Elemente anzusehen sind. Es wird deutlich, dass offenbar erhebliche Anteile an Silizium im Abgas vorhanden sind, ebenso Phosphor, Schwefel und Zinn. Insofern ist verständlich, dass der Oberflächenverlust insbesondere der ersten Lage beträchtlich ist. Aber auch die zweite Lage weist schon eine deutlich Belegung auf, während die dritte Lage bezüglich der Oberfläche praktisch im ursprünglichen Zustand erhalten geblieben ist.

Bemerkenswert ist, dass Schwefel in besonders hohen Anteilen in der zweiten Edelmetalllage (also in der 3. Lage) detektiert worden ist. Offenbar handelt es sich um Verbindungen im Abgas, die längere Verweildauern im Katalysator benötigen bzw. relativ schwer bei der eingestellten Katalysatortemperatur oxidieren. Eine weitere Analyse an Katalysatoren derselben Lagen im April 2011 nach etwa 22 Monaten Betrieb bestätigt das Ergebnis der fortschreitenden Deaktivierung (auch aufgrund derselben kritischen Elemente [SüC11]), so dass ein Katalysatorenaustausch absehbar ist (in Abhängigkeit der erzielten Reingaswerte; siehe hierzu auch Abschnitt 7.5). Zu diesem Zeitpunkt waren die Katalysatoren jedoch grundsätzlich noch funktionsfähig, wie der Hersteller bestätigte.

Im Zuge des Austausches der Katalysatoren ist dann der Versuch unternommen worden, eine Regeneration durch Ausblasung und Waschung durchzuführen. Dies erfolgte bei der Firma Ebinger, die sich allerdings auf die Regeneration von DENOX-Katalysatoren spezialisiert hat. Eine anschließende Analyse der Firma Clariant vom 09.10.2012 [Cla12] hat gezeigt, dass die Regeneration nicht zielführend war. Die Oberfläche der Katalysatoren war verhältnismäßig gering im Vergleich zur Erstausrüstungsqualität, wobei für die Edellmetallwabe " von einem Washcoatverlust auszugehen wäre, da Si/Al-Verhältnisse um 0,5....1 auf eine Beprobung von Cordierit (also des Trägermaterials) hindeuten. Insgesamt lassen die Analysenergebnisse erwarten, dass die Ausgangsperformance nicht wieder erreicht wird".

### 7.4.3 Analysenergebnisse Füller, Versuchsanlage

Weiter sind die Katalysatoren aus den beiden Versuchsanlagen analysiert worden [SüC09; Her10]. Es handelte sich um einen Edelmetallkatalysator von Fa. Süd-Chemie Typ EnviCat 2520 CH (150x150x150)mm<sup>3</sup> mit einer Platindotierung von 1 g/L und einem Opferkatalysator gleicher Abmessungen der Firma Heraeus, allerdings mit Metalloxid-Aktivkomponenten im Washcoat mit einem Verhältnis Cu : Mn von 1 : 1.

Der Edelmetallkatalysator zeigte nach etwa neunmonatigem Versuchsbetrieb eine verminderte Leistungsfähigkeit, was einerseits insbesondere auf die deaktivierenden Elemente Silizium und Schwefel zurückzuführen war und andererseits auf die Oberflächenabnahme von etwa 30 %. Er ist dann einem Reinigungsversuch unterzogen worden [SüC09]

- Waschen im Ultraschallbad mit VE-Wasser für 15 Minuten
- Trocknung bei 120 ℃.

Es zeigte sich, "dass der Reinigungsvorgang erstens hauptsächlich Washcoat und Aktivkomponente abgelöst hat und zweitens, dass sehr wahrscheinlich eine thermische Schädigung des Katalysators vorliegt". (Hinweis: Der Katalysator wurde innerhalb der zugehörigen Tempe-

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Elektronenstrahl – Mikrosonde (EDX), Bruker und Rasterelektronenmikroskop Typ LED 1539, Zeiss

raturspezifikation des Herstellers betrieben). Die Analyse der spezifischen Oberfläche hat dann einen weiteren Rückgang von ca. 22 % ergeben [SüC09], so dass eine Aufarbeitung des Katalysators durch Waschen offensichtlich nicht zielführend ist.

#### 7.4.4 Analysenergebnisse KTL, Versuchsanlage

Um die Deaktivierungsneigung an KTL-Trocknern zu untersuchen, wurde eine der verfügbaren Versuchsanlagen (Versuchsanlage KARLOS, siehe Bericht zu Phase 1 des Vorhabens [SCJ11]) in Betrieb gesetzt. Für die Untersuchungen wurden schichtweise eingesetzt:

- eine Lage Katalysatoren (150 x 150 x 150) mm<sup>3</sup> (200cpi) mit einem metalloxidischen Washcoat (Kupfer/Mangan) auf Cordierit der Firma Heraeus
- eine Lage Katalysatoren (Geometrie wie oben) mit Platinwashcoat (1 g/L) auf Cordierit der Firma Heraeus

Schon nach wenigen Wochen zeigte sich eine deutliche Deaktivierung der ersten Katalysatorlage, so dass eine Analyse beim Hersteller angefordert wurde. Es wurden die Gifte Schwefel, Phosphor und Calcium detektiert, ob sich auch Silizium darunter befunden hat, konnte nicht festgestellt werden [Her12a]. Ebenso war eine Abnahme der Katalysatoroberfläche um mindestens 50 % festgestellt worden. Eine weitere Analyse etwa 6 Monate später bestätigte das Ergebnis aus der ersten Analyse. Wenngleich der Katalysatorhersteller mitteilte, dass die benannten Verunreinigungen in der Opferlage (1. Lage) im Vergleich zur Platinlage (2. Lage) deutlich größer sind und der gewählte Aufbau offenbar seine Berechtigung hat [Her12b], muss grundsätzlich die Frage gestellt werden, ob für KTL-Trockner die Katalysatorentechnik das Verfahren der Wahl ist, weil schon nach extrem kurzer Zeit eine beträchtliche Deaktivierung der Opferlage eingetreten ist. Endgültigen Aufschluss kann nur die Implementation einer Vollstromanlage bringen.

#### 7.5 Betriebserfahrungen mit Vollstromanlagen

Insgesamt sind während der Laufzeit des Gesamtvorhabens 23 Vollstromanlagen durch Volkswagen implementiert worden. 18 konnten im Rahmen des Vorhabens während ihrer bisherigen Laufzeit messtechnisch begleitet werden, wobei neben Abluftmengenströmen und Katalysatortemperaturen insbesondere die Konzentrationen

- an Kohlenstoffmonoxid
- an organisch gebundenem Kohlenstoff (Gesamtkohlenstoff, FID)

im Vordergrund standen.

Geht man von einer mittleren Erdgaseinsparung von etwa 30% (40% Decklack und UBS; 20% Füller), einem mittleren Abluftmengenstrom von ca. 10.000 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/h aus, erhält man eine Einsparung von ca. 300 kW an Erdgas je Anlage, also insgesamt 6,9 MW an Erdgas, was bei einem Erdgaspreis von 3,5 €Cent je kWh Kosteneinsparungen von 241,50 €/h bzw. bei 6.500 Jahresbetriebsstunden 1.569.750 €/a entspricht. Für die Wiederbeschaffung, den Ausbau der alten und die Einbringung einer neuen Katalysatorfüllung können derzeit etwa 65.000 € (3 Katalysatorlagen: 1 Opferlage, Metalloxid und 2 Oxidationslagen, Edelmetall Platin) veranschlagt werden, so dass insgesamt Kosten in Höhe von 1.495.000 € entstehen würden. Somit beträgt die mittlere, überschlägige Amortisationszeit 0,95 Jahre.<sup>5</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Der (zusätzliche) Druckverlust durch den Katalysator wird etwa kompensiert durch niedrigere Druckverluste in der TNV als Folge der Temperaturabsenkung.

Bezüglich der nicht erfolgten Kohlenstoffdioxidemissionen errechnet sich ein Wert in Höhe von ca. 1,4 t/h (0,202 kg  $CO_2$  je kWh Erdgas, bezogen auf Erdgas H [Ce88]) bzw. 9.100 t/a.

Die vorstehenden Betrachtungen sind insofern bedeutsam, weil grundsätzlich – wie dargelegt – mit einer Deaktivierung der Katalysatoren zu rechnen ist. Dieser Problematik sollen sich die weiteren Betrachtungen in diesem Kapitel zunächst widmen. Abschließend wird aufgezeigt, dass auch der apparative Aufbau, der den Anschein erweckt, sehr einfach zu sein, eine Reihe von konstruktiven Herausforderungen beinhaltet, denen der Anlagen- bzw. Apparatebauer begegnen muss.

#### 7.5.1 Messtechnische Untersuchungen an Vollstromanlagen (9/2011)

**Tabelle 7.5.1-1** vermittelt einen Überblick zu den während der Messkampagne August/September 2011 erhaltenen Ergebnissen. Demnach erstrecken sich die Untersuchungen über

- 3 UBS-Linien
- 6 Füller-Linien und
- 9 Decklacklinien

Tabelle 7.5.1-1: Überblick zu den an Vollstromanlagen im Zeitraum August / September 2011 erhaltenen Messdaten (Unten: Katalysatorampel)

		Beginn der Messung	Ende der Messung	Zeitpunkt der Erstinstallation	Konzentrationen CO			Konzentrationen Org. C		
Anlage	Kürzel				Rohgas	ZWG	Reingas	Rohgas	ZWG	Reingas
					mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
UBS 1	UBS1	30.08.2011 13:47:21	31.08.2011 10:30:01	1/2010	126,0	3,8	6,8	113,4	12,5	7,4
UBS 2	UBS2	31.08.2011 11:34:21	31.08.2011 12:56:41	1/2010	179,3	2,4	2,8	132,9	12,4	7,8
UBS 3	UBS3	31.08.2011 13:25:01	31.08.2011 14:33:21	1/2010	189,7	5,1	2,8	99,1	10,2	4,0
Füller 1 Str.1	FÜ1STR1	02.09.2011 13:05:01	03.09.2011 09:46:21	1/2010	323,5	241,8	263,0	137,8	128,8	82,4
Füller 1 Str.2	FÜ1STR2	02.09.2011 11:15:41	02.09.2011 12:36:21	1/2010	348,2	315,9	50,9	60,7	53,3	10,1
Füller 2 Str.1	FÜ2STR1	01.09.2011 14:31:21	02.09.2011 10:32:01	7/2009	400,1	393,7	386,9	97,8	93,6	85,0
Füller 2 Str.2	FÜ2STR2	01.09.2011 12:33:41	01.09.2011 14:02:21	1/2010	557,5	571,2	219,2	129,0	109,2	69,7
Füller 3 Str. 1	FÜ3STR1	01.09.2011 10:51:01	01.09.2011 12:29:41	1/2010	566,6	120,6	5,2	157,0	55,8	38,3
Füller 3 Str.2	FÜ3STR2	31.08.2011 15:40:01	01.09.2011 10:36:01	1/2010	240,4	185,0	4,6	89,6	40,5	3,0
Decklack 1 Str.1	DL1STR1	05.09.2011 12:11:01	05.09.2011 13:43:21	1/2010	101,5	11,1	2,6	210,7	58,2	5,0
Decklack 1 Str.2	DL1STR2	05.09.2011 13:56:21	05.09.2011 15:43:41	1/2010	85,7	29,6	3,3	157,0	78,7	7,7
Decklack 2 Str.1	DL2STR1	06.09.2011 04:30:41	06.09.2011 10:36:21	11/2008	168,0	156,0	26,7	194,3	162,7	40,8
Decklack 2 Str.2	DL2STR2	06.09.2011 11:06:21	06.09.2011 12:28:21	1/2010	139,2	78,7	2,4	214,8	129,5	6,5
Decklack 3 Str.1	DL3STR1	07.09.2011 00:45:01	07.09.2011 02:54:21	1/2010	66,8	6,3	2,1	126,9	29,1	2,1
Decklack 4 Str.1	DL4STR1	08.09.2011 11:20:01	08.09.2011 13:20:21	1/2010	70,7	21,2	4,1	172,5	92,2	10,4
Decklack 4 Str.2	DL4STR2	07.09.2011 16:46:01	08.09.2011 10:59:41	1/2010	63,4	13,0	2,2	106,3	47,1	4,2
Decklack 5 Str. 1	DL5STR1	07.09.2011 14:27:21	07.09.2011 16:31:41	1/2010	78,3	1,8	2,0	171,2	14,3	3,3
Decklack 5 Str. 2	DL5STR2	07.09.2011 12:26:41	07.09.2011 14:11:41	1/2010	113,1	5,6	0,9	264,7	21,1	1,6
weiterfahren		beobachten	demnä	chst austauschen			austauschen			

Dabei wird deutlich, dass zumindest eine zeitlich periodische Eigenüberwachung des oxidativen Umsatzes im Katalysator notwendig ist, damit erhöhte Emissionen grundsätzlich vermieden werden. In diesem Zusammenhang wird vermerkt, dass der (derzeitige) gesetzliche Grenzwert für katalytische Abgasreinigungs- bzw. Nachverbrennungsanlagen (und um eine solche handelt es sich nach Absenkung des Brennkammertemperaturniveaus und der Implementation einer katalytischen Stufe) gemäß Ziffer 5.2.4 "Gasförmige anorganische Stoffe" für Kohlenstoffmonoxid 0,10 g/m<sup>3</sup> beträgt [TAL02]:

"...Im Abgas von thermischen oder katalytischen Nachverbrennungseinrichtungen dürfen die Emissionen an Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid, die Massenkonzentration 0,10 g/m<sup>3</sup> nicht überschreiten; gleichzeitig dürfen die Emissionen an Kohlenmonoxid die Massenkonzentration 0,10 g/m<sup>3</sup> nicht überschreiten. ..."

Im Fall der Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff wird (auch gemäß einer Entscheidung des Länderausschusses Immissionsschutz LAI) auf den allgemeinen Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> unter Ziffer 5.2.5 TA Luft verwiesen [TAL02]: "...Organische Stoffe im Abgas, ausgenommen staubförmige organische Stoffe, dürfen den Massenstrom 0,50 kg/h oder die Massenkonzentration 50 mg/m<sup>3</sup>, jeweils angegeben als Gesamtkohlenstoff, insgesamt nicht überschreiten. ..."

Lediglich "bei Anwendung von Abgasreinigungseinrichtungen mit thermischer Nachverbrennung" wird in der 31. BImSchV ein Emissionsgrenzwert von 20 mg/m<sup>3</sup> gefordert.

Das Erreichen einer Emissionsbegrenzung für katalytische Nachverbrennungsanlagen von 50 mg/m<sup>3</sup> am Ende eines Katalysatorlebenszyklus bedeutet, dass im zeitlichen Mittel eine weitaus niedrigere Emissionskonzentration zu verzeichnen ist wie **Bild 7.5.1-1** zeigt.



Bild 7.5.1-1: Verlauf der Reingaskonzentration nach Katalysator der Anlage Decklack 2, Strang 1 als Funktion der Zeit (Basis: ausgewählte, repräsentative Daten aus Bild 7.3.3-7 des Berichtes zu Phase 1 und Tabelle 7.5.1-1)

Bildet man einen zeitlichen Mittelwert über die Funktionen für CO und org. C in Bild 7.5.1-1 erhält man:

- Durchschnittswert org. C: ca. 11 mg/m<sup>3</sup>
- Durchschnittswert CO: ca. 7 mg/m<sup>3</sup>

Die während der Katalysatorlaufzeit von etwa 2,7 Jahren ermittelten, durchschnittlichen Konzentrationswerte im Reingas unterschreiten die Grenzwerte deutlich. Darüber hinaus fällt auf, dass die Konzentrationen an Kohlenstoffmonoxid im Reingas fast durchgehend unterhalb derer von organisch gebundenem Kohlenstoff liegen, im Gegensatz zu thermischen Nachverbrennungsanlagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Kohlenstoffmonoxid für eine Oxidation zu Kohlenstoffdioxid i.A. niedrigere Aktivierungsenergien benötigt als organische, gasförmige Substanzen.

Wieder Bezug nehmend auf Tabelle 7.5.1-1 kommt der mit ZWG oder als Zwischengas bezeichneten Spalte mit Blick auf einen Katalysatorwechsel besondere Bedeutung zu. Es werden drei Beispiele zum Zweck des Vergleiches betrachtet:

• UBS 3

- Füller 1, Strang 2
- Füller 2, Strang 1

Weiter werden Abbaugrade  $\eta$  definiert

$\eta_{0+1}$	=	(C <sub>Rohgas</sub> – C <sub>ZWG</sub> ) / C <sub>Rohgas</sub>	(1)
$\eta_2$	=	(C <sub>ZWG</sub> - C <sub>Reingas</sub> ) / C <sub>Rohaas</sub>	(2)

$$\eta_{\text{Ges}} = \eta_{0+1} + \eta_2$$
 (3)

mit Index 0 + 1: Opferschicht und 1. Lage Index 2: 2. Lage

**Bild 7.5.1-2** zeigt die Daten der Beispielfälle in grafischer Aufarbeitung. Links ist der CO-Abbau, rechts der org. C-Abbau dargestellt.



Bild 7.5.1-2: Beispielhafter Vergleich des Abbaus von org. C und CO an den Vollstromanlagen UBS 3, FÜ1STR2 und FÜ2STR1

Die UBS 3-Linie charakterisiert den Idealzustand: Sowohl CO als auch org. C werden in der 1. und 2. Lage im Wesentlichen abgebaut, die 3. Lage dient der sogenannten Feinreinigung, der Gesamtwirkungsgrad des Abbaus beträgt nahezu 100%. Im Fall von FÜ1STR2 sind die ersten beiden Lagen weniger aktiv, die Hauptlast des Abbaus liegt auf der 3. Lage, c<sub>ZWG</sub> nähert sich bereits der Rohgaskonzentration, während der Abbau in der 3. Lage als noch gut zu bezeichnen ist. Die Linie FÜ2STR1 steht für einen praktisch vollständig deaktivierten Katalysator, der org. C-Abbau beträgt gerade noch 12%, so dass ein Austausch bereits hätte erfolgen sollen. Auch diese Ergebnisse unterstreichen einmal mehr die Notwendigkeit einer (zumindest) zeitlich periodischen Überwachung der Reingaswerte, eine (zu entwickelnde) einfache und preisgünstige Messtechnik für CO und org. C wäre wünschenswert (siehe auch Kapitel 7.6.2).

Der Vollständigkeit wird noch auf die Bilder A-7.5.1-1 bis A-7.5.1-6 im Anhang verwiesen, wobei die zeitliche Auflösung differieren kann. Es wird u.a. deutlich, dass

- die org. C-Rohgaskonzentrationsspitzen im Füller am höchsten sind, dies gilt ebenso für CO und sich diese in stark gedämpfter Form auch im Reingas wiederfinden.
- je nach Reaktionsverlauf im Brenner die CO- bzw. org. C-Konzentrationen dominieren.
- teilweise auch beladungsschwächere Zeiten mit in die Mittelwertbildung eingeflossen sind, was jedoch dem bestimmungsgemäßen Betrieb im Sinne des BImSchG entspricht.

#### 7.5.2 Messtechnische Untersuchungen an Füller-Vollstromanlagen (7/2012)

Einerseits haben sich die Füllerlinien im Hinblick auf eine Deaktivierung als besonders empfindlich erwiesen, andererseits sind faserförmige Beläge auf der Anströmseite gemäß **Bild 7.5.2-1** festgestellt worden, deren Herkunft allerdings nicht zweifelsfrei feststellbar war. Denkbar wären vermehrte siliziumorganische Verbindungen im Abgas oder Rückstände, die im Zuge von Wartungsarbeiten innerhalb der gasführenden Rohrleitungen verblieben sind und hier abgeschieden wurden. Beide Phänomene wurden zum Anlass genommen, eine erneute Überprüfung der Katalysatorperformance vorzunehmen.



Bild 7.5.2-1: Ablagerungen auf Katalysatoren an Füllerlinie 3, Strang 1

Eine relevante Verringerung der Abgasvolumenströme konnte dabei nicht festgestellt werden. Bevor jedoch erneute Messungen der CO- sowie org. C-Gehalte vorgenommen wurden, sind die Katalysatoren ausgebaut, gereinigt und wieder eingebaut worden. Vorab wird vermerkt, dass aufgrund der nachlassenden Oxidationswirkung der Katalysatoren die Reaktionstemperaturen der TNV-Kompaktgeräte angehoben wurden, um somit auch höhere Katalysatoreintrittstemperaturen (z.B. Füller 3, Strang 1: 500 °C) zu erzeugen und den Umsatz im Katalysator zu erhöhen. Hierdurch verändern sich auch die Katalysatoreintrittsbedingungen im Hinblick auf CO (ggf. etwas höher) und org. C (ggf. etwas niedriger), was auf die Ausbrandcharakteristik der TNV zurückzuführen ist.

**Bild 7.5.2-2** gibt einen Überblick der Konzentrationsmessungen am 09.07.2012 wieder. Dargestellt sind jeweils die Rohgaskonzentrationen und nacheinander die Reingaskonzentrationen hinter den drei Katalysatorstufen für die Parameter CO und org. C sowie die zugehörigen Umsätze (Füller 3, Strang 1).

Es wird ersichtlich, dass die Katalysatoren der Lagen 1 und 2 kein CO mehr abbauen und der Umsatz hinsichtlich org. C unterhalb von 40% ausfällt. Im Reingas nach Katalysator 3 ist ein Abbau zu verzeichnen, allerdings ergeben sich CO-Konzentrationen deutlich höher als 0,10 g/m<sup>3</sup>. Die Konzentrationen an org. C liegen unterhalb von 35 mg/m<sup>3</sup>.



Bild 7.5.2-2: Füller 3, Strang 1, Roh.- und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysatoreintrittstemperatur

Auffällig ist jedoch, dass z.B. der Konzentrationsverlauf von CO während der Überprüfung von KAT3 (bzw. der 3. Lage) einen relativ zum Reingaswert gleichförmigen Verlauf nimmt. Der Reingaswert und damit auch der CO-Umsatz schwankt beträchtlich. Dies betrifft allerdings ausschließlich die 3. Katalysatorlage, die einen noch relevanten Umsatz bringt, ansonsten wäre dieses Phänomen nicht feststellbar. Es ist zu vermuten, dass (zumindest) die 3. Katalysatorlage lokale Bypässe aufweist und somit Strähnen unterschiedlicher Konzentrationen hervorruft. Hierzu gibt eine Vermessung des Katalysatorquerschnitts Aufschluss. **Bild 7.5.2-3** zeigt die Konzentrationsverläufe. Es wird deutlich, dass wiederum die Rohgaskonzentration z. B. an CO gleichförmig verläuft, während die Reingaskonzentration beträchtlich schwankt. Bezüglich org. C erscheinen im ersten Moment auch die Reingaswerte gleichförmiger zu verlaufen, was jedoch dem gewählten Maßstab geschuldet ist. Die Umsätze von CO <u>und</u> org. C weisen denselben schwankenden Verlauf auf, so dass von Katalysatorbypässen auszugehen ist, die im Rahmen einer erneuten Revision zu detektieren und zu beseitigen wären.

Hier wird eine besondere konstruktive Problematik des Katalysatorapparates deutlich: Während im Neuzustand dieses Phänomen offensichtlich nicht auftrat, ergeben sich als Folge von Dehnungswechseln (Temperaturwechseln), Verschiebungen, nachlassender Elastizität von Dichtungen etc. im Laufe der Zeit Bypässe, die die Wirkung des Katalysators konterkarieren.

Die Vermessungen der übrigen Füllerlinien lieferten keine weiteren Erkenntnisse zur Performance der Katalysatoren. Auch dort wäre – wie in Füllerlinie 3, Strang 1 – ein Katalysatoraustausch bereits notwendig gewesen.



09.07.2012, 16:40-17:55 Uhr

Bild 7.5.2-3: Füller 3, Strang 1, Querschnittsmessung nach 3. Katalysatorlage, Roh- und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysatoreintrittstemperatur

#### 7.5.3 Konstruktive Hinweise zur Ausführung von Vollstromanlagen

Den prinzipiell gewählten Aufbau einer Katalysatorlage zeigt Bild 7.5.3-1.



Bild 7.5.3-1: Aufbau einer Katalysatorlage (Prinzip)
In ein Stahlgehäuse mit quadratischem Querschnitt sind Winkelstahlprofile eingeschweißt, die den seitlichen Einschub von Katalysatorelementen ermöglichen. Jeweils vier keramische Wabenkörper sind in einem "Can" zusammengefasst. Die einzelnen Cans berühren sich gegenseitig, eine Fixierung findet nur durch den äußeren Rahmen statt, untereinander sind die Cans nicht verbunden, um die versperrte Durchströmungsfläche so gering wie möglich zu gestalten. Vom Grundsatz her bergen derartige Konstruktionen folgende Problemkreise in sich:

- Dauerelastische Dichtungen bei Temperaturwechseln im Bereich von (0...500)℃ in Verbindung mit verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Keramikwaben und Stahl sind nur sehr eingeschränkt verfügbar. Hieraus resultieren nach einer Reihe von Lastwechseln sich öffnende Spalte, die ggf. Rohgas-Reingas-Kurzschlüsse nach sich ziehen und zu den bereits im vorangegangenen Abschnitt registrierten Phänomenen führen.
- Die Gewährleistung der mechanischen Stabilität der gesamten Katalysatorlage, ohne den einfachen Ausbau und Wiedereinbau (Katalysatorwechsel) zu behindern und durch stabilisierende Elemente nicht zu viel Anströmfläche verloren gehen zu lassen (Versperrung von Wabenkörperkanälen bei gleichzeitiger Erhöhung der Raumgeschwindigkeit in einem gleichbleibenden Gesamtquerschnitt).

Im Einzelnen sind vornehmlich betroffen:

- Dichtung der Katalysatorwaben gegeneinander
- Spaltbildung zwischen Wabenkörpern und Can als Folge unterschiedlicher thermischer Ausdehnung
- Dichtung der Cans gegeneinander
- Abdichtung der Cans gegen die Tür zur Gehäuseöffnung
- Verwindungssteifigkeit des Gehäuses, so dass zwischen Rahmenkonstruktion und Cans keine Spalte entstehen

### 7.5.4 Fazit Vollstromanlagen

Die vorstehend beschriebenen Erkenntnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Temperaturabsenkung innerhalb einer TNV in diesem Anwendungsfeld zur Einstellung des sogenannten Wärmegleichgewichts und die Nachrüstung einer katalytischen Stufe stellen eine grundsätzlich geeignete Maßnahme dar.
- Mit einer Katalysatordeaktivierung ist prinzipiell zu rechnen. Ihr Fortschreiten hängt jeweils von der Art und der Konzentration der Katalysatorgifte ab. An Vollstromanlagen der VW AG am Standort Wolfsburg wurden folgende Deaktivierungsrisiken bzw. Katalysatorstandzeiten<sup>6</sup> ermittelt:

Decklack	moderat	(3 Jahre)
UBS:	eher gering	(3 bis 4 Jahre)
Füller:	höher	(1,5 bis 2 Jahre)
KTL:	höher	(noch nicht abschließend bewertbar)7

 $<sup>\</sup>frac{6}{2}$  Die Daten beziehen sich auf die spezifische Situation der Produktion am gewählten Standort.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Die Katalysatorperformance ist – wie bereits vermerkt – bislang ausschließlich innerhalb einer Versuchsanlage im Bypassbe-trieb und bei "normaler" TNV-Betriebstemperatur (TNV-Temperatur <u>nicht</u> abgesenkt) ermittelt worden. Relevante org. C-Konzentrationen waren im Rohgas der Versuchsanlage – also hinter TNV – nicht anzutreffen, die CO-Konzentrationen beträcht-lich. Für eine endgültige Aussage hätte die TNV-Temperatur dauerhaft abgesenkt sein müssen, so dass der Katalysator auch die Crackverbindungen aus der TNV abbauen muss. Eine abschließende, belastbare Beurteilung ist daher erst nach Implementation einer Vollstromanlage und dem Betrieb bei abgesenkter TNV-Temperatur realistisch mödlich einer Vollstromanlage und dem Betrieb bei abgesenkter TNV-Temperatur realistisch möglich.

- Das Deaktivierungsrisiko erzwingt zumindest die zeitlich periodische Überprüfung der Oxidationsfunktion bezüglich org. C und Kohlenstoffmonoxid. Hinweise für einen Katalysatorwechsel können Messdaten bei 3-Lagensystemen (1 Opferkat, 2 Hauptlagen) zwischen den beiden Hauptlagen erbringen.
- Neue Lacksysteme sind auf Katalysatortauglichkeit hin zu überprüfen.
- Der ordnungsgemäße Einsatz des untersuchten Technologieansatzes beinhaltet folgende Vorteile:
  - > Einsparung an Erdgas und damit Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes
  - > Niedrige Emissionswerte im zeitlichen Mittel
  - > Relativ kurze Amortisationszeiten
  - > Deutliche Verlängerung der TNV-Laufzeiten durch niedrigere Temperaturen
  - > Jederzeitige Rückkehr in den thermischen Betriebsmodus möglich

In diesem Zusammenhang wird darauf verwiesen, dass aus diesem Vorhaben ein weiteres hervorgegangen ist [Zim10], das sich die lastabhängige Abluftvolumenstromreduzierung zum Ziel gesetzt hat. Es handelt sich um einen regelungstechnischen Ansatz, der mit der hier entwickelten Technologie ohne weiteres kompatibel ist und zu einer weiteren, deutlichen Erdgaseinsparung führt.

### 7.6 Überwachung der Reingaskonzentrationen

Im Rahmen der vorgenannten Ausführungen ist deutlich geworden, dass im Zuge der Zeit die Katalysatoren einer Deaktivierung unterworfen sind. Insofern stellt sich die Frage zu deren Überwachung bzw. zur Ermittlung des Zeitpunktes für einen Austausch. Auch wird diese Thematik von der jeweils überwachenden Behörde angesprochen. Wie die benannte Problematik bei den bereits implementierten Vollstromanlagen in Wolfsburg gelöst werden soll, wird im folgenden Kapitel 7.6.1 erläutert. Im nachfolgenden Abschnitt 7.6.2 findet sich ein Lösungsansatz für eine betriebstechnische Überwachung gleichzeitig des Kohlenstoffmonoxidgehaltes und der Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff, so dass eine preisgünstige Alternative zu herkömmlicher Messtechnik geschaffen werden könnte. Schließlich ist ein Formularansatz entwickelt worden, der begleitend den Zustand der Katalysatoren dokumentiert (Abschnitt 7.6.3).

### 7.6.1 Summarische Erfassung der Qualität des Reingases

Die Führung des Reingases aus den thermischen Nachverbrennungsanlagen bei Volkswagen ist derart vorgenommen, dass mehrere Linien an einen Kamin angeschlossen sind. Insofern ist eine vereinfachte gemeinsame Überwachung mehrerer Linien möglich, indem an den Kaminen jeweils eine Messtechnik (org. geb. Kohlenstoff, Kohlenstoffmonoxid) implementiert wird. Damit ist der Notwendigkeit einer behördlichen, kontinuierlichen Überwachung genüge getan, das Einhalten der Emissionswerte wird registriert und ggf. über die EFÜ (Elektronische Fern-Überwachung) als Vollzugswert an die zuständige Behörde übermittelt. Sollte sich die gemessene Emissionskonzentration einem definierten Schwellwert (unterhalb der Emissionsbegrenzung) nähern, müssten Maßnahmen eingeleitet werden, die ein weiteres Ansteigen der Reingaskonzentration verhindern. Dann ist bzw. sind diejenigen Linien zu identifizieren, die dazu maßgeblich beiträgt bzw. beitragen. Hierzu kann eine punktuelle Messung mit mobiler Messtechnik dienen, wobei die Ergebnisse dokumentiert werden (Abschnitt 7.6.3) und Kataly-

satorersatz ggf. veranlasst wird oder eine preiswerte, ortsfeste Messtechnik an jede katalytische Stufe ggf. auch mit periodischer Umschaltung zwischen den Lagen – implementiert wird.

#### 7.6.2 Lösungsansatz für eine kontinuierliche, betriebstechnische Überwachung

Auf der Suche nach einer vereinfachten, betriebstechnischen Überwachung der Funktion der Katalysatoren wurde der Kontakt zur Firma WT SYSCO GmbH in Wardenburg aufgenommen, die zwischenzeitlich über eine prototypische, ursprünglich für die Detektion des Sauerstoffs in Abgasen entwickelte Sonde verfügt, die offenbar Gehalte brennbarer Substanzen erkennen kann. Dies wird erreicht, indem zusätzlich Platin in der Messzelle appliziert wurde. Im Rahmen eines mehrmonatigen Versuchs ist die grundsätzliche Eignung an einer Unterbodenschutzlinie untersucht worden. **Bild 7.6.2-1** gibt einen (kleinen) Ausschnitt der gefahrenen Messreihen wieder.



VW, WOB; Halle 15b; UBS 3, Rohgas zur Katalyse; 4.11.2011 Vergleich WT SYSCO u. kontin. Messtechnik (org. C, FID u. CO)



Bild 7.6.2-1: Vergleich der mit konventioneller Messtechnik ermittelten Konzentrationsverläufe an CO und org. C mit dem Ausgangssignal der WT SYSCO-Sonde

Die mit konventioneller Messtechnik gewonnenen Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff ( $\Sigma$  org. C, blau) und Kohlenstoffmonoxid (CO, schwarz) sind als Funktion der Zeit aufge-

tragen, die Signale der Sonde von WT SYSCO in Rot (COe). Die Abkürzung MW steht für Mess-Wert, es wird zunächst die obere Abbildung betrachtet.

Im Zeitraum 4.11.11, 0:00 Uhr bis 4.11.11 etwa 14:00 Uhr wird offensichtlich ein Teil des Signals der WT SYSCO-Sonde unten abgeschnitten, die Verläufe der org. C- und CO-Konzentrationen finden sich nicht vollständig wieder. Dies gab die Veranlassung für eine Neuanpassung des Offsets des Messsignals. Danach wird sowohl der Verlauf der CO- als auch der org. C-Konzentration zumindest qualitativ richtig wiedergegeben. Dies bestätigt die Spreizung des Zeitfensters am 4.11.2011 von 17:30 Uhr bis 23:30 Uhr in der unteren Abbildung von Bild 7.6.2-1.

Grundsätzlich könnte eine derartige, vereinfachte Überwachung zielführend arbeiten, allerdings basiert die damit gewonnene Aussage prinzipiell auf einem bestimmten Verhältnis von CO : org. C. Falls dieses – wie beispielsweise anhand von Bild 7.3.2-4 aus dem Bericht zur Phase 1 des Vorhabens [SCJ11] ansatzweise deutlich wird – durch den Katalysator einer Veränderung unterzogen ist, besteht der Wunsch nach einer Separierung des Signals in CO und org. C. Hierzu wurden Überlegungen angestellt, auch erste Ansätze entwickelt, die jedoch einer weiteren Validierung – ggf. im Rahmen eines separaten Vorhabens – unterzogen werden müssen. Eine solche Messtechnik könnte dann auch für die betriebstechnische kontinuierliche Überwachung von insbesondere TNV-, RNV- und KNV-Anlagen interessant sein, deren Funktion heute nur anhand der Reaktionstemperatur festgemacht wird, die naturgemäß interne Bypässe oder Ähnliches nicht berücksichtigen kann.

### 7.6.3 Eigenüberwachung CO- und org. C-Konzentrationen; Katalysatorformular

Im Anhang (**Tabellen A 7.6.3-1** bis **A 7.6.3-3**) findet sich ein Vorschlag für die Dokumentation einer Katalysatorüberwachung, die auf punktuellen Überprüfungsmessungen der Katalysatorfunktion beruht. Zunächst (Tabelle A 7.6.3-1) werden die Produktionslinien bezeichnet, der Ort definiert und Verfahrensangaben gemacht. Es folgt die Beschreibung der eingebauten Katalysatoren, wobei Änderungen (partielle oder vollständige Neubestückung) in weiteren Tabellen dokumentiert werden, so dass die "Historie" der Katalysatoranlage jederzeit nachzuvollziehen ist. Eine Skizze zum prinzipiellen Aufbau ruft die Anordnung der Katalysatorlagen (RG1 bis RG3) in Erinnerung. Daneben ist eine Tabelle positioniert, die Temperatur- und Druckverlustverhältnisse dokumentiert. Hier können auch Bemerkungen zu Besonderheiten notiert werden – wie "Revision", "starker Anstieg des Druckverlustes" etc.

Die weiteren Tabellen A7.6.3-2 und A7.6.3-3 widmen sich der Dokumentation der Reingaswerte an Kohlenstoffmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff. Messwerte zu den Konzentrationen im Rohgas, zwischen den Lagen und im Reingas werden eingetragen. Das vorbereitete System generiert dann selbsttätig ein nebenstehendes Balkendiagramm, das Schwellwerte enthält. Die gewählten Farben bedeuten

- Grün: Die Konzentration unterschreitet ein Viertel der maximal zulässigen Konzentration. "Weiterhin freie Fahrt!"
- Gelb: Die Konzentration liegt zwischen einem Viertel und drei Vierteln der maximal zulässigen Konzentration. "Achtung! Werte beobachten, ggf. in kürzeren zeitlichen Abständen!"
- Rot: Die Konzentration liegt oberhalb von drei Vierteln der maximal zulässigen Konzentration. "Jetzt sind Maßnahmen (z. B. partieller Katalysatorersatz) einzuleiten".

Sollte – wider Erwarten – eine Deaktivierung relativ schnell voranschreiten, was anhand der Dokumentation auf einen Blick nachvollzogen werden kann, ist eine Prüfung empfehlenswert, ob andere Lacke bzw. Lacke mit veränderten Bestandteilen zwischenzeitlich Verwendung

finden. Häufig sind in großen Fabriken die Kommunikationswege noch nicht im wünschenswerten Umfang angepasst.

## 8. Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens

### 8.1 Technologische Bewertung

Es wird vorab angemerkt, dass die Ausführungen zur Thematik "Bewertung der Ergebnisse des Vorhabens" auch für die Phase 2 des Vorhabens sich nicht grundlegend von denen der Phase 1 unterscheiden. Insofern fließen lediglich ergänzend Erkenntnisse der Phase 2 ein.

Insbesondere die Automobilindustrie am Standort Deutschland steht vor einer schwierigen Situation. Der internationale Wettbewerbsdruck ist hoch, die Margen sind eng, neue Produktionsstraßen sind mit hohen Investitionskosten behaftet, die Auflagen bezüglich Umweltschutz sind hoch. Vor diesem Hintergrund sind Lösungen gefragt, die gleichzeitig

- eine hohe Energieeinsparung erbringen und schnell implementierbar sind (hoher und sofortiger Beitrag zum Klimaschutz)
- die vorhandene Anlagentechnik erhalten (niedrige Investitionen)
- die toxischen Emissionen zusätzlich senken (Verbesserung der Immissionssituation)
- sich schnell rechnen (hohe Wirtschaftlichkeit der Zusatzinvestitionen)

Die Absenkung der Reaktionstemperatur in der TNV zur Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen TNV (Wärmeerzeuger) und Lacktrockner (Wärmeabnehmer) sowie zusätzlicher Installation einer katalytischen Stufe bewirken:

- eine Minderung des Erdgaseinsatzes in der TNV von ca. 20% bis ca. 40 %. Die Absenkung der TNV-Temperatur erfolgt durch Einstellung am Schaltschrank, der Einbau der katalytischen Stufe wird (wie realisiert) am Wochenende vorgenommen.
- Sonst wird an der Anlage nichts verändert, in den Trocknungsprozess wird nicht eingegriffen.
- Messungen haben ergeben, dass die Emissionen an Stickoxiden sinken und die TA Luft-Werte f
  ür org. C und CO deutlich unterschritten werden.
- Die Katalysatorfüllungen amortisieren sich etwa in einem halben bis max. einem Jahr bei einer geschätzten Katalysatorstandzeit von 2 bis 3 Jahren. Rechnet man die Investition für das Katalysatorgehäuse einschließlich Montage und Isolierung mit - was jedoch nach Erstinstallation erhalten bleibt – erhöht sich die Amortisationszeit etwa um ein halbes Jahr. Die Restlaufzeit der (meistenteils) Ganzstahl-TNV-Anlagen verlängert sich durch Absenkung des Brennkammer- Temperaturniveaus um viele Jahre (Laufzeitende i. d. R. nicht absehbar).

Das zentrale innovative Element liegt also nicht in einer katalytischen Stufe (die in sich selbst einen fortschrittlichen Aufbau aus Opferschicht und zwei Feinreinigungsstufen enthält), sondern in der Anpassung bzw. Modifikation einer vorhandenen Systemtechnik, verbunden mit dem Ziel, schnell den Brennstoffbedarf (die CO<sub>2</sub>-Emissionen) und die toxischen Emissionen (vorsorgender Umweltschutz) zu senken. Es kommt hinzu, dass die Durchsetzung dieses Lösungsansatzes bei der Volkswagen AG sowie in der Branche (vom Betreiber bis zum Anlagenbauer) ein Umdenken in Richtung energiesparender Fahrweisen bewirkt hat und daher Vorbildcharakter einnimmt.

### 8.2 Ökonomische Bewertung und patentrechtliche Situation

#### Marktreife bzw. Marktpotenzial

Das Projekt ist grundsätzlich marktreif. Für Decklack,- Füller- und UBS-Linien ist die Langzeiteignung prinzipiell erbracht (Ausnahme 2-Komponenten-Nanolacke mit höheren Siliziumbestandteilen), für die Potenzialermittlung sowie Wärmegleichgewichtseinstellung existiert ein eingespieltes Team. Der Bereich KTL (kathodische Tauchlackierung) sollte weitergehend mit Hilfe einer Vollstromanlage validiert werden, wie die 2. Phase des Vorhabens ergeben hat.

Das Marktpotenzial in der Karosserielackierung in Deutschland wird mit insgesamt 210 Linien (Erhebung Volkswagen 2006, davon 120 bei Volkswagen) beziffert, unter Einschluss weiterer Lackierer und Beschichter im Automobilbereich mit mehr als 350 Linien. Europaweit ist das Potenzial deutlich größer.

Die Anfangsinvestitionen für eine Linie mit einem Abluftmengendurchsatz von 8.000 bis 12.000 m<sup>3</sup>/h betragen 90.000 bis 120.000 €, die Ermittlung der Wärmegleichgewichtseinstellung (Potenzialermittlung) zwischen 15.000 und 20.000 €. CUTEC führt derzeit an verschiedenen Standorten der Volkswagen AG Potenzialermittlungen durch. Die Aufnahme des Produkts in das Portfolio der Firma LTB ist erfolgt. Volkswagen hat zwischenzeitlich 23 Linien umgerüstet.

#### Vorteile für den Kunden in wirtschaftlicher Hinsicht

Die Wirtschaftlichkeit wird beispielhaft anhand einer Decklacklinie beschrieben.

Die Kosten für eine Katalysatoranlage (bei einer Abnahmemenge von 19 Anlagen) einschließlich Lieferung, Montage und Inbetriebnahme betrug 94.000 € (Beispiel Decklack), davon machte der Katalysator selbst ca. 60.000 € aus. Die Verringerung des Erdgasbedarfes beläuft sich auf 53,8 m<sup>3</sup>/h (i. N.), also auf 538 kW, jährlich errechnet sich bei 6.500 Betriebsstunden (Dreischichtbetrieb, Unterbrechung am Wochenende) eine Einsparung von 3.497.000 kWh, wobei für die kWh (Erdgas) 3,5 Eurocent anzusetzen sind, also ein Betrag von 122.395 €. Die Amortisationszeit beläuft sich dann auf 0,77 Jahre. Sollte nach einigen Jahren ein kompletter Katalysatorwechsel notwendig werden, beträgt dessen Amortisationszeit 0,49 Jahre. Da die TNV nach einem Wochenende auf ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau aufgeheizt werden muss, wird weniger Erdgas benötigt. Dieser Effekt ist bei der aufgeführten Erdgaseinsparung nicht berücksichtigt.

Weiter erhöht sich die Restlaufzeit der TNV-Anlage auf Grund des geminderten Temperaturniveaus um mindestens 10 Jahre. Der Wert einer TNV beträgt für einen Abluftvolumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h etwa 250.000 € (incl. Nebenaggregaten). Müsste das Geld geliehen werden (Annahme Zinssatz 5 % pro Jahr) ist das gleichbedeutend mit einem monetären Vorteil von 12.500 € jährlich.

#### Wirtschaftliche und strategische Bedeutung der Innovation für das Unternehmen

*Wirtschaftlich* bedeutet die Innovation eine Einsparung an Kosten für den Bezug von Primärenergie. Gelingt es, an anderen Standorten der Volkswagen AG ähnlich große Erdgaseinsparungen zu erzielen wie in Wolfsburg, würde sich am Standort Deutschland - ausgehend von einer mittleren Einsparung von ca. 700 m<sup>3</sup>/h Erdgas bezogen auf 23 Linien - eine Erdgaseinsparung von etwa 30 m<sup>3</sup>/h je Linie, bei (120 Linien) im Mittel also etwa 3.600 m<sup>3</sup>/h an Erdgas ergeben. Bezogen auf 6.500 Betriebsstunden jährlich und 3,5 €Cent je kWh Erdgas (Heizwert 10 kWh/m<sup>3</sup>) ergibt sich ein Betrag von 8.190.000 €.

Strategisch bedeutet die Innovation, dass man sich neben organisatorischen Sparmaßnahmen (Abschalten von Verbrauchern wie z.B. Licht, Antrieben etc., wenn sie nicht benötigt werden) auch den Produktionsprozessen im Einzelnen widmen und zugehörige prozessspezifische Einsparmöglichkeiten aufspüren muss. In einer Lackiererei sind dies über die TNV hinaus z. B. die Antriebe für Ventilatoren (Ab- bzw. Umluftmengen von teilweise mehr als 300.000 m<sup>3</sup>/h), die vielfach nicht mit Frequenzumformern ausgestattet sind, gegen angedrosselte Klappen fahren und unnötig viel elektrische Energie beanspruchen. Einerseits müssen die Kosten und andererseits der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt werden, denn nur beides, niedrige Verbrauchskosten <u>und</u> niedriger Ausstoß von Klimagasen zeichnen einen zukunftsfähigen Standort aus und tragen zu Spielräumen für sozial tragfähige Reallöhne bei.

Für den Antragsteller bedeuten die Ergebnisse aus dem Vorhaben einen signifikanten Erkenntnisgewinn sowie das sich ergebende Marktpotenzial, das Zug um Zug erschlossen werden kann und soll.

Für das beteiligte Forschungsinstitut erweitert sich das F&E-Potenzial in der bislang wenig erschlossenen Branche der Produktion von Fahrzeugen einschließlich der Zulieferindustrie.

#### Synergieeffekte

Das System Trockner-TNV mit Prozesswärmekopplung wird auch in Zulieferbetrieben der Automobilindustrie eingesetzt, so dass ähnlich gelagerte Problematiken auch dort angetroffen werden können. Aber der Einsatzbereich ist nicht auf die Autobranche beschränkt. Viele Produktionsbetriebe, die der 31. BImSchV (Lösemittelverordnung) unterliegen, betreiben derartige Systeme und haben Probleme mit zu hohen Kamintemperaturen, was meistens mit zu hohen Brennstoffverbräuchen der TNV einhergeht. Auch hier kann der Einbau katalytischer Stufen zur Senkung des Brennstoffverbrauches erwogen werden, wobei jedoch die Randbedingungen für einen Einsatz jeweils vorher ermittelt werden müssen.

### Patentrechtliche Situation

Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2008 052 644.4 "Verfahren und Vorrichtung zur thermischen Nachbehandlung von Abluft einer Trocknerkammer" durch die Volkswagen AG. Das Datum der Offenlegungsschrift ist 29.04.2010.

### 8.3 Ökologische Bewertung / Umweltentlastung

#### Klimaschutz und effiziente Nutzung von Energie

Die Einsparung an Erdgas ist mit einer unmittelbaren Verminderung des  $CO_2$ -Ausstoßes zu bewerten. An 23 Anlagen der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg werden beim Betrieb ca. 700 m<sup>3</sup>/h an Erdgas eingespart. Dies sind etwa 1,4 t/h an  $CO_2$ , die weniger emittiert werden oder bei 6.500 Betriebsstunden pro Jahr 9.100 t. Das Gesamtpotenzial ist bereits im Abschnitt 8.2 dargelegt worden.

#### Ressourcenschonendes und rohstoffeffizientes Verhalten

Durch die Absenkung des TNV-Brennkammertemperaturniveaus auf ca. 500 °C bis 600 °C erhöht sich die Restlaufzeit der TNV-Kompaktgeräte drastisch. Es ist mindestens von einer noch 10- bis 15-jährigen Laufzeit der Anlagen des Baujahres 1990 auszugehen. (Es werden somit keine Werkstoffe für den Bau neuer Anlagen benötigt.) Bei Betrieb der Anlagen mit etwa 730 °C Reaktionstemperatur in der TNV würde die Restlaufzeit unter 5 Jahre fallen.

### Vermeidung von gefährlichen Stoffen

Die eingebaute katalytische Stufe arbeitet mit platindotierten (1 g/L) Keramikwaben und einer Raumgeschwindigkeit von (10.000...15.000) 1/h bei etwa 300 °C bis 400 °C. Die Emissionswerte unterschreiten die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte bezüglich org. gebundenem Kohlenstoff (50 mg/m<sup>3</sup>), Kohlenmonoxid (0,10 g/m<sup>3</sup>) sowie den Wert für Stickoxide (0,10 g/m<sup>3</sup>) deutlich im Lifecycle-Zeitraum der Katalysatoren.

## 9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse sind getroffen worden (erste und zweite Phase des Vorhabens):

- Am 11. Mai 2009 fand bei der CUTEC in Clausthal-Zellerfeld ein durch die Volkswagen AG initiiertes Lack- und Abluftreinigungssymposium statt. Teilnehmer waren neben Fachleuten aus den verschiedenen Bereichen rund um die Karossenlackierung der VW AG auch Lackproduzenten sowie Hersteller aus dem Anlagen- und Brennerbau sowie der Katalysator- und Adsorbensproduktion. Einen thematischen Schwerpunkt des Symposiums bildeten die Möglichkeiten des Katalysatoreinsatzes für bestehende Abluftreinigungsanlagen für Trocknungsprozesse in der Lackiererei. Herr Prof. Carlowitz referierte über den Stand des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Gemeinschaftsprojektes der Forschungspartner Luft- und Thermotechnik Bayreuth, Volkswagen und CUTEC. Im Programm folgten Vorträge über Katalyse und Katalysatoren, bevor verschiedene Lackexperten den Anwesenden über mögliche kritische Inhaltsstoffe und Zusätze der Lacke berichteten. Abschließend fand am Nachmittag eine für alle Beteiligten interessante Diskussion der bisherigen Ergebnisse und der noch offenen Fragen statt. Dabei wurde deutlich, dass selten so viele Spezialisten aus verschiedenen Branchen an einem Tisch gesessen und die Probleme der Abluftreinigung in Lackierereien aus den unterschiedlichen Blickwinkeln erörtert hatten.
- Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2008 052 644.4 "Verfahren und Vorrichtung zur thermischen Nachbehandlung von Abluft einer Trocknerkammer". Das Datum der Offenlegungsschrift ist 29.04.2010.

#### Vorträge:

- I. Jahns, O. Carlowitz, B. Schricker: "Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung (TNV) und Lacktrockner in der Automobillackierung durch nachträglichen Einbau von Oxidationskatalysatoren" im Rahmen der VDI-Tagung "Emissionsminderung 2010" am 08. und 09.06.2010 in Nürnberg [JCS10].
- O. Carlowitz, I. Jahns, O. Neese: "Konzepte zur Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung und Lacktrockner in der Automobil-Industrie". Fachtagung Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 29./30.01.2008, München.
- O. Carlowitz: "Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung und Trockner bei bestehenden Lackieranlagen in der Automobilindustrie zur Steigerung der Energieeffizienz". Jahrestreffen der ProcessNet-Fachausschüsse Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung und Hochtemperaturtechnik, 17./19.02.2010, Magdeburg.
- O. Carlowitz: "Spannungsfeld zwischen Energieeffizienz und Luftreinhaltung". 4. Kolloquium "Best verfügbare Technik/Stand der Technik" des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, 25.11.2010, Chemnitz.
- O. Carlowitz: "Zur Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Thermischer Nachverbrennung (Wärmeerzeuger) und Lacktrockner in der Automobilindustrie - Ansätze und Erfahrungen". 4. Fachtagung Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 08./09.02.2011, München.

### Veröffentlichungen:

- O. Carlowitz: Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Emissionswerten an ausgewählten Beispielen. Tagungsband 1. Bayerische Immissionsschutztage 2009, 01./02.07.2009, Augsburg.
- O. Carlowitz: Energieeffizienz versus Emissionswerte. Tagungsband 3. Fresenius Fachtagung "Immissionsschutzrecht Aktuell", 05./06.11.2009, Köln.
- I. Jahns, O. Carlowitz, B. Schricker: Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung (TNV) und Lacktrockner in der Automobillackierung durch nachträglichen Einbau von Oxidationskatalysatoren. VDI-Bericht 2110 "Emissionsminderung 2010 - Stand, Konzepte, Fortschritte", VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010, ISBN 978-3-18-092110-5, S. 47 - 60.
- L. Piech, O. Carlowitz, I. Jahns, B. Schricker: Uzyskanie równowagi cieplnej pomiedzy systemem dopalania a suszarnia karoserii w przemysle samochodowym poprzez wbudowanie do istniejacego systemu stopnia katalitycznego prowadzace do jednoczesnego obnizenia emisji zanieczyszczen. Archiwum Spalania, Kwartalnik Vol. 10 (2010) Nr. 3 - 4, S. 121 - 132, PIS, Polski Instytut Spalania, Warzawa, Polen. ISSN 1641-8549.
- O. Carlowitz, O. Neese: Lassen sich Immissionsschutz und Energieeffizienz miteinander vereinbaren? K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Hoppenberg (Hrsg.): Immissionsschutz -Planung, Genehmigung und Betrieb von Anlagen - Band 1, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2010. ISBN 978-3-935317-59-7, S. 175 - 188.
- Bewerbung für den Innovationspreis für Klima und Umwelt 2010 (IKU) beim Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung mit dem Projekt "Erdgaseinsparung an vorhandenen Lacktrocknern für Automobilkarosserien durch Wärmegleichgewichtseinstellung (Bewerbungsfrist bis 20.05.2010).
- "VW senkt Energiebedarf in der Lackiererei"; Automobilwoche –Die Branchen- und Wirtschaftszeitung; <u>http://www.automobilwoche.de/article/20100806/REPOSITORY/100809916/vw-senktenergiebedarf-in-der-lackiererei</u>; Freitag, 06. August 2010.
- Kurznotiz "Abgebremst." über Energieeinsparung in der Lackiererei bei der Volkswagen AG in Wolfsburg; ADAC-Motorwelt, Ausgabe 9/2010, S. 12.
- O. Büttner, I. Jahns: Abluftreinigung in Lackieranlagen. Wasser Luft Boden wlb, Ausgabe 2/2011.
- I. Jahns, O. Carlowitz, B. Schricker: Oxidationskatalysatoren reduzieren Erdgasverbrauch. JOT Journal für Oberflächentechnik, Ausgabe 3/2011.
- O. Neese: Analyse und Erprobung von Konzepten zur Senkung des Primärenergieeinsatzes bei bestehenden Lacktrocknersystemen am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, TU Clausthal, Veröffentlichung in 2013.

## 10. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes sind Randbedingungen erarbeitet und realisiert worden, die es erlauben, an vorhandenen Trocknern hinter Automobillackieranlagen, die mit thermischen Nachverbrennungsanlagen ausgerüstet sind und gleichzeitig die Trockner mit Prozesswärme versorgen, den Brennstoffbedarf signifikant zu senken und die Emissionen an toxischen Stoffen (CO, org. C, NO<sub>x</sub>) deutlich zu verringern. Die Untersuchungen während beider Vorhabensphasen erstreckten sich über

- Decklacklinien
- Füllerlinien
- Unterbodenschutzlinien
- Linien der kathodischen Tauchlackierung (KTL-Linien)

im Werk Wolfsburg der Volkswagen AG.

Die Ergebnisse beider Projektphasen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch Absenkung der Reaktionstemperatur in der TNV bis zum sogenannten Wärmegleichgewicht (Wärmebereitstellung durch die TNV entspricht der Wärmeabnahme im Trockner) lassen sich im Decklack- und Unterbodenschutzbereich bis zu etwa 40 % an Brennstoffzufuhr zur TNV, im Füller- und KTL-Bereich um etwa 20 % einsparen.
- Da der Ausbrand in einer TNV sich mit sinkender Reaktionstemperatur verschlechtert (org. C und CO steigen), ist eine Nachoxidation erforderlich, die in Form von katalytischen Stufen realisiert wurde, weil sie prinzipiell einen angemessenen apparativen und investiven Aufwand erfordert.
- Analysen des durch den Katalysator zu behandelnden Abgases bei abgesenkter Reaktionstemperatur im TNV-Brennraum, langfristig angelegte Versuchsserien mit Katalysatortestanlagen sowie Erfahrungen mit 23 Vollstromanlagen haben gezeigt, dass die Katalysatoren
  - o in Decklackanlagen einem moderaten
  - o in Fülleranlagen einem höheren
  - o in Unterbodenschutzanlagen einem niedrigeren und
  - o in KTL-Anlagen einem höheren

Deaktivierungsrisiko ausgesetzt sind. Nach bisherigen Erfahrungen mit Versuchsund insbesondere Vollstromanlagen liegt die (derzeitige) Katalysatorstandzeit für Füllerlinien bei etwa 2 Jahren und für Decklack- und Unterbodenschutzlinien bei mindestens 3 Jahren. Die Implementation einer Vollstromanlage in einer KTL-Linie steht noch aus, so dass eine abschließende Aussage nicht möglich ist.

 Als Einbauort für die 23 implementierten Vollstromkatalysatoranlagen (12 Decklack, 8 Füller, 3 Unterbodenschutz entsprechend einer eingesparten Feuerungswärmeleistung von ca. 7 Megawatt) hat sich die Position hinter dem TNV-Kompaktgerät, bestehend aus Brennkammer und Abluftvorwärmrekuperator, bzw. hinter der ersten Wärmeauskopplungszone für den Trockner bewährt. Die ursprünglich angedachte Positionierung am Ende des TNV-Brennraumes (in diesem Fall wird kein separates Katalysatorgehäuse benötigt) erfordert ein spezielles Brennerverhalten (homogenes Temperatur-, Konzentrations- und Strömungsfeld im TNV-Brennraum sowie eine moderate Temperaturregelcharakteristik), das jedoch durch die vorhandenen Brenner nicht ausreichend abgebildet werden konnte. Allerdings ist diese Lösung grundsätzlich realisierbar, wie eine Versuchskampagne in der Technikums-TNV der CUTEC unter Beweis gestellt hat.

- Die bei Volkswagen implementierten Katalysatorstufen führen während des Lifecycle im Mittel zu einer deutlichen Unterschreitung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionswerte an Kohlenstoffmonoxid (0,10 g/m<sup>3</sup>), org. gebundenem Kohlenstoff (50 mg/m<sup>3</sup> für katalytische Nachverbrennungsanlagen) sowie NO<sub>x</sub> (als NO<sub>2</sub>; 0,10 g/m<sup>3</sup>).
- Die Kapitalrückflusszeit für die Katalysatoren (ohne Gehäuse) erstreckt sich über einen Zeitraum von 0,5 Jahren bis zu 1 Jahr, so dass der Einbau sich als wirtschaftlich erweist und daher als attraktiv einzustufen ist.

Neben diesen unmittelbaren Ergebnissen der ersten Phase des Vorhabens lassen sich die folgenden weiteren, sogenannten mittelbaren Ergebnisse ableiten:

- Das Vorhaben hat der Branche der Automobillackierer (Planer, Anlagenbauer, Anlagenbetreiber) bedeutende Impulse vermittelt, über Technologien im Zusammenhang mit der Verminderung des Primärenergiebedarfes nicht nur nachzudenken, sondern auch praktikable Ansätze anzubieten. Im Konzern der Volkswagen AG besteht nunmehr generell das Bestreben, die Energieeffizienz der Automobilproduktion deutlich zu erhöhen und den fahrzeugspezifischen Primärenergieverbrauch deutlich zu senken.
- Die entwickelte anlagentechnische Lösung verbreitet sich in Ansätzen schon über die Marke Volkswagen hinaus in den Volkswagenkonzern und von dort hin zu anderen Automobilfabriken sowie Zulieferern. Dazu tragen im Rahmen dieses Berichtes zitierte, einschlägige Vorträge und Veröffentlichungen wesentlich bei.
- Für die am Vorhaben Beteiligten Luft- und Thermotechnik Bayreuth (LTB) und CUTEC eröffnen sich einerseits neue Märkte (LTB) und andererseits Ansätze für neue Forschungsvorhaben (CUTEC).
- Aus diesem Forschungs- und Entwicklungsprojekt sind weitere entstanden, u.a. ein Vorhaben [Zim10], das sich die lastabhängige Abluftvolumenstromreduzierung zum Ziel gesetzt hat. Der technologische Ansatz hat im Volkswagenwerk Emden seine Funktionalität nachgewiesen, hat zu Einsparungen an Erdgas von 27% an einer Decklacklinie geführt, ist kompatibel mit der hier entwickelten Lösung und kann daher zusätzlich vorgesehen werden.
- Das Vorhaben bildete in Verbindung mit weiteren die Basis für die Gründung der CVET GmbH, der Clausthaler Verfahrens- und Energietechnik GmbH, die die planerische Seite derartiger Energieeinspartechnologien in Zukunft vorantreiben wird.

## 11. Literaturverzeichnis

- [Ce88] CERBE, G.: Grundlagen der Gastechnik. Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 1988.
- [Cla12] CLARIANT Produkte (Deutschland) GmbH; Untersuchungsbericht, Bericht K2788, Bruckmühl 2012 (unveröffentlicht).
- [Dür02] DÜRR GmbH; Auszug aus der Anlagendokumentation, Verfahrenstechnische Fließbild KTL-Trockner, Halle 9; Stuttgart 2002 (unveröffentlicht).
- [Her10] W.C. HERAEUS GmbH; Untersuchungsbericht, Worknumber 2010040153, Hanau 2010 (unveröffentlicht).
- [Her12a] W.C. HERAEUS GmbH; Untersuchungsbericht, Worknumber 2012020500, Hanau 2012 (unveröffentlicht).
- [Her12b] W.C. HERAEUS GmbH; Untersuchungsbericht, Worknumber 2012100116, Hanau 2012 (unveröffentlicht).
- [JCS10] JAHNS, I.; CARLOWITZ, O.; SCHRICKER, B.: Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung (TNV) und Lacktrockner in der Automobillackierung durch nachträglichen Einbau von Oxidationskatalysatoren. VDI-Berichte 2110: Emissionsminderung 2010, Nürnberg, 08./09.06.10, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2010, ISBN 978-3-18-092110-5, S. 47 – 60.
- [Mü09] MÜLLER, T.: Vorstellung der Lackierereien in Wolfsburg. Vortrag im Rahmen des Lack-Symposiums/Abluftreinigung. CUTEC-Institut, Clausthal-Zellerfeld, 11. Mai 2009.
- [NBa08] Entwicklung und Erprobung einer Brennertechnologie zum Einsatz in thermischen Nachverbrennungsanlagen mit katalytischer Stufe; Projektförderung durch die NBank, Hannover; Laufzeit 01.10.2008 - 30.09.2012.
- [Ne13] NEESE, O.: Analyse und Erprobung von Konzepten zur Senkung des Primärenergieeinsatzes bei bestehenden Lacktrocknersystemen am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation (Entwurf), TU Clausthal, Januar 2013.
- [SCJ11] SCHRICKER, B.; CARLOWITZ, O.; JAHNS, I. et al: Entwicklung und Erprobung von Abgasreinigungskonzepten für Trockner von Automobilkarosserien mit verringertem Primärenergieeinsatz unter weitgehender Beibehaltung vorhandener Anlagentechnologien (1. Phase); Abschlussbericht zur ersten Phase eines Entwicklungsprojektes, gefördert unter Aktenzeichen 26471-22 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt; Goldkronach, Februar 2011
- [SüC09] SÜD-CHEMIE AG; Untersuchungsbericht, Bericht HE204K2421, Bruckmühl 2009 (unveröffentlicht).
- [SüC10a] SÜD-CHEMIE AG; Untersuchungsbericht, Bericht HE204K2507, Bruckmühl 2010 (unveröffentlicht).
- [SüC10b] SÜD-CHEMIE AG; Untersuchungsbericht, Bericht K2581, Bruckmühl 2010 (unveröffentlicht).
- [SüC11] SÜD-CHEMIE AG; Untersuchungsbericht, Bericht K2663, Bruckmühl 2011 (unveröffentlicht).
- [TAL02] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft); 2002
- [Zim10] Systemtechnische Entwicklung zur energiesparenden Lacktrocknung bei Automobilkarosserien durch Regelung des Abluftmengenstromes; Projekt gefördert aus dem ZIM-Programm; Laufzeit 01.01.2010 - 30.06.2012.

# 12. Anhänge

## 12.1 Anhangverzeichnis Tabellen

Nr.	Bezeichnung	Seite
A 7.2.1-1	Auslegungsdaten KTL-Trockner VW Wolfsburg	52
A 7.2.1-2	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im Ausle- gungszustand bei Nennlast	53
A7.2.2-1	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemesse- nen Istzustand (Volllastbetrieb)	54
A 7.2.2-2	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemesse- nen Istzustand (Leerlaufbetrieb)	55
A 7.2.3-1	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturab- senkung auf 608 °C (Volllastbetrieb)	56
A 7.2.3-2:	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturab- senkung auf 575 °C (Volllastbetrieb)	57
A 7.3.1-1	Auflistung der eingesetzten Mess- und Analysentechnik	58
A 7.3.1-2	Chromatogramm Aktivkohle bei 715℃, KTL-Linie 2	59
A 7.3.1-3	Chromatogramm Silicagel bei 715℃, KTL-Linie 2	60
A 7.3.1-4	Chromatogramm Aktivkohle bei 650 °C, KTL-Linie 2	61
A 7.3.1-5	Chromatogramm Silicagel bei 650 ℃, KTL-Linie 2	62
A 7.3.1-6	Chromatogramm Aktivkohle bei 600 °C, KTL-Linie 2	63
A 7.3.1-7	Chromatogramm Silicagel bei 600 °C, KTL-Linie 2	64
A 7.6.3-1	Dokumentation Katalysatorüberwachung: Technische Daten	65
A 7.6.3-2	Dokumentation Katalysatorüberwachung: CO-Konzentrationen	66
A 7.6.3-3	Dokumentation Katalysatorüberwachung: org. C-Konzentrationen	67

Bezeichnung	Einheit	Menge	Bezeichnung	Einheit	Ме	nge
Trockner A	10	•	Aufheizzone 1 - 2		W31	W32
Nenndurchsatz Karroserien	1/h	35	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m <sup>3</sup> /h	45000/35800	45000/32000
Masse Karrose (maximal)	kg	600	Motorleistung	kW	37	37
Masse Warenträger Skid	kg	250	Statischer Druck	Ра	1350	1350
Trockner Länge Gesamt	mm	152000	Wärmetauscherleistung	kW	251	223
Länge der Schleuse (Ein/Austritt)	mm	4000/4000	Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	68/87	105/124
Länge des aktiven Trockners	mm	124000	Reingasvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16000	16000
Länge der Aufheizzone 1-2-3-4	mm	21000	Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	483/439	439/400
Länge der Zwischenschleuse 1-2	mm	-	Aufheizzone 3		W	33
Länge der Haltezone 1-2	mm	21000/19000	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m <sup>3</sup> /h	45000	/29000
Länge der Kühlzone	mm	21000	Motorleistung	kW	3	7
Objekttemperatur AH1	°C	70	Statischer Druck	Pa	13	50
Objekttemperatur AH2	°C	110	Wärmetauscherleistung	kW	20	03
Objekttemperatur AH3	°C	150	Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	145	/164
Objekttemperatur AH4,HZ 1-2	°C	185	Reingasvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16	000
Objekttemperatur Kühlzone	°C	35	Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	400	/365
Frischluftvolumenstrom über W37	m³ <sub>N</sub> /h	13700	Aufheizzone 4		W	34
Frischluftvolumenstrom (Ein-/Auslauf),Kalt	m³ <sub>N</sub> /h	1000/1000	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m³/h	45000	/26800
Frischluftvolumenstrom (Schleuse 1)	m³ <sub>N</sub> /h	1700	Motorleistung	kW	3	7
Frischluftvolumenstrom (Schleuse 2)	m³ <sub>N</sub> /h	5000	Statischer Druck	Pa	13	50
Frischluftvolumenstrom (Auslauf)	m³ <sub>N</sub> /h	7000	Wärmetauscherleistung	kW	11	31
TNV-System	A20		Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	174	/193
Abluftvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16000	Reingasvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16	000
Ablufttemperatur aus Trockner	°C	180	Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	365	/334
Abluftvorwärmtemperatur	°C	-	Haltezone 1 - 2		W35	W36
Brennraumtemperatur (Dauerbetrieb)	°C	750	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m³/h	45000/26800	45000/26800
Reingastemperatur Austritt	°C	483	Motorleistung	kW	37	37
Leistung Abluftventilator	kW	132	Statischer Druck	Pa	1350	1350
Leistung Abluftvorwärmer W22	kW	-	Wärmetauscherleistung	kW	42	37
Brennerleistung (Betrieb)	kW	1870	Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	186/190	186/190
Abhitzesystem	n A30		Reingasvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16000	16000
Kühlzone			Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	334/326	326/320
Abluftventilator			Frischluftvorwärmeeinrichtung		W	37
Abluftvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	85100	Frischluftvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	14	000
Motorleistung	kW	2 x 22	Motorleistung	kW	18	3,5
Statischer Druck	Ра	700	Wärmetauscherleistung	kW		-
			Frischlufttemperatur	°C	20/	203
			Reingasvolumenstrom	m³ <sub>N</sub> /h	16	000
			Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	320	/160

### Tabelle A 7.2.1-1: Auslegungsdaten KTL-Trockner VW Wolfsburg.

	U H H H J N L M M N V Y V M S Y Y Z M AB AC AU AC AF AG AH AU AN AL AM AU AU AU AU AF AG AF AG AF AU AN AU AN AU AN AU AU AU AV AU AF AU AM AN AU AF	Berechnungsmodul Trockner A10	Dichtel Hickmentalsammensetaung vol. 20, H, H, A, Co Co, So, CH, C,H, Summe Eregebadar/Karossnuud Skid Summe Trockere FL-WT katt A+Z	0,767 - 76;68 20,37 0,00 3,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00	0.767 76.58 2035 0.00 3.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0	1,273 75,38 21,35 0,00 3,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 Massenstom 21000 8750 2750 [Tempe Enhibit (Y] 181,0 20,0 25,0 150 150 150 150 150 150 150 150 150 15	0,742 40.237 9,86 0,01 0,00 0,00 0,00 1,53 0,00 87,35 1,15 100 Temperatur Erinnit 25 25 25 <sup>1424</sup> Austriti (°C) – – – – – – – – – – – – – – – – – – –	1,196 - 75,37 2,183 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,	1,196 13.700 Austral MUK97() 0.5 0.5 0.5 0.5 August Funder () 17.745 2.819 0	1,176	0.960 Trodriner Einritet Drift Drift Austriet Drift einritet kwn 1.056 99 20 0	0.871 Temperatur 180,0 kW kW brange-Austrit kM – - – – –	0,795 C000000000000000000000000000000000000	0,746 0,746 2u/dr/Ablut 1.037 1.056 19 192 Vertuat AVI	0,750 Schradsdiffkorzentration 0,8 bei 16.000 Umhürf Aufheizzonet 1.073 822 251 Umhürf WU31 251,0 251,3 Summe WU 900,0 0.750 Schradsdiffkorzentration low <sup>3</sup> 1 0.8 Enchersteinden Schradet Bin Jun 1.70 Trans 1.200 1.50 21,50 200 1.100 1.50 200 200 200	0.25713 31.400 Link W VV Cudasativeri curates (1991 K) VV Cudasativeri curates (1991 K) VV Cudasativeri curates (1992 K) VV Cudasativeri curates (1992 K) VV Cudasativeri curates (1993 K) VV Cudasati	semperatur (angezeigt) (*C) 750 Landoda Benner 0 Vowärngrad Unhuft Auhieizzone 4 1867 1885 -181 Umbuft W034 1810 1812 Filschuld Neu 9186	stemperaturitator 100%, Venustrahiba:2. Reingas [%] 0,84 Umfurti Hatezonen 3.716 3.492 -223 Umfurt W0 38 42,0 42,0 Summe WÜ Keu 901,0	Stemperatur (Blanc) 750.0 Ventus Wärmestrom (kW) 40 (rsi 47,91% Summer 10,666 10,452 412 412 Umbrt W036 37,0 37,0	Berechnungsmodul Prozesswärmerzeugung A30	inkammer D21 Abluthonvärmer W22 Wärmeübertrager W31 Wärmeübertrager W33 Wärmeübertrager W34 Wärmeübertrager W35 Frischluftwärmeübertrager W35 Frischluftwärmeübertrager W35	Abluhrowahung seuperatur Umluh Aufheizzone 1 Umluh Aufheizzone 2 Umluh Aufheizzone 3 Umluh Haltezone 1 Umluh Haltezone 2 Frischlitterwärung	Volume         Lo         Z7,00         Z		Molecular         Control         Molecular         Contro         Molecular         Control	<b>dT</b> <sub>46</sub> <b>dT</b> <sub>46</sub> (1) Bipates 2814 30:0 24.0 38:0 194.3 22m/W0] 3150 1628 22m/W0] 226;1 133,9 22m/W0] 172,0 107.8 22m/W0] 144,0 50.8 22m/W0] 1560 46.6 22m/W0] 1169 133.6	110569 AT IC % 22.04 0.125 23.26 0.125 23.057 0.125 180.15 0.125 137,41 0.125 89,45 0.125 83,46 0.125 125,07	3120 00 ml 00 17866 44891 730 2513 4294 2052 232 2657 2657 2657 263 36 1812 00 69 64 371 00 64 371 00 896 985	Berner butt Periogas Reirgas Mant Periogas Reirgas	0 16.013 16.220 0 16.220 10.014 16.220 15.004 13.016 23.04 33.688 16.220 11.516 14.200 12.615 16.220 11.5161 16.220 16.261	0 20382 2058 10 20582 2058 16861 3577 43216 20588 16.304 4.234 33190 20588 15.008 54.58 35.774 20538 13.346 7.189 35.548 20538 13.145 1.425 35.766 20538 13.25 3126 20538 13.25 2127 18.411 75.51 20538 20.375	200 486 - 7500 750 750 750 750 750 750 750 750 75	756 µ 4830 466 4830 20510 87,0 4390 287,1 124,0 400,1 278,4 1640 3650 282,0 1900 385,0 139,9 153,8 2030 1600 - 100,1 206,1 100,0				00 2821 - 00 4.748 1055 - 24457 533 822 - 2135,9 556 1.169 - 1797,6 650 1.484 - 14463 779 1685 - 1889,1 141 1.807 - 1863,1 27 1.812 - 2012 1.741 99 - 1.056	47-48 0.0 2.879 2.85 2.979 2.85 2.979 2.85 10.73 2.896 333 1.382 2.447 4.47 1.897 2.255 59 5.98 1.867 2.030 99 1.890 90 1.849 1.942 82 1.017 9.68 -	00 1.769 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 1.789 0.0 203 223 2232 0.0 203 2032 0.0 203 2032 0.0 181 181 181 181 181 181 181 181 181 18	
- - - - - - - - - - - - - - - - - - -	KTL Linie 1, VW Wolfsburg		ichteN DichteB Heizwert Zusammensetzung zim <sup>3</sup> /il Raim <sup>3</sup> il Ruimai Ni O, Hi HrOn C	1,273 0,767 - 76,63 20,37 0,00 3,00 0,	1,272 0,767 76,58 20,35 0,00 3,00 0,	1,273 1,273 76,58 20,35 0,00 3,00 0.	0,796 0,742 40.237 9,86 0,01 0,00 0,00 0	1,283 1,196 - 78,37 20,83 0,00 0,80 0, 1,266 0,338 - 75,69 17,67 0,00 5,38 0,	1,283 1,196 13.700	1,283 1,176	1,266 0,960	1,266 0,871	1,272 0,795	1,272 0,746	1,272 0,750 Schadstoffkonzentration t 1.272 0,750 Schadstoffkonzentration traina <sup>3</sup> 1 0	79601 0.76713 <b>31,400</b>	adktionstemperatur (angezeigt) [°C] 750 Lambda Bren	saktionstemperaturfaktor 100% Vertustzahl be	saktionstemperatur (Bilanz) 750,0 Verlust-Wärm		Brennkammer D21 Abluftvorwärmer W22	Abluftvorwärmung rekuperatu	k <sub>0</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] 27,00	A [m <sup>2</sup> ] A 22.50 A	<b>40</b> [W/(m/k)] 24,52 U	ΔT <sub>ein</sub> ΔT <sub>aus</sub> ['C] Bypass 281,4 303,0	1,10959 ATm [*C] % 292,04	3.120 QÜ [kw] 0,0 1.768,6 445	chacts Brenner Abluft Reingas Reingas Reingas Abluft W2 quival. Frischl. Ablutt gesamt Bypass WÜ	12,5 0 16.013 16.220 0 16.220 16.013 16.	9,99 0,0 20.362 20.538 0 20.538 20.372 20.	468,6 20,0 468,6 - 750,0 750,0 180,0	750,0 483,0 468,6 46	2,563 1,009 1,064 - 1,110 1,137 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	26 0 21.672 - 0 22.789 21.119	22.789 22.204 21.698 22.	15,0 0,0 2,821 - 0,0 4.748 1.056	4.748 0,0 2:979 2.825 2:		4747,6
	Berechnung TNV-Trockner	Stoffstromdaten / Eingangsdaten	V Norm V Betrieb Mass Temp Di [m <sup>3</sup> ,M1] [m <sup>3</sup> ,M1] [rc] [k	Abluft, unb 16.000 26.544 20.362 180 1	Abluft, bei. 16.013 26.564 20.372 180 1	Abluft ZWT 0 0 0 0	Erdgas 207,90 284,01 165,49 20 (	Br. Luft 0 0,00 0 20 1 Reingas 1 16.220 60.754 20.538 750,0 1	Fr_Luft W 13.700 14.703 17.581 20 1	Fr_Luft K 2.175 2.374 2.791 25 1	Umluft1 34.130 45.000 43.216 87 1	Umluft2 30.950 45.000 39.190 124 1	Umluft3 28.118 45.000 35.774 164 1	Umluft 4 26.369 45.000 33.548 193 1	Umluft5 26.539 45.000 33.766 190 1 Umluft6 26.539 45.000 33.766 190 1	Schadst. 12.5 21.7 10.0 180 0.	[m <sup>3</sup> ,/h] <b>16.000</b> Re	Wengenstrom Abgas Austerungswert	Rgh) 20.362 Re	Berechnungsmodul TNV-System A20			Värmedurchgangskoeffizient Auslegung	rarmeubertragentache Järmeithernanskonffiziernen Ratrieh	ramedurchgangskoeffizient Betrieb	emperaturdifferenz Eintritt/ Austritt	enbende log. Temperaturdifferenz intritt	ibertragener Wärmestrom	Brennst Å	(olumenstrom [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h] 207,9	Aassenstrom [kg/h] 165,5	emperatur Eintritt [*C] 20,0 4	Austrift ['C] -	spezifische Einfritt (ku/(kg*K)) 1,946 2 Närmekanazität Austria munazivi	Eintritt NURANI 322	<pre>{apazitätsstrom Austritt [kJ/K+h]] -</pre>	Eintritt [kW] 1851,4 1	Energies from Austritt [kW] -	Differenz [kW] 1849,6	Varluet IVM I An II

Tabelle A 7.2.1-2: Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im Auslegungszustand bei Nennlast

Н	A	0	٥	ш	ш	g	т	-	٦	×	٦	W	z	0	۵.	σ	æ	S	F	n	v V	×	>	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	R	AK	AL A	M AN	AO	AP	_
-	Berech	nung TNV	-Trockne	ır		KTL L	inie 1,	VW Wol	fsburg		lstz	ustand	2012-06	715°C	16260m <sup>3</sup>	/h Voll L	ast											Stand:	22.08	.2012										
3 3	offstromdat	en / Einga	ngsdatei	-														Berechnu	powsbu	ul Trock	ner A10																			
4	VN	orm V Betrie	vb Mass	Temp	DichteN	DichteB	Heizwert	Zusamm	nensetzun	6,							Vol%	- and a second se	and Variation	0	Karc	S-					Abuft	Luft	Zuluft	Zuluft										
ŝ	[m <sup>3</sup>	/h] [m <sup>3</sup> ,/h]	[kg/h]	[2]	[kg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]	[kg/m <sup>3</sup> <sub>8</sub> ]	[kJ/kg]	N2	02	н	$\rm H_2O_D$	8	ŝ	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	$C_2H_6$	Summe	Energreua	uari naros	sen und s	kiu sei	- C	uune n	Ð			Trockne	r FL-WT	kalt	AHZ										
6 At	luft, unb 16.2	<b>60</b> 28.46	3 20.693	205	1,273	0,727	ı	76,63	20,37	0,00	3,00	0,00	00'0	0,00	00'0	00'00	8	Anzahl			32,	8 32,8	32,8	Vol.str.		[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h	16.272	10.000	6.137	0										
7 AI	iluft, bel. 16.5	28.49	20.709	205	1,272	0,727		76,55	20,35	0,00	3,00	00'0	00'0	0,00	0,10	00'0	100	Masse je Eir	iheit		Э́е	0 250	550	Ma.str.		[kg/h]	20.709	12.833	7.876	0										
8 8	Iuft ZWT 0	•	0	•	1,273	1,273		76,55	20,35	0'00	3,00	0,00	00'0	0,00	0,10	0,00	6	Massenstro	E		984	0 820	0 1804(	Tempe	. Eintritt	0	205,0	36,3	25,0	•										
ы в	dgas 207	,57 283,5;	7 165,23	8	0,796	0,742	40.237	9,86	0,01	0,00	0,00	0,00	1,63	0,00	87,35	1,15	6	Temperatur	ш	ntritt	<b>32</b>	25	52	ratur	Austritt	[2]	1	ı.	ı.	I										
10 BI	C Luft C	00'00	0	8	1,283	1,196	ī	78,37	20,83	0,00	0,80	00'0	00'0	0,00	0,00	0,00	100		A	Istritt	2 20	180	180	spez. Wärme	Eintritt	[kJ/kg•K	0 1,0393	1,01078	1,00977	1,02007										
1	ingas 1 16.4	186 61.91(	20.874	752,6	1,266	0,337	ı	75,68	17,63	0,00	5,41	0,00	1,28	0,00	00'0	0,00	100	spez. Wärm	ekap. Ei	ntritt [kJ/(	kg (X) 0,4	5 0,4!	5 0,45		Austritt	[kJ/kg+K	-	ı.	ı.	I										
12 Ft	Luft W 10.	11.32	12.833	36,3	1,283	1,133		10.000											- W	Istritt	<del>2</del> 0	0.5	0'2	Kapaz.	Eintritt	(k•h)	1 21.523	12.971	7.953	0										
13	Luft K 6.1	37 6.695	7.876	ន	1,283	1,176											_	Aufheizener	giebedarf	×.	W] 215	,3 179,	4 394,6		Austritt	[k•h]	-	ı	I	I										
14 N	nluft 1 21.6	30.00t	27.438	165	1,266	0,915												rockner		Ē	ntritt Aust	ŧ.		Enerai	Eintritt	[kW]	1.226	131	55	0										
15 U	nluft 2 24.(	005 40.00(	30.395	182	1,266	0,760											_	l emperatur	¢1	02'0 k	W KM	/ KW		strom	Austritt	[kw]	1		I											
16	nluft 3 22.8	351 40.00(	29.068	205	1,272	0,727											-	(arossen+S	kid		54 54	395		_	Differer	rz (kw]														
17 U	nluft 4 16.5	30.00	21.575	210	1,272	0,719			_				_				14	Zuluft/Abluft		~	65 1.22	56 361	360,7		Verlust	[kW]			,											
18 U	nluft 5 17.1	38 30.00(	21.801	205	1,272	0,727		Schadst	offkonzent	tration		1,2	je j	16.260				Jmluft Aufh	eizzone 1	~	24 69	7 -12	~	Umr	ıft WÜ 31	127,0	127,0	Summe	ΝÜ	633,0										
19 UI	nluft 6 22.6	351 40.000	29.068	205	1,272	0,727		Schadst	offkonzent	tration	[g/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]	1,2	Erdgasä	qivalent S	chadst.	[kg <sub>Eg</sub> /kgs]	0,780	Jmluft Aufh	eizzone 2	<del>-</del>	594 1.36	6 -22	~	DmL	ıft WÜ 32	228,0	228,0	Frischluf	t Ausg.	678,8										
20 <b>St</b>	hadst 19	,1 33,1	15,2	205	0,79601	0,72702	31.400											Jmluft Aufh	eizzone 3		720 1.55	-16		- E L	ıft WÜ 33	169,0	169,0	Summe	Gesamt	1311,8										
21			[m <sup>3</sup> //h]	16.000	Reaktior	stemperatu	ur (angez	:eigt)	[2]	715	Lambda I	Brenner			0	Vowärmç	rad	Jmluft Aufh	eizzone 4	<del>2</del>	309 1.24	-99		Uml	ıft WÜ 34	66,0	66,0	Frischluf	t Neu	678,8										
22 AL	slegungswert	gas			Reaktior	stemperat	urfaktor			95%	Verlustza	ahl bez. R	eingas	[%]	0,83			Jmluft Halte	zonen	3)	011 2.79	98 -210	_	Ē	ıft WÜ 35	43,0	43,0	Summe	WÜ Neu	633,0										
23	>		[u]By]	20.362	Reaktior	nstemperatu	ur (Bilanz	÷		752,6	Verlust-W	Värmestro	E	[kW]	40	[%]	45,32%	Summen		6	378 9.33	18	<del>8</del>	лг С	ıft WÜ 36	170,0	170,0													
24 B	srechnungs	nodul TN	/-System	A20									Berech	nugsn	odul Pro	ozesswä	rmeerze	ugung A	0																					
25					Brei	nnkammer	· D21		Ā	bluftvorv	rärmer W.	53	M	ärmeübe	rtrager W	31	Wä	rmeübertra	ger W32	-	Wärmeü	ibertragei	- W33	_	Wärmeüb	ertrager <sup>1</sup>	W34	M	ärmeūbe	rtrager W3	35	Wä	irmeüberti	ager W36	Ľ	rischluftw	ärmeübertı	ager W37		_
26									Abluf.	tvorwärmu	ing rekupe	eratuv	2	Jmluft Au	fheizzone	-	'n	muft Aufhei	zzone 2		Umluft	Aufheizzo	ne 3		Umluft A	ufheizzon	e 4		Umluft Ha	altezone 1		D	Jmluft Halt	ezone 2		Frisc	hlufterwärm	Bun		
27 W	ärmedurchganç	<b>j</b> skoeffizient	Auslegung	-			Ł	[W/(m <sup>2</sup> K)]		27	00			27	005			27,00				27,00			2	2,00			27	00			27,0	0			27,00			
28 W	ärmeübertrage.	fläche					٩	(س) ۳		21	0,0			ũ	0			8				80	_			80			æ	0			8				250	_		
29 W	ärmeübergang:	skoeffiziente	n Betrieb				පි	[W/(m <sup>2</sup> K)]		53,23	54,72	0,79		6,97	53,80	0,79		16,15 5	3,80 0	.79	14,8	30 54,0	0,79		6,80	54,00	0,79		4,74	54,00	0,79		18,58	54,00	0,79	8	,44 37,5	0,79		
30 W	ärmedurchganç	<b>j</b> skoeffizient	Betrieb				¥	[W/(m <sup>2</sup> K)]	_	26	86			œ́	17			12,42			ſ	11,61			Ī	6,04			4	36			13,8	5		[	17,95			
31 Té	mperaturdifferu	anz Eintritt/ /	Nustritt			$\Delta T_{oin}$	ATaus	[2]	Bypass	285,0	293,8		zum WÜ	404,7	150,7		zum WÜ	306,9 1	66,2	ZUIT	WÜ 247	6 129	0	Zum W	Ü 215,1	80,0		zum WÜ	208,4	65,1	14	zum WÜ	200,2	115,1	unz	n WÜ 15	6,3 146,			
32 Eii	thritt	mperaturam	ZUBJA			1,11007	ÅT	[2]	%	28	9,40		0,125	52	7,16		0,125	229,41		ó	125	181,89		0,125	+	36,60		0,125	123	3,14		0,125	153,	75	0	,125	151,26			
33 üt	ertragener Wä	rmestrom				2.512	αÜ	[kw]	4,2	1.6	40,0	47250,4	7,31	12	0'2	45995,3	21,17	228,0	-	₽	,95	169,0	-	7,1		96,0	0'0	4,5	42	6.0	0,0	25,3	170,		0'0	5,2	678,8	-		r
34 35				Brennst.	Schadst Äquival.	t Brenner Frischl.	Abluft	Reingas gesamt	Bypass	Reingas WÜ	Abluft	Reingas W22_A	Reingas Bypass	Reingas WÜ	Umluft	Reingas _Austritt	Reingas Bypass	Reingas U WÜ	mluft Re	ingas Rei ustritt By	ngas Reing bass Wi	gas Umlı	rft Reings _Austr	as Reinga itt Bypas	as Reinga s WÜ	s Umluft	t Reinga: Austrit	Reingas Bypass	Reingas WÜ	Umluft	Reingas I _Austritt	Reingas F Bypass	Reingas WÜ	Umluft R	eingas Rei Austritt By	ingas Rei pass V	ngas Frisch /Ü Ab ZV	I.+ Reinga /TAustri	tt zur TN	_
36 VC	lumenstrom		[m <sup>3</sup> v/h]	207,6	19,1	0	16.279	16.486	692	15.793	16.279	16.486	15.280	1.205	21.569	16.486	12.995	3.490 2	3.894 16	.486 13	362 3.12	22.8	51 16.48	6 15.31	8 1.167	16.961	16.486	15.746	740	17.138	16.486	12.320	4.166	22.851 1	6.486 7.	.385 9.	00 10.00	0 16.48(	16.275	
37 Ma	ssenstrom		[luj/By]	165,2	15,23	0'0	20.693	20.874	876,7	19.997	20.709	20.874	19.348	1.526	27.438	20.874	16.454	4.420 3	395 20	.874 16	919 3.95	55 29.06	38 20.87	4 19.39	6 1.478	21.575	5 20.874	19.937	937	21,801	20.874	15.599	5.274	29.068 2	0.874 9.	351 11.	523 12.80	3 20.874	20.705	
38 Te	mperatur	Eintritt	[2]	20,0	467,6	20,0	467,6	ı.	752,6	752,6	205,0	ı.	509,7	509,7	88,9	ı	488,9	488,9 1	56,3	1	2,6 452	,6 185,	1	425,1	425,1	199,6	1	413,4	413,4	198,3	ı.	405,2	405,2	185,1	1	77,3 37	7,3 36,3	'	205,0	
39		Austritt	[2]	ı.	I.	ı.	ı.	752,6		498,8	467,6	509,7		239,7	105,0	488,9		322,5 1	82,0 4	52,6	314	,2 205,	0 425,1		279,6	210,0	413,4		263,4	205,0	405,2		300,2	205,0	377,3	18	2,6 221,	0 269,2	1	
40 sp	ezifische	Eintritt	[kJ/(kg+K)	1,946	2,562	1,009	1,064	ı.	1,110	1,110	1,039	I.	1,084	1,084	1,028	I	1,082	1,082	,035	÷	1,07	8 1,03	- 2	1,075	1,075	1,039	1	1,074	1,074	1,039	I	1,073	1,073	1,037	-	,070	1,01	-	1,0393	
41 🕅	ärmekapazität	Austritt	[kJ/(kg+K)	1	I	ı	ı	1,110		1,083	1,065	1,084		1,056	1,030	1,082		1,064 1	,037	078	1,06	54 1,03	9 1,075	10	1,060	1,040	1,074		1,058	1,039	1,073		1,062	1,039	0/0/1	2	1,02	8 1,059	I.	
42 Ka	nazitätsstrom	tiutui	[(4+X)/[7]]	322	39	0	22.022	ı.	973	22.198	21.523	ı.	20976	1.655	28.214	ı	17803	4.782 3	1.448	1	240 4.26	34 30.1	1	20854	1.589	22.412	1	21412	1.006	22.644	ı	16740	5.660	30.155	1	007 12.	331 12.97	۱ ۳	21.523	
43		Austritt	[(4+X)/[?9]	ı.	I.	ı.	ı.	23.171		21.657	22.061	22.631		1.611	28.255	22.585		4.704 3	1.522 22	504	4.20	96 30.2	11 22.44		1.567	22.434	1 22.417		991	22.658	22.399		5.602	30.211 2	2.338	12.	098 13.18	8 22.102	1	
44		Eintritt	[kW]	1848,6	175,3	0'0	2.860	i.	203,5	4.641	1.226	1	2970,1	234	697	I.	2417,9	649 1	366	- 22	93,3 53(	6 1.55	-	2462,	7 188	1.243	1	2458,8	116	1.247	1	1884,3	637	1.550	1	948,9 1.2	131	1	1.226	
45 Er	ardiestrom	Austritt	[kW]	1	I	ı	ı	4.844	0'0	3.001	2.866	3.204		107	824	3.067		421 1	.594 2	829	8	7 1.72	0 2.650		12	1.309	2.574		73	1.290	2.521		467	1.720	2.341	9	14 810	1.653	1	
46	2	Differen	rz [kW]	1846,8	I		I	ı	0'0	1.640	1.640		0'0	127	127,0		0,0	228	28,0	_	16 16	9 169	_	0'0	8	66,0		0'0	43	43,0		0'0	170	170,0	-	<b>0,0</b>	79 678,			
47		Verlust	[kW]	40,0			4844,3							67		10	_	411		10	8	2	₽		112		₽		63		9		457		10	0	04	₽		

Tabelle A 7.2.2-1: Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemessenen Istzustand (Volllastbetrieb)

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Z   AA   AB   AC   AD   AE   AF   AG   AH   AI   AJ   AK   AL   AM   AN   AO		Aburt Lurt Zulut: Zulut Trocknei FL-WT Aat AHZ	0.1str. $[m_3^Mh]$ 16.750 9.780 6.831 0	astr. [k@n] 21.317 12.551 8.766 0	ampe. Eintritt [10] 210,0 36,3 25,0 0	tur Austritt (10)	282. Einintitt (kullikonki) 1,03894 1,01078 1,00977 1,0194 ämtek		monthshift (knike)	Eintritt [kw] 1.292 128 61 0	1ergie-Austritt (kM)	Differenz kwj	Verlust Rwy	Umbut W031 25,0 25,0 Summe WÜ 312.0	Umurt WU 32 110,0 110,0 FFISCHURT AUSS. 663,9 Imilit Will 23 400.0 400.0 Eurone Geener 275.0	Ummur wood 10000 10000 Summe desame 9/5,9		Umbtt W0 36 1750 1750		Wärneübertrager W34 Wärneübertrager W35 Wärneübertrager W36 Frischluftwärneübertrager W37	Umluft Aufheizzone 4 Umluft Haltezone 1 Umluft Haltezone 2 Frischlufterwärmung	27,00 27,00 27,00 27,00	80 80 250	2,78 54,00 0,79 4,15 54,00 0,79 14,86 54,00 0,79 26,81 36,84 0,79	2.64 3.85 11.65 15.22 	111 WU 204,0 04,7 2011 WU 203,7 / 0,1 2011 WU 203,2 2011 WU 211,7 100,1 115 14194 0.105 155.50 0.105 187.71 0.105 1711	<b>22</b> 300 0,0 <b>3,7</b> 47,0 0,0 <b>18,5</b> 175,0 0,0 <b>39,0 68</b> 3,8	eingas Reingas Nanutri Reingas Reingas Reingas Nanutriti Bipass NuU - Umutri Bipass NU - Austriti Bipass NU -	6.606 376 16.961 16.962 16.358 625 17.138 16.982 13.842 3.140 22.851 16.962 10.354 6.629 9.780 16.982 16	1.027 4.76 21.565 21.503 20.712 791 21.811 21.503 17.527 3.576 29.081 21.503 13.109 8.383 12.551 21.503 2	474.6 474.6 205.3 - 468,7 468,7 197,7 - 460,2 460,2 184,5 - 432,7 432,7 36,3 - 2	Z70,0 210,0 468,7 275,7 205,0 460,2 317,8 205,0 432,7 172,4 221,0 331,1	1,080 1,080 1,038 - 1,080 1,080 1,088 - 1,079 1,079 1,079 - 1,077 - 1,076 1,076 1,011 - 1,	1,059         1,080         1,060         1,028         1,076         1,076         1,049         1,028	22717 514 22.416 - 22364 854 22.634 - 18909 4.290 30.142 - 14105 9.031 12.686 - 2	504 22.425 23.218 838 22.649 23.199 4.230 30.199 23.136 8.803 12.898 22.906	- 921 C0011 Fricco1 - C4021 846 Fritz - C4121 11 01112 - 8121 00 10202 2012 2021 2021 2021 2021 20	00 30 300 0.0 47 470 0.0 175 175.0 0.0 664 683.9	
	J K L L M N O P O P O R S T urg Istzustand 2012-06 715 °C Leerlauf	 Berechnungsn	estrung vol.% 0, 1, 1, 14,0, co co, so, ch, C,14, Summe Energiebadart k	0,37 0,00 3,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00	20,37 0,00 3,00 0,00 0,00 0,00 0,00 0,00	20,37 0,00 3,00 0,00 0,00 0,00 0,00 100 Massenstrom	0,01 0,00 0,00 0,00 1,63 0,00 <i>87,3</i> 5 1,15 100 Temperatur	20,83 0,00 0,80 0,00 0,00 0,00 0,00 100 100	17,64 0,00 5,40 0,00 1,27 0,00 0,00 0,00 100 Spez. Warmekap.	Auffreizenergiebee	Trockner	Temperatur	Karossen+Skid	Zuluft/Abluft	onzentration 0 bei 16.750 Unrudt Aufheizzor	orizentration [g/m <sup>*</sup> /J] 0 Erdgasaqwalent Schadst. [kGe <sub>g</sub> /kgs] 0,780 Umlurt Autheizzor Unduk Autheizzor	Umult Aumerzor (vi 746 Lambda Branner A Uzundienwerd Umuli Aufledizzor	VOTABILIA DELINA DELINA ARX/Votinetration Delina De	75.2.6. Verlust-Wärmestrom [kWI] 40 % 14.95% Summen	Berechnungsmodul Prozesswärmeerzeugung A30	Abluftvorwärmer W22 Wärmeübertrager W31 Wärmeübertrager V	Ablutivomärmung rekuperatuv Umluft Aufheizzone 1 Umluft Aufheizzone	27,00 27,00 27,00	210,0 80 80	54,18 55,99 0,79 1,63 53,78 0,79 7,46 53,78	27,54 1,58 6,55 2014	ptass 200,3 231,1 24011 WU 440,7 73,0 24011 WU 326,0 123,1 % 287,47 0.155 107,39 0.125 200.08	<b>49</b> 1.662.3 48920,0 <b>1,13</b> 25,0 48600,0 <b>7,72</b> 110,0	aingas Reingas Reingas Reingas Reingas Reingas Reingas Reingas Umbutt ypass WÜ Abutt W22,A Bypæss WÜ Junkitti Bypæss WÜ	832 16.150 16.750 16.982 16.791 192 21.560 16.982 15.670 1.312 23.883	153.62 20.449 21.317 21.503 21.260 243 27.438 21.503 19.842 1.661 30.395	752,6 752,6 210,0 - 513,7 513,7 101,8 - 508,6 508,6 169,6	501,1 468,8 513,7 177,4 105,0 508,6 294,8 182,0	1,110 1,110 1,039 - 1,085 1,085 1,029 - 1,084 1,084 1,035	1,083 1,064 1,085 1,049 1,029 1,084 1,061 1,036	1170 22.699 22.147 - 23058 263 28.226 - 21509 1.801 31.462	22.151 22.688 23.321 255 28.234 23.309 1.763 31497	244,5 4./40 1.292 - 3.290,2 35 /96 - 3.035,4 234 1.492 0.0 3.083 2.954 3.328 13 823 3.293 1.444 1.562		
	B C D E F G H L I B B C B B E F I G B H L I B B B B B B B B B B B B B B B B B B	Stoffstromdaten / Eingangsdaten	V Norm V Betrieb Mass Temp DichteN DichteB Heizvent Zusammen m <sup>3</sup> , Mi m <sup>3</sup> , Mi Pophi [ YS] [ ggm <sup>3</sup> , J] [ ggm <sup>3</sup> , J] [ M <sup>2</sup> J]	Abluft, unb         16.750         29.628         21.317         210         1,273         0,719         -         76,63         2	Abluft, bel.         16.750         29.628         21.317         210         1,273         0,719         76,63         2	Abluft ZWT         0         0         0         1,273         1,273         76,63         2	Erdgas 233,10 318,43 185,55 20 0,796 0,742 40.237 9,86	Br. Luft 0 0,00 0 20 1,283 1,196 - 78,37 2	Heingas 1 16.982 63.775 21.503 752,6 1,266 0,337 – 75,68 Fr Luft W 9780 11.080 12.551 36.3 1,283 1,133 9,280	Fr_Luft K 6.831 7.456 8.766 25 1,283 1,176	Umbuft 1 21.670 30.000 27.438 105 1.266 0.915	Umluft 2 24.005 40.000 30.395 182 1,266 0.760	Umluft 3 22.851 40.000 29.081 205 1,273 0,727	Umluft 4 16.961 30.000 21.585 210 1.273 0.719	Umluft 5 17.138 30.000 21.811 205 1,273 0,727 Schadstoffk	Umutt 6 22.851 40.000 29.081 205 1,2/3 0,727 Schadstoffk	Schadst. U,U U,U U,U 2.10 U,/3601 U,/195 31.400	Mengenstrom Abgas	Auslegungswert [Auslegungswert] [Auslegu	Berechnungsmodul TNV-System A20	Brennkammer D21		Wärmedurchgangskoeffizient Auslegung ko	Wärmeübertragerliäche A [m³]	Wärmeübergangskoeffizienten Betrieb	I Wămedurchgangskoefiizient Betrieb Trommonstrucktromms Eindekt Austriet	Temperaturumerenz cumur Ausur (V) Dy Trebende log. Temperaturdifferenz 11100A AT (%)	Einhinft übentragener Wärmes tom 2.381 QÜ (kw)	Brennst, Schadst Brenner, Ablutt Brennst, Äguival, Frischt, nessemt B.	Volumenstrom [m <sup>3</sup> , /h] 233,1 0,0 0 16.750 16.982	Massenstrom [kg/h] 185,5 0,00 0,0 21.317 21.503 10	Eintritt [*C] 20,0 468,8 20,0 468,8 - 7	1 emperatur Austritt [rC] – – – – 752,6	spezifische Eintritt [kJ/(kgrK1)] 1,946 2,563 1,009 1,064 - 1	Wärmekapazität Austritt (ku/tvg-K)) – – – – 1,110	Eintritt [kJ/K+h]] 361 0 0 22.688 -	Austrift [ku/k/+h]] 23.869	. Emmitt (rw) 20/3,9 0,0 0,0 2,304 4,990	Energiestrom Differenz R.VII 2073 9	

Tabelle A 7.2.2-2: Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemessenen Istzustand (Leerlaufbetrieb)

A B C		ш	L L		F	Ĥ	×	Ĥ	2					~	S	F	Π	٨	M	×	7	Z	AA	AB A	C A	D AI	E AF	AG	AH	A	AJ	AK	AL	AM AN	AO	AP	
1 Berechnung IN	V-Irockner		×	IL LINE	1, VW V.	Voltsbu	ĝ		lemp	eratura	DSenKu	ng auf 6	18 C VC	llast					Stand:	22.08.2	210:																
2 2 Stoffstromdaten / Fino	andaten														Beret	hnundsm	odul Tro	ockner 4	10																		
		Č			ł										1				2		ŀ			-	-	1	ř	-									
4 V NOrm V Bell 5 [m <sup>3</sup> ,h] [m <sup>3</sup> ,h	leb Mass		2/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] [kg/	med Heiz	Neur Lusa		H h	н	°00	3	3, S(	с С	ۍ ا	L Sumn	e Ere	giebadarf K	aros sen u	nd Skid	Karos- sen	Skid S	Summe			a pot	with the second se	MT Ka	un zun it AH	E N									
6 Abluft, unb 16.260 28.44	3 20.693	205	,273 0,	- 127	- 76,4	53 20,	37 0,0	0 3,6	0'0 00	),0 0,C	V'0 00	2'0 0'C	10 0,C	0 100	. Anzah	_			32,8	32,8	32,8 Vc	ol.str.	Ē	<sup>3</sup> <sub>N</sub> /h] 16.	272 10.	000 6.1	37 0										
7 Abluft, bel. 16.279 28.4:	7 20.709	205	272 0.	727	76,5	55 20,	35 0,0	10 3,C	0'0 00	1'0 OC	00 00	1'0 00	)'O 0,	0 100	Masse	je Einheit			300	250	550 Ma	a.str.	4	g/h] 20.	709 12.	833 7.8	76 0										
8 Abluft ZWT 0 0	0	•	,273 1,	273	76,5	55 20,	35 0,0	0 3,C	0'0	),0 OC	1 <sup>''0</sup> 00''	1'0 00	0,0	0 100	Masse	nstrom			9840	8200	18040 Te	impe- Ein	trit	°C] 20	5,0 36	3,3 25	<b>0</b>										
g Erdgas 157,64 215,	125,49	50	1,796 0,	742 40.5	237 9,8	10 91	01 0,0	0,0	0'0 00	30 1,t	63 0,	00 87,	35 1,1	5 100	Temp	ratur	Eintritt	ŝ	25	25	25	tur Aus	stritt	Ģ	· ·												
10 Br. Luft 0 0,0	0	50	,283 1,	- 196	- 78,	37 20,	.83 0,0	30 0,5	30 0,0	),0 OC	00	00 0'f	0,0	0 100	_		Austritt	2	180	180	180 Sp W	ez. Ein ärmek	tritt (kJA	kg•K)] 1,00	3931 1,01	1,00	977 1,020	201									
11 Reingas 1 16.436 54.9.	6 20.834 6	640,0	,268 0,	- 6/2	- 75,4	89 18,	,23 0,0	0 4,6	38 0,0	30 1,1	00	00 0'(	0,0 0,0	0 100	Spez	Wärmekap.	Eintritt	[kJ/(kg K)]	0,45	0,45	0,45	Au	stritt [kJ/	[(), [(), [(), [(), [(), [(), [(), [(),	· ·	-											
12 Fr_Luft W 10.000 11.3.	9 12.833	36,3	,283 1,	133	10.0	8										:	Austritt		0,5	0,5	0,5 Ka	apaz Ein	tritt SC	(K+h)] 21.	523 12.	971 7.9	53 0										
13 Fr_LUIT K 6.13/ 6.05	9/8/9	ß	,283 1,	9/1											Authe	zenergieber	art	[KW]	215,3	1/9,4	394,6	AUS	STITT	(IN•N)													
14 Umluft 1 21.670 30.0	0 27.468	105	,268 0,	916											Trock	ner		Eintritt	Austritt	ΞĦ	ľ	emie Ein	ŧ	57 57	526	10	0 0										
15 Umluft 2 24.005 40.0	0 30.429	182	,268 0,	761											Temp.	eratur	205,0	ΚŅ	kW	kW	1 tš	W MO	strift	M													
16 Umluft 3 22.851 40.0	0 29.068	205	1,272 0,	727											Karos.	sen+Skid		56	451	395		ΗÖ	ferenz	[M)													
17 Umluft 4 16.961 30.0.	0 21.575	210	,272 0,	719		_	_			1	_				Zuluft	Abluft		865	1226	361	360,7	Ver	rlust P	ĮV)	_												
18 Umluft 5 17.138 30.0	0 21.801	205	,272 0,	727	Scha	dstoffkor	rzentration		1,	2 b¢	ei 16.	260	_		Umluf	Aufheizzon	e 1	825	698	-127	_	Umluft W	j31	27,0 12	7,0 Sum	me WÜ	633	0									
19 Umluft 6 22.851 40.0	0 29.068	205	,272 0,	727	Scha	dstoffkon	zentration	u/6]	1 <sup>3</sup> 1,	2 Erdg	lasäqivale	nt Schads	t. [kg∈g/	kgs] 0,78	Julut 0.	Aufheizzon	e 2	1.595	1.367	-228	_	Umluft Wi	j 32	28,0 22	8,0 Frisc	chluft Ausg	9. 678	80									
20 Schadst 19,1 33,	15,2	205 0,	79601 0,72	702 31.4	100										Umluf.	Aufheizzon	e3	1.720	1.551	-169	_	Umluft W	j 33	59,0 16	9,0 Sum	nne Gesar	mt 1311	<u>ø</u>									
21	[m <sup>3</sup> ,/h] 1t	6.000 Rt	aktionstem	peratur (ar	1gezeigt)	2]	c] 60	8 Lamt	da Brenn	ter		0	Vorw	ärmgrad	Umlufi	Aufheizzon	e4	1.309	1243	<u>8</u>	_	Umluft Wi	j34 6	6,0 66	6,0 Frisc	chluft Neu	678	80									
Mengenstrom Abgas 22 Auslanumswort		ž	aktionstern	peraturfak	tor		956	% Verlu	ıstzahl bez	z. Reingæ	s [9	6] 0,5	æ		Umlufi	Haltezonen		3.011	2.798	-213	_	Umluft W	j 35 4	3,0	3,0 Sum	me WÜN	leu 633	0									
23	[kg/h] 2(	0.362 Rt	aktionstem	peratur (Bi	llanz)		640	,0 Verlu	st-Wärme	sstrom	[k]	V] 4	%] (	45,75	wwns %:	eu		9.381	9.334	-48	48	Umluft W	j 36 1	70,0 17	0'0			1									
24 Berechnungsmodul TI	V-System A2	20								Ben	echnun	npowst	Prozes	swärmee	Inguazie	1g A30																					
3			Brennkaı	nmer D21		-	Abluftv	orwärme	ir W22	_	Wärme	-übertrage	ir W31		Wärmeū	bertrager M	132	ŝW	<u>armeŭbert</u>	rager W33	_	Wärm	leŭbertra	ger W34		Wärme	übertrage	r W35	_	Värmeüb	ertrager W3	99	Frischluft	värmeüberti	ager W37		-
8	I					¥	Nbluftvorwä	imung re	kuperatuv	~	Umlut	t Aufheizzı	one 1		Umluft ,	Vufheizzone	2	П	Imluft Aufh	eizzone 3		Uml	uft Aufheiz	zone 4		Umlu	ft Haltezor	le 1		Umluft F	altezone 2		Fris	chlufterwärm	bur		
27 Wärmedurchgangskoeffizie.	t Auslegung			¥	0 [W/(m	<sup>2</sup> K)]	_	27,00		-		27,00				27,00			27,0	0			27,00				27,00			2	00'2			27,00		1	
28 Wärmeübertragerfläche				A	ĨĽ.	Ĺ		210,0				80				80			8				8				80				80			250			
29 Wärmeübergangskoeffizien:	en Betrieb			ಕ	0 [W/{m	<sup>(3</sup> K)]	53,1	15 54,	72 0,7	79	80	27 53,	85 0,7	6	20,9	3 53,85	0,79		20,60	54,00	0,79	0,	9'69 2'	4,00 0,4	79	6,6	30 54,0	0 0,79		29,38	54,00	0,79	ŝ	4,69 37,5	0,79		
30 Wärmedurchgangskoeffizie	It Betrieb			×	1 [W/(m	(%)]	[	26,96			ĺ	71,7			ſ	15,07			14,9	=		[	8,22			ſ	6,04			÷	9,03		[	22,25			
31 Temperaturdifferenz Eintritt/	Austritt		۶.	T <sub>ein</sub> ⊿T <sub>i</sub>	aus [10	) Bypi	ass 226	i,7 230	3,3	mnz	WÜ 33:	9,1 134	6'1	zum V	VÜ 240;	9 145,3		zum WÜ	180,9	108,6	nz	m WÜ 1	47,9 6	4,3	mnz	WÜ 141	1,0 51,		zum WI	J 132,6	93,1	21	um WÜ 🛛	8,2 163,	(0		
32 Eintritt	terenz		1,05	1445 <b>A</b>	۳ ک	۰ ۲	ي.	228,52		0,1	25	221,52		0,12	ι. Ω	189,06		0,125	141,	87	U	0,125	100,39		0,1	25	88,95		0,125	Ξ	1,68		0,125	122,07			
33 übertragener Wärmestrom	L		2.16	99 90	Ü RM	۷] <b>4</b> ,	2	1.293,9	4315	56,7 9, <b>I</b>	08	127,0	4188	2,6 29,4	5	228,0		28,86	169,	0		11,1	66,0	0	0,7		43,0	0'0	45,2	-	20,0	0'0	99,3	678,9	-		
8	ă	rennst Ä	shadst Bre Juival. Fris	mer Abl chl. Abl	uft Rein gesa	gas Reir unt Byp	rgas Rein ass WL	gas Abl	uft W22	1gas Reir 2_A Bypi	ngas Reir ass W	igas Um	luftAus	gas Reinç tritt Bypa	tas Reing ss WÜ	as Umluft	Reingas _Austritt	Reingas Bypass	Reingas WÜ	Umluft	leingas R Austritt B	eingas Re ypass V	ingas Ur NÜ	nluft _Au	ngas Reir istritt Byp	ngas Rein bass W	igas Umli Ü	uft Reing: _Austr	ts Reinga itt Bypast	s Reinga:	Umluft	Reingas R Austritt E	leingas Re Bypass	ingas Frisch NÜ Ab ZV	I.+ Reinga /T_Austri	Abluft tt zur TNV	
36 Volumenstrom	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> h] 1:	157,6	1,9,1	0 16.2	279 16.4	39 96	30 15.7	46 162	279 16.4	14.5	943 1.4	93 21.5	93 16.4	36 11.55	35 4.84	1 23.920	16.436	11.693	4.743	22.851 1	16.436	4.610 1	.827 16	.961 16.	436 15.	269 1.1	67 17.1	38 16.43	9.002	7.434	22.851	16.436	110 16	:326 10.00	0 16.436	16.279	1 -
37 Massenstrom	[kg'h] 1.	125,5	5,23 6	,0 20.6	593 20.8	134 875,	.031 19.9	69 20.7	709 20.8	334 18.5	941 1.6	193 27.4	168 20.6	34 14.65	38 6.13.	30.429	20.834	14.822	6.013	29.068 2	20.834 1	8.519 2	.315 21	575 20.	834 19.	355 1.4	79 21.8	01 20.83	4 11.411	9.424	29.068	20.834	140 20	12.83	3 20.834	20.709	
38 Temperatur	[0]	20,0	13,3 21	9,0 415	1	64	0,0 640	1,0 205	- 0'5	4	4,1 44.	4,1 89	- 0,	422,	9 422,	9 156,4	ī	385,9	385,9	185,2	1	357,9 3	57,9 19	9'66	8	6,0 346	5,0 198	۱ رو	337,6	337,6	185,1	ı	309,2 3	36,3	'	205,0	
39 Austri	t ['C]	ī	I		- 640	0'0	435	13 410	3,3 444	<del>1</del> ,1	ର୍ଷ	3,9 105	5,0 422	6	301,	5 182,0	385,9		293,8	205,0	357,9	Ñ	63,9 2	10,0	6,0	249	9,9 205	0 337,6	~	278,1	205,0	309,2	-	99,9 221,	199,0	T	
40 spezifische Eintrit	[kJ/(kg+K)] 1	1,946	3,485 1,4	009 1,0.	- 69	1,0	194 1,00	34 1,0	1	- 1,0	174 1,0	174 1,0	- 28	1,07	2 1,07.	2 1,035	I	1,068	1,068	1,037	1	,065 1	,065 1,	680	-	64 1,0	64 1,03	1 6	1,063	1,063	1,037	ı	1,060 1	060 1,01	-	1,03931	-
41 Wärmekapazität Austri	t [kJ(kg+K)]	ı	I	,	- 1,0	94	1,0	73 1,0	60 1,0:	174	1,0	151 1,0	30 1,0	72	1,05	1,037	1,068		1,058	1,039	1,065	-	,055 1,	040 1,0	964	1,0	54 1,03	1,060		1,057	1,039	1,060	-	049 1,02	3 1,049	I	
42 Kanazirätestrom	[(++X)/[*]]	244	8	0 21.5			58 21.8	144 21.5	523 -	- 205	340 2.0	132 28.5	- 545	1575	1 6.57	31.483	I	15826	6.420	30.155	-	9720 2	.466 22	412	- 205	586 1.5	74 22.6	44	12127	10.015	30.155	ı	148 2	.933 12.97	1	21.523	
43 Austri	t [kJ/(K+h)]	ī	I		- 22.6	102	21.4	15 21.5	948 22.3	372	1.5	190 28.2	22.5	26	6.49	31.557	22.246		6.363	30.211 2	22.186	61	.443 22	.434 22.	160	1.5	59 22.6	58 22.14	0	9.957	30.211	22.081	5	.702 13.18	8 21.847	'	
44 Eintrit	- [kw] 1-	403,9	74,5 C	,0 2.5	- 15	. 17.	0,3 3.86	33 1.2		- 250	19,0	51 65	0	1850	2 772	1.367	1	1696,5	688	1.551	-	9,096	245 1.	243	- 197	8,5 15	1 1.24	-	1137,4	606	1.550	ı	12,7 1	884 131	1	1.226	
45 Energiestrom Austr.	t [kw]	ı	I		4.0	54 0,	0 2.5	39 2.5	20 2.7	200	#	34 82	5 2.6	8	54	1.595	2.385		519	1.720	2.206	-	179 1.	309 2.1	130	₽ ₽	8 1.25	0 2.07	_	769	1.720	1.897	-	205 810	1.208	ı	
46 Č Differ	inz [kw] 1.	402,6	ı	,	·	Ő	<b>0</b> 1.2	94 1.2	94	Ó	4 0	27 12.	0,	0'0	228	228,0		0,0	169	169,0	1	0'0	999	6,0	0	o, ¥	43		0,0	170	170,0	٦	0,0	579 678		_	
47 Verlu:	t [kw]	40,0		405	3,6					_	÷	4	Ĩ	_	534		9		509		<del></del> 9	_	169	-	0	õ		₽		759		9	-	195	₽		_

Tabelle A 7.2.3-1: Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturabsenkung auf 608  $\odot$  (Volllastbetrieb)

A	B	٥	ш	E E	5	н		ſ	- -	2	4		4 C	o	8	s	F	n	>	M	×	>	Z	AA	AB A	VC A	D AI	E AF	: AG	AH	AI	ΓY	AK	AL	AM	AN A	AP C	
- B	rechnung TNV-T	rockner		¥	CTL Linie	e 1, VW	Wolfsbi	urg	Ter	mperatu	rabsenk	kung aut	575 °C	- FL 193	°C Volli	Ist				Stand:	22.08.2	012																
2 3 Stoffstro	mdaten / Eingang	sdaten														Bere	chnungsn	nodul TI	rockner	410																		
4 5	V Norm V Betrieb [m <sup>3</sup> , <sup>th</sup> ] [m <sup>3</sup> , <sup>th</sup> ]	Mass T [kg/h]	emp Dic (°C) [kg/	hteN Dick /m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] [kg/	theB Hei: (m <sup>3</sup> e] [kJ	izwert Zus	N2 N2	setzung 02 F-	4 H	0 0	0	ත් ව	5 22	r r	le Sumr	ne Ener	rgiebadarf F	Karossen L	Ind Skid	Karos- sen	Skid S	lumme			At Troc	buft L ckner FL-	uft Zul WT ka	Iuft Zult. it AHZ	4 2									
6 Abluft, uni	<b>16.260</b> 28.463	20.693	205 1.	273 0.7	727	- 76	3,63 2!	0,37 0,	00 3/	y'0 00	10 90 00	0 00	10 00	0 0'C	0 10(	h Anzah	-			32,8	32,8	32,8 Vc	ol.str.	<u>د</u> ،	1 <sup>3</sup> /h] 16.	.272 10.	000 6.1.											
ADIUIT, DE ADIUIT ZW	10.2/9 28.49/	60/-02		272 U.	121	2 22	155 21	0 0 139 0	5 00 00						10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,	Masse	s je Einneit nstrom			300	002 002	180.40 M	a.str.	tinter -	10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10,	./U9 12.	833 / 8	0 0										
9 Erdgas	142,71 194,96	113,60	20	7.0 867	742 40.	.237 9,	86 0	101 0	00	00 00	00 1/4	63 0,	00 87	35 1,1	5 100	Tempe	sratur	Eintritt		25	25	25 rai	iur Au	stritt	1 . 5 5	2 1	2 1	2   2										
10 Br. Luft	00'0 0	0	20 1,	283 1,1	196	- 78	3,37 21	0,83 0,	00 00	80 0,	v'0 00	0 00	)'0 00	0'0 0,0	0 100			Austritt	ç	180	180	180 Sp	<sup>lez.</sup> Eli ärmok	ntritt (k.J.	(kg+K)] 1,0;	3931 1,01	1078 1,00:	1,02C	200									
11 Reingas 1	16.421 52.808	20.822 6	05,3 1, 16.3 1,5	268 0.5	394	- 75. 10.	5,95 1:	8,41 0,	00 4,	72 0,	00	,92 0,	10 00	0,0	10(	) Spez.	Wärmekap	. Eintritt Austritt	[kJ/[kg K]]	0,45	0,45	0,45	armen. AL	stritt (kJ	(kg+K)] 21.	- 523		, 8										
13 Fr_Luft K	6.137 6.699	7.876	25 1.2	283 1,1	176	2										Aufhei	zenergiebe	darf	[kW]	215,3	179,4	394,6 Sti	and Au	istritt (k.)	((K+h))			· ·										
14 Umluft 1	21.670 <b>30.000</b>	27.478	105 1,2	268 0,5	916											Trock	ner		Eintritt	Austritt	Diff		تت	ntritt [	kw] 1.2	226 1:	31 5:	2										
15 Umluft 2	24.005 <b>40.000</b>	30.439	182 1,	268 0,5	761											Tempe	eratur	205,0	kW	kW	kW	1 문 문	om AL	stritt [	[WV]	1	1											
16 Umluft 3	22.851 <b>40.000</b>	29.068	205 1,	272 0.7	727											Karos:	sen+Skid		56	451	395		Ō	ferenz [	[WN]													
17 Umluft 4	16.961 30.000	21.575	210 1,	272 0,	719			_								Zuluft/.	Abluft		760	1.226	465	360,7	Vé	irlust [	[WN]	+	-	_	-1									
18 Umluft 5	17.138 30.000	21.801	205	272 0.	727	Sch	radstoffko	nzentratio			2 1 1	ei 16.	260			Umluft	t Aufheizzoi	ne 1	825	677	-148	-	Umluft W	0.31	27,0 14	47,9 Sun	nme WÜ	633	0.									
19 Umluft 6	22.851 40.000	29.068	205	272 0.	727	Sch	nadstoffkc	nzentratio	1/6] u	m <sup>k</sup> ] 1,	,2 Erdç	gasäqivalk	ent Schadt	t. [kg <sub>Eg</sub>	kgs, 0,78	0 Umlut	t Aufheizzoi	ne 2	1.596	1.330	-266			U 32	28,0 26	35,6 Fris.	chluft Ausç	g. 678	<b>Q</b>									
20 Schadst.	19,1 33,1	15,2	205 0,7	9601 0,72	2702 31.	.400										Umluf.	t Aufheizzor	ne 3	1.720	1.523	-197		Umluft W	- - 133	69,0 15	96,9 Sun	nme Gesar	mt 1311	1,8									
21 Menoenstre	m Ahras	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> <sup>th</sup> ] <b>1</b>	6.000 Re٤	aktionstem	nperatur (a	angezeigt)	_	<b>2</b>	<b>75</b> Lam	ibda Breni	ner		5	Vorv	ärmgrad	Umluf.	t Aufheizzoı	ne 4	1.309	1.232	L-		Umluft W	034	26,0 7	6,9 Fris	chluft Neu	574	4									
22 Auslegung	swert		Re	aktionstem	peraturfa	aktor		ő	5% Verl	ustzahl be	ez. Reinga	as Se	- 	ю		Umluf	t Haltezone	_	3.011	2.762	-248			U 35	13,0	0,1 Sun	nme WU N	leu 737	4									
23		[kg/h] 2	0.362 Ret	aktionstem	nperatur (E	Bilanz)		98	5,3 Verl	ust-Wärm	estrom	ž.	4 (M	š (	45,8%	% Summ	len		9.278	9.202	92-	76	Umluft W	U 36	70,0 15	98,0												
24 Berechn	-ANI Inpomsbun	system A:	R				┢		ŀ		Rei	rechnun	gsmodu	<b>Prozes</b>	swarme	inguaria	ng A30					┢																
55				brennka.	mmer uz			ADIUT	vorwarm	er wzz		Warm	eupertrag	er w31		warmeu	Dertrager .	7.27	\$	armeuber.	trager w.s.	~	Wari	neubertra	iger w34		warme	subertrage	CS W 32		warmeup	ertrager w	8,			ertrager w	2	
38							_	Abluttvorw	/armung r	ekuperatu	2	nimo	It Autheizz	one 1	+	Umlutt,	Autheizzon	82	_	Jmlutt Aufr	eizzone 3	†	5	utt Autheiz	zzone 4	+	nimu	uft Haitezoi	le 1		Omlutt	Haltezone 2		۲ –	Ischlutterwa	ßunm	1	
27 Wärmedur Wärmeühe	chgangskoeffizient Ai	nslegung				چ	(m <sup>2</sup> K)]		27,00				27,00				27,00			27,4	8			27,00				27,00			7	00,7,00			27,00			
28 Warmeuot	rirageniache vionde onffizionton B	Jotriah				- 1	[m]	8	210,0	20	70	÷	00 14	<b>r o</b>	-	10 20	00	0.70		00 00 00	2400	02.0		4 E4 E	• •	ę	, e	00 DE E4.0	07.0		54 50	00 2	02.0		ne7		ę	
29 wameuu 20 Wärmedur	thrancekoeffizient Be	trieb				90 14 10 14	(m RJ)	3	26.96	<b>, ,</b>	R	-	853	<b>'n</b>	ņ	0,12	+ 30,00 18.35	e / 'n		19.5	n, tr	e1,0		11.44	B	61	Ď.		5 <b>5</b>		on'+n	7.14	0,13		22.28	n.	p	
30 Temperatu	differenz Eintritt/ Aus	tit		Þ	T <sub>ein</sub> AT		CI BVD	ass 20	8.7 21	1.0	mnz	WÜ 31	9.1 135	5	V muz	VÜ 217.6	3 148.6		zum WÜ	151.5	107.1	nz	m WÜ	13.9 5	66	ZUM	WÜ 105	5.1 46.8	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	Zum W	Ü 95.6	87.0		zum WÜ	74.4 1	88.4		
treibende 1	og. Temperaturdittere	zui		18	3971 A			8	209,88	<u>+</u>	0.1	125	216,78	-	0.12	5	180,91		0.125	128,	10	i 3	1.125	84,04	-	0	25	72.07	1	0.125	6	1,20		0.125	103,13			
33 übertragen	er Wärmestrom			1.98	37 C	. ≚ 	, M	4,2	1.188,2	4191	19,0 11,	<i>TT</i> ,	147,9	4044	3,0 42,2	4	265,6		46,18	196,	6		18,5	76,9	0	1,0,0	1	50,1	0'0	99,1	-	98,0	0'0	99,9	574,4			
88		Bri	ennst. Scl Äqu	hadst Bre uival. Fris	anner Ab schl.	bluft ges	ingas Re samt By	ingas Rei. pass W	ngas Ab /Ü	Nuft Reir W2:	ngas Reir 2_A Byp	ngas Rei vass W	ngas Um /Ü	luft Rein _Aus	gas Reinč tritt Bypa	las Reing. ss WÜ	as Umluft	Reinga: _Austrit	s Reingas t Bypass	Reingas WÜ	Umluft	Reingas R. Austritt B	eingas R. ypass	eingas U w.Ü	mluft _Au	ingas Rei ustritt Byr	ngas Rein xass W	igas Umli Ü	uft Reing _Aust	as Reinga ritt Bypas	as Reinga s WÜ	s Umluft	Reingas _Austritt	Reingas F Bypass	teingas Fri WÜ Ab	chl.+ Reir ZWT _Au	gas Ablu stritt zur T	ų≷
36 Volumenst	mo.	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h] 1.	42,7 1:	9,1 (	0 16.	.279 16.	.421 6	390 15.	732 16.	279 16.4	421 14.	489 1.5	332 21.(	\$00 16.4	21 9.46	0 6.94	1 23.928	16.421	8.839	7.583	22.851	16.421 1.	3.379 3	1042 16	3.961 16.	.421 14.	436 1.9	85 17.1.	38 16.42	21 145	16.276	3 22.851	16.421	20	16.401 10	.000 16.4	16.2	62
37 Massenstre	Ē	[kg/h]	13,6 15	5,23 0	),0 20.	.693 20.	.822 87.	4,532 19.	948 20.	709 201	822 18.	372 2.4	450 27.4	178 20.6	12.0.	21 8.80	1 30.439	20.822	11.207	9.615	29.068	20.822	6.965	1857 21	1.575 20.	.822 18.	306 2.5	17 21.8	101 20.82	22 184	20.635	29.068	20.822	26	20.797 12	.833 20.1	822 20.7	60
38 Temperatu	Eintritt	[0]	20,0 35	96,5 2t	6C 0'0	96,5	9	05,3 60	5,3 20	20	42	94,1 42	14,1 86	۱ رو	399	9	6 152,1	1	356,5	356,5	181,9	i i	323,9	1 23,9	97,9	31	0,1 31(	0,1 197	N	300,6	300,6	181,8	I.	267,4	267,4	6,3	205	0
ଞ	Austritt Eistritt 8	[%]	1 970			1 2	05,3	41	6,0 35	6,5 42,	4,1	22	5,4 10.	296 0'0	9,6	300,	7 182,0	356,5	100 1	289,0	205,0	323,9	, • • •	57,8 2	10,0 31	10,1	24	4,0 205	000'	9	268,7	205,0	267,4	1 055	174,7 1 4 AEE	3,0	1	*0
40 spezifisch: 44 Wärmekap	azität Austritt li	- [N-Ruhan]	ι Γ	e '	- ·	1	- 060	10	70 1.6		14		201	30 1.06	5 	1.056	3 1.037	1.064	±00'	1.057	1.039	1.060	1	054	040 1.(	028	10,1	52 1.03	39 1.05	- 8	1.055	1,039	1.055	200,1	1.045	025 1.0	42	5
40	Eintritt	[kJ/(K+h)]	21	37 (	0 21.	876	1	153 21.	737 21.	523	- 196	572 2.6	323 28.5	148	1284	1 9.401	1 31.481	. 1	11922	10.228	30.146		7989 4	.090	409	- 19.	385 2.6	65 22.6	- 1 - 1	194	21.836	30.146	. 1	27	21.933 12	- 12	21.5	ន
43 Kapazitäts	strom Austritt	[(v-)/(K+h)]				1	.690	21.	342 21:	913 222	296	2.5	573 28.2	36 22.2	42	9.312	2 31.568	22.150		10.161	30.211	22.080	4	.064 22	.434 22.	.050	2.6	.48 22.6:	58 22.03	00	21.765	30.211	21.960		21.739 13	.155 21.	762 -	
44	Eintritt	[kW] 12	270,9 17	74,3 0	1,0 2.4	410	÷ ۱	60,2 3.6	355 1.2		- 231	17,7 31	09 67	7 -	1425	3 1.04	3 1.330	I	1180,5	1.013	1.523	÷	618,3	368 1	.232	- 16	39,9 23	30 1.24	∣ ç	16,2	1.823	1.522	I	2,0	1.629	31	- 1.22	90
45 Enerriactro	Austritt	[kW]	I			1	815	0,0 2.4	167 2.4	414 2.6	327	÷	61 82	5 2.4	39	778	1.596	2.193		816	1.720	1.986		291 1	.309 1.4	899	1	79 1.25	90 1.83	6	1.625	1.720	1.631		1.055	05 1.0	47 -	
46	Differenz	[kW] 12	269,7	ı		1	-	0,0	188 1.1	188	Ó	1.	48 14	<sup>2</sup> ,9	0,0	266	265,6		0'0	197	196,9		0,0	1 11	76,9	•	<b>,0</b>	.0 20,	-	0'0	198	198,0		0,0	574 5	'4,4		
47	Verlust	[kW]	¢0'0		38:	14,9		_		_		4	51	μ	~	768		10		806		10		281		9	16	65	10	_	1.615	ļ	9	_	1.045	÷	0	

Tabelle A 7.2.3-2: Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturabsenkung auf 575 C (Volllastbetrieb)

Ermittlung des Volumenstromes	
Messgröße	Messverfahren / Messgeräte
Strömungsgoschwindigkoit	Prandtl-Staurohr (Airflow Lufttechnik GmbH)
Strontungsgeschwindigkeit	Digitalmanometer (Furness controls)
Feuchte	Kapazitiver Fühler (Testo 650)
Temperatur	Thermoelement (NiCr-Ni)
Gas- und dampfförmige Emission	nen
	Flammenionisationsdetektor (Bernath Atomic, BA
organischer gebundener Kohlen-	3006K)
stoff (org. C)	Messbereich: 0-100 ppm
	Kalibriergas: Propan 95 ppm; Luft
Hauptkomponentenbestimmung	Probenahme auf Silica- und Aktivkohleröhrchen
diskontinuierlich	Analytik: Gaschromatographie/FID
Hauptkomponentenbestimmung	Multikomponenten FT-IR Gas-Analysator
kontinuierlich	Gasmet DX 4000N
HCI	Probenahme in bidest. H <sub>2</sub> O, Analytik mittels Ionen-
	chromatographie
HE	Probenahme in Natronlauge, Analytik mittels Ionen-
	chromatographie
Formaldehyd	Probenahme in DNPH in Acetonitril, Analytik mit HPLC
Benzol	Probenahme auf Aktivkohle, Extraktion mit CS <sub>2</sub> und
	Analytik mittels GC-FID
Aldehyde	Probenahme in Acetonitril, Analytik mit HPLC
Essigsäure Ameisensäure	Probenahme in Natronlauge, Analytik mittels Ionen-
	chromatographie
SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub>	nasschemisch, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Ionenchromatographie
Gesamtschwefel	nasschemisch, Natronlauge, CP
CH <sub>4</sub>	Probenahme Beutel, GC
staubförmige Emissionen	
Gesamtstaub	Isokinetische Probenahme auf Quarzfilter, Wägung
an Staub gebundene und filter-	Isokinetische Probenahme auf Quarzfilter und in Salpe-
gängige Metalle	tersäure und Kaliumpermanganat
Silioium	Isokinetische Probenahme Waschflaschen, nassche-
Silicium	misch
Datenerfassung und -auswertung	
kontinuierliche elektronische Da-	Delphin Topmessage
tenerfassung	Messhaussoftware V. 3.5
Auswertung	Microsoft Excel X für Mac

Tabelle A 7.3.1-1: Auflistung der eingesetzten Mess- und Analysentechnik

#### Tabelle A 7.3.1-2: Chromatogramm Aktivkohle bei 715 °C, KTL-Linie 2

#### CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by	: Kiefer
Analyzed	: 12.07.2012 18:01:10
Sample Type	: Unknown
Sample Name	: 12062912
Sample ID	: BTX-Rein_5A_V3
Injection Volume	: 1.000
Data File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062912_BTX-Rein_5A_V3_12.07.2
Method File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SilMS_Screen_CS2.qgm
Report File	
Tuning File	: C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]	
12062912, BTX-Reing	as 5 A,
Projekt: VW-WOB, 25	60
Messstelle: KTL Reing	as am 28.06.2012
Temp.: 715 °C	
Start: 10:57 Uhr bis 11	:28 Uhr
A-Kohle, Typ G am 02	.07.2012, Teil A
mit 5 mL CS2 versetzt	und für 1 Std. geschüttelt
Säule: Rxi-5 Sil ms, 60	) m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 µm
von Restek, SerNr. 9	95332
Det.: 1,45 kV	
Modified by	: Admin
Modified	: 13.07.2012 10:10:57

Chromatogram 12062912 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062912\_BTX-Rein\_5A\_V3\_12.07.2012\_3.qgd



#### Tabelle A 7.3.1-3: Chromatogramm Silicagel bei 715 °C, KTL-Linie 2

10.0

. .

CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by	: Kieter
Analyzed	: 12.07.2012 21:09:22
Sample Type	: Unknown
Sample Name	: 12062904
Sample ID	: Silicium-Rein_5A_V3
Injection Volume	: 1.000
Data File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062904_Silicium-Rein_5A_V3_12.0
Method File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SilMS_Screen_CS2.qgm
Report File	:
Tuning File	: C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]	
12062904, Silicium, org	janReingas 5 A,
Projekt: VW-WOB, 256	0
Messstelle: KTL Reinga	as am 28.06.2012
Temp.: 715 °C	
Start: 10:57 Uhr bis 11:	28 Uhr
A-Kohle, Typ G am 02.	07.2012, Teil A
mit 5 mL CS2 versetzt	und für 1 Std. geschüttelt
Säule: Rxi-5 Sil ms, 60	m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 μm
von Restek, SerNr. 99	15332
Det.: 1,45 kV	
Modified by	: Admin
Modified	: 13.07.2012 10:14:25

Chromatogram 12062904 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062904\_Silicium-Rein\_5A\_V3\_12.07.2012\_6.qgd



Peak# R.Time Area Area% Name 1 31.136 1189517 100.00 Blindwert: Weichmacher (Diethylphthalat) 1189517 100.00

#### Tabelle A 7.3.1-4: Chromatogramm Aktivkohle bei 650 °C, KTL-Linie 2

#### CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by	: Kiefer
Analyzed	: 12.07.2012 19:04:19
Sample Type	: Unknown
Sample Name	: 12062913
Sample ID	: BTX-Rein_6A_V3
Injection Volume	: 1.000
Data File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062913_BTX-Rein_6A_V3_12.07.2
Method File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SilMS_Screen_CS2.qgm
Report File	:
Tuning File	: C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]	
12062913, BTX-Reinga	as 6 A,
Projekt: VW-WOB, 250	60
Messstelle: KTL Reing	as am 28.06.2012
Temp.: 650 °C	
Start: 12:27 Uhr bis 12	:58 Uhr
A-Kohle, Typ G am 02	.07.2012, Teil A
mit 5 mL CS2 versetzt	und für 1 Std. geschüttelt
Säule: Rxi-5 Sil ms, 60	) m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 µm
von Restek, SerNr. 9	95332
Det.: 1,45 kV	
Modified by	: Admin
Modified	: 13.07.2012 10:12:45

Chromatogram 12062913 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062913\_BTX-Rein\_6A\_V3\_12.07.2012\_4.qgd



#### Peak Report TIC

Peak#	R. Time	Area	Area%	Name
1	5.754	93821	5.96	Benzol (C6 H6); CAS: 71-43-2
2	8.949	153440	9.74	Toluol (C7 H8); CAS: 108-88-3
3	31.132	1327898	84.30	Blindwert: Weichmacher (Diethylphthalat)
		1575159	100.00	

#### Tabelle A 7.3.1-5: Chromatogramm Silicagel bei 650 ℃, KTL-Linie 2

CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by	: Kiefer
Analyzed	: 12.07.2012 22:12:28
Sample Type	: Unknown
Sample Name	: 12062905
Sample ID	: Silicium-Rein 6 V3A
Injection Volume	: 1.000
Data File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062905_Silicium-Rein_6_V3A_12.0
Method File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SilMS_Screen_CS2.qgm
Report File	
Tuning File	: C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]	
12062905, Silicium, o	rganReingas 6 A,
Projekt: VW-WOB, 25	560
Messstelle: KTL Rein	gas am 28.06.2012
Temp.: 650 °C	
Start: 12:27 Uhr bis 12	2:58 Uhr
A-Kohle, Typ G am 02	2.07.2012, Teil A
mit 5 mL CS2 versetz	t und für 1 Std. geschüttelt
Säule: Rxi-5 Sil ms, 6	0 m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 µm
von Restek, SerNr. 9	995332
Det.: 1,45 kV	
Modified by	: Admin
Modified	: 13.07.2012 10:15:28

Chromatogram 12062905 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062905\_Silicium-Rein\_6\_V3A\_12.07.2012\_7.qgd



				Peak Report TIC
Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	5.760	123404	9.61	Benzol (C6 H6); CAS: 71-43-2
2	31.135	1160472	90.39	Blindwert: Weichmacher (Diethylphthalat)
		1283876	100.00	

Tabelle A 7.3.1-6: Chromatogramm Aktivkohle bei 600 ℃, KTL-Linie 2

CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

: Kiefer : 12.07.2012 20:06:15 Analyzed by Analyzed Sample Type Unknown Sample Name Sample ID Injection Volume : 12062914 : BTX-Rein\_7A\_V3 : 1.000 : D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062914\_BTX-Rein\_7A\_V3\_12.07.2 : D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi\_5SiIMS\_Screen\_CS2.qgm Data File Method File Report File Tuning File : C:\GCMSsolution\System\Tune1\12 07 12 Scan.ggt [Comment] 12062914, BTX-Reingas 7 A, Projekt: VW-WOB, 2560 Messstelle: KTL Reingas am 28.06.2012 Messstelle: KTL Reingas am 28.06.2012 Temp.: 600 °C Start: 13:11 Uhr bis 13:41 Uhr A-Kohle, Typ G am 02.07.2012, Teil A mit 5 mL CS2 versetzt und für 1 Std. geschüttelt Säule: Rxi-5 Sil ms, 60 m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 µm von Restek, Ser.-Nr. 995332 Det.: 1,45 kV Modified by : Admin Modified : 13.07.2012 10:13:44 : 13.07.2012 10:13:44 Modified





Deel:#	D Time	A	Area 94	Manna
Peak#	R. Hune	Alea	ALC: 70	Ivame
1	5.747	148605	10.90	Benzol (C6 H6):C AS: 71-43-2
2	31.136	1215044	89.10	Blindwert Weichmacher (Diethylphthalat)
		1363649	100.00	

#### Tabelle A 7.3.1-7: Chromatogramm Silicagel bei 600 ℃, KTL-Linie 2

#### CUTEC-Institut GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by	: Kiefer
Analyzed	: 12.07.2012 23:14:20
Sample Type	: Unknown
Sample Name	: 12062928
Sample ID	: Silicium-Rein_7A_V3
Injection Volume	: 1.000
Data File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062928 Silicium-Rein 7A V3 12.0
Method File	: D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SilMS_Screen_CS2.ggm
Report File	
Tuning File	: C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]	
12062928, Silicium	, organReingas 7 A,
Projekt: VW-WOB,	2560
Messstelle: KTL Re	ingas am 28.06.2012
Temp.: 600 °C	
Start: 13:11 Uhr bis	s 13:41 Uhr
A-Kohle, Typ G am	02.07.2012, Teil A
mit 5 mL CS2 vers	etzt und für 1 Std. geschüttelt
Säule: Rxi-5 Sil ms	a, 60 m, ID: 0,25 mm, Film: 0,25 μm
von Restek, SerN	r. 995332
Det.: 1,45 kV	
Modified by	: Admin
Modified	: 13.07.2012 10:16:25

Chromatogram 12062928 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062928\_Silicium-Rein\_7A\_V3\_12.07.2012\_8.qgd



				Peak Report TIC
Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
1	5.752	217714	17.20	Benzol (C6 H6)
2	31.129	1048119	82.80	Blindwert: Weichmacher (Diethylphthalat)
		1265833	100.00	

Fuller       Stand:       141.2013         156 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 141.2013       141.2013         158 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 1       141.2013       141.2013         158 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 1       1       1       1         260 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 2       2       1       1         260 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 2       2       1       1       1         260 $n_{n,n}^{2,n}/n$ 2       2       2       1	File Notificities Solutions So	oduktionsabschnitt: nie, Nr u. Strang-Nr	tandort Mark	tandort, Werk: alle:	olume nstrom:	emp <sub>BK_TNV</sub> :		atalysatorgehäuse: Lai		atalysator, Lage 1	atalysator, Lage 2	atalysator, Lage 3	ă	atalysator, Lage 1	atalysator, Lage 2	atalysator, Lage 3		Dohase							5
	m <sup>1,3</sup> m <sup>1</sup> Mande     1412.2013     1412.2013       C     Mit     Mit     1412.2013     1412.2013       C     Mit     Mit     Mit     100       Mit     Mit     Mit     100     100       Mit     Mit     Mit     100     100       Mit     Mit     Mit     100     100       Mit     Mit     100     2000pisit     100       Sted Chemie     Oriektionskit, Envicat:220th     100     2000pisit       Sted Chemie     Oxidationskit, Envicat:220th     100     000       Sted Chemie     Oxidationskit, Envicat:200     100     000       Sted Chemie     Oxidationski	Füller F3S1	Molfshurg	Woltsburg 15b	6200	280		ngbein & Engelbrac	Datum Einbau	Jan 10	Jan 10	Jan 10	atum, 1. Wechsel	Juli 12 / Jan 10	Juli 12 / Jan 10	Jul 12								2 H 1	0
Stand:       1412.2013         Att       Typ       Maße       1412.2013         Att       Typ       Maße       2114(the       Anzihl         Opfertatt.       HC-801 Cu/Mn1       ISA150A1500       2000pisi       100         Opfertatt.       HN-(Cat25200H)       ISA150A1500       2000pisi       100         Onderionstatt.       Envicat25200H       ISA150A1500       2000pisi       100       Marvotherin Lage 3verhauet (Bsp)         Ovidationstatt.       EnviCat25200H	Stand:         14.12.2012           Art         Typ         Malie         Zelldictie         Arzahl         Benerkungen           Diefenstaat         Enclosional         Zoopsi         Zoopsi         200         Zoopsi         Zoopsi           Diefenstaat         Enclosional         Enclosional         Enclosional         Enclosional         Enclosional         Enclosional           Diefenstaat         Enclosional         Enclopsintista         Enclo				m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ,tr/h	° C	)	cht	Hersteller	Heraeus	Süd-Chemie	Süd-Chemie	Hersteller	Süd-Chemie	Süd-Chemie	Süd-Chemie	Reinga	-					//		
Type         Stanti         11.2001         Meale         11.2001         Meale         11.2001         Meale	Stand:         1412.0013         1412.0013           Typ         Maße         Zalldichte         Anzahl         Bernerkungen           HC-601.0L/Mn         1500-1500-1500         Zongsi         1100           Erwicat2300H         1500-1500-1500         Zongsi         100           Erwicat2300H         1500-1500-1500         Zongsi         100           Erwicat2300H         1500-1500         Zongsi         100           Erwicat2300H         1500-1500         Zongsi         100           Erwicat2300H         1500-1500         Zongsi         100           Erwicat2300H         1500-1500         2000psi         100           Erwicat2300H         1500-1500         2000ps								Art	Opferkat.	Oxidationskat.	Oxidationskat.	Art	Oxidationskat.	Oxidationskat.	Oxidationskat.	S	Datum	23.02.2010	10.03.2010	01.09.2011	10.07.2012			
Stand:     14,12,2012       Maße     2eldichte     Anzahl       Bemerkungen     2eldichte       150x150x150     200cpsi       1	Stant:       1412.2012         Maße       Zelldichte       Anzahl       Bemerkungen         150A.150A.150       200cpsi       100         150A.150A.150       200cps								Typ	HC-801 Cu/Mn 1	EnviCat2520CH	EnviCat2520CH	Typ	EnviCat2520CH	EnviCat2520CH	EnviCat2520CH	ingasvolumensti	[ˈw_º/ʰ]	6296,63	6241	Davicion	7256			
Stand:     14.12.2012       Stand:     14.12.2012       All the stand	Stand:       14.12.2012         Stand:       14.12.2012         2elldichte       Anzahl         2o0cpsi       100         200cpsi       203         200cpsi       203         200cpsi       203         200       203 <tr< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Maße</td><td>1 150x150x150</td><td>150x150x150</td><td>150x150x150</td><td>Maße</td><td>150x150x150</td><td>150x150x150</td><td>150x150x150</td><th>r Temp<sub>ak, TNV</sub></th><td>[°C]</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr<>								Maße	1 150x150x150	150x150x150	150x150x150	Maße	150x150x150	150x150x150	150x150x150	r Temp <sub>ak, TNV</sub>	[°C]							
14.12.2012       14.12.2012         14.12.2012       Anzahl       Bemerkungen         100       Bemerkungen       Indentitien         100       Marzahl       Bemerkungen         100       Marvorher in Lage 2 verbaut (Bsp)       Indentitien         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)         100       Marvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)	14.12.2012       14.12.2012       Anzahi       Bemerkungen       100       1100 <t< td=""><td>Stand:</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Zelldichte</td><td>200cpsi</td><td>200cpsi</td><td>200cpsi</td><td>Zelldichte</td><td>200cpsi</td><td>200cpsi</td><td>200cpsi</td><th>Temp<sub>kat</sub>. Eintrit</th><td>[°c]</td><td></td><td>584 390</td><td></td><td>500</td><td></td><td></td><td></td></t<>	Stand:							Zelldichte	200cpsi	200cpsi	200cpsi	Zelldichte	200cpsi	200cpsi	200cpsi	Temp <sub>kat</sub> . Eintrit	[°c]		584 390		500			
Bemerkungen     Bemerkungen       Bemerkungen     Bemerkungen       Bemerkungen     Massung 2 verbaut (BSD)       war vorher in Lage 2 verbaut (BSD)     Massung von SW: 77       Massung von SW: 77     Messung von SW: 77	Bemerkungen       Bemerkungen       Bemerkungen       Bemerkungen       Bemerkungen       Warvorher in Lage 2 verbaut (Bsp)       Warvorher in Lage 3 verbaut (Bsp)       Massung von SW: 77 2822	14.12.2012							Anzahl	100	100	100	Anzahl	100	100	100	. Te mp <sub>Reingas</sub>	[]		293		304			
Messung von SW: 77	Messenng von SW: 772 2822								Bemerkungen				Bemerkungen	warvorher in Lage 2 verbaut (Bsp.	war vorher in Lage 3 verbaut (Bsp.	frische Katalysatoren (Bsp)	Δp <sub>kat</sub>	[mbar]							
																				Messung von SW: 77					

Tabelle A 7.6.3-1: Dokumentation Katalysatorüberwachung: Technische Daten



Tabelle A 7.6.3-2: Dokumentation Katalysatorüberwachung: CO-Konzentrationen



Tabelle A 7.6.3-3: Dokumentation Katalysatorüberwachung: org. C-Konzentrationen

## 12.2 Anhangverzeichnis Bilder

Nr.	Bezeichnung	Seite
A 7.2-1	Verfahrenstechnisches Fließbild des KTL-Trocknersystems	69
A 7.2.1-1	Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Auslegungs- zustand bei Nennlast	70
A 7.2.2-1	Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Istzustand (Messung, Leerlaufbetrieb)	71
A 7.2.3-1	Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System Temperaturab- senkung auf 608 °C (Volllast)	72
A 7.2.3-2	Energiefließbild Füller-Trockner bei einer berechneten Temperaturab- senkung auf 575 °C.(Volllast; Absenkung 2)	73
A 7.5.1-1	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (1)	74
A 7.5.1-2	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (2)	75
A 7.5.1-3	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (3). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. La- ge, in Opferschicht doppelt so hoch	76
A 7.5.1-4	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (1). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch	77
A 7.5.1-5	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (2). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch	78
A 7.5.1-6	Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwi- schengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des UBS. 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Op- ferschicht doppelt so hoch	79







Bild A 7.2.1-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Auslegungszustand bei Nennlast. Abluftvolumenstrom: 16.000 m<sup>3</sup>/h;

Abiuitvolumenstiom.	10.000	III N/
TNV-Regeltemperatur:	750	°C
Karosserien Volllast:	35	1/h



Bild A 7.2.2-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Istzustand (Messung, Leerlaufbetrieb) Abluftvolumenstrom: 16.750 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h; TNV-Regeltemperatur: 715 ℃ Karosserien Leerlauf: 0 1/h



"Abgasreinigung Automobillackierung (Phase 2)", AZ 26471-22 bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Bild A 7.2.3-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System Temperaturabsenkung auf 608 °C (Volllast) Abluftvolumenstrom: 16.260 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h;

TNV-Regeltemperatur:	608	$^{\circ}$
Karosserien Volllast:	32,8	1/h











Lage 1: nicht eingebaut Lage 2: Edelmetall Lage 3: Edelmetall Inbetriebsetzung: 1/2010 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>





Bild A 7.5.1-1: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (1)










Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>

Reingas

C

3



Bild A 7.5.1-2: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (2)





Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>







Bild A 7.5.1-3: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (3). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch







Reingas

✔ Rohgas

Raumgeschwindigkeit<sup>1</sup>: ca. 10.400 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>



Lage 2: Edelmetall Lage 3: Edelmetall Inbetriebsetzung: 1/2010 Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C Raumgeschwindigkeit<sup>1</sup>: ca. 10.400 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>





Bild A 7.5.1-4: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (1). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch





Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C Raumgeschwindigkeit<sup>1</sup>: ca. 10.400 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>







Lage 1: Metalloxid (Opfer) Lage 2: Edelmetall Lage 3: Edelmetall Inbetriebsetzung: 7/2009 Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C Raumgeschwindigkeit<sup>1</sup>: ca. 10.400 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>



Bild A 7.5.1-5: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (2). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch











Lage 2: Edelmetall Lage 3: Edelmetall Inbetriebsetzung: 1/2010 Temperatur Rohgas: 300 - 325 °C Raumgeschwindigkeit<sup>1</sup>: ca. 9.600 <sup>1</sup>/<sub>h</sub>



Bild A 7.5.1-6: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des UBS. 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch