

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht Teil I+II

Zuwendungsempfänger: Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz	Bearbeiter im Projektträger: Dr. Dimitri Tabakajew Förderkennzeichen: 03ET1547A
Vorhabenbezeichnung: Verbundvorhaben EnergyTex – „Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie“; Teilprojekt: „Prozessanalytische Untersuchungen an Veredlungs- und Beschichtungsanlagen zur Erhöhung der Energieeffizienz“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2018 bis 31.07.2021	
Berichtszeitraum: 01.08.2018 bis 31.07.2021	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren/Projektleitern.

Projektleitung: Dr.-Ing. Ulrich Heye

Rechtsverbindliche Unterschrift

Dr. Heike Illing-Günther

Geschäftsführender Direktor

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Danksagung.....	VII
Zusammenfassung.....	1
1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
Teil II - Eingehende Darstellung.....	9
6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses	9
AP 1: Präzisierung der Projektplanung	9
AP 2: Entwicklung der materiell-technischen Basis des Projektes	11
Identifizierung potentieller Einsatzorte für den Betrieb einer Mikrogasturbine.....	11
Auswahl möglicher Einsatzorte zu weiterführenden Betrachtungen und Untersuchungen.....	16
AP 3: Analyse der in AP 2 ausgewählten energetisch relevanten Prozesse.....	17
AP 4: Untersuchung der Einflüsse der Prozessparameter auf Produkteigenschaften und Energieverbrauch im Produktionsprozess.....	18
Wäscher-Prüfstand an der HOBA bei der Firma VOWALON	19
AP 5: Entwicklung der Einbindung, Konzeptionierung und Auslegung der Gasturbine	22
Mikrogasturbinen-Prüfstand bei der Firma efa in Leipzig	22
Weichmacher	22
Siloxane	24
Einleitung	24
Verwendung und Einsatz	24
Abtrennung	25
Siloxane und Mikrogasturbinen.....	26
AP 6: Umsetzung des Konzeptes bei der Firma VOWALON	27
Aufbau des Mikrogasturbinen-Prüfstands bei VOWALON (Einsatzort 6: Lösemittelanmischraum)	27
AP 7: Vermessung der Prototypenanlage inklusive der relevanten Produktionsprozesse	29

Analytik von Siloxanen (Beispiel Laborbeschichtungsanlage LABA)	29
AP 8: Versuche an der Prototypenanlage unter Beachtung der in AP 5 entwickelten Konzepte und Technologien.....	34
Teil A) Abluftkonditionierung: Entfernung von Weichmachern aus der Abluft durch Kondensation (Weichmacher-AWT an LABA bei VOWALON).....	34
Teil B) Abluftwärmerückgewinnung (AWT-WRG an LABA).....	35
Teil C) Entfernung von Siloxanen aus der Abluft durch Absorption in Mineralöl (Siloxanwäscher im STFI) 36	
AP 9: Untersuchung des Einflusses der Gasturbine auf die Abgasnachbehandlung (RTO) und die dort auftretenden Energieverbräuche.....	41
Energetische Betrachtung am μ GT-Prüfstand bei VOWALON	41
AP 10: Weiterentwicklung des Technologie- und Anlagenkonzeptes.....	45
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	45
Einsatzort 2 (Einbau einer μ GT in UBA-ABL-Bypasskanal)	46
Einsatzort 6 (Einbau einer μ GT im LMA, Abgaseinspeisung direkt in ABL-Kanal).....	47
Einsatzort 10 (VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel mittels Saacke-Brenner).....	48
Einsatzort 11 (Einbau einer μ GT in Gesamt-ABL-Bypasskanal mit WRG).....	48
Einsatzort 12 (Einbau einer μ GT in HOBA-ABL-Kanal mit vorgelagertem Kühler).....	48
AP 11: Entwicklung eines Konzeptes zur Verallgemeinerung und Übertragung der Projektergebnisse auf andere Branchen und Prozesse	52
AP 12: Projektauswertung, Dokumentation.....	53
7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	54
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....	55
9. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	56
Energiekosten in der Textilindustrie	56
Voraussichtlicher Nutzen der Beispiellösungen	57
10. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	59
11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	59
12. Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	3-stufiger Prozess zur Konditionierung weichmacherhaltiger Abluft.....	1
Abbildung 2:	Abluftanfall und-behandlung bei VOWALON zu Beginn des Vorhabens (Verfahrensfließbild)	5
Abbildung 3:	Gesamtbetriebliche Übersicht der Abluftführung (VOWALON) und möglicher Einsatzorte für eine Mikrogasturbine (μ GT)	10
Abbildung 4:	Grobe Übersicht möglicher Einsatzorte für einen Mikrogasturbinenbetrieb bei VOWALON	11
Abbildung 5:	Temperaturen im Volllast-Arbeitszyklus bei herkömmlicher Mikrogasturbine.....	13
Abbildung 6:	Temperaturen im abgeschätzten Arbeitszyklus bei modifizierter Mikrogasturbine	14
Abbildung 7:	Einspeisung des μ GT-Abgases kurz vor der RTO-Anlage.....	18
Abbildung 8:	Umlenkammer der HOBA.....	20
Abbildung 9:	Versuchswäscher an der HOBA.....	21
Abbildung 10:	Prinzip des Wäscher-Prüfstandes für Weichmacher an der HOBA	21
Abbildung 11:	Mikrogasturbinen-Prüfstand (efa Leipzig GmbH)	22
Abbildung 12:	Verbrennungsluftansaugung über Verdampferbad und Ansaugrohr	23
Abbildung 13:	Verbrennungsluftfilter der Mikrogasturbine.....	23
Abbildung 14:	SiO ₂ -Ablagerung an innenliegenden Bauteilen	26
Abbildung 15:	Vereinfachtes Schema zur Einbindung einer μ GT in den Abluftstrom	27
Abbildung 16:	Mikrogasturbinen-Laborprüfstand (VOWALON)	28
Abbildung 17:	Auswirkung der Zufuhr von Lösemitteln über die Verbrennungsluft auf den Betrieb der μ GT. In Abhängigkeit von der Intensität der Lösemittelbelastung traten z. T. starke, regelungsbedingte Leistungsschwankungen auf bis hin zum kompletten Herunterfahren der μ GT.	29
Abbildung 18:	Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie-Funktionsschema (© STEP, Pockau)	30
Abbildung 19:	IMS-Spektrum der Abluft bei Verarbeitung einer lösemittelbasierten PUR- Formulierung. Das Lösemittel (MEK) dominiert und führt zur vollständigen Aufzehrung der Reaktionsionen; Siloxane werden überdeckt bzw. kaum ionisiert.....	31
Abbildung 20:	IMS-Spektrum der Abluft bei Verarbeitung einer lösemittelfreien high-solid PUR-Formulierung. Reaktionsionen sind in ausreichender Menge vorhanden, so dass die Siloxane ionisiert werden können; die Siloxanpeaks werden nicht durch Lösemittel überdeckt.	31
Abbildung 21:	Beprobung eines Gasvolumens und Messung des IMS-Spektrums (STEP, Pockau)	32
Abbildung 22:	Laborbeschichtungsanlage (LABA) bei VOWALON (links), als Prüfstand „Abluftkonditionierung“ nach Integration eines Bypasses zur Abluftkühlung/- kondensation und Gasanalyse (rechts)	32
Abbildung 23:	Versuchsaufbau zur Ermittlung von Siloxanemissionen an der Laborbeschichtungsanlage.....	33

Abbildung 24:	IMS-Spektren der Abluft (Abluftvolumenstrom: 450 m ³ /h, 50 - 75 °C) bei Verarbeitung einer lösemittelhaltigen PUR-Formulierung nach Verdünnung (1:200 bzw. 1:400) und GC-Vortrennung.....	33
Abbildung 25:	Reduzierung der Weichmacheranteile in der Abluft durch Abluftabkühlung und Kondensation (interpolierter Verlauf).....	34
Abbildung 26:	Reduzierung der Lösemittelanteile in der Abluft durch Abluftabkühlung und Kondensation (interpolierter Verlauf).....	35
Abbildung 27:	3-stufiger Prozess zur Konditionierung weichmacherhaltiger Abluft.....	36
Abbildung 28:	Versuchsaufbau zur Desorption und Ab-/Adsorption von Siloxanen	37
Abbildung 29:	Gegenstromwäscher mit integriertem Rieselbett (links), PP-KEMAFIL®-Gewirke als textiles Rieselbett (rechts).....	38
Abbildung 30:	Versuchsaufbau zur Verdampfung von Siloxanen in einen Luftstrom	39
Abbildung 31:	Verlauf der Siloxanabsorption im Heizöl des Gegenstromwäschers im Vergleich zu dem Luftstrom durch Verdampfung beigemischten Menge an Siloxan.....	40
Abbildung 32:	Schematische Darstellung eines mehrstufigen Absorbersystems zur Entfernung von Siloxanen durch Abluftwäsche.....	41
Abbildung 33:	Einfluss lösemittelhaltiger Verbrennungsluft auf die Stromerzeugung und den Gasverbrauch (kurze Zeitintervalle zur Überprüfung der Regelung der μ GT.....	42
Abbildung 34:	Gemessene Feuerungswärmeleistung des Lösungsmittels in der Zuluft der Gasturbine.....	42
Abbildung 35:	Prinzip der ABL-Führung aus der UBA mit AWT und Absorptionswäscher	46
Abbildung 36:	Prinzip der ABL-Führung aus der UBA mit AWTs, Absorptionswäscher und Feststoffabsorber	46
Abbildung 37:	Prinzip der bestehenden Einbindung der Mikrogasturbine bei VOWALON	47
Abbildung 38:	Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Mikrogasturbine.....	48
Abbildung 39:	Prinzip der ABL-Führung aus der HOBA mit AWT	49
Abbildung 40:	Eine beispielhafte Simulation des Systems zur Abluftkonditionierung an der HOBA (Werte zur Wahrung von betrieblichen Interessen unkenntlich gemacht).....	50
Abbildung 41:	Steigender Energiekostenanteil in der Textil- und Bekleidungsindustrie über die letzten Jahre.....	56
Abbildung 42:	Nutzung der Abluft nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO	57
Abbildung 43:	Nutzung siloxanhaltiger Abluft nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO	58
Abbildung 44:	Nutzung der Abluft aus der Lösemittelanmischung als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: mögliche Einsatzorte für eine Mikrogasturbine (μ GT) bei VOWALON.....	10
Tabelle 2: Zusammenfassende Übersicht über mögliche Einsatzorte einer μ GT bei VOWALON.....	12
Tabelle 3: Ermittlung von Abluftparametern mittels Laborbeschichtungsanlage (LABA)	17
Tabelle 4: Charakteristik relevanter Abluftströme bei VOWALON	17
Tabelle 5: Bewertung von Verfahren für die Abtrennung von Siloxanen als Nachrüstlösung in bestehenden Textilbetrieben mit nachgeschalteter regenerativer Abluftreinigung	25
Tabelle 6: Ermittelte Siloxan-Konzentrationen in der Trocknungsluft (Abluft) bei Verarbeitung einer lösemittelbasierten PUR-Formulierung mit siloxanhaltigem Oberflächenadditiv.....	33
Tabelle 7: Bewertung der Absorptionskapazität verschiedener Ab-/Adsorbentien.....	37
Tabelle 8: Reduktion des Siloxangehaltes in einem Luftstrom durch mehrstufige Absorption	40
Tabelle 9: Einsparung von Brenngas in der μ GT durch Zuführung lösemittelhaltiger Verbrennungsluft.....	44
Tabelle 10: Übersicht über den Gasverbrauch bei VOWALON für den Betrieb des Thermoölkessels und der RTO	44
Tabelle 11: Übersicht über die im Projekt realisierten Prüfstände	53

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	LM	Lösemittel
ABL	Abluft	LMA	Lösemittelanmischung
AP	Arbeitspaket	min	Minute(n)
AWT	Abluftwärmetauscher	µGT	Mikrogasturbine
Bh	Betriebsstunden	µm	Mikrometer
BHKW	Blockheizkraftwerk	ml	Milliliter
D	Durchmesser	mm	Millimeter
d	Tag(e)	NH	Nachheizung
D3	Hexamethylcyclotrisiloxan	NK	Nachkühlung
D4	Octamethylcyclotetrasiloxan	Nm ³	Normkubikmeter
D5	Decamethylcyclopentasiloxan	NRW	Nordrhein-Westfalen
D6	Dodecamethylcyclohexasiloxan	ppb	Parts per billion (µg/kg)
efa	efa Leipzig GmbH	ppm	Parts per million (mg/kg)
Fa	Firma	PUR	Polyurethan
FID	Flammenionisationsdetektor	PP	Polypropylen
GC-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometer	PVC	Polyvinylchlorid
GiD	integrierter Gas-Dampf-Prozess	RIP	Reaktionsionenpeak (IMS)
h	Stunde(n)	RTO	regenerative thermische Oxidation
HOBA	Hochleistungsbeschichtungsanlage	s	Sekunde(n)
i. d. R.	in der Regel	SIZ	Steinbeis Innovationszentrum für Energie- und Umwelttechnik
IMS	Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie	STEP	STEP Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH
KG-Rohr	Kanalgrundrohr	STFI	Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V.
KNV	Katalytische Nachverbrennung	TÖ	Thermoöl
kPa	Kilopascal	U	Umdrehungen
kW _(Gas, El)	Kilowatt, Leistung aus/in Gas oder elektrisch	UBA	Universalbeschichtungsanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	UBA	Umweltbundesamt (Literatur)
L	Liter	VBL	Verbrennungsluft
L2	Hexamethyldisiloxan	VOW	VOWALON Beschichtung GmbH
L3	Octamethyltrisiloxan	VW	Vorwärmung
L4	Decamethyltetrasiloxan	WRG	Wärmerückgewinnung
L5	Dodecamethylpentasiloxan		
LABA	Laborbeschichtungsanlage		

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbundvorhaben „EnergyTex – Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03ET1547A-D gefördert. Wir danken dem Bundesministerium und dem Projektträger Jülich für die finanzielle Unterstützung.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Dank gilt allen Projektpartnern für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit, in Persona Herrn Dr. Thomas Freitag und Herrn Ulf Niersmann vom Steinbeis Innovationszentrum Energie- und Umwelttechnik, Frau Petra Krüger, Herrn Franz-Martin Lippold und Herrn Jonas Krone von der efa-Leipzig GmbH, Herrn Gregor Götz und Herrn Richard Götz von der VOWALON Beschichtung GmbH und Herrn Dr. Ulrich Heye, Herrn Jens Mählmann und Herrn Marco Sallat vom Sächsischen Textilforschungsinstitut e. V.



Die Partner danken allen Kollegen und Kolleginnen in Verwaltung, Laboren, Technika und Produktion sowie den Herren Dr. Werner Schüler und Carsten Wendrock der Firma STEP Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH für die geleistete Arbeit und konkrete praktische Hilfe bei der Umsetzung der Versuche.

Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes war die Erarbeitung einer verallgemeinerungsfähigen Beispiellösung für die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Erhöhung der Energieeffizienz in Unternehmen der Textilindustrie, gekennzeichnet durch den Anfall organisch belasteter Abluft und hohen Energieeinsatz (Veredlung, Beschichtung, Trocknung, Abluftreinigung). Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden konkrete Lösungen für den Einsatz einer Mikrogasturbine (μ GT) und die energetische Nutzung der Lösemittel in den Abluftströmen zur Energieeinsparung erarbeitet.

Auftretende Probleme mit Weichmachern und Siloxanen in der Abluft sowie mit für den μ GT-Betrieb zu hohen Ablufttemperaturen konnten durch die Entwicklung geeigneter Konzepte zur Abluftkonditionierung größtenteils gelöst werden:

- Für den Einsatz einer nicht modifizierten μ GT (Originalzustand) dürfen Verbrennungslufttemperaturen von $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht überschritten werden. In den betrachteten Produktionsprozessen war mit Ablufttemperaturen $> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu rechnen. Daher wurde der Fokus auf die Konditionierung der als Verbrennungsluft angesaugten Abluft gelegt. Im Ergebnis der Arbeiten hat sich der Einsatz eines geschlossenen Abluftwärmetauschers zum Kühlen der Verbrennungsluft sowie zum Auskondensieren der Weichmacher als günstig und effektiv erwiesen.
- In der Abluft enthaltene Weichmacher werden bei einer Abkühlung auf $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur zu 30 – 40 % auskondensiert und würden insbesondere im Anfahrprozess der Mikrogasturbine zur weiteren Abscheidung an kälteren Anlagenteilen führen. Dies hätte eine sukzessive Versottung von Anlagenteilen wie Filter und Rekuperator in der μ GT zur Folge und würde den Wartungsaufwand deutlich erhöhen. Aus diesem Grund wurde hier das Konzept des Wärmetauschs erweitert: Die konstruktive Lösung sieht nun drei in Reihe verschaltete Abluftwärmetauscher mit verschiedenen Temperaturstufen vor (vgl. Abbildung 1):
 - Stufe 1: Abkühlung zur Wärmerückgewinnung auf ca. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 - Stufe 2: Kühlung der Abluft auf ca. $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kondensation der Weichmacher),
 - Stufe 3: Wiedererwärmung der Abluft auf ca. $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wärme aus Stufe 1).

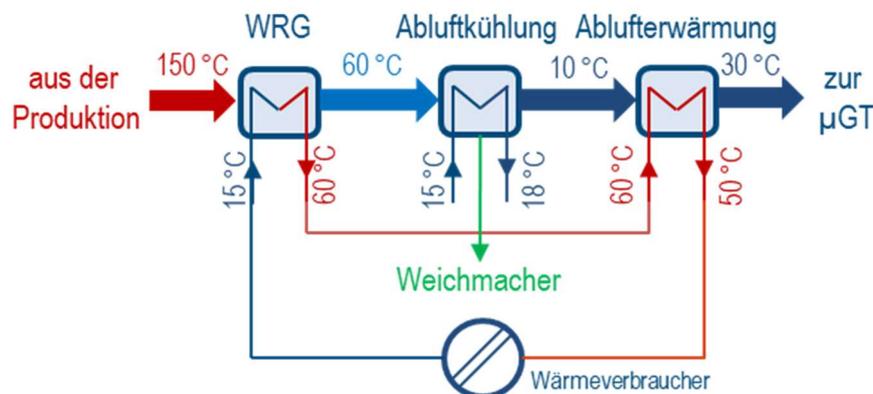


Abbildung 1. 3-stufiger Prozess zur Konditionierung weichmacherhaltiger Abluft

Durch das erneute Aufheizen über den Taupunkt der zuvor abgekühlten Abluft lassen sich eine weitere Kondensation von Weichmachern und eine Störung des μ GT-Betriebes durch in der Abluft verbliebene Weichmacher vermeiden.

Siloxane in der Verbrennungsluft der μ GT führen bei thermischer Oxidation zu feinsten Ablagerungen von SiO_2 in abgasführenden Bauteilen und Luftlagern der μ GT. Dies hat eine Reduzierung der Turbinenstandzeit und schlimmstenfalls eine Zerstörung der μ GT zur Folge. Ziel der Abluftkonditionierung war in diesem Fall daher die vollständige Entfernung der Siloxane aus der Abluft, bevor letztere der μ GT als Verbrennungsluft zugeführt wird. Es wurden verschiedene Verfahren, z. B. Kondensation, Adsorption und Absorption (Aktivkohle, Silikagel, Aluminiumoxid, Mineralöl), hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Dabei rückten die Adsorption an Silikagel und die Absorption in Mineralöl aufgrund der möglichen Regenerierbarkeit des Ad-/Absorbens in den Fokus der Untersuchungen. Eine Kryo-Kondensation schied aufgrund energetischer Gründe aus. Im Ergebnis der Versuche wurde deutlich, dass ein Mineralölwäscher die längerkettigen Dimethylsiloxane (D4 – D6, L4, L5) sehr gut aus der Abluft entfernen kann, die kurzkettigen (L2, D3, L3) aber passieren lässt. Der Silikagel-Adsorber konnte mit der vollständigen Adsorption aller getesteten Dimethylsiloxane (L2 – L5, D3 – D5) überzeugen, allerdings zeigte sich bei gleichzeitiger Anwesenheit von Lösemitteln eine starke Beeinträchtigung des Siloxanrückhalts (konkurrierende Adsorption).

Im Ergebnis der Untersuchungen kann allgemein festgestellt werden, dass

- Weichmacher und Lösemittel in der Abluft sowie hohe Temperaturen der Abluft händelbar sind,
- Siloxane nach wie vor ein ernstzunehmendes Problem darstellen,
- die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung mit einer μ GT bei dezentralem Einsatz möglich und sinnvoll ist und
- eine Erhöhung der Energieeffizienz in dem Moment gegeben ist, in dem Erdgas und Lösemittel zur Erzeugung von Elektroenergie genutzt werden und die Abwärme vollständig genutzt wird.

Konkret lässt sich feststellen, dass

- an der Hochleistungsbeschichtungsanlage (HOBA) Weichmacher aus der Abluft problemlos auskondensiert werden können,
- die lösemittelhaltige Abluft aus dem Lösemittelanmischraum problemlos als Verbrennungsluft genutzt werden kann,
- an der Universalbeschichtungsanlage (UBA), mit Hilfe eines Mineralöl-Absorbers, Siloxane teilweise aus der Abluft entfernt werden können. Kurzkettige Siloxane in der Abluft stellen dabei weiterhin ein Problem dar und verkürzen bei Nutzung der Abluft in einer μ GT deren Wartungsintervalle.
- die Entwicklung eines Silikagel-Adsorbers zugunsten eines Mineralöl-Absorbers zurückgestellt wurde. In Vorversuchen war eine Regeneration des beladenen Silikagels ineffektiv bzw. fehlerhaft. Jedoch ist im Gegensatz zu einem Mineralöl-Absorber eine rückstandsfreie Entfernung von Siloxanen möglich. Eine thermische Regeneration des Mineralöls (Verdampfung niedrig siedender Komponenten (inkl. Siloxane)) ist möglich, aber aufwendig und birgt eine hohe Explosionsgefahr, weshalb diese Maßnahme nicht ratsam ist. Das beladene Mineralöl soll deshalb in einem Heizkessel thermisch verwertet werden.

Die im Vorhaben entwickelten Beispiellösungen sehen vor,

- einen Teil der nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen anfallenden Abluft als Verbrennungsluft einer μ GT zuzuführen und die produzierte Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO zu nutzen (auch möglich: anteilige Vorwärmung der Trocknungsluft für die Beschichtung) bzw.
- die Abluft aus der Lösemittelanmischung vollständig als Verbrennungsluft einer μ GT zuzuführen und die produzierte Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO zu nutzen.

Teil I - Kurze Darstellung

gemäß Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

1. Aufgabenstellung

Das Ziel des Verbundvorhabens bestand darin, für Unternehmen verallgemeinerungsfähige Beispiellösungen zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu erarbeiten. Die avisierten Unternehmen sind dabei durch energieintensive Produktionsprozesse (z. B. Textilveredlung/-beschichtung, Trocknung) und dem gleichzeitigen Anfall unter hohem (thermischen) Energieeinsatz zu reinigender, organisch belasteter Abluftströme gekennzeichnet.

Die Entwicklungslösungen sollten beispielhaft in Zusammenarbeit mit einem Beschichtungs- und Veredlungsbetrieb der Textilindustrie technisch umgesetzt und getestet werden. Der Lösungsansatz bestand darin, Anteile der zu reinigenden, organisch belasteten Abluft als Verbrennungsluft einer Mikrogasturbine (MGT; hier: Modell C50, Fa. Capstone Green Energy Corporation, Van Nuys/USA; $P_{el} = 50 \text{ kW}$) zuzuführen. Auf diesem Weg sollte es möglich werden, die in der Abluft enthaltene chemische Energie anteilig in elektrische Energie umzuwandeln (Eigenstromerzeugung) und gleichzeitig die bei der Verbrennung freierwerdende Wärmeenergie entweder zur notwendigen Aufheizung der Abluft für die spätere regenerative thermische Oxidation (RTO) oder zur Vorwärmung von Trocknungsluft (Wärmerückgewinnung) zu nutzen. Damit sollte die betriebliche Wärmeerzeugung anteilig entlastet werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei der Firma VOWALON war/ist es technisch nicht möglich, die Mikrogasturbine als Ersatz für die zur Abluftreinigung notwendige regenerative thermische Oxidation (RTO-Anlage) einzusetzen. Dies ergab sich aus folgenden Gründen:

- Die Abluftmenge ist sehr hoch und in der anfallenden Menge stark schwankend.
- Die gesetzlichen Vorgaben (Verweilzeit der beladenen Abluft mindestens 30 Sekunden bei mindestens $800 \text{ }^\circ\text{C}$) können auch mit einer technisch modifizierten Gasturbine nicht realisiert werden.
- Das Vorhandensein von Weichmachern und Siloxanen kann die Nutzung der Abluft als Verbrennungsluft für die Mikrogasturbine ganz oder zumindest teilweise ausschließen.

Trotz dieser Einschränkungen bietet der Einsatz einer Mikrogasturbine durch Realisierung des Prinzips der Wärme-Kraft-Kopplung eine Erhöhung der Energieeffizienz, wenn die dabei entstehende Wärme in der RTO oder für Produktionsprozesse (z. B. Prozessluftvorwärmung) genutzt werden kann. Dazu war zum Zeitpunkt der Vorhabensdurchführung keine technische Beispiellösung vorhanden. In einem bereits abgeschlossenen BMWi-Projekt „Energieeffiziente Verstromung von VOC - VOCStrom“ (DLR - Institut für Verbrennungstechnik) wurde eine technische Lösung für eine komplette Nutzung lösemittelhaltiger Abluft als Verbrennungsluft in einer zu diesem Zweck mit einer dafür entwickelten speziellen Brennkammer versehenen Mikrogasturbine entwickelt. Diese Entwicklung unterscheidet sich damit grundsätzlich von der in diesem Vorhaben beschriebenen Zielstellung.

Die verfahrenstechnischen Gegebenheiten stellten sich zum Beginn des Vorhabens wie folgt dar:

In der Produktion fallen beim Unternehmen VOWALON je nach Produkt zwischen $8.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bis $45.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ lösemittel- und weichmacherhaltiger Abluft an. Um Kondensation der belasteten Luft vor

Eintritt in die RTO zu verhindern und damit die Funktion der Abluftreinigung zu gewährleisten, erfolgt eine Vorwärmung dieser Luft in einem Wärmeübertrager auf 220 °C. Beheizt wird dieser Wärmeübertrager mit Thermoöl.

In der nachgeschalteten RTO-Anlage wird die Abluft unter Gaseinsatz auf eine Temperatur von 830 °C erhitzt und innerhalb der Verweilzeit von 30 s oxidiert. Die heiße Abluft wird durch Wärmetausch anschließend wieder abgekühlt und verlässt die Anlage mit einer Temperatur von ca. 200 °C (Abbildung 2).

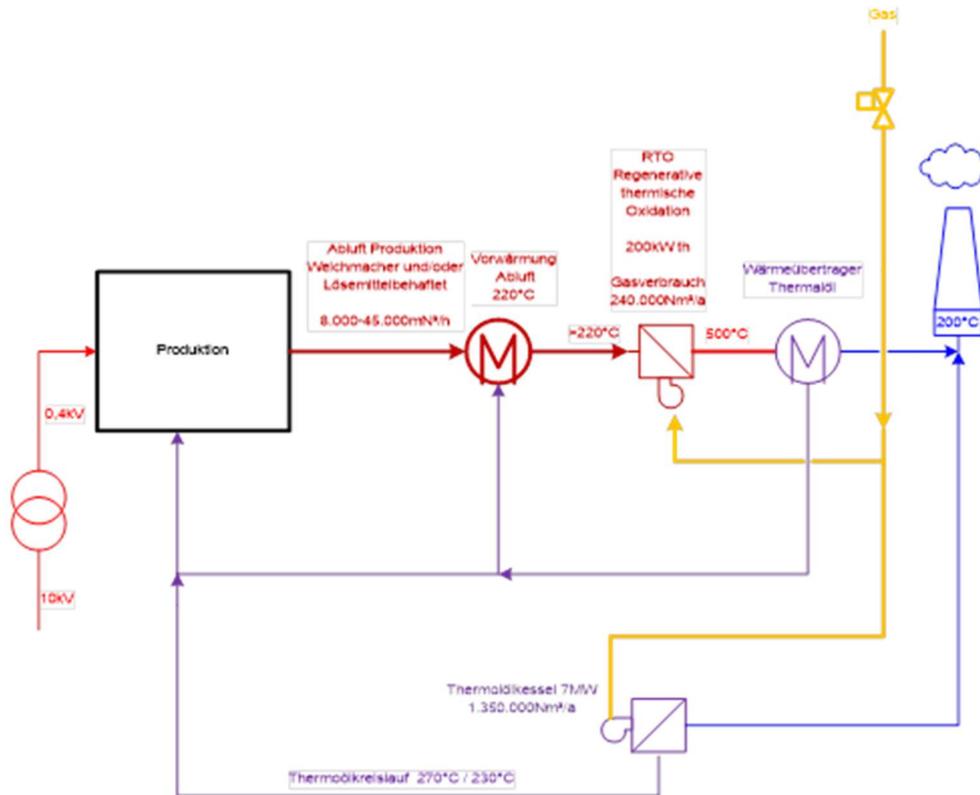


Abbildung 2: Abluftanfall und -behandlung bei VOWALON zu Beginn des Vorhabens (Verfahrensfließbild)

Sowohl die Vorwärmung als auch die anschließende oxidative Behandlung der Abluft stellen durch die zu bereitstellende notwendige Energie große Gasverbraucher im Betrieb dar. Der Lösungsansatz zur Steigerung der Energieeffizienz bestand darin, die Vorwärmung der Abluft vor der RTO mit Hilfe einer Mikrogasturbine (μ GT) auszuführen und diese Gasturbine mit lösemittelhaltiger Abluft aus der Produktion (als Verbrennungsluft) zu betreiben. Inwiefern die brennbaren Bestandteile der Abluft als Brennstoff für die Mikrogasturbine nutzbar sind, war im Vorhaben zu prüfen. Die Bestandteile der Abluft mussten bekannt sein bzw. im Rahmen des Projektes exakt ermittelt werden.

Insgesamt war in diesem Szenario mit einem gesamtbetrieblich reduzierten Gasverbrauch zu rechnen, da

- zum einen durch die lösemittelhaltige Verbrennungsluft von einem reduzierten Brenngasbedarf für die μ GT ausgegangen wurde und
- zum anderen durch die Nutzung der Abwärme der μ GT sowohl für die Abluftvorwärmung (via Thermoöl) als auch für die RTO eine Entlastung im Gasverbrauch abgeschätzt wurde.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan sah die Bearbeitung folgender Arbeitspaket vor:

Nr.	Titel des Arbeitspaketes	Laufzeit
1	Präzisierung der Projektplanung	08/2018 - 09/2018
2	Entwicklung der materiell-technischen Basis des Projektes	08/2018 - 11/2018
3	Analyse der in AP2 ausgewählten energetisch relevanten Prozesse	11/2018 - 03/2019
4	Untersuchung der Einflüsse der Prozessparameter auf Produkteigenschaften und Energieverbrauch im Produktionsprozess	02/2019 - 07/2019
5	Entwicklung der Einbindung, Konzeptionierung und Auslegung der Gasturbine	04/2019 - 10/2019
6	Umsetzung des Konzeptes bei der Firma VOWALON (alle Partner)	08/2019 - 02/2020
7	Vermessung der Prototypenanlage inklusive der relevanten Produktionsprozesse	02/2020 - 03/2020
8	Versuche an der Prototypenanlage unter Beachtung der in AP5 entwickelten Konzepte und Technologien	03/2020 - 08/2020
	Meilenstein: Erarbeitung einer technisch-technologischen Innovation zur Lösung der Weichmachproblematik	
9	Untersuchung des Einflusses der Gasturbine auf die Abgasnachbehandlung (RTO) und die dort auftretenden Energieverbräuche	08/2020 - 11/2020
10	Weiterentwicklung des Technologie- und Anlagenkonzeptes	10/2020 - 03/2021
11	Entwicklung eines Konzeptes zur Verallgemeinerung und Übertragung der Projektergebnisse auf andere Branchen und Prozesse	02/2021 - 07/2021
12	Projektauswertung, Dokumentation	06/2020 - 07/2020

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte im Wesentlichen gemäß der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung. Teilarbeiten aus den Arbeitspaketen 8 und 9 mussten aus Gründen der Pandemiesituation zeitlich verschoben werden. Das im Meilenstein formulierte Kriterium zur Fortführung des Vorhabens konnte erfüllt werden. Eine Erklärung seitens der beteiligten Partner gegenüber dem Projektträger erfolgte im September 2020.

Der pandemiebedingte zeitliche Verzug konnte bis zum Projektende wieder ausgeglichen werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Nutzung vorhandener Energiesparpotentiale ist eine ständige Herausforderung. Auch die Wettbewerbssituation fordert, neue Potenziale zu finden und zu nutzen. Eine Analyse des VDMA zeigt am Beispiel der Herstellung von Funktions-T-Shirts, dass der Einsatz neuer Textilmaschinen zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs im Zeitraum von 2003 bis 2013 um 30 % führte. Für den gesamten Bereich der Textilindustrie ist das vorhandene Einsparpotenzial aber nur zu einem geringen Anteil umgesetzt. Wichtig ist hierbei eine prozessübergreifende und ganzheitliche Sicht- und Handlungsweise.

Mikrogasturbinen sind kleine Gasturbinen, die insbesondere für den Einsatz in der dezentralen Energieversorgung im Leistungsbereich bis 200 kW (elektrisch) entwickelt wurden. Sie sind gekennzeichnet durch eine sehr kompakte Bauform, eine hohe Drehzahl, niedrige Brennkammerdrücke und -temperaturen sowie durch geringe Investitionskosten. Sie können mit einem breiten Spektrum an Kraftstoffen, wie Erd- und Biogas sowie flüssigen Brennstoffen, betrieben werden.

Mikrogasturbinen sind in der Regel Einwellenmaschinen, bei denen Generator, Verdichter und Turbine auf einer Welle befestigt sind. Die Verbrennungsluft tritt über den Generator ein und kühlt diesen dabei. Anschließend wird die Luft im Radialverdichter auf etwa 4 bar komprimiert. Im Rekuperator wird die Luft durch die heißen Abgase vorgewärmt. In der Brennkammer wird der Brennstoff eingespritzt und gezündet. Die heißen Verbrennungsgase werden in der Turbine entspannt und treiben so Verdichter und Generator an. Nachdem die Abgase einen Teil ihrer Wärmeenergie im Rekuperator abgegeben haben, verlassen sie die Mikrogasturbine. Durch den Rekuperator können elektrische Wirkungsgrade von 26 bis 32 % erreicht werden. Mikrogasturbinen sind im Vergleich zu Gasturbinen einfacher aufgebaut, benötigen nur eine minimale bis keine Peripherie und weisen geringe Investitions- und Wartungskosten auf. Im Gegensatz dazu ist der elektrische Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen (größeren) Gasturbinenkonzepten (z. B. Gas-Dampf-Turbinen) geringer. Im Vergleich zu Mikrogasturbinen ist es bei anderen Turbinenkonzepten mit Leistungen > 1 MW unerlässlich, größere Anpassungen und Eingriffe in den Produktionsprozess vorzunehmen. So ist es meist erforderlich, Dampf als Wärmeträger zu nutzen. Da dies in vielen kleineren Unternehmen nicht möglich ist und meist auch deutlich geringere Leistungen erforderlich sind, sind derartige Konzepte in den im Rahmen des Projektes betrachteten Unternehmensgrößen nicht umsetzbar. Deshalb sollen Konzepte dieser Art im Rahmen dieses Projektes nicht konkret betrachtet werden. Im Rahmen der Förderinitiative „Energieeffizienz in der Industrie“ wurde zum Zeitpunkt der Antragstellung das Projekt „Energieeffizienz im Heatsetrollenoffset-Druck (EHROD)“ an der TU Dresden mit einem solchen Anlagenkonzept durchgeführt. Essentieller Bestandteil war dabei die indirekte Beheizung der Trockner mit Prozessdampf aus einer flexiblen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) basierend auf einem integrierten Gas-Dampf-(GiD)-Prozess. Das im vorliegenden Projekt zu entwickelnde Konzept sollte flexibel und ohne größere Eingriffe in die Produktion die Möglichkeit bieten, Mikrogasturbinen nachträglich zu errichten und einzubinden. Dabei wurde bewusst in Kauf genommen, dass zugunsten der Wirtschaftlichkeit und technischen Machbarkeit nicht der maximale Wirkungsgrad erreicht wird.

Die Energiekosten in der Textil- und Bekleidungsindustrie betragen etwa 10 % des gesamten Umsatzes (Destatis (Statistisches Bundesamt), 2019). Mehr als 50 % der in Deutschland hergestellten Textilien sind Technische Textilien. Der Energieverbrauch für Ausrüstung bzw. Veredlung beträgt dabei etwa 55 % des Gesamtenergieverbrauches.

Unter dem FKZ DLR 03ET1039B gibt es ein vom Projektträger DLR gefördertes Projekt mit dem Titel „Energieeffiziente Verstromung von VOC“. Das Projektziel bestand in der Entwicklung eines Mikrogasturbinen-basierten Abluftreinigungssystem. Dabei wird die gesamte mit Lösungsmittel belastete Abluft über den Verdichter in den Gasturbinenkreislauf eingebracht und am Ende auf eine externe thermische Oxidation, z. B. eine RTO Anlage, verzichtet. In diesem Punkt unterscheiden sich beide Vorhaben. Eine Abgrenzung ergibt sich weiterhin aus folgenden Punkten:

1. Eine wie auch immer geänderte Brennkammer einer Gasturbine ermöglicht keine Reaktionszeiten von 30 Sekunden.
2. Ein Abluftvolumenstrom von ca. 45.000 Nm³/h kann unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit nicht komplett über eine Gasturbine geleitet werden. Aufgrund des um den Faktor 6 schwankenden Abluftvolumenstroms muss immer ein Teil extern oxidiert werden.
3. Abluft, die - wie noch sehr häufig in der Textilindustrie - silikonhaltige Formulierungen enthält, kann dazu führen, dass die Nutzung dieser als Verbrennungsluft in einer Gasturbine nicht realisierbar ist.
4. Die Nutzung der Abwärme aus der Mikrogasturbine in der RTO ist bisher nicht untersucht worden. Die anlagentechnischen Veränderungen und Kosten können bei bestehenden Anlagen durch Realisierung des im Vorhaben umgesetzten Konzepts zur Erhöhung der Energieeffizienz auf ein Minimum reduziert werden.

Das vorliegende Projekt ging davon aus, dass die RTO in den Firmen der Textilindustrie schon Bestand ist. Die RTO-Anlage ist dann integraler Bestand der BlmSch-Genehmigung¹ der jeweiligen Firma und kann nicht einfach durch eine lösemittelreduzierende Mikrogasturbine ersetzt werden. Die VOC-reduzierenden Dürr-Turbinen können also, wenn die notwendigen Zulassungen durch die Genehmigungsbehörden in ferner Zukunft vorliegen sollten, nur bei Neubauten eingesetzt werden, bei denen gleich der Genehmigungsantrag entsprechend gestellt wurde. Die weitaus größere Anlagenzahl stellen Bestandsanlagen dar. Dort gibt es eine RTO, die lt. Genehmigungsbescheid betrieben werden muss, und die einen Energieverbraucher mit erheblichen Energiekosten für das Unternehmen darstellt. Für diese Fälle ist die im Projekt „EnergyTex“ erarbeitete Verfahrenslösung gedacht.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte in Zusammenarbeit der Partner

- VOWALON Beschichtung GmbH Treuen (VOW), Bahnhofstrasse 46 - 48, 08233 Treuen
- efa Leipzig GmbH (efa), Bucksdorffstraße 43, 04159 Leipzig
- Steinbeis-Innovationszentrum Energie- und Umwelttechnik (SIZ), Hauptstraße 17, 09376 Oelsnitz
- Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI), Annaberger Straße 240, 09125 Chemnitz

und mit dem Unterauftragnehmer

- STEP Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH.

¹ Alle Anlagen, die Mensch oder Umwelt schädigen können, sind genehmigungspflichtig nach §4 Bundesimmissionsschutzgesetz (BlmSch). Bei Vorliegen der Genehmigungsvoraussetzungen (§ 6 BlmSchG) und Sicherstellung, dass von der Anlage keine unzumutbaren Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch, Tier, Pflanze, Boden, Wasser und Atmosphäre, Kultur und sonstige Sachgüter (§ 1 BlmSchG) ausgehen, besteht ein Rechtsanspruch auf die Erteilung der Genehmigung.

Teil II - Eingehende Darstellung

gemäß Anlage 2 zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung des erzielten Ergebnisses

Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf der gemeinsamen Bearbeitung der in Punkt 5 genannten Projektpartner.

AP 1: Präzisierung der Projektplanung

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein Pflichtenheft erarbeitet sowie eine Literatur- und Patentrecherche zur Problemstellung durchgeführt. In weiteren vornehmlich organisatorischen Arbeiten/Projekttreffen aller Beteiligten wurden grundsätzliche Maßnahmen und das Vorgehen im Einzelnen vereinbart (z. B. Objektbegehungen bei VOWALON durch die Projektpartner). Erste technisch/technologisch relevante Informationen zum Produktionsprozess (VOWALON) und zur KWK-Anlage (efa) wurden ausgetauscht. Auf Basis dessen wurden die nächsten Arbeitsschritte (gemäß Arbeitsplan) konkretisiert und abgestimmt.

Patent- und Literaturrecherchen zeigten keine neuerliche Bearbeitung ähnlicher Problematiken wie der hier bearbeiteten.

Die entsprechenden Bewertungen werden in den jeweiligen Arbeitspaketen detailliert behandelt.

Durch mehrere Begehungen und die Analyse technischer Daten wurden verschiedene Möglichkeiten für den Einsatzort einer μ GT im Werk des Projektpartners VOWALON gefunden (Abbildung 3, Tabelle 1).

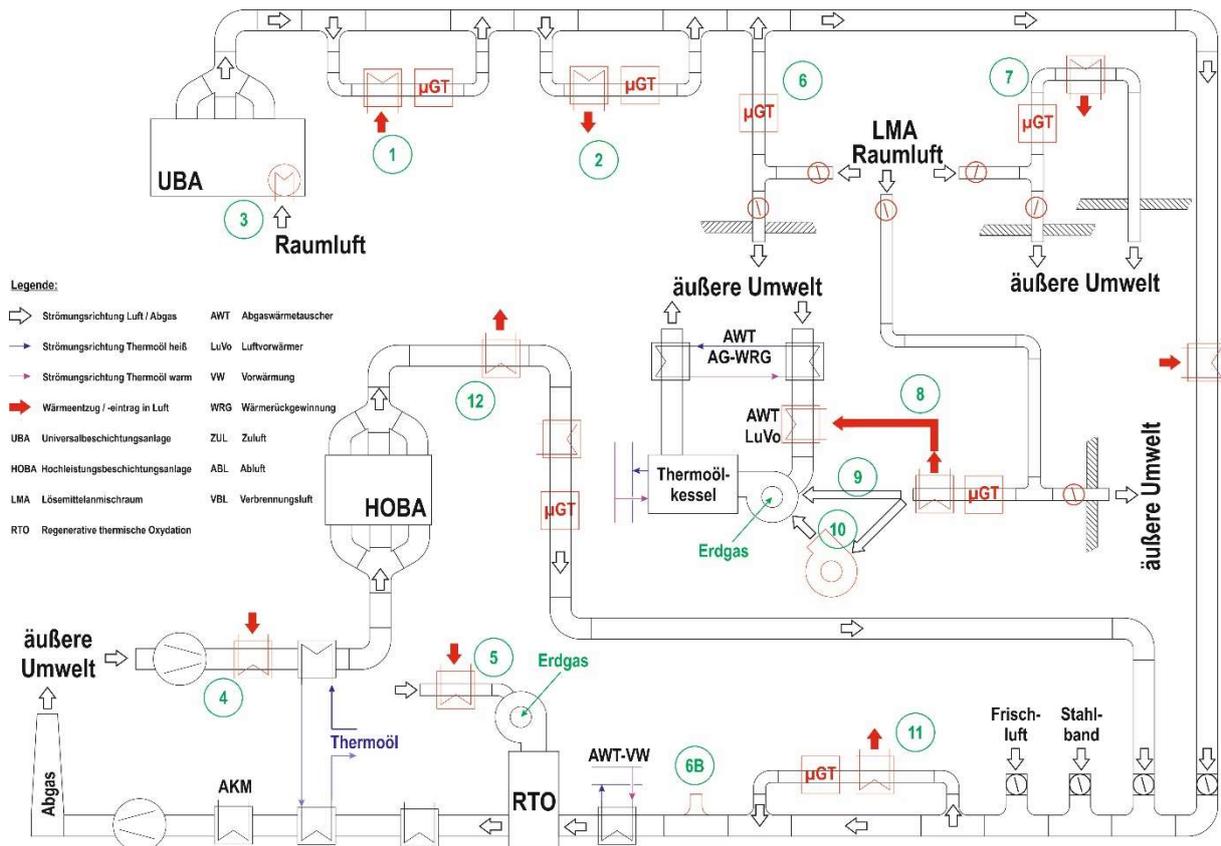


Abbildung 3: Gesamtbetriebliche Übersicht der Ablufführung (VOWALON) und möglicher Einsatzorte für eine Mikrogasturbine (µGT)

Tabelle 1: Mögliche Einsatzorte für eine Mikrogasturbine (µGT) bei VOWALON

Möglicher Einsatzort	
1	Einbau einer <u>modifizierten</u> µGT in UBA-ABL-Bypasskanal
2	Einbau einer µGT in UBA-ABL-Bypasskanal
3	ZUL-VW an der UBA als Wärmesenke für WRG
4	ZUL-VW an der HOBA als Wärmesenke für WRG
5	VBL-VW für RTO-Brenner als Wärmesenke für WRG
6	Einbau einer µGT direkt in LMA-ABL-Kanal
6B	direkte Einspeisung der µGT-Abgase in zentralen Abluftkanal vor der RTO
7	Abluft-Nutzung aus LMA mit AWT (WRG) im Abluftkanal
8	VBL-Vorwärmung für Heizkessel-Brenner mittels AWT-WRG
9	VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel parallel zum Heizkessel-Brenner
10	VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel mittels Saacke-Brenner
11	Einbau einer µGT in Gesamt-ABL-Bypasskanal mit WRG
12	Einbau einer µGT in HOBA-ABL-Kanal mit vorgelagertem Kühler

AP 2: Entwicklung der materiell-technischen Basis des Projektes

Identifizierung potentieller Einsatzorte für den Betrieb einer Mikrogasturbine

Durch Zusammenführung aller bereits vorliegender Prozessdaten und dem jeweiligen Abgleich mit den technischen Daten wurden Möglichkeiten für potentielle Einsatzorte einer μ GT sowie für entsprechende Wärmeübertrager im Werk des Projektpartners VOWALON identifiziert (Tabelle 2). Während Lösemittel in der Abluft gewünscht sind, stellen Siloxane, Weichmacher sowie hohe Lufttemperaturen Probleme dar.

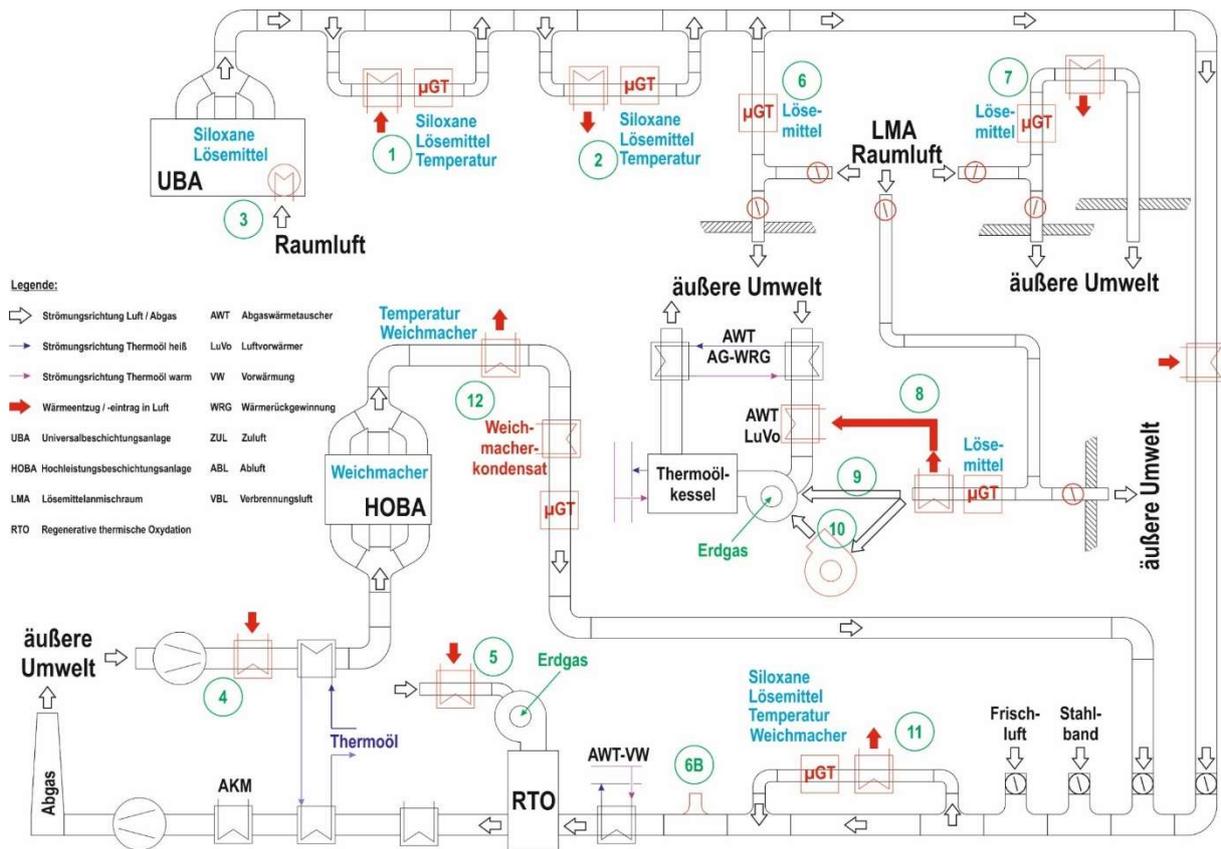


Abbildung 4: Grobe Übersicht möglicher Einsatzorte für einen Mikrogasturbinenbetrieb bei VOWALON

Tabelle 2: Zusammenfassende Übersicht über mögliche Einsatzorte einer μ GT bei VOWALON

möglicher Einsatzort		Abluftparameter	Einsatz von Technik
1	Einbau einer modifizierten μ GT in UBA-ABL-Bypasskanal	<ul style="list-style-type: none"> • Siloxane • Lösemittel • hohe Ablufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • technische Modifikation der μGT • Stabilisierung der ABL-Temperatur auf 200 °C • Siloxane entfernen
2	Einbau einer μ GT in UBA-ABL-Bypasskanal	<ul style="list-style-type: none"> • Siloxane • Lösemittel • hohe Ablufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlung der ABL-Temperatur unter 50 °C • Siloxane entfernen
3	ZUL-VW an der UBA als Wärmesenke für WRG	X	<ul style="list-style-type: none"> • technische Modifikation an der UBA • AWT
4	ZUL-VW an der HOBA als Wärmesenke für WRG	X	<ul style="list-style-type: none"> • AWT
5	VBL-VW für RTO-Brenner als Wärmesenke für WRG	X	<ul style="list-style-type: none"> • AWT
6	Einbau einer μ GT direkt in LMA-ABL-Kanal	<ul style="list-style-type: none"> • Lösemittel 	
6B	direkte Einspeisung der μ GT-Abgase in zentralen Abluftkanal vor der RTO	X	
7	Abluft-Nutzung aus LMA mit AWT (WRG) im Abluftkanal	<ul style="list-style-type: none"> • -Lösemittel 	<ul style="list-style-type: none"> • AWT
8	VBL-Vorwärmung für Heizkessel-Brenner mittels AWT-WRG	<ul style="list-style-type: none"> • -Lösemittel 	<ul style="list-style-type: none"> • AWT
9	VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel parallel zum Heizkessel-Brenner	<ul style="list-style-type: none"> • -Lösemittel 	
10	VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel mittels Saacke-Brenner	<ul style="list-style-type: none"> • -Lösemittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Saacke-Brenner
11	Einbau einer μ GT in Gesamt-ABL-Bypasskanal mit WRG	<ul style="list-style-type: none"> • -Siloxan • -Weichmacher • -Lösemittel • -hohe Ablufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Kühlung der ABL-Temperatur unter 50 °C • Siloxane entfernen
12	Einbau einer μ GT in HOBA-ABL-Kanal mit vorgelagertem Kühler	<ul style="list-style-type: none"> • -Weichmacher • -hohe Ablufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Weichmacherkondensat fällt an • ABL-Kühlung auf T < 50 °C • WRG empfehlenswert

Einsatzort 1

Die Abluft aus der Universalbeschichtungsanlage (UBA) besitzt Betriebstemperaturen von 150 °C bis 200 °C. Des Weiteren befinden sich in diesem Teil der Abluft Siloxan- und Lösemittelanteile.

Der normale Vollastbetrieb einer Mikrogasturbine erfordert eine Verbrennungslufttemperatur von max. 40 °C. Damit bleibt gewährleistet, dass die Kühlung des Generators erfolgt. Dabei erhöht der Verdichter den Luftdruck von 1 bar auf 4 bar sowie die Lufttemperatur auf ca. 200 °C. Im Rekuperator wird die Temperatur weiter auf ca. 500 °C erhöht. Danach gelangt die Verbrennungsluft zusammen mit Erdgas in die Brennkammer. Nach der Zündung hat das Abgas eine mittlere Temperatur zwischen 800 °C und 1.000 °C und gelangt in die Turbine. Das Abgas verlässt die Turbine Richtung Rekuperator mit ca. 600 °C

und einem Druck von 1 bar. Den Rekuperator und somit auch die Mikrogasturbine verlässt das Abgas dann mit ca. 300 °C (vgl. Abbildung 5).

Typischer Arbeitszyklus einer Mikrogasturbine

Temperaturen bei Volllast

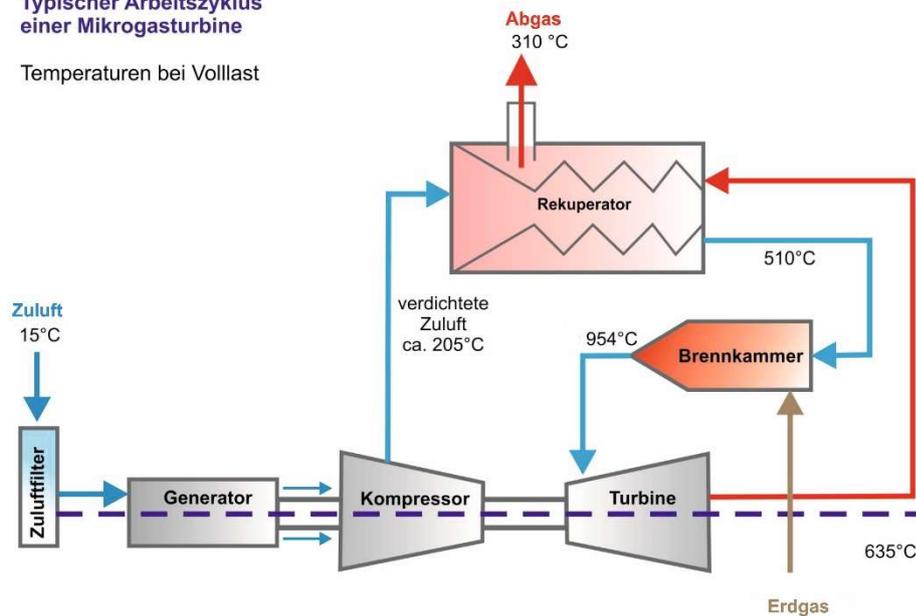


Abbildung 5: Temperaturen im Volllast-Arbeitszyklus bei herkömmlicher Mikrogasturbine

Der Betrieb einer Mikrogasturbine, welche Verbrennungsluft von 200 °C nutzen soll, erfordert Änderungen im Aufbau der bestehenden Turbine. Der Generator müsste über separat geführte Raumluft gekühlt werden. Der Verdichter würde die Temperatur der angesaugten Abluft von 200 °C auf Temperaturen zwischen 400 °C und 500 °C erhöhen. (Die polytrope Abschätzung erfolgte unter der Bedingung, dass unter diesen Umständen eine Verdichtung auf 3,5 bar bis 4 bar möglich wäre.) Mit diesen Austrittstemperaturen aus dem Verdichter empfiehlt es sich, den Rekuperator zu entfernen und durch eine entsprechende Kanalführung zu ersetzen. Ohne Rekuperator würde die Luft mit Temperaturen zwischen 400 °C und 500 °C in die Brennkammer eintreten und zusammen mit Erdgas gezündet werden. Auch hier würde nach der Zündung eine mittlere Abgastemperatur zwischen 800 °C und 1.000 °C entstehen. Allerdings wird das Abgas nach Verlassen der Turbine direkt, ohne Passieren des Rekuperators, mit etwa 600 °C aus dem Gerät herausgeführt (Abbildung 6). Da das Luftlager der Welle zwischen Verdichter- und Turbinenrad höheren Temperaturen ausgesetzt wäre, würde auch dort eine entsprechende Änderung notwendig werden.

In jedem Fall würde mit gleichem Volumenstrom, wie bei einer herkömmlichen Turbine, weniger Massenstrom mit höherer Viskosität in der modifizierten Mikrogasturbine angesaugt werden. Somit würde auch weniger Erdgas für den Betrieb benötigt werden. Die Leistung der so modifizierten Turbine würde sich verringern. Zum Einfluss auf den Wirkungsgrad kann an dieser Stelle nichts gesagt werden. Eine zwangsläufige und gravierende Änderung müsste nicht eintreten.

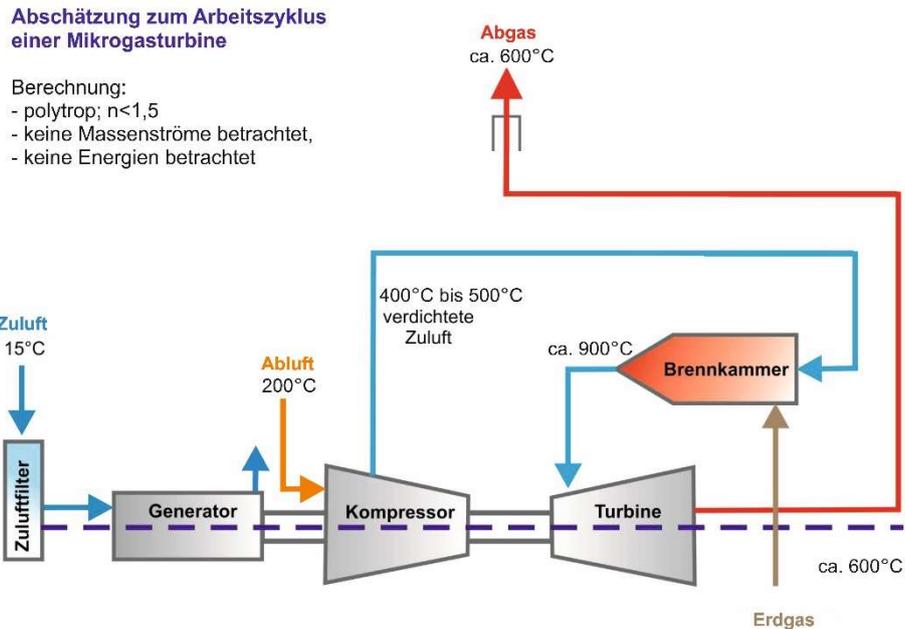


Abbildung 6: Temperaturen im abgeschätzten Arbeitszyklus bei modifizierter Mikrogasturbine

Um eine so modifizierte Turbine dauerhaft sicher betreiben zu können, muss gewährleistet sein, dass Luft mit konstant hoher Temperatur von etwa 200 °C angesaugt wird. Dies würde mit einem thermoölbetriebenen Erhitzer erreicht werden können.

Die Siloxane der Abluft würden in vollem Maße in die Mikrogasturbine gelangen und dort mit verbrannt werden. Ein Austrag der Siloxane bei solch hohen Temperaturen per Wäscher oder Absorber wäre, wenn überhaupt realisierbar, zu aufwendig.

Dieser Einsatzort empfiehlt sich nicht.

Einsatzort 2

Für einen herkömmlichen Mikrogasturbinenbetrieb müssen die Temperaturen der UBA-Abluft auf unter 50 °C gesenkt werden. Zum Kühlen wird der Einsatz eines Wärmeübertragers vor der Mikrogasturbine notwendig. Da in der Luft keine Weichmacher vorhanden sind, sollte ein normaler geschlossener AWT genügen.

Um den Wirkungsgrad des Systems nicht zu verringern, also den Nachheizbedarf am Thermoölkessel zu erhöhen, sollte die aus der Abluft entzogene Wärme an geeigneter Stelle wieder zugeführt werden.

Auch hier würden die Siloxane der Abluft in vollem Maße in die Mikrogasturbine gelangen und dort mit verbrannt werden. Ein Austrag der Siloxane wäre per Wäscher oder Absorber realisierbar.

Der Einsatz einer Mikrogasturbine an diesem Ort wäre möglich.

Einsatzorte 3, 4 und 5

Bei diesen Punkten handelt es sich um Orte, an denen ein AWT zur Rückführung von aus dem System entzogener Wärme möglich wäre.

Einsatzort 3, mit Vorwärmung der über Schlitze angesaugten Raumluft für die UBA, wird als zu aufwendig eingeschätzt. Hierfür müsste die UBA zu stark umgebaut werden.

Für den Einsatzort 5, mit Vorwärmung der Verbrennungsluft des RTO-Brenners, wurde eingeschätzt, dass ein AWT mit zu geringer Leistung zu wenig Energie zurückführen würde.

Einsatzort 4, mit Vorwärmung der über einen Kanal angesaugten Zuluft für die HOBA, wäre realisierbar. Ein AWT hätte eine genügend hohe Leistung. Eine vorhandene thermoölgeführte WRG würde zwar etwas an Leistung verlieren, trotzdem könnte über einen zusätzlichen AWT genügend Wärme wieder in das System zurückgeführt werden. Somit wäre der Einsatzort 4 empfehlenswert.

Einsatzorte 6 und 6B

Beim Punkt 6 handelt es sich um den Einbau einer Mikrogasturbine in den Abluftkanal des Lösemittelanmischraumes. Das Abgas der Mikrogasturbine wird direkt in die Abluft des Gesamtsystems gespeist.

Eine Konditionierung der Abluft aus dem Lösemittelanmischraum ist nicht notwendig.

Zur Einspeisung des Abgases der Mikrogasturbine empfiehlt sich auch der weiter entfernte Ort des Punktes 6B direkt vor der RTO.

Bei einer direkten Einspeisung des Abgases muss beachtet werden, dass der gesamte Abluftmassenstrom in der RTO erhöht wird. Eine Aufheizung der Abluft in der RTO auf Temperaturen von ca. 800 °C erhöht somit auch den Energieeinsatz, also den Erdgasverbrauch in der RTO.

Allerdings fand im Betrieb der Abluftabsaugung durch die RTO der diskontinuierliche Lösemittelgehalt in der Abluft aus dem Anmischraum bisher keine Beachtung.

Durch die relativ geringen Investitionskosten wäre der Punkt 6 in Verbindung mit dem Punkt 6B empfehlenswert.

Einsatzort 7

Der Punkt 7 gleicht dem Punkt 6 mit dem Unterschied, dass das Abgas der Mikrogasturbine nicht in den Abluftkanal des Gesamtsystems gespeist wird. Über einen Abgaswärmetauscher wird dem Abgas soweit Wärme entzogen, dass eine Nutzung über eine Wärmerückgewinnung möglich ist. Der gesamte Abluftmassenstrom, welcher in die RTO geführt wird, erhöht sich nicht.

Eine Konditionierung der Abluft aus dem Lösemittelanmischraum ist auch hier nicht notwendig.

Durch den zusätzlichen Wärmeübertrager erhöhen sich allerdings die Investitionskosten gegenüber dem Punkt 6.

Einsatzort 8

Der Punkt 8 ist den Punkten 6 und 7 gleichzusetzen. Der Unterschied besteht darin, dass über eine Wärmerückgewinnung keine Einspeisung in die Abluft erfolgt, sondern zur Unterstützung der Vorwärmung der Verbrennungsluft des Thermoölkessels dient.

Eine Konditionierung der Abluft aus dem Lösemittelanmischraum ist auch hier nicht notwendig.

Durch den zusätzlichen Wärmeübertrager bleiben auch hier die höheren Investitionskosten gegenüber Punkt 6 bestehen.

Einsatzort 9

Im Punkt 9 wird der Punkt 8 erweitert, indem das Abgas der Mikrogasturbine nach Durchströmen des Wärmeübertragers direkt als Verbrennungsluft für den Thermoölkessel genutzt wird. Somit kann auch noch Restwärme im Abgas genutzt werden.

Eine Konditionierung der Abluft aus dem Lösemittelanmischraum ist auch hier nicht notwendig.

Die Investitionskosten gleichen denen des Punktes 8.

Einsatzort 10

Punkt 9 gleicht ebenfalls den Punkten 8 und 9 mit dem Unterschied, dass das Abgas der Mikrogasturbine, welches einen genügend hohen Sauerstoffgehalt aufweist, direkt als Verbrennungsluft für den Thermoölkessel genutzt wird.

Für diese Betriebsart wird ein spezieller Brenner, den die Firma Saake, Bremen, anbietet, notwendig.

Eine Konditionierung der Abluft aus dem Lösemittelanmischraum ist auch hier nicht notwendig.

Der Einsatz eines Saake-Brenners erhöht die Investitionskosten um schätzungsweise 200 – 250 T€.

Einsatzort 11

Bei Punkt 11 wird der Einsatzort für den Mikrogasturbinenbetrieb in einem Bypasskanal der Abluft des Gesamtsystems gewählt. An dieser Stelle besitzt die Abluft nicht nur hohe Temperaturen, sondern ist mit Siloxanen und Weichmachern belastet. Für die Nutzung der Abluft in einer Mikrogasturbine wird somit eine aufwendige Aufbereitung notwendig.

Einsatzort 12

Bei Punkt 12 wird der Einsatzort für den Mikrogasturbinenbetrieb in einem Bypasskanal der Abluft der HOBA gewählt. An dieser Stelle besitzt die Abluft hohe Temperaturen und ist mit Weichmachern belastet. Siloxane sowie Lösemittel sind nicht vorhanden.

Für die Nutzung der Abluft in einer Mikrogasturbine wird eine Aufbereitung in der Form notwendig, dass Weichmacher auskondensiert werden müssen. Dafür können verschiedene Systeme genutzt werden.

Ein offener Kühler, in Form eines Wäschers, verhindert ein „Anbacken“ von Kondensat im Wärmeübertrager. Zur Wärmerückgewinnung müssten mehrere Wäscher kaskadenartig verschaltet werden.

Ein „Anbacken“ von Kondensat würde die Leistung eines geschlossenen Wärmeübertragers herabsetzen.

Um dies zu verhindern, muss der Wärmeübertrager ständig gereinigt werden.

Sollte keine Anlagerung von Kondensat stattfinden, indem das Kondensat in den unteren Bereich des Übertragers abfließt, wäre der Einsatz von geschlossenen Wärmeübertragern möglich.

Auswahl möglicher Einsatzorte zu weiterführenden Betrachtungen und Untersuchungen

Diese groben und vorläufigen Betrachtungen zu Machbarkeiten sowie zur Wirtschaftlichkeit sowie weitere kritische Bewertungen verfahrenstechnischer Randbedingungen führten letztlich dazu, dass aus den Möglichkeiten die Einsatzorte 2 (UBA), 11 (Gesamtabluft), 12 (HOBA), 6 (LMA) und 10 (Saake-Brenner) für weiterführende Analysen ausgewählt wurden. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die jeweiligen Standorte sind in AP 10 dargelegt.

AP 3: Analyse der in AP 2 ausgewählten energetisch relevanten Prozesse

Basierend auf Temperatur- und Massenstrommessungen an verschiedenen Stellen in den Abluftkanälen wurden mögliche Einsatzorte für die μ GT diskutiert. Dazu wurden die standortbezogenen μ GT technischen und wirtschaftlichen Aspekte eines μ GT-Betriebs bewertet.

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Abluft in der Sammelleitung Anteile von Weichmachern, Siloxanen und Lösungsmitteln enthielt. Dabei waren die genannten Abluftbestandteile eindeutig einzelnen Produktionsmaschinen (HOBA, UBA, Ansetz-/Mischreaktor) und produzierten Beschichtungen (PVC, PUR) zuordenbar. Nachfolgende Tabellen zeigen die Abluftcharakteristika in der Übersicht. Basierend auf den an der Laborbeschichtungsanlage (LABA) ermittelten Prozessparametern (Tabelle 3) wurde die Charakteristik der real emittierten Abluft an den Produktionsanlagen HOBA und UBA unter Berücksichtigung der Massenströme bzgl. Beschichtungsflotte und Prozessluft bestimmt (Tabelle 4).

Tabelle 3: Ermittlung von Abluftparametern mittels Laborbeschichtungsanlage (LABA)

Fahrweise	Weichmacher	Siloxane	Lösemittel	Temperatur	Volumenstrom
	[mg C/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg C/Nm ³]	[°C]	Nm ³ /h
PVC-Schaumstrich (HOBA)	190	keine	keine	70	260
PVC-Haftstrich (HOBA)	90	keine	keine	93	260
PUR-Beschichtung (UBA)	keine	D3: 22 D4: 31 L2: 434	1.090	60	240

Tabelle 4: Charakteristik relevanter Abluftströme bei VOWALON

Produktion (Fahrweise)	Weichmacher (Geschätztes Jahresmittel)	Siloxane (Geschätztes Jahresmittel)	Lösemittel (Geschätztes Jahresmittel)	Volumenstrom		Temperatur	Laufzeit
	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[m ³ /h]	[Nm ³ /h]	[°C]	[h/a]
PVC-Schaumstrich HOBA	27	keine	keine	18.000	11.500	180	6.000
PVC-Haftstrich HOBA	40						
PUR-Beschichtung UBA	keine	5	1.786	28.000	18.500	160	6.000
LMA	keine	keine	543	2.000	2.000	25	7.200

Durch Zusammenführung aller gesammelten Prozessdaten und dem jeweiligen Abgleich mit den technischen Daten wurden die verschiedenen Möglichkeiten für den Einsatzort einer μ GT sowie für entsprechende Wärmeübertrager im Werk des Projektpartners VOWALON bewertet. Während Lösemittel in der Abluft gewünscht sind, stellen Siloxane, Weichmacher sowie hohe Lufttemperaturen Probleme dar. Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sowie kritische Bewertungen verfahrenstechnischer Randbedingungen führten letztlich dazu, dass aus den Möglichkeiten die **Einsatzorte 2, 6, 10, 11 und 12 für weiterführende Analysen ausgewählt** wurden.

AP 4: Untersuchung der Einflüsse der Prozessparameter auf Produkteigenschaften und Energieverbrauch im Produktionsprozess

Bei Versuchen mit geänderten Prozessparametern an den Produktionsanlagen, z. B. Temperaturen des Wärmeträgers, wurde festgestellt, dass schon geringe Änderungen der Parameter zur Beeinträchtigung der Produktqualität führten. Daher wurden weitere Versuche dieser Art nicht durchgeführt und die Untersuchungen konzentrierten sich auf die durch die Produktion beeinflussten Abluftparameter (Temperatur, Menge, Zusammensetzung), die für die Wahl/Festlegung potenzieller Einsatzorte der μ GT von Bedeutung waren.

An den favorisierten Positionen des Produktionsprozesses wurden Untersuchungen durchgeführt: Es wurden verschiedene Proben der auskondensierten Weichmacher analysiert. Zur Ermittlung der aus dem Lösemittel-Anmischraum abgesaugten Lösemittelfrachten und deren zeitlicher Abhängigkeit wurden mehrere Messreihen durchgeführt. Es wurde eine Übersicht über die Daten der vorwiegend eingesetzten Lösemittel zusammengestellt. Ebenso fanden Gasanalysen (Temperaturen, Massenströme, Stoffanteile) statt. Des Weiteren wurden Datenblätter gesichtet, Stellplätze (gefahren- und explosionsfrei, Gasanschluss, Leitungslängen etc.) und Einbindungsorte gesucht.

Resultierend aus diesen Untersuchungen und in Abstimmung mit der Geschäftsführung von VOWALON wurde eine endgültige Entscheidung über den konkreten Einsatzort der μ GT getroffen: **Einsatzort 6**. Als Verbrennungsluft sollte die Abluft aus der Lösemittelanmischung angesaugt werden. Die Abluft (Abgas) aus der μ GT sollte unmittelbar vor der RTO in den Abluftkanal eingespeist (Abbildung 7).



Abbildung 7: Einspeisung des μ GT-Abgases kurz vor der RTO-Anlage

Am Einsatzort 6 (Prüfstand „Mikrogasturbine“ bei VOWALON) hätten auch unabhängig von der Produktion Versuche gefahren werden können, welche unterschiedliche Zusammensetzungen und Zustände der angesaugten Luft zuließen. Allerdings wurden an diesem Prüfstand lediglich die Lösemittelfrachten in der Abluft (bzw. Verbrennungsluft) variiert. Für die Untersuchungen von Weichmachern sowie Siloxanen in der Verbrennungsluft wurde ein Prüfstand „Mikrogasturbine“ bei efa genutzt.

Ohne weitere Untersuchungen war bekannt, dass für den Einsatz der μ GT eine Verbrennungslufttemperatur von maximal 40 °C zu gewährleisten ist. Im Produktionsprozess war/ist allerdings mit Ablufttemperaturen bis zu 100 °C bzw. teilweise auch bis 200 °C zu rechnen.

Eine Modifizierung der Mikrogasturbine, um höhere Ansaugtemperaturen zu ermöglichen, konnte innerhalb dieses Projektes auf Grund des hohen Aufwands nicht erfolgen. Darüber hinaus resultieren aus den höheren Temperaturen auch andere Stoffdichten. Da Verdichter und Turbine volumenabhängig arbeiten, das Volumen aber gleichbleiben würde, verringern sich mit abnehmender Dichte auch die Massenströme und somit die Leistungen. Der Wirkungsgrad und somit auch die Betriebskosten könnten unverändert bleiben. Allerdings wären für eine geringere Leistungsfähigkeit mindestens die gleichen Investitionskosten für das Gerät zu veranschlagen. Der Betrieb eines modifizierten Gerätes wäre demnach unwirtschaftlicher.

Da die Mikrogasturbine nicht an die Abluftbedingungen angepasst werden konnte, musste die Abluft entsprechend konditioniert werden, um sie dann der Mikrogasturbine als Verbrennungsluft zuzuführen. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand „Konditionierung Ansaugluft“ konzipiert.

Bei VOWALON stellen in der Abluftleitung kondensierende Weichmacher ein großes Problem dar. Deswegen wurde für den Einsatzort des Prüfstandes „Konditionierung Ansaugluft“ die HOBA gewählt, da dort neben den hohen Temperaturen auch hohe Anteile an Weichmachern in der Abluft zu finden waren.

Der Prüfstand „Konditionierung Ansaugluft“ sollte primär Untersuchungen zur Abluftabkühlung ermöglichen. Da allerdings mit dem Kondensieren von Weichmachern innerhalb des Kühlers zu rechnen war, sollte parallel ein offener Luft-Wasser-Kühler entwickelt werden. In diesem Gerät sind keine festen Übertragungsflächen vorhanden. Die Abluft wird an offen strömendem Wasser vorbeigeführt und kühlt an diesem ab. Kondensierende Weichmacher werden im Wasser aufgefangen, die nach entsprechender technischer Modifikation aus dem System ausgeschleust werden können (Wäscherfunktion).

Da der Betrieb der Mikrogasturbine durch weniger Weichmacher verbessert werden kann, stellte die Entwicklung eines geeigneten Systems zur Ausschleusung von Weichmachern (neben der Abkühlung der Abluft) eine für das Projekt zu lösende Hauptproblematik dar.

Wäscher-Prüfstand an der HOBA bei der Firma VOWALON

Zur Untersuchung zum Auswaschen von Weichmachern aus der Abluft und zum Abkühlen derselben sollte der „offene“ Kühler (Wäscher) mit Wasser als Arbeitsmedium im Gegenstromprinzip betrieben werden. Dabei sollte der Grad der Abkühlung sowie die Menge der dabei im Wasser auskondensierten Weichmacher bestimmt werden. Da vermutet wurde, dass es in einem herkömmlichen geschlossenen Kühler zu Verstopfungen auf Grund von zähflüssigem Weichmacherkondensat kommen würde, wurde das Prinzip eines „offenen“ Kühlers gewählt.

Für den Versuch sollte die Abluft nicht direkt aus dem Abluftkanal entnommen werden, weil dieser Eingriff zum einen die Produktionsparameter verändert hätte und zum anderen zu zeitaufwendig und kostenintensiv (Installation eines Probenahmepunktes in Edelstahl-Abluftkanal) gewesen wäre. Deswegen wurde

ein Teil der Abluft aus der Umlenkammer der HOBA abgesaugt (Abbildung 8) und in den Wäscher geleitet.

Der Wäscher wurde aus KG-Rohr mit einer Nennweite von 200 mm angefertigt (Abbildung 9). Der Verdüsungsteil wurde mit kaltem Wasser aus dem Trinkwassernetz gespeist. Die Düse wurde durch einen Duschkopf so hergestellt, dass gewährleistet war, dass entsprechend große Tropfen auch bei entgegengerichteter Luft senkrecht nach unten fallen konnten. Als Tropfenabscheider diente ein mit PP-KEMAFIL®-Gewirke (Schlingseil) gefülltes KG-Rohr. Als Auffangbehälter zur Probenahme des kontaminierten Wassers wurde ein IBC-Container benutzt (Abbildung 10).



Abbildung 8: Umlenkammer der HOBA

Um den optimalen Betriebspunkt zu finden, wurde zwischen Abluftvolumenströmen von 50 m³/h bis 300 m³/h sowie Wasservolumenströmen von 50 l/h bis 500 l/h variiert. Die Wassereintrittstemperaturen betragen 15 °C.

Da zu viel Nebenluft aus dem Raum abgesaugt wurde, schwankten die Eintrittstemperaturen sowie die Weichmacheranteile der angesaugten Luft zu stark. Somit brachte dieser Versuch keine relevanten Ergebnisse. Die ausgewählte Probenahmestelle an der HOBA war ungeeignet; es fanden dazu keine weiteren Versuche an dieser Stelle statt.

Das Konzept der Abluftkonditionierung durch Abluftabkühlung wurde nach erneutem Aufbau des Prüfstandes an der Laborbeschichtungsanlage fortführend untersucht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in AP 7: Vermessung der Prototypenanlage inklusive der relevanten Produktionsprozesse.



Abbildung 9: Versuchswäscher an der HOBA

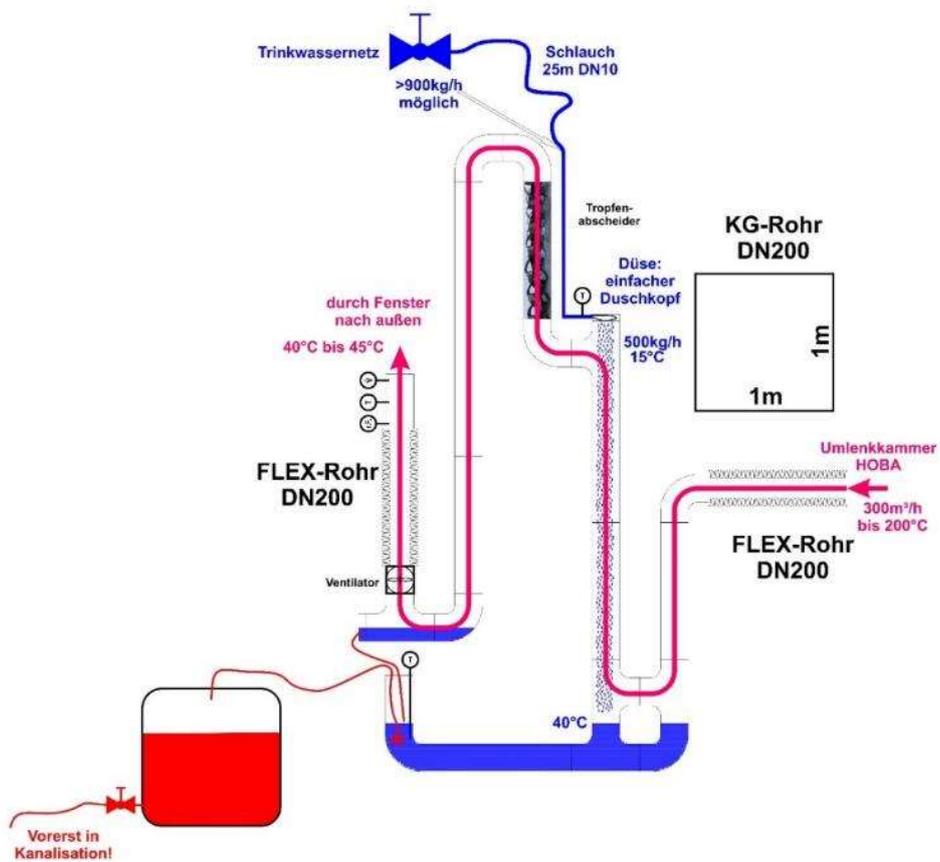


Abbildung 10: Prinzip des Wäscher-Prüfstandes für Weichmacher an der HOBA

AP 5: Entwicklung der Einbindung, Konzeptionierung und Auslegung der Gasturbine

Mikrogasturbinen-Prüfstand bei der Firma efa in Leipzig

An der Mikrogasturbine (Abbildung 11) im Technikum der Firma efa fanden Experimente statt, mit denen zum einen der Einfluss von Weichmachern und zum anderen der Einfluss von Siloxanen in der Verbrennungsluft untersucht werden sollte.

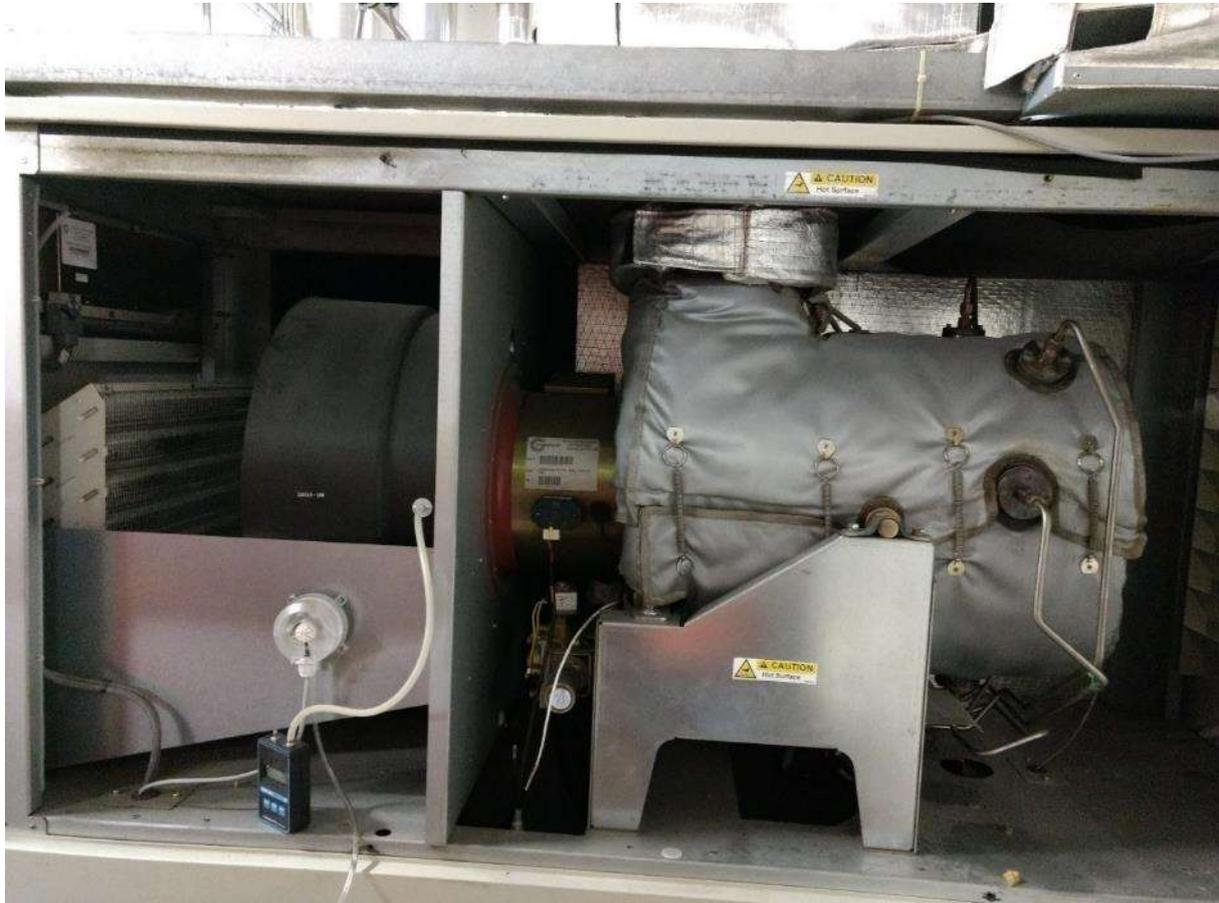


Abbildung 11: Mikrogasturbinen-Prüfstand (efa Leipzig GmbH)

Weichmacher

Für den Versuch mit Weichmachern in der Verbrennungsluft wurden Weichmacher verdampft und der Zuluft beigemischt. Um zeitnah verwertbare Ergebnisse zu erzielen, wurde ein Ölbaderhitzer entsprechend umgebaut, um die erwünschten Verdampfungstemperaturen zu erreichen. Während des Betriebs wurde Raumluft über Öffnungen am Erhitzer direkt über die Flüssigkeitsoberfläche geführt, so dass sich die Weichmacherdämpfe mit der Luft vermischen konnten. Die so belastete Luft wurde dann durch ein Rohr von der Mikrogasturbine als Verbrennungsluft angesaugt (Abbildung 12).



Abbildung 12: Verbrennungsluftansaugung über Verdampferbad und Ansaugrohr

Der Siedepunkt der verwendeten Weichmacherprobe lag bei ca. 230 °C und der Flammpunkt bei 210 °C. Um ein Entzünden zu vermeiden, wurde die Probe lediglich auf Temperaturen bis 190 °C erwärmt. Die Verdampfungsleistung betrug dabei etwa 4,5 ml/min bzw. 4,3 g/min.

Schon nach 3 Stunden konnte beobachtet werden, dass sich der Luftfilter mit kondensierendem Weichmacher zuzusetzen begann (Abbildung 13). Ob Weichmacher in der Startphase im Rekuperator auskondensieren, um dann eventuell im Betrieb an der Wand anzubackern, kann nur vermutet werden.

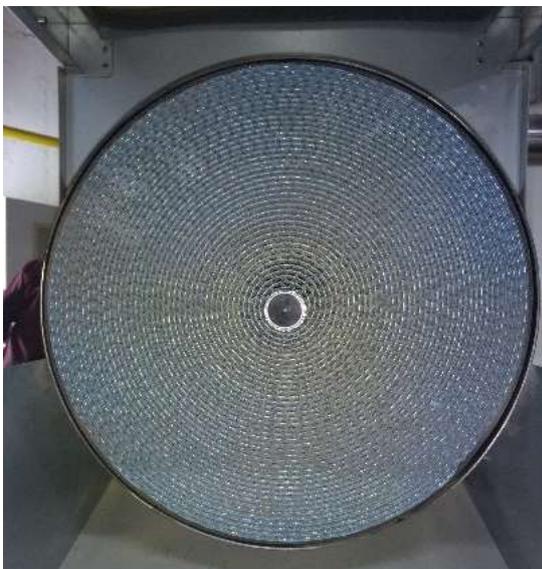


Abbildung 13: Verbrennungsluftfilter der Mikrogasturbine

Siloxane

Einleitung

Siloxane sind lineare (L) oder ringförmige (D) Verbindungen der allgemeinen Formel $-\text{[SiOR}_1\text{R}_2\text{]}-$. Typisch sind 5–12-stufige Verbindungen. Höhere Kettenzahlen werden als Silikone bezeichnet. Siloxane zeichnen sich durch eine geringe Wasserlöslichkeit aus, und sie sind chemisch weitgehend inert. Ein chemischer Angriff erfolgt nur durch starke Säuren oder Basen. Niedermolekulare Siloxane sind flüchtig. Siloxane sind brennbar und verbrennen i. d. R. zu CO_2 , H_2O , SiO_2 (Arnold, 2009).

Die Siloxane D4 und D5 sind kaum biologisch abbaubar und nicht hydrolysierbar (Patentnr. DE102004051807B4, 2008) Auf Grund ihrer Hochtemperaturbeständigkeit finden Siloxane Einsatz z. B. als Motorenschmiermittel (Doczyck, 2012), sie zeigen ein kunststoffartiges Verhalten.

Nach HLUNG (2003) ist Octamethylcyclotetrasiloxan, OMCTS, D4 wie folgt charakterisiert:

- Log KOW: 5,1,
- Henry-Konstante: 3,4 (Normalbedingungen),
- Dampfdruck: 1,2–1,33 hPa,
- Wasserlöslichkeit: 74 $\mu\text{g/L}$ (gering),
- Verdunstungsrate: $\text{kvc/kv0} = 0,57$,
- Halbwertszeit (Oberflächengewässer): 3 Stunden bis 6 Tage,
- atmosphärisch schneller Abbau durch Hydroxyl-Radikale,
- hohe Adsorptionstendenz.

Verwendung und Einsatz

Siloxane sind Bestandteil von Körperpflegeprodukten, Haarpflege, Kosmetik. Sie werden jedoch auch als Hilfsstoffe, z. B. als Weichmacher in der chemischen Industrie, eingesetzt (UBA, HLNUG, 2003). Eine weitere Verwendung von vernetzten Polydimethylsiloxanen (PDMS) findet sich als Lebensmittelkontaktmaterialien (Droth, Gerl, & Simat, 2016), z. B. als Haushaltsartikel (Backformen, Babyschnuller ...) (UBA). Als wasserabweisende Oberflächenbeschichtung werden Siloxane in der Papierindustrie und bei der Textilreinigung und -ausrüstung eingesetzt. Weiterer Einsatz erfolgt in der (Zahn-)Medizin/Implantate oder als hochtemperaturbeständiges Motorenschmiermittel (Arnold, 2009, Doczyck, 2012).

Zyklische Siloxane finden in der Textilindustrie als Wirkstoff keinen Einsatz (Axhausen et al., 2019) können aber als Rückstände aus der Synthese von Polysiloxanen in Formulierungen (Weichgriffmittel, Entschäumer) auftreten. Sicherheitsdatenblätter müssen informieren, wenn D4, D5 und/oder D6 mit mehr als 0,1 % in Formulierungen enthalten sind.

Das Gefährdungspotential ist derzeit schwer abschätzbar. Es gibt Hinweise auf Reproduktionstoxizität sowie Cancerogenität. Auf Grund der Persistenz zyklischer Verbindungen besteht ein hohes Bioakkumulationsvermögen (UBA). Kurzkettenige Siloxane gelten als sehr flüchtig. In der Umwelt werden vor allem D4, D5 (Zulauf von KA, Abwasser, Klärschlamm, Faulgas 50 – 250 mg/m^3) und D6 nachgewiesen (Arnold, 2009, Doczyck, 2012, UBA).

Abtrennung

Grundsätzlich ist eine Aktivkohleabsorption mit vorgeschalteter Gastrocknung < 50 % rel. Feuchte möglich und führt zu Reingasqualitäten mit < 1 mg Siloxan/m³ (Doczyck, 2012). Als wirtschaftlicheres Verfahren ist die Abtrennung mittels hydrophobierten Kieselgels nach (Patentnr. DE102004051807B4, 2008) beschrieben. Kieselgel weist nach (Schweigkofler & Niessner, 2001) eine 10-fach höhere Beladungskapazität als Aktivkohle auf.

Der hydrolytisch nukleophile Angriff auf die Si-O-Bindung des cyclischen Siloxans ist sterisch sehr stark behindert, weil die Ringform selbst chemisch sehr stabil und zusätzlich vollständig methyliert, also gesättigt und hydrophob ist. Diese Siloxane lösen sich nicht in wässrigen Medien. Im Gegensatz dazu steigen mit zunehmender Molekülmasse und zunehmender Hydrophobie des Siloxans (z. B. D4 oder D5) die Van-der-Waals'schen Bindungskräfte deutlich an, was wiederum sehr positive Auswirkungen auf die Sorptionswechselwirkungen zwischen cyclischen Siloxanen und hydrophobiertem Kieselgel hat. Hydrophobiertes Kieselgel erscheint daher als Sorbensmaterial geeignet.

Ein Angriff mit hochkonzentrierter Schwefelsäure, Trichloressigsäure oder Salpetersäure ist in (Patentnr. DE102004051807B4, 2008) beschrieben.

Die Effizienz der technischen Abtrennung wird nach (Wheless & Pierce, 2004) für unterschiedliche Verfahren wie folgt beziffert:

- Kohleabsorption 1 Massen% bis 1,5 Massen%,
- Ausfrieren (40 °F, 365 psig) ~32 %; -20°F ~ 95 %,
- Flüssig-Absorption im Waschturm mit Selexol (Dimethlether aus Polyethylenglykol) 99 %, Silikagel ~50 %.

In Tabelle 5 sind die ermittelten Verfahren für die Anwendung als Nachrüstlösung in einem bestehenden Textilbetrieb mit nachgeschalteter regenerativer Abluftreinigung, wie am Beispiel des Projektpartners VOWALON dargestellt, zusammengefasst.

Tabelle 5: *Bewertung von Verfahren für die Abtrennung von Siloxanen als Nachrüstlösung in bestehenden Textilbetrieben mit nachgeschalteter regenerativer Abluftreinigung*

Verfahren zur Siloxanentfernung	Bewertung
Adsorption (z. B. Aktivkohle, Al ₂ O ₃ , Silikagel)	ungeeignet bei hoher organischer Belastung (konkurrierende Adsorption; außer Aktivkohle eventuell regenerierbar)
Absorption <ul style="list-style-type: none"> • starke Säuren (T > 60 °C) (Schwefelsäure, Salpetersäure), • organische Flüssigkeiten (z. B. Lösemittel, Eisessig, Kerosin/Diesel) • (Wasser) 	aggressiv und gefährlich im Umgang moderat bis sehr effektiv (abh. vom Absorbens) äußerst ineffektiv
Auskondensieren durch Tiefkühlen auf < -25 °C	energieaufwendig

Siloxane und Mikrogasturbinen

Für den Versuch mit Siloxanen in der Verbrennungsluft als Zuluft für eine Mikrogasturbine (μ GT) beim Projektpartner efa Leipzig wurden Siloxane verdampft und der Zuluft beigemischt.

Der Siedepunkt der verwendeten Siloxanprobe lag bei ca. 245 °C und der Flammpunkt bei 240 °C. Zur Vermeidung eines Entzündens wurde die Probe lediglich auf Temperaturen bis 220 °C erwärmt. Die Verdampfungsleistung betrug dabei etwa 1,6 ml/min bzw. 1,8 g/min. Die siloxanhaltige Zuluft wurde einer Mikrogasturbine zugeführt. Der Versuch wurde über 2 Stunden durchgeführt. Inklusiv Einlaufphase wurden dabei insgesamt etwa 300 g Siloxane von der Mikrogasturbine angesaugt. In Abbildung 14 sind die nach Versuchsende an innenliegenden Bauteilen der Mikrogasturbine festgestellten Ablagerungen aufgezeigt.



Abbildung 14: SiO_2 -Ablagerung an innenliegenden Bauteilen

Bei der thermischen Oxidation entstehen aus Siloxanen Siliziumoxide, die innerhalb der Mikrogasturbine offensichtlich zu Ablagerungen an Bauteilen führen. Der Silikonstaub reichert sich in der Brennkammer an und dringt schließlich in die Lagerung ein. Diese Ablagerungen können zu einer Reduzierung der Standzeit bis hin zur dauerhaften Zerstörung führen.

Eine Woche nach der o. g. Versuchsdurchführung kam es zu einem Ausfall der Turbine. Somit konnte festgestellt werden, dass eine Gesamtmasse von 300 g Siloxanen, welche über die Verbrennungsluft in die Turbine gelangten, einen Grenzwert für einen Totalausfall darstellen.

Für einen sicheren Betrieb einer Mikrogasturbine muss also entweder sichergestellt sein, dass (bei einer Standzeitverkürzung) hinreichend Siloxan aus der zugeführten Luft entfernt (vgl. AP 8: Versuche an der Prototypenanlage unter Beachtung der in AP 5 entwickelten Konzepte und Technologien) oder eine siloxanbeladene Zuluft durch die Nutzung anderer geeigneter (Ab-)Luftströme vermieden werden kann (vgl. AP 6: Umsetzung des Konzeptes bei der Firma VOWALON). Im Projekt wurden beide möglichen Wege verfolgt.

Anhand von Laborversuchen am STFI e.V. mit den Stoffen Eisessig, Petroleum, Heizöl, Benzin und Alkohol wurde deren Eignung als flüssiges Absorptionsmittel für Siloxane getestet. Andere Methoden (z. B.

Adsorption an Aktivkohle, Kondensation durch Kryowäsche) wurden nach einer entsprechenden Bewertung ausgeschlossen. Eine Kryowäsche scheidet aus energetischen Gründen aus, wohingegen beim Aktivkohleeinsatz neben unzureichender Absorptionskapazität durch den gleichzeitigen Feuchteeintrag eine Absorptionskonkurrenz zu anderen flüchtigen organischen Stoffen besteht.

Das somit zu betrachtende/zu entwickelnde Verfahren zur Reduktion von Siloxanen aus der Abluft durch Adsorption in Mineralöl (hier Heizöl) ist im Detail dargestellt in AP 8: Versuche an der Prototypenanlage unter Beachtung der in AP 5 entwickelten Konzepte und Technologien.

AP 6: Umsetzung des Konzeptes bei der Firma VOWALON

Aufbau des Mikrogasturbinen-Prüfstands bei VOWALON (Einsatzort 6: Lösemittelanmischraum)

Im Zuge der in AP 5 dargestellten Überlegungen wurde am Standort VOWALON der Einsatz einer Mikrogasturbine unter Vermeidung der Zuführung siloxanhaltiger Abluft als Brennluft für die μ GT erprobt. Als geeignete Brennluft wurde lösemittelhaltige Abluft aus dem Lösemittelanmischraum identifiziert.

In großen Anmischbehältern werden die Pasten für die Beschichtungsanlagen hergestellt. Bei diesem Prozess werden freigesetzte Lösungsmitteldämpfe abgesaugt. Bisher wurde dieser lösemittelhaltige Abluftstrom unter Einsatz von Brenngas in der RTO verbrannt, nun sollte er als Brennluft in einer μ GT genutzt werden. Dabei reduziert sich durch die bei der Verbrennung der enthaltenen Lösemittel eingetragene Energie der Brenngasverbrauch der μ GT – bei gleicher elektrischer Leistung. Die über die μ GT nun auf 300 °C erwärmte Abluft (Abgas) trägt bei der anschließenden Nachbehandlung in der RTO aufgrund der Eigenwärme zu einer weiteren Reduzierung des Gasverbrauchs bei. Ein vereinfachtes Schema der Einbindung der μ GT in den Abluftstrom ist in Abbildung 15 dargestellt.

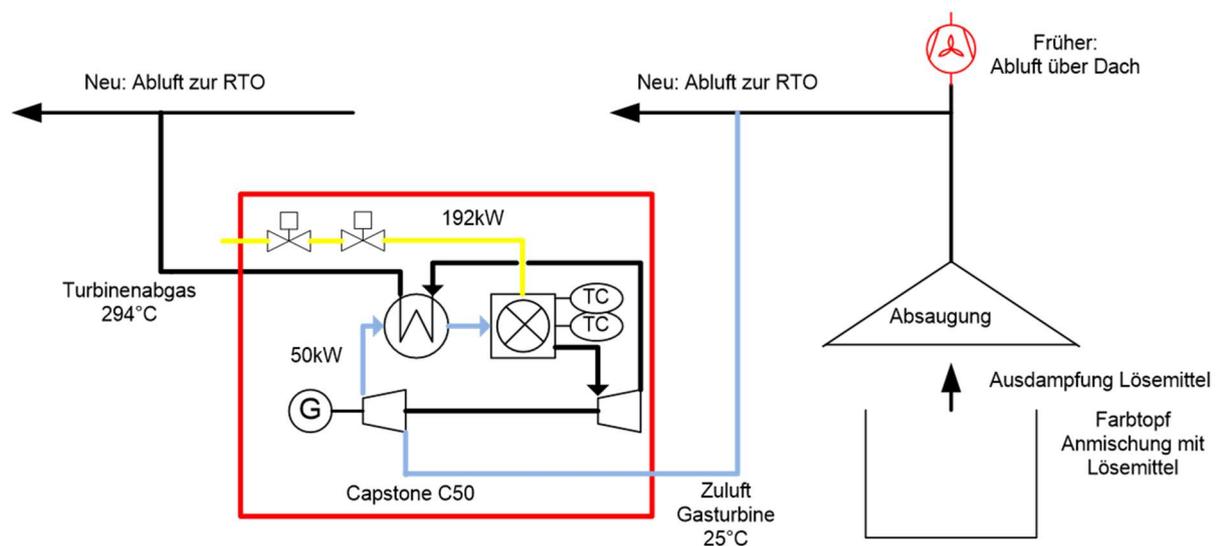


Abbildung 15: Vereinfachtes Schema zur Einbindung einer μ GT in den Abluftstrom

Vor dem Einbau der μ GT waren durch VOWALON umfangreiche Vorbereitungsarbeiten auszuführen (Freiräumen der benötigten Aufstellfläche, Gewährleistung der Medienanbindungen sowie der Elektronik/Steuerung). Nach Installation der Mikrogasturbine vor Ort wurde eine umfassende Funktionsprüfung durchgeführt. Insbesondere musste das entwickelte SPS-Programm zur Ansteuerung aller für den Betrieb

der Mikrogasturbine relevanter Komponenten (u. a. Zu- und Abluftklappen, Verdichter, Raumlüfter) getestet und angepasst werden. Darüber hinaus wurde die Fernwirktechnik und die verbaute Sicherheitstechnik (u. a. Abgasgedrucktächter) getestet.

Die für den Betrieb der Anlage notwendige Verbrennungsluft sollte zunächst über einen Zuluftkanal aus der Lösemittelanmischung angesaugt werden. Für die planmäßige Einbindung der Mikrogasturbine war darüber hinaus der Anschluss des Abluftkanals vor der RTO zu realisieren.



Abbildung 16: Mikrogasturbinen-Laborprüfstand (VOWALON)

Nach der durchgeführten Installation und der Inbetriebnahme der Mikrogasturbine (Stufe 1) erfolgte die Einbindung der μ GT in das Abluftsystem (Stufe 2) durch die Projektpartner VOWALON und efa. Während die Stufe 1 den standardmäßigen Einsatz einer μ GT repräsentiert, stellt die Zuführung lösemittelhaltiger Verbrennungsluft eine Besonderheit für den Einsatz der μ GT dar. Eine zweite Besonderheit war die Notwendigkeit der Einbindung in ein druckgeregeltes Abluftsystem. Die Fertigstellung dieser Tätigkeiten erforderte einen kompletten Stillstand der Produktion und der RTO bei VOWALON.

Das entwickelte SPS-Programm zur Ansteuerung aller für den Betrieb der Mikrogasturbine relevanten Komponenten wurde programmiert und getestet. Die durchgeführten Testläufe der Mikrogasturbine nach deren Einbindung verliefen erfolgreich, wobei die Zuluft zur μ GT zeitweise sowohl lösemittelfrei als auch lösemittelbelastet war. Messungen zeigten, dass die Lösemittelbelastung in der Abluft des Lösemittel-Anmischraumes (LMA) im Mittel ca. 200 ppm VOC betragen, wobei kurzzeitig auch deutlich höhere Spitzenwerte (bis zum Fünffachen der mittleren Belastung) zu erwarten sind. Auswirkungen der Lösemittelzufuhr über die Verbrennungsluft auf den Betrieb der μ GT waren eindeutig im Leistungsbild und anhand der Rotordrehzahl erkennbar. Sehr große, schnell ansteigende Lösemittelkonzentrationen konnte die Mikrogasturbine nicht ausregeln und fuhr kurz herunter (Abbildung 17). Im Ergebnis dieser Testläufe stellte sich weiterhin heraus, dass Gasdruckschwankungen in der Zuleitung der μ GT zum vorgeschalteten Gasverdichter auftraten. Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten, wurden ein Gasdruckminderer in der Gassicherheitsstrecke installiert und Feinjustierungen bis hin zu einem Federwechsel im Gasdruckregler durchgeführt. Die dauerhafte Inbetriebnahme der Mikrogasturbine erfolgte ab dem 01.01.2021.

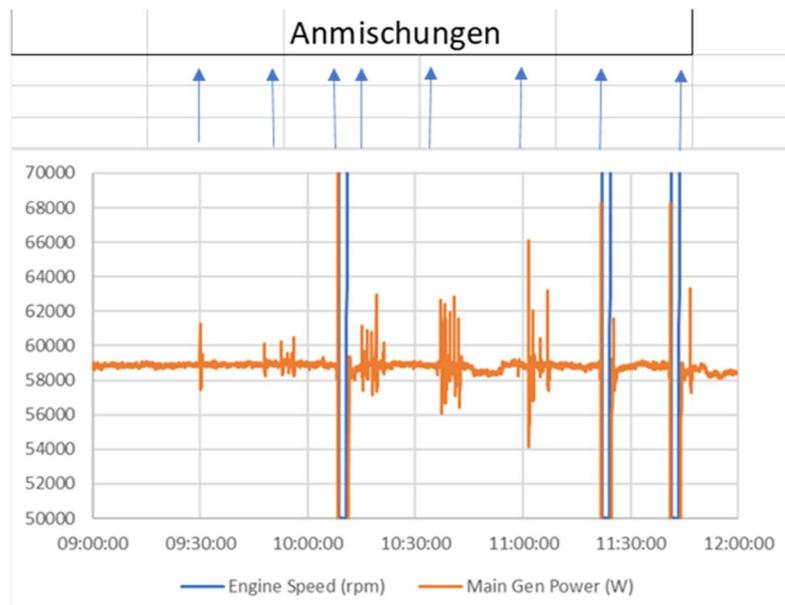


Abbildung 17: Auswirkung der Zufuhr von Lösemitteln über die Verbrennungsluft auf den Betrieb der μ GT. In Abhängigkeit von der Intensität der Lösemittelbelastung traten z. T. starke, regelungsbedingte Leistungsschwankungen auf bis hin zum kompletten Herunterfahren der μ GT.

AP 7: Vermessung der Prototypenanlage inklusive der relevanten Produktionsprozesse

Analytik von Siloxanen (Beispiel Laborbeschichtungsanlage LABA)

Um das in AP 5 favorisierte und in AP 8 näher dargestellte Verfahren zur Siloxanentfernung dimensionieren zu können, bedurfte es einer Analyse und Ermittlung von Siloxanfrachten in den zu konditionierenden Abluftvolumenströmen. Sämtliche Untersuchungen dazu wurden an der Laborbeschichtungsanlage (LABA) von VOWALON durchgeführt:

- Laborbeschichtungsanlage (Nuova, Isotex s.p.A., Sandrigo-Venecia/IT),
- PUR-Beschichtungsformulierungen (Testansätze): mit und ohne Zusatz von Lösemitteln, Verwendung siloxanhaltiger Oberflächenadditive/Flussmittel.

Die Analytik der Siloxane in der Abluft erfolgte durch die Fa. STEP Sensortechnik Pockau GmbH (Pockau, Sachsen) mittels Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie (IMS). Das Messprinzip der IMS beruht auf unterschiedlichen Driftgeschwindigkeiten von Ionen innerhalb eines elektrischen Feldes in Luft bei Atmosphärendruck und Detektortemperaturen bis ca. 150 °C. Umgebungsluft mit der Messprobe wird auf eine Ionisierungsquelle (im Falle der STEP IMS-Geräte Beta-Nuklid Tritium) geleitet und ionisiert. Es entstehen komplexe Ionen vom Typ NH^+ , NO^+ , $(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}^+$, die den positiven Reaktant-Ionenpeak (RIP⁺) im Spektrum generieren. Negative Ionen der Typen O_2^- und $(\text{H}_2\text{O})_m^-$ bilden den negativen Reaktant-Ionenpeak (RIP⁻). Beide Arten von Ionen sind in der als Träger- und Driftgas genutzten, in den Geräten über integrierte Filter permanent erzeugten Reinstluft im internen Gaskreislauf eines IMS immer vorhanden.

Gelangen mit der Messprobe gasförmige Substanzen, also „Fremdmoleküle“ in die Ionisationskammer des IMS-Detektors, so findet ein Ladungstransfer zwischen den Reaktant-Ionen und den Fremdstoff-Molekülen (hier als M bezeichnet) statt:

- $\text{RIP}^+ + \text{M} \rightarrow \text{RIP} + \text{M}^+$ (positives elektrisches Feld),

- $\text{RIP}^- + \text{M} \rightarrow \text{RIP} + \text{M}^-$ (negatives elektrisches Feld).

Durch elektrische Impulse am Eintrittsgitter werden die Ionen von der Ionisationskammer in die Driftröhre des Detektors gelenkt. Abhängig von ihren Eigenschaften der Ionenmobilität bewegen sich die Ionen mit unterschiedlicher Driftgeschwindigkeit innerhalb des homogenen elektrischen Feldes zum Kollektor am Ende der Driftstrecke. Dementsprechend gelangen die Substanz-Ionen zu unterschiedlichen Zeiten - ihrer jeweiligen Driftzeit - an der Kollektorelektrode an und erzeugen ein elektrisches Signal. Da die Driftzeit für jede Substanz typisch und individuell ist, kann diese zur Identifizierung von Substanzmolekülonen M^\pm verwendet werden, wobei die Größe des Signals (Ionenstrom) an der Kollektorelektrode in einem weiten Bereich proportional zur Anzahl der Ladungsträger und somit zur Konzentration dieser Moleküle in der Messprobe ist (Schüler, 2021; Abbildung 18).

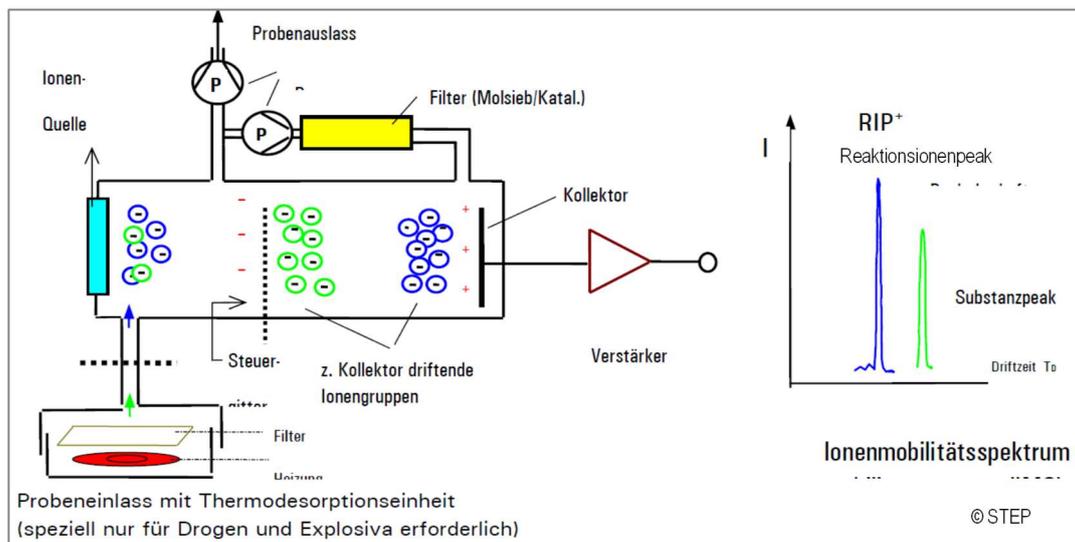


Abbildung 18: Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie-Funktionsschema (© STEP, Pockau)

In Vorbereitung der Abluftmessungen und -analysen wurde das Messgerät der Fa. STEP durch analytentechnische Modifikationen an die Gegebenheiten der Produktion bei VOWALON angepasst. Vorversuche zeigten, dass der hohe Anteil an Lösemitteln (hier: Methylethylketon MEK) in der Abluft eine („einfache“) messtechnische Erfassung von Siloxanen verhinderte, da es zum einen zur vollständigen Aufzehrung der Reaktionsionen und zum anderen zu starken Überlagerungen des MEK-Peaks mit Siloxan-Substanzpeaks in den IMS-Spektren kam (Abbildung 19, Abbildung 20).

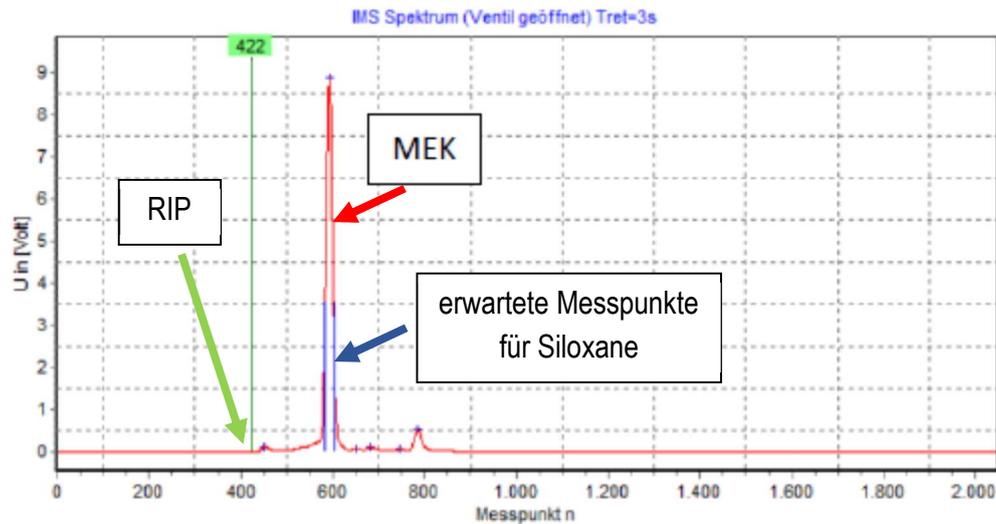


Abbildung 19: IMS-Spektrum der Abluft bei Verarbeitung einer lösemittelbasierten PUR-Formulierung. Das Lösemittel (MEK) dominiert und führt zur vollständigen Aufzehrung der Reaktionsionen; Siloxane werden überdeckt bzw. kaum ionisiert.

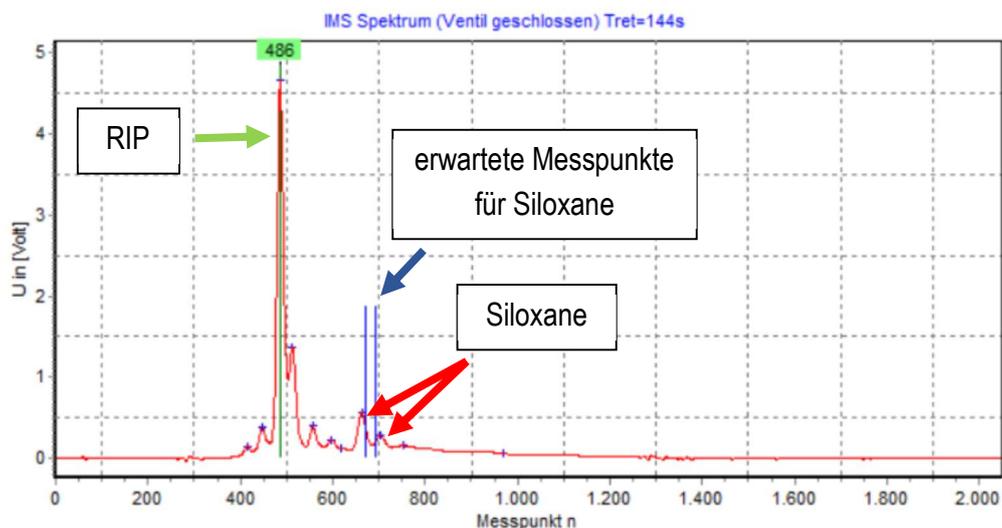


Abbildung 20: IMS-Spektrum der Abluft bei Verarbeitung einer lösemittelfreien high-solid PUR-Formulierung. Reaktionsionen sind in ausreichender Menge vorhanden, so dass die Siloxane ionisiert werden können; die Siloxanpeaks werden nicht durch Lösemittel überdeckt.

Die Lösung des Problems bestand in der gerätetechnischen Erweiterung um eine gaschromatografische Vortrennung der Abluftbestandteile unter Verwendung der Säule MXT-5 30m 0,53 mm 1,0 µm von RESTEK 75073 (ser. 1453461) bei einem Durchfluss von 20 ml/min. Infolgedessen konnten die Ionisierung und die Detektion des Lösemittels von denen der Siloxane zeitlich entkoppelt werden.

Das IMS-Messgerät wurde auf folgende Dimethylsiloxane kalibriert:

- Hexamethyldisiloxan (L2), CAS 107-46-0
- Octamethyltrisiloxan (L3), CAS 107-51-7
- Hexamethylcyclotrisiloxan (D3), CAS 541-05-9

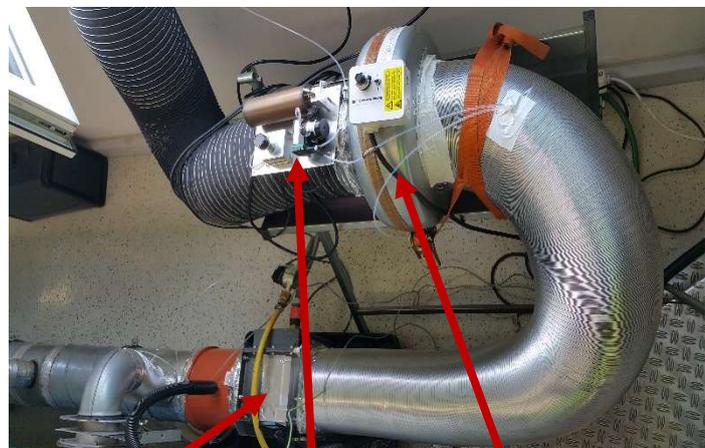
- Decamethyltetrasiloxan (L4), CAS 141-62-8
- Octamethylcyclotetrasiloxan (D4), CAS 556-67-2
- Dodecamethylpentasiloxan (L5), CAS 141-63-9
- Decamethylcyclopentasiloxan (D5), CAS 541-02-6
- Dodecamethylcyclohexasiloxan (D6), CAS 540-97-6

Für die Kalibrierung wurden Flüssigstandards der Siloxane hergestellt (Lösungsmittel: Cyclohexan). Daraus erfolgte durch Verdampfung entsprechender Mengen in einem bekannten Gasvolumen die Herstellung von Gasstandards für die IMS-Analyse (enthaltende Siloxankonzentrationen: 250 ppb, 500 ppb, 750 ppb und 1.000 ppb).



Abbildung 21: Beprobung eines Gasvolumens und Messung des IMS-Spektrums (STEP, Pockau)

Nach erfolgreicher Kalibrierung erfolgten an der Laborbeschichtungsanlage von VOWALON am Prüfstand „Abluftkonditionierung“ die Abluftanalysen unter Modellierung ausgewählter Produktionsprozesse.

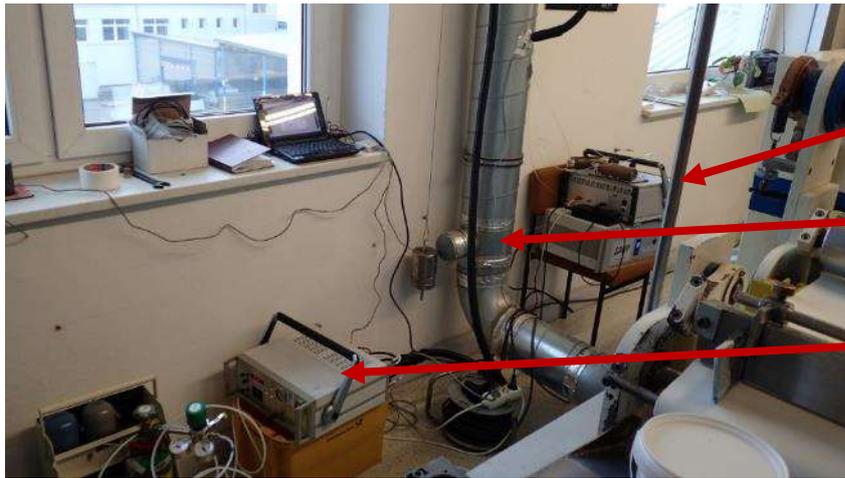


Wasser/Luft-
Wärmetauscher

Probennahme
für IMS

Radialventilator zum
Absaugen eines Abluft-
teilvolumenstroms

Abbildung 22: Laborbeschichtungsanlage (LABA) bei VOWALON (links), als Prüfstand „Abluftkonditionierung“ nach Integration eines Bypasses zur Abluftkühlung/-kondensation und Gasanalyse (rechts)



Ionenmobilitäts-Spektrometer (IMS) (Messung Siloxananteil)

Abluftleitung zur Be-
probung

Flammenionisations-
detektor (Messung
VOC-Anteil)

Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Ermittlung von Siloxanemissionen an der Laborbeschichtungsanlage

Im Ergebnis der Messungen konnten die Siloxane L2, D3 und D4 als Bestandteile in der bei der Verarbeitung (lösemittelbasierter) PUR-Formulierung mit siloxanhaltigen Oberflächenadditiven abgeführten Trocknungsluft (Abluft) detektiert (Abbildung 24) und quantifiziert werden (Tabelle 6).

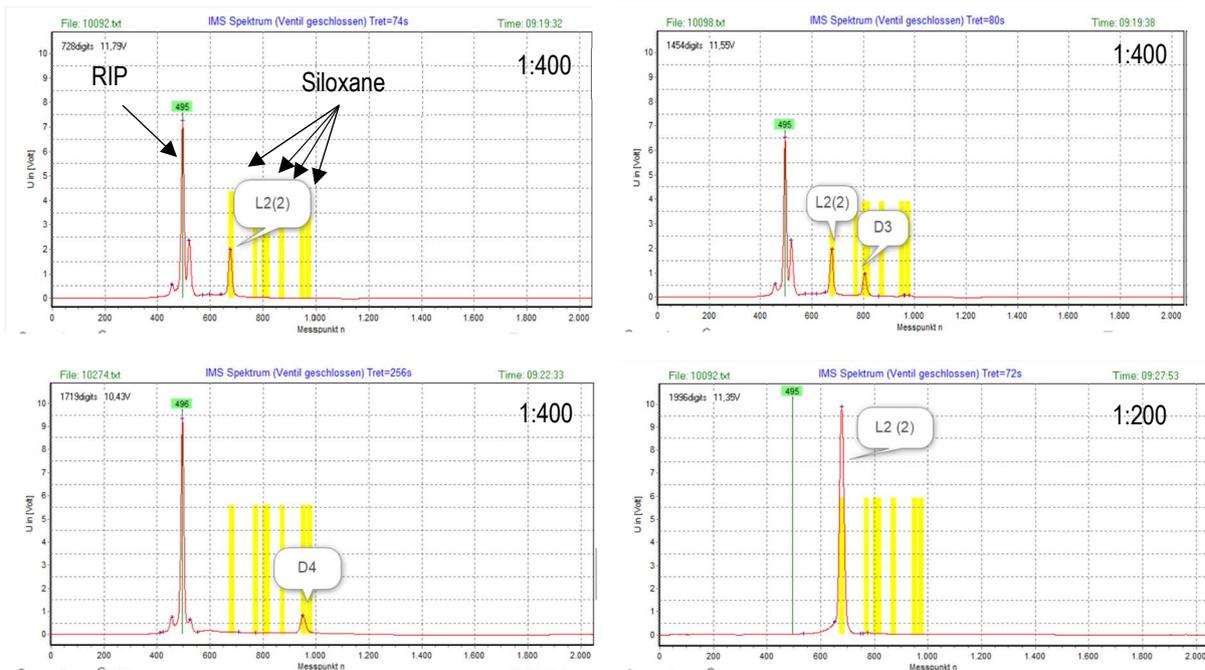


Abbildung 24: IMS-Spektren der Abluft (Abluftvolumenstrom: 450 m³/h, 50 - 75 °C) bei Verarbeitung einer lösemittelhaltigen PUR-Formulierung nach Verdünnung (1:200 bzw. 1:400) und GC-Vortrennung

Tabelle 6: Ermittelte Siloxankonzentrationen in der Trocknungsluft (Abluft) bei Verarbeitung einer lösemittelbasierten PUR-Formulierung mit siloxanhaltigem Oberflächenadditiv

Siloxan	Konzentration (ppm)	Konzentration (mg/Nm ³)
D3	17,14	22
D4	24,04	31
L2 (2)	336,13	434

AP 8: Versuche an der Prototypenanlage unter Beachtung der in AP 5 entwickelten Konzepte und Technologien

Teil A) Abluftkonditionierung: Entfernung von Weichmachern aus der Abluft durch Kondensation (Weichmacher-AWT an LABA bei VOWALON)

Mit dem Aufbau des Prüfstandes „Abluftkonditionierung“ an der Laborbeschichtungsanlage bei VOWALON konnten die konkreten Abluftbedingungen der bei VOWALON zum Einsatz kommenden Beschichtungsanlagen (HOBA, UBA) definiert eingestellt und die jeweiligen Schadstofffrachten separat untersucht werden.

Unter Verwendung eines geschlossenen Kühlers (Rekuperator) wurde der Effekt der Abluftkühlung zur Weichmacherkondensation (Weichmacher-AWT) untersucht. Dazu wurde der Kühler derart betrieben, dass eine möglichst starke Abluftabkühlung stattfand, um zu ermitteln, unter welchen Bedingungen die Kontaminierungsanteile (vorrangig Weichmacher, ggf. auch Siloxane) in der Abluft auskondensieren und damit deren Anteile gesenkt werden können, um bei Nutzung der konditionierten Abluft als Verbrennungsluft für die μ GT einen störungsfreien Turbinenbetrieb zu gewährleisten.

Im Versuch wurde die Abluft mit dem zur Verfügung stehenden Kühlwasser (15 °C) von ca. 70 °C und 90 °C auf etwa 30 °C abgekühlt, wodurch die Weichmacheranteile der Abluft (gemessen als VOC-Anteil mittels FID) aus der PVC-Produktion jeweils um ca. 40 % reduziert werden konnten. Eine weitere Abkühlung der Abluft auf 10 °C würde eine Reduktion der Weichmacheranteile um insgesamt etwa 60 % zur Folge haben (lineare Extrapolation) (Abbildung 25).

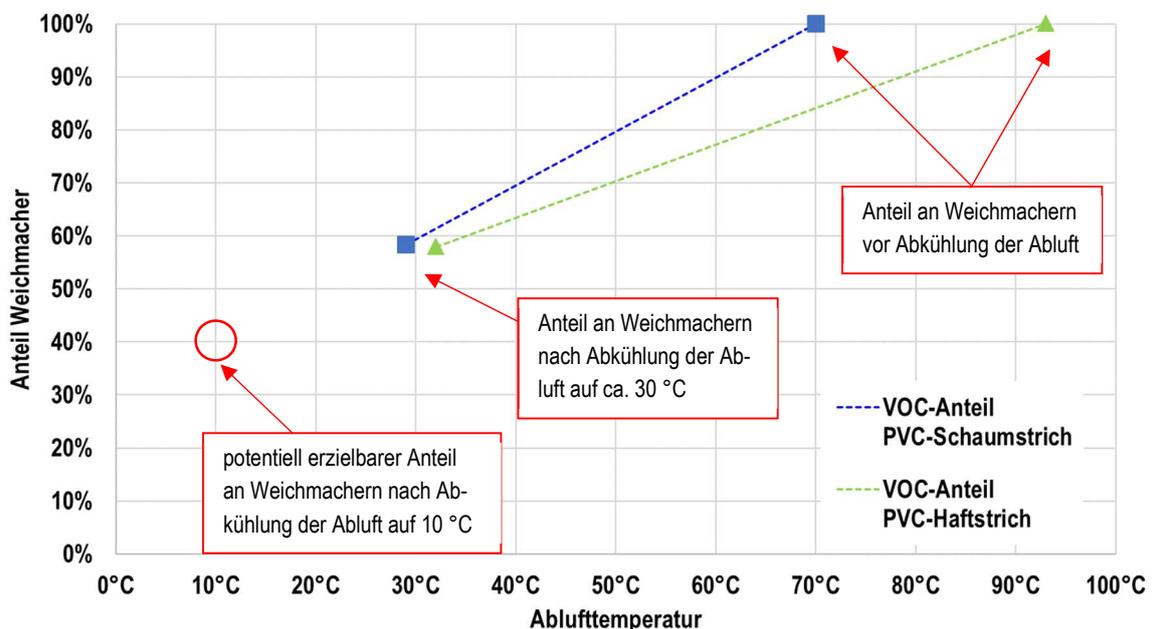


Abbildung 25: Reduzierung der Weichmacheranteile in der Abluft durch Abluftabkühlung und Kondensation (interpolierter Verlauf).

Eine Abkühlung der Abluft aus der PUR-Produktion von etwa 60 °C auf ca. 20 °C führte zu einer Senkung der Lösemittelanteile (gemessen als VOC-Anteil mittels FID) um ca. 30 % (Abbildung 26). Der Anteil der in dieser Abluft enthaltenen Siloxane (L2, D3, L3, gemessen mittels IMS) ließ sich über die Abkühlung

nur unwesentlich reduzieren. Ein nachgeschaltetes Verfahren zur Siloxanentfernung bleibt in diesem Fall weiterhin notwendig.

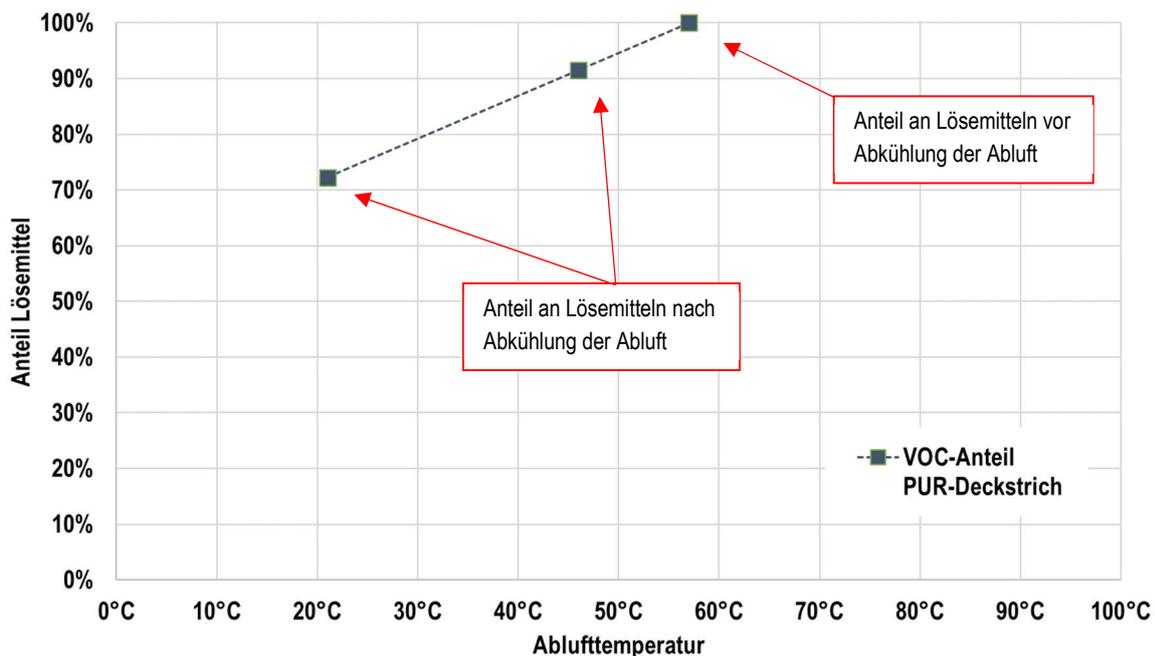


Abbildung 26: Reduzierung der Lösemittelanteile in der Abluft durch Abluftabkühlung und Kondensation (interpolierter Verlauf).

Im Ergebnis der Versuche wurde deutlich, dass eine Reduzierung des Weichmacheranteils in der Abluftsammeleleitung durch Kondensation unweigerlich auch eine Reduzierung des Lösemittelanteils zur Folge hätte. Letzteres wäre für die Nutzung der derart konditionierten Abluft als Verbrennungsluft in der μ MT von wirtschaftlichem Nachteil, da der reduzierte Brennwert der Verbrennungsluft durch Zufuhr von Brenngas wieder ausgeglichen werden müsste.

→ Eine zentrale Platzierung einer Abluftkonditionierung empfiehlt sich daher nicht. Stattdessen werden dezentrale Lösungen bevorzugt.

Teil B) Abluftwärmerückgewinnung (AWT-WRG an LABA)

Unter Verwendung des geschlossenen Kühlers (Rekuperator) konnte die Abluftwärmeübertragung für eine künftige Abwärmenutzung (AWT-WRG) untersucht werden. Der AWT-WRG wurde so betrieben, dass das im Kühler erwärmte Wasser energetisch genutzt werden kann. Dazu wurde der Kühlwasserstrom derart einreguliert, dass eine Erwärmung des Wassers von 15 °C auf 45 °C erfolgte. Eine weitere Temperaturerhöhung ließ sich unter den herrschenden Versuchsbedingungen nicht realisieren. Derart, im Idealfall auf ≥ 60 °C, erhitztes Wasser kann (innerbetrieblich) für andere Temperierungszwecke (z. B. Gebäudeheizung, Prozessluftvorwärmung) genutzt werden.

Im Versuch wurden bei dieser Betriebsweise (maximale Abwärmenutzung bei gleichzeitig geringer Abluftabkühlung) die Anteile an Weichmachern nur um ca. 5 %, die Anteile an Lösemitteln nur um etwa 10 % gesenkt (jeweils gemessen mittels FID).

Auf Basis der Ergebnisse aus Teil A) Weichmacher-AWT und Teil B) AWT-WRG wurde ein Verfahrenskonzept erarbeitet, welches die Vorteile beider Betriebsweisen des Rekuperators miteinander verbindet:

Die konstruktive Lösung sieht drei in Reihe verschaltete Abluftwärmetauscher mit verschiedenen Temperaturstufen vor (vgl. Abbildung 27):

- Stufe 1: Abkühlung der Abluft zur Wärmerückgewinnung auf ca. 60 °C,
- Stufe 2: Kühlung der Abluft auf ca. 15 °C (Kondensation der Weichmacher),
- Stufe 3: Wiedererwärmung der Abluft auf ca. 30 °C (Nutzung der Wärme aus Stufe 1).

Durch das in Stufe 3 erneute Aufheizen über den Taupunkt der zuvor abgekühlten Abluft lassen sich eine weitere Kondensation von Weichmachern und eine Störung des μ GT-Betriebes durch in der Abluft verbliebene Weichmacher vermeiden.

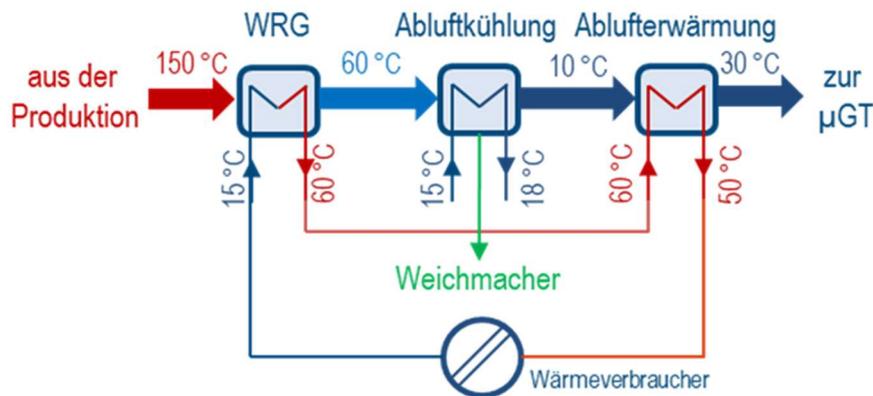


Abbildung 27: 3-stufiger Prozess zur Konditionierung weichmacherhaltiger Abluft

Teil C) Entfernung von Siloxanen aus der Abluft durch Absorption in Mineralöl (Siloxanwäscher im STFI)

Am Standort des STFI wurde ein Versuchsstand „Absorptionswäscher“ aufgebaut. Der Versuchsstand diente dazu, das Verfahren der Siloxanabsorption in Heizöl zu testen. Es sollten Erkenntnisse über die Ausschleusung der bei VOWALON auftretenden, für den Betrieb der μ GT störenden Siloxanfrachten aus der Abluft gewonnen werden.

Zur Dimensionierung und technischen Umsetzung des Versuchsstandes fanden im Vorfeld Laboruntersuchungen unter Variation einzelner Prozessparameter statt. So wurde die Effektivität der Siloxanentfernung sowohl unter Verwendung verschiedener Ab-/Adsorbentien (Heizöl, Petroleum, Wachswolle, Silikagel) als auch unter Variation der Prozesstemperatur (2 °C, 20 °C, 50 °C) untersucht.

Die Versuchsdurchführung erfolgte derart, dass aus einem temperierten Siloxanstandard (10 ml; Dimethylsiloxane D3 - D6, L2 - L5 á 1 g/l in Heizöl) die Siloxane mit einem definierten Luftblasenstrom (Soll: 0,4 l/min) desorbiert wurden. Der siloxanbeladene Luftstrom wurde anschließend durch eine mit dem jeweils zu untersuchenden Ab-/Adsorbens gefüllten Waschflasche, gefolgt von einer weiteren, mit n-Dodecan (10 ml) befüllten Waschflasche geleitet (s. Abbildung 28).

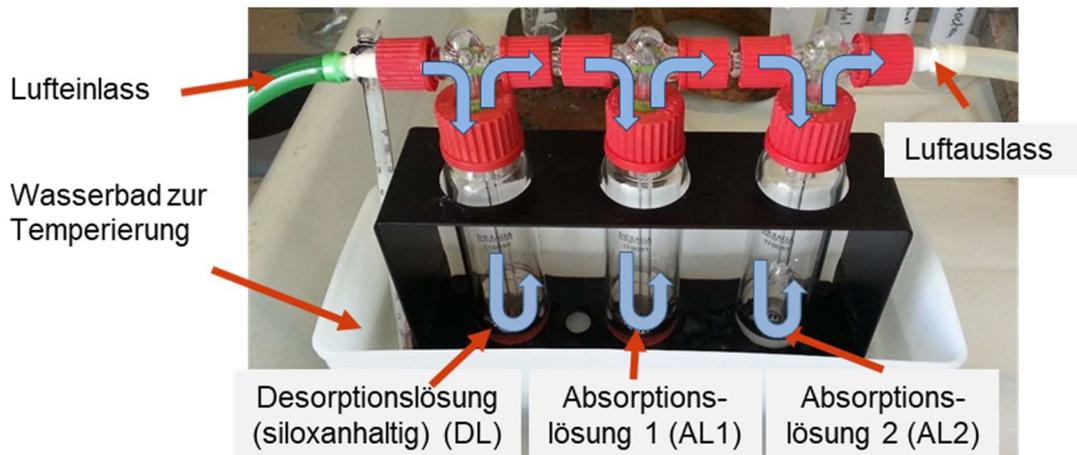


Abbildung 28: Versuchsaufbau zur Desorption und Ab-/Adsorption von Siloxanen

Zur Bestimmung der Siloxandesorption bzw. -Absorption wurde aus allen Lösungen über einen Zeitraum von 120 min in bestimmten Zeitabständen eine Probe entnommen. Diese Proben wurden anschließend gaschromatografisch auf ihren Gehalt an Siloxanen untersucht; aus den Messergebnissen wurden die Absorptionskapazitäten der getesteten Ab-/Adsorbentien (AL1) für die einzelnen Siloxane ermittelt/berechnet und bewertet (s. Tabelle 7)

Tabelle 7: Bewertung der Absorptionskapazität verschiedener Ab-/Adsorbentien

Absorbens:		Heizöl			Petroleum	Wachswolle	Silikagel	
Siloxan		H-H-D** 2 °C	H-H-D 20 °C	H-H-D 50 °C	P-P-D 20 °C	H-WW-D 20 °C	H-S-D 25 °C	M-S-D 20 °C
L2	Flüchtigkeit	rot	rot	rot	rot	rot	grün	rot
D3		gelb	orange	rot	orange	rot	grün	rot
L3		gelb	orange	rot	orange	rot	grün	rot
D4		gelb	orange	orange	orange	orange	grün	rot
L4	Kettenlänge	gelb	orange	orange	orange	orange	grün	grün
D5		grün	gelb	orange	gelb	grün	grün	grün
L5		grün	grün	grün	grün	n/a***	n/a	n/a
D6		grün	grün	grün	grün	n/a	n/a	n/a

* H: Heizöl, D: n-Dodecan, P: Petroleum, WW: Wachswolle, S: Silikagel, M: Methyläthylketon

** Versuchsaufbau gemäß Abbildung 28: DL-AL1-AL2, z. B. H-H-D = Heizöl-Heizöl-Dodecan

***n/a: aufgrund des Versuchsdesigns nicht anwendbar

kein Rückhalt, sehr schnelle und vollständige Desorption	mäßiger Rückhalt, schnelle Desorption	guter Rückhalt, langsame Desorption	sehr guter Rückhalt, sehr langsame Desorption	vollständiger Rückhalt, keine Desorption
--	---------------------------------------	-------------------------------------	---	--

Im Ergebnis der Versuche wurde festgestellt, dass Mineralöl (in Form von Heizöl oder Petroleum) D4, L4 und länger-kettige Siloxane gut bis sehr gut zurückhält, wobei niedrige Temperaturen den Rückhalt begünstigen. Keinen oder nur sehr geringen Rückhalt bietet Mineralöl für L2, D3 und L3. Die Verwendung

von Wachswolle führte zu ähnlichen Ergebnissen wie Mineralöl, mit leicht verschlechtertem Rückhaltevermögen. Sehr gute Siloxanrückhalte wurden unter Verwendung von Silikagel erzielt, solange die Desorptionslösung bzw. der daraus erzeugte Luftstrom keine weiteren leichtflüchtigen Bestandteile beinhaltet (Versuch H-S-D). Die Verwendung von Methyl ethylketon (als gängiges Lösungsmittel in Produktionsprozessen von VOWALON) in der Desorptionslösung führte zu einer drastischen Verschlechterung der Siloxanadsorption am Silikagel (Versuch M-S-D). Methyl ethylketon ist leichter flüchtig als das Siloxan L2 und beeinträchtigt die Adsorptionskapazität des Silikagels für Siloxane deutlich.

Nach Aufbau des Versuchsstandes „Absorptionswäscher“ erfolgte ein Testlauf, um die durchströmbaren Mengen von Luft und Absorptionsmittel zu ermitteln. Mit einem Radialventilator vom Typ Helios RR EC 200 B konnte dem Versuchstand mit integriertem textilen Rieselbett (PP-KEMAFIL®-Gewirke, zur Verbesserung des Stoffübergangs durch Oberflächenvergrößerung) eine Luftmenge von bis zu 300 m³/h kontinuierlich (Lufttemperatur 20 °C) zugeführt werden (Abbildung 29).

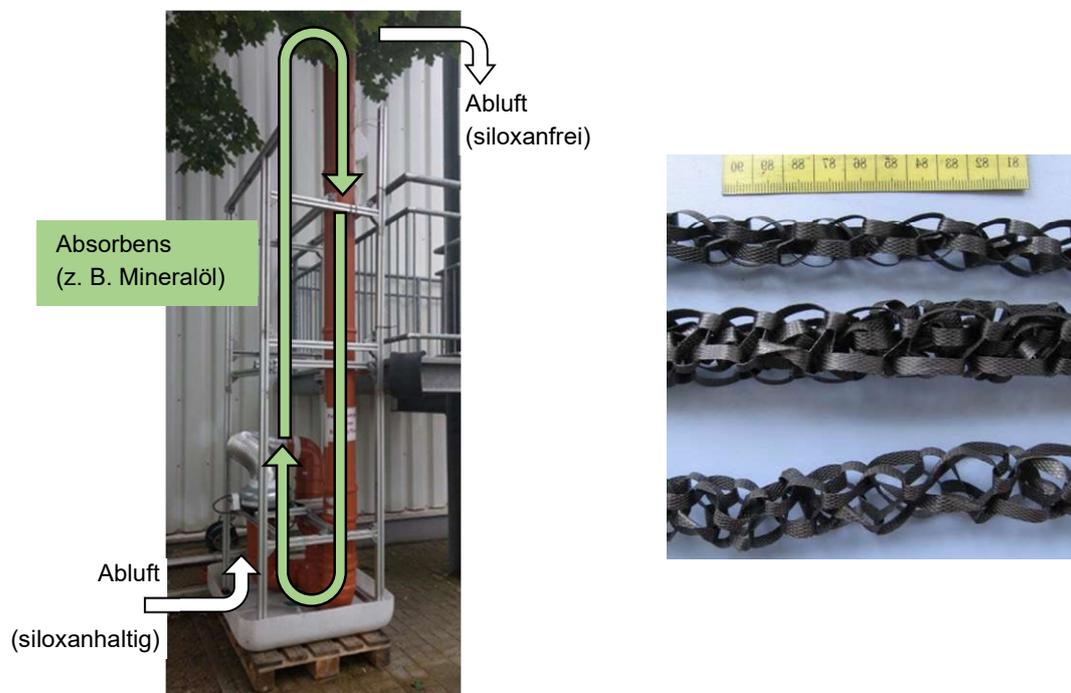


Abbildung 29: Gegenstromwäscher mit integriertem Rieselbett (links), PP-KEMAFIL®-Gewirke als textiles Rieselbett (rechts)

Da der Versuchsstand im Freien errichtet wurde, ließen sich die Erkenntnisse aus den o. g. Laborversuchen bei niedrigen Umgebungstemperaturen gut nutzen (Verbesserung der Abscheidung, v. a. kurzketziger Siloxane, bei niedrigen Temperaturen). Um dennoch eine Beaufschlagung mit den für eine Nutzung in einer μ GT erforderlichen realen Ablufttemperaturen von ca. 40 °C gewährleisten zu können, wurde vor dem Absorptionswäscher ein Luftkanal installiert, der es insbesondere bei niedrigen Außenlufttemperaturen ermöglichte, auf 20 °C bis 25 °C vorgewärmte Luft aus einem Gebäude zuzuführen, um diese dann mit geringerem Aufwand auf 40 °C erwärmen zu können.

Zur Umwälzung des Absorptionsmittels (Heizöl) diente eine Kreiselpumpe mit einer elektrischen Leistung von 0,55 kW (Fördermenge 15 l/min = 900 l/h). Die Einstellung der jeweils gewünschten Fördermenge

erfolgte manuell mit Hilfe eines druckseitig in der Förderleitung installierten Ventils. Der Wäscher wurde mit einer Heizölmenge von 50 l betrieben.

Da sich in Vorversuchen ebenfalls gezeigt hatte, dass die Messung der Siloxangehalte im Luftstrom mit einem Ionen-Mobilitäts-Spektrometer (IMS) in Anwesenheit des Absorptionsmitteldampfes keine auswertbaren Ergebnisse lieferte (vgl. dargestellte Lösemittelproblematik in AP 7), wurde entschieden, die Messung des Siloxangehaltes in der Luft alternativ durch gaschromatografische Bestimmung der Anteile im Heizöl indirekt vorzunehmen.

Für die Versuchsdurchführung wurde das Siloxan D4 als Testsubstanz ausgewählt. Eine definierte Menge der Testsubstanz wurde auf einer Heizplatte bei 75 – 100 °C kontrolliert in den Luftstrom (60 - 70 m³/h) verdampft und mit diesem durch den Wäscher geführt (Abbildung 30).

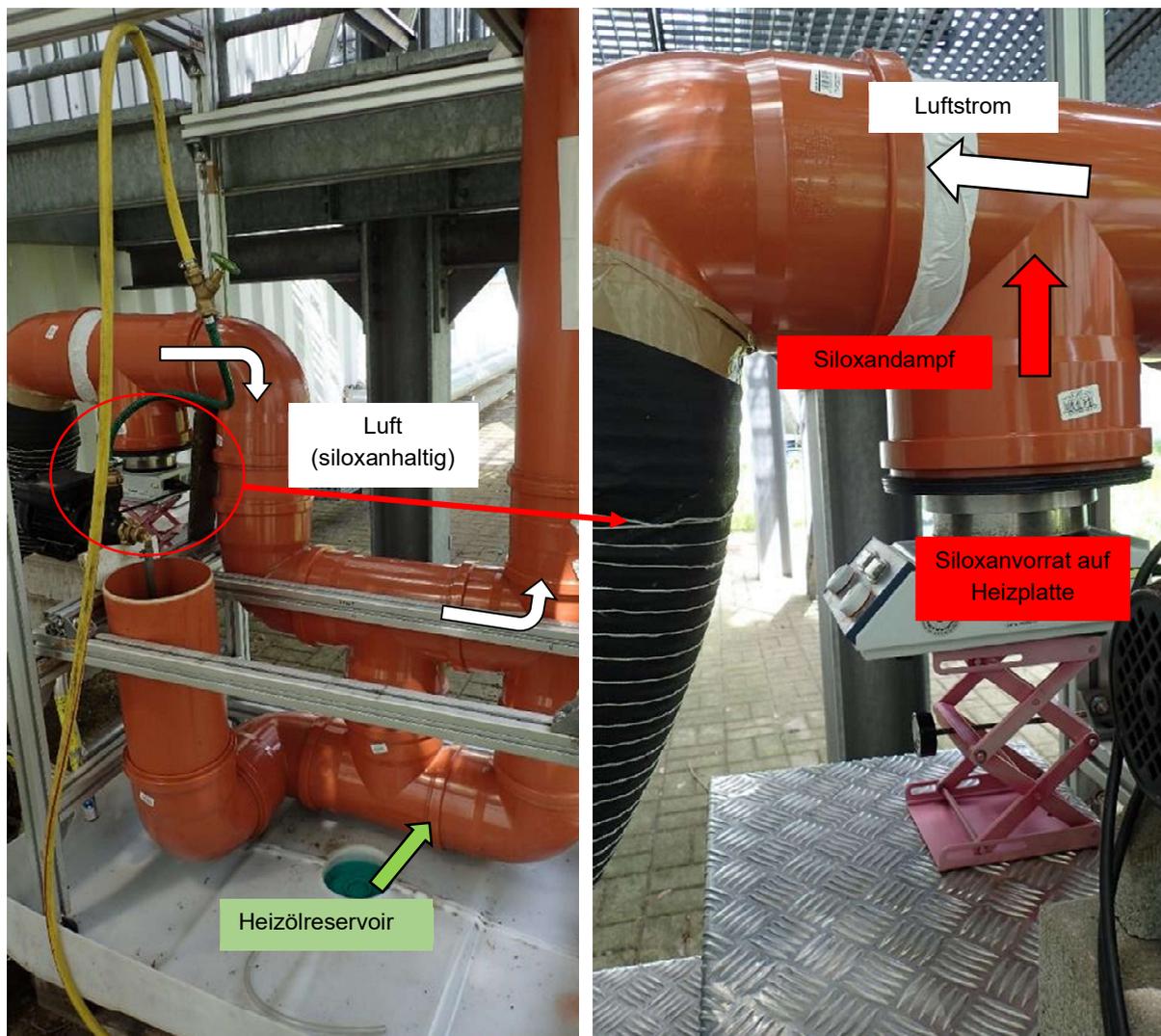


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Verdampfung von Siloxanen in einen Luftstrom

Während des Versuches wurden in gleichmäßigen Zeitabständen von 5 min Probemengen von 5 ml Heizöl aus dem Reservoir entnommen und für die anschließende GC-Analyse präpariert. Jeweils zur vollen Stunde wurde zusätzlich die verdampfte Menge der Testsubstanz gravimetrisch bestimmt. Nach drei Stunden wurde der Versuch beendet.

Die Auswertung der Messwerte zeigt, dass der Anteil des verdampften Siloxans über die gesamte Versuchsdauer (abzüglich der Einlaufphase innerhalb der ersten 20 Versuchsmi­nuten) durch die Luftwäsche zu etwa 75 – 80 % im Heizöl absorbiert werden konnte (Abbildung 31).

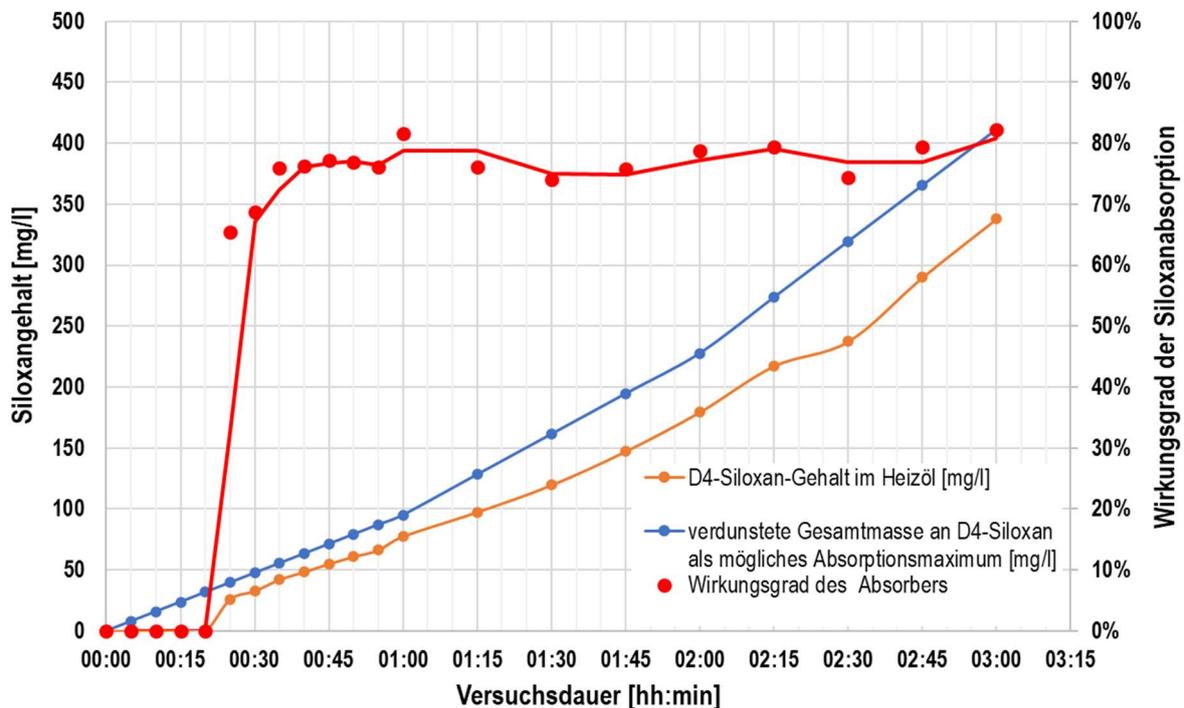


Abbildung 31: Verlauf der Siloxanabsorption im Heizöl des Gegenstromwäschers im Vergleich zu dem Luftstrom durch Verdampfung beigemischten Menge an Siloxan

Auf Basis dieser Ergebnisse und der zuvor abgeschätzten Siloxan-Jahresmittelwerte (vgl. Tabelle 4) lässt sich ein entsprechender Absorptionswäscher dimensionieren:

Für eine ausreichend hohe Entfernung der Siloxane auf einen Restgehalt von kleiner 0,05 % bedarf es bei oben bestimmtem Wirkungsgrad von 80 % mindestens fünf in Reihe geschalteter Absorptionsstufen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Reduktion des Siloxangehaltes in einem Luftstrom durch mehrstufige Absorption

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Wirkungsgrad	80 % von 100 %	80 % von 20 %	80 % von 4 %	80 % von 0,8 %	80 % von 0,16 %
absorbiert (gesamt)	80 %	16 %	3,2 %	0,64 %	0,13 %
Rest (gesamt)	20 %	4 %	0,8 %	0,16 %	0,03 %

Eine Stufe besteht dabei aus 21 quadratischen Röhren mit einer Seitenlänge, die dem Durchmesser des Versuchsabsorbers entspricht. Die gesamte Querschnittsfläche entspricht dann etwa dem 26-fachen des Versuchsabsorbers. Bei einem Verbrennungsluftvolumenstrom der μ GT von ca. 1.530 m³/h ergibt sich ein Luftvolumenstrom pro Röhre von ca. 60 m³/h (ähnlich dem des Versuchsabsorbers). Die 3 Meter hohen Absorberröhren fassen pro Stufe knapp 4 km PP-KEMAFIL®-Gewirke (Schlingseil). Mit einem 0,25 m

hohen Auffangbecken für das Heizöl und 0,25 m hohen Kanälen zur Luftein- bzw. -ausströmung beträgt die Gesamthöhe des Absorbersystems 3,75 m. Alle flüssigkeitsführenden Systeme wie Pumpen und Leitungen werden seitlich positioniert.

Abbildung 32 zeigt ein Absorbersystem mit drei in Reihe geschalteten Absorptionsstufen. Zur Gewährleistung der Luftführung (grün) werden Zwischenkanäle (rot) notwendig. Das 3-stufige Absorbersystem reduziert die Abluftbeladung mit dem Siloxantyp D4 von 100 % auf 0,8 %. Eine nahezu vollständige Reduzierung gelingt mit einem 5-stufigem Absorbersystem.

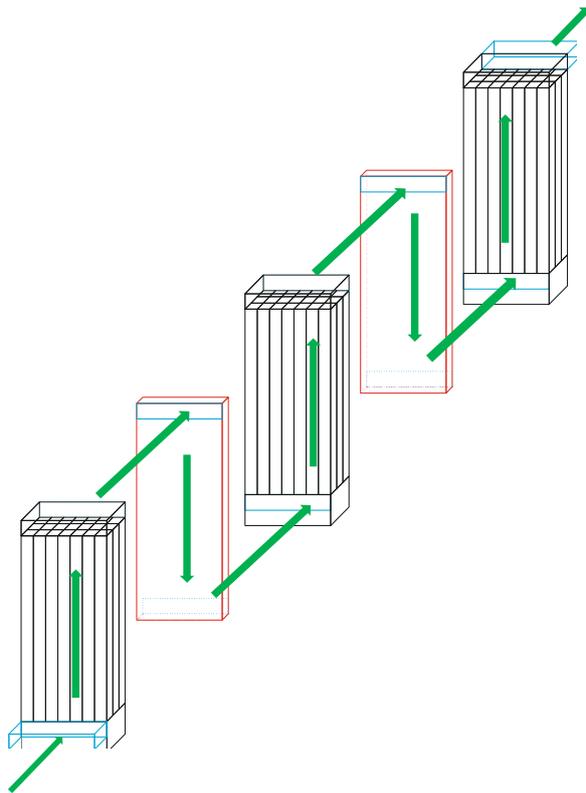


Abbildung 32: Schematische Darstellung eines mehrstufigen Absorbersystems zur Entfernung von Siloxanen durch Abluftwäsche

AP 9: Untersuchung des Einflusses der Gasturbine auf die Abgasnachbehandlung (RTO) und die dort auftretenden Energieverbräuche

Energetische Betrachtung am μ GT-Prüfstand bei VOWALON

Versuchsdurchführungen unter Zuführung lösemittelhaltiger Verbrennungsluft zeigten im Ergebnis eindeutig eine Reduzierung des Gasverbrauchs in der μ GT. Mit dem Einströmen der lösemittelhaltigen Verbrennungsluft drosselt die μ GT die Gaszufuhr, so dass die erzeugte elektrische Leistung konstant bleibt (Abbildung 33). Als problematisch erwies sich hier, dass plötzlich auftretende starke Änderungen der Feuerungswärmeleistung der Verbrennungsluft (verursacht durch Lösemittelspitzen, vgl. Abbildung 34) zum Abschalten der Turbine führten. Dem Problem kann verfahrenstechnisch einfach dadurch begegnet werden, dass der μ GT Ausgleichszonen vorgeschaltet werden, in denen eine Vergleichmäßigung der Lösemittelbeladung in der Verbrennungsluft (Peak-Glättung) stattfinden kann.

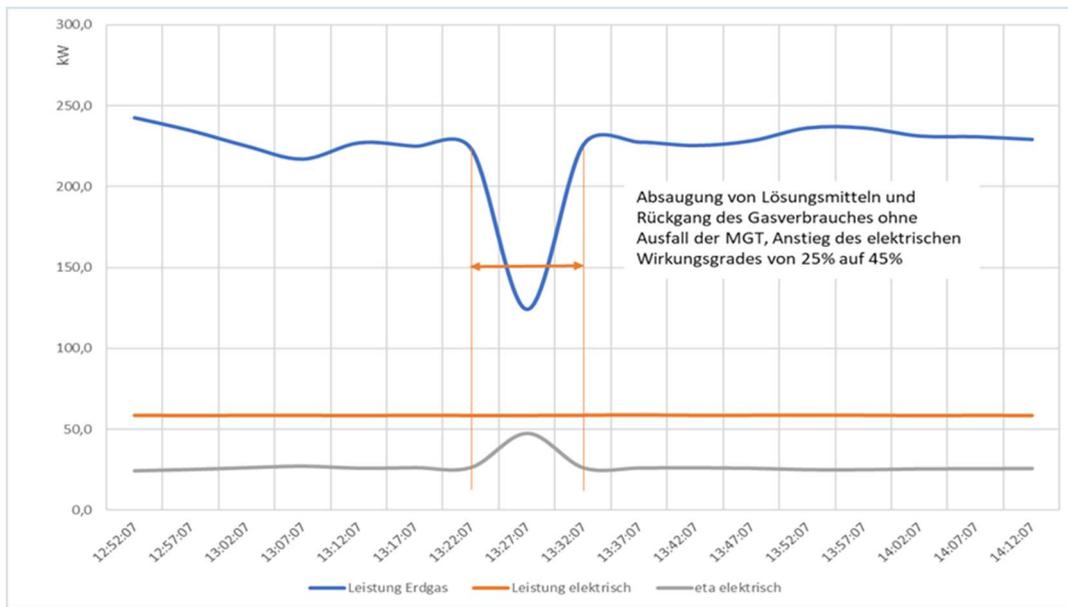


Abbildung 33: Einfluss lösemittelhaltiger Verbrennungsluft auf die Stromerzeugung und den Gasverbrauch (kurze Zeitintervalle zur Überprüfung der Regelung der μ GT)

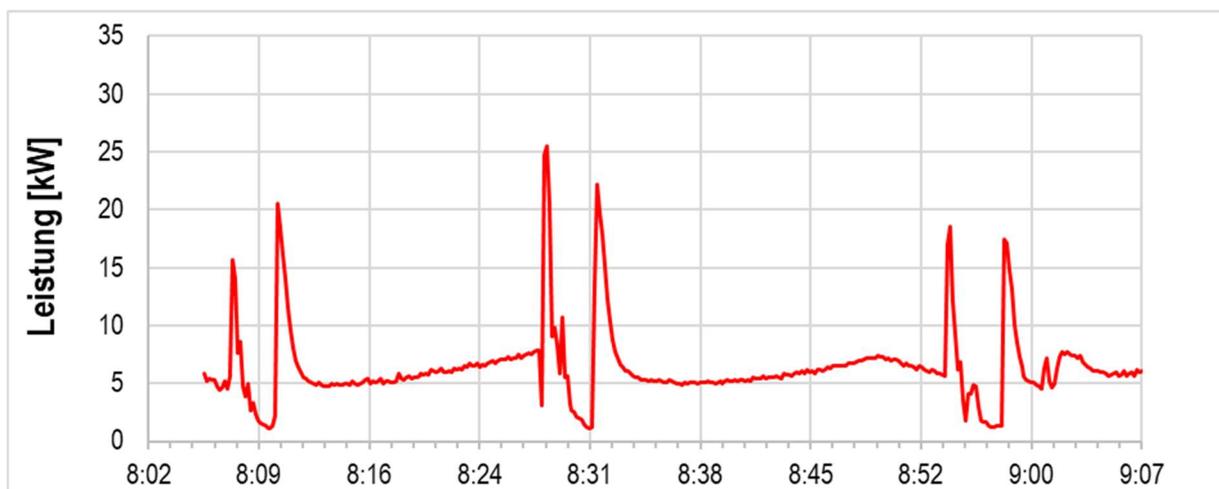


Abbildung 34: Gemessene Feuerungswärmeleistung des Lösungsmittels in der Zuluft der Gasturbine

Wird die in den Versuchen ermittelte Feuerungswärmeleistung und deren zeitlichen Verlauf zugrunde gelegt, sich eine mittlere Lösemittelfracht von etwa 0,47 kg/h (angegeben als Propan-Äquivalente), was bei einem mittleren Lösemittelheizwert von 13 kWh/kg zu einer mittleren Feuerungswärmeleistung von 6,15 kW führt. Damit sind im Mittel in der Mikrogasturbine Einsparungen an Brenngas von 2,5 % möglich (Tabelle 9)

Tabelle 9).

Tabelle 9: Einsparung von Brenngas in der μ GT durch Zuführung lösemittelhaltiger Verbrennungsluft

	ohne Lösemittel	mit Lösemittel	maximal mögliche Einsparung	mittlere mögliche Einsparung
elektrische Leistung (kW)	57	57	-	-
Gasverbrauchsspitze (kW)	225	125	- 45 %	- 2,5 %

Eine derartige Betriebsweise der μ GT hätte auf die nachfolgende Abluftreinigung durch regenerative thermische Oxidation (RTO) folgenden positiven Effekt:

Die RTO wird jährlich für ca. 5.500 Betriebsstunden (Bh) mit 400 kW_{Gas} betrieben (Tabelle 10). Durch die Abwärme der μ GT können von 400 kW_{Gas} etwa 90 kW_{Gas} ersetzt werden. Gleichzeitig stehen 50 kW_{el} für die Produktion zur Verfügung. Je nach Betriebsdauer der μ GT ergibt sich daraus eine Energieeinsparung.

Tabelle 10: Übersicht über den Gasverbrauch bei VOWALON für den Betrieb des Thermoölkessels und der RTO

Gasverbrauch 2017					5.500 Betriebsstunden/a		
					458 Betriebsstunden/Monat		
	Gasverbrauch Thermoölkessel (TÖ-Kessel)		Gasverbrauch RTO			Wärmeleistung TÖ-Kessel	Wärmeleistung RTO
	PLAN	IST	Plan	IST			
	[Nm ³]	[Nm ³]	[Nm ³]	[Nm ³]		[kW]	[kW]
Jan	185.000	185.935	19.000	18.808		4.057	410
Feb	168.000	166.204	21.000	18.540		3.626	405
Mär	146.000	171.272	20.000	19.852		3.737	433
Apr	141.000	117.039	22.000	12.581		2.554	274
Mai	136.000	126.543	21.000	21.326		2.761	465
Jun	152.000	127.959	27.000	23.619		2.792	515
Jul	100.000	81.007	24.000	15.589		1.767	340
Aug	104.000	102.020	21.000	16.677		2.226	364
Sep	154.000	146.000	19.000	22.208		3.185	485
Okt	161.000	143.471	23.000	15.670		3.130	342
Nov	181.000	165.471	21.000	22.630		3.610	494
Dez	150.000	123.218	20.000	12.900		2.688	281
Σ	1.778.000	1.656.139	258.000	220.400			

AP 10: Weiterentwicklung des Technologie- und Anlagenkonzeptes

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Folgende Ergebnisse konnten aus den vorangegangenen Versuchen für den Betrieb einer μ GT abgeleitet werden:

Temperatur

- Um die Temperatur der Abluft auf Werte von ca. 40°C zu bringen, können geschlossene Abluftwärmetauscher (AWT) verwendet werden.
- Um den Wärmeverlust bei der Abkühlung zu verringern, sollte eine Wärmerückführung (WRG) an geeigneter Stelle stattfinden.

Weichmacher

- Sind Weichmacher in der Verbrennungsluft enthalten (HOBA, Sammelleitung), können diese durch Vorschaltung eines geschlossenen Kühlers (AWT) auskondensiert werden.
- Um ein Auskondensieren von Weichmachern an kalten Teilen in der Turbine beim Anfahren zu vermeiden, sollte ein Nacherhitzer direkt vor die Mikrogasturbine platziert werden.

Siloxane

- Sind Siloxane in der der Mikrogasturbine zugeführten Verbrennungsluft vorhanden (UBA, Sammelleitung), sind diese durch einen zusätzlich vorgeschalteten Absorber soweit wie möglich zu entfernen. Zum Auswaschen von Siloxanen wurde als kohlenwasserstoffartiges Lösemittel Heizöl genutzt. Heizöl wurde gewählt, weil die Verflüchtigungsrate sehr gering ist und ein späteres Recycling möglich wäre, da die Lösemittel trotz Siloxan zur Wärmeerzeugung genutzt werden könnten. Allerdings sind kurzkettige Siloxane (L2, D3) durch einen Absorber nicht hinreichend entfernbar.
- Der Einsatz von „Aktiviertem Aluminiumoxid“ als Adsorbens fand in diesem Projekt aus Kostengründen nicht statt. Es besteht aber durchaus die Möglichkeit, dass sich mit diesem Material eine praktikable Lösung finden lässt.
- Der Einsatz von Polyethylenoxiden als Adsorbens fand in diesem Projekt aus fehlendem Hintergrundwissen hinsichtlich eines Recyclings nicht statt. Weiterhin kann der Einfluss einer so gereinigten Luft auf den Betrieb der Mikrogasturbine nicht eingeschätzt werden.
- Der Einsatz von Silikagel als Adsorbens fand in diesem Projekt ebenfalls aus Kostengründen nicht statt. Da bei Silikagel auch eine Regenerationsfähigkeit mit hoher Zyklanzahl vermutet wird, besteht aus unserer Sicht die beste Möglichkeit, eine praktikable sowie kostengünstige Lösung zu finden.

Lösemittel

- Lösemittel stellen kein Problem dar. Das Risiko einer Explosion ist nicht vorhanden, da zur Vermeidung dessen die Prozessluft entsprechend geregelt wird.

Im Ergebnis der durchgeführten Prozessanalysen und basierend auf den Resultaten der Untersuchungen an den verschiedenen Prüfständen und im Labor wurden die potenziell möglichen Einsatzorte 2 (UBA), 6 (LMA), 10 (Saake-Brenner), 11 (Gesamtabluft) und 12 (HOBA) ausgewählt und wie folgt bewertet.

Einsatzort 2 (Einbau einer μ GT in UBA-ABL-Bypasskanal)

Da an der UBA lösemittel- und siloxanbelastete Abluft mit hoher Temperatur vorhanden ist, müssten vor der Mikrogasturbine eine Wärmerückgewinnung (Abkühlung), ein Nachkühler sowie ein Absorptionswäscher in Reihe verschaltet werden (Abbildung 35).

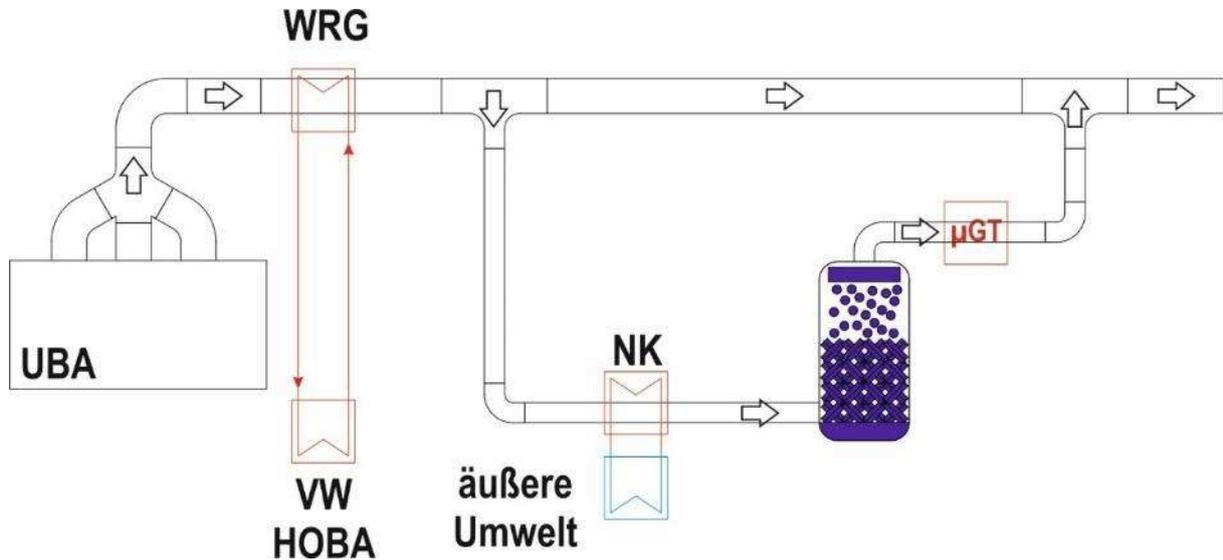


Abbildung 35: Prinzip der ABL-Führung aus der UBA mit AWT und Absorptionswäscher

Da an der UBA ein großer Anteil kurzketziger Siloxane (L2, D3) vorhanden ist, reicht der getestete Absorptionswäscher nicht aus. Das System könnte künftig durch einen Feststoffabsorber erweitert werden (Abbildung 36). Dieses Konzept wurde hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit nicht weiter betrachtet.

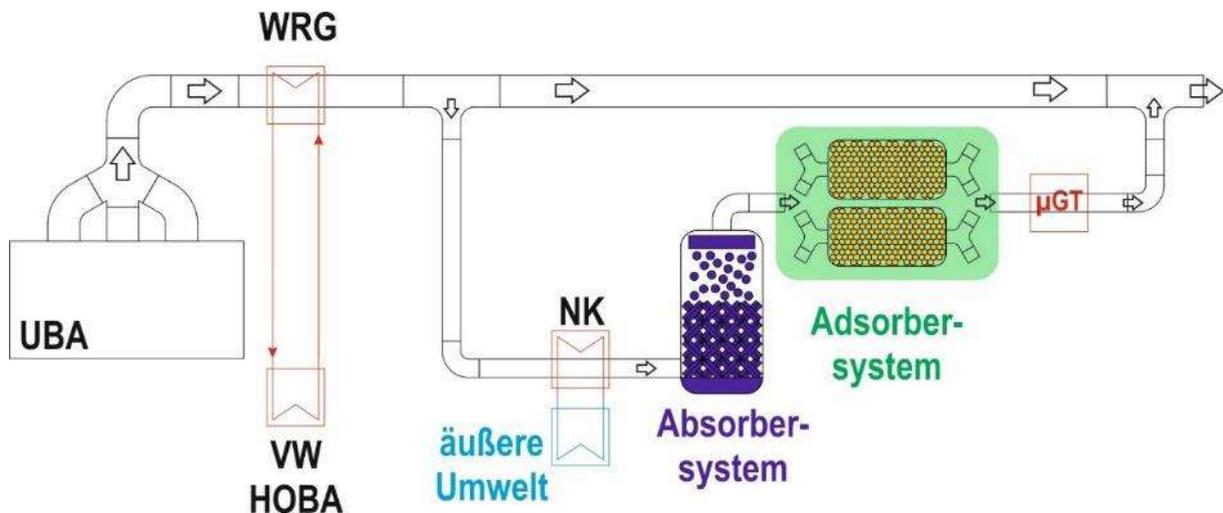


Abbildung 36: Prinzip der ABL-Führung aus der UBA mit AWTs, Absorptionswäscher und Feststoffabsorber

Einsatzort 6 (Einbau einer μ GT im LMA, Abgaseinspeisung direkt in ABL-Kanal)

Am Einsatzort 6 wurde im Projektverlauf eine Mikrogasturbine aufgestellt und bis zum Projektende betrieben. Die zugeführte Verbrennungsluft wurde direkt aus dem Lösemittelanmischraum angesaugt. Je nach Produktion waren entsprechende Lösemittelanteile enthalten. Die Abgase der Mikrogasturbine wurden der Gesamtabluft direkt in den Hauptkanal vor der RTO zugeführt.

Ein vereinfachtes Schema der Einbindung der μ GT in den Abluftstrom ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

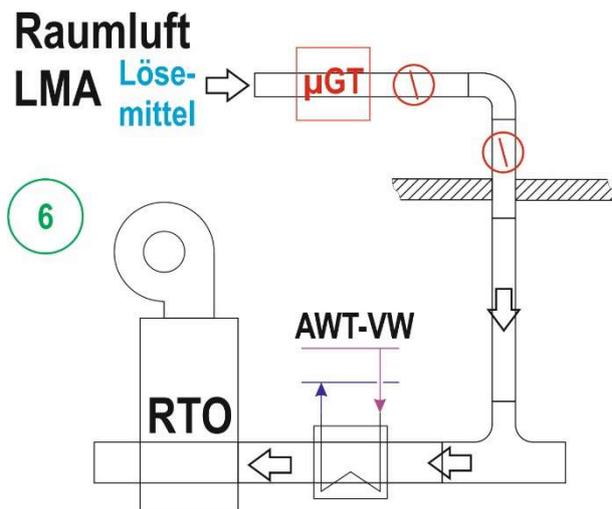


Abbildung 37: Prinzip der bestehenden Einbindung der Mikrogasturbine bei VOWALON

Die aus dem LMA abgesaugte Luft enthielt/enthält weder Siloxane noch Weichmacher. Die Ablufttemperatur gleicht der Temperatur normaler Raumluf. Somit waren/sind keinerlei Abluftwärmeübertrager notwendig.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Betrieb Mikrogasturbine an diesem Standort basiert auf folgenden Parametern:

- Investitionskosten: 124.200 €
(beinhalten Mikrogasturbine, Verdichter, Kanal und sämtliche Anschlüsse),
- elektrische Leistung der Mikrogasturbine: 50 kW,
- thermische Leistung der Mikrogasturbine: 110 kW,
- Feuerungsleistung der Mikrogasturbine: 218 kW,
- angesetzter Elektroenergiepreis: 22 Ct/kWh,
- angesetzter Gaspreis: 5 ct/kWh,
- Laufzeit der Produktion (Beschichtung) und somit auch der Mikrogasturbine: 6.000 h/a,
- EEG-Umlage,
- Wartungskosten: 1,00 €/Bh,
- KWK Bonus: 8 ct/kWh bei Eigennutzung.

Eine über 10 Jahre berechnete Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Mikrogasturbine zeigt Abbildung 38.



Abbildung 38: Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Mikrogasturbine

Einsatzort 10 (VBL-Vorwärmung direkt in Heizkessel mittels Saacke-Brenner)

Eine Besonderheit der Mikrogasturbine ist, dass deren Abgas einen relativ hohen Sauerstoffgehalt aufweist. Dies ermöglicht es, das Abgas direkt als Verbrennungsluft zu nutzen und so einen Teil der Verbrennungsenergie, welcher diese Luft und speziell den inerten Stickstoffanteil mit aufheizt, einzusparen. Da das Abgas aber eben diese hohe Temperatur besitzt, ist für die Nutzung am Thermoölkessel ein spezieller Brenner der Firma Saake notwendig.

Schon in der Vorplanung, welche die Firma VOWALON übernahm, konnte festgestellt werden, dass die Investitionskosten, sowohl für den Brenner als auch für bauliche Maßnahmen, einen zumutbaren Rahmen sprengen würden. Somit wurde der Einsatz eines Saake-Brenners verworfen.

Einsatzort 11 (Einbau einer μ GT in Gesamt-ABL-Bypasskanal mit WRG)

Da sich auch im Sammelkanal die lösemittel- und siloxanbelastete Abluft der UBA mit hoher Temperatur findet, müssten vor einer Mikrogasturbine an dieser Stelle ebenfalls eine Wärmerückgewinnung, ein Nachkühler, ein Absorptionswäscher sowie künftig ein Feststoffabsorber in Reihe verschaltet werden. Dieses Konzept wurde im Rahmen dieses Vorhabens hinsichtlich Wirtschaftlichkeit nicht weiter betrachtet.

Einsatzort 12 (Einbau einer μ GT in HOBA-ABL-Kanal mit vorgelagertem Kühler)

An der HOBA weist die Abluft zwar auch eine hohe Temperatur auf, ist aber nur mit Weichmachern belastet. Dadurch ergibt sich hier die Möglichkeit, mit einer Reihenschaltung von Wärmerückgewinnung,

Nachkühler sowie einem Nacherhitzer den Betrieb einer Mikrogasturbine problemlos zu realisieren (Abbildung 39).

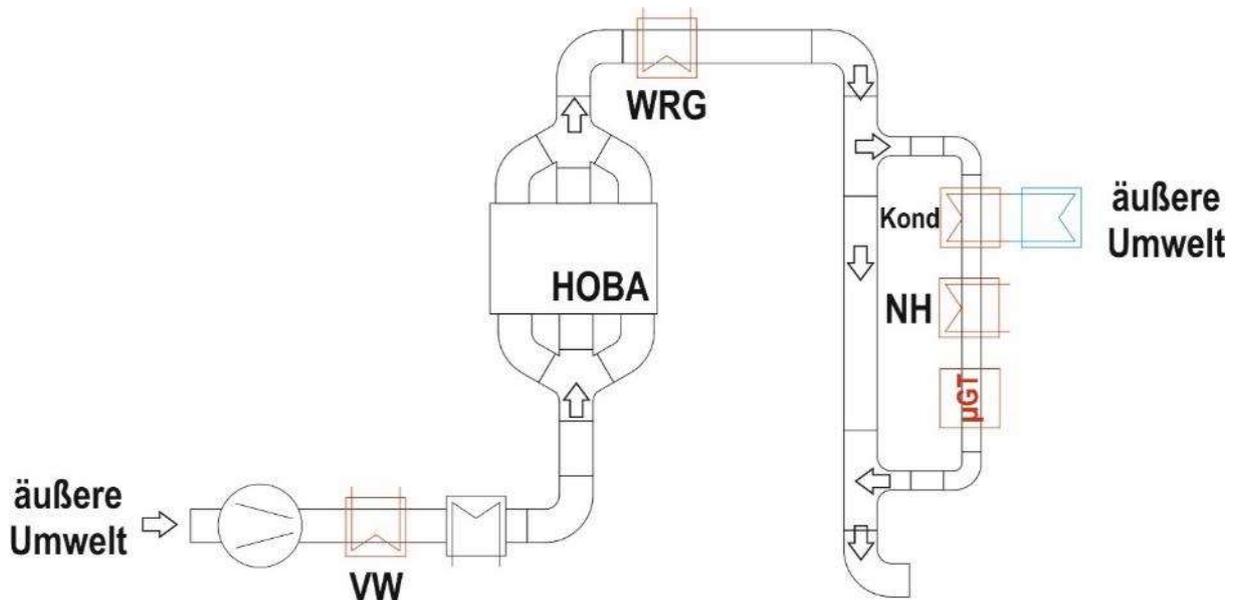


Abbildung 39: Prinzip der ABL-Führung aus der HOBA mit AWT

Wärmerückgewinnung

Die Wärmerückgewinnung hat die Funktion, den Wärmeverlust zu verringern. Die entzogene Wärme aus der Abluft der HOBA wird zur Vorwärmung der Prozessluft genutzt. Speziell bei der HOBA kann die Wärmerückgewinnung ohne zusätzlichen Pufferspeicher auskommen.

Da in einer RTO ebenfalls eine Wärmerückgewinnung stattfindet, kann es an dieser Stelle zur Beeinflussung des Energieverbrauches kommen. Bei einer zu klein ausgeführten RTO können sich der Energieverbrauch und die Abgastemperaturen erhöhen. Eine zusätzliche Wärmerückgewinnung hinter der zu kleinen RTO würde dann sinnvoll werden.

In der Regel ist eine RTO, so wie auch bei VOWALON, so groß konzipiert, so dass sich positive Effekte einstellen können. Die Abgastemperaturen sinken und mit ihnen auch die Energieverluste.

Die hier der Abluft entzogene und der Zuluft wieder zugeführte Wärme bleiben in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unbeachtet.

Kondensator

Der Kondensator hat die Funktion, Weichmacher aus der Abluft zu entfernen.

Je weiter die Ablufttemperaturen gesenkt werden, umso mehr Weichmacher können aus der Abluft entfernt werden. Da dies ganz gezielt an einer Stelle, dem Kondensator, stattfindet, kann der Aufwand für die Entsorgung sehr stark vereinfacht werden.

Es ist darauf zu achten, dass der Kondensator mit entsprechenden Lamellenabständen ausgeführt wird. Das Konzept sieht bei VOWALON vor, dass der Kondensator über den vorhandenen Kühlteich bedient wird.

Die hier der Abluft entzogene Wärme stellt einen Wärmeverlust dar.

Nacherhitzer

Der Nacherhitzer hat die Funktion, die Dampfdrucktemperaturen der Weichmacher zu erhöhen, um so ein Auskondensieren an kalten Bauteilen der Mikrogastrurbine zum Zeitpunkt der Startphase zu vermeiden.

Die hier der Abluft zugeführte Wärme stellt einen Wärmegewinn dar.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Ermittlung der Energiemengen und zur Dimensionierung der Systeme zur Abluftkonditionierung wurden Simulationen durchgeführt. Dabei wurde in den Simulationen neben Wasser als Wärmeträgermedium auch Thermoöl gerechnet.

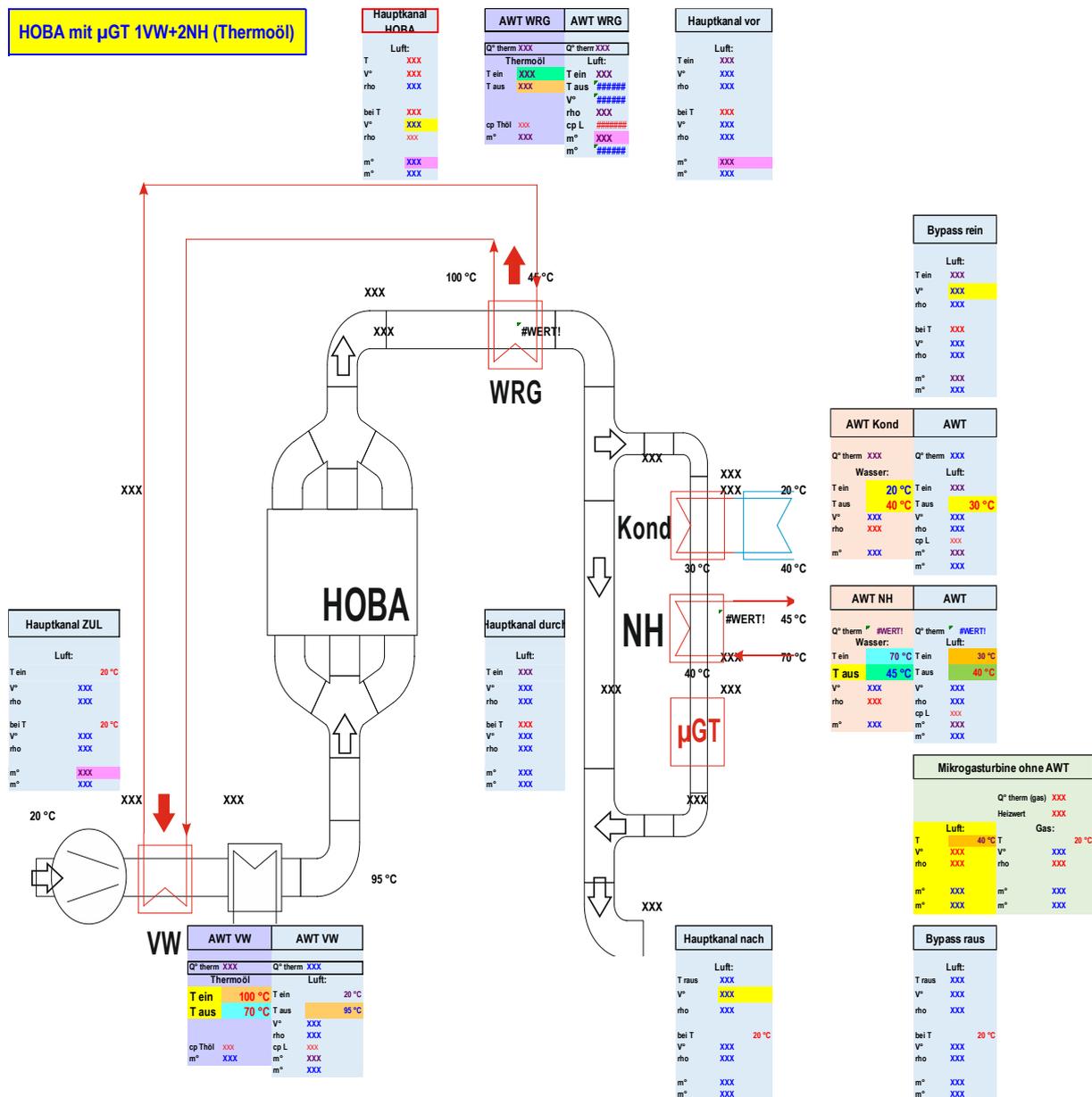


Abbildung 40: Eine beispielhafte Simulation des Systems zur Abluftkonditionierung an der HOBA (Werte zur Wahrung von betrieblichen Interessen kenntlich gemacht)

Somit konnte für dieses Konzept die Wirtschaftlichkeit einer zusätzlichen Mikrogasturbine an der HOBA mit folgenden Parametern geschätzt werden:

- zusätzliche Investitionskosten: 167.000 € für eine 2. MGT an der HOBA bei VOWALON
(Investitionskosten 216.500 € für eine separate MGT an der HOBA),
- ab- und wieder zugeführte Wärme durch Wärmerückgewinnung: ca. 150 kW
(Abkühlung der Ablufttemperatur der HOBA durch die Wärmerückgewinnung von 180 °C auf 140 °C),
- abgeführte Wärme durch den Kondensator: ca. 55 kW
(Abkühlung der Ablufttemperatur durch den Kondensator von 140 °C auf 30 °C),
- wieder zugeführte Wärme durch den Nacherhitzer: ca. 5 kW
(Erwärmung der Ablufttemperatur durch den Nacherhitzer von 30 °C auf 40 °C),
- elektrische Leistung der Mikrogasturbine: ca. 50 kW
(Verdichter schon beachtet -> höhere Feuerungsleistung),
- thermische Leistung der Mikrogasturbine: ca. 110 kW
(durch die Abluftkonditionierung reduziert sich die nutzbare thermische Leistung auf ca. 60 kW),
- Feuerungsleistung der Mikrogasturbine: ca. 190 kW,
- angesetzter Elektroenergiepreis: 22 ct/kWh,
- angesetzter Gaspreis: 5 ct/kWh,
- Jahresnutzungsgrad des Thermoölkessels: ca. 0,6,
- somit angesetzte Wärmegestehungskosten von ca. 8,3 ct/kWh,
- Laufzeit der HOBA und somit auch der Mikrogasturbine: 6.000 h/a,
- EEG-Umlage (2022): 3,7 ct/kWh,
- somit angesetzter Preis für Elektroenergieeinsparung: 18,3 ct/kWh,
- angesetzte Wartungskosten: 2 ct/Bh,
- KWK Bonus: 8 Ct/kWh bei Eigennutzung für 3.500h/a.

Es werden somit etwa 300.000 kWh/a Elektroenergie und 360.000 kWh/a eingespart. Der Erdgasverbrauch beträgt ca. 1.140.000 kWh jährlich.

Mit den angesetzten Preisen ergeben sich für die Einsparung an Elektroenergie ca. 54.900 €/a und für die Einsparung an ersetzter Wärme aus dem Thermoölkessel ca. 30.000 €/a. Die Kosten für Erdgas betragen ca. 57.000 €/a und die Wartungskosten ca. 12.000 €/a. Zusätzlich erfolgt eine KWK-Bonus-Gutschrift über 14.000 €/a. Somit werden jährlich etwa 30.000 € eingespart.

Die Amortisation dieser Maßnahme beträgt etwa 5,5 Jahre.

AP 11: Entwicklung eines Konzeptes zur Verallgemeinerung und Übertragung der Projektergebnisse auf andere Branchen und Prozesse

Der Einsatz von Gasturbinen zur Nutzung von lösemittelhaltigen Abluftströmen ist in allen Branchen möglich, wo derartige Abluftströme in relevanten Mengen anfallen. Eine Energieeinsparung durch die Lösungsmittel wurde nachgewiesen.

Weichmacher

Weichmacher in der Verbrennungsluft von Mikrogasturbinen stellen prinzipiell kein Problem dar. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass es nicht zu einer Abkühlung unter die Kondensationstemperatur der Weichmacher kommt. Dies kann insbesondere an kalten Turbinenteilen oder bei Vermischung mit kalter Verbrennungsluft passieren. Bei der im vorliegenden Projekt genutzten Gasturbine der Firma Fa. Capstone Green Energy Corporation, Van Nuys/USA, muss die Abluft aus der Produktion allerdings auf 40 °C abgekühlt werden, um sie in der Gasturbine nutzen zu können. Dabei kommt es zwangsläufig zur Auskondensation von Weichmachern. Um dies zuverlässig zu vermeiden, können, wie in vorhergehenden Abschnitten dargestellt, die Weichmacher aus der Verbrennungsluft auskondensiert werden. Um möglichst wenig thermische Energie zu verlieren, ist dabei mit einer Wärmerückgewinnung zu arbeiten. Im Falle der Auskondensation der Weichmacher können diese (u. U. mit einer geringfügigen Aufbereitung) wieder in der Produktion eingesetzt werden.

Siloxane

Siloxane stellen für den zuverlässigen Betrieb einer Gasturbine ein Problem dar. Technische Lösungen für die Abscheidung von Siloxanen sind vorhanden. Allerdings hat sich gezeigt, dass eine wirtschaftliche Abscheidung mit einem Heizölwäscher nur für längerkettige Siloxane > D3 zuverlässig möglich ist. Sollten nur derartige Siloxane in Produktionsprozessen anfallen, ist die Entfernung möglich. Andere Verfahren funktionieren nur unzureichend bzw. sind aufgrund der hohen Betriebskosten nicht wirtschaftlich einzusetzen.

Ablufttemperatur/Verbrennungslufttemperatur

Die anfangs in Betracht gezogene Nutzung heißer Abluft als Verbrennungsluft war mit der von der Firma Capstone Green Energy Corporation, Van Nuys/USA genutzten Gasturbine nicht möglich. Aufgrund des technischen Aufbaus sind Verbrennungslufttemperaturen von > 40 °C nicht umsetzbar, da der Rekuperator dann nicht mehr ausreichend arbeiten und in der Turbine die Luftlager und der Generator überhitzen können. Dies würde zwangsläufig zum Ausfall der Turbine führen.

Zukünftige Entwicklungsschritte

Ein Ausbau des Rekuperators war nicht möglich. Nach Rücksprache erscheint es aber umsetzbar (wenngleich ein sehr großer technischer Aufwand), durch eine Neuberechnung und Neukonstruktion der Lager den Betrieb mit Verbrennungslufttemperaturen > 40 °C zu ermöglichen. Der ebenfalls davon beeinflusste Generator müsste entweder mit separater kalter Luft gekühlt oder, wie schon bei BHKW eingesetzt, mit einem wassergekühlten Generator ausgestattet werden.

Eine derartige Weiterentwicklung wäre wünschenswert, um die Einsatzmöglichkeiten von Mikrogasturbinen zu erweitern.

AP 12: Projektauswertung, Dokumentation

Im Rahmen des Projektes wurden eine Reihe von Prüfständen aufgebaut und erfolgreich Versuchsreihen zur Ermittlung wichtiger Einflussgrößen auf den wirtschaftlichen Betrieb einer μ GT durchgeführt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Übersicht über die im Projekt realisierten Prüfstände

Prüfstand	Art bzw. Ziel Versuchsdurchführung
Mikrogasturbinen-Laborprüfstand (efa, Leipzig)	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss von Weichmacher auf den Betrieb • Einfluss von Siloxanen auf den Betrieb
Mikrogasturbinen-Prüfstand (VOWALON, Treuen)	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss von Lösemittel auf den Betrieb • Dauerversuch Gaseinsparung
Beschichtung-Laborprüfstand (LABA bei VOWALON, Treuen)	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung Produktionsparameter für HOBA • Ermittlung Produktionsparameter für UBA • Test Kondensatorsystem + WRG-System • Test Wäschersystem
Wäscher-Prüfstand (VOWALON, Treuen)	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung Luftkonditionierungsparameter
Absorber-Prüfstand (STFI, Chemnitz)	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung Luftkonditionierungsparameter
Laborversuche (STFI, Chemnitz)	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung Absorptionsparameter verschiedener Stoffe

Nach Auswertung aller Ergebnisse kann folgendes zusammengefasst werden:

1. Lösungen im Allgemeinen:

- Weichmacher und Lösemittel in der Abluft sind händelbar.
- Hohe Temperaturen der Abluft sind händelbar.
- Siloxane bleiben ein Problem.
- Die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung mit einer μ GT ist bei dezentralem Einsatz möglich und sinnvoll.
- Eine Erhöhung der Energieeffizienz ist in dem Moment gegeben, in dem Erdgas und Lösemittel zur Erzeugung von Elektroenergie genutzt werden und die Abwärme vollständig genutzt wird.

2. Konkrete Lösungen

- An der HOBA können Weichmacher aus der Abluft problemlos auskondensiert werden. Zum Erhalt der Wirtschaftlichkeit dient eine WRG.
- Die Lösemittel in der Abluft des Lösemittelanmischraumes können problemlos genutzt werden.
- An der UBA können, mit Hilfe eines Mineralöl-Absorbers, Siloxane teilweise aus der Abluft entfernt werden. Kurzkettige Siloxane in der Abluft stellen dabei weiterhin ein Problem dar und verkürzen bei Nutzung der Abluft in einer μ GT deren Wartungsintervalle.
- Die Entwicklung eines Silikagel-Adsorbers wurde zugunsten eines Mineralöl-Absorbers zurückgestellt. In Vorversuchen war eine Regeneration des beladenen Silikagels ineffektiv bzw. fehlerhaft. Jedoch ist im Gegensatz zu einem Mineralöl-Absorber eine rückstandsfreie Entfernung von Siloxanen möglich. Eine thermische Regeneration des Mineralöls (Verdampfung niedrig siedender Komponenten (inkl. Siloxane)) ist möglich, aber aufwendig und birgt eine hohe Explosionsgefahr,

weshalb diese Maßnahme nicht ratsam ist. Das beladene Mineralöl soll deshalb in einem Heizkessel thermisch verwertet werden.

3. Siloxanmessung mittels modifizierten IMS:

- Der Betrieb von Ab- bzw. Adsorbern ist für die einzelnen Siloxane verschieden wirksam. Somit muss die Messung der Siloxane in der Abluft spektral erfolgen.
- Zwar kann man mit einem IMS gut die einzelnen Siloxananteile in Luft erfassen, allerdings erfordert das Vorhandensein von Lösemitteln eine Vorbehandlung der Messprobe (Erweiterung des IMS um eine GC-Vortrennung). Ein derart modifiziertes Gerät wäre neben dem Einsatz in der Textilindustrie auch in anderen Bereichen (Biogasproduktion) nützlich.

4. Siloxanentfernung mittels Silikagel-Adsorber

- Durch die Messung mit einer speziell angefertigten Grundpaste konnten die einzelnen Siloxan-Anteile erfasst werden. Es wurde festgestellt, dass sehr viele kurzkettige Siloxane vorhanden waren. Hierfür wäre ein Silikagel-Adsorber deutlich besser geeignet als ein Mineralöl-Absorber.
- Eine effektive Regeneration des Silikagels ist unter bestimmten Umständen möglich. Somit würde solch ein Silikagel-Adsorber nicht nur eine Alternative darstellen, sondern auch ein von Grund auf besseres System als ein Mineralöl-Absorber.
- Silikagel adsorbiert neben Siloxanen auch in der Abluft enthaltene Feuchte und Lösemittel. Versuche zeigten, dass die Adsorptionskapazität des Silikagels für Siloxane bei gleichzeitig vorhandenem Lösemittel stark reduziert ist. Bei der Konzeptionierung eines Adsorbersystems muss dieser Umstand unbedingt beachtet werden.

7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In den Verwendungsnachweisen wurden folgende wichtige Positionen abgerechnet:

STFI	PLAN	IST
Pos. 0812 wissenschaftlicher Mitarbeiter E13	87.196 €	102.284 €
Pos. 0817 wissenschaftlicher Mitarbeiter E11	92.969 €	79.570 €
Pos. 0843 Pauschale Allg. Ausgaben	18.015 €	18.185 €
Pos. 0846 Dienstreisen	1.501 €	122 €
Die Differenzen in den Pos. 0812 und 0817 entstanden durch den Wechsel in der Einstufung bei den Entgeltgruppen E11 / E13. Bis auf die Dienstreisen, bedingt durch die Corona-Pandemie stark eingeschränkte Kontaktmöglichkeiten, wurden alle Positionen planmäßig abgerechnet.		

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die Ausgaben und der Aufwand für die Erarbeitung der Projektergebnisse waren notwendig und stehen in einem zur Antragstellung angemessenen Verhältnis.

Die Struktur in der Textil- und Bekleidungsindustrie ist vorwiegend durch klein- und mittelständische Unternehmen geprägt. Das Ziel des Projektes, die Einbindung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in Produktionsprozessen mit lösemittelhaltigen Abluftströmen zur Erhöhung der Energieeffizienz stellte für alle Beteiligten ein erhebliches wirtschaftliches Risiko dar und wäre für keinen der Partner ohne Förderung erfolgreich zu bewältigen gewesen. So waren die für das Projekt notwendigen Entwicklungsarbeiten und Versuchsreihen im laufenden Betrieb nicht ohne Gefährdung der wirtschaftlichen Sicherheit der Unternehmen möglich.

Im Gegensatz zu reinen Demonstrationsprojekten bestanden bei dem im Projekt verfolgten Lösungsansatz eine Reihe erheblicher technischer Risiken, die untersucht und gelöst werden mussten. Ungeklärt war, ob die brennbaren Bestandteile der Abluft aus der Beschichtung textiler Warenbahnen (Lösungsmittel, Weichmacher, Staub, Fasern ...) als Brennstoff für die Mikrogasturbine nutzbar sind. Da die Abluftbestandteile und die Veränderungen in der Gaszusammensetzung anfangs nicht konkret bekannt waren, mussten diese im Rahmen des Projektes genau analysiert werden. Da bekannt war, dass Silikon (als möglicher Bestandteil von Textilhilfsmitteln oder Beschichtungsformulierungen) bei der Verbrennung amorphes SiO_2 bildet und sich ablagern kann, waren Beeinträchtigungen und Schäden im Verdichter oder Heißgasteil der Mikrogasturbine möglich. Ob und in welchem Umfang das geschieht, musste in Versuchen ermittelt werden. Für den Fall, dass sich die Ablagerungen als schädlich erweisen, bestand ein ursprünglicher Lösungsansatz darin, eine Aufspaltung von Verbrennungsluftvolumenstrom und Kühlluftvolumenstrom in der Gasturbine zu realisieren. Im Verlauf des Vorhabens hat sich dann gezeigt, dass dieser Lösungsansatz mit umfangreichen Veränderungen am μGT -Anlagenkonzept verbunden gewesen wäre, die sich nicht umsetzen ließen.

Ein weiterer Risikofaktor bestand in der vorhandenen hohen Ablufttemperatur. Es war geplant, diese durch Realisierung der im Projekt geplanten technischen Maßnahmen deutlich abzusenken. Jedoch konnten mögliche negative Auswirkungen auf die Abgasqualität (Kondensation ...) im Vorfeld nicht gesichert beurteilt werden. Mit der Durchführung des Projektes war dies jedoch möglich, und die erarbeitete Lösung stellt nun eine Beispiellösung für ähnliche Anlagen und Prozesse dar.

Die Antragsteller gingen mit ihrem damaligen Wissensstand von einer erfolgreichen Durchführung des Projektes aus. Da mit dem Projekt technisches Neuland betreten wurde, war jedoch ein Risiko zum erfolgreichen Projektabschluss vorhanden, welches durch die Einbindung der Kompetenzen aller beteiligten Projektpartner auf ein Minimum begrenzt werden konnte.

9. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Energiekosten in der Textilindustrie

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Energiekostenanteil am Gesamtumsatz bei den Unternehmen in der Branche der Textil- und Bekleidungsindustrie erhöht, so dass er insbesondere in Textilveredelungsunternehmen von gegenwärtig durchschnittlich 10 % in naher Zukunft bei einem Drittel liegen wird (Abbildung 41). Bei einigen Veredlungsbetrieben sind es heute schon 25 %.

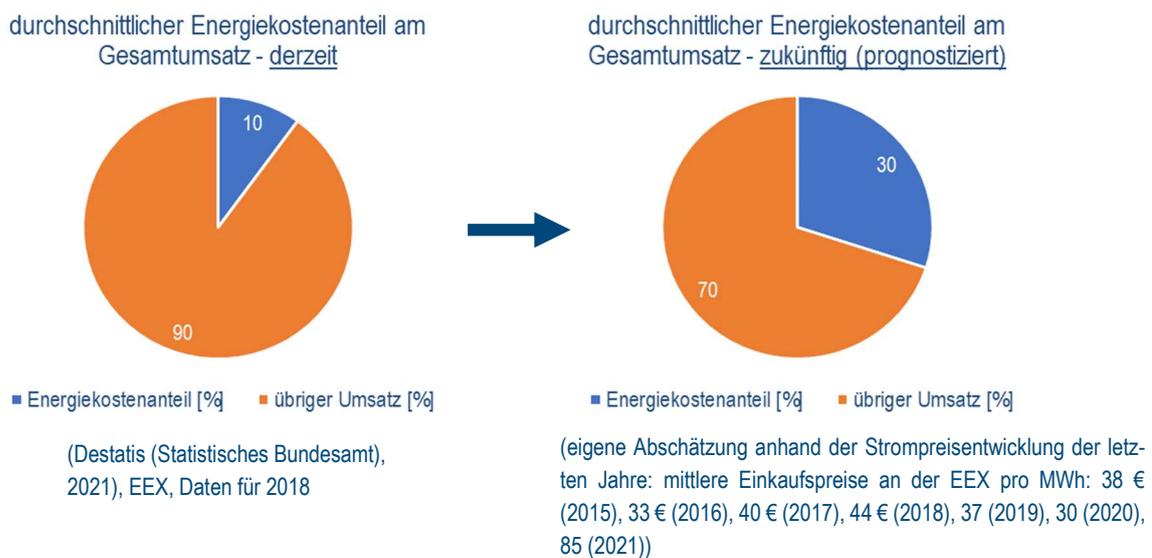


Abbildung 41: Steigender Energiekostenanteil in der Textil- und Bekleidungsindustrie über die letzten Jahre

In Deutschland gibt es ca. 500 Unternehmen, vorrangig aus der Textilindustrie, bei denen Beschichtungen und Oberflächenveredelungen durchgeführt werden. In einer großen Anzahl dieser Betriebe fallen lösemittelhaltige Abluftmengen an, die mit hohem Energieaufwand gereinigt werden müssen. Die gereinigte Abluft gelangt mit Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C in die Atmosphäre und stellt damit einen hohen, meist nicht nutzbaren Energieverlust dar. Daraus leiten sich ökonomisch interessante Konzepte des Wärmemanagements – der sogenannten Wärmewende – ab.

Das Ziel des Vorhabens bestand deshalb darin, eine verallgemeinerungsfähige Beispiellösung für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung zur Erhöhung der Energieeffizienz für Unternehmen zu erarbeiten, die zum einen über belastete Abluftströme verfügen und zum anderen sowohl durch einen hohen Energiebedarf für die Abluftreinigung als auch durch energieintensive Produktionsprozesse (Veredelung, Beschichtung, Trocknung) gekennzeichnet sind. Dabei sollte als Prämisse gelten, dass notwendige Eingriffe in bestehende Anlagen mit einem für die Betreiber vertretbaren Risiko verbunden sind. Nur so war es möglich, ein Konzept zu entwickeln, welches universell und in existierende Produktionsanlagen bzw. Systeme integrierbar ist, so dass trotz der vorzunehmenden anlagen- und steuerungstechnischen Eingriffe eine hohe Produktionssicherheit gewährleistet werden kann.

Konkret wurde dies am Beispiel der Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in einer Mikrogasturbine (μ GT) untersucht, welches durch Realisierung des Prinzips der Wärme-Kraft-Kopplung eine deutliche Erhöhung der Energieeffizienz bietet, wenn die dabei entstehende Wärme für eine weiterführende Abgasnachbehandlung (hier: regenerative thermische Oxidation - RTO) oder auch für Produktionsprozesse genutzt wird.

Voraussichtlicher Nutzen der Beispiellösungen

In vielen Fällen – wie auch in dem speziellen Fall bei der Firma VOWALON – ist es technisch nicht möglich, die Mikrogasturbine als Ersatz für eine thermische Abluftreinigung einzusetzen. Gründe dafür sind hohe und stark schwankende Abluftmengen sowie die gesetzliche Notwendigkeit der Emissionsminderung, insbesondere von organisch gebundenem Kohlenstoff.

Die im Vorhaben entwickelten Beispiellösungen sehen deshalb vor,

- einen Teil der nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen anfallenden Abluft als Verbrennungsluft einer μ GT zuzuführen und die produzierte Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO zu nutzen (auch möglich: anteilige Vorwärmung der Trocknungsluft für die Beschichtung) (Abbildung 42, Abbildung 43) bzw.
- die Abluft aus der Lösemittelanmischung vollständig als Verbrennungsluft einer μ GT zuzuführen und die produzierte Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO zu nutzen (Abbildung 44).

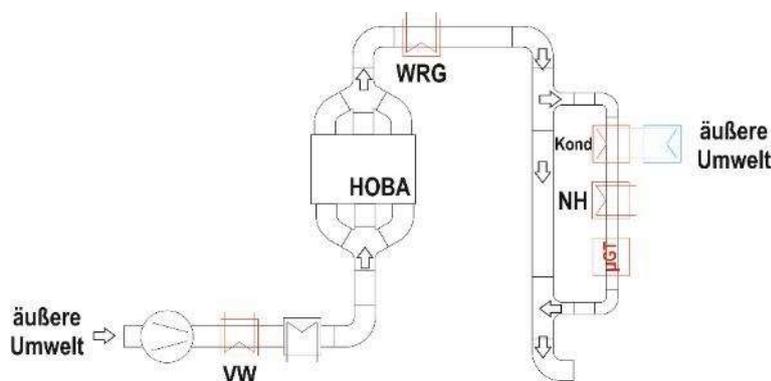


Abbildung 42: Nutzung der Abluft nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO

Zu Abbildung 42: Weichmacher kondensieren im Zuge der ohnehin für die Zuführung an die μ GT erforderlichen Abluftkonditionierung gut aus, weshalb für diesen Zweck bei der PVC-Beschichtung (HOBA: Beladung mit Weichmachern) ausschließlich geschlossene Kühler bzw. Erhitzer zum Einsatz kommen sollen. Der Vorteil gegenüber einem Wäscher besteht darin, das Kondensat (Weichmacher) besser abführen und einfacher entsorgen bzw. verwerten zu können. Durch ein erneutes leichtes Aufheizen (NH) der für die Weichmacherkondensation abgekühlten Abluft lässt sich eine Störung des μ GT-Betriebes durch in der Abluft verbleibende Weichmacher vermeiden. Die konstruktive Lösung sieht deshalb drei in Reihe verschalteter Abluftwärmetauscher mit verschiedenen Temperaturstufen vor. In der 1. Stufe erfolgt die Wärmerückgewinnung (WRG), in der 2. Stufe die Kühlung der Abluft auf ca. 10 °C (Kondensation) und in der 3. Stufe eine Wiederaufwärmung der Abluft auf ca. 30 °C (NH). Hierbei wird der Weichmacheranteil auf ca. 40 % gesenkt, unabhängig, ob Haftstrich oder Schaumstrich aufgetragen wird.

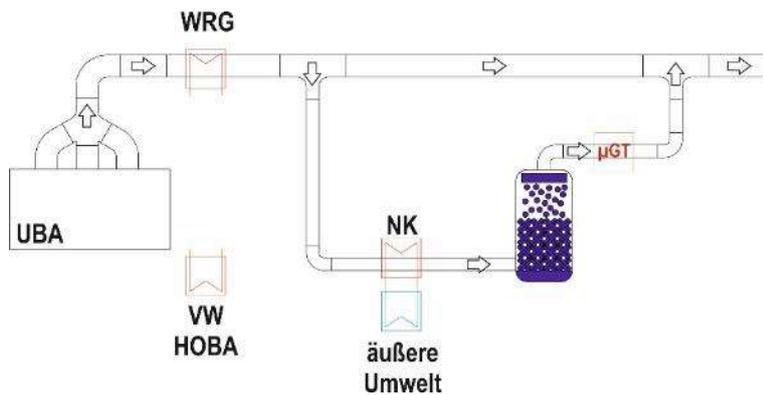


Abbildung 43: Nutzung siloxanhaltiger Abluft nach Beschichtungs- und Trocknungsvorgängen als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO

Zu Abbildung 43: Zur Konditionierung der Abluft bei der PUR-Beschichtung (UBA: Beladung mit Lösemitteln und Siloxanen [rezepturabhängig, große Konzentrationsschwankungen]) sollen die ersten beiden Stufen analog zur Beladung mit Weichmachern über geschlossene Kühler realisiert werden. Die 3. Stufe wird hierbei als „Absorptionswäscher“ ausgeführt. In der 1. Stufe erfolgt die Wärmerückgewinnung (WRG), in der 2. Stufe die Kühlung der Abluft auf ca. 10 °C (NK) und in der 3. Stufe eine Absorption der Siloxane. Lösemittel kondensieren bei dieser notwendigen Abluftkonditionierung zwangsläufig zu einem geringen Teil mit aus. Es kommt zu einer Reduktion des Lösemittelanteils durch die ersten beiden Stufen auf ca. 65 %. Eine Abscheidung der Lösemittel ist jedoch nicht das Ziel, da diese in der μ GT durch Mitverbrennung den Primärenergiebedarf senken.

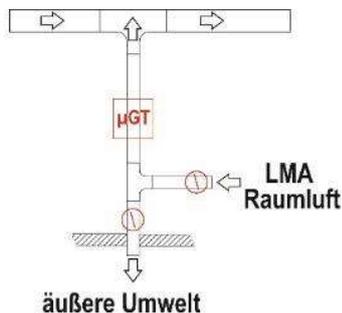


Abbildung 44: Nutzung der Abluft aus der Lösemittelanmischung als Verbrennungsluft in einer μ GT, Nutzung der produzierten Verbrennungswärme zur anteiligen Vorwärmung der Abluft für die RTO

Die RTO-Anlage stellt trotz der internen Wärmerückgewinnung einen sehr großen Gasverbraucher dar, insbesondere wenn der Energieinhalt der zu behandelnden Abluft (organische Belastung) nicht hoch genug für einen autothermen Anlagenbetrieb ist. Im vorliegenden Fall wird die RTO jährlich für ca. 5.500 Betriebsstunden mit zusätzlichen 400 kW_{Gas} betrieben. Dieser Energiebedarf kann durch die o. g. anteilige Nutzung anfallender Abluft in einer μ GT (50 kW_{el}) mit der freiwerdenden Wärme um 90 kW_{gas} gesenkt werden. Zusätzlich stünden 50 kW_{el} für die Produktion zur Verfügung.

10. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der kontinuierlichen projektbegleitenden Patent- und Literaturrecherchen wurden keine Berührungen der hier dargestellten Problematik gefunden.

11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen zu (Teil-)Ergebnissen des FuE-Projekts wurden im Rahmen des Know-how-Transfers getätigt:

Marco Sallat und Jens Mählmann, 2021. EnergyTex – Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie. 5. Erfahrungsaustausch Abluftreinigung, 8. September 2021, Chemnitz

Werner Schüler, 2021. Mobile und stationäre Messtechniken zum empfindlichen Nachweis von Luftschadstoffen auf Basis der Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie und Photo-Ionisations-Detektion. 5. Erfahrungsaustausch Abluftreinigung, 8. September 2021, Chemnitz

12. Literaturverzeichnis

- Arnold, C. (2009). *Siloxane aus Gasen holen*. Von <https://www.arnold-chemie.de/2009/05/siloxane-aus-gasen-holen/> abgerufen
- Axhausen, J., Christl, D., Teichert, M., Geubtner, M., Lang, G., Modenhauer, J., . . . Zyschka, R. (2019). Methode zur Bestimmung zyklischer Siloxane in Textilhilfsmitteln. *Melliand Textilberichte*(2), S. 91-92.
- Destatis (Statistisches Bundesamt). (2019). Tabellen 42271-0002 und 85131, Daten für 2016.
- Destatis (Statistisches Bundesamt). (2021). Tabellen 42271-0002 und 85131, Daten für 2018.
- DLR - Institut für Verbrennungstechnik. (kein Datum). Energieeffiziente Verstromung von VOC (VOCStrom) (FKZ 03ET1069B). Abgerufen am 27. 01 2022 von https://www.dlr.de/vt/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909_read-38402/
- Doczyck, W. (19. 03 2012). *Abtrennung von Siloxanen aus biogenen Gasen mittels Festbettadsorbentien*. Von <https://www.siloxa.com/n/d/news/abtrennung-von-siloxanen-aus-biogenen-gasen-mittels-festbettadsorbentien> abgerufen
- Droth, E., Gerl, L., & Simat, T. (2016). Charakterisierung von Siloxanen aus Lebensmittelkontaktmaterialien. TU Dresden.
- HLNUG. (2003). (U. u. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Hrsg.) Abgerufen am 18. 11 2019 von https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/fliessgewaesser/gewaesserbelastung/orientierende_messungen/6.26Siloxane.pdf
- Institut Fresenius. (2019). *Angebot/Preisliste 2017*. SGS Institut Fresenius GmbH, Longuich.
- Sallat, M., Mähmann, J., & Heye, U. (2021). EnergyTex - Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie. *Vortragsband zum 5. Erfahrungsaustausch Abluftreinigung, 8. September 2021* (S. 2). Chemnitz: Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.
- Schüler, W. (2021). Mobile und stationäre Messtechniken zum empfindlichen Nachweis von Luftschadstoffen auf Basis der Ionen-Mobilitäts-Spektrometrie und Photo-Ionisations-Detektion. *Vortragsband zum 5. Erfahrungsaustausch Abluftreinigung am 08. September 2021*. Chemnitz.
- Schweigkofler, M., & Niessner, M. (2001). Removal of siloxanes in biogases. *Journal of Hazardous Materials, B83*, S. 183-196.
- UBA. (kein Datum). Abgerufen am 18. 11 2019 von <https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/schadstoff/silox/>
- Urban, W., & Unger, C. (09. 10 2008). *Patentnr. DE102004051807B4*.
- Wheless, E., & Pierce, J. (2004). Siloxanes in Landfill and Digester Gas. *27th Annual SWANA LFG Symposium*.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundvorhaben EnergyTex – „Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie“; Teilprojekt: „Prozessanalytische Untersuchungen an Veredlungs- und Beschichtungsanlagen zur Erhöhung der Energieeffizienz“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Mählmann, Jens Sallat, Marco Niersmann, Ulf Dr. Heye, Ulrich	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2021
	6. Veröffentlichungsdatum 31.01.2022
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. an der Technischen Universität Chemnitz Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 03ET1547A
	11. Seitenzahl 60
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	12. Literaturangaben 15
	14. Tabellen 11
	15. Abbildungen 42
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 31.01.2022	
18. Kurzfassung Das Ziel des Projektes war die Erarbeitung einer verallgemeinerungsfähigen Beispiellösung für die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Erhöhung der Energieeffizienz in Unternehmen der Textilindustrie, gekennzeichnet durch den Anfall organisch belasteter Abluft und hohen Energieeinsatz (Veredlung, Beschichtung, Trocknung, Abluftreinigung). Es wurden Lösungen für den Einsatz einer Mikrogasturbine (μ GT) und die energetische Nutzung der Lösemittel in den Abluftströmen zur Energieeinsparung erarbeitet. Auf tretende Probleme mit Weichmachern und Siloxanen in der Abluft sowie mit für den μ GT-Betrieb zu hohen Ablufttemperaturen konnten durch Entwicklung geeigneter Konzepte zur Abluftkonditionierung gelöst werden: Für den Einsatz einer μ GT dürfen Verbrennungslufttemperaturen von 40 °C nicht überschritten werden. In den betrachteten Produktionsprozessen war mit Ablufttemperaturen > 150 °C zu rechnen. Daher wurde der Fokus auf die Konditionierung der als Verbrennungsluft angesaugten Abluft gelegt. Der Einsatz eines geschlossenen Abluftwärmetauschers zum Kühlen der Verbrennungsluft sowie zum Auskondensieren der Weichmacher erwies sich als günstig und effektiv. In der Abluft enthaltene Weichmacher werden bei einer Abkühlung auf 40 °C nur zu 30–40 % auskondensiert. Um eine sukzessive Versotung von Anlagenteilen wie Filter und Rekuperator in der μ GT und erhöhten Wartungsaufwand zu vermeiden, sieht die konstruktive Lösung eines erweiterten Wärmetauschers drei in Reihe verschaltete temperaturgestufte Abluftwärmetauscher vor: 1. Abkühlung zur Wärmerückgewinnung auf ca. 60 °C, 2. Kühlung der Abluft auf ca. 10 °C (Kondensation der Weichmacher) und 3. Wiedererwärmung der Abluft auf ca. 30 °C (Wärme aus Stufe 1). Durch das erneute Aufheizen über den Taupunkt der zuvor abgekühlten Abluft lassen sich eine weitere Kondensation von Weichmachern und daraus resultierende Störungen im μ GT-Betrieb vermeiden. Siloxane in der Verbrennungsluft der μ GT führen bei thermischer Oxidation zu einer Reduzierung der Turbinenstandzeit bis hin zur Zerstörung der μ GT. Ziel der Abluftkonditionierung war hier die vollständige Entfernung der Siloxane vor Zuführung als Verbrennungsluft. Verschiedene Verfahren, z. B. (Kryo-) Kondensation, Adsorption und Absorption, wurden bewertet. Die Adsorption an Silikagel und die Absorption in Mineralöl rückten in den Fokus der Untersuchungen. Ein Mineralölwäscher konnte die länger-kettigen Dimethylsiloxane (D4 – D6, L4, L5) sehr gut aus der Abluft entfernen, die kurzkettigen (L2, D3, L3) aber passierten den Absorber. Ein Silikagel-Absorber adsorbierte alle getesteten Dimethylsiloxane (L2 – L5, D3 – D5) vollständig, zeigte aber Beeinträchtigungen bei gleichzeitiger Anwesenheit von Lösemitteln. Die Entwicklung eines Silikagel-Absorbers wurde zugunsten eines Mineralöl-Absorbers zurückgestellt. Eine thermische Regeneration des beladenen Mineralöls ist möglich, aber aufwendig, und birgt eine hohe Explosionsgefahr. Eine thermische Verwertung des beladenen Mineralöls wird empfohlen.	
19. Schlagwörter Kraft-Wärme-Kopplung; Mikrogasturbine; Lösemittel; Weichmacher; Siloxane; Abluft	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Verbundvorhaben EnergyTex – „Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie“; Teilprojekt: „Prozessanalytische Untersuchungen an Veredlungs- und Beschichtungsanlagen zur Erhöhung der Energieeffizienz“	
4. author(s) (family name, first name(s)) Mählmann, Jens Sallat, Marco Niersmann, Ulf Dr. Heye, Ulrich	5. end of project 31.07.2021
	6. publication date 31.01.2022
	7. form of publication final report
8. performing organization(s) (name, address) Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. an der Technischen Universität Chemnitz Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz	9. originator's report no.
	10. reference no. 03ET1547A
	11. no. of pages 60
13. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	12. no. of references 15
	14. no. of tables 11
	15. no. of figures 42
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, 31.01.2022	
18. abstract The aim of the project was to develop a generalizable example solution for the use of combined heat and power generation (CHP) to increase energy efficiency in companies in the textile industry characterized by the occurrence of organically polluted exhaust air and high energy input (finishing, coating, drying, exhaust air purification). Solutions were developed for the use of a micro gas turbine (μ GT) and the energetic utilization of the solvents in the exhaust air streams for energy savings. Problems with plasticizers and siloxanes in the exhaust air and with exhaust air temperatures that are too high for μ GT operation were solved by developing suitable concepts for exhaust air conditioning: For the use of a μ GT, combustion air temperatures of 40 °C must not be exceeded. In the production processes considered, exhaust air temperatures of > 150 °C were to be expected. Therefore, the focus was placed on the conditioning of the exhaust air drawn in as combustion air. The use of a closed exhaust air heat exchanger for cooling the combustion air and condensing out the plasticizers proved to be favorable and effective. Only 30–40 % of the plasticizers contained in the exhaust air are condensed out when cooled down to 40 °C. In order to avoid both successive sooting of plant components (such as filter and recuperator) in the μ GT and increased maintenance effort, the design solution of an extended heat exchanger provides three stages of heat exchange: 1. cooling for heat recovery to approx. 60 °C, 2. cooling of the exhaust air to approx. 10 °C (condensation of the plasticizers) and 3. reheating of the exhaust air to approx. 30 °C (heat from stage 1). By reheating above the dew point of the previously cooled exhaust air, further condensation of plasticizers and resulting malfunctions in μ GT operation can be avoided. Siloxanes in the combustion air of the μ GT lead to a reduction in turbine service life and even to the destruction of the μ GT. In this case, the aim of exhaust air conditioning was to completely remove the siloxanes before use as combustion air. Different processes, e.g. (cryo-) condensation, adsorption and absorption, were evaluated. Adsorption on silica gel and absorption in mineral oil became the focus of the investigations. A mineral oil scrubber was able to remove the long-chain dimethylsiloxanes (D4 – D6, L4, L5) from the exhaust air very well, but the short-chain siloxanes (L2, D3, L3) passed through the absorber. A silica gel adsorber adsorbed all tested dimethylsiloxanes (L2 – L5, D3 – D5) completely, but showed impairments when solvents were simultaneously present. The development of a silica gel adsorber was postponed in favor of a mineral oil adsorber. Thermal regeneration of the loaded mineral oil is possible, but is costly and involves a high risk of explosion. Thermal recycling of the loaded mineral oil is recommended.	
19. keywords combined heat and power generation (CHP); micro gas turbine; solvents; plasticizers; siloxanes; exhaust air	
20. publisher	21. price