

Behandlung von NMVOC-Abgasen in der Halbleiterbauelement- und Solarzellenfertigung – gesamtökologisch sinnvoll?

*Heidi Hottenroth, Hochschule Pforzheim, Institut für Angewandte
Forschung*

Martin Schottler, M+W Zander FE GmbH

1 Einleitung

Bei der Halbleiterbauelement- und Solarzellenfertigung entsteht Abluft, die gering konzentrierte leicht flüchtige Kohlenwasserstoffe (NMVOC) enthält. Diese werden mit Hilfe thermischer Verfahren behandelt, um den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwert zu erreichen. Der Bau der Behandlungsanlagen erfordert große Mengen Stahl, und beim Betrieb werden fossile Energieträger und elektrische Energie eingesetzt. Vor dem Hintergrund der Richtlinie zur integrierten Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie), die einen hohen Schutz der Umwelt insgesamt zum Ziel hat, stellte sich die Frage, ob der Aufwand der Behandlung der gering konzentrierten NMVOC-Abluft gesamtökologisch gerechtfertigt ist. Die IVU-Richtlinie äußert „die Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern“ [Europäische Kommission 2008]. Dazu sollen die besten verfügbaren Technologien eingesetzt und bei der Auswahl die Umweltauswirkungen medienübergreifend ermittelt und verglichen werden. Es soll sichergestellt werden, dass bei der Lösung eines Umweltproblems kein neues, ernsthafteres Umweltproblem geschaffen wird. [Europäische Kommission 2006]

Bei der Kohlenwasserstoffbehandlung besteht ein Zielkonflikt zwischen der Minimierung der Emissionen und damit dem Schutz der menschlichen Gesundheit durch verminderte Sommersmogbildung einerseits und der Minimierung der Auswirkungen durch die Nutzung fossiler Energien andererseits [Gerber 2006]. Um die gesamten Umweltauswirkungen für das Beispiel der Halbleiterbauelement- und

Solarzellenfertigung zu quantifizieren, wurde eine Lebenszyklusbetrachtung für die Behandlung typischer Abgaskonzentrationen im Vergleich zur Nicht-Behandlung durchgeführt. Im Folgenden wird nur auf die Abgasbehandlung bei der Halbleiterfertigung eingegangen, da die Ergebnisse der Solarzellenfertigung ähnliche Schlussfolgerungen zulassen [Schottler 2010].

2 Verwendung und Minderung von Lösemitteln bei der Halbleiterfertigung

Bei der Halbleiterfertigung werden Silizium-Wafer (Durchmesser 200 – 300 mm) zur Herstellung von integrierten Schaltungen mit Hilfe fotochemischer Prozesse bearbeitet. Dabei kommen bei verschiedensten Prozessschritten organische Lösungsmittel zum Einsatz, so dass kohlenwasserstoffhaltige Abluft entsteht. Reinigungs- und Entlackungsvorgänge sind weitere Quellen.

Stand der Technik bei der Minderung von Kohlenwasserstoffemissionen in der Halbleiterfertigung ist die thermische Nachverbrennung, wobei die Abwärme rekuperativ zur Vorheizung der Abluft genutzt wird. Um die gering beaufschlagte Abluft in einen kleineren Volumenstrom mit höherer Konzentration zu überführen, wird ein Adsorptionsschritt vorgeschaltet.

3 Daten und Annahmen für die Lebenszyklusbetrachtung

Die Lebenszyklusbetrachtung wurde für die rekuperative thermische Nachverbrennung im Vergleich zur Nichtbehandlung der Abgase durchgeführt. Für die Behandlung der Abgase werden die Herstellung der Behandlungsanlage, der Betrieb und die Entsorgung der Anlage berücksichtigt. Bei Nichtbehandlung wird die direkte Abgabe der ungeminderten Abgase an die Umwelt betrachtet. Die Lebenszyklusbetrachtung umfasst ein Jahr mit einer Betriebsdauer von 8.000 h und einem Volumenstrom von 10.000 m³/h, was einer bearbeiteten Waferfläche von knapp 12.000 m²/a entspricht. Es wurden definierte Lösungsmittelgemische untersucht, wobei es sich hierbei einerseits um eine Mischung aus Propylglykoldimethylacetat (PGMEA), Ethyllaktat, Isopropanol, n-Butylacetat, Ethanol sowie Xylol und andererseits Benzol als einziges Lösemittel handelte. Benzol wurde hier nicht aufgrund seiner Relevanz in der Halbleiterfertigung ausgewählt, sondern um die Auswirkungen eines giftigen Lösemittels zu untersuchen. Als weitere Variation wurden Eingangskonzentrationen von 200 und 800 mg/m³ gewählt. Diese Konzentration ist zu gering, als dass eine autotherme Verbrennung möglich wäre, weshalb kontinuierlich Erdgas zugeführt werden muss. Dessen Verbrauch ist abhängig von der Konzentration: bei

höherer Konzentration ist weniger Erdgas notwendig als bei niedriger Konzentration. Neben Erdgas wird elektrischer Strom für den Betrieb von Gebläsen und Servomotoren benötigt. Die direkten Emissionen beim Betrieb der Anlage resultieren einerseits aus der Verbrennung des Erdgases und der Lösemittel sowie aus den nicht umgesetzten Restemissionen der Lösemittel. Die Emissionen der Erdgasverbrennung wurden mit Hilfe von generischen Daten aus der ecoinvent-Datenbank [ecoinvent centre 2007] ermittelt. Die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung der Lösemittel wurden stöchiometrisch berechnet, während für die Restemissionen durchgängig von 20 mg/m³ ausgegangen wurde. Für die Restemissionen an PGMEA und Ethyllaktat musste verallgemeinernd der Summenparameter NMVOC eingesetzt werden, da diese Einzelstoffe nicht von der gewählten Wirkungsabschätzungsmethode (s. Kap. 4) berücksichtigt werden.

Um den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen, müssen auch die Herstellung und Entsorgung der Abluftbehandlungsanlage einbezogen werden, zumal es sich hier um große Anlagen mit hohem Materialaufwand handelt. Allerdings waren hierfür außer einer Schätzung des Gesamtgewichts von 16 t keine Primärdaten verfügbar. Somit wurde für die Analyse nur der Stahl als Hauptbestandteil der Anlage berücksichtigt. Für die Lebensdauer der Anlage wurden fünf Jahre angenommen, was der ökonomischen Abschreibungsdauer entspricht. Da der Stahl am Ende der Lebensdauer recycelt werden kann, wurde hier vereinfachend von einem closed-loop-Recycling ausgegangen, so dass Primärmaterial im selben System substituiert werden kann. Dem System wurde für diese Analyse nur die Hälfte des Primärmaterials an Stahl gutgeschrieben, um den Aufwand für Herstellung und Recycling widerzuspiegeln.

Tabelle 1 zeigt die Daten für die Berechnung der Szenarien im Überblick. Die Szenarien basieren auf Emissionsmessungen, Herstellerangaben und Daten zum Fabrikdesign der Firma M+W Zander. Für die thermische und elektrische Energie sowie für die Stahlerzeugung wurden Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank verwendet [ecoinvent centre 2007].

Tab. 1: Überblick über die Szenarien

Szenarioname	Eingangsemission NMVOC		Thermische Energie		Elektrische Energie		Stahl kg/a	Ausgangsemission NMVOC	
	mg/m ³	kg/a	kW	MJ/a	kW	kWh/a		mg/m ³	kg/a
Behandlung_200	200	16.000	104	2.995.000	15	120.000	1.600	20	1.600
Nicht- Behandlung_200	200	16.000	0	0	0	0	0	200	16.000
Behandlung_800	800	64.000	54	1.555.000	15	120.000	1.600	20	1.600
Nicht- Behandlung_800	800	64.000	0	0	0	0	0	800	64.000

4 Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtung

Für die Wirkungsabschätzung wurde die Methode Impact 2002+ [Joliet 2003] gewählt, die 14 Wirkungskategorien beinhaltet, von den wiederum zwölf zu vier Schadenskategorien zusammengefasst werden. Dazu gehören menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität, Klimawandel und Ressourcen. Durch eine Integration von Charakterisierungsfaktoren aus Eco-Indicator 99 und CML werden etwa 1500 Einzelstoffe abgedeckt.

Das Ergebnis der Wirkungsabschätzung zeigt, dass es bei der thermischen Behandlung einer Konzentration von 200 mg/m³ des ungiftigen Lösemittelgemisches in allen vier Schadenskategorien zu größeren Umweltauswirkungen im Vergleich zur Nicht-Behandlung kommt. Bei einer Konzentration von 800 mg/m³ kehrt sich bei der „menschlichen Gesundheit“ als einziger Schadenskategorie das Ergebnis zulasten der Nicht-Behandlung um. Die Umweltauswirkungen bei der Behandlung werden im Wesentlichen von der Erdgasnutzung verursacht (vgl. Abb. 1 und 2).

Ab einer Eingangskonzentration von etwa 600 mg/m³ (48 t/a) wäre die Schadenskategorie „menschliche Gesundheit“ für die Nicht-Behandlung höher als für die Behandlung (vgl. Abb. 3), wobei jedoch alle anderen Schadenskategorien niedriger bleiben. Bei der Substitution des Lösemittelgemisches durch ein giftiges Lösungsmittel wie Benzol zeigen sich deutlich höhere Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die Grenzkonzentration ab der die Nicht-Behandlung eindeutig besser abschneidet als die Behandlung sinkt hier auf etwa 50 mg/m³ (vgl. Abb. 4).

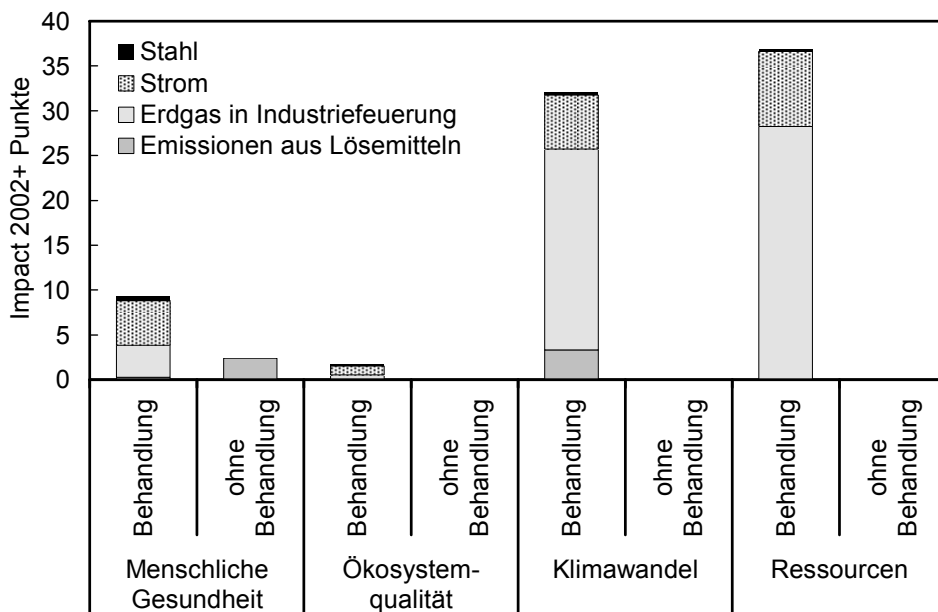


Abb. 1: Behandlung gegenüber Nicht-Behandlung von 200 mg/m³ Lösemittel während eines Jahres

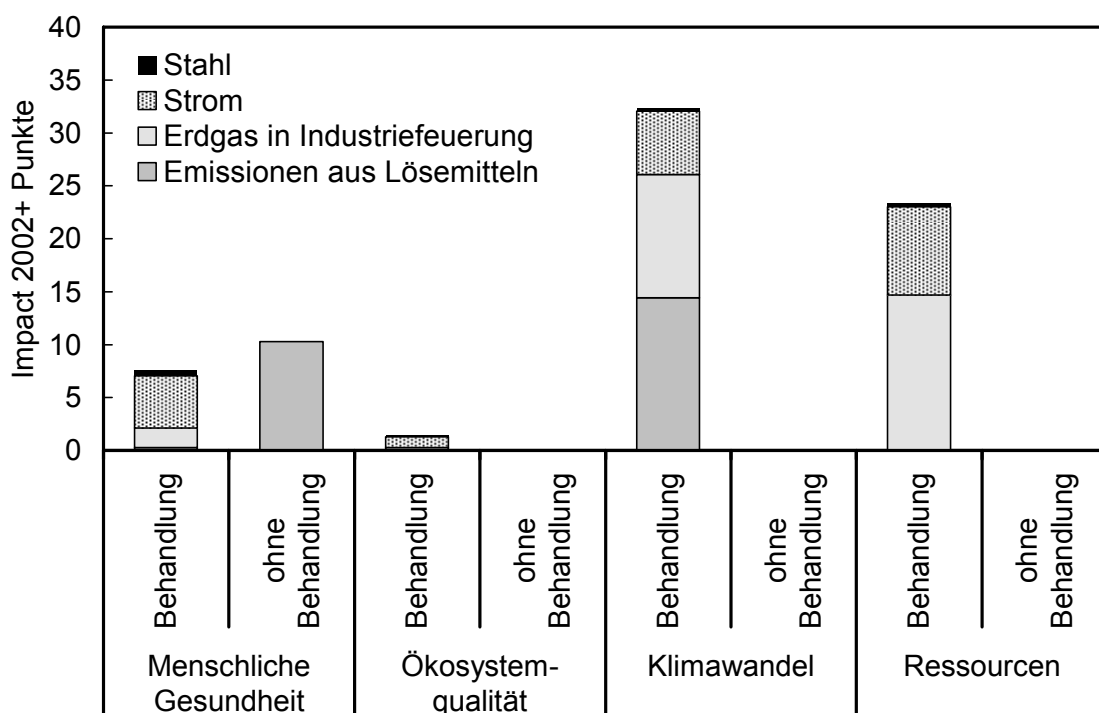


Abb. 2: Behandlung gegenüber Nicht-Behandlung von 800 mg/m³ Lösemittel während eines Jahres

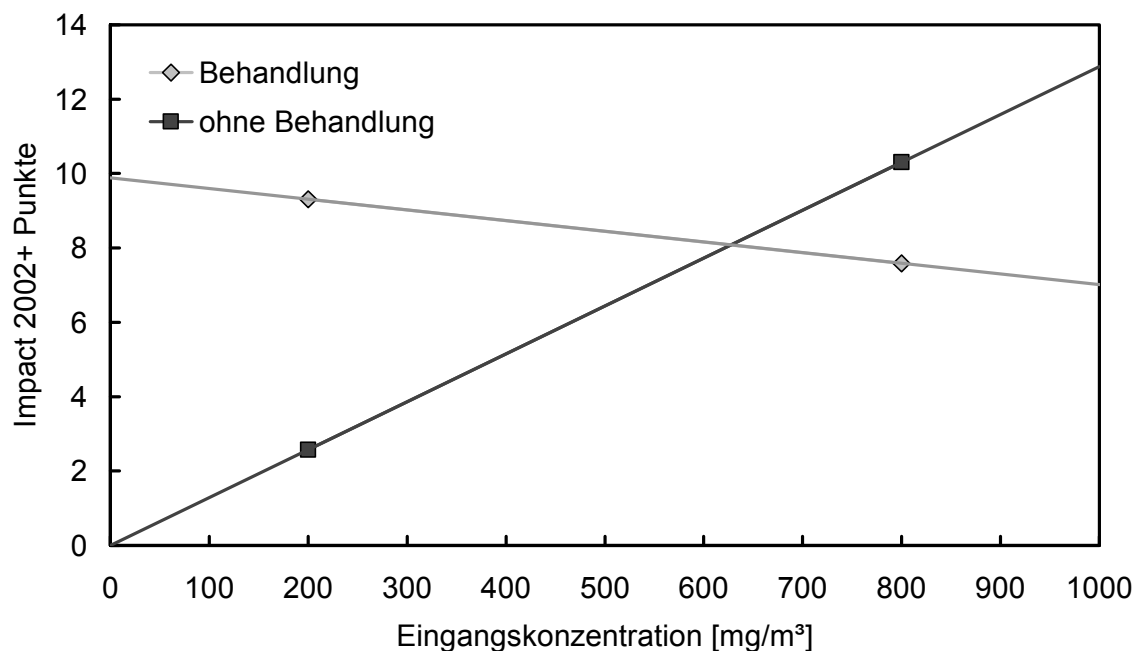


Abb. 3: Schadenscategory „menschliche Gesundheit“ in Abhängigkeit von der Eingangskonzentration

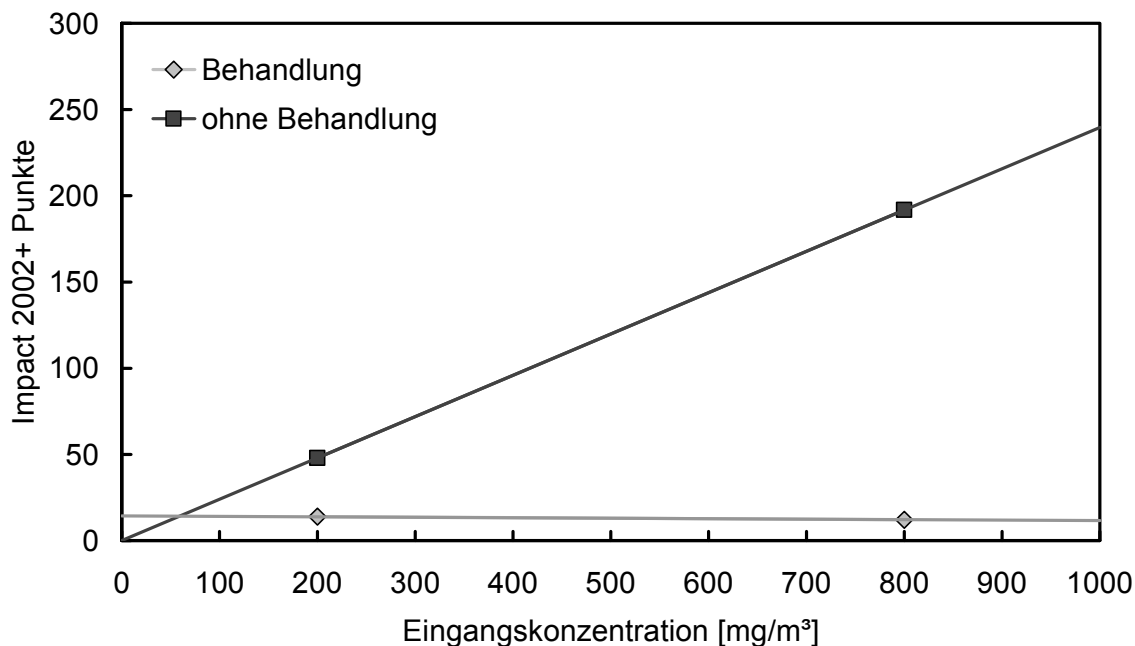


Abb. 4: Schadenskategorie „menschliche Gesundheit“ in Abhängigkeit von der Eingangskonzentration bei giftigem Lösemittel

5 Diskussion

Die Ergebnisse für die Behandlung von ungiftigen Kohlenwasserstoffverbindungen aus der Halbleiterfertigung zeigen, dass bei geringen Abluftkonzentrationen durch die thermische Behandlung die Umwelt insgesamt stärker belastet als entlastet wird. Bei höheren Konzentrationen erfolgt zwar eine Entlastung für die menschliche Gesundheit, durch den Einsatz fossiler Energien kommt es jedoch zur Verlagerung von Umweltauswirkungen. Dann muss zwischen den Schäden für die menschliche Gesundheit wie Atemwegsprobleme durch Sommersmog und den Folgen des Klimawandels sowie dem Ressourcenverbrauch abgewogen werden. In einem zeitbezogenen Kontext gesehen bedeutet das, dass zwischen kurzfristig auftretenden Folgen auf die menschliche Gesundheit und zukünftigen Problemen wie Klimawandel und Ressourcenverbrauch gewichtet werden muss. Unstrittig bleibt, dass VOC-Emissionen gemindert werden müssen. Bei thermischer Behandlung ist ein autothermer Betrieb anzustreben. Ist dieser nicht möglich, kann mit mehr Energieeffizienz die Problemverlagerung abgemildert, aber nicht beseitigt werden. Bei der Anlagenplanung und -genehmigung muss differenziert betrachtet werden, für welche Art von VOC, bei welcher Konzentration und mit welcher Technik die Behandlung gesamtökologisch sinnvoll ist. Die Minderung auf Grenzwertniveau auch mit besten

verfügbaren Techniken ist für die Umwelt als Ganzes nicht per se die beste Lösung. Es stellt sich die Frage, wie ein solches Ergebnis gegenüber Genehmigungsbehörden und politischen Entscheidungsträgern kommuniziert werden kann.

Referenzen

- [ecoinvent centre 2007] ecoinvent centre: ecoinvent data v2.0. ecoinvent reports No. 1-25. Dübendorf (2007), Swiss Centre for Life Cycle Inventories
- [Europäische Kommission 2006] Europäische Kommission: Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. Brüssel (2006)
- [Europäische Kommission 2008] Europäische Kommission: Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control (Codified version). Brüssel (2008)
- [Gerber 2006] Gerber, R.; Liechti, J.: VOC-Nachverbrennung und Energienutzung, in: Umwelt Perspektiven, 3/06, Illnau (2006)
- [Jolliet 2003] Jolliet, O. et al.: IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. Int. Journal of Life Cycle Assessment, 8 (6), S. 324-330
- [Schottler 2010] Schottler, M. et al.: NMVOC abatement in semiconductor and photovoltaic cell fabrication with respect to resource efficiency. Chemical Engineering & Technology, eingereicht