

SVEN MEYER

STRATEGIEN DER EMISSIONSMINDERUNG IM SPANNUNGSFELD VON ÖKONOMIE UND ÖKOLOGIE



Während seines Studiums der Geoökologie in Potsdam beschäftigte sich Sven Meyer mit der Interaktion komplexer Umweltsysteme. In seiner Dissertation untersuchte er Strukturen im Entscheidungsprozess bei der Planung von Begrünungsmaßnahmen in Bergbaufolgelandschaften. Aktuell arbeitet Meyer im ingenieurtechnischen Umweltschutz an Projekten zur Emissionsreduzierung aus Produktionsprozessen, zur energetischen Prozessverbesserung und zum stofflichen Recycling von Lösemitteln. Ziel der Forschungsvorhaben ist jeweils die Entwicklung von innovativen Verfahren und Produkten, die anschließend zur gesellschaftlichen Wertschöpfung beitragen und den Industriestandort Deutschland stärken können.

Meyers Tätigkeit am Institut für Umweltwissenschaften der TU Clausthal wurde bereits 2013 mit dem Lehrpreis der TU Clausthal (gemeinsam mit Prof. Carlowitz) und 2014 mit dem „nachhaltige PRODUKTION“-AWARD in der Kategorie „Forschung & Entwicklung“ auf der Hannover Messe ausgezeichnet.

Maßnahmen zur Emissionsminderung entlasten die Umwelt, binden jedoch gleichzeitig Kapital. Die Reduzierung von Emissionen aus einem Produktionsprozess stellt für Unternehmen eine Notwendigkeit dar, die sich aus der aktuellen Gesetzgebung (Bundesimmissionsschutzgesetz [1]) und den zugehörigen Verordnungen (z.B. 31. BImSchV [2]) ergibt. Die Abgasreinigung trägt dabei nicht zur Wertschöpfung im eigentlichen Produktionsprozess bei. Sie benötigt aber elektrische und thermische Energie und verursacht damit Kohlenstoffdioxid-Emissionen.

Die Keeling-Kurve ist eine langjährige Messreihe des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids und reicht bis in die 1960er Jahre zurück. Sie zeigt den kontinuierlichen Anstieg des Kohlenstoffdioxids von anfänglich etwa 320 ppm auf aktuell über 400 ppm [3]. Der Pariser Klimagipfel 2015 hat erneut gezeigt, dass eine Reduzierung von klimaschädlichen Emissionen weltweit zwingend notwendig ist. Der Beschluss sieht vor, dass die Kohlenstoffdioxid-Emissionen soweit reduziert werden, dass ein Temperaturanstieg auf deutlich unter 2K begrenzt wird [4]. Ebenfalls ist geplant, die Netto-Emissionen ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf den Wert Null zu senken. Es soll ein Gleichgewicht zwischen anthropogenen Emissionen und der Aufnahme in Kohlenstoffdioxid-Senken wie Wäldern und Speicherung (Carbon Capture Storage) erreicht werden.

Die Auswirkungen von Emissionen sind nicht nur auf den globalen Temperaturanstieg beschränkt, sondern spiegeln sich auch in lokalen und regionalen Ereignissen wider. Das Ruhrgebiet war in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts das Zentrum der deutschen (Schwer-)Industrie. Der „Smog“-Begriff („Winter-Smog“) ist untrennbar mit der wirtschaftlichen Entwicklung verbunden. Die Ursachen des Smogs und die damit verbundenen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt sind u.a. in [5] dargestellt.

Emissionen von Staub, Schwefeldioxid und weiteren Stoffen führen insbesondere bei austauscharmen Inversionswetterlagen zu einer erheblichen Belastung der Bewohner im nahen Umfeld von Industriebetrieben.

Kurzzusammenfassung:

Emissionen von Kohlenstoffdioxid und anderen toxischen Stoffen verursachen lokal und global negative Umweltauswirkungen. Bei der Bedruckung flexibler Verpackungen werden Lösemittel freigesetzt, wobei die Abluft entsprechend der gesetzlichen Vorgaben gereinigt werden muss. Die Lösemittel stellen einen Wertstoff dar, der aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen recycelt werden sollte. Im Rahmen eines geförderten Vorhabens wird ein innovativer Verfahrensansatz auf absorptiver Aufkonzentrationsbasis erprobt, der es erlaubt, die Rückgewinnung für Lösemittel auch bei kleineren Massenströmen von (100 ... 500) kg/h für kleine und mittelständische Unternehmen wirtschaftlich zu gestalten. Es kann ferner gezeigt werden, dass durch die Lösemittelrückgewinnung die Kohlenstoffdioxidbilanz um (40 ... 45) % entlastet wird.

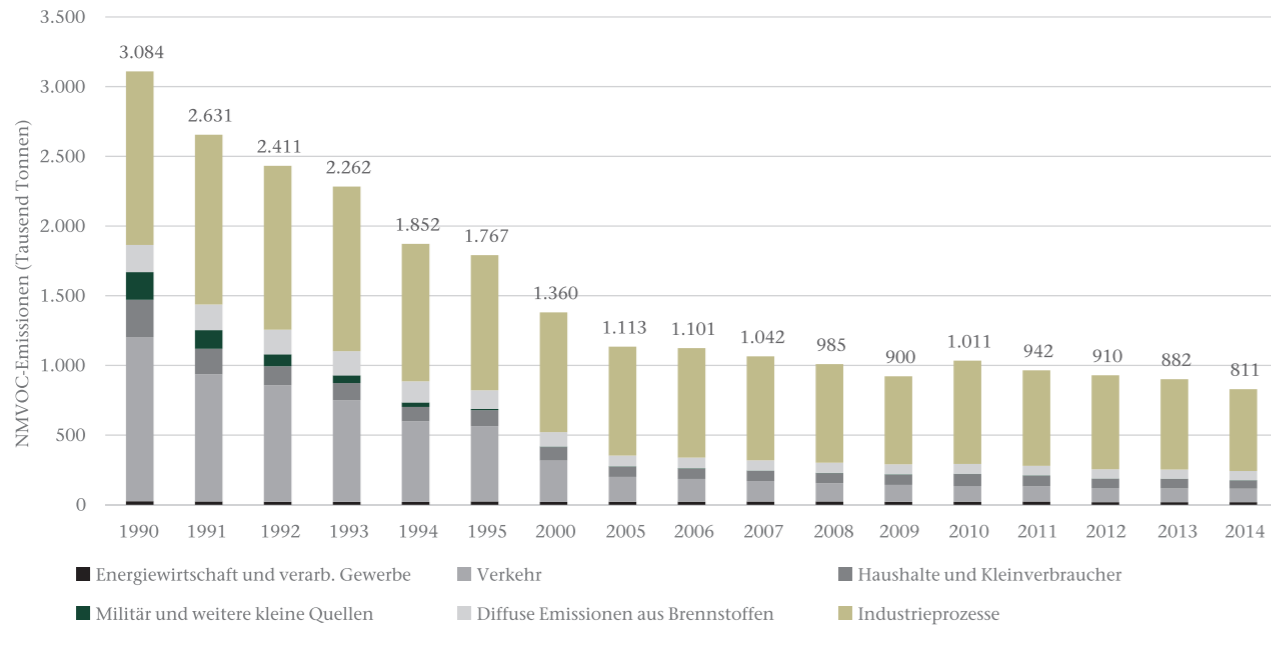


Abbildung 1: Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan (NMVOC) nach Quellkategorien [9]

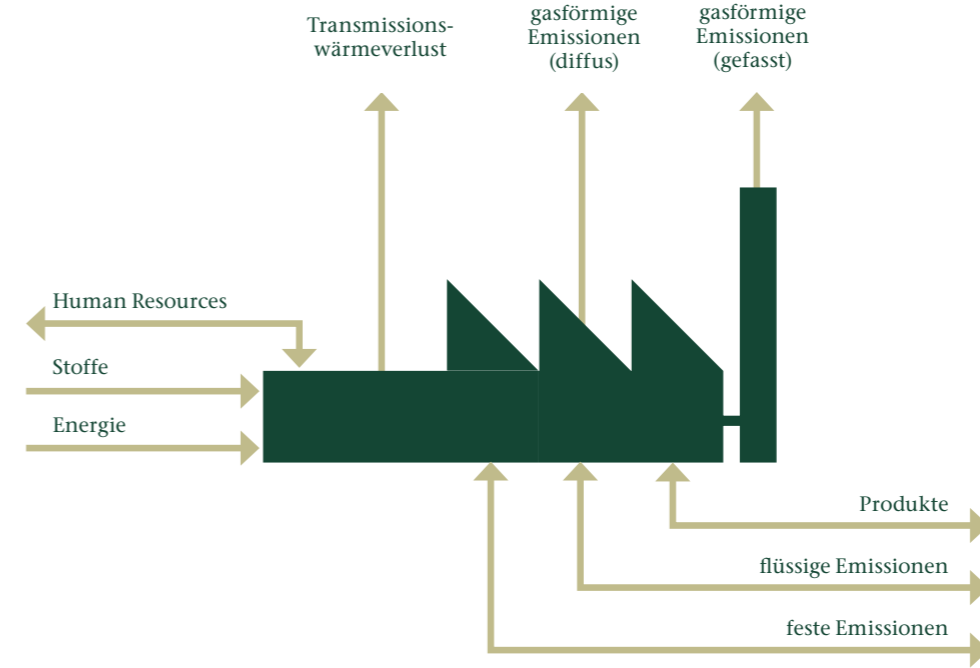
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Produktionsprozesses (S. 27)

Aus der Umweltsituation in den 1960er und 1970er Jahren resultiert schließlich die Smog-Verordnung des Landes Nordrhein-Westfalen, die 1974 erlassen wurde [6]. Sowohl (Weiter-)Entwicklungen der Abluftreinigungsverfahren als auch verschärfte gesetzliche Vorgaben haben dazu geführt, dass sich die Emissionsproblematik im Ruhrgebiet deutlich entspannt hat.

Smog-Situationen in Deutschland sind rarer geworden und treten in der Regel nur noch mit langanhaltenden Inversionswetterlagen auf.

Presse- und Nachrichten Anfang Dezember 2015 haben allerdings gezeigt, dass die Smog-Problematik weiterhin aktuell ist [7, 8]. Emissionen aus Industriebetrieben wie auch privaten Feuerstätten (Kohle- und Ölheizungen) haben in Peking zu einem mehrtägigen Smog-Alarm und damit zu einem Stillstand des öffentlichen Lebens geführt. Entsprechend mussten Maßnahmen getroffen werden, um die Emissionen zumindest kurzfristig zu reduzieren.

Es gibt verschiedene Arten von gasförmigen Emissionen. Neben dem bekannten (nicht-



toxischen) Kohlenstoffdioxid zählen dazu u.a. auch Schwefeldioxid, Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (sogenannte NMVOCs). Die Emissionen der NMVOCs resultieren vorwiegend aus dem Einsatz von Lösemitteln in verschiedenen Produktionsprozessen. Bild 1 zeigt die Entwicklung dieser Emissionen in Deutschland seit 1990 [9]. Die Emissionen in dieser Schadstoffgruppe sind dabei kontinuierlich von ursprünglich 3.084 Tausend Tonnen (in 1990) auf aktuell 811 Tausend Tonnen (in 2014) gesunken. Die Erfolge sind dabei vorwiegend auf den Verkehrsbereich

zurückzuführen, in dem sich seit der flächendeckenden Einführung der Katalysator-Technik in den 1990er Jahren eine erhebliche Verbesserung der Emissionssituation ergeben hat. Auch die Emissionen aus Industrieprozessen sind um etwa 50 % gesunken, wobei ein Teil des Erfolgs auf die Abwicklung von Betrieben in den Jahren nach der deutschen Einheit zurückzuführen sein dürfte. Die 31. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz

„Eine Reduzierung der Lösemittel-emissionen ist aus wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekten zwingend notwendig.“

Sven Meyer

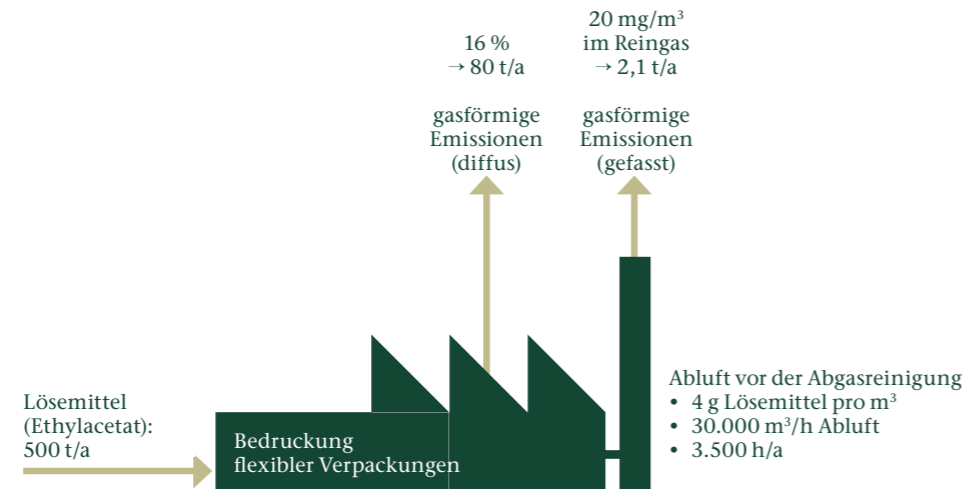


Abbildung 3:
Produktionsprozess
„Bedruckung flexibler
Verpackungen“ und Löse-
mittelbilanz (S. 29)

(Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen) hat seit ihrem Erlass im Jahr 2001 zu einer weiteren – wenn auch relativ geringen – Reduzierung der Emissionen im Industriebereich geführt. Aktuell dominiert der Industriesektor die Emissionen dieser Schadstoffklasse.

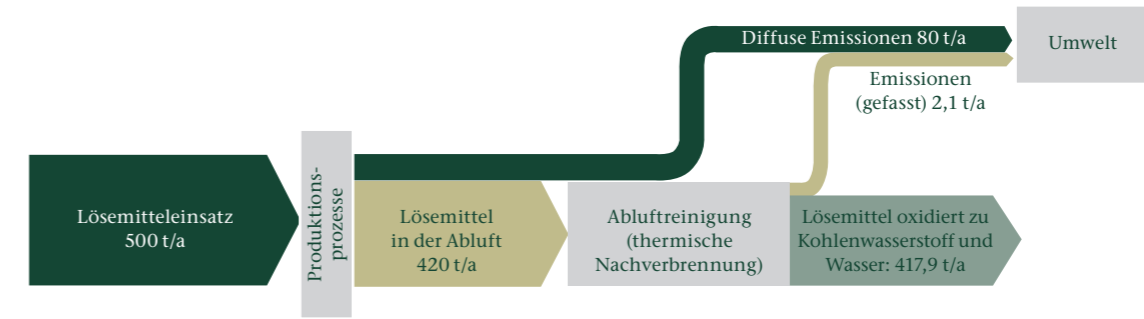
Ein klassischer Produktionsprozess ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Anhand der aufgeführten Input- und Output-Größen lassen sich die Ursachen der Lösemittelfreisetzung erläutern. Für den Produktionsprozess werden als Inputgrößen benötigt:

- Energie
- Stoffe
- Humanressourcen

Gleichzeitig werden aus dem Produktionsprozess abgeführt:

- (veredelte) Produkte
- Abfallstoffe in fester und flüssiger Form
- gasförmige Emissionen aus gefassten und diffusen Quellen
- Transmissionswärmeverluste

Durch Recyclingmaßnahmen wird ein stoffliches Wiederverwerten und damit ein Wiedereinsatz von Abfallstoffen realisiert und somit auch dem Konzept nach Abfallhierarchien gemäß § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz Rechnung getragen [10]. Je größer die Wiedereinsatzquote ist, desto kleiner gestaltet sich der Massenstrom „neuer“ Stoffe in den Produktionsprozess. Dies gewährleistet bei einem Unternehmen ein Mindestmaß an Unabhängigkeit z.B. von Rohstoffpreisen.



Die aufgeführten Maßnahmen sollen an einem Beispielfall näher betrachtet werden. Ein mittelständisches Unternehmen, das flexible Verpackungen bedruckt, bekommt die Druckfarben mit einem hohen Feststoffanteil als sogenannte „High-Solids“ angeliefert und stellt mit organischen Lösemitteln (vorwiegend Ethylacetat) die notwendige Viskosität für den Druckprozess ein. In den Druckmaschinen selbst sind Trockner integriert, so dass die Lösemittel nach dem Auftrag der Druckfarben verdampfen und gezielt mit der Abluft fortgeleitet werden können. In Bild 3 ist der Produktionsprozess schematisch dargestellt und die resultierenden Massenströme werden aufgezeigt. Aus dem Lösemittelleinsatz von 500 Tonnen pro Jahr resultiert eine Trocknerabluft mit einer Beladung von 4 g Lösemittel pro Kubikmeter Luft. Insgesamt wird ein Volumenstrom

von 30.000 m³/h aus dem Druck- bzw. Trocknungsprozess abgezogen. Für den Beispielfall lassen sich 3.500 Betriebsstunden im Jahr ansetzen. Dies entspricht einem 2-Schicht-Betrieb mit den entsprechenden Rüstzeiten zwischen den einzelnen Druckaufträgen. Die fortgeleitete Abluft wird anschließend in einer Abgasreinigungsanlage auf einen Grenzwert von 20 mg/m³ behandelt, wobei eine detoxifizierende Oxidation (Nachverbrennung) der kohlenwasserstoffhaltigen Lösemittel zu Kohlenstoffdioxid und Wasser stattfindet. In den mittelständischen Unternehmen wird als Stand der Technik eine Thermische Nachverbrennung mit regenerativer Abluftvorwärmung (RTO) eingesetzt [11].

„Jeder Produktionsprozess weist Besonderheiten auf, auf die eine Abgasreinigungsanlage angepasst werden muss.“

Sven Meyer

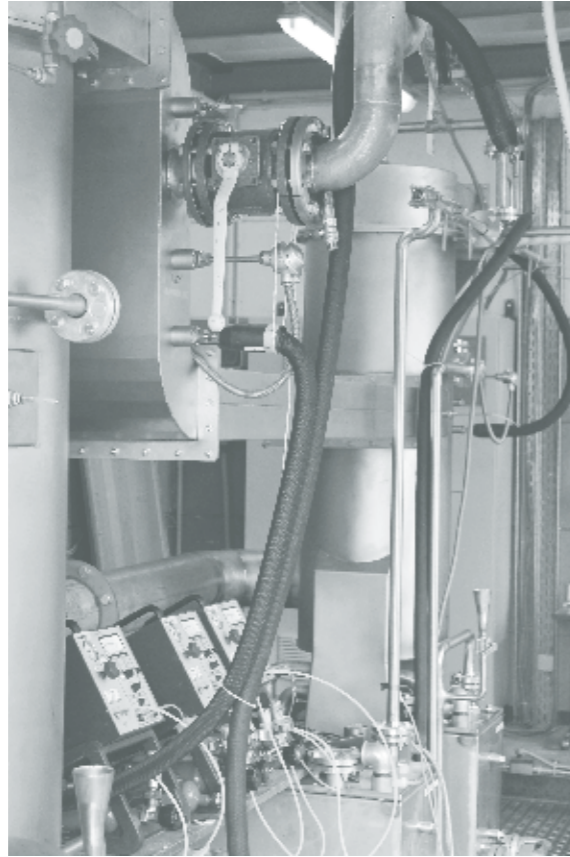


Abbildung 4:
Versuchsanlage zur Lösemittelabscheidung im Technikum des Instituts für Umweltwissenschaften der TU Clausthal

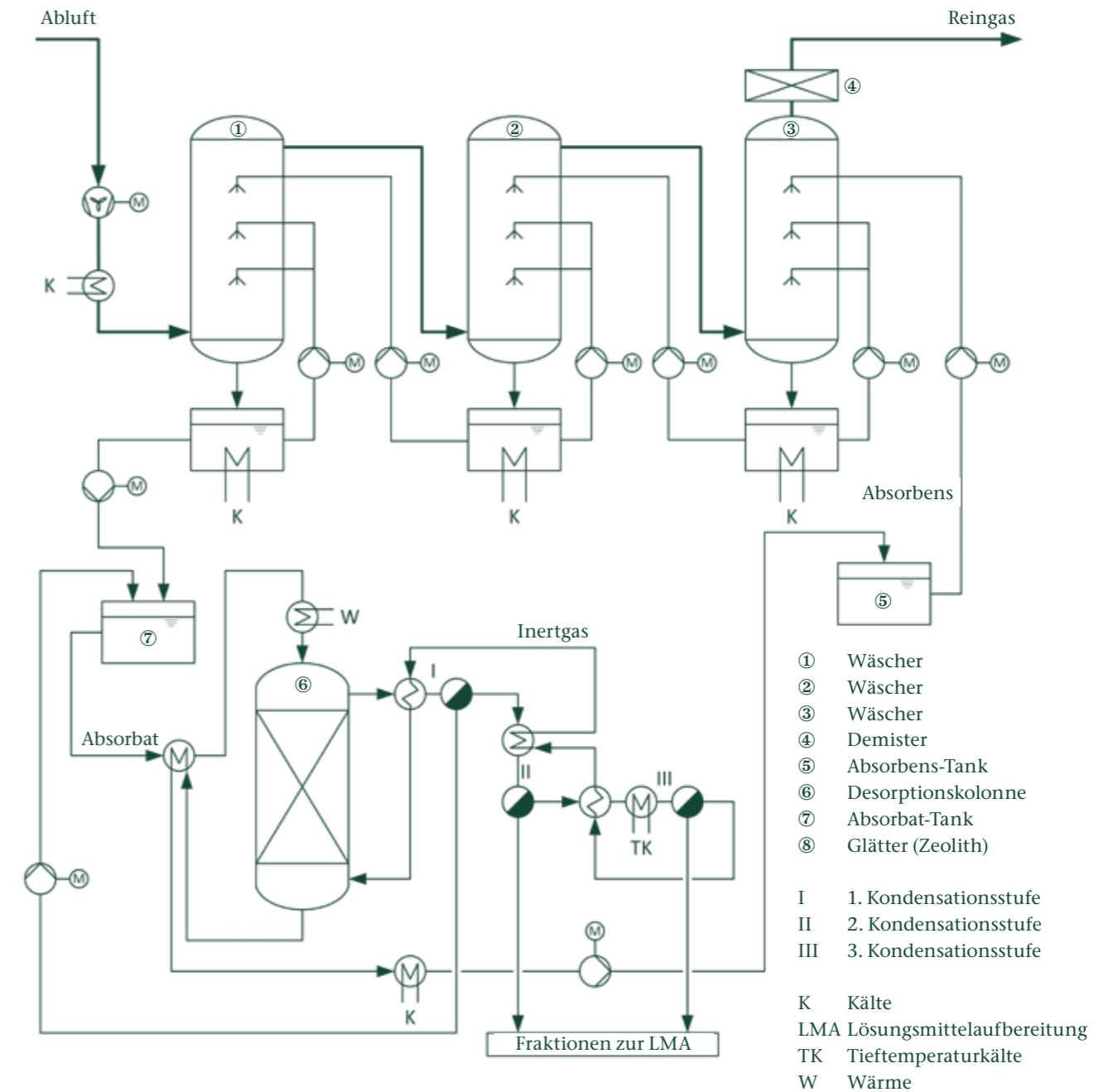
Aus dem Reingas der RTO resultiert dann noch ein Massenstrom an Lösemitteln bzw. restorganischen Substanzen von 2,1 t/a. Die Druckprozesse werden zwar zum Schutz der Mitarbeitenden im Unterdruck betrieben, jedoch gelangt über die Hallenluft und eventuell nicht gefasste Quellen ein Anteil von bis zu 20 % des Lösemittels in die Atmosphäre.

Abbildung 5, S. 31:
Verfahrensansatz zur Lösemittelrückgewinnung (basierend auf [12, 17])

Eine Entlastung der Umwelt kann durch drei verschiedene Maßnahmen erzielt werden:

1. Reduzierung der Lösemittelmmissionen aus der Abluftreinigung

Durch eine Verschärfung der einzuhaltenen Grenzwerte einer Abluftreinigungsanlage – wie es aktuell bei der Neufassung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft für bestimmte Anlagenarten angedacht ist – kann der emittierte Massenstrom weiter reduziert werden. Es gilt hier aber zu beachten, dass die Abluftreinigungsanlage zur Einhaltung der verschärften Grenzwerte i.d.R. mit einem erhöhten



Energieaufwand betrieben werden muss, so dass die Kohlenstoffdioxidemissionen steigen.

2. Reduzierung der Lösemittlemissionen aus diffusen Quellen

Bild 3 zeigt, dass der Hauptanteil der Lösemittlemissionen aus diffusen Quellen stammt. Durch eine verbesserte Kapselung von Produktionsanlagen kann hier ein Beitrag geleistet werden. Ablüfte mit geringen Lösemittelkonzentrationen können prozessintern oder -extern aufkonzentriert werden und einer Abluftreinigungsanlage zugeführt werden [siehe z.B. 12].

3. Reduzierung des Lösemittleinsatzes durch stoffliches Recycling innerhalb des Unternehmens

Die eingesetzten Lösemittel stellen aus finanzieller Sicht einen Wertstoff dar, der – im Fall von Ethylacetat – im Einkauf derzeit 1,30 €/kg kostet. Für den betrachteten

Produktionsprozess sind damit jährliche Kosten von 650.000 € verbunden. Gleichzeitig verursachen die Herstellung und die oxidative Entsorgung der Lösemittel auch Emissionen von CO₂. Nach [13] ist die Herstellung eines

Kilogramms Ethylacetat an CO₂-Emissionen von 2,8 kg gekoppelt. Die Verbrennung der lösemittelhaltigen Abluft in einer ther-

mischen Nachverbrennung verursacht weitere 2 kg CO₂ pro kg Ethylacetat.

Die Rolle von Ethylacetat als Wertstoff und der mit der Herstellung und Verwendung des Ethylacetats verbundene Carbondioxid-Footprint hat zu einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Gemeinschaftsprojekt mit zahlreichen Projektpartnern geführt. Ziel des Projektes ist es, eine Lösemittelrückgewinnung für mittelständische Unternehmen des Verpackungsdruckes zu ermöglichen. Die erste Projektphase wurde 2014 erfolgreich abgeschlossen [14], die Erprobung des Verfahrens mit einer Technikumsanlage unter realen Produktionsbedingungen in einer Druckerei wird aktuell umgesetzt.

Ab einem Lösemittleinsatz von ca. 1 t/h ist allerdings bereits heute der Einsatz von adsorptiven Verfahren zur Aufkonzentration der Abluft und Kondensation des Desorbates mit dem Ziel der wirtschaftlichen Rückgewinnung möglich. Die Desorption erfolgt dabei mittels Wasserdampf bei relativ niedrigen Temperaturen (ca. 120 °C). Die im Flexo-Verpackungsdruck eingesetzten Lösemittel sind jedoch teilweise wasserlöslich, so dass sich eine aufwändige thermische Aufarbeitung anschließt. Alternativ könnte eine Inertgasdesorption bei dann notwendigen Temperaturen von bis zu 200 °C erwogen werden. Allerdings reagiert das Ethylacetat mit dem ebenfalls adsorbierten

»Lösemittel stellen einen Wertstoff dar. Die Lösemittelrückgewinnung ist stoffliches Recycling, das ökologisch sinnvoll und wirtschaftlich ist.«

Sven Meyer

Wasserdampf aus der Abluft bzw. Umgebungsluft teilweise zu Essigsäure, wobei das Adsorbens (z.B. Aktivkohle) einen katalytischen Effekt auf die Reaktion ausüben kann [15]. Als Folge ist dieses Rückgewinnungsverfahren somit für geringere Lösemittelmassenströme (100 ... 500) kg/h in kleinen und mittelständischen Unternehmen nicht wirtschaftlich darstellbar.

Die Abluftreinigung für diese Unternehmen erfolgt daher – wie bereits vermerkt – häufig mit regenerativen Nachverbrennungsanlagen, in denen die kohlenwasserstoffhaltigen Lösemittel oxidiert und damit in die nichttoxischen Substanzen Kohlenstoffdioxid und Wasser umgewandelt werden. Zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und Senkung des Kohlenstoffdioxidausstoßes kann zur Lösemittelrückgewinnung ein adsorptives Aufkonzentrationsverfahren mit Inertgasdesorption (Stickstoff) erwogen werden. Der besondere Vorteil dieses Verfahrensansatzes liegt in der niedrigen Desorptionstemperatur mit Inertgas (100 ... 130) °C und dem Fehlen einer die Zersetzung von Ethylacetat katalysierenden Substanz.

Um den Nachweis

- einer Wirtschaftlichkeit der Lösemittelrückgewinnung auch deutlich unterhalb eines Lösemittelmassenstroms von 1 t/h darstellen zu können,
- einer Wiedereinsetzbarkeit der rückgewonnenen Lösemittel beim Druckprozess zu führen,

wird derzeit das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchgeführt [14] und ein Verfahrensansatz mit einer Technikumsanlage erprobt (siehe Bild 4).

Die Lösemittel in der gekühlten Abluft werden mit einem organischen Hochsieder (z.B. Genosorb 1843 der Fa. Clariant [16]) durch eine mehrstufige Wäsche gebunden. Das Adsorbat wird anschließend in einer Kolonne erwärmt und mit (inertem) Gas desorbiert. Das aufkonzentrierte Desorbat kann anschließend kondensiert und einer Lösemittelaufbereitung zugeführt werden. Den zugehörigen neuartigen Technologieansatz zeigt Bild 5.

Zusammenfassend sind zur Reduzierung der Lösemittlemissionen verschiedene Ansätze möglich. Die Implementation einer Lösemittelrückgewinnungsanlage stellt dabei sicherlich die finanziell aufwändigste Maßnahme dar, die gleichzeitig auch technologisch sehr anspruchsvoll ist.

Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zeigt jedoch, dass die Implementation einer solchen Technologie eine wirtschaftlich vorteilhafte Investition sein kann. Eine Amortisation ist innerhalb eines Zeitraums von (2 ... 4) Jahren darstellbar [17]. Gleichzeitig ergibt sich für das Unternehmen eine Entlastung für die CO₂-Bilanz des Lösemittleinsatzes um (40 ... 45) %.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 76 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- [2] 31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen) vom 21. August 2001 (BGBl. I S. 2180), die zuletzt durch Artikel 82 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- [3] Scripps Institution of Oceanography (2015): The Keeling Curve. <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/> (Zugriff: 31.12.2015).
- [4] Bundesregierung (2015): UN-Gipfel in Paris – Neuer Klimavertrag beschlossen. Pressemitteilung. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2015/12/2015-12-12-klimaabkommen.html> (Zugriff: 31.12.2015).
- [5] Der Spiegel 33/1961: Blauer Himmel über der Ruhr. S. 22–33. <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-43365482.html> (Zugriff: 31.12.2015).
- [6] Verordnung zur Verhinderung schädlicher Umwelteinwirkungen bei austauscharmen Wetterlagen – Smog-Verordnung. vom 29. Oktober 1974. Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen, Jahrgang 1974.
- [7] Spiegel Online: So oft versinkt Peking im Smog. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/smog-in-pekings-ausnahmesituation-oder-dauerzustand-a-1065711.html> (Zugriff: 31.12.2015).
- [8] Spiegel Online: Peking ruft erneut Alarmstufe Rot aus. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/china-pekings-ruft-erneut-hoehste-smog-alarmstufe-aus-a-1068458.html> (Zugriff: 31.12.2015).

- [9] Umweltbundesamt (2016): Emission flüchtiger organischer Verbindungen ohne Methan (NMVOC). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschaedstoff-emissionen-in-deutschland/emission-fluechtiger-organischer-verbindungen-ohne> (Zugriff: 06.10.2016).
- [10] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch Artikel 1a des Gesetzes vom 20. November 2015 (BGBl. I S. 2071) geändert worden ist.
- [11] O. Carlowitz, O. Neese (2005): Ansatzpunkte zur konzeptionellen und betrieblichen Optimierung von thermischen Abgasreinigungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft (65), S. 320-327.
- [12] O. Carlowitz, S. Meyer (2015): Verfahren zur Aufkonzentration von kohlenwasserstoffhaltigen Abgasen mit dem Ziel der Energieeinsparung. Immissionsschutz, Band 5. Hrsg. K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Löschau. TK Verlag, ISBN 978-3-944310-23-7. S. 263-280.
- [13] Ecoinvent database. <http://www.ecoinvent.org/database/> (Zugriff: 11/2014).
- [14] M. Pfutterer, O. Carlowitz (2014): Neues Aufkonzentrationsverfahren für VOC-Ablüfte mittels Absorption. VDI-Bericht 2214: Emissionsminderung 2014. Nürnberg, 20./21.05.2014, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092214-0, S. 37-47.
- [15] S. Meyer, M. Pfutterer, J. Altmann, M. Napp, B. Benker, A. Wollmann (2014): eSorb – ein neuer Baustein zur effizienten Stoffrückgewinnung aus der Gasphase. VDI-Bericht 2214: Emissionsminderung 2014. Nürnberg, 20./21.05.2014, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092214-0, S. 215-222.
- [16] Clariant: Genosorb® 1843 – Absorption fluid. <https://www.clariant.com/Solutions/Products/2013/12/09/18/27/Genosorb-1843> (Zugriff: 31.12.2015).
- [17] M. Pfutterer, O. Carlowitz, S. Meyer, J. Altmann, M. Napp, S. Gutperl, B. Benker, A. Wollmann, N. Muschkalski (2014): eSorb – ein neuer Baustein zur effizienten Stoffrückgewinnung aus der Gasphase. DBU-Az: 30932-21/29.