

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 Schrickler (LTB GmbH)

Goldkronach, Januar 2013

1. Projektkennblatt

11/95	Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt				
Az	26471-22	Referat	22/2	Fördersumme	Phase 2: 182.133,00 € Gesamt: 575.353,00 €
Antragstitel	Entwicklung und Erprobung von Abgasreinigungskonzepten für Trockner von Automobilkarosserien mit verringertem Primärenergieeinsatz unter weitgehender Beibehaltung vorhandener Anlagentechnologien – Abgasreinigung Automobillackierung				
Stichworte	Abgasreinigung, Automobillackierung, TNV, Erdgaseinsparung, CO ₂ -Minderung, Klimaschutz, Katalysator, Emission, Energie, Bilanz, Abgas, Abluft, Abwärme				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
19 Monate	01.02.2011	31.08.2012	2 / 2		
Zwischenberichte:	alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	Luft- und Thermotechnik Bayreuth GmbH Markgrafenstr.4 95497 Goldkronach		Tel	09273/500-0	
			Fax	09273/500-111	
			Projektleitung Dr.-Ing. B. Schrickler		
			Bearbeiter Dr.-Ing. B. Schrickler		
Kooperationspartner	CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld; Volkswagen AG, Wolfsburg				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Bei der Endbehandlung von Automobilkarosserien werden die verschiedenen aufgetragenen Lack-schichten in Durchlauftrocknern getrocknet. Während des Prozesses fallen unterschiedliche, mit organischen 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 CO₂-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.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>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 Teillackschichten BC/CC, Füller und UBS, wobei hierfür die ersten Hauptausführungen 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.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

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 Füller- und 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 Rein gaswerte 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.

2. Inhaltsverzeichnis

1. Projektkennblatt.....	4
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	13
7.1 Einführung und Aufgabenstellung	13
7.2 Ermittlung des Wärmegleichgewichts und des Einsparpotenzials	16
7.2.1 Auslegungszustand.....	17
7.2.2 Ausgangszustand auf der Basis von Messwerten	17
7.2.3 Berechnung des Einsparpotenzials bei Temperaturabsenkung.....	19
7.3 Inhaltsstoffbezogene Untersuchungen Kathodische Tauchlackierung.....	21
7.3.1 Abgasanalysen KTL.....	22
7.3.2 Betrieb der Versuchsanlage und zugehörige Ergebnisse KTL.....	25
7.4 Katalysatoranalytik.....	29
7.4.1 Analysenergebnisse Decklack, Vollstrom.....	29
7.4.2 Analysenergebnisse Füller, Vollstrom	30
7.4.3 Analysenergebnisse Füller, Versuchsanlage.....	31
7.4.4 Analysenergebnisse KTL, Versuchsanlage	32
7.5 Betriebserfahrungen mit Vollstromanlagen.....	32
7.5.1 Messtechnische Untersuchungen an Vollstromanlagen (9/2011)	33
7.5.2 Messtechnische Untersuchungen an Füller-Vollstromanlagen (7/2012)	36
7.5.3 Konstruktive Hinweise zur Ausführung von Vollstromanlagen	38
7.5.4 Fazit Vollstromanlagen.....	39
7.6 Überwachung der Reingaskonzentrationen.....	40
7.6.1 Summarische Erfassung der Qualität des Reingases.....	40
7.6.2 Lösungsansatz für eine kontinuierliche, betriebstechnische Überwachung	41
7.6.3 Eigenüberwachung CO- und org. C-Konzentrationen; Katalysatorformular	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	48
11. Literaturverzeichnis	50
12. Anhänge	51
12.1 Anhangverzeichnis Tabellen	51
12.2 Anhangverzeichnis Bilder	68

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, Vollastbetrieb)	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 CUTEK-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, repräsen-tative 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 Katalysatorreintrittstemperatur	38
7.5.3-1	Aufbau einer Katalysatorlage (Prinzip)	38
7.6.2-1	Vergleich der mit konventioneller Messtechnik ermittelten Konzentrationsverläufe 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 ²]	Wärmeübertragerfläche
c_p	[kJ/(kg K)]	Spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)
DL	---	Decklack
Fü	---	Füller
h	[kJ/kg]	Spezifische Enthalpie
\dot{H}	[kW]	Enthalpiestrom
$\Delta\dot{H}$	[kW]	Enthalpiestromdifferenz
k	[W/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
Kat	---	Katalysator
KNV	---	Katalytische Nachverbrennung
KTL	---	Kathodische Tauchlackierung
\dot{m}	[kg/h]	Massenstrom
Δp	[Pa]	Differenzdruck, Druckverlust
\dot{Q}_v	[kW],	Wärmestrom (z.B. Transmissionsverlust)

Zeichen/ Symbol	Dimension	Erläuterung
<i>RG</i>	[h ⁻¹]	Raumgeschwindigkeit; Quotient aus Abgasvolumenstrom im Normzustand [m _N ³ /h] und Katalysatoreinbauvolumen [m ³]
RNV	---	Regenerative Nachverbrennung
<i>s</i>	[m]	Wanddicke
<i>T</i>	[°C]	Temperatur
ΔT	[°C]	Temperaturdifferenz
TNV	---	Thermische Nachverbrennung
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Wand
η	[%]	Wirkungsgrad, Abbaugrad
Σ org. C	[mg/m ³]	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)
32 bzw. W32	Wärmeübertrager W32 (Aufheizzone)
33 bzw. W33	Wärmeübertrager W33 (Aufheizzone)
34 bzw. W34	Wärmeübertrager W34 (Aufheizzone)
35 bzw. W35	Wärmeübertrager W35 (Haltezone)
36 bzw. W36	Wärmeübertrager W36 (Haltezone)
36 bzw. W37	Wärmeübertrager W37 (Frischluftrökuperator)
<i>AbL</i>	Abluft
<i>AbL_v</i>	Abluftvorwärmung

Indizes	Erläuterung
<i>aus</i>	Austritt
<i>Br</i>	Brennstoff (zugeführter Brennstoff im TNV-System)
<i>by</i>	Bypass
<i>ein</i>	Eintritt
<i>FrL</i>	Frischlufte (zum Frischluftrekuperator; aus Kabinen und Kühlzone)
<i>Kar</i>	Karosserien + SKID
<i>Lm</i>	Lösungsmittel (verdampfte flüchtige Bestandteile des Lackes)
<i>Rg</i>	Reingas
<i>UmG</i>	Umgas (im Kreislauf geführte Umgasströme)
<i>UmL</i>	Umlufte (im Kreislauf geführte Umlufteströme)
<i>V</i>	Verluste, Transmissionsverluste
<i>Vd</i>	Verdampfung
<i>wü</i>	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_x) 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 Wärme-gleichgewicht (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 Katalysator-testanlagen sowie Erfahrungen mit 23 Vollstromanlagen haben gezeigt, dass die Katalysatoren
 - in Decklackanlagen einem moderaten
 - in Fülleranlagen einem höheren
 - in Unterbodenschutzanlagen einem niedrigeren und
 - in KTL-Anlagen einem höheren

Deaktivierungsrisiko ausgesetzt sind. Nach bisherigen Erfahrungen mit Versuchs- und 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 ab-

gebildet 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 ($0,10 \text{ g/m}^3$), org. gebundenem Kohlenstoff (50 mg/m^3 für katalytische Nachverbrennungsanlagen) sowie NO_x (als NO_2 ; $0,10 \text{ g/m}^3$).
- 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 Energieeinspartetechnologien 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.

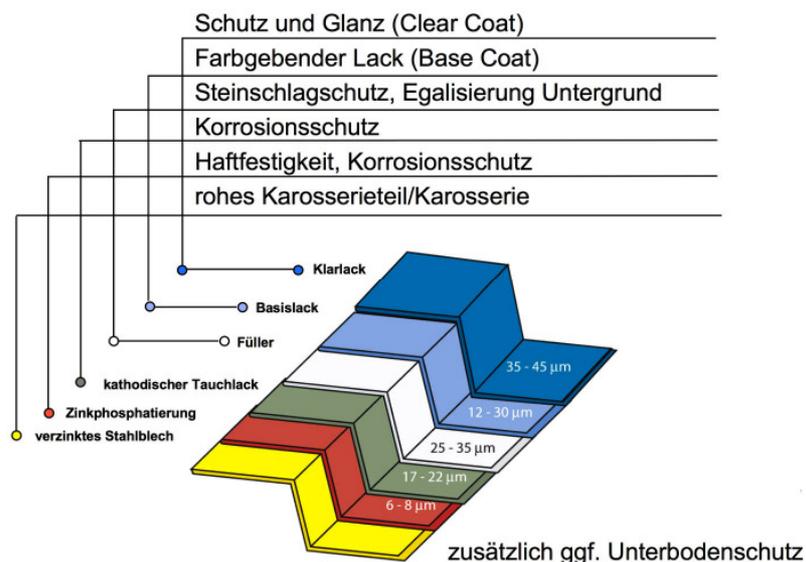


Bild 7.1-1: Typischer Aufbau einer Karosserielackierung

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.

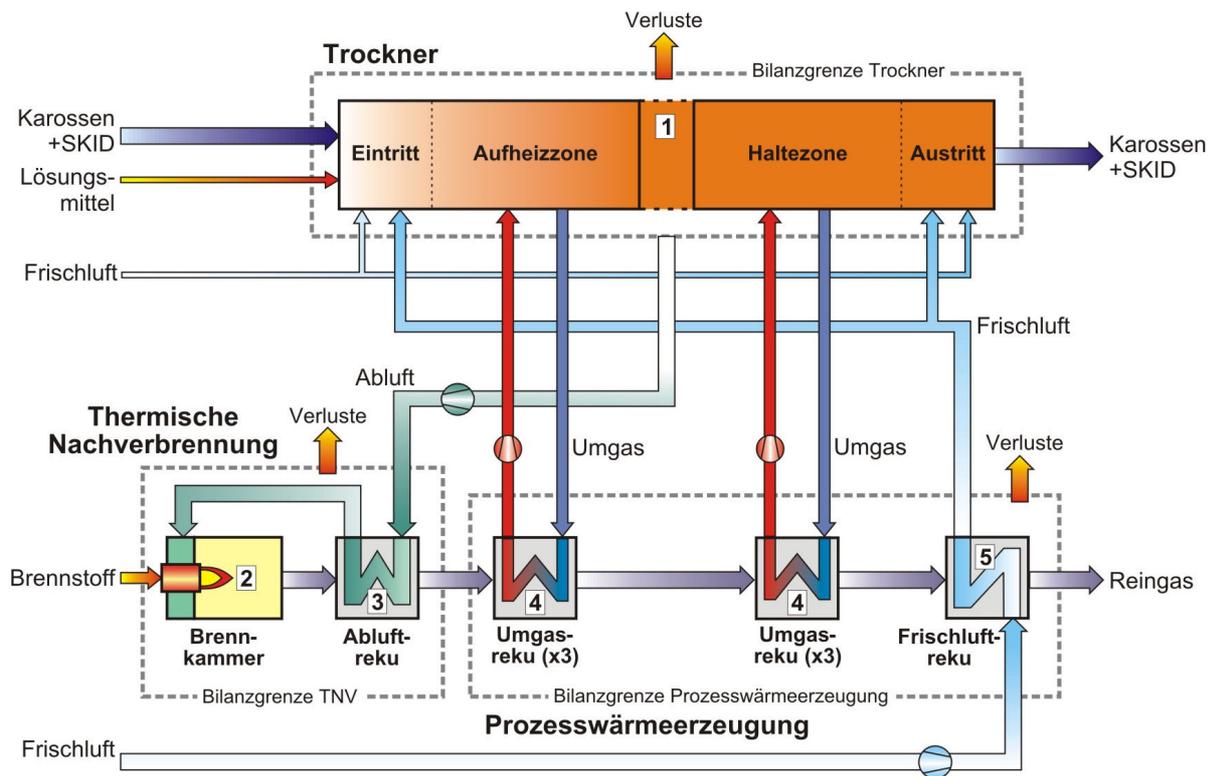


Bild 7.1-2: Vorwiegend in der Automobilindustrie eingesetzte Systemtechnik Lackrockner/Abgasreinigung

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 (Abluftrekuuperator 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 °C bis 800 °C) kühlt sich im Abluftrekuuperator ab und versorgt anschließend den Trockner über sog. Umgasrekuuperatoren (Pos. 4) und einen Frischluftrekuuperator (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 °C; Ist-Temperatur 320 °C). In Verbindung mit einem Reingasmengenstrom von etwa 10.000 Nm³/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“¹ – 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 Füllanlagen 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.

¹ 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.

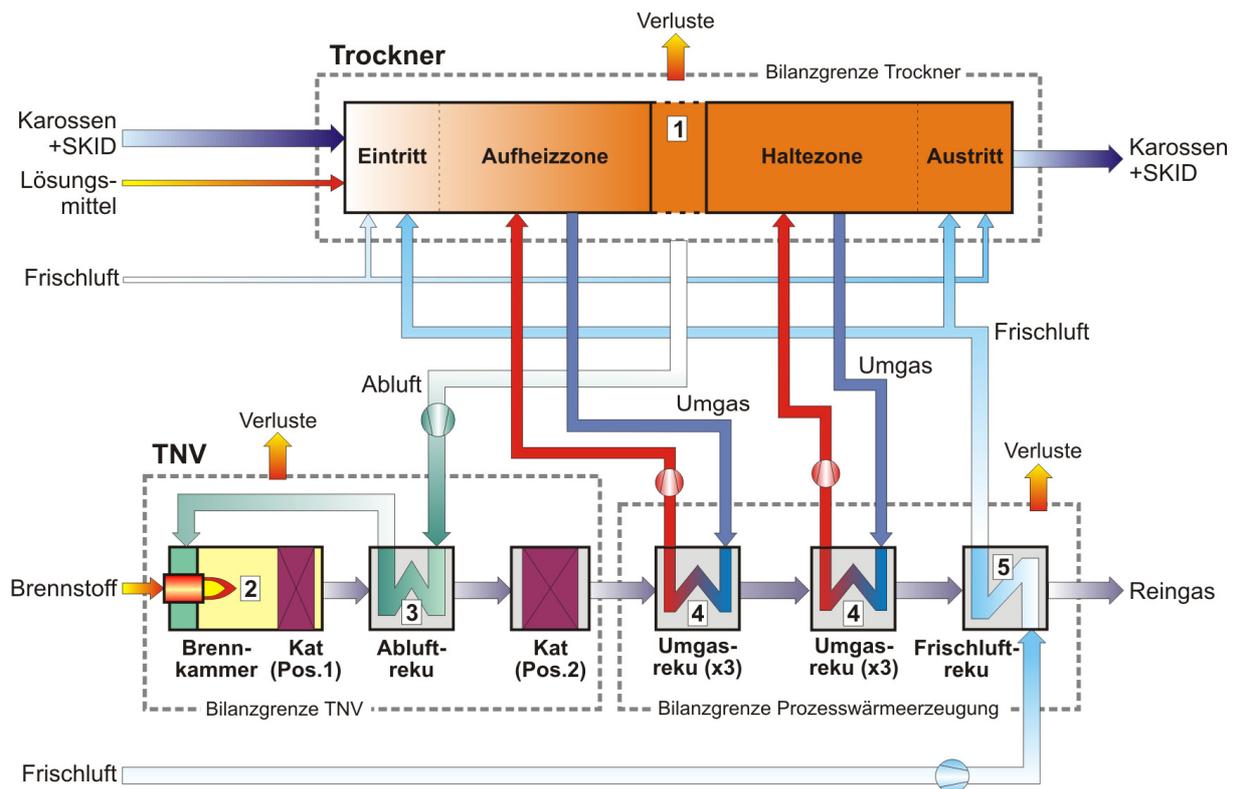


Bild 7.1-3: Absenkung der TNV-Temperatur und Katalysatornachrüstung

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 Lackrocknersystemen 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 °C) 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 Lackrocknern. 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 m³_N/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 Abhitzezone 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 Abhitzezone des Trocknersystems sind in **Bild 7.2.2-1** dargestellt. Die Reingastemperaturen am Kamin bewegen sich in einem Bereich von 240 °C bis 330 °C, 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.

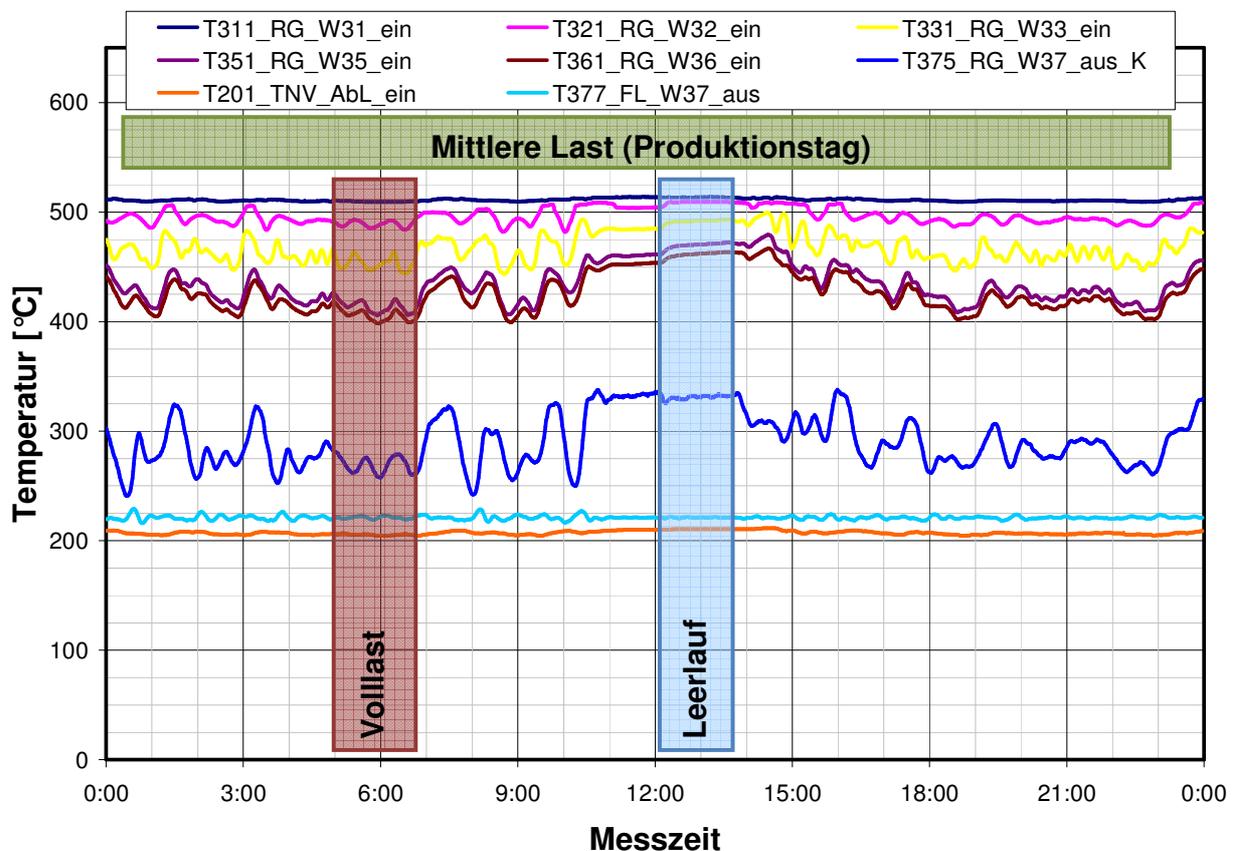


Bild 7.2.2-1: Zeitliche Verläufe gemessener Temperaturen an einem KTL-Trocknersystem bei einer TNV-Regeltemperatur von 715 °C

Im Vergleich mit dem Auslegungszustand fällt auf, dass der Wärmebedarf des Trockners mit 1552 kW insgesamt geringer ist als projiziert. 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 m³_N/h) führt dies zu deutlich höheren Kaminverlusten von 1652 kW und einer Kamintemperatur von 269 °C. Die Frischluftmenge ist mit ca. 10.000 m³_N/h sehr viel geringer, als projiziert, 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 Vollastfall zusammengefasst.

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

Einsparpotenzial KTL-Trocknersystem VW-Wolfsburg, Halle 9														
TNV-Regeltemp.	Temperaturen							Erdgas		übertragene Reingaswärme				
	T1	T2	T3	T4	T5	T8	T9	Leistung TNV	Einsparung	Aufheizzone	Haltezone	Frischluftruku. (FL-WÜ)	Summe	
	Abluft Eintritt	TNV Brennk	Reing. TNV	Reing. AHZ	Reing. HZ	Reing. Kamin	Frischluf							
°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

	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

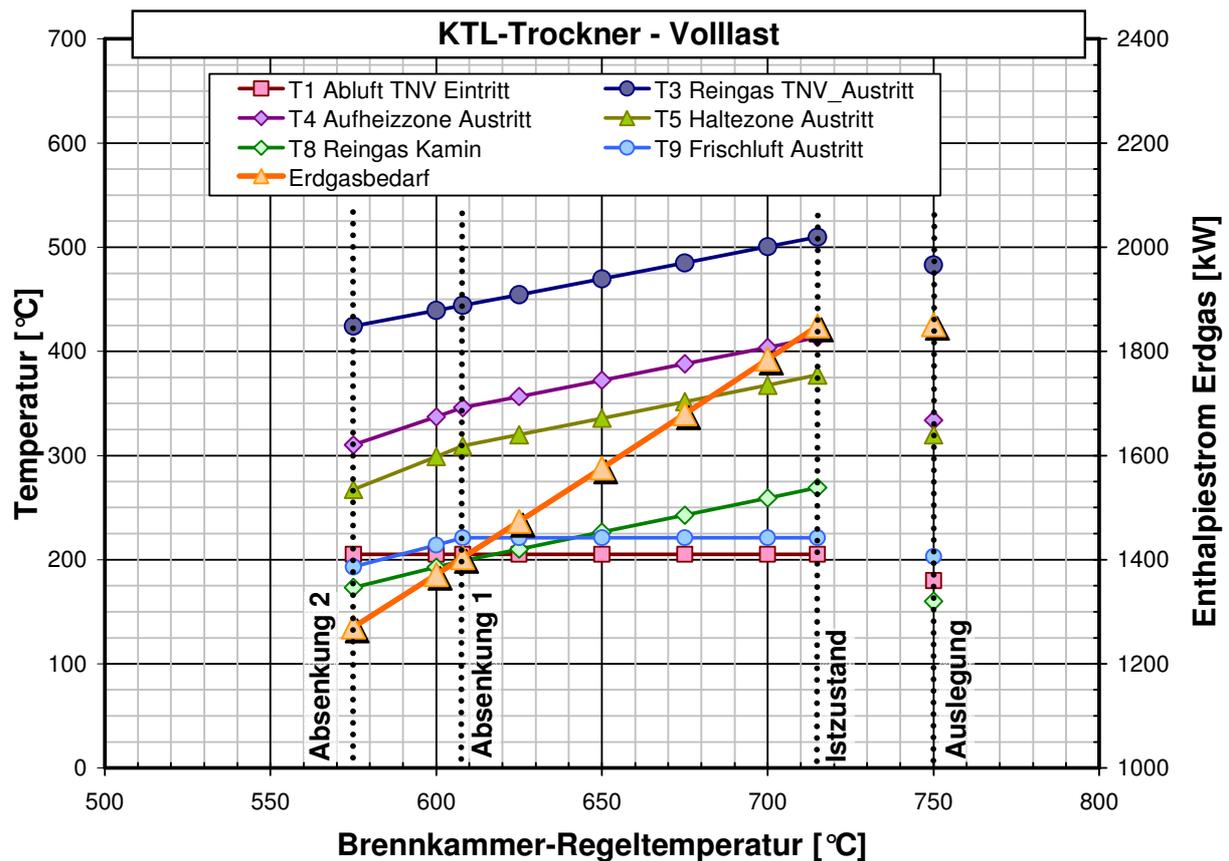


Bild 7.2.3-1: Erdgasbedarf und Temperaturverläufe im Reingasweg des KTL-Trocknersystems in Abhängigkeit von der TNV-Regeltemperatur

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 fluidodynamisch 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 (Falschlufansaugung). Vor Implementation einer Katalysatorvollstromanlage sollte der Trockner neu eingestellt werden.

7.3 Inhaltsstoffbezogene Untersuchungen Kathodische Tauchlackierung

Zur Erläuterung der Funktion der unterschiedlichen Lackaufträge wird einleitend 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 VOC² 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.

² VOC: Volatile Organic Compounds

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 Analysetechnik.

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/m³ detektiert wurde, konnte bei (715 – 720) °C eine SO_x-Konzentration von 4,3 mg/m³ 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.

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

KTL, Linie 2; 26. - 28.06.2012			
Komponenten	Massenkonzentration [mg/m ³]		
	600 °C	650 °C	715 – 720 °C
organisch C-Verbindungen			
Σ org. C	40	15	< 1
Formaldehyd ¹⁾	16	4	< 1
Acetaldehyd ¹⁾	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 ¹⁾	5,3	1,5	1,5
BTXE und andere Kohlenwasserstoffe			
Benzol	0,24	0,14	< 0,13
Toluol	< 0,13	< 0,13	< 0,13
Ethylbenzol	< 0,13	< 0,13	< 0,13
Xylole (Isomerenmisch, 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-methoxy-Propanol (IG)	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Cumol	n. n.	n. n.	n. n.
Chlor-, Fluor- und Schwefelverbindungen			
HCl	< 0,5	< 0,6	< 0,6
Cl ₂	< 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
Tl	0,16	0,19	0,25
Hg	< 3,8 µg/m ³	< 3,5 µg/m ³	< 4,5 µg/m ³
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 ³ ,tr]; 2) Doppelbestimmung n.b.: nicht bestimmt; n. n.: nicht nachweisbar			

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 Σ org. C und CO sowie NO_x (als NO₂) 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.
- die Stickoxidkonzentrationen erwartungsgemäß mit sinkender Reaktionstemperatur fallen, weil
 - der thermische Stickoxidbildungsmechanismus weniger zum Tragen kommt.
 - mit sinkender Temperatur vermehrt Reduktionsmittel (org. C, CO) vorhanden sind.

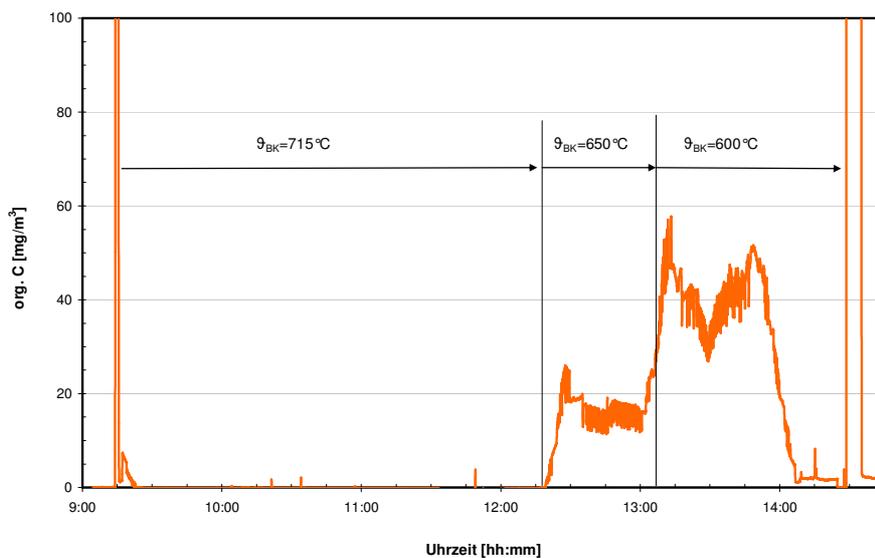


Bild 7.3.1-1: Abhängigkeit der Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)

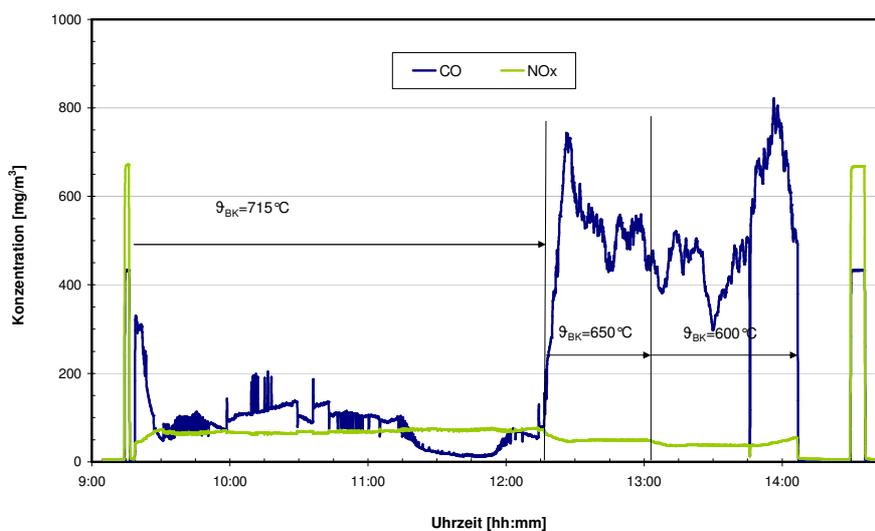


Bild 7.3.1-2: Abhängigkeit der CO-Konzentration und der NO_x-Konzentration als Funktion der Reaktionstemperatur (KTL)

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°C 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°C (maximale Fluidtemperatur für den Ventilator) nicht überschritten wird.

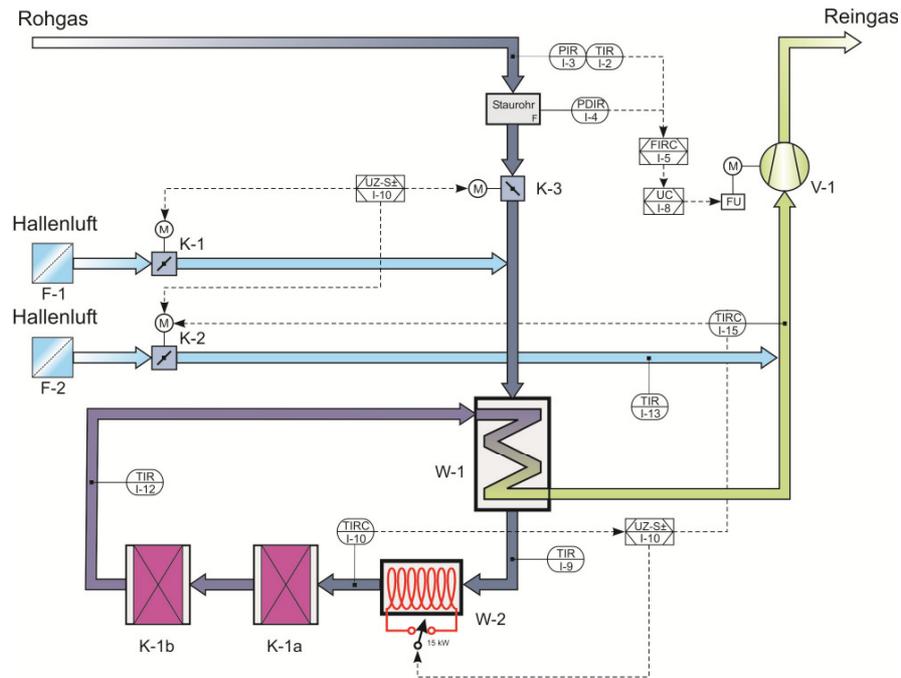


Bild 7.3.2-2: Versuchsanlage KARLOS zur katalytischen Abluftbehandlung

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.

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

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 _n ³ /h
Raumgeschwindigkeit RG	15.000 h ⁻¹

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.

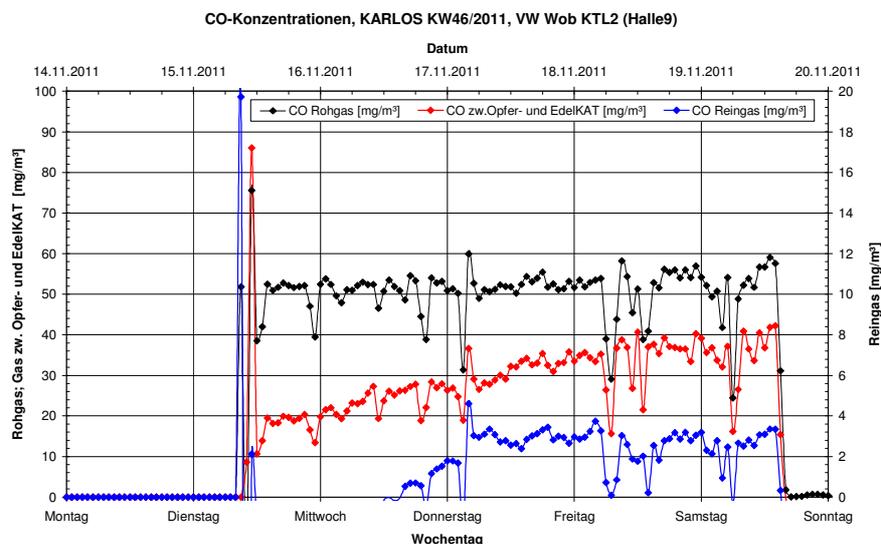


Bild 7.3.2-4a: Versuchsanlage KARLOS; Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, zwischen den Katalysatorlagen und im Reingas als Funktion der Zeit (14.11. - 20.11.2011)

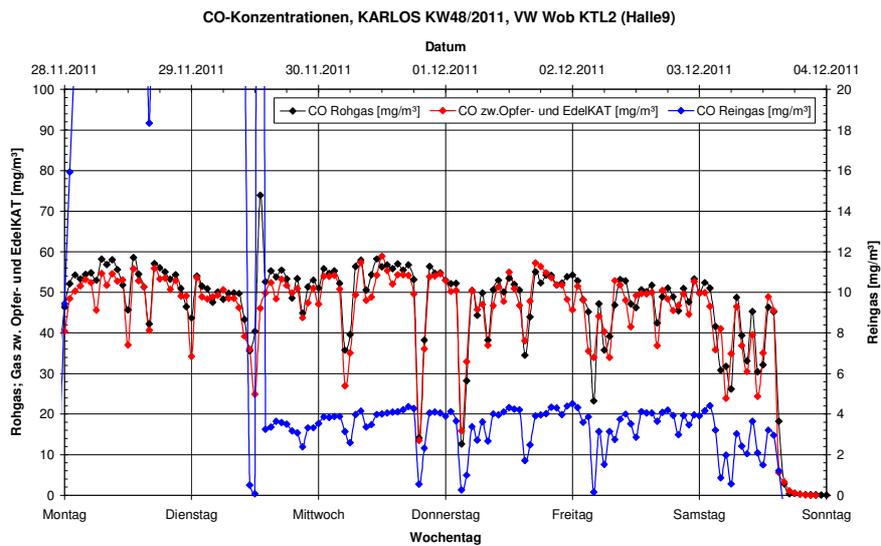


Bild 7.3.2-4b: Versuchsanlage KARLOS; Schadstoffkonzentrationen im Rohgas, zwischen den Katalysatorlagen und im Reingas als Funktion der Zeit (28.11. - 04.12.2011)

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.

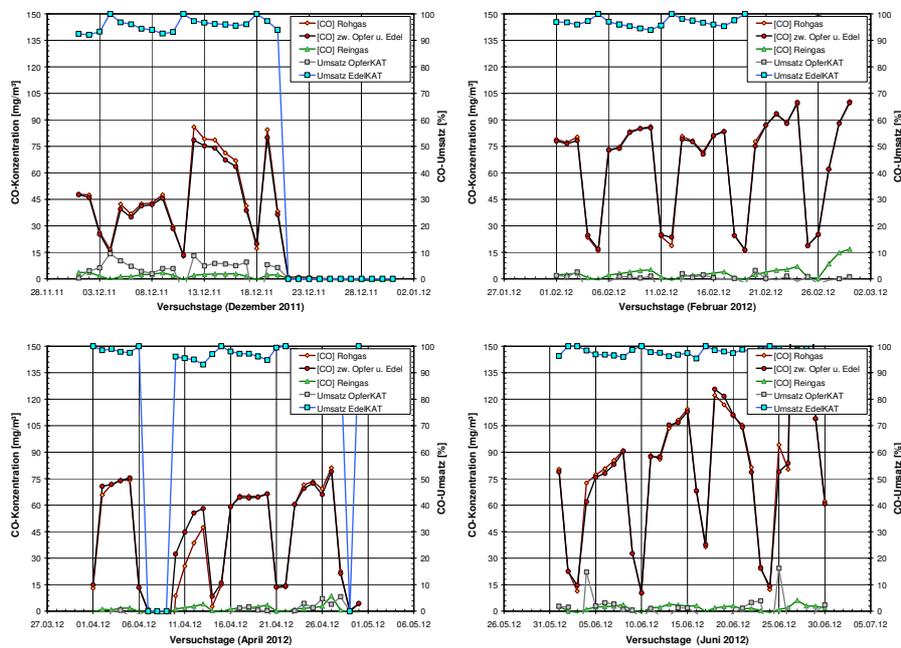


Bild 7.3.2-5: Abhängigkeit des Umsatzes an Kohlenstoffmonoxid von der Katalysatorbetriebszeit (KTL-Trockner)

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 Katalysatoroberflächenproben weisen bereits deaktivierende Elemente auf. Zitat aus dem Untersuchungsbericht [SüC10a]:

„Unter den Verunreinigungen entfällt der größte Teil auf SiO₂. Unter den anionisch vorliegenden Elementen wurden P und S in signifikanten Mengen detektiert, beide sind als Katalysatortgifte bekannt. Die geringen Anteile Fe, Ti und Cu deuten auf Ablagerungen von Farbpigmentpartikeln hin“.

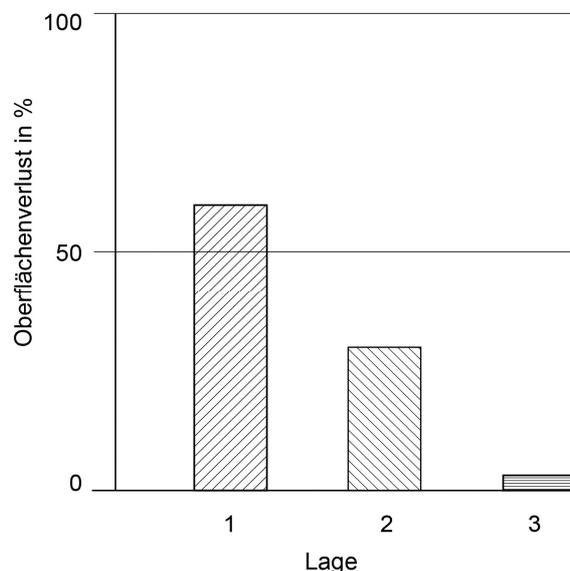
Auch wurde die spezifische Oberfläche (BET-Methode) der vorderen der beiden Lagen bestimmt. Unter Bezugnahme auf den frischen Vergleichswert für den Katalysator von 16,5 m²/g wurden 9,6 g/m² ermittelt. Demnach ergibt sich eine Abnahme von etwa 42 %. Gleichwohl war zu verzeichnen, dass der Katalysator insgesamt noch ohne Einbußen oxidierte, so dass eine erhebliche Restlaufzeit verblieben ist (siehe hierzu auch Abschnitt 7.5).

7.4.2 Analyseergebnisse Füller, Vollstrom

Die Analyseergebnisse 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 Edelmetalllagen (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.



Ele-ment	1	2	3
Si	31,50	6,6	5,7
P	0,97	--	--
S	0,10	1,02	1,4
Sn	0,38	--	--

Bild 7.4.2-1: Oberflächenverlust³ und deaktivierende Elemente⁴, Füller 2, Strang 1, Mai 2010

³ BET-Methode (N₂-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 Edelmetallwabe „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)mm³ 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 °C.

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-

⁴ 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 Analyseenergebnisse 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) mm³ (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_n³/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.⁵

⁵ 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 CO₂ 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)

Anlage	Kürzel	Beginn der Messung	Ende der Messung	Zeitpunkt der Erstinstallation	Konzentrationen CO			Konzentrationen Org. C		
					Rohgas mg/m ³	ZWG mg/m ³	Reingas mg/m ³	Rohgas mg/m ³	ZWG mg/m ³	Reingas mg/m ³
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		demnächst 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/m³ beträgt [TAL02]:

„...Im Abgas von thermischen oder katalytischen Nachverbrennungseinrichtungen dürfen die Emissionen an Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid, die Massenkonzentration 0,10 g/m³ nicht überschreiten; gleichzeitig dürfen die Emissionen an Kohlenmonoxid die Massenkonzentration 0,10 g/m³ 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/m³ 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/m³, 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/m³ gefordert.

Das Erreichen einer Emissionsbegrenzung für katalytische Nachverbrennungsanlagen von 50 mg/m³ am Ende eines Katalysatorlebenszyklus bedeutet, dass im zeitlichen Mittel eine weit aus niedrigere Emissionskonzentration zu verzeichnen ist wie **Bild 7.5.1-1** zeigt.

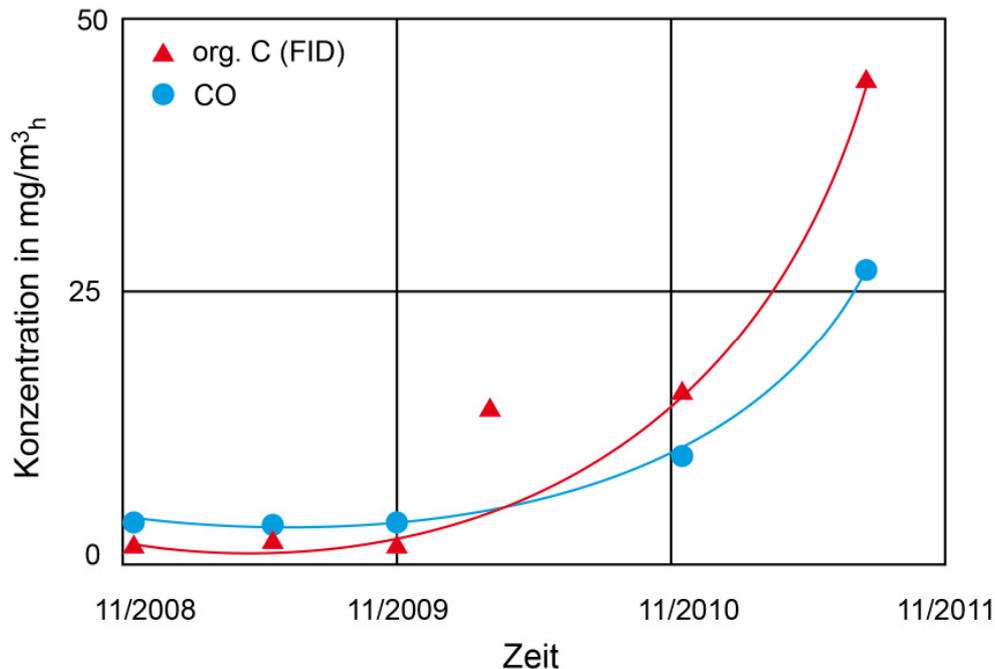


Bild 7.5.1-1: Verlauf der Reingaskonzentration nach Katalysator der Anlage Decklack 2, Strang 1 als Funktion der Zeit (Basis: ausgewählte, repräsentative Daten aus Bild 7.3.3-7 des Berichtes zu Phase 1 und Tabelle 7.5.1-1)

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/m³
- Durchschnittswert CO: ca. 7 mg/m³

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 η definiert

$$\eta_{0+1} = (C_{\text{Rohgas}} - C_{\text{ZWG}}) / C_{\text{Rohgas}} \quad (1)$$

$$\eta_2 = (C_{\text{ZWG}} - C_{\text{Reingas}}) / C_{\text{Rohgas}} \quad (2)$$

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

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.

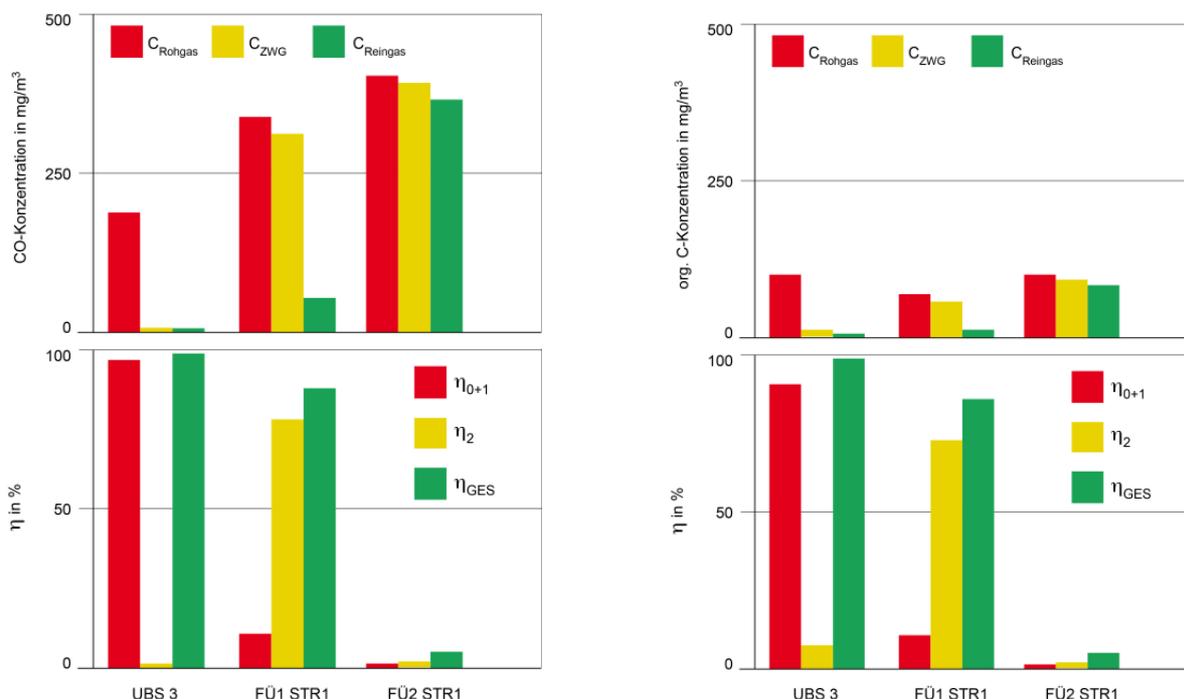


Bild 7.5.1-2: Beispielhafter Vergleich des Abbaus von org. C und CO an den Vollstromanlagen UBS 3, FÜ1STR2 und FÜ2STR1

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_{ZWG} 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 Reingaskonzentratio-

nen 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 $0,10 \text{ g/m}^3$. Die Konzentrationen an org. C liegen unterhalb von 35 mg/m^3 .

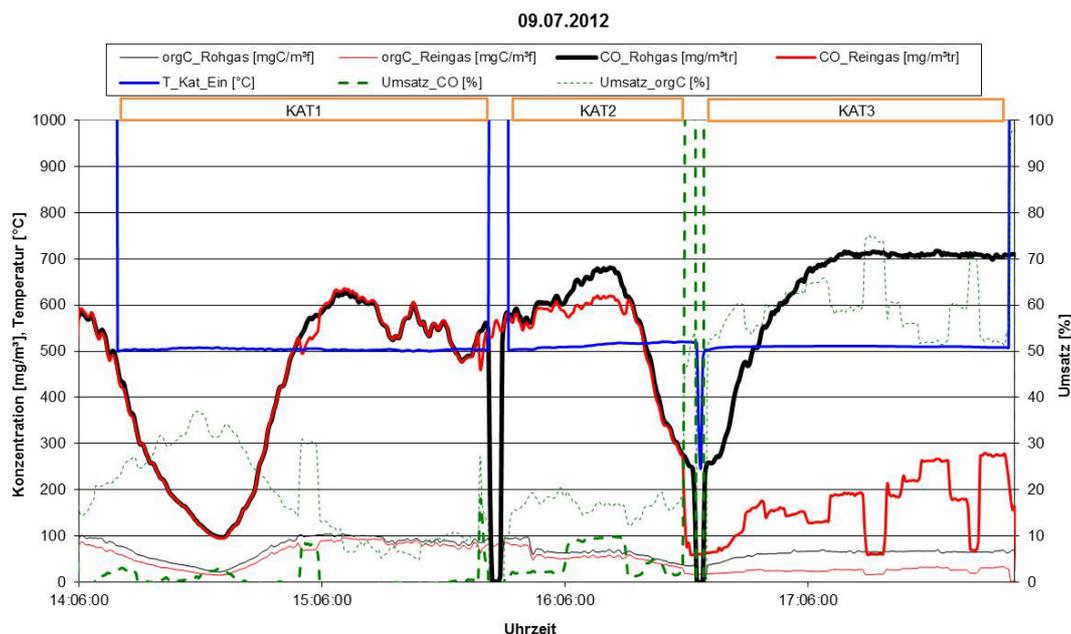


Bild 7.5.2-2: Füller 3, Strang 1, Roh.- und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysatoreintrittstemperatur

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 und 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 Katalysatoraus-tausch bereits notwendig gewesen.

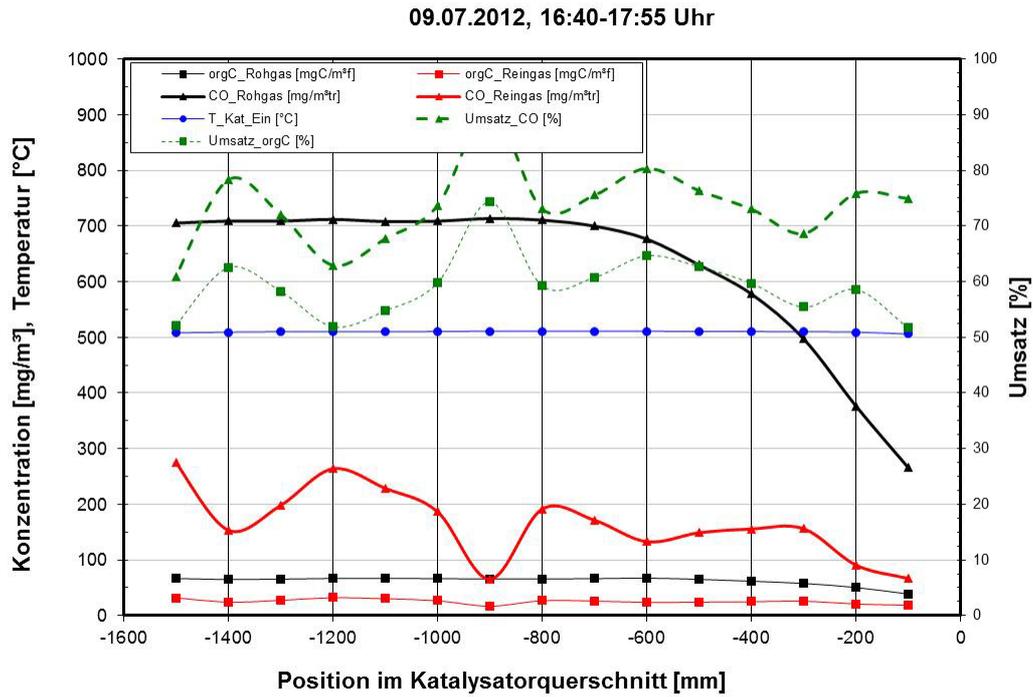


Bild 7.5.2-3: Füller 3, Strang 1, Querschnittsmessung nach 3. Katalysatorlage, Roh- und Reingaskonzentrationen CO und org. C, Umsätze und Katalysatoreintrittstemperatur

7.5.3 Konstruktive Hinweise zur Ausführung von Vollstromanlagen

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

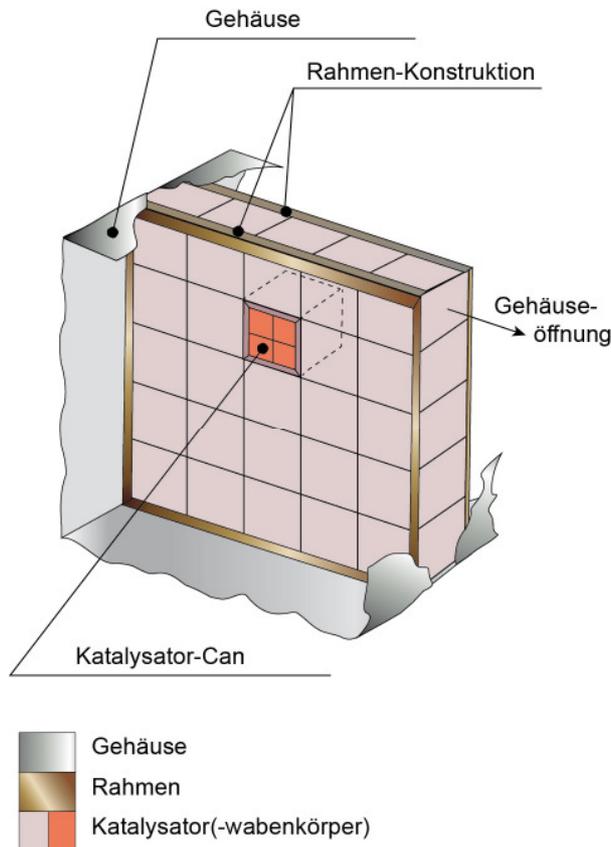


Bild 7.5.3-1: Aufbau einer Katalysatorlage (Prinzip)

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) °C 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. Katalysatorstandzeiten⁶ 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

⁶ Die Daten beziehen sich auf die spezifische Situation der Produktion am gewählten Standort.

⁷ Die Katalysatorperformance ist – wie bereits vermerkt – bislang ausschließlich innerhalb einer Versuchsanlage im Bypassbetrieb und bei „normaler“ TNV-Betriebstemperatur (TNV-Temperatur nicht abgesenkt) ermittelt worden. Relevante org. C-Konzentrationen waren im Rohgas der Versuchsanlage – also hinter TNV – nicht anzutreffen, die CO-Konzentrationen beträchtlich. 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 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 Katalysator-tauglichkeit hin zu überprüfen.
- Der ordnungsgemäße Einsatz des untersuchten Technologieansatzes beinhaltet folgende Vorteile:
 - Einsparung an Erdgas und damit Minderung des CO₂-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 Erdgas-einsparung 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.

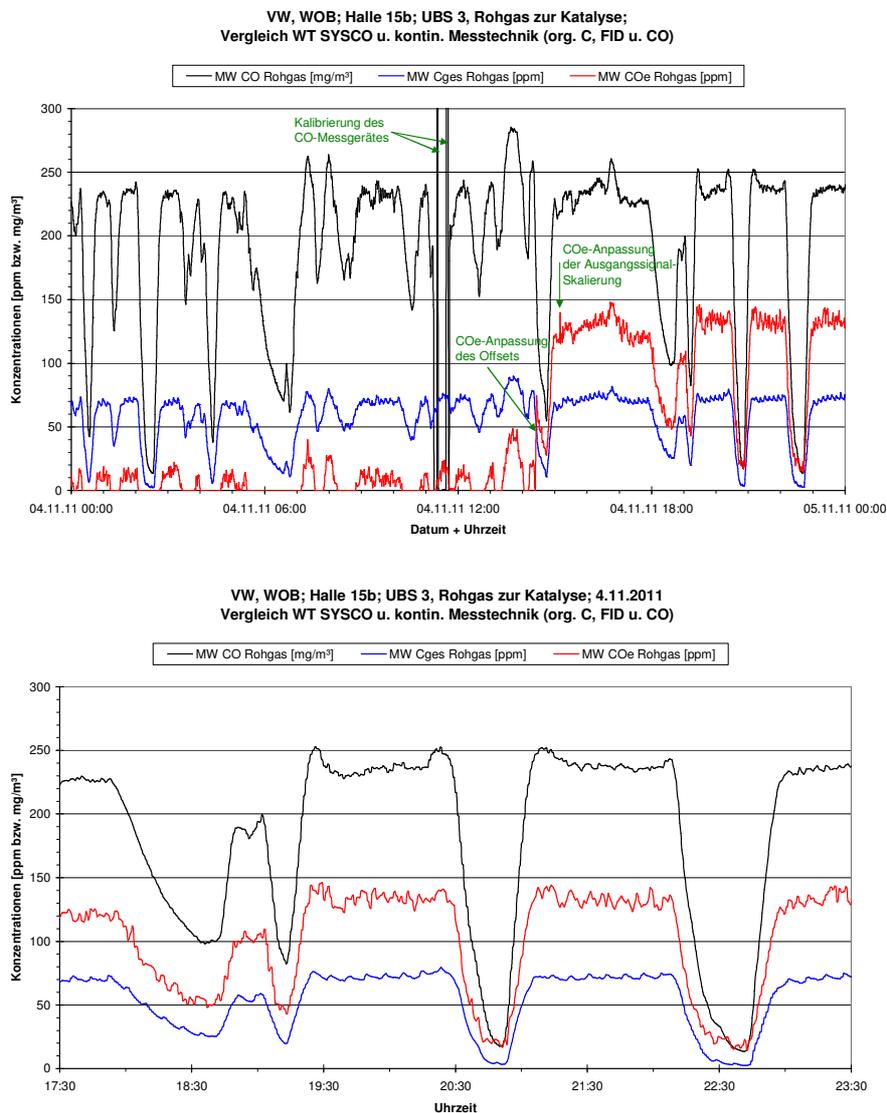


Bild 7.6.2-1: Vergleich der mit konventioneller Messtechnik ermittelten Konzentrationsverläufe an CO und org. C mit dem Ausgangssignal der WT SYSCO-Sonde

Die mit konventioneller Messtechnik gewonnenen Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff (Σ 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 Neuanspassung 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 Überprüfungs-messungen 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 Lackrockner (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 für 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 CO₂-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 Abluftmengenumsatz von 8.000 bis 12.000 m³/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 m³/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 m³/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 m³/h Erdgas bezogen auf 23 Linien - eine Erdgaseinsparung von etwa 30 m³/h je Linie, bei (120 Linien) im Mittel also etwa 3.600 m³/h an Erdgas ergeben. Bezogen auf 6.500 Betriebsstunden jährlich und 3,5 €Cent je kWh Erdgas (Heizwert 10 kWh/m³) 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 m³/h), die vielfach nicht mit Frequenzumformern ausgestattet sind, gegen angedroselte Klappen fahren und unnötig viel elektrische Energie beanspruchen. Einerseits müssen die Kosten und andererseits der CO₂-Ausstoß gesenkt werden, denn nur beides, niedrige Verbrauchskosten und 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 CO₂-Ausstoßes zu bewerten. An 23 Anlagen der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg werden beim Betrieb ca. 700 m³/h an Erdgas eingespart. Dies sind etwa 1,4 t/h an CO₂, 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/m³), Kohlenmonoxid (0,10 g/m³) sowie den Wert für Stickoxide (0,10 g/m³) 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 Lackrockner 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 Lackrockner 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 Luftreinheit". 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 Lackrockner 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 Immissionsschutztagung 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. Schrickler: Einstellung des Wärmegleichgewichts zwischen Nachverbrennung (TNV) und Lackrockner 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. Schrickler: Uzyskanie równowagi cieplnej pomiędzy systemem dopalania a suszarnia karoserii w przemyśle samochodowym poprzez wbudowanie do istniejącego systemu stopnia katalitycznego prowadzące do jednoczesnego obniżenia emisji zanieczyszczeń. Archiwum Spalania, Kwartalnik Vol. 10 (2010) Nr. 3 - 4, S. 121 - 132, PIS, Polski Instytut Spalania, Warszawa, 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 Lackrocknern für Automobilkarosserien durch Wärmegleichgewichtseinstellung (Bewerbungsfrist bis 20.05.2010).
- „VW senkt Energiebedarf in der Lackiererei“; Automobilwoche –Die Branchen- und Wirtschaftszeitung;
<http://www.automobilwoche.de/article/20100806/REPOSITORY/100809916/vw-senkt-energiebedarf-in-der-lackiererei>; 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. Schrickler: Oxidationskatalysatoren reduzieren Erdgasverbrauch. JOT Journal für Oberflächentechnik, Ausgabe 3/2011.
- O. Neese: Analyse und Erprobung von Konzepten zur Senkung des Primärenergieeinsatzes bei bestehenden Lackrocknersystemen 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_x) 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 Wärme-gleichgewicht (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 Katalysator-testanlagen sowie Erfahrungen mit 23 Vollstromanlagen haben gezeigt, dass die Katalysatoren
 - in Decklackanlagen einem moderaten
 - in Fülleranlagen einem höheren
 - in Unterbodenschutzanlagen einem niedrigeren und
 - in KTL-Anlagen einem höheren

Deaktivierungsrisiko ausgesetzt sind. Nach bisherigen Erfahrungen mit Versuchs- und 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 ab-

gebildet 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 ($0,10 \text{ g/m}^3$), org. gebundenem Kohlenstoff (50 mg/m^3 für katalytische Nachverbrennungsanlagen) sowie NO_x (als NO_2 ; $0,10 \text{ g/m}^3$).
- 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 Energieeinspartetechnologien 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 Auslegungszustand bei Nennlast	53
A7.2.2-1	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemessenen Istzustand (Volllastbetrieb)	54
A 7.2.2-2	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems im gemessenen Istzustand (Leerlaufbetrieb)	55
A 7.2.3-1	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturabsenkung auf 608 °C (Volllastbetrieb)	56
A 7.2.3-2:	Ergebnisse der Bilanzierung des KTL-Trocknersystems Temperaturabsenkung 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 °C, KTL-Linie 2	59
A 7.3.1-3	Chromatogramm Silicagel bei 715 °C, 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 °C, 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

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

Bezeichnung	Einheit	Menge	Bezeichnung	Einheit	Menge	
Trockner A10			Aufheizzone 1 - 2		W31	W32
Nenndurchsatz Karroserien	1/h	35	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m ³ /h	45000/35800	45000/32000
Masse Karrose (maximal)	kg	600	Motorleistung	kW	37	37
Masse Warenträger Skid	kg	250	Statischer Druck	Pa	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	m ³ _N /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		W33	
Länge der Haltezone 1-2	mm	21000/19000	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m ³ /h	45000/29000	
Länge der Kühlzone	mm	21000	Motorleistung	kW	37	
Objekttemperatur AH1	°C	70	Statischer Druck	Pa	1350	
Objekttemperatur AH2	°C	110	Wärmetauscherleistung	kW	203	
Objekttemperatur AH3	°C	150	Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	145/164	
Objekttemperatur AH4,HZ 1-2	°C	185	Reingasvolumenstrom	m ³ _N /h	16000	
Objekttemperatur Kühlzone	°C	35	Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	400/365	
Frischluftvolumenstrom über W37	m ³ _N /h	13700	Aufheizzone 4		W34	
Frischluftvolumenstrom (Ein-/Auslauf),Kalt	m ³ _N /h	1000/1000	Umluftvolumenstrom (Betrieb/Norm)	m ³ /h	45000/26800	
Frischluftvolumenstrom (Schleuse 1)	m ³ _N /h	1700	Motorleistung	kW	37	
Frischluftvolumenstrom (Schleuse 2)	m ³ _N /h	5000	Statischer Druck	Pa	1350	
Frischluftvolumenstrom (Auslauf)	m ³ _N /h	7000	Wärmetauscherleistung	kW	181	
TNV-System A20			Umlufttemperatur (Ein/Aus)	°C	174/193	
Abluftvolumenstrom	m ³ _N /h	16000	Reingasvolumenstrom	m ³ _N /h	16000	
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)	m ³ /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 A30			Reingasvolumenstrom	m ³ _N /h	16000	16000
Kühlzone			Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	334/326	326/320
Abluftventilator			Frischlufthvorwärmeeinrichtung		W37	
Abluftvolumenstrom	m ³ _N /h	85100	Frischlufthvolumenstrom	m ³ _N /h	14000	
Motorleistung	kW	2 x 22	Motorleistung	kW	18,5	
Statischer Druck	Pa	700	Wärmetauscherleistung	kW	-	
			Frischlufftemperatur	°C	20/203	
			Reingasvolumenstrom	m ³ _N /h	16000	
			Reingastemperatur (Ein/Aus)	°C	320/160	

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

		KTL Linie 1, VW Wolfsburg												Stand: 22.08.2012												A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM AN AO AP											
1		Berechnung TW-Trockner												Auslegung 750 °C Vollast																							
2		Berechnungsdaten / Eingangsdaten												Berechnungsmodul Trockner A10												Berechnungsmodul Prozesswärmezeugung A30											
3		Stoffstromdaten / Eingangsdaten												Energiebedarf (Kerosen und Skid)												Energiebedarf (Kerosen und Skid)											
4		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
5		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
6		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
7		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
8		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
9		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
10		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
11		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
12		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
13		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
14		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
15		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
16		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
17		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
18		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
19		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
20		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
21		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
22		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
23		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
24		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
25		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
26		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
27		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
28		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
29		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
30		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
31		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
32		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
33		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
34		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
35		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
36		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
37		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
38		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
39		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
40		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
41		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
42		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
43		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
44		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
45		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
46		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											
47		V Norm / Betrieb												Zusammensetzung												Zusammensetzung											

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

		KTL Linie 1, VW Wollsburg												Stand: 22.08.2012																																																																																																																																																																																																											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP																																																																																																																																																																														
1		Berechnung Tm-Trockner																																																																																																																																																																																																																							
2																																																																																																																																																																																																																									
3		Berechnungsmodul Trockner A10																																																																																																																																																																																																																							
4		Zusammensetzung												Vol.-%												Kerosin												Skid																																																																																																																																																																																			
5		Heizwert												C ₂ H ₆												CH ₄												SO ₂												CO ₂												CO												H ₂ O												H ₂												O ₂												N ₂												Dichte												Dichte												Temp												Mass												V Norm												V																																			
6		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
7		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
8		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
9		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
10		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
11		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
12		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
13		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
14		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
15		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
16		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
17		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
18		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
19		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
20		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
21		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
22		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
23		Abh. und												Abh. bel.												Abh. ZVT												Edgas												Br. Luft												Reingas 1												Fr. Luft W												Fr. Luft K												Umluft 1												Umluft 2												Umluft 3												Umluft 4												Umluft 5												Umluft 6												Schadst.												Energiesrom												Abgas												Ausgangswert											
24		Berechnungsmodul Tm-System A20																																																																																																																																																																																																																							
25		Brennkammer D21												Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																															
26		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
27		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
28		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
29		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
30		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
31		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
32		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
33		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
34		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
35		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
36		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
37		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
38		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
39		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
40		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
41		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
42		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
43		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
44		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
45		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
46		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											
47		Abfluhwärmer W22												Wärmeübertrager W23												Wärmeübertrager W24												Wärmeübertrager W25												Wärmeübertrager W26												Frischlufthwärmeübertrager W27																																																																																																																																																											

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

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

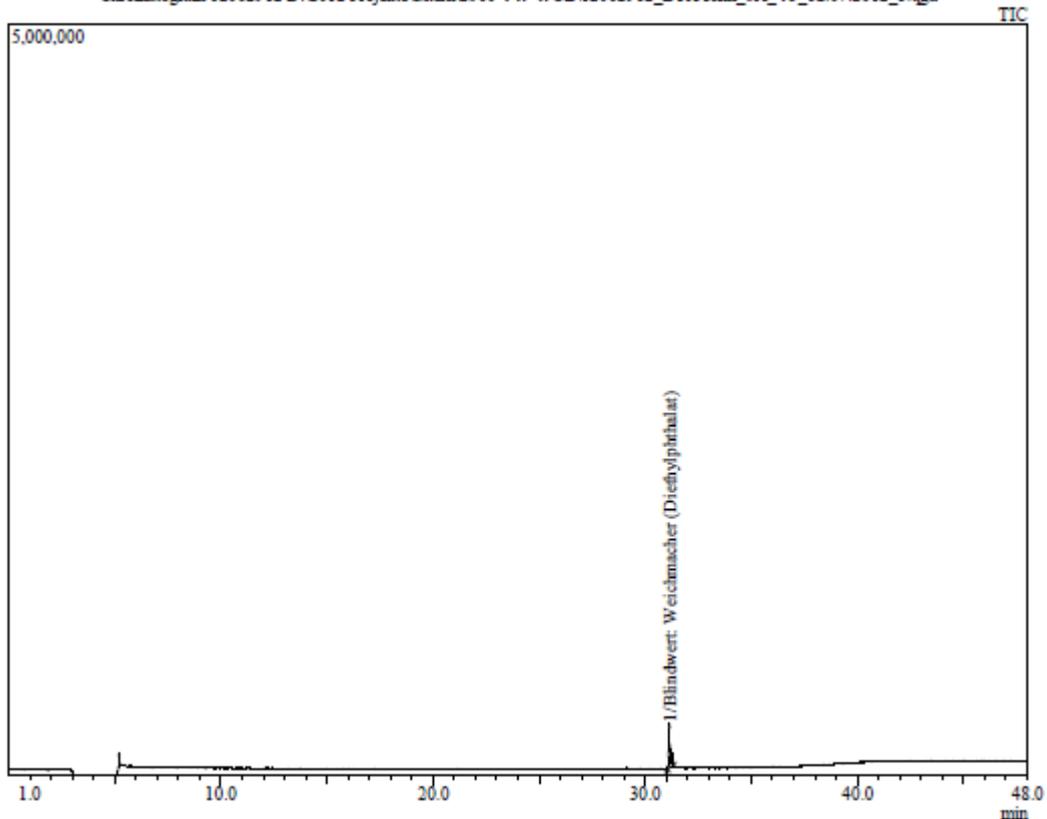
Tabelle A 7.3.1-2: Chromatogramm Aktivkohle bei 715 °C, KTL-Linie 2

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_BT-X-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-Reingas 5 A,
Projekt: VW-WOB, 2560
Messstelle: KTL Reingas 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, Ser.-Nr. 995332
Det.: 1,45 kV
Modified by : Admin
Modified : 13.07.2012 10:10:57

Chromatogram 12062912 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062912_BT-X-Rein_5A_V3_12.07.2012_3.qgd



Peak#	R. Time	Area	Area%	Name
1	31.135	1355510	100.00	Blindwert: Weichmacher (Diethylphthalat)
		1355510	100.00	

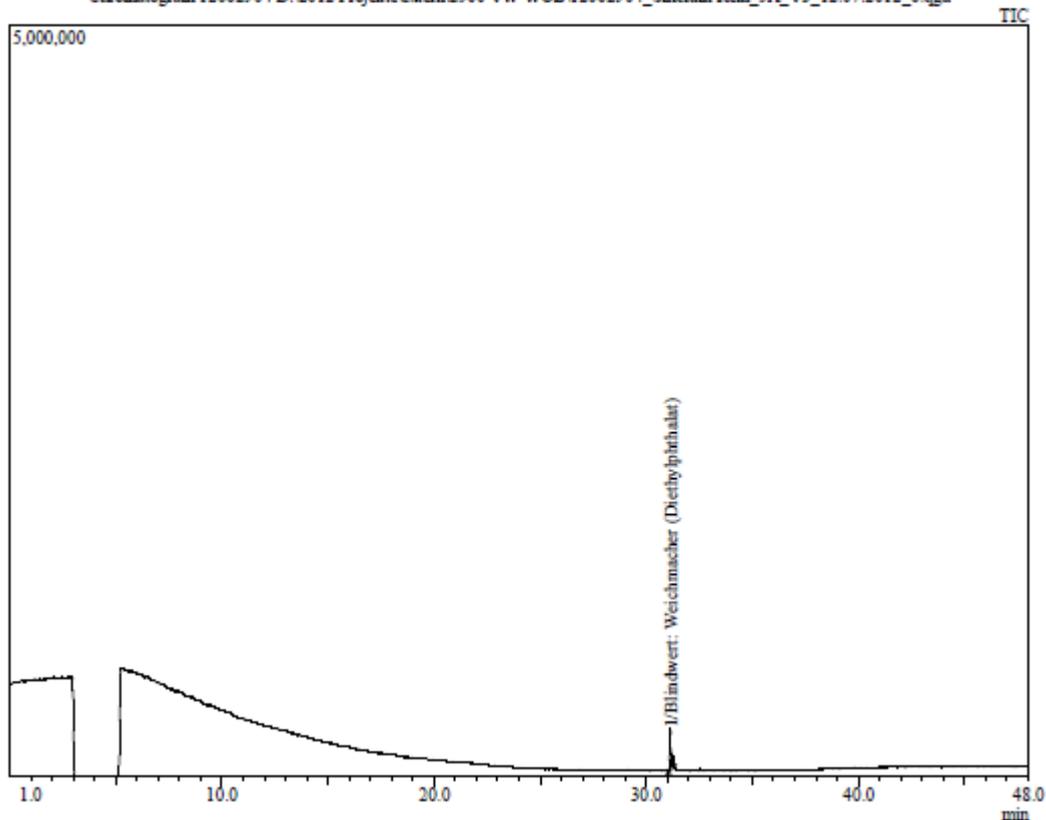
Tabelle A 7.3.1-3: Chromatogramm Silicagel bei 715 °C, KTL-Linie 2

CUTEC-Institut
GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by : Kiefer
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.C
Method File : D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SiIMS_Screen_CS2.qgm
Report File :
Tuning File : C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]
12062904, Silicium, organ.-Reingas 5 A,
Projekt: VW-WOB, 2560
Messstelle: KTL Reingas 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, Ser.-Nr. 995332
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 Report TIC

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

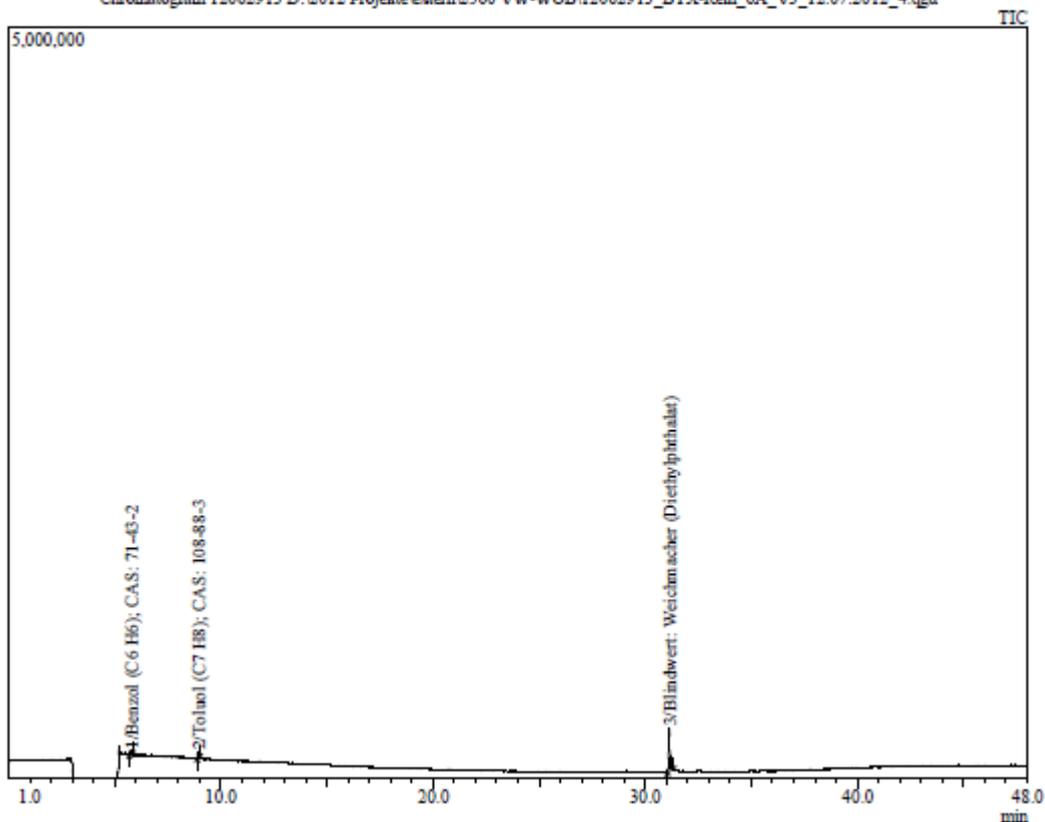
Tabelle A 7.3.1-4: Chromatogramm Aktivkohle bei 650 °C, KTL-Linie 2

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_BT-X-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-Reingas 6 A,
Projekt: VW-WOB, 2560
Messstelle: KTL Reingas 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, Ser.-Nr. 995332
Det.: 1,45 kV
Modified by : Admin
Modified : 13.07.2012 10:12:45

Chromatogram 12062913 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062913_BT-X-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	

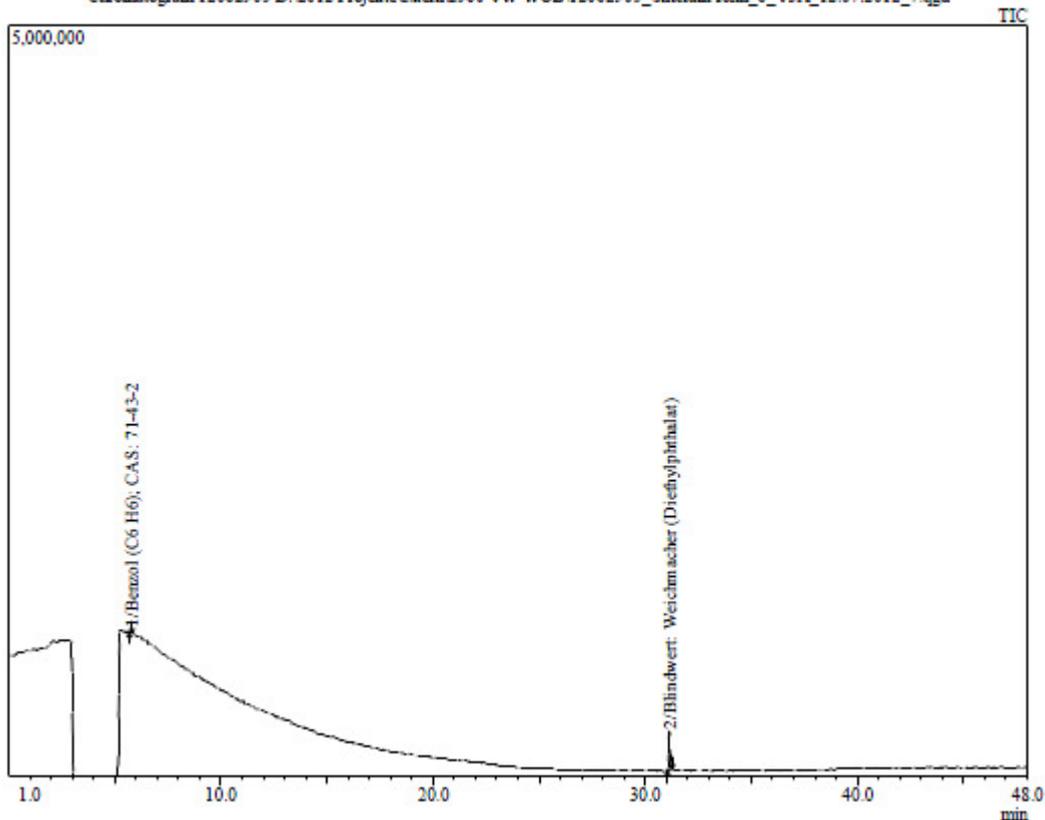
Tabelle A 7.3.1-5: Chromatogramm Silicagel bei 650 °C, KTL-Linie 2

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.C
Method File : D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\Rxi_5SiIMS_Screen_CS2.qgm
Report File :
Tuning File : C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
[Comment]
12062905, Silicium, organ.-Reingas 6 A,
Projekt: VW-WOB, 2560
Messstelle: KTL Reingas 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, Ser.-Nr. 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	

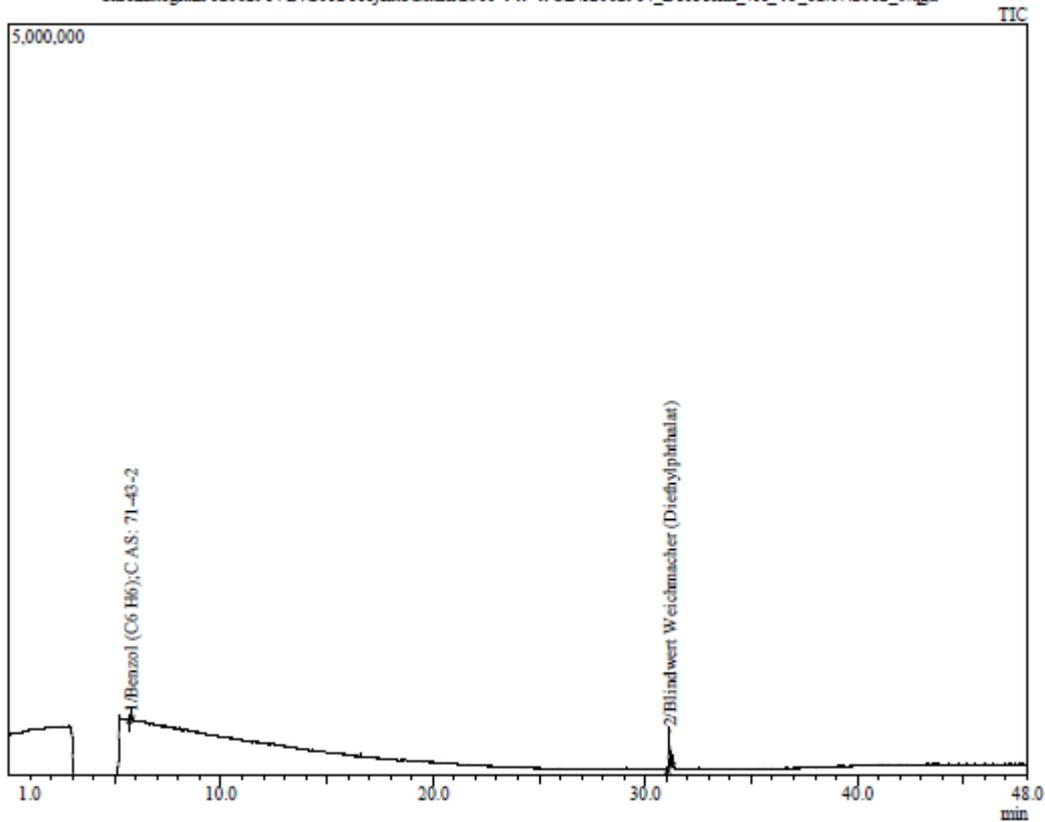
Tabelle A 7.3.1-6: Chromatogramm Aktivkohle bei 600 °C, KTL-Linie 2

CUTEC-Institut
GC-MS QP 5050 von Shimadzu

Sample Information

Analyzed by : Kiefer
Analyzed : 12.07.2012 20:06:15
Sample Type : Unknown
Sample Name : 12062914
Sample ID : BTX-Rein_7A_V3
Injection Volume : 1.000
Data File : D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062914_BT-X-Rein_7A_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]
12062914, BTX-Reingas 7 A,
Projekt: VW-WOB, 2560
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

Chromatogram 12062914 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062914_BT-X-Rein_7A_V3_12.07.2012_5.qgd



Peak Report TIC

Peak#	R.Time	Area	Area%	Name
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	

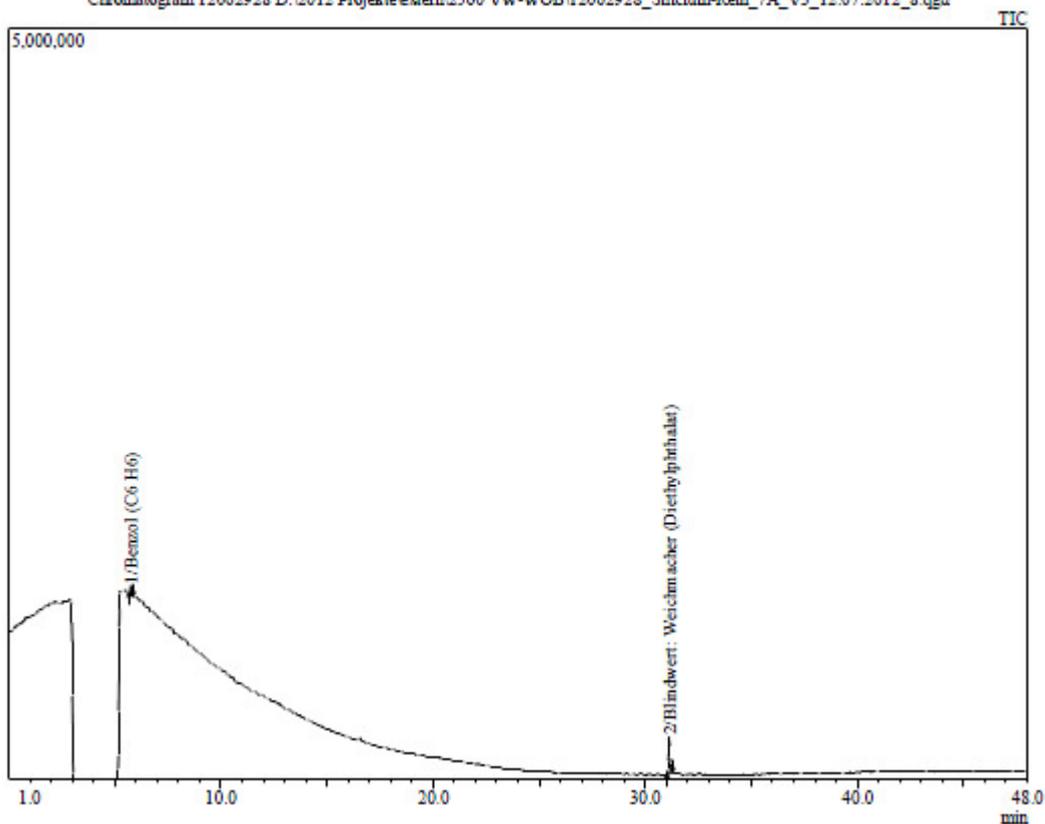
Tabelle A 7.3.1-7: Chromatogramm Silicagel bei 600 °C, KTL-Linie 2

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.qgm
 Report File :
 Tuning File : C:\GCMSsolution\System\Tune1\12_07_12_Scan.qgt
 [Comment]
 12062928, Silicium, organ.-Reingas 7 A,
 Projekt: VW-WOB, 2560
 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 10:16:25

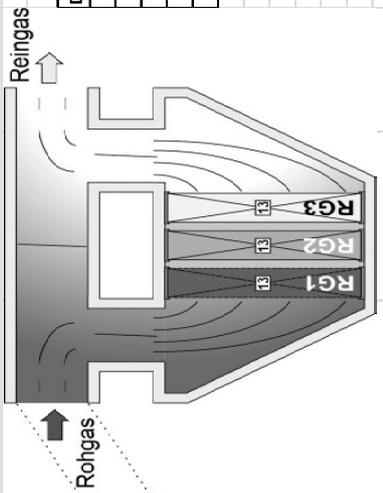
Chromatogram 12062928 D:\2012 Projekte\extern\2560 VW-WOB\12062928_Silicium-Rein_7A_V3_12.07.2012_8.qgd



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	

Tabelle A 7.6.3-1: Dokumentation Katalysatorüberwachung: Technische Daten

Produktionsabschnitt:		Füller		Stand:		14.12.2012			
Linie, Nr u. Strang-Nr	F3S1	Datum Einbau	Hersteller	Art	Typ	Maße	Zeldichte	Anzahl	Bemerkungen
Standort, Werk:	Wolfsburg	Jan 10	Heraeus	Opferkat.	HC-801 Cu/Min 1	150x150x150	200cpsl	100	
Halle:	15b	Jan 10	Süd-Chemie	Oxidationskat.	EnviCat2520CH	150x150x150	200cpsl	100	
Volumenstrom:	6200 m ³ _{n,nd} /h	Jan 10	Süd-Chemie	Oxidationskat.	EnviCat2520CH	150x150x150	200cpsl	100	
Temp _{BK, TNV} :	580 °C								
Katalysatorgehäuse: Langbein & Engelbracht									
Katalysator, Lage 1									
Katalysator, Lage 2									
Katalysator, Lage 3									
Datum, 1. Wechsel									
Katalysator, Lage 1		Hersteller		Art	Typ	Maße	Zeldichte	Anzahl	Bemerkungen
Katalysator, Lage 2		Juli 12 / Jan 10	Süd-Chemie	Oxidationskat.	EnviCat2520CH	150x150x150	200cpsl	100	war vorher in Lage 2 verbaut (Bsp)
Katalysator, Lage 2		Juli 12 / Jan 10	Süd-Chemie	Oxidationskat.	EnviCat2520CH	150x150x150	200cpsl	100	war vorher in Lage 3 verbaut (Bsp)
Katalysator, Lage 3		Jul 12	Süd-Chemie	Oxidationskat.	EnviCat2520CH	150x150x150	200cpsl	100	frische Katalysatoren (Bsp)
									
Reingasvolumenstr		Temp _{BK, TNV}		Temp _{Kat, Einleit}		Temp _{Kat, Ausg}		ΔP _{Kat}	
Datum	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mbar]			
23.02.2010	6296,63								
10.03.2010	6241	584		390	293				
01.09.2011									
09.02.2012	Revision								
10.07.2012	7256			500	304				
Messung von SW: 77 2822									

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 Auslegungszustand 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 Temperaturabsenkung auf 608 °C (Volllast)	72
A 7.2.3-2	Energiefließbild Füller-Trockner bei einer berechneten Temperaturabsenkung 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. Zwischengas) 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. Zwischengas) 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. 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	76
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	77
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	78
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	79

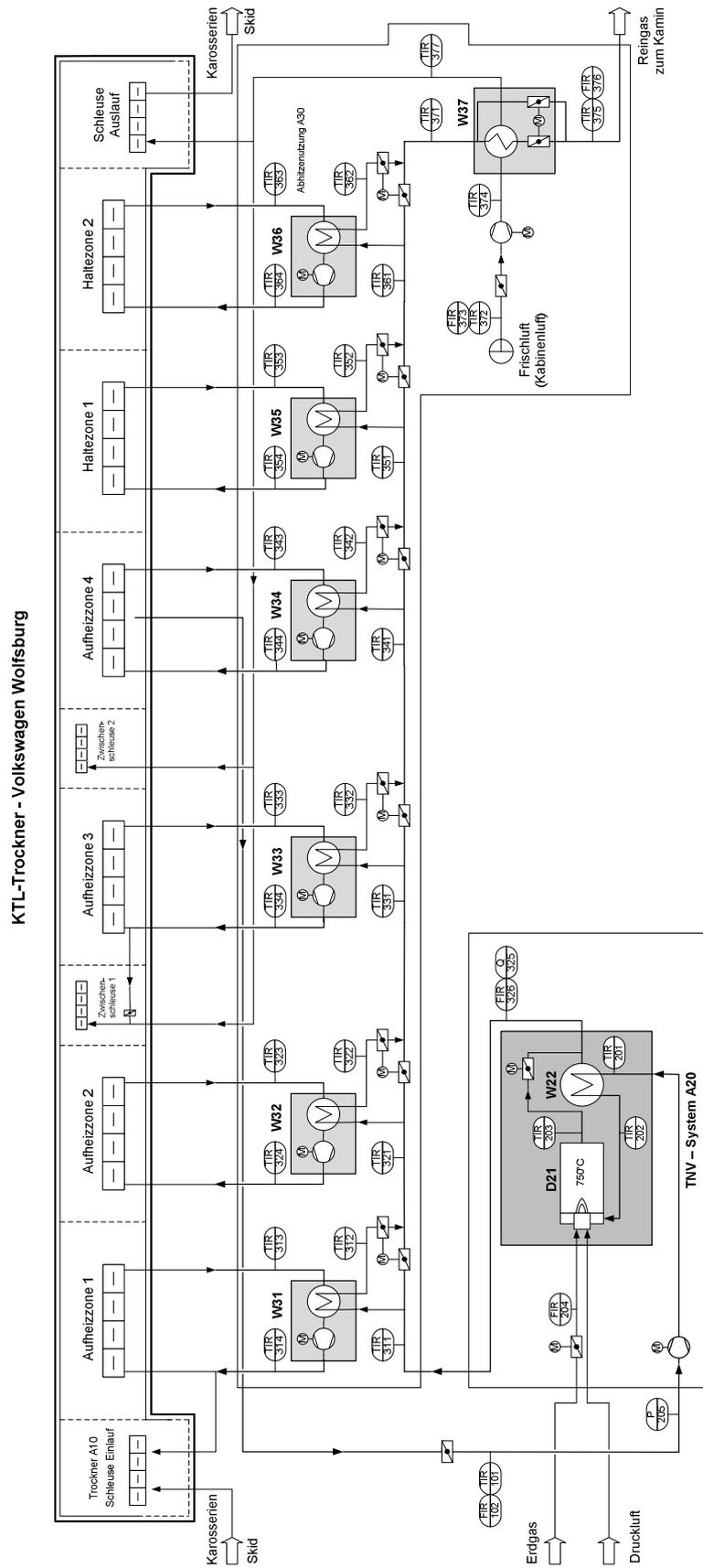


Bild A7.2-1: Verfahrenstechnisches Fließbild des KTL-Trocknersystems

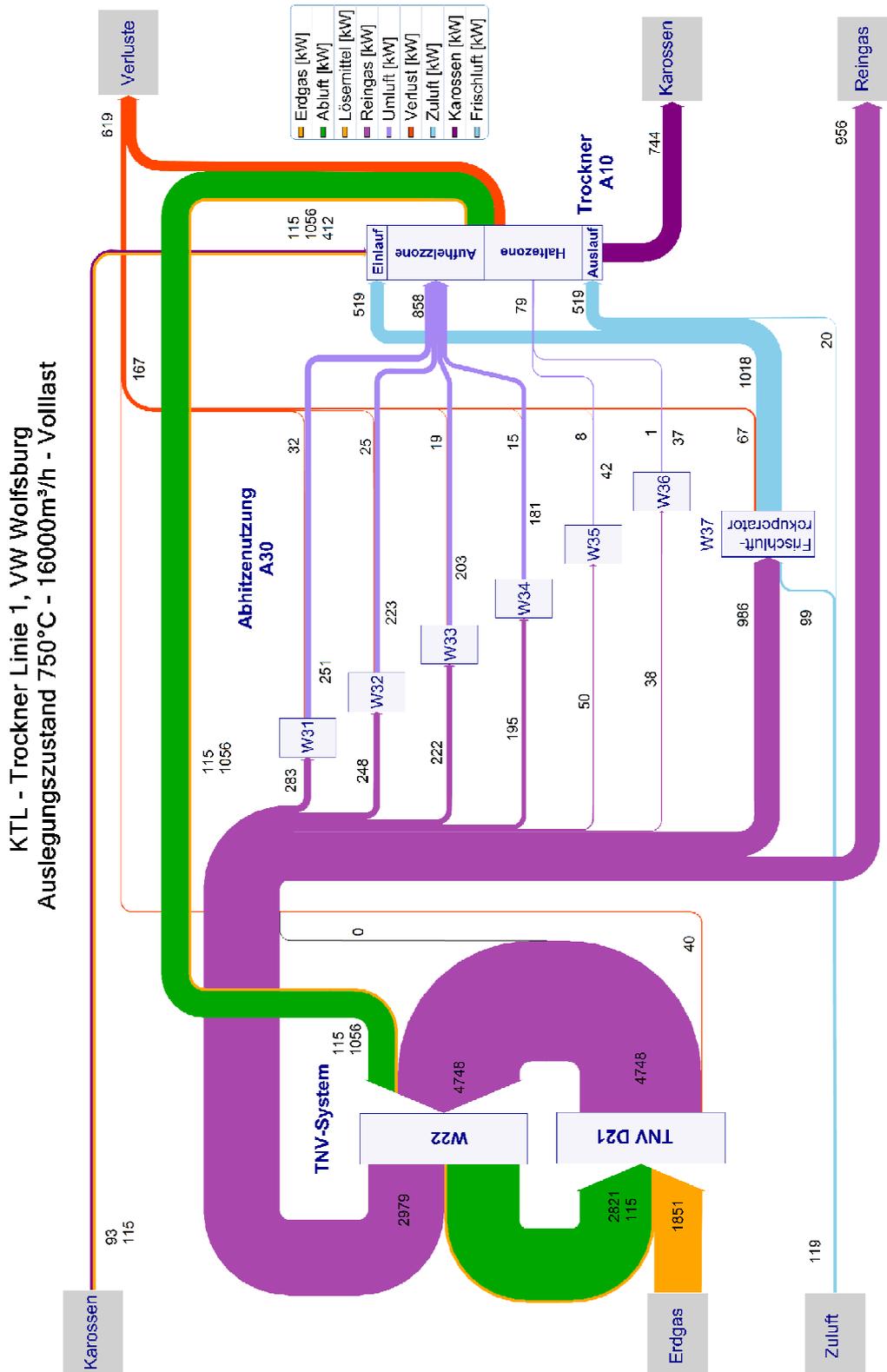


Bild A 7.2.1-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Auslegungszustand bei Nennlast.

Abluftvolumenstrom: 16.000 m³_N/h;
 TNV-Regeltemperatur: 750 °C
 Karosserien Volllast: 35 1/h

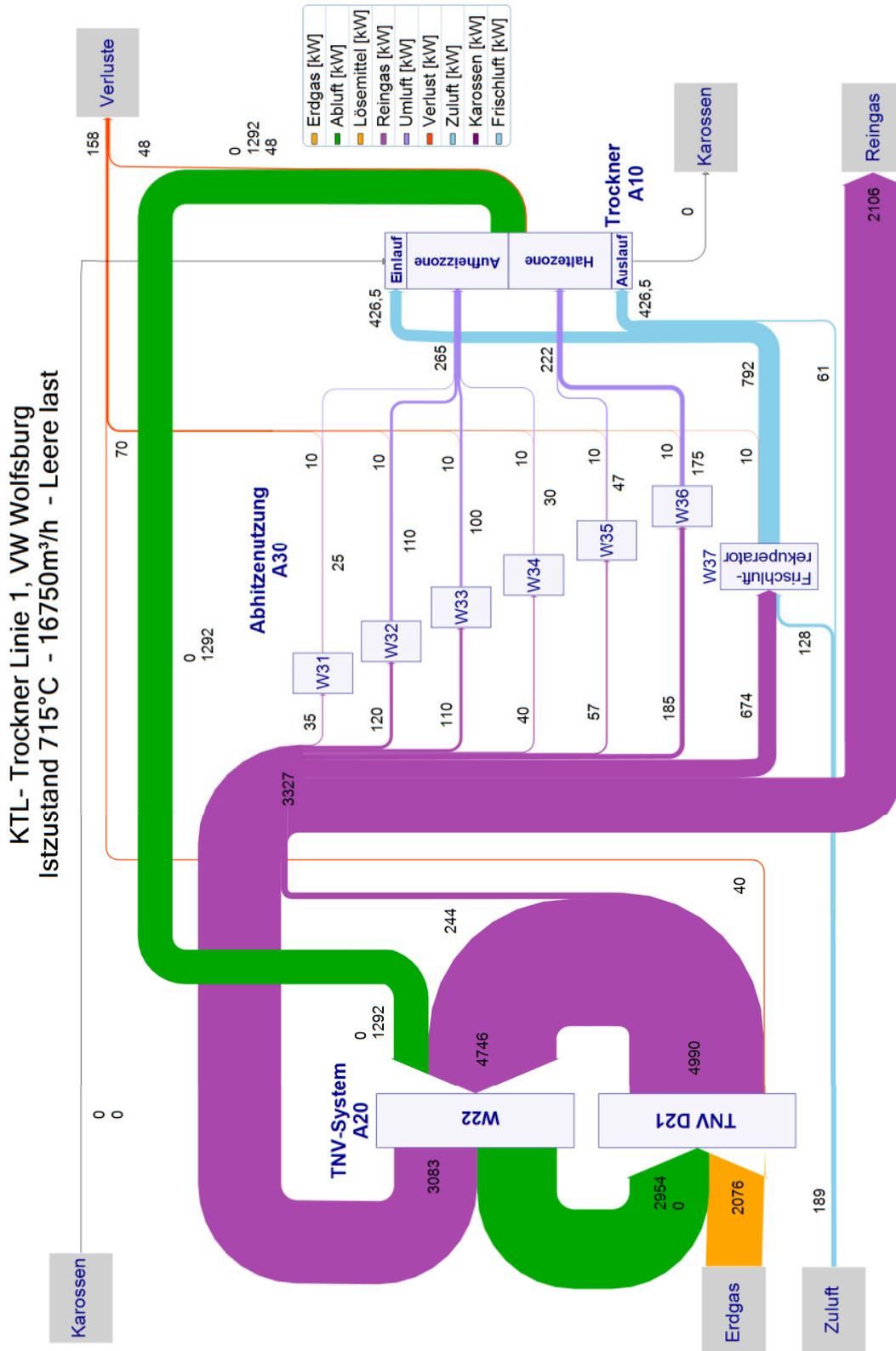


Bild A 7.2.2-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System im Istzustand (Messung, Leerlaufbetrieb)
 Abluftvolumenstrom: 16.750 m³_N/h;
 TNV-Regeltemperatur: 715 °C
 Karosserien Leerlauf: 0 1/h

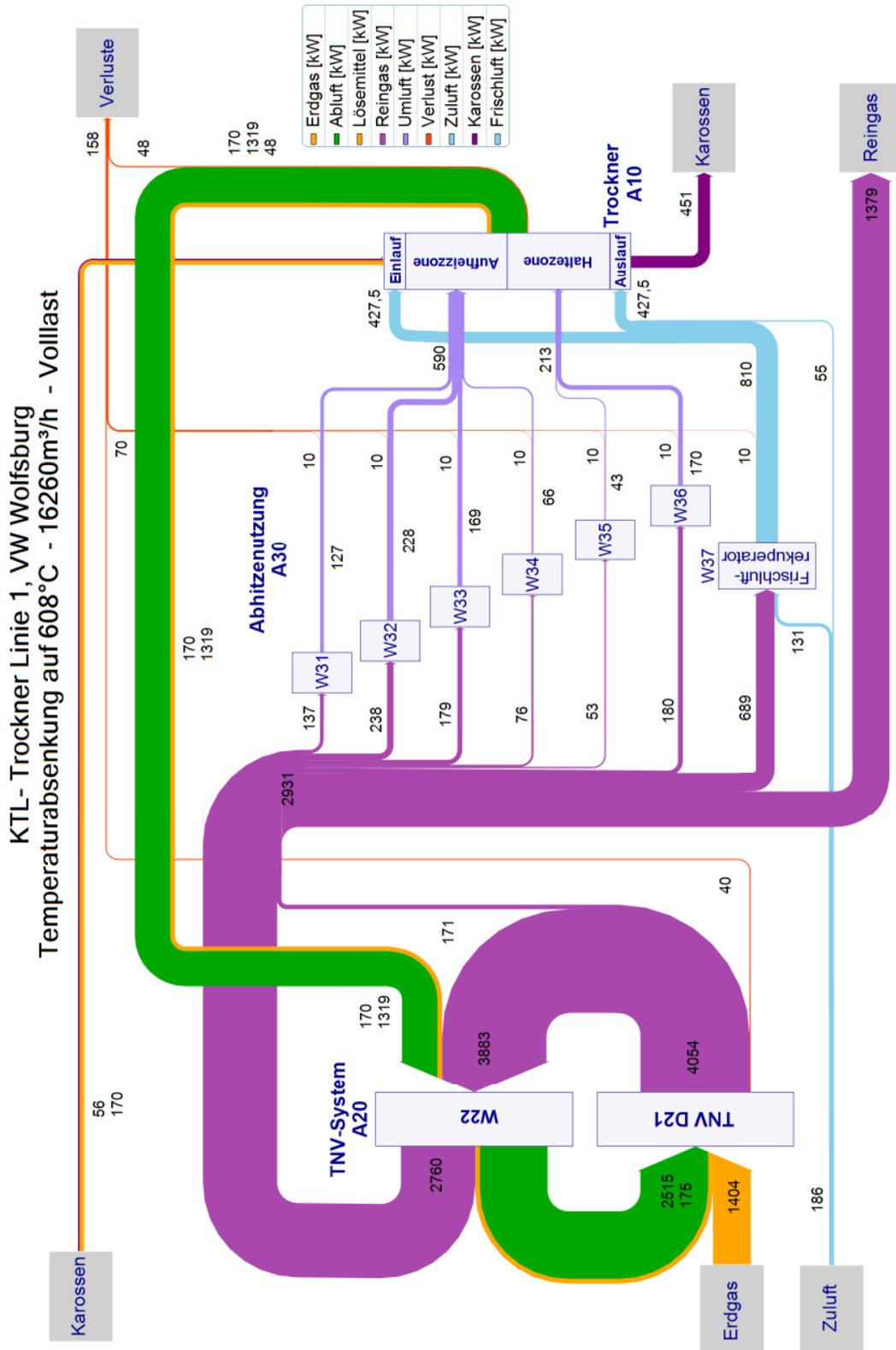


Bild A 7.2.3-1: Energiefließbild des KTL-Trockners mit TNV-System Temperaturabsenkung auf 608 °C (Volllast)

Abluftvolumenstrom: 16.260 m³_N/h;
 TNV-Regeltemperatur: 608 °C
 Karosserien Volllast: 32,8 1/h

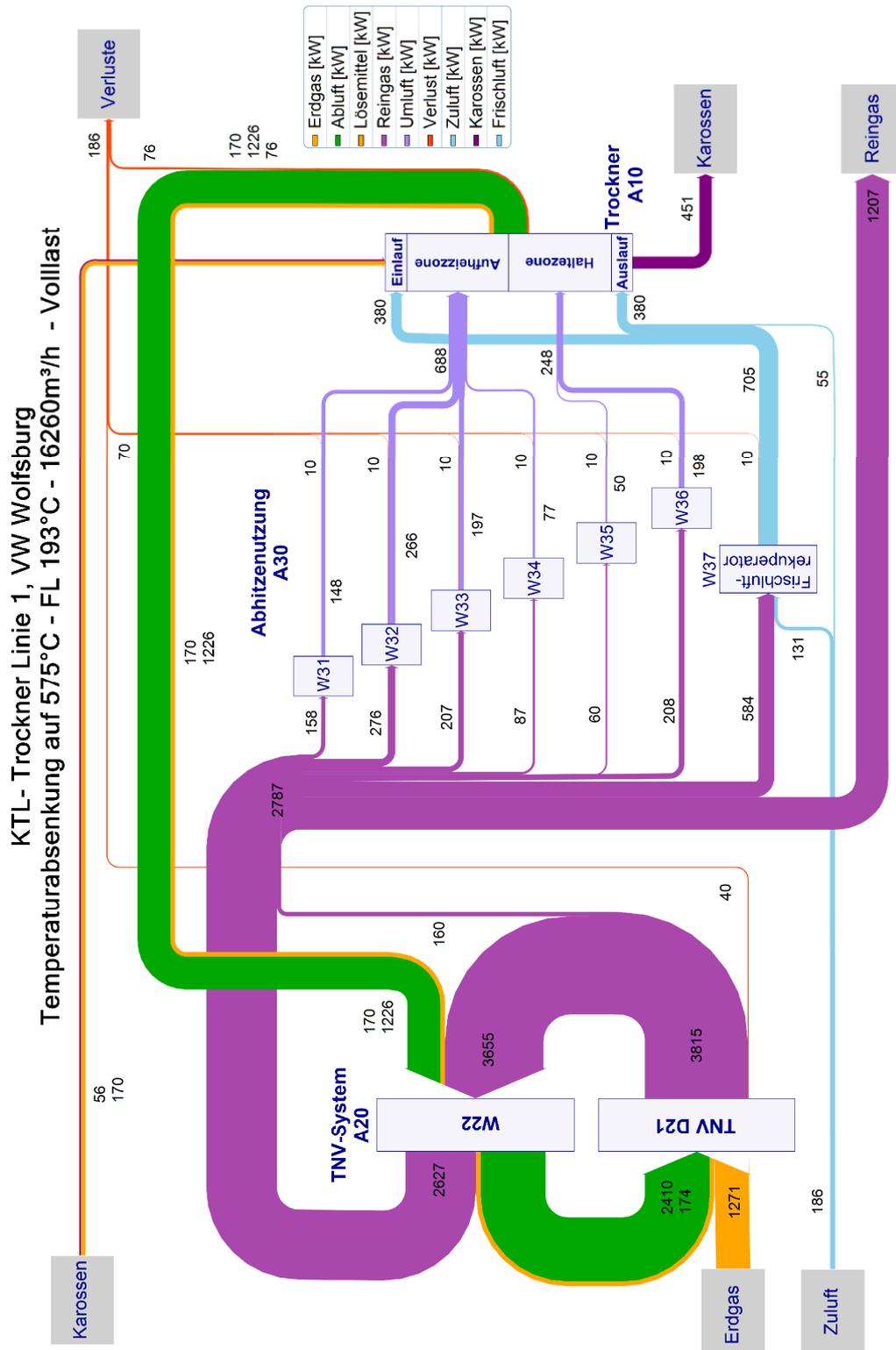


Bild A 7.2.3-2: Energiefließbild Füller-Trockner bei einer berechneten Temperaturabsenkung auf 575 °C. (Volllast; Absenkung 2)
 Abluftvolumenstrom: 16260 m³_N/h;
 TNV-Regeltemperatur: 575 °C
 Frischlufttemperatur: 193 °C
 Karosserien (Normalbetrieb): 32,8 1/h

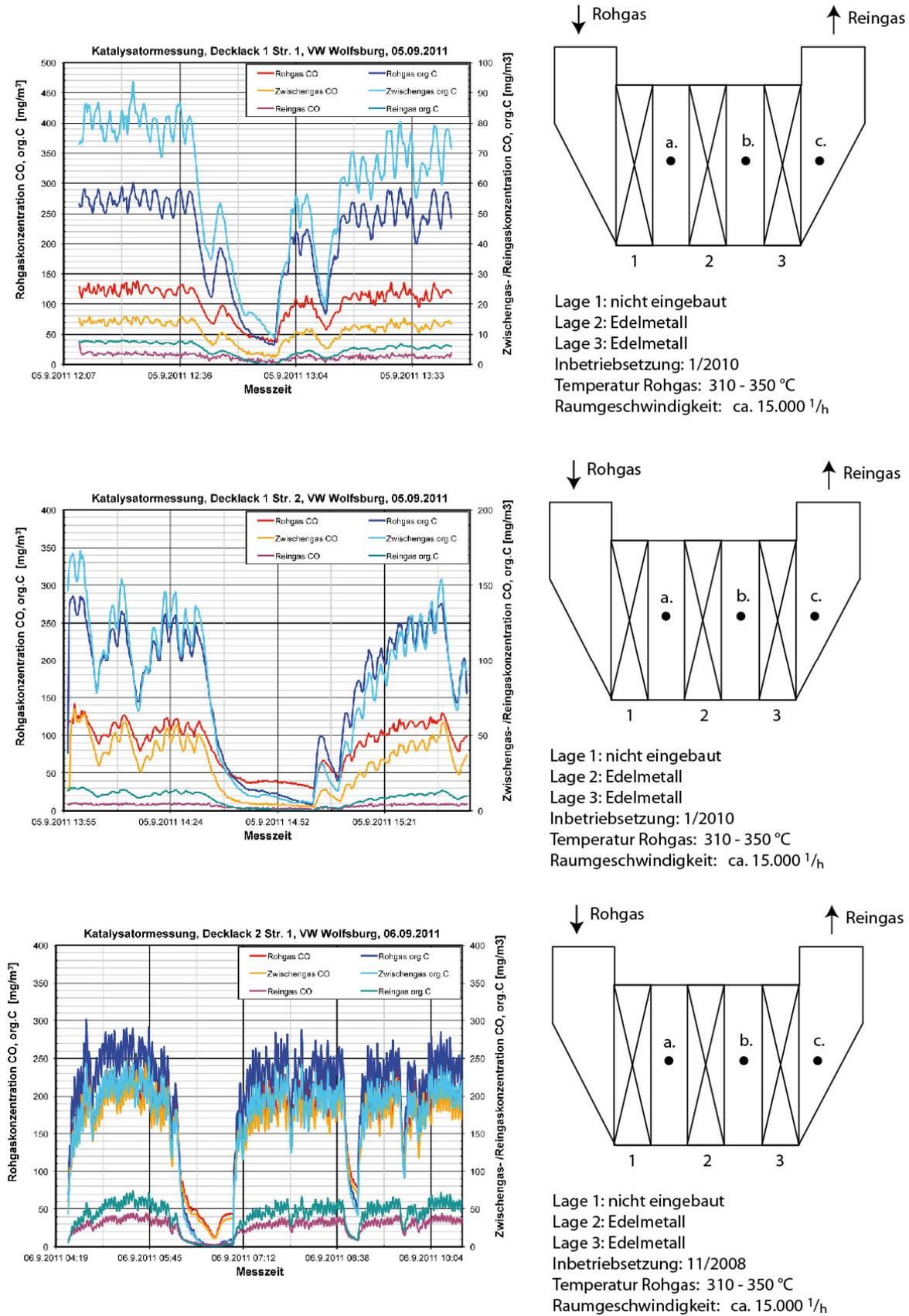
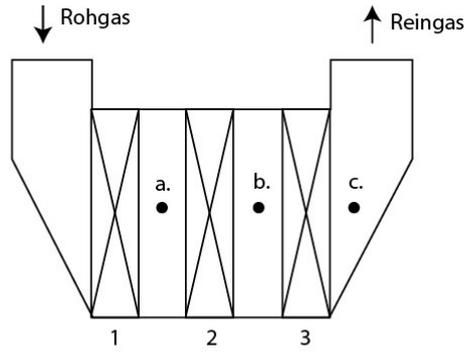
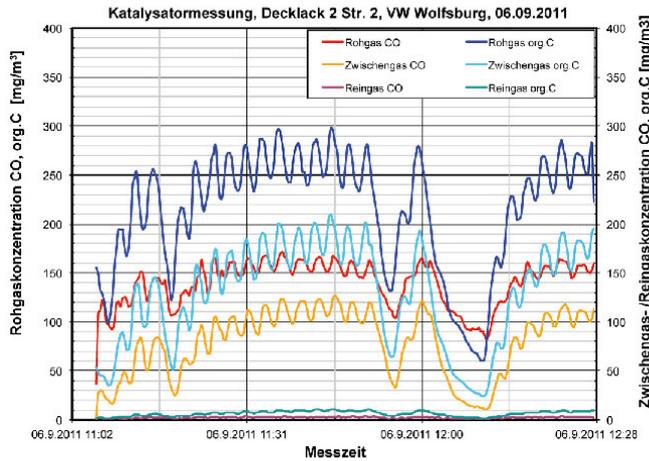
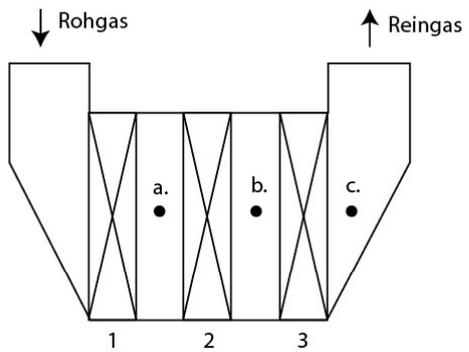
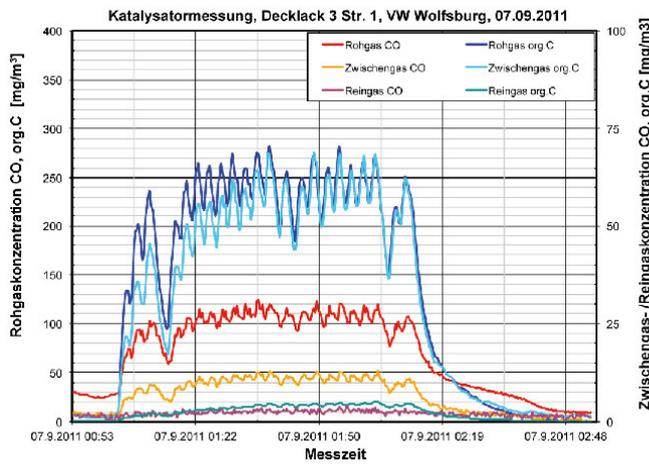


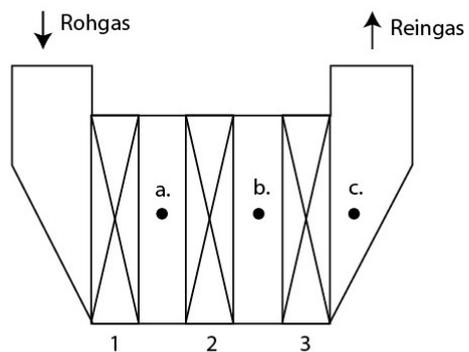
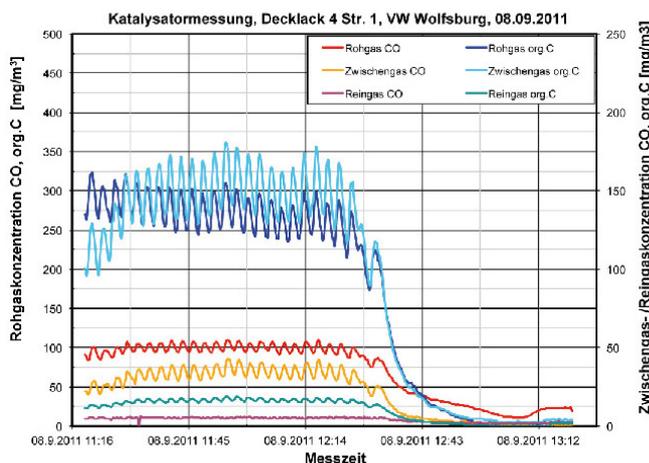
Bild A 7.5.1-1: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (1)



Lage 1: nicht eingebaut
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 11/2008
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

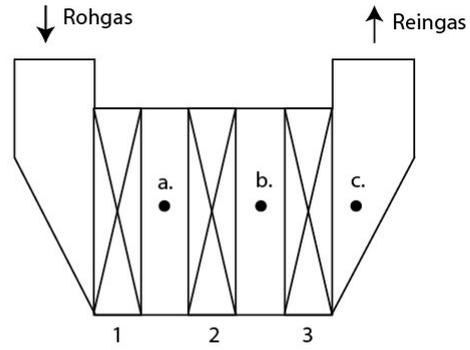
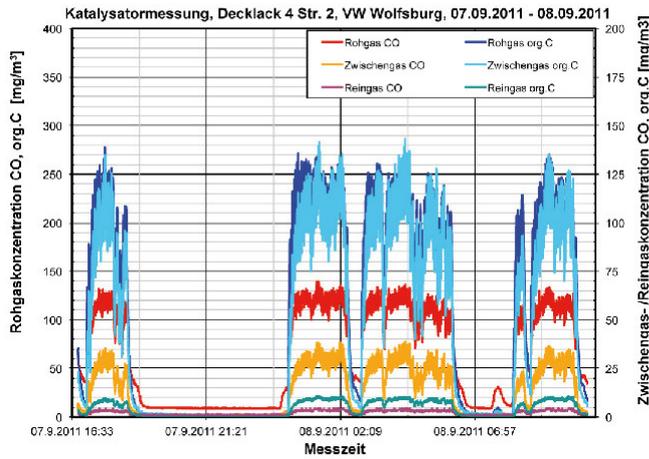


Lage 1: nicht eingebaut
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 11/2008
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

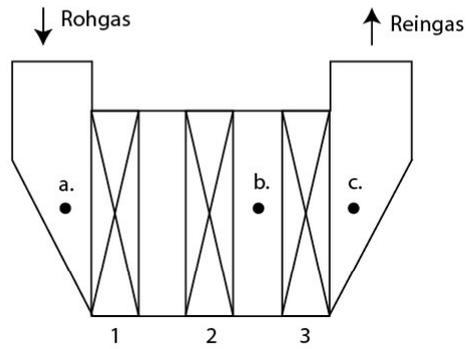
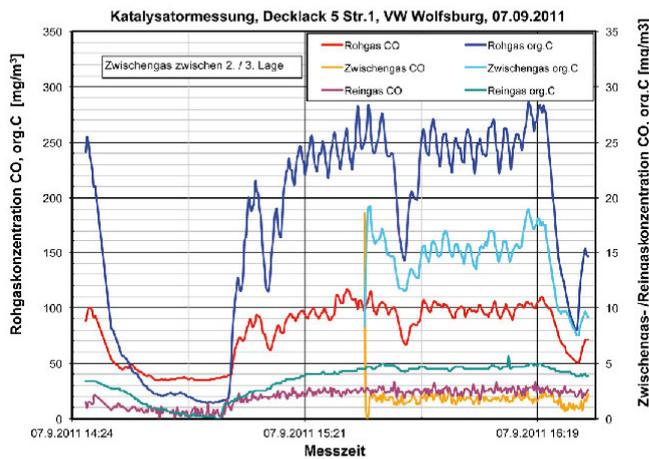


Lage 1: nicht eingebaut
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 11/2008
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

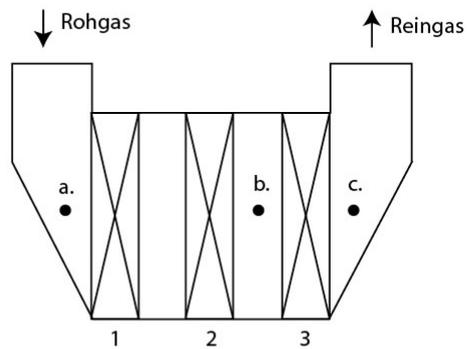
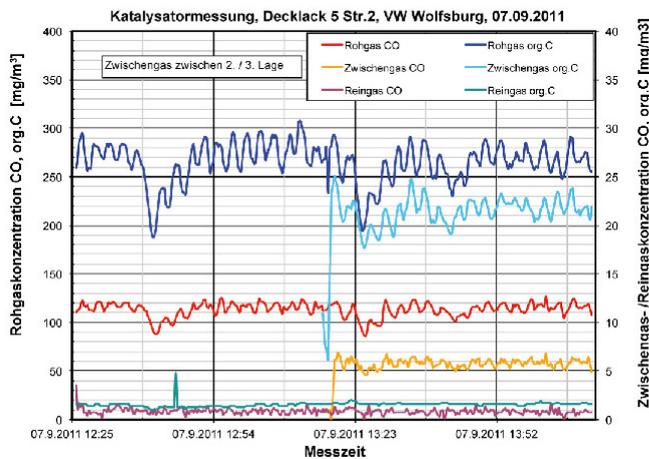
Bild A 7.5.1-2: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (2)



Lage 1: nicht eingebaut
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 11/2008
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

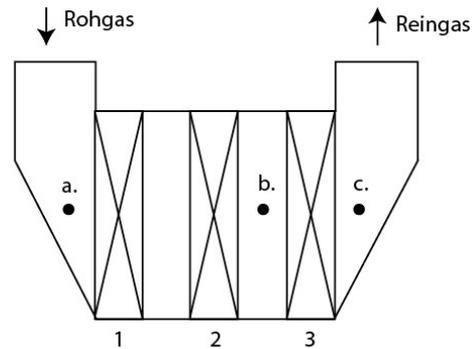
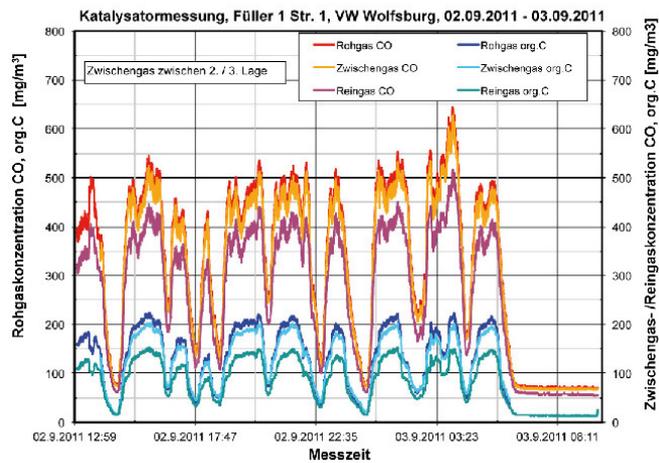


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 1/2010
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

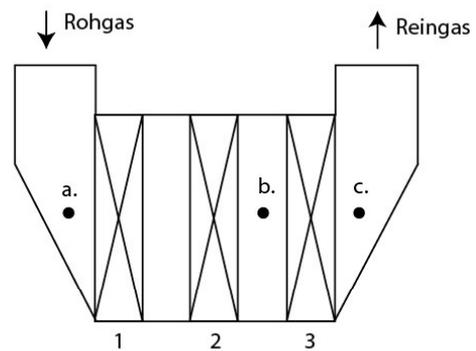
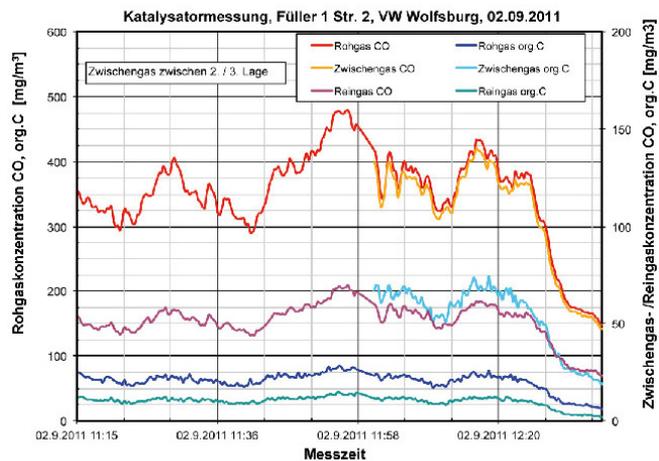


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 1/2010
 Temperatur Rohgas: 310 - 350 °C
 Raumgeschwindigkeit: ca. 15.000 1/h

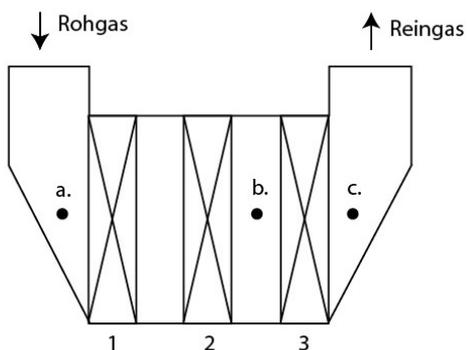
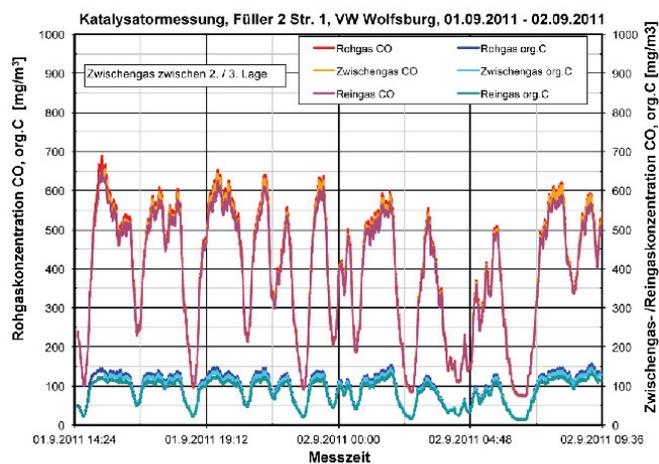
Bild A 7.5.1-3: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Decklacks (3). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt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



Lage 1: Metalloxid (Opfer)
Lage 2: Edelmetall
Lage 3: Edelmetall
Inbetriebsetzung: 1/2010
Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

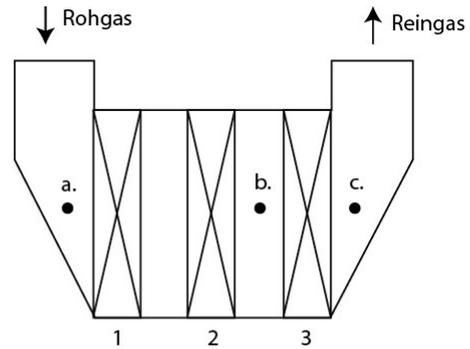
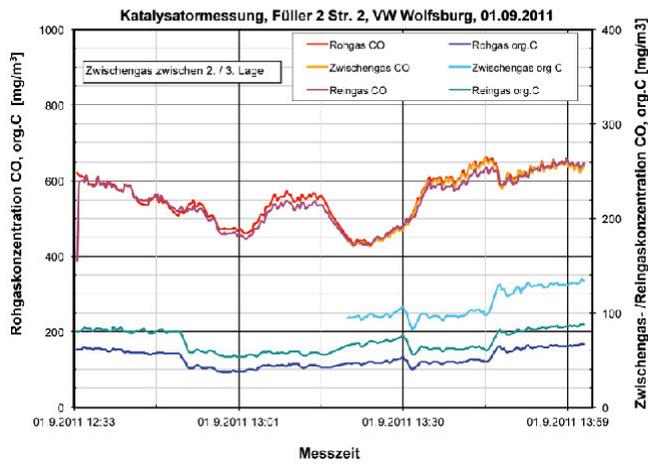


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
Lage 2: Edelmetall
Lage 3: Edelmetall
Inbetriebsetzung: 1/2010
Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

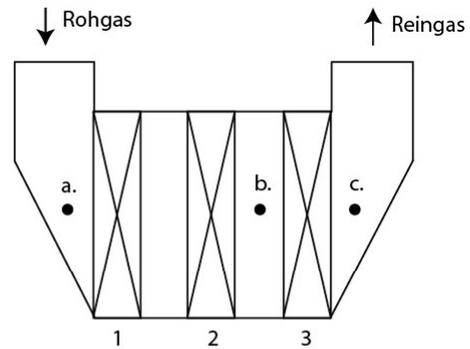
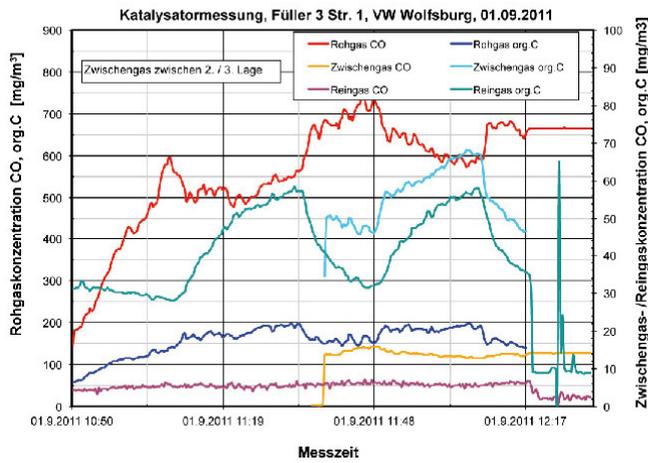


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
Lage 2: Edelmetall
Lage 3: Edelmetall
Inbetriebsetzung: 7/2009
Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

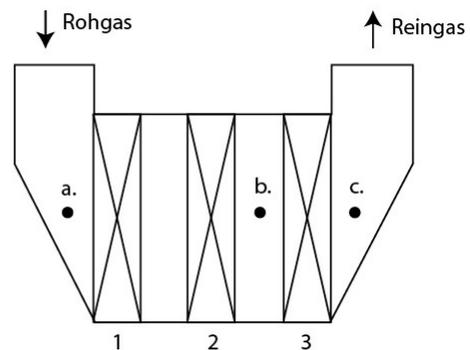
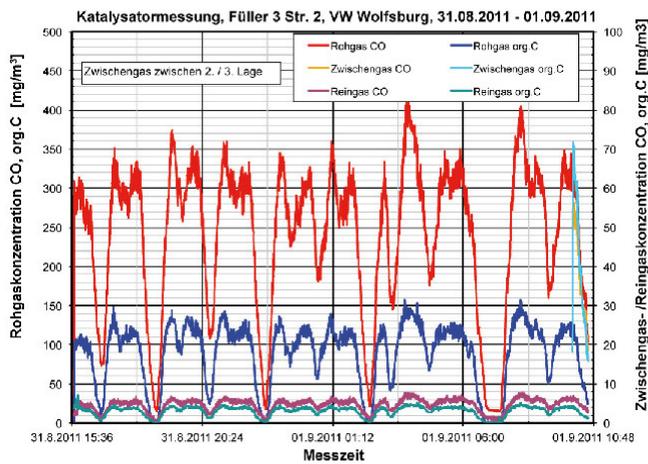
Bild A 7.5.1-4: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (1). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt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



Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 7/2009
 Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
 Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

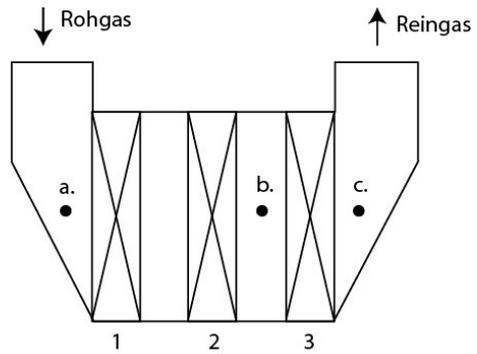
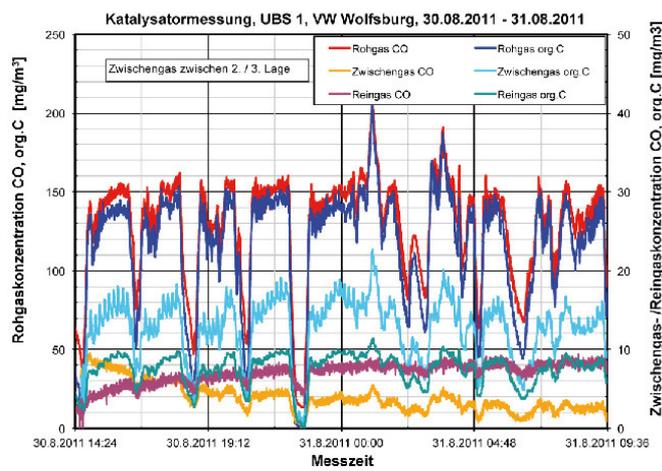


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 7/2009
 Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
 Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

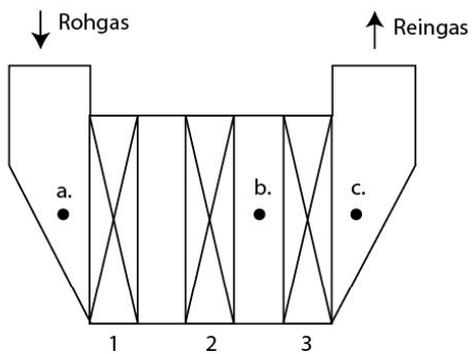
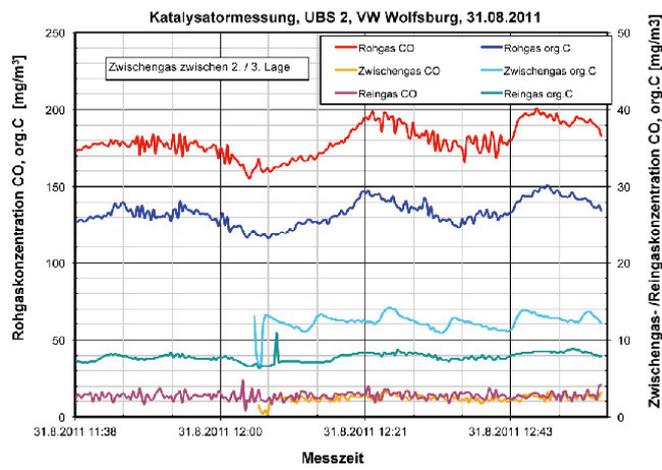


Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 7/2009
 Temperatur Rohgas: 390 - 400 °C
 Raumgeschwindigkeit¹: ca. 10.400 1/h

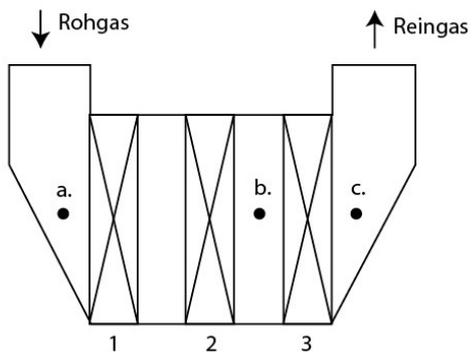
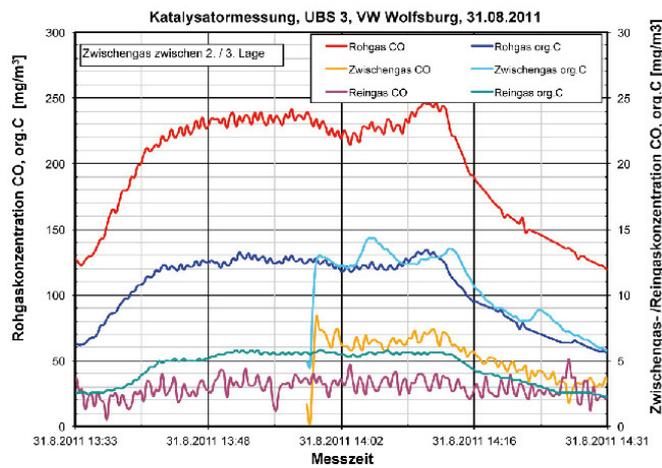
Bild A 7.5.1-5: Messungen zu den Konzentrationsverläufen an Kohlenstoffmonoxid und org. gebundenem Kohlenstoff vor (a. Rohgas), zwischen (b. Zwischengas) und hinter (c. Reingas) den Katalysatorlagen im Bereich des Füllers (2). 1) Raumgeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt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



Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 1/2010
 Temperatur Rohgas: 300 - 325 °C
 Raumeschwindigkeit¹: ca. 9.600 1/h



Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 1/2010
 Temperatur Rohgas: 300 - 325 °C
 Raumeschwindigkeit¹: ca. 9.600 1/h



Lage 1: Metalloxid (Opfer)
 Lage 2: Edelmetall
 Lage 3: Edelmetall
 Inbetriebsetzung: 1/2010
 Temperatur Rohgas: 300 - 325 °C
 Raumeschwindigkeit¹: ca. 9.600 1/h

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) Raumeschwindigkeit bezogen auf die 2. und 3. Lage, in Opferschicht doppelt so hoch