

Dipl.-Ing. Rudolf Rafflenbeul

Die Abluftreinigungsanlage als Energiezentrale



RAFFLENBEUL ANLAGENBAU GMBH

Voltastraße 5

D-63225 Langen (Hessen)

Tel.: +49 (0) 6103 / 30 09 78

Fax: +49 (0) 6103 / 28 06 65

E-Mail: rafflenbeul@envisolve.com

www.envisolve.com

Vor 20 Jahren waren VOC-Abluftreinigungsanlagen Energievernichtungseinrichtungen. Der Einsatz thermischer Energie in Druckereien, in Tuben- und Dosenproduktionen sowie in Beschichtungsbetrieben wurde durch die Verwendung thermischer Abluftreinigungsanlagen oft mehr als verdoppelt [1], [2]. Mit der Einführung der regenerativen Abluftreinigung kurz vor der Jahrtausendwende gelang es erstmals, Energieneutralität zumindest für die Abluftreinigungsanlage selbst durch sogenannte autotherme Reaktionen ab etwa 2 bis 2,5 g Lösemittel/m³ Abluft sicherzustellen [3].

Hierbei ist die Autothermie jener Betriebszustand einer Abluftreinigungsanlage, bei dem der Reinigungsprozess ohne Zusatz- bzw. Stützfeuerung erfolgt. Verfahrenswege zur Ausschleusung von Überhangenergie aus Abluftreinigungsanlagen erlaubten ab 2000 zunehmend interessante Reduktionen an Primärenergie.

Ende 2008 wurde weltweit zum ersten Mal die Autothermie einer Abluftreinigungsanlage mit <0,5 VOC/m³ erreicht. Hierfür wurden Molekularsiebssysteme (Duplex-Stationen) der eigentlichen Abluftreinigungsanlage vorgeschaltet. Durch diese Weiterentwicklung kann nun die gesamte in der Abluft vorhandene Lösemittelenergie als Wärme für die Trockner zur Verfügung gestellt werden [4].

Da z. B. in vielen Druckereien Kälteenergie heute noch mit Kompressionskälteanlagen erzeugt wird, ist bei konsequenter Anwendung dieser modernen Abluftreinigungsverfahren nicht nur der gesamte thermische Energiebedarf, sondern auch ein erheblicher Teil an elektrischer Energie einsparbar.

Die Energieverfügbarkeit

1 kg Lösemittel ersetzt heizwerttechnisch ca. 0,8 m³ Erdgas. Es ist somit ersichtlich, dass während der Trocknung von Druckfarben, Klebern oder Lacken enorme Energiemengen freigesetzt werden. Bei zwei bis drei Flexodruckmaschinen können dies 50 bis 70 kg/h Lösemittel (äquivalent rund 50 m³ Erdgas/h) sein. Bei größeren Produktionsbetrieben, z. B. mit mehr als fünf Tiefdruckmaschinen, werden über die Lösemitteläquivalente bis zu 1.300.000 m³ Erdgas/a einsparbar. Hierbei wird nicht nur der Energiebedarf für die Abluftreinigungsanlage und die Trockner der Druckmaschinen eingespart, auch die gesamte Kälteversorgung im Sommer und die im Winter erforderliche Beheizung der Werksanlagen und Büros werden in Beschichtungs- und Druckbetrieben über die Lösemittelenergie abgedeckt.

Der entscheidende Fortschritt seit 2008

Dieser Fortschritt zur Reduzierung des Energiebedarfs gelang über die Absenkung der Autothermie. Genau genommen dadurch, dass ein erheblicher Teil der Abluft nur noch physikalisch und nicht mehr thermisch gereinigt wird. Die Abluft wird vor der Verbrennung zunächst filtriert und dabei aufkonzentriert. Diese Aufkonzentration erfolgt über eine gestufte Molekularsieberanwendung. Dauerhaft ist somit ein sehr hohes VOC-Niveau in der verbleibenden Abluft für die Verbrennung konstant einhaltbar. Mittels Regel- und Steueroptionen innerhalb dieser sogenannten Duplex-Stationen [5] wird es möglich, permanent 7 bis 8 g VOC/m³ in der verbleibenden Abluft einzustellen, auch wenn kurzzeitig alle Druckmaschinen im Andruck befindlich oder ausgeschaltet sind. Über bewährte Verfahrenstechniken wird nun dauerhaft Heißgas mit bis zu 1.000 °C aus der Brennkammer der Abluftreinigungsanlage ausgeschleust. Mit diesem Heißgas wird Thermalöl bis auf 350 °C, Heißwasser bis auf ca. 150 °C oder Warmwasser bis 110 °C erhitzt. Hierdurch wird hochvalente Verbrennungsenergie wie in einer Kesselanlage in mittel- oder niedervalente Wärme (Öl, Heißwasser, Warmwasser) transformiert und somit für alle Verbraucher nutzbar. Mit Ausnahme der Betriebe, die Papier mit lösemittelfreien Einsatzstoffen bedrucken, ist ansonsten keine mittelvalente Energie für die Produktion erforderlich. Zur Kälteerzeugung und auch zur Beheizung der Trockner ist jedoch der Einsatz nieder- und mittelvalenter Wärmefractionen mit Heißwasser bis 150 °C empfehlenswert. Oft ist in historisch gewachsenen Betrieben noch eine Thermalölversorgung installiert, so dass die direkte Wärmeübertragung mit Thermalöl trotz schlechterem Wärmeübertragungsgrad beibehalten wird. Beispiele für diesbezügliche Anwendungen und die Funktion der Abluftreinigung sind ausführlich in vorausgegangenen Artikeln dargestellt [6], so dass nachfolgend die moderne Verfahrenstechnik zur Gesamtenergieversorgung des Werkes behandelt wird.

Die Aufkonzentrierung und Emissionsglättung von Abluft durch neue Adsorptionsmaterialien

Die Aufkonzentrierung als Adsorption ist ein seit langer Zeit bekanntes Verfahren [7]. Anfälligkeiten hinsichtlich dauerhaften Betriebes, insbesondere jedoch zu kurze Standzeiten der als Sorptionsmittel eingesetzten Aktivkohlen haben die heute für monomere Anwendungen immer noch erfolgreich in Betrieb befindlichen Adsorptionsanlagen im Bereich der Verpackung, der Beschichtung sowie der Tuben- und Dosenindustrie leider als nicht ausreichend wirtschaftlich offensichtlich gemacht. Im Akzidenzdruck zur Rückgewinnung von Toluol sind Adsorptionsanlagen bis heute die wirtschaftlichste und beste Option, um Abluft zu reinigen und Wertstoffe zurückzuerhalten. Dies obwohl es seit ca. 15 Jahren sogar gelingt, Ethylacetat, Ethanol und Drittfraktionen ohne Rektifikation getrennt aus der Abluft nach flexiblen Verpackungsbetrieben zurückzugewinnen [8].

Aus diesem Grunde hofft der Verfasser, die Lösemittelrückgewinnung mittels Duplex-Technik zumindest in Großbetrieben (>600 t Lösemittel/a) als prüfenswert und als rasch abschreibbare Option aufzeigen zu können.

Das Verfahrensprinzip

Gering konzentrierte Emissionen (<3 bis 4 g VOC/m³ im Mittel), die zudem in stark schwankender Konzentration vorliegen können, werden zunächst über eine Molekularsiebfestbettstufe geführt. Diese Pufferstufe erfüllt fünf Aufgaben:

- a) Der Molekularsiebpuffer adsorbiert hochmolekulare Abgasspurenstoffe, die ansonsten das nachfolgend geschaltete Molekularsiebaufkonzentrationsrad nach wenigen Jahren inhibieren.
- b) Das vorgeschaltete Molekularsiebfestbett homogenisiert Konzentrationsunterschiede in der Abluft. Hierdurch wird der effektive Einsatz des nachgeschalteten Molekularsiebadsorberrades durch die unverzichtbare Voraussetzung einer stabilen Eingangskonzentration ermöglicht.
- c) Mit dem Molekularsiebpuffer werden in Verbindung mit b) Konzentrationsspitzen des Originalabgases abgeschnitten (gepuffert) und in Bezug auf die nachgeschaltete Konzentrationsvervielfachung im Rotationsadsorber unwirksam gemacht. Das bedeutet: Der später für die Aufkonzentrierung notwendige Rotationsadsorber kann mit hohem Konzentrationsfaktor eingesetzt werden. Dies ist ein extrem wichtiger und insbesondere investitionskostenparender Vorteil.
- d) Der Molekularsiebpuffer stellt eine technisch durch andere Systeme nicht zu überbietende Sicherheitseinrichtung gegen brand- und explosionsgefährliche Konzentrationen vor Abluftreinigungsanlagen dar. Verdünnungen und aufwendige Sicherheitsregelkreise, wie sie in der Vergangenheit vor Abluftreinigungsanlagen in Druckbetrieben u. a. nach Waschmaschinen zwingend erforderlich waren, können entfallen. Die gesamte Abluftreinigung wird vereinfacht.
- e) In Betriebszeiten mit sehr geringer oder ohne VOC-Emission, in denen die Abluftreinigungsanlage jedoch im Stand-by verbleiben muss, liefert das im Molekularsiebpuffer zurückgehaltene Lösemittel nun den größten Teil der überhängenden Heizenergie.

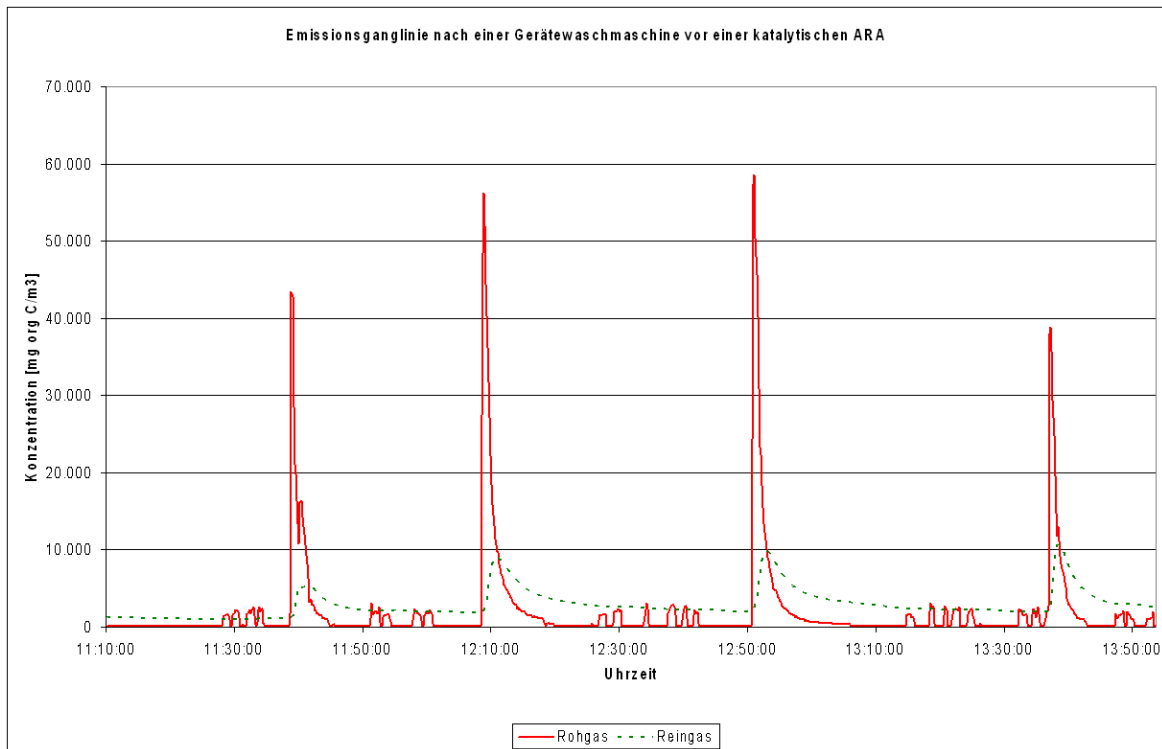


Abbildung 1: Glättung von VOC-Emissionen nach Waschmaschinen

Aufbau eines Molekularsiebpuffersystems

In Abbildung 2 sind die Adsorptionsisothermen verschiedener Substanzen abgebildet [9].

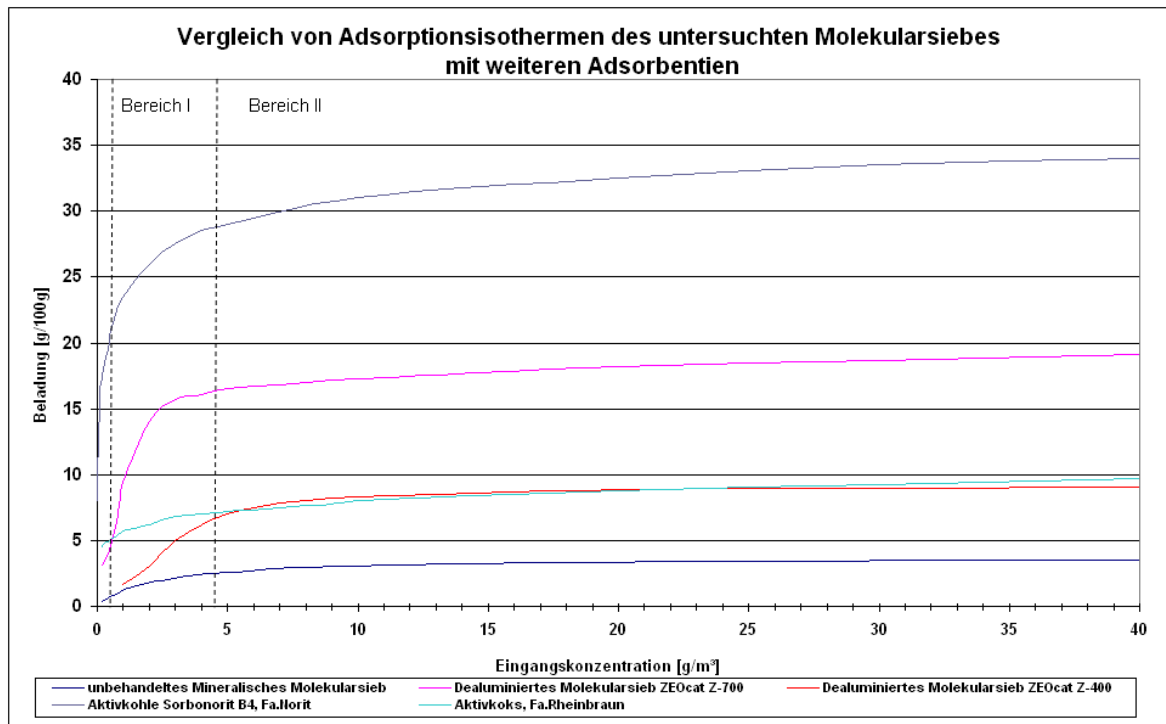


Abbildung 2: Adsorptionsisothermen

Auffällig ist, dass Aktivkohle mit weitem Abstand die beste und effektivste Zurückhaltung organischer Substanzen ermöglicht. Im Falle eines Molekularsiebpuffers steht diese Eigenschaft jedoch nicht im Vordergrund. Zwar erlaubt die Verwendung von Materialien mit hohem Adsorptionsvermögen den Bau kleiner Apparate, in Bezug auf das Gesamtvolumen eines solchen Behälters ist dieser Aspekt jedoch kostenmäßig vernachlässigbar. Die zweite negativ wirkende Eigenschaft in der Adsorptionscharakteristik einer Aktivkohleeinheit ist die Sensibilität des Beladungsgrades bei unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlichen Konzentrationszuständen. Das heißt, bereits geringe Temperaturschwankungen zwischen 10 und 15 °C können einen Aktivkohlepuffer zu starken unerwünschten Desorptionsvorgängen veranlassen. Zum anderen muss die Entnahmecharakteristik von Lösemittel aus der Kohle über Steuervorgänge und eine spezielle Luftführung (Bypass- und Kreislaufführung) dann ausgeregelt werden, wenn plötzlich zu hohe Desorptionsraten aufgrund von Produktumstellungen im Druckbetrieb gegeben sind. Erhebliche Brände und Anlagenzerstörungen mit Aktivkohleanlagen als Puffereinheit vor industriellen Anwendungen haben in den vergangenen 20 Jahren Millionenschäden verursacht [10], obwohl die Kohle zum Teil durch Kalk oder Sand inhibiert bzw. durch andere Zusatzstoffe porenmäßig selektiert wurde (Vermeidung von Mikroporen, z. B. durch den Einsatz von Herdofenkoks).

Originäre mineralische Zeolithe ermöglichen als die am besten bekannten Molekularsiebe bereits eine günstigere Anwendung, weil die spezifische Beladung auch im unteren Bereich der Lösemitteladsorption im Materialgefüge inhomogen verläuft. Die bei der Aktivkohle im Zuge der Desorption üblicherweise angestrebte Beladungsfront ist im Falle von Molekularsiebanwendungen mit entsprechender Vorbehandlung als verzogene Fahne ersichtlich [vgl. 8]. Diese bei konventionellen Adsorptionsvorgängen unbedingt zu vermeidende Fahne führt zwar zu keiner maximalen Beladung des Puffermaterials, sie reguliert jedoch in einer für technische Vorgänge zeitlich langsamen Funktionsweise (Minuten) spontan auftretende Konzentrationsspitzen und erlaubt die gegebenenfalls auch notwendige Anwendung konventioneller Steuertechnik hinsichtlich Ableitung oder Verdünnung einer mit kritischer Lösemittelmasse eintretenden Emission in den Puffer selbst. In Abbildung 3 ist die Glättung der Emissionsganglinie eines Ethylacetat-/Ethanol-Lösemittelgemisches nach Tiefdruckmaschinen und einer Waschmaschine dargestellt.

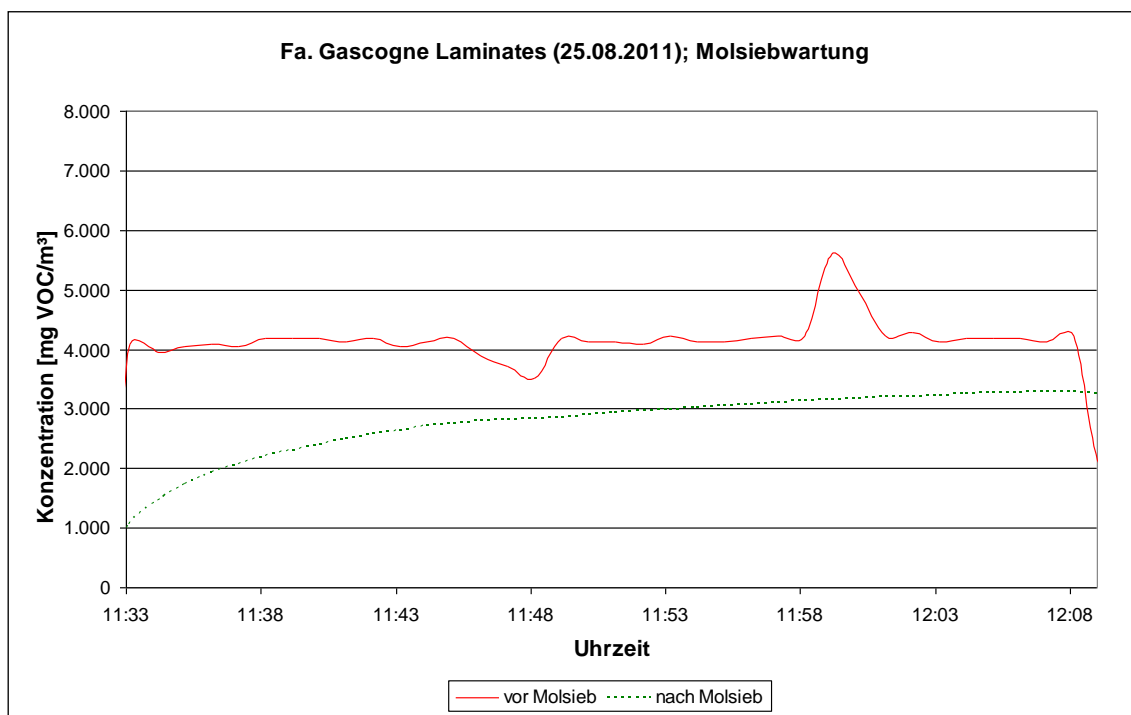


Abbildung 3: Glättung der Emissionsganglinien von Lösemittelgemischen (mit freundlicher Genehmigung von Fa. Gascogne Laminates Germany GmbH)

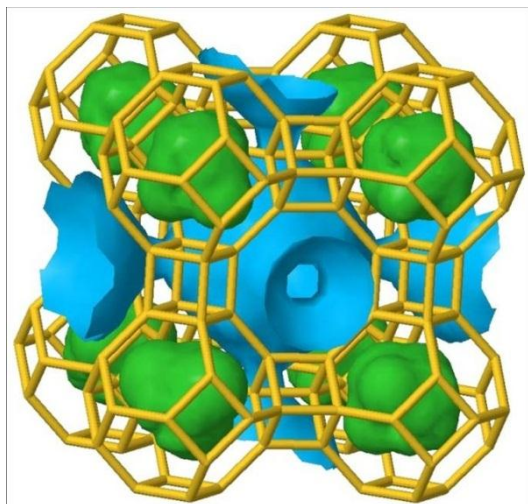
Zum Erreichen des Glättungseffektes können auch natürliche Molekularsiebe mit stark hygroskopischen Eigenschaften durch chemische Vorbehandlung hydrophobiert und mit synthetischen Molekularsieben verschnitten werden. Die Verwendung eines geringen Anteils Aktivkohle (bis ca. 5%) ist unter Umständen möglich, wenn keine selbstoxidierenden Lösemittel (Ketone etc.) vorhanden sind. Da die Kosten des hydrophobierten Molekularsiebes unterhalb der Kosten von Aktivkohle befindlich sind, ist eine solche – als Ausnahme denkbare – Option jedoch nicht begründbar.

Trotz ausreichender Erfahrungswerte bei nunmehr ca. 30 Anlagen wird das hier gegebene Ad- und Desorptionsverhalten über kalorische Konzentrationsmessgeräte überwacht. Eine Regelung oder Steuerung ist nicht erforderlich, die Überwachung dient lediglich der sicheren Kontrolle zwecks Einhaltung der nach dem Puffer zulässigen Grenzkonzentration.

In dem zuvor dargestellten Beispiel sind Rohgaskonzentrationen zwischen 200 mg/m³ und ca. 10 g VOC/m³ möglich, die nach dem Puffergefäß mit maximal 2,2 g/m³ an einen Rotationskonzentrator abgegeben werden. Im Rotationskonzentrator erfolgt die Aufkonzentrierung der Emission bis auf bspw. 4 bis 8 g VOC/m³ mit Maximalgrenzwerten bis 14 g/m³. Je nach Größe, Auswahl des Puffermaterials und den zu behandelnden Emissionen sind jedoch auch Pufferungen im Bereich zwischen 0,1 bis 120 g VOC/m³ (>200% UEG) mit Austrittskonzentrationen zwischen 4 bis 16 g VOC/m³ in der technischen Anwendung bereits realisiert.

Die Verbindung mit Rotationskonzentrationssystemen

Rotationskonzentratoren zur wirtschaftlichen Anwendung sind seit ca. 20 Jahren bekannt und im Einsatz. Die hierin ausschließlich eingesetzten Zeolithe (Abbildung 4) haben zwischenzeitlich die ab 1995 im Wettbewerb stehenden Aktivkohleadsorptionsräder komplett abgelöst. Das Risiko von Bränden und Explosionen ist bei diesen Systemen ausgeschlossen.



Jede Ecke – Gelb – steht für einen Al- oder Si-Käfig, die untereinander über Sauerstoffatome verbunden sind.

Grün sind die Leervolumina des Gitters, in denen die Lösemittel zurückgehalten werden.

Blau sind die Gaskanäle oder Gaswege markiert, über die VOC-Moleküle in das Gitter gelangen [8 bis 20 Å].

Abbildung 4: Kristallgitter Zeolith

Aufgrund der vorerwähnten erheblichen Störfälle hinsichtlich Überkonzentrationen mit Rotationskonzentratoren ohne vorausgehende Pufferung wurden nachgeschaltete Abluftreinigungsanlagen zerstört. Doch nicht das Risiko einer solchen Fehlanwendung, insbesondere die sehr frühe Inhibierung dieser Rotationskonzentratoren durch gasförmige Spurenelemente, wie Harzanteile, metallorganische Verbindungen oder Silan-/Silikonverbindungen haben auch im Bereich der Tuben- und Dosenherstellung und in der Druckindustrie zur Aufgabe des ab 1999 hoffnungsvoll in Europa eingesetzten Verfahrens geführt.

Mit der Vorschaltung von Molekularsiebpufferstufen sind diese Risiken beseitigt. Die Lebenszeit der Räder kann mehr als verdoppelt werden. Zerstörungen durch Brände oder Explosionen sind absolut sicher ausgeschlossen. Damit waren die Barrieren für die Anwendung dieser Technologie zur höchstwirtschaftlichen Nutzung von Lösemittlemissionen nach Druckereien erstmals ab 2008 beseitigt.

Steigerung der Energieeffizienz bei Druck- und Beschichtungsvorgängen

Moderne Druck- und Beschichtungsmaschinen besitzen heute Regel- und Steuereinrichtungen, mit denen die zur Trocknung eingesetzte Zuluft mehrmals durch den Trockner geleitet wird. Hierbei tritt bereits eine Aufkonzentrierung der Emissionen ein, die eine weitergehende Nachbehandlung im Duplex-System einsparen kann oder vereinfacht. Z. B. wegen Andruckvorgängen, der Stand-by-Zeiten und Begrenzungen der Beladepazität bei sehr geringen Druck- oder Beschichtungsdichten verbleiben Produktionszeiten mit geringen VOC-Konzentrationen in der Abluft. In solchen Fällen schaltet die Druckmaschine, die Tuben- und Dosenlinie oder die Beschichtungsanlage durch Konzentrationsmessgeräte gesteuert die Abgasweiche in Richtung Duplex. Hierdurch werden die wertvollen Lösemittel auch bei nur geringer Konzentration zurückgehalten und später für den Wärmeerzeugungsprozess nutzbar gemacht. Abluft mit geringer Konzentration wird demgegenüber permanent durch die Duplex-Anlage geleitet.

Mit 1 kg Lösemittel können ca. 300 m³ Trocknungsluft von 20 °C auf 80 °C erhitzt werden. Für den in der Praxis stehenden Betriebsleiter wird ersichtlich, dass in der Regel weit mehr Lösemittel emittiert werden, als zum heiztechnischen Betrieb seiner Trockner erforderlich sind. Doch wohin mit so viel Überhangwärme, wenn sie denn durch moderne Technologie zur Nutzung verfügbar gemacht ist?

Energieverbünde in Druckereien und Beschichtungsbetrieben

Nicht nur in der Politik gilt: „Small is beautiful!“ – auch in der Technik sind kleine angepasste Lösungen oft die optimale Option, um nachhaltig zu produzieren. Wie sehr Druckbetriebe mit dieser Meinung auch daneben liegen können, zeigen die Anwendungen im Rollenoffsetdruck. Dort werden noch heute Abluftreinigungsanlagen in Druckmaschinen integriert und den Anwendern als modernste Lösung verkauft. Zu Zeiten der billigen Energie waren solche Anlagen als Krone des Fortschritts gefeiert, war die Abluftreinigung doch gleich mit in der Druckmaschine vorhanden. Auch dann, wenn 50.000 m³/h Abluft mit oftmals 250 °C und mehr ins Freie geleitet wurden. Bis ins Jahr 2000 waren kaum Existenzsorgen im Rollenoffsetdruck gegeben und Energie war deshalb ein Thema für Praktikanten oder Berufsanfänger. Ganz anders im Bereich der flexiblen Verpackung. Hier wurden sehr früh Energieeinsparungen realisiert und bis heute weiterentwickelt. Diese Einsparungen betrafen die Rückführung von Wärmeenergie nach den Abluftreinigungsanlagen in die Trockner der Druckmaschinen mit außerhalb angeordneten Reinigungsanlagen. Darüber hinaus wird die Abluft mehrfach rückgeführt. Die Kompliziertheit dieser Verfahrenstechnik, insbesondere die an den Maschinen vorgenommene Aufkonzentrierung hat einen Entwicklungsweg von über 20 Jahren transparent gemacht [11].

Ein Beispiel aus der Praxis

Ab 2009 gelang es erstmals, eine Druckerei mit Tief- und Flexodruckmaschinen ganzjährig komplett energieautark zu führen [12]. Im kontinuierlichen Betrieb, das bedeutet von Montag 08:00 bis Samstag 12:00 Uhr, gibt es keinen Fremdbezug von Erdgas oder Heizöl. Die Energieversorgung erfolgt allein über die in den Druckfarben enthaltenen Lösemittel. Aufgrund der optimalen Nutzung der Lösemittelenthalpie gelang es ergänzend in 2010, auch den elektrischen Kraftbedarf durch die Einkoppelung einer Absorptionskältemaschine (ca. 450 kW Kälte) zu reduzieren. Die optimale Energieausschleusung nach zwei parallel betriebenen regenerativen Nachverbrennungsanlagen ist über zwei thermisch getrennt genutzte Heißwasser-/Warmwasserkreislaufsysteme so gestaltet, dass im Sommer die Überhangwärme zur Kälteerzeugung und im Winter zur Wärmeversorgung in den Produktionshallen und den Büros genutzt wird. Ab 2012 wird die Kühlung nicht nur der Produktion sondern auch den Büroräumen zugeführt. Die Kälteanlage wird dann von Mitte April bis voraussichtlich Ende Oktober mit Abwärme betrieben. Im Mittel werden ca. 120 kW elektrische Energie über gerundet 4.000 h eingespart. In erster Näherung bedeutet dies eine Einsparung an elektrischer Energie von ca. 50.000,- €/a. Die Kosteneinsparung an thermischer Energie ist mit etwa 350.000,- €/a transparent.

Eine der entscheidenden und wesentlichen Voraussetzungen für die dauerhafte Verfügbarkeit thermischer Energie aus VOC-Emissionen war und ist der Einsatz einer Molekularsiebpufferstufe, in der insbesondere die bei Waschvorgängen anfallende Emission zwischengespeichert wird. In Betriebsphasen mit geringer Produktionsauslastung wird das Lösemittel aus den Molekularsiebspeichern verdampft und reichert dabei die nur gering beladene Abluft nach den Druck- oder Beschichtungsmaschinen an. Ergänzend zu dieser Maßnahme werden weiterhin Abfalllösemittel nach genau spezifizierten Bedarfsanforderungen in entsprechenden Vorrichtungen verdampft, um ergänzend zur Desorption des Molekularsiebpufferspeichers über eine zweite Quelle Abfallenergie zu nutzen.

Für die Rückführung war es sehr entscheidend, die ursprünglich vorherrschende Meinung, den Trocknungsbetrieb der Druck-, Kaschier- oder Beschichtungsmaschinen mit Thermalöl zu leisten, aufzugeben. Über den Entscheid, in der zweiten Abluftreinigungsanlage Heißwasser mit ca. 145 °C zu erzeugen, um damit einen möglichst hohen Wirkungsgrad für die Absorptionskältemaschine sicherzustellen, war der Weg offen für die Totalversorgung des Werkes mit Abwärme.

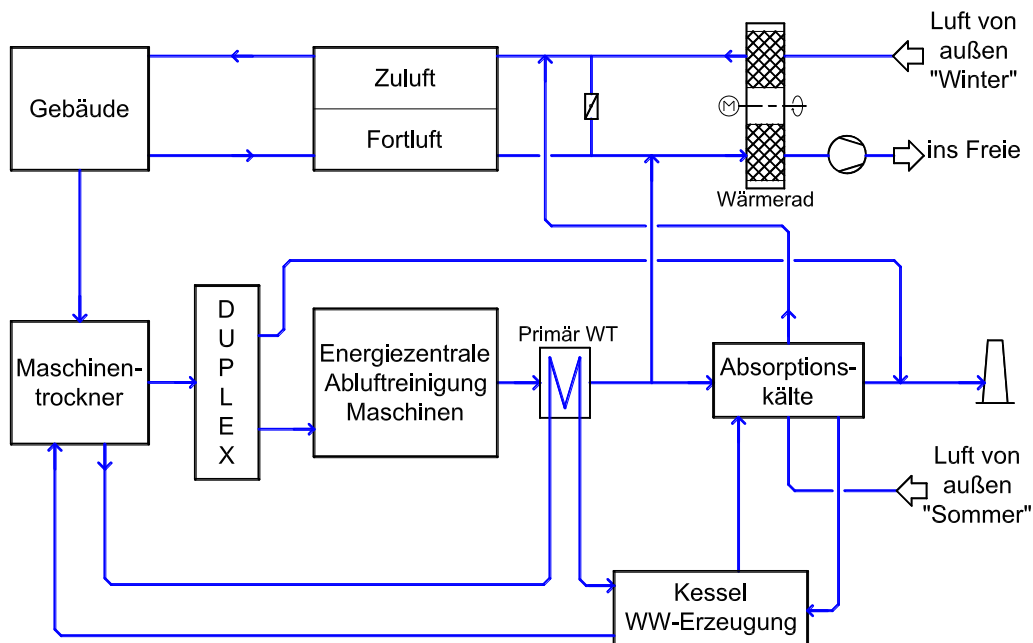


Abbildung 5: Prinzip ganzjährige Abwärmenutzung



Abbildung 6: Blick auf die eingesetzte Absorptionskältemaschine [12]

Zwischenzeitlich sind die Abluftreinigungsanlagen weitestgehend beschrieben, kleine Ergänzungen oder Erweiterungen werden über eingeplante Reserven abgedeckt. Bedauerlicherweise ist der Wärmeüberhang einerseits so groß, dass immer noch ein Teil dieser Überhangwärme ins Freie abgegeben werden muss. Er ist andererseits zu klein, um eine Eigenstromerzeugung oder eine Lösemittelrückgewinnung unter vier Jahren amortisieren zu können. In größeren Betrieben werden in den kommenden Jahren durch die Duplex-Technik der intelligent vernetzten Abwärmenutzung auch Wege zur Stromerzeugung und zur Kombination mit Großwärmespeichern für ergänzende Anwendungen ersichtlich.

Ausblick

Ein sehr hoher Standard hinsichtlich optimaler Energieausnutzung in Verbindung mit modernen Abluftreinigungstechnologien ist erreicht. Nicht immer gelingt eine hundertprozentige Abwärmrückgewinnung, insbesondere wenn neben Druck- und Beschichtungsprozessen noch andere Produktionsprozesse gegeben sind. Diesbezüglich zeichnet sich eine weitergehende Nutzung über Wärmespeicher ab, deren Einsatz untergliedert in mittel-, nieder- und hochvalente Wärme die optimale Nutzung von Abwärme ermöglicht. Die Befeuchtung von Zuluft unter Nutzung von Abwärme ist dabei eine interessante Lösung, thermische Energie einzusparen. In anderen Bereichen ist bspw. die Vorwärmung von Waschbädern, Aluminiumschmelzen oder anderen vorgelagerten Produktionseinrichtungen eine Möglichkeit, die immer teurer werdende Energie auf das verfahrenstechnische Minimum zu reduzieren. Eine solche umfassende Studie wird derzeit für einen der größten Tuben- und Dosenhersteller weltweit (einschließlich Beschichtung und Druck) in Sao Paulo erstellt.

Referenzen:

- [1] K. Wirth: Thermische Verbrennungsanlagen zur Reinigung geruchsbelästigender Abluft und zur Verbrennung flüssiger Rückstände. Chemie-Anlagen+Verfahren 9/1974. Seiten 75 f.
- [2] Dr. H. D. Brandt: Betriebserfahrungen mit thermischen Verbrennungsanlagen zur Abluftreinigung im Rollenoffsetdruck. Der Polygraph DK 66.074.7.
- [3] R. Rafflenbeul: Abluft ist Geld wert. Neue Reinigungssysteme bringen neue Verwertungsmöglichkeiten. Deutsches Ingenieurblatt 12/2003.
- [4] R. Rafflenbeul: Wie man Emissionen in Erlöse wandelt. Besser lackieren!. Nr. 09. 20. Mai 2011.
- [5] F. Stork, H. B. Stork, R. Rafflenbeul: Nanomaterialien für kostengünstige Abluftreinigungsverfahren. Fa. Stork nimmt weltweit erste Molekularsieb-Duplex-Anlage in Betrieb. Besser lackieren!. Nr. 10. 5. Juni 2009.
- [6] R. Rafflenbeul, E. Borchers, B. Cordes: Economy of Air and Energy at Film and Label Printing Operations. Flexo+Tief-Druck 1-2003.
- [7] H. Jüntgen: Staubreinhaltung der Luft 36. Nr. 7, 1976. Seite 281/324
- [8] R. Rafflenbeul: Fortschritte in der Adsorptionstechnologie. Chemie Ingenieur Technik (68) 11/1996.
- [9] A. Weißgärber: Adsorption von Lösemitteln an Molekularsieben zur nachhaltigen Minderung des CO₂-Ausstoßes bei Abluftreinigungsvorhaben. Diplomarbeit an der Hochschule Darmstadt / Rafflenbeul Ingenieure 2009/2010.
- [10] <http://www.bailii.org/ew/cases/EWHC/TCC/2055/1659.html>
- [11] R. Rafflenbeul: Fortschritte bei der Trocknungstechnik in Druck- und Veredelungsmaschinen mit lösemittelhaltigen Einsatzstoffen. Deutscher Drucker Nr. 10. 12. März 1992.
- [12] Fa. Heyne & Penke, Dassel: mit zwei Tiefdruck- und zwei Flexodruckmaschinen, einschließlich Waschmaschine mit Molekularsiebpuffersystem