

Ergebnispapier zum Thema der thermischen Nachverbrennung

Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts EE4InG



Verfasser des Berichts:

ETA-Solutions GmbH
Alexander Uhl



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1. Vorwort.....	3
2. Projekte der letzten 10 Jahre.....	4
3. Kurzbeschreibung der thermischen Nachverbrennung.....	4
4. Marktkontexturierung	7
5. Energietechnische und –wirtschaftliche Bewertung	9
6. Technologiezyklus- und Innovationssystem-Analyse	12
7. Ableitung von Entwicklungspotenzialen sowie Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen.....	13
8. Ableitung von Policy-Maßnahmen und Empfehlungen.....	16
9. Zusammenfassung	17
10. Literaturverzeichnis	19

1. Vorwort

Im Rahmen des Projekts „EE4InG“ (Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe) wird zur Bewertung von Technologien, welche ein großes Potenzial aufweisen den Energiebedarf sowie Treibhausgasausstoß zu verringern, die am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelte EDUAR&D-Methode (EnergieDaten Und -Analyse R&D, siehe Abbildung 1) verwendet. Dieser strukturierte Such- und Analyseprozess verbindet verschiedene Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung einzelner Technologien miteinander, wobei abhängig von den vorhandenen Informationen nicht in jeder EDUAR&D-Analyse der komplette Umfang genutzt werden kann. Das Ziel einer jeden EDUAR&D-Analyse sind Handlungsempfehlungen für thematische Schwerpunktsetzungen sowie die Intensivierung bestehender Förderungen für die zukünftige Energieforschung in Deutschland zu entwickeln.

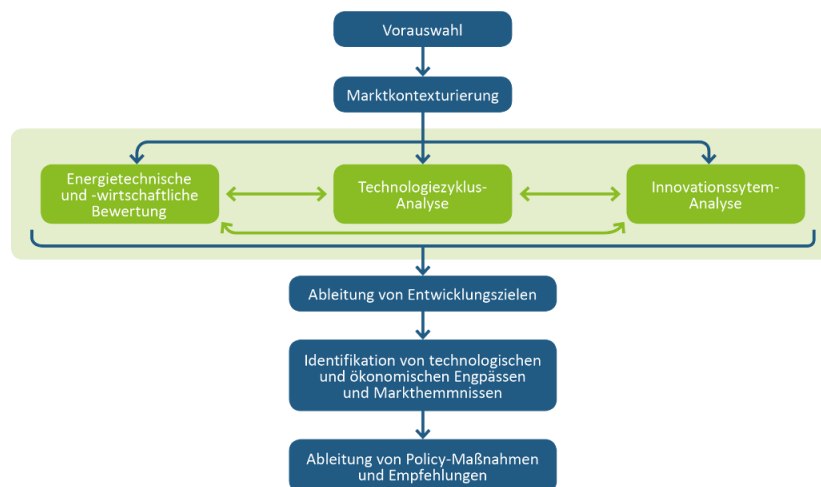


Abbildung 1: Vorgehen in der EDUAR&D-Analyse

Die **Vorauswahl** legt die einzelne(n) Technologie(n) fest, welche aufgrund ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die THG-Emissionen in einer Branche bzw. eines bestimmten Produktionsprozesses für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Frage kommen könnte(n). Durch die nachfolgende **Marktkontexturierung** werden sowohl die Regionalität denkbarer Märkte, derzeitige oder absehbare Marktformen sowie mögliche Konkurrenztechnologien untersucht. Der komplexeste Schritt in der EDUAR&D-Methode setzt sich aus einer **energietechnischen und -wirtschaftlichen Bewertung** und einer **Technologie-** sowie **Innovationsystem-Analyse** zusammen. Im Konkreten beinhaltet die **energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung** zum einen den Einfluss der einzelnen Technologien und Branchen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen (THG), zum anderen das Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie schlussendlich die Einschätzung zur Übertragung bereits eingesetzter energieeffizienterer Technologien in andere Branchen. Die **Technologiezyklus-Analyse** dient dazu die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie abzubilden und ist in die sechs Phasen Entdeckung, Euphorie, Ernüchterung, Reorientierung, Aufstieg und Diffusion unterteilt. Je nach Verortung der einzelnen Technologie können zielgerichtete Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die **Innovationsystem-Analyse** beschäftigt sich mit Komponenten, welche Akteure, Technologien sowie regulatorische Rahmen inklusive Förderpolitik beinhalten und Relationen, welche die formellen und informellen Beziehungen

zwischen diesen Komponenten beschreiben. Die EDUAR&D-Analyse schließt mit der *Ableitung möglicher Entwicklungsziele* sowie der *Identifikation technologischer und ökonomischer Engpässe und Markthemmnisse* aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus können *Handlungsempfehlungen* abgeleitet werden.

In die Ausarbeitung des Ergebnisrapports fließen neben den Ergebnissen aus Literaturrecherche auch die Einschätzungen von Expertinnen und Experten aus Industrie, Forschung und Verbänden. Aufbauend auf den Einzelgesprächen fand am 20.08.2020 ein virtuelles Fachgespräch statt, in welchem vor allem die Fragestellungen der letzten drei EDUAR&D-Schritte diskutiert wurden.

2. Projekte der letzten 10 Jahre

Auf die vergangenen zehn Jahre bezogen sind der EnArgus-Projektbank nur sehr wenige Forschungsprojekte mit Schwerpunkt der thermischen Nachverbrennung zu entnehmen. Das Projekt „Energieeffiziente Verstromung von VOC (VOC-Strom)“ [1] hatte beispielsweise für einen Zeitraum von 3,5 Jahren ein Fördervolumen von ca. 0,8 Mio. €. Ein weiteres Projekt mit Schwerpunkt der regenerativen Nachverbrennung im Bereich der Abfallbehandlung wurde (Fördervolumen ca. 1,4 Mio. €) bearbeitet [2]. Das in diesem Jahr ausgelaufene, dreijährige Projekt „Verbundvorhaben EnergyTex: Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie“ wurde mit ca. 0,72 Mio. € gefördert [3].

3. Kurzbeschreibung der thermischen Nachverbrennung

Die thermische und katalytische Nachverbrennung sind Verfahren, welche zum Einsatz kommen, um beispielsweise prozessbedingte Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (sog. VOC – volatile organic compounds) zu vermindern. Weiterhin dienen sie zur Verhinderung bzw. Reduktion von Geruchsentwicklungen.

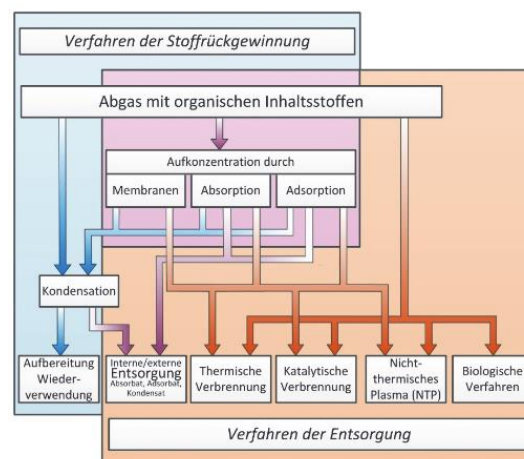


Abbildung 2: Verfahren zur Behandlung von Abgasen mit organischen Inhaltsstoffen [4]

Im Gegensatz zu Verfahren der VOC-Rückgewinnung stellt die Nachverbrennung ein Verfahren aus dem Bereich der VOC-Zerstörung dar (siehe Abbildung 2). Diesem können außerdem noch das biologische Verfahren sowie das Verbrennen mittels nicht-thermischem Plasma zugeordnet werden.

Unternehmen, welche im Rahmen ihrer industriellen oder gewerblichen Tätigkeit VOC emittieren (z.B. im Zuge von Lösemittelanwendungen), sind verpflichtet Maßnahmen zu treffen, um ihre Prozessabgase zu reinigen, um die VOC-Emissionen zu begrenzen. Betroffene Anlagen und Tätigkeiten bzw. zugehörige Grenzwerte können der 31. Bundes-Immissionsschutzverordnung zur *Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen* entnommen werden. [5]

Das Verfahren zur thermischen Zerstörung von VOC (thermische Oxidation) unterteilt sich grundsätzlich in zwei Verfahren, die thermische Nachverbrennung (TNV, siehe Abbildung 3) und die katalytische Nachverbrennung (KNV, siehe Abbildung 4). Der grundlegende Unterschied zwischen der TNV und der KNV ist der Einsatz eines Katalysators bei der KNV, welcher die Aktivierungsenergie erniedrigt und somit die benötigte Verbrennungstemperatur (auf ca. 300 – 600 °C) reduziert. Dieser Katalysator führt jedoch zu einem begrenzteren Anwendungsfeld, sodass die TNV das universellere Verfahren darstellt. Beiden Verfahren der Nachverbrennung ist gleich, dass das zu reinigende Abgas (Rohgas) in einem ersten Schritt durch das gereinigte Abgas (Reingas), welches aufgrund der Verbrennungstemperaturen in der Brennkammer (Brennkammertemperatur bei der TNV ca. 700 - 900°C) stark erhitzt wird, vorgewärmt wird. In Abhängigkeit von dem eingesetzten Wärmetauscher werden beide Verfahren noch einmal in die rekuperative (siehe Abb. 2; seit 60/70er Jahre) und die regenerative (RNV, siehe Abbildung 5) Verfahrensart (seit 80er Jahre) unterteilt.

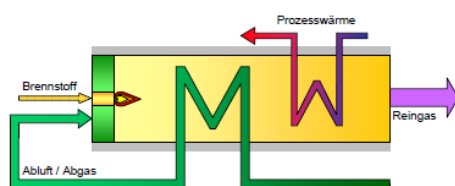


Abbildung 3: rekuperative TNV [6]

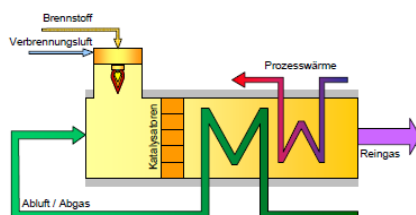


Abbildung 4: Katalytische Nachverbrennung (KNV) [6]

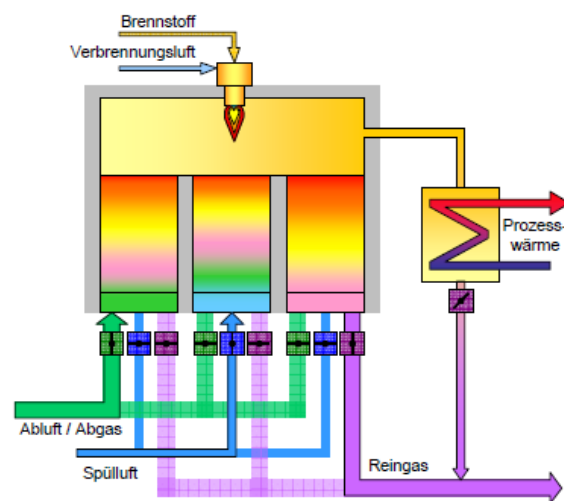


Abbildung 5: Regenerative TNV [6]

Die Wärmeübertragung der rekuperativen Verfahrensart erfolgt über einen Rohrbündelwärmetauscher [7, 8], welcher von dem heißen Reingas umströmt wird und das durchströmende Rohgas vorwärmt. Bei der regenerativen Verfahrensart hingegen wird die Wärmeenergie des Reingases über eine Wärmespeichermasse (z.B. Keramikformteile), welche sich in der Verbrennungs- bzw. Oxidationszone befinden, an das Rohgas übertragen. Die unterschiedlichen Töpfe werden abwechselnd mit dem zu verbrennenden Abgas befüllt bzw. von dem Reingas befreit (2-Topf-Anlage), ggf. noch mit Spülluft gereinigt (3-Topf-Anlage). Das Reingas gibt seine Wärme an einen Regenerator ab, der seinerseits das Abgas aufwärmt. Der Wärmetauscher-Wirkungsgrad der

regenerativen Verfahrensart ist hierbei größer als der der rekuperativen Verfahrensart. Um die erforderlichen Temperaturen zur Zerstörung der VOC zu ermöglichen, wird dem Verfahren meist ein Zusatzbrennstoff zugeführt, wenn die VOC-Konzentration für einen autothermen Betrieb nicht ausreicht. Die Menge an Zusatzbrennstoff ist dabei abhängig von der Zusammensetzung des Rohgases, dem Gehalt an brennbaren Stoffen, der Vorwärmtemperatur des Rohgases und der Reaktionstemperatur [8]. Die Leistungszufuhr für die thermische Oxidation kann sowohl über einen Brenner oder auch ein elektrisches Heizregister erfolgen, an welches sich ein Flammlosbetrieb anschließen kann. Zur vollständigen Oxidation ist neben einer hohen Temperatur und langer Verweilzeit auch eine gute Vermischung wichtig, sodass Brenner verwendet werden, welche Turbulenzen erzeugen [8, 9, 10]. Daher kommen bspw. Flächenbrenner [8, 11] oder Drallbrennkammern [9] zum Einsatz. Darüber hinaus sind häufig Duoblock-Gebläsebrenner [12] in der Anwendung zu finden.

Neben der Art des Wärmetauschers (rekuperative und regenerative Verfahrensweise) können zwei weitere wesentliche Unterschiede der beiden Arten von TNV ausgemacht werden. Der Wärmetauscher-Wirkungsgrad der regenerativen Verfahren ist wie zuvor dargestellt höher als der des rekuperativen Verfahrens (regenerativ: bis ca. 98%, rekuperativ: bis ca. 76% [8]). Dies zeigt sich besonders in der Temperatur des Reingases beim Verlassen der Anlage bzw. Eintritt in den Kamin. So hat das Reingas beim Austritt bei der regenerativer Verfahrensart eine Temperatur von ca. 40-200°C [8] bzw. ein ΔT (Reingastemperatur nach Austritt über Eintrittstemperatur) von 40K und mit rekuperativer Verfahrensart noch ca. 250-400°C bzw. ein ΔT von 240K, bzw. 160K. Im Falle der KNV liegt ΔT bei ca. 60K. Tabelle 1 zeigt die Unterschiedliche der Nachverbrennungsarten.

Tabelle 1: Unterschiede der Nachverbrennungsarten

Abgasbehandlung	Rekuperative TNV	Regenerative TNV	Katalytische Nachverbrennung
Autothermer Bereich	6 – 8 g C/Nm ³ [8, 13, 14]	1 – 2 g/m ³ [15] 1,5 g/cm ³ [16]	1 – 3 g C/m ³ [8]
Mittlere Beladung	16 g/m ³ [15]	8 g/Nm ³ [16] 12 g/cm ³ [17, 18, 19]	
Reingaswert	< 10 mg C/Nm ³ [15]	< 10 mg/Nm ³ [17, 18, 19]	< 10 mg /Nm ³ [8]
NOx- und CO-Grenze	< 100 mg/m ³ [15]	< 50 mg/m ³ [20, 19]	< 50 mg/m ³ [21]
Lösemittelkonzentration		15 g/Nm ³ [22]	2 g/Nm ³ [22]
Abluftströme	< 7.500 Nm ³ /h [22] < 60.000 Nm ³ /h [22]	5.000 – 360.000 Nm ³ /h [16] 300 – 200.000 Nm ³ /h [22]	< 15.000 Nm ³ /h [22] <1000 – 70.000 Nm ³ /h [22]

Zu den potenziellen Einsatzgebieten der thermischen und katalytischen Nachverbrennung zählen beispielsweise

- Chemieindustrie
- Beschichtungsprozesse
- Lackierbetriebe
- Druckereibetriebe
- Kunststoffindustrie
- Papierindustrie
- Abfallbehandlungsanlagen
- Röstereien

Als Wärmerückgewinnung (siehe Abbildung 6) bei niedrigeren Temperaturen stehen die Warm- bzw. Heißwassererzeugung mit 80°C bzw. unter höherem Druck mit 110°C (bei Abgasen von z.B. T = 300°C

bzw. $T = 470^{\circ}\text{C}$) zur Verfügung. Die Thermalölerhitzung mit Systemtemperaturen bis zu 350°C bei Umgebungsdruck und die Dampferzeugung mit 425°C ($T = 550^{\circ}\text{C}$) ermöglichen zusätzlich eine Rückführung der Abwärme in Strom über den ORC-Prozess (organic rankine cycle). Bei hohen Dampfabgasmengen kann des Weiteren die Stromerzeugung auch direkt in der Turbine erfolgen.

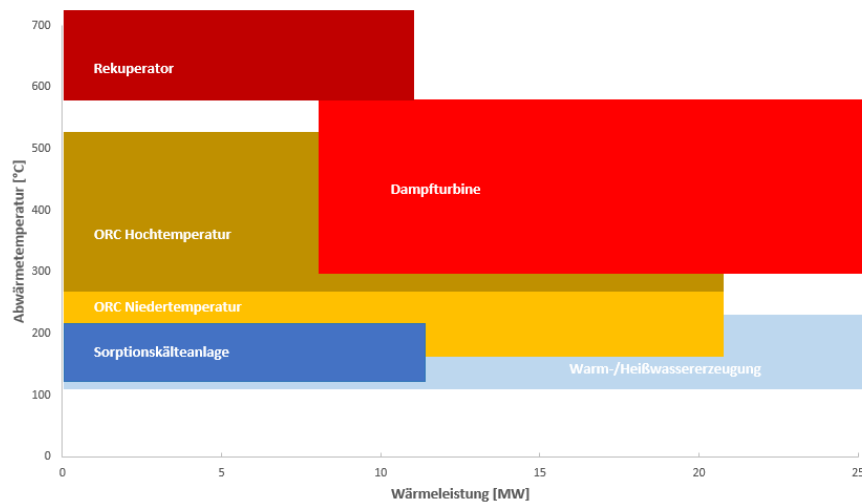


Abbildung 6: Methoden zur Wärmerückgewinnung in Abhängigkeit zur Abwärmetemperatur (nach [23]).

Während die rückgewonnene Energie aus Warm- und Heißwasser zu Heizzwecken oder auch als Prozesswärme genutzt werden kann, ermöglicht ein Thermalölbad zusätzlich die Heißluftterzeugung, sowie die Stromerzeugung mittels ORC-Module. Im Falle des Dampfes können noch Kälteerzeugungsprozesse versorgt werden und somit bietet es das breiteste Spektrum an Weiterverwendung [23].

4. Marktkontexturierung

Hinsichtlich der Verbreitung von TNV- und KNV-Anlagen in Deutschland liegen nur ungenaue Informationen vor. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) regelt in seinen Verordnungen den Schutz vor Immissionen und Emissionen. In diesem Zusammenhang wurde die 31. BImSchV veröffentlicht, welche die VOC-Emissionen bei Verwendung organischer Lösemittel begrenzen soll und daher auch als „VOC-Verordnung“ bezeichnet wird [5]. Einer Schätzung nach fallen in Deutschland etwa 20.000 Anlagen unter die neue BImSchV. Inwiefern diese Anlagen zur Begrenzung der VOC-Emissionen auf eine thermische Abgasreinigung zurückgreifen, ist allerdings nicht bekannt. Zieht man Daten der Industrieemissionsrichtlinie (IED) heran, so werden im Rahmen dieser insgesamt etwa 9.000 Industrieanlagen in Deutschland erfasst, wovon ca. 7.000 Anlagen einen Lösemittelleinsatz aufweisen. [24] Diesen Zahlen und den vorab dargestellten möglichen Anwendungsfeldern der TNV/KNV zur Folge, sollte sich die Anzahl der sich im Einsatz befindenden Anlagen in Deutschland entsprechend im oberen vierstelligen Bereich bewegen, zumal kleinere Anlagen (mit einem Durchsatz weniger als 150 kg/h bzw. 200 t/Jahr an Lösemittel) zwar unter die BImSchV fallen, jedoch nicht unter die IED [25]. Der Anteil der thermischen sowie katalytischen Nachverbrennungsanlagen an der Gesamtanzahl der Anlagen zur Abluft-/Abgasreinigung dürfte u.a. aufgrund des universellen Einsatzes einer solchen Anlage entsprechend hoch sein. Bzgl. der Anzahl von Kleinstanlagen (evtl. auch Kesselbefeuerung)

konnten keine Zahlen genannt werden. Lediglich sei ein Trend von Kleinanlage zu Großanlagen erkennbar aufgrund von Marktzentralisierung und Aufkonzentration.

In einem fünfjährigen Diskussionsprozess, der sogenannter Sevilla-Prozess, wurden 2019 für die IED die BVT-Schlussfolgerung (BVT: beste verfügbare Technik) aktualisiert. Diese erlaubt den Unternehmen eine Frist von vier Jahren (spätestens 2024) um ihre bestehende Abluftreinigung ab Veröffentlichung (2020) des BVT-Merkblattes mit der entsprechenden Technik nachzurüsten. Neuanlagen hingegen müssen sofort mit dem beschriebenen neusten Stand der Technik geplant und gebaut werden. Die von der EU angestrebte Wettbewerbsgleichheit des Binnenmarktes ermöglicht den örtlichen Behörden aber auch ihre Grenzwerte selbst festzulegen und somit die BVT-Anforderungen zu unterschreiten (von der Richtlinie zu „befreien“). Dies ist erlaubt, sollten die Kosten der betroffenen Anlage aufgrund der geografischen Lage, der lokalen Umweltbedingungen oder der technischen Merkmale unverhältnismäßig hoch sein. Deutschland erlaubt seinen Behörden hierbei die BVT-Anforderungen nur bzgl. des Punktes *technischen Merkmale* zu unterschreiten. [25, 26]

Im Rahmen einer Recherche zu möglichen Anlagenherstellern wurden auf dem deutschen Markt bislang etwa 30 Anbieter identifiziert. Hierbei unterscheiden sich die Hersteller im Wesentlichen hinsichtlich Größe und Spezialisierung. Vor dem Hintergrund der Untersuchung von Potenzialen der Steigerung der Energieeffizienz bzw. (sekundäre) Abwärmenutzung bei TNV/KNV-Anlagen unterscheiden sich die Hersteller allerdings auch hinsichtlich des Produktportfolios. Nur bei der Minderheit der Hersteller konnte im Rahmen der Recherche eine potenzielle (sekundäre) Abwärmenutzung identifiziert werden.

Das Alter des Anlagebestandes wird seitens der Experten in der Forschung auf ca. 10 – 20 Jahre geschätzt. Die Maximaleinsatzdauer wird mit 30 Jahren angegeben.

Im Rahmen einer Herstellerbefragung wurden seitens eines Anlagenbauers 400 – 450 verkaufte TNV- und KNV-Anlagen in den letzten 35 Jahren genannt. Ca. 80 - 85% hiervon fallen auf die Regenerative TNV (RNV), die KNV machen dagegen einen Anteil von 10 - 15% aus und werden meist als Kleinanlage als Speziallösung verwendet. In der Lackierbranche sind letztere nur zu 3 – 5% vertreten, da für Mischanwendungen weniger geeignete Katalysatoren bereitstehen – die Prozessgaszusammensetzung muss bekannt und weitestgehend gleich sein. Laut eines anderen Anlagenbauers wurden in den letzten 50 Jahren sogar fast 10.000 (thermische) Nachverbrennungsanlagen weltweit ins Feld gebracht. Ein weiterer Hersteller bezifferte seine insgesamt verkauften KNV-Anlagen auf eine niedrige einstellige Verkaufszahl. Andere Experten nannten ein geschätztes RNV/KNV-Verhältnis von 78/22, 75/25, 66/33 und 60/40 – die Unterschiede könnten an den unterschiedlichen Branchen und den entsprechenden Anforderungen an die Abluftreinigung der Kunden liegen. 30 – 40 % der TNV-Anlagen eines Herstellers für die chemische Industrie sind von Planungsbeginn mit einer sekundären Wärmerückgewinnung ausgestattet aufgestellt worden, da es die logistischen und ökonomischen Gegebenheiten zuließ. Einer der Anbieter verzichtet hingegen in dieser Branche aufgrund der Korrosionsgefahr durch die Bestandteile in der Abluft auf eine Vorwärmung dieser (rekuperativ). Bzgl. der Automobilbranche geht er von europaweit insgesamt 400 – 500 verbauten rekuperativen TNV-Anlagen aus.

Laut dem VDMA wurden im Jahr 2016 Aufträge im Wert von ca. 33,2 Mio. Euro für Deutschland (im Ausland 13,2 Mio. Euro) an deutsche Unternehmen für Investitionen im Bereich RNV erteilt, was 6% der Gesamtausgaben bzgl. der Abluftreinigung ausmacht (*Hinweis: die VOC-Eliminierung macht nur*

einen kleinen Prozentsatz im Bereich der Abluftreinigung aus). Zahlen bzgl. der katalytischen sowie rekuperativen thermischen Nachverbrennung wurden seitens der betreffenden sechs mitwirkenden Hersteller nicht an den VDMA gemeldet. Ein Register der Gesamtanzahl der sich in Deutschland befindlichen Anlagen mit energetischen Daten bzw. Betriebsdaten existiert bisher nicht. [27]

5. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

Die energetische Bedeutung der Nachverbrennung (NV) kann anhand der hohen Anzahl der Anlagen und den dargestellten Temperaturbereichen der Reingase als groß abgeschätzt werden. In Abhängigkeit von der Betriebszeit einer NV-Anlage kann in Summe eine große bisher ungenutzte Wärmeenergiemenge vorliegen, welche dem NT- und MT-Abwärmebereich zuzuordnen ist und eine nähere Betrachtung sinnvoll erscheinen lassen.

Da innerhalb der unterschiedlichen Verfahrensarten der NV bereits eine primäre Wärmerückgewinnung (WRG) zur Vorwärmung der Rohgas in den größeren Anlagen zum Einsatz kommt, stellt sich die Frage nach einer sekundären WRG. Für Kleinanlagen könnte die Aufrüstung einer primären WRG wirtschaftlich sein, jedoch ist die Anlagenanzahl in Deutschland unbekannt.

Wie bereits dargestellt, wurden die identifizierten Anlagenhersteller dahingehend betrachtet, ob eine sekundäre WRG als Anlagenspezifikation angeboten werden kann oder ob lediglich eine NV-Anlage mit primärer WRG-Technik verfügbar ist. Hierbei hat sich herausgestellt, dass nur etwa ein Drittel der identifizierten Anbieter auf ihrer Homepage eine sekundäre WRG anbieten.

Eine sekundäre WRG kann wie über verschiedene Wege erfolgen und für unterschiedliche Zwecke genutzt werden. Beispielsweise kann das austretende Reingas unmittelbar über ein Heißgasabgriff als direktes Verfahren genutzt werden oder die Energie aus dem austretenden Reingas über einen Wärmeübertrager genutzt werden. Sekundäre (Abwärme-) Nutzungsmöglichkeiten sind z.B. die Nutzung für Warmwasser, Warmluft, einen Dampf- oder Thermalölkreis. Praxisbeispiele haben hierbei gezeigt, dass Prozesswärme beispielsweise aus regenerativen TNV-Anlagen durch eine Systemanpassungen für andere Prozesse bereitgestellt werden kann. Mitunter konnte aufgezeigt werden, dass ganze Thermalölheizkessel substituiert werden können [28]. Neben der einfachen Umsetzung deuten diese Praxisbeispiele auf eine gewisse (brancheninterne) Übertragbarkeit hin, da sich Produktionsprozesse bei Unternehmen einer jeweiligen Branche entsprechend ähneln.

Möglichkeiten zur primären und sekundären Abwärmenutzung, welche eine Abluft- bzw. Abgasreinigungsanlage bietet, sollten in jedem Fall umfänglich ausgeschöpft werden, um bestehende Energie-/Wärmequellen im Betrieb auszunutzen.

Seitens der interviewten Hersteller spielen Nachrüstungen für rekuperative TNV kaum bis gar keine Rolle - Altanlagen werden meist durch die regenerative Variante ersetzt und ins Ausland verkauft – bei Bedarf an rückzuführender Prozesswärme kann eine Erneuerung einer rekuperative TNV-Anlage oder sogar Neuanlage durchaus wirtschaftlich sinnvoller sein. Des Weiteren könnte eine Nachrüstung einer sekundären Wärmerückgewinnung bei einer bestehenden rekuperativen TNV ökonomisch sein, sofern diese prozessbedingt im Dauerbetrieb läuft. Die Temperaturschwankungen beim Hoch- und Runterfahren im Wechselbetrieb führen auf lange Sicht zu Materialschäden (*Bsp. Längenänderung in*

den Wärmetauschern aus Stahl; Wirkungsgrad bis zu 76% - durch schonende Abkühlung bzw. Nachlauf bei qualitativen Wärmetauschern kann jedoch durchaus eine Lebensdauer von 15-20 Jahren erreicht werden). Ein Hersteller schätzte bei 80% der von der Automobilindustrie genutzten TNV-Anlagen eine ungenutzte Wärmeabgabe über das Dach von 350 – 400 °C. Ein anderer Anbieter sieht das ungenutzte Potential bei 200°C. Seitens eines Forschungsexperten wurde die austretende Reingastemperatur bei 180°C vermutet.

Bei nicht kontinuierlichem Betrieb (elementare Bedarfsregelung) und sofern es die „Natur“ der VOCs zulässt, wäre die Anschaffung einer regenerativen TNV bzw. KNV der Nachrüstung einer bestehender rekuperativen TNV vorzuziehen. Problematisch bei der Umrüstung von einer rekuperativen TNV-Anlagen auf eine wirtschaftlichere regenerative Variante könnte hierbei sein, dass der dadurch erforderliche Umbau der Produktionsanlage mit zu hohen Kosten verbunden ist oder die notwendige hohen Stützlast der RNV nicht vom Dach gehalten werden kann.

Investitionen in Energierückgewinnung für bestehende sowie neue geplante Anlagen sind seitens der Unternehmen im Allgemeinen zwar gewünscht und werden angefragt, scheitern jedoch oft an den Kosten oder nicht vorhandenen Energieabnehmern bzw.- Wärmesenken. Beispiele: 1) bei austretenden Reingastemperaturen von über 120 °C liegen die Kosten für den Umbau bzgl. der zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen zu hoch und erhöhen die Amortisierungsdauer über 5 Jahre, 2) diese wird weiter gesteigert, je geringer die Betriebsdauer und die Volumenströme sind, 3) die rückgewonnene Energie wird im eigenen Unternehmen als Prozesswärme nicht benötigt bzw. kann aufgrund der „kurzen“ Winterzeit im Jahr nur für wenige Monate zum Heizen genutzt oder wegen fehlender Abnehmer im Umkreis nicht abgegeben werden. Jedoch sieht ein Hersteller eine mögliche Verwendung der Abwärme im Sommer zur Raumkühlung in Sorptionskältemaschinen. Auch wurden die sehr hohen Strompreise (*die Ventilatoren der WRG verbrauchen Strom*) im Vergleich zu den deutlich niedrigeren Erdgaskosten in modernen Anlagen als Hemmnis für zusätzliche WRG-Maßnahmen genannt. Ein Hersteller sieht großes Potential bei der Einspeisung von Warmwasser ins Firmennetz eines großen Automobilherstellers (z.B. Nutzung in Gießerei und Galvanik), jedoch scheitert eine Umsetzung meist aufgrund von Kompetenzstreitigkeiten. Weitere Energieeinsparung könnten durch die KVS-Systeme (Kreislaufverbundsysteme) schon bei niedrigen Temperaturen erreicht werden. Die niedrigen Wirkungsgrade (5-10%) werden durch die niedrigeren Investitionskosten ausgeglichen. Durch entsprechende Förderungen könnten diese wirtschaftlich interessant werden.

Das Hauptaugenmerk der Unternehmen liegt auf einem sicheren Produktionsablauf - das Wissen sowie die Manpower im Unternehmen sich über Energieeinsparungspotentiale zu informieren fehlen bzw. es besteht kein Vertrauen in Energieoptimierer oder letztere sind dem Kunden nicht bekannt.

Zwei Experten aus der Forschung sowie zwei aus der Wirtschaft sehen vor allem großes Energieeinsparungspotential in der Nachrüstung von Adsorptionsrädern (siehe Abbildung 7) und Molekularsieben (generelle Empfehlung als BVT – beste verfügbare Technik) für einen Betrieb im autothermen Bereich. Im Falle des Adsorptionsrades (welche auch seitens einiger Anbieter explizit empfohlen sind) werden die VOC-beladenen Abluftströme aufkonzentriert, wodurch der autotherme Bereich leichter erreicht und gehalten werden kann und deshalb weniger zusätzlicher Brennstoff benötigt wird. Das Molekularsieb ermöglicht einen konstant beladenen VOC-Strom – es glättet diesen

durch Unterbinden von Konzentrationsspitzen. Eine anschließende Verbrennung hinter einer Kombination aus Molekularsieb und Adsorptionsrad kann somit in einer kleineren NV-Anlage autotherm und kontinuierlich erfolgen. Zum Einsatz kommen diese Paarungen bereits vermehrt in der Druckindustrie.

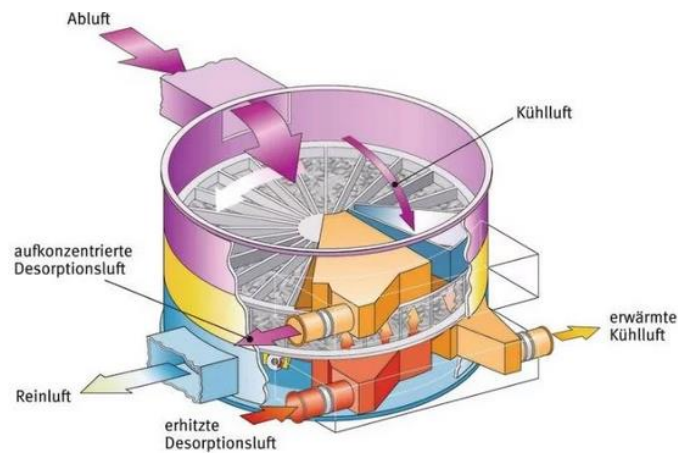


Abbildung 7: Aufbau eines Adsorptionsrades [29]

Seitens eines Forschungsexperten wird ein gesamtheitliches Abluftreinigungskonzept für den Betrieb angestrebt. So sollten nicht nur die Abluft bzgl. der „harten“ VOC-Verordnung betrachtet werden, sondern auch die „soften“ Emissionen, welche durch Fenster, Türen oder allgemein in der Produktionshalle umher strömen. In der Lackier- bzw. Automobilindustrie werden die Produktionsanlagen mittlerweile vorwiegend inkl. der Abgasreinigung im Verbund geplant, wohingegen z.B. in der Druckindustrie die Abluftreinigung eher als End-off-pipe angesehen wird – hier wird oft, wenn überhaupt, erst im Nachhinein über Wärmerückgewinnung nachgedacht. Auch elementare Bedarfsregelung spart durch einen an die Produktion angepassten Betrieb (kein Dauerbetrieb mehr) entsprechend fossilen Brennstoff ein, jedoch sollte die Wirkung der Materialien auf das An- und Runterfahren miteinkalkuliert werden, um Schäden an der Anlage zu vermeiden.

Die Restwärme des Reingases kann bei einer Wärmerückgewinnung auch nur bis zu einer gewissen Grenztemperatur entzogen werden. Je nach Abgaszusammensetzung kommt es zwischen 100 – 130°C zu Kondensierungseffekten, bei welchen sich Reststoffe aus dem Reingas an den umgebenen Oberflächen (Umgebung) ablagern könnten.

Beim Betrieb einer RNV muss auf die Dichtigkeit geachtet werden, da die einzelnen Töpfe aufgrund des kontinuierlichen Umschaltens besonders durch die Temperaturwechsel belastet werden. Ein Ausströmen des Rohgases gilt es zu vermeiden. Die rekuperative TNV wurde von allen Experten als der „Generalist“ bezeichnet, und gibt den Kunden die bestmögliche Flexibilität bzgl. zukünftiger Produktionsveränderungen und den zu verbrennenden Abgasen. Jedoch ist sie bis zu einer Größe von 60.000 Nm³/h beschränkt, wohingegen die RNV beliebig groß auslegbar sei. In der Praxis bereiten z.B. Verschmutzungseffekte beim Verbrennen (bei Produzenten mehrerer Lacke) der RNV größere Probleme.

Die TNV wurde anfangs nur anhand der Randbedingungen konzipiert, eine tiefgreifende Forschungs- und Entwicklungsarbeit gab es vorher nicht. Auch werden viele Nachverbrennungsanlagen bei der

Planung überdimensioniert. Der Kunde fordert z.B. eine „Verbrennungskapazität“ für die Produktion von 50 Stück – jedoch werden im Betrieb anschließend nur 25 produziert. In den letzten drei Jahren haben viele größere Kunden aber in ihrer Planung von Neuanlagen den Minimaldurchsatz mitbedacht. Wieviel überdimensionierte Anlagen in Deutschland noch in Betrieb sind, ist nicht bekannt.

6. Technologiezyklus- und Innovationssystem-Analyse

Für die Analyse des Technologiezyklus und Innovationssystems wurde sowohl eine Patentanalyse als auch eine Publikationsanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Patentanalyse hat sich gezeigt, dass der Trend bei Betrachtung der letzten 20 Jahre steigend war, in der kurzfristigen Vergangenheit allerdings die Tendenz zur Stagnation aufweist. Nach weltweiter Betrachtung nach transnationalen Patenten sind Frankreich, USA, Deutschland und China (absteigende Reihenfolge) als führende Länder hinsichtlich der Anzahl an Patenten zu nennen. Die Zahlen beziehen sich auf eine Analyse transnationaler Patentanmeldungen am Europäischen Patentamt oder bei der internationalen Patentorganisation WIPO. Somit handelt es sich um Patentanmeldungen (siehe Abbildung 8), welche jeweils in mehreren Ländern angemeldet wurden.

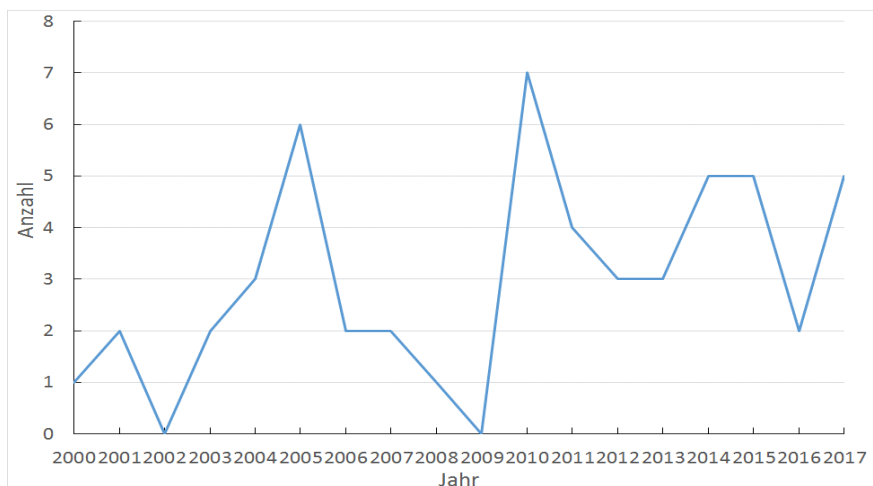


Abbildung 8: Patentanmeldungen zwischen 2000 und 2017

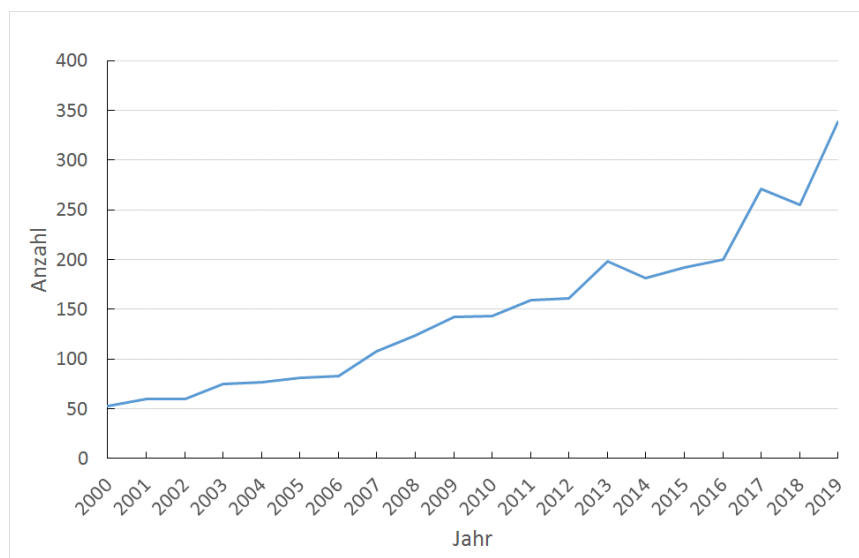


Abbildung 9: Publikationen zwischen 2000 und 2019

Die Publikationsanalyse (siehe Abbildung 9) führt zu dem Ergebnis, dass der Trend über die letzten Jahre konstant einem Anstieg gefolgt ist. Hierbei übernimmt China den dominanten Part, gefolgt von USA, Indien, Spanien und Frankreich. Ein Grund dafür, dass beispielsweise Indien und Spanien nicht in der zuvor dargestellten Patentanalyse erwähnt wurden, kann sein, dass eine Anmeldung eines transnationalen Patents mit entsprechen höheren Kosten einhergeht, sodass dieses unter Umständen nur für wertvolle Patente mit einer entsprechend hohen Ertragserwartung erfolgt.

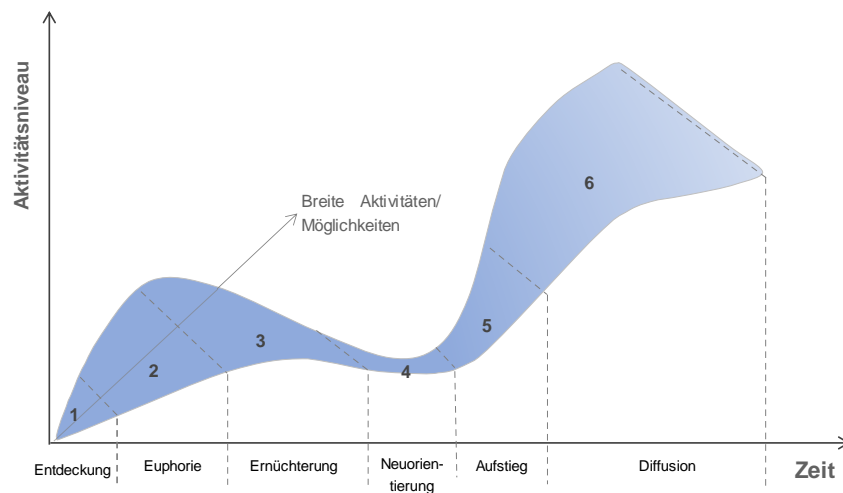


Abbildung 10: Technologiezyklus

In der Technologiezyklus-Analyse (siehe Abbildung 10) sind die Nachverbrennungstechnologien rekuperative TNV, RNV sowie KNV in den letzten drei Phasen anzusehen – insbesondere erstere ist weitestgehend ausgereift. Adsorptionsräder sowie Molekularsiebe werden in einigen Unternehmen bereits verwendet und könnten sowohl für Neuanlagen wie auch bestehende größere Altanlagen in den nächsten vier Jahren einen höheren Stellenwert einnehmen. Branchenübergreifend sind diese beiden Technologien in den Bereichen 4 und 5 einzuordnen. Die Wärmerückgewinnung in Form von Warm- und Heißwasser bzw. Öl wird bereits technisch in der Breite realisiert und ist im Bereich 5 und 6 einzuordnen. Hier liegt der Mangel für eine Diffusion vorwiegend an den Kosten für Nachrüstungen von Bestandsanlagen bzw. an den fehlenden Abnehmern der Energie, sollte das Unternehmen selbst diese nicht für ihre Prozesse nutzen können.

7. Ableitung von Entwicklungspotenzialen sowie Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen

Im Fachgespräch ergab sich, dass Forschungs- und Entwicklungsthemen pauschal nicht abzuleiten sind. So existiert z.B. die Technologie zur Kondensation von Lösemitteln in der chemischen Industrie, jedoch ist nur bei besonders teuren Lösemitteln eine Rückgewinnung wirtschaftlich. Das Verhältnis der Kosten von Sprühflüssigkeit zu Lösemittel ist meist zu hoch. Für einen breiteren Einsatz ist es erforderlich diese Grenzkosten im Vergleich zur Nachverbrennung deutlich zu senken und die Qualität der rückgewonnenen Lösemittel den Anwendungsanforderungen entsprechend zu garantieren. Die CO₂-

Besteuerung könnte diese Technologie zukünftig für die Industrie wieder interessanter machen. Die Kondensation sollte deshalb weiter im Blick behalten werden und eine mögliche Förderung in Form eines Forschungs- und Entwicklungsprojekt in Erwägung gezogen werden.

Bei den Adsorptionsmaterialien für Adsorptionsräder und Molekularsiebe handelt es sich hauptsächlich um Zeolithe oder Aktivkohle, welche heute bereits sehr robust und langlebig arbeiten. Generell sind besonders effiziente Materialien sehr teuer. Die Technologie ist sehr komplex, wird von wenigen Herstellern angeboten und meist nur von diesen weiterentwickelt. Hier gelten japanische Unternehmen als Vorreiter und stehen konkurrenzlos an der Spitze. Eine Förderung zur Entwicklung neuartiger Materialien wäre zwar denkbar, jedoch wurde in einem dem Fachgespräch nachfolgendem Einzelgespräch nochmals betont, dass die japanischen Hersteller trotz ihrer „Monopolstellung“ diese nicht ausnutzen, weshalb neue Entwicklungsbemühungen derzeit keinen langfristig wirtschaftlichen Vorteil versprechen. Somit sind Vorhaben in diese Richtung, wenn überhaupt, nur als Grundlagenforschung im universitären Bereich sinnvoll. In diesem Zusammenhang wurden unter anderem MOFs (Metal-organic frameworks) genannt, welche potenzielle Anwendungsgebiete in der Gasspeicherung von z.B. Wasserstoff oder Methan, zur Stofftrennung, Sensorik oder auch Katalyse haben. Ein großes deutsches Chemieunternehmen arbeitet derzeit mit zwei Varianten, gibt jedoch keine Daten preis oder stellt Muster hierzu nicht zur Verfügung. Da die bisher verwendeten Adsorptionsmaterialien aber bereits sehr effektiv arbeiten, gibt es seitens der Anlagenbauer wenig Bestrebung bestehende Adsorptionssysteme zu ändern.

Vor allem weist der Desorptionsprozess einen hohen Energiebedarf auf (und verursacht somit CO₂ und erhöht Kosten), welcher durch neuartigere Technologien fernab von Druckänderungen oder Temperaturerhöhungen gesenkt werden könnte. In diesem Zusammenhang wurden Radio- sowie Mikrowellenerwärmung genannt, welche aufgrund der geringen Eindringtiefe in modularer Bauweise konzipiert im Labormaßstab erfolgreich eingesetzt wurden. Bemühungen für eine Weiterentwicklung oder Skalierung auf einen größeren Maßstab sind hingegen nicht bekannt.

Die durch den Sevilla-Prozess im Jahre 2019 erarbeitete und empfohlene BVT Molekularsieb wird bisher noch nicht in der Breite eingesetzt und ist der Kundschaft der Anlagenbauunternehmen sowie der Wirtschaft oft nicht bekannt, obwohl die Technik bereits vor ca. 20 Jahren durch das BMWF gefördert wurde. Die meisten deutschen Hersteller bieten die Aufkonzentration von Lösemittel mittels Adsorptionsräder an, jedoch fehlt das Molekularsieb für eine vorherige Glättung und Vermeidung von Konzentrationsspitzen noch in einigen Portfolios. Laut einer Expertenmeinung aus der Anlagenplanung gelten die lösemittelverarbeitenden Branchen wie Druck-, Lack-, Pharma- und Lebensmittelindustrie bereits zu den Paradebranchen für eine breitere Anwendung von Glättern. Hemmend wirken hierbei Einsätze mit sehr hoher Feuchte, durch die hochsiedende Komponenten sich anreichern können und Druckverluste, welche durch das Sieb systembedingt entstehen. Da es wenige Anwendungen gibt, welche 24 Stunden lang eine gleichhohen Lösungsmittelkonzentration aufweisen, kann eine Glättung trotz des damit verbundenen Druckverlusts dennoch wirtschaftlich sein und somit die höheren Investitionskosten rechtfertigen. Jedoch kann es abhängig von der Zusammensetzung des Lösemittelgemische zu ungewünschten, spontanen Desorptionseffekte kommen, welche für eine Vielzahl von „klassischen“ Anwendungen in den letzten Jahren aber bereits kontrolliert und verhindert werden konnten. Dennoch gilt es Glätter durch Kombination der Molekularsiebarten entsprechend der

zu erwartenden Lösemittelgemische in der Abluft auszulegen und im Zweifel vorab zu testen. Die bisher seitens eines Anlagenplaners weltweit verbauten Molekularsieve wurden auf 50 Anwendungen geschätzt, welche Abluftströme von geringen 1.000 bis hohen 160.000 – 200.000 m³/h behandeln können. Aufbauend auf der Technik der Glätter (siehe Abbildung 11) entwickelt ein Anlagenplaner Energiespeicher, welche die Lösungsmittel langfristiger speichern kann und die Reinigung in einem deutlich geringeren Betriebspunkt erlaubt. Hierbei liegt der Fokus nicht auf Anwendungen, welche die hinten anfallende Wärme dauerhaft nutzen, sondern auf der Vermeidung von Wärme bzw. auf Verlagerung der Wärmeentstehung zu Zeiten, in welcher sie tatsächlich benötigt wird. Die Patentanmeldung soll in diesem Jahr erfolgt sein.

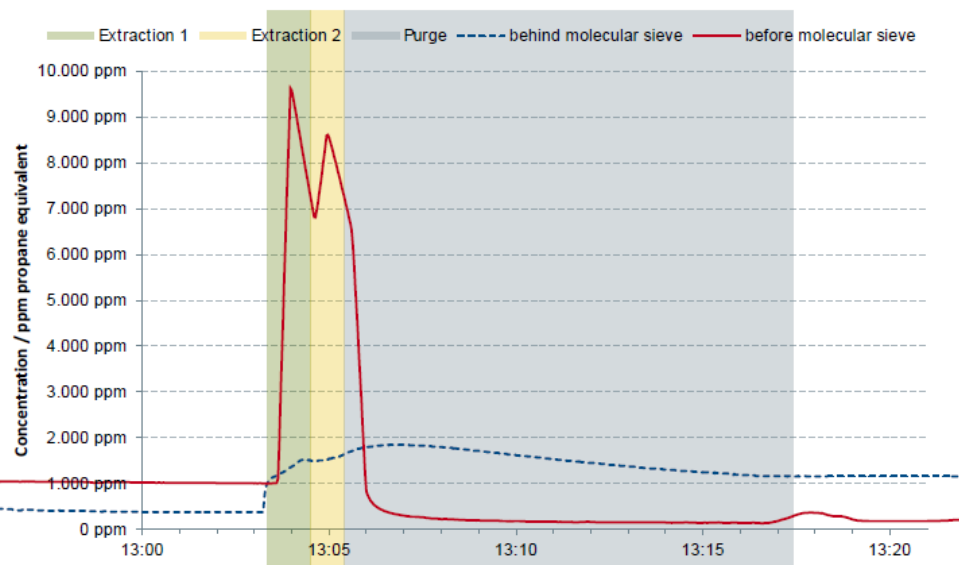


Abbildung 11: Funktionsweise eines Molekularsiefs [30]

Ein Anlagenbauer legte im Jahr 2020 für einen Lackierbetrieb erstmals eine Abluftreinigungsanlage mittels Mikrogasturbinen (MGT) aus, welche den Gasbedarf reduziert und ähnlich einer KNV arbeitet. Die Abluft wird zunächst aufkonzentriert, bevor sie in den dahinter geschalteten sechs MGT verbrannt wird, deren Robustheit durch erfolgsversprechende Vorprojekte bestätigt werden konnten. Die erwartbare gesamte Stromleistung bzw. thermische Leistung wird auf ca. 360 kW bzw. 700 kW geschätzt. Eine MGT kann Volumenströme von jeweils 1.500 m³ behandeln, wobei aufgrund der bisherigen Gestaltung der Brennkammer und der kurzen Verweilzeit die Reingaswerte nicht erreicht werden, weshalb ein Katalysator nachgehalten wird. Vorteilhaft in diesem Setup ist, dass die Abluft nach der MGT schon Temperaturen von ca. 320 °C aufweist und eine weitere Erwärmung für die Endreinigung nicht notwendig ist. Die Wärme der Abluft wird abschließend mit Wasser und Wärmetauschern genutzt, um die Produktion zu versorgen. Das Projekt konnte nur aufgrund einer KfW-Förderung und der Bereitschaft des Kunden etwas Neues auszuprobieren realisiert werden und weist eine Amortisationsdauer von ca. 10 Jahren auf, welche ja nach Auslastung der Produktion und abhängig der Energiepreise auch kürzer ausfallen kann.

Im Zusammenhang mit einer geplanten elektrischen Variante der RNV musste der betreffende Anlagenbauer aufgrund seiner Insolvenz die Entwicklung einstellen. Generell werden in der Anlagenbaubranche im Bereich Nachverbrennung erst auf Kundenwunsch neuartige Systeme

angefertigt und an die Bedürfnisse angepasst. Ein anderer Anlagenbauer bietet bereits seit Mitte der 80er Jahre eine solche Technologie an und kann auf über 600 Referenzen weltweit verweisen. Gerade im aktuellen Umfeld der Elektrifizierung und CO₂-Einsparung ist die elektrisch-betriebene RNV sehr gefragt. Hinderlich ist hierbei im deutschsprachigen Bereich vorwiegend der hohe Strompreis. Eine Senkung des Preises sowie ein zukünftiger Strombezug aus erneuerbaren Energien könnte einen deutlichen Sprung in Richtung umweltfreundlicherer thermischer Abgasreinigung bringen.

Wasserstoff als Ersatz von zusätzlich benötigtem Erdgas zum Erreichen des autothermen Bereichs wird erst bei Überschuss in der Zukunft ein Thema, zumal es viele alternative Brennstoffe gibt, welche leichter herzustellen und lagerbar sind. Einen Einsatz von Wasserstoff ergibt derzeit nur dort Sinn, wo er entsteht. Das ist oftmals im groß-industriellen Umfeld der Fall, wo der Strombedarf selten gedeckt ist, weshalb der Wasserstoff meist vor Ort verbraucht wird und nicht durch Synthese in alternative Energieträger bzw. als Brennstoff für entfernte Abgasreinigungsanlagen zur Verfügung zu stellen, um anschließend wieder Wärme zu erzeugen.

Bei der Auslegung von Nachverbrennungsanlagen mit höchster Energieeffizienz sind zum Teil die geforderten Grenzwerte der BImSchG ein bremsender Faktor. Obwohl durch effizientere Maßnahmen die CO₂-Werte in der Summe niedriger ausfallen würden, muss auf diese verzichtet werden, sollten die Grenzwerte bzw. Konzentrationen nicht eingehalten werden. Die Folge ist ein erhöhter Energieverbrauch bei geringerer Konzentration aber insgesamt mit höherer CO₂-Emissionsabgabe. Die Betrachtung der CO₂-Bilanz als politisches Mittel bezüglich der Regulatorik neben der BImSchG ist jedoch bereits Teil des Energieforschungsprogramm und wird dort weiter thematisiert.

Bisherige Anlagen sind auch meist bewusst nicht bis zum letzten Effizienzgrad ausgelegt, um die Ausfallkosten und -zeiten möglichst gering zu halten, oder um auf Produktionsumstellungen flexibler reagieren zu können. Aus Sicht der Anlagenbauer können neuartige Technologien sowie besonders effiziente Anlagen jedoch nur dann platziert werden, wenn die Kundschaft bereit ist diese komplexeren Anlagen zu betreiben und Mitarbeitende zur Verfügung stellt, die sich um den Betrieb und die Wartung kümmern. Bei großen Unternehmen kommt erschwerend hinzu, dass die Planung von energieeffizienteren Maßnahmen zunächst deutlich mehrere Hierarchiestufen durchlaufen müssen. Zusätzlich werden Amortisationszeiträume über 3 Jahren meist als inakzeptable angesehen. Familiengeführte KMUs hingegen stehen oft vor der Frage, ob sie in 2-3 Jahren große Produktionsänderungen zu erwarten haben, weil sie womöglich andere Produkte herstellen und sich deshalb eine angepasste energieeffiziente Auslegung nicht rechnet. Die Flexibilität der Abluftreinigung konkurriert somit mit der Energieeffizienz. Laut einem Anlagenbauer ist z.B. eine ORC-Anlage aufgrund der 40% Förderung mittlerweile zwar wirtschaftlich und rechnet sich nach ca. 5-6 Jahren. Die gewünschte Amortisierungszeit mit 2-3 Jahren in der Privatwirtschaft liegt deutlich darunter, weshalb Unternehmen derartige Erweiterung zu selten einsetzen.

8. Ableitung von Policy-Maßnahmen und Empfehlungen

Der beste Umgang zur Vermeidung unnötiger Emissionen erfolgt durch die ganzheitliche Systembetrachtung. So gilt es Bedarfe für Energierückführung zu schaffen. Sollte ein Betreiber einer Anlage hierfür nicht in der Lage sein, muss Unterstützung durch Beratung erfolgen. Die erforderlichen Stellschrauben sind besonders bei Bestandsanlagen oftmals schwierig zu identifizieren. Hier können

umfangreiche Voruntersuchungen oder Messkampagnen nötig sein, welche mit hohen Kosten verbunden sind. Durch geeignete Förderinstrumente, die Beraterkosten übernehmen, würden die betreibenden Unternehmen entlastet werden. Bei der Planung neuer Produktionsanlagen sollte die Reinigung und ggf. mögliche Rückführung von Energie von Beginn an berücksichtigt werden. Wie im Bereich der Solarthermie könnte hierfür ein branchenspezifischer Leitfaden zielführend sein, welcher dem Anlagenbetreiber trotz Komplexität und Überforderung eine schnelle Ableitung sinnvoller Maßnahmen ermöglicht. Hierbei muss der Fokus zunächst immer auf der Vermeidung vor der Verbrennung der VOCs liegen. Der Aufwand zur Erstellung solcher Leitfäden wird seitens eines Anlagenbauers auf 3 bis 4 Monate redaktionelle Arbeit geschätzt inkl. Reisetätigkeit und Gesprächen mit Herstellern. Bisher scheiterte eine Ausarbeitung an den begrenzten Mitteln der Unternehmen, welche solche Leitfäden gerne konzipieren würden.

Auf die Frage nach der Transparenz der Gesamtsituation bzw. der gesamtwirtschaftlichen Bewertung bezüglich möglicher Energiepotentiale in der Abgasreinigung können keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Aufgrund der unterschiedlichen Anlagenarten ist eine Aufarbeitung sehr aufwändig. Ein Ansatzpunkt wäre hier die Erstellung eines TNV-Katasters mit möglichen Daten zu Volumenstrom, Gasbedarf, Anlagengröße, Temperatur-Niveaus. Hierfür existiert bereits ein Emissionskataster, welcher aber ausgewertet und um den Gasbedarf erweitert werden müsste. Jedoch fehlen zum Teil Gaszähler an den Anlagen, oder diese können nur vor Ort abgelesen werden. Außerdem zeigen einige Gaszähler nicht nur den Verbrauch der Nachverbrennungsanlage an, sondern beinhalten auch den Verbrauch anderer Maschinen und Anlagen. Des Weiteren gilt es auch weitere Aspekte wie Wetter, Rohrführung und generell deren Ausmaße zu berücksichtigen. Auch lassen sich die Ergebnisse von Anlage A nicht so einfach auf Anlage B übertragen, sofern diese nicht exakt baugleich sind. Somit ist die Schaffung einer Übersicht sehr komplex. Ein erster Schritt könnte durch Schaffung eines „use case“ mit Annahmen sein, wobei hierfür die Definition eines solchen zunächst noch diskutiert werden müsste. Sofern möglich und datenschutzrechtlich erlaubt könnten aber bereits vorhandene Daten bei den größten Anlagenbauern wie Eisenmann und Dürr, welche einen Großteil der in den letzten Jahrzehnten gebauten Nachverbrennungsanlagen *abdecken*, für eine Datengrundlage sorgen.

9. Zusammenfassung

Die thermische Nachverbrennung (TNV) ist ein Verfahren, um prozessbedingte Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Industrie so weit zu vermindern, dass die gesetzlichen Bestimmungen der Grenzwerte eingehalten werden. Aus der TNV entwickelten sich über die Jahre die energieeffizienteren Varianten der katalytischen und regenerativen Nachverbrennung. Diese haben die klassische TNV weitestgehend verdrängt und sind technologisch bereits ausgereift. Das Verhältnis von RNV zu KNV wird in Deutschland auf ca. 70:30 geschätzt. Klassische TNV-Anlagen selbst werden zum Teil nur in der chemischen Industrie oder in Form von Altanlagen betrieben. Anhand der Industrieemissionsrichtlinie und BImSchV lässt sich der Gesamtanlagenbestand von Nachverbrennungsanlagen in Deutschland in einem hohen vierstelligen Bereich verorten.

Bei der Auslegung von Produktionsanlagen hat die Vermeidung von VOCs die höchste Priorität, weshalb eine ganzheitliche Systembetrachtung unerlässlich ist. Sollte eine thermische Nachverbrennung notwendig werden, sollte die Wärme der gereinigten Abluft durch

Energierückgewinnung genutzt werden, indem sie z.B. in den Produktionsprozess im Unternehmen zurückgeführt wird. Oftmals liegen aber keine Bedarfe vor, weshalb Energie ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Aufgrund eines fehlenden Energie-Katasters für Nachverbrennungsanlagen lässt sich bislang auch nicht abschätzen, wieviel Bestandsanlagen durch Nachrüstungen zukünftig energieeffizienter betrieben werden könnten. Fraglich ist, sofern Daten einzelner Anlagen überhaupt vorhanden sind, ob die einzelnen Unternehmen und Anlagenbauer dazu bereit wären, diese für einen Kataster bereitzustellen. Die Hemmnisse hierfür können datenrechtlicher, personeller oder unternehmenspolitischer Natur sein. Das ungenutzte Potenzial wird seitens der Beteiligten der Einzelgespräche und des Fachgesprächs sehr hoch vermutet.

Neben den einzelnen Energierückgewinnungsmethoden kann die Energieeffizienz durch Adsorptionsräder und Molekularsiebe erhöht werden. Hierbei werden die VOC-beladenen Abluftströme durch erstere aufkonzentriert und zweitens geglättet. Die Folge ist ein leichter erreichbarer bzw. stabilerer autotherme Bereich, wodurch weniger zusätzlicher fossiler Brennstoff nötig ist und die damit verbundenen Kosten sowie zusätzlichen CO₂-Emissionen entfallen. Beiden Technologien sind abhängig von den verwendeten Lösungsmittelgemischen kombinierbar und werden als Beste-verfügbare-Techniken empfohlen. Im Vergleich zu Adsorptionsrädern werden Molekularsiebe bislang noch selten eingesetzt.

10. Literaturverzeichnis

- [1] „,Energieeffiziente Verstromung von VOC (VOCStrom),“
<https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201102665/1%22.>“
- [2] „,Verbundvorhaben Energieeffiziente Abluftbehandlung (EnAB),“
<https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201083886/1%22.>“
- [3] „,Verbundvorhaben EnergyTex: Neue Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Nutzung lösemittelhaltiger Abluftströme in Produktionsprozessen der Textilindustrie,“
<https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201181705/1%22.>“
- [4] „,VDI-Richtlinie 2441: Prozessgas- und Abgasreinigung durch Kaltplasmaverfahren,“
BeuthVerlag, Berlin, Mai 2016.“
- [5] „,31. BImSchV - 31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes,“
[https://www.bmu.de/gesetz/31-verordnung-zur-durchfuehrung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes/.](https://www.bmu.de/gesetz/31-verordnung-zur-durchfuehrung-des-bundes-immissionsschutzgesetzes/)“
- [6] T. Reindorf, „Modellierung und Analyse des Betriebsverhaltens von thermischen Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung,“ Technische Universität Clausthal, 2015.
- [7] „,Rohrbündelwärmeübertrager,“ 16 Februar 2020.
<https://de.wikipedia.org/wiki/Rohrb%C3%BCndelw%C3%A4rme%C3%BCbertrager.>“ 2020.
- [8] O. RENTZ, S. NUNGE, M. LAFORSCH und T. HOLTSMANN, „Technical Background Document for the Actualisation and Assessment of UN/ECE Protocols related to the Abatement of the Transboundary Transport of Volatile Organic Compounds from Stationary Sources,“ Report of the Task Force on the Assessment of the Abatement of the Transboundary Transport of Volatile Organic Compounds from Stationary Sources, Karlsruhe, September 1999.
- [9] F. J. 2006, Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen.
- [10] M. Nitsche, Abluft-Fibel, Reinigung lösemittelhaltiger Abgase, Springer.
- [11] Flächenbrenner, „Flächenbrenner. http://saacke.de/classes/technical-group_pdf.php?we_objectID=1966&TableID=15..“
- [12] Duoblock-Gebläsebrenner, „Duoblock-Gebläsebrenner.
https://www.elco.ch/de/resources/downloads/produktflyer/MKT_281013_Duoblock_DE.pdf“.
- [13] ADEME, MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT: *La Réduction des Emissions de Composés Organiques.*
- [14] VOGEL, U.; CEDRASCHI, P.: *Verfahren zur Verminderung der Kohlenwasserstoffemissionen in der.*
- [15] „DFIU-Karlsruhe, Umsetzung der IVU-Richtlinie: Lack- und Klebstoffanwendung“.
- [16] „,Durr.com,“ <https://www.durr.com/de/produkte/umwelttechnik/abgas-und-abluftreinigung/>“.

- [17] JAUNS-SEYFRIED, S.: *Simulation des Betriebsverhaltens von Festbettregeneratoren in thermischen*.
- [18] CARLOWITZ O.: *Thermische Verbrennung mit regenerativer Abgasvorwärmung, VDI-BERICHT 124,*.
- [19] BANK M. : *Basiswissen Umwelttechnik, Vogelverlag 1995.*
- [20] *Eisenmann Maschinenbau KG, Böblingen: Umwelttechnik: Abluftreinigung, 2001.*
- [21] *VDI2587, Blatt 3.*
- [22] „„Krantz GmbH,“ 2020. <https://www.krantz.de/de/ueber-uns/liefer-und-leistungsspektrum/clean-air-solutions,>“ 2020.
- [23] Rotamill, „Rotamill, „Wärmetechnik,“ <https://www.rotamill.de/waermetechnik/waerme/>“.
- [24] „Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin...,“ [Online]. Available: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/106/1710605.pdf>. [Zugriff am 15 Juni 2020].
- [25] BVT, „TEXTE46/2020 Für Mensch & Umwelt, Innovative Techniken: Festlegung von besten verfügbaren Techniken (BVT) im Bereich der Lösemittelanwendung Abschlussbericht Umwelt Bundesamt“.
- [26] „Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen,“ 26 März 2020. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2010/75/EU_%C3%BCber_Industrieemissionen.
- [27] G. Preuß, „VDMA, Fachverband Allgemeine Lufttechnik, Auftragseingang und Umsatz für Luftreinigungstechnik im Jahr 2017,“ März 2019.
- [28] D. S. W. H. Meyer, *Entwicklung und Bewertung von Verfahrensansätzen zur Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie in regenerativen thermischen Abgasreinigungseinrichtungen.*
- [29] „„Adsorptionsrad,“ <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/abfallprodukt-loesemittel-sinnvoll-genutzt/>“.
- [30] „Rafflenbeul Anlagenbau, 2015; Innovative Techniken: Festlegung von besten verfügbaren Techniken (BVT) im Bereich der Lösemittelanwendung; 46/2020 Umweltbundesamt“.