

Untersuchung der Emissionen eines Laserdruckers in der Prüfkammer und am Arbeitsplatz

B. Varnskühler, U. E. A. Fittschen, H. Georg, A. Goebel, M. Wesselmann

Zusammenfassung In niedersächsischen Landesbehörden wurden Tausende Laserdrucker des Typs Samsung ML-3471ND ausgemustert, weil Messungen von Gutachtern ergeben hatten, dass dieser Drucker aufgrund der hohen Emission von ultrafeinen Partikeln (UFP) die neuen Prüfvorschriften des Umweltzeichens „Blauer Engel“ nicht erfüllt. Die Emissionen von zwei Exemplaren dieses Druckertyps wurden in einer Prüfkammer und in realen Büroräumen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Drucker beim Drucken kein Tonerpulver emittiert. Die hohen UFP-Emissionen können auf die beim Drucken aus dem Papier und zu einem geringen Anteil aus dem Toner freigesetzten flüchtigen organischen Stoffe (VOC) zurückgeführt werden. Etwa 1,2 % der UFP enthalten feste Inhaltsstoffe, die aus dem Toner stammen könnten. Selbst hohe Druckleistungen führen im realen Büroraum nicht zu gesundheitlich bedenklichen VOC-Konzentrationen in der Raumluft. Angemessene Lüftung, die immer erforderlich ist, um den CO₂-Gehalt der Raumluft unter 1 000 ppm zu halten, reicht aus, um die UFP-Konzentration der Raumluft auf das Niveau der Außenluft zu begrenzen.

Characterization of laser printer emissions in a test chamber and in real-life use

Abstract The state government of Lower Saxony has banned the use of Samsung ML-3471ND laser printers in its offices after reports of high emissions of ultrafine particles (UFP) during printing with this printer. This decision has stirred up quite a bit of concern in public media and among federal government staff as well, who are also using this type of printer in substantial numbers. Therefore the emissions of this type of printer were closely examined in a test chamber as well as in two office settings. It was found that this type of printer does not emit toner powder during print jobs. The high emissions of UFP are almost completely composed of condensed volatile organic compounds (VOC). The VOC are most likely released from the paper and to a far lesser extent from the toner powder during the heated fusing process. About 1.2% of the total UFP number can be linked to solid toner components. Even a very high number of printed pages does not yield a hazardous concentration of VOC in the office air. Proper ventilation, which is always needed to maintain a healthy concentration of carbon dioxide, is sufficient to keep the UFP concentration within ambient air levels during printing.

Dipl.-Chem. Bernhard Varnskühler,
Unfallkasse des Bundes, Wilhelmshaven.

Dr. habil. Ursula Elisabeth Adriane Fittschen,
Institut für Anorganische und Angewandte Chemie,
Universität Hamburg.

Dipl.-Ing. Hartmut Georg, Dipl.-Ing. Arno Goebel,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Dipl.-Chem. Martin Wesselmann,
Bau-Institut Hamburg-Harburg, Hamburg.

1 Einleitung

Seit Ende der 1990er-Jahre wird in der deutschen Öffentlichkeit und in Expertenkreisen über mögliche Gesundheitsgefahren durch den Betrieb von Laserdruckern und Kopiergeräten diskutiert. Befürchtungen wurden besonders dahingehend geäußert, dass diese Geräte Tonerstaub in Form feiner und ultrafeiner Partikel freisetzen [1]. Auch unter Wissenschaftlern ging die Unruhe so weit, dass Emissionen von Laserdruckern mit Zigarettenrauch verglichen [2] und Tonerpartikel in Gewebepreparaten vermutet wurden [3], ohne dass diese Vermutung hinreichend belegt werden konnte [4]. Heute kann man gesichert davon ausgehen, dass es sich bei den freigesetzten ultrafeinen Partikeln (UFP) größtenteils um flüssige Kondensate flüchtiger und schwerflüchtiger organischer Stoffe (SVOC) handelt und nicht um Tonerstaub [5 bis 9].

Das Umweltbundesamt als Geschäftsstelle der Jury Umweltzeichen hat zusammen mit dem Deutschen Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL) die Vergabegrundlage RAL-UZ 171 [10] herausgegeben, die die Anforderungen für die Vergabe des Umweltzeichens „Blauer Engel“ für Bürogeräte mit Druckfunktion beschreibt. Darin ist festgelegt, dass nur Laserdrucker, die bei ununterbrochenem Druck innerhalb von 10 min nicht mehr als $3,5 \times 10^{11}$ UFP freisetzen, mit dem Umweltzeichen „Blauer Engel“ ausgezeichnet werden können. Die für die Auszeichnung maximal zulässige Emissionsrate ergibt pro gedruckter Seite ca. 1 bis 2 Mrd. freigesetzte UFP.

Der Prüfwert der RAL-UZ 171 ist nicht auf der Grundlage toxikologischer Daten gewählt worden, sondern soll die mit der heutigen Technik erreichbare Emission widerspiegeln [11]. Allein aus einer Überschreitung des UFP-Prüfwerts kann deshalb nicht geschlossen werden, dass eine Gesundheitsgefahr besteht. Der Prüfwert wurde so festgelegt, dass ihn voraussichtlich nur 25 % der geprüften Drucker einhalten können [11]. Damit soll entsprechend den Grundsätzen des Umweltzeichens [12] erreicht werden, dass nur die emissionsärmsten Drucker mit dem „Blauen Engel“ ausgezeichnet werden.

Obwohl der UFP-Prüfwert der RAL-UZ 171 bisweilen als „Feinstaub-Grenzwert“ wahrgenommen wird – so z. B. in einer Anfrage eines Abgeordneten der Piratenpartei im Schleswig-Holsteinischen Landtag [13] – handelt es sich nicht um einen Grenzwert im arbeitsschutzrechtlichen Sinn. Dennoch führte die Überschreitung dieses „gefühlten Grenzwerts“ dazu, dass ein bestimmtes Druckermodell, der Samsung ML-3471ND, in Behörden der niedersächsischen Landesverwaltung in großem Umfang ausgetauscht wurde [14]. Nachdem bei Beschäftigten eines Amtsgerichts mehrere Krebserkrankungen aufgetreten waren, bekam eine Umweltgutachterfirma den Auftrag, im Gebäude dieses Gerichts nach auffälligen Raumluftbelastungen zu suchen. Gebäudespezifische Emissionsquellen wurden nicht gefunden, aber hohe UFP-Emissionen des in diesem Gericht benutzten

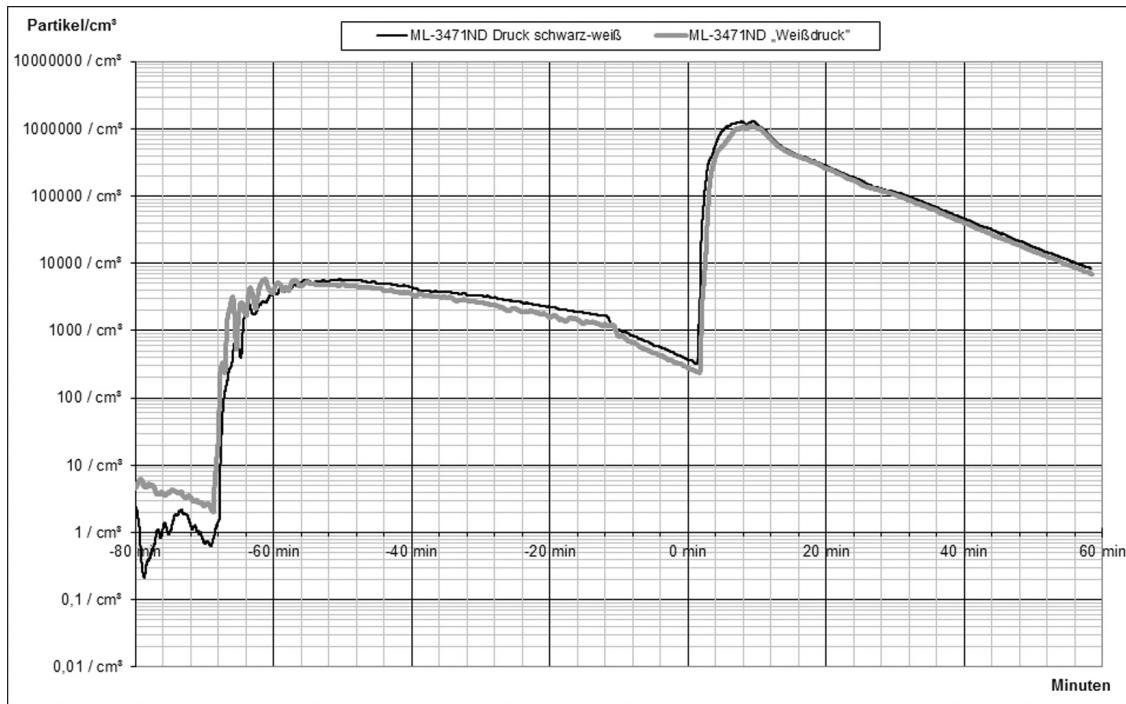


Bild 1. Verlauf der UFP-Emission, Experiment 1; Druckauftrag bei 0 min; - 70 bis 0 min: Drucker in Bereitschaft.

Laserdruckers Samsung ML-3471ND fielen auf. Die Gutachter wollten aufgrund der von ihnen festgestellten Überschreitung des UFP-Prüfwerts der RAL-UZ 171 „nicht ausschließen“, dass „gesundheitliche Risiken“ [14] bestünden. Verständlicherweise sorgten die Medienberichte über den Austausch des Samsung ML-3471ND in Niedersachsen auch in anderen staatlichen Verwaltungen, in denen dieser Drucker teilweise in großen Stückzahlen benutzt wird, für große Unruhe. Auf Bitten einer großen Bundesbehörde wurden deshalb die Emissionen dieses Druckermodells in verschiedenen Szenarien umfangreich untersucht.

2 Methoden

2.1 Experiment 1

Ein von einer Bundesbehörde zur Verfügung gestellter gebrauchter Drucker des Typs Samsung ML-3471ND wurde mit dem bei der Behörde verwendeten Toner und dem dort verwendeten Marken-Recyclingpapier im Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin, nach den Vorgaben des Prüfverfahrens RAL-UZ 171, Anhang S-M [10] untersucht. In einer Prüfkammer mit 1,25 m³ Raumvolumen wurden unter Zufuhr konditionierter Reinstluft innerhalb einer Druckzeit von 7,67 min 250 Blatt Papier mit dem vorgesehenen Prüfmuster bedruckt. Dabei wurden die Emissionsraten hinsichtlich der Parameter Gesamt-VOC (TVOC), Ozon und Gesamtstaub sowie UFP bestimmt. Die Messung der UFP-Emission wurde mit „Weißdruck“ wiederholt. Hierbei wurde jeweils auf einer ansonsten leeren Seite ein Buchstabe in der Textfarbe „weiß“ gedruckt. Dadurch wird erreicht, dass das Papier vom Drucker wie beim normalen Druck behandelt wird, mit der einzigen Ausnahme, dass kein Tonerpulver zugegeben wird. Das Papier wird so wie bei einem normalen Druckvorgang im Drucker aufgeheizt.

2.2 Experiment 2

Die Untersuchung nach RAL-UZ 171 ergibt zwar die Anzahl der emittierten UFP, kann aber keinen Aufschluss über deren Zusammensetzung geben. Dazu müssen die Partikel aufgefangen und mit Röntgen- sowie weiteren Methoden analysiert werden. Die Messungen zur Charakterisierung der emittierten Partikel wurden nicht in einer Prüfkammer, sondern in einem real genutzten Büro durchgeführt, um die beim Drucken erzeugten Partikel mit den im Büro bereits vorhandenen Partikeln und den Partikeln der Außenluft vergleichen zu können.

In dem zuvor über zwei Tage ungelüfteten Büro wurde zunächst die Belastung an VOC, Aldehyden und Ketonen sowie Feinstaub in den Fraktionen bis 10 µm Durchmesser (particulate matter, PM₁₀) und bis 2,5 µm Durchmesser (PM_{2,5}) ermittelt. Gleichzeitig wurden die in der Raumluft vorhandenen Partikel mit einem Impaktor auf Silicium- und Aluminiumscheiben (Wafer) gröbenselektiv gesammelt. Die bei diesen Messungen erhaltenen Werte repräsentieren eine akkumulierte Maximalbelastung, wie sie am Beginn einer Arbeitswoche vor dem ersten Lüften angetroffen wird (Ausgangslast). Im Folgenden wird angenommen, dass die Raumluftbelastung unmittelbar nach dem Lüften im Wesentlichen der Außenluftbelastung entspricht.

Nach einer Lüftung von ca. 10 min wurden diese Messungen wiederholt, wobei dieses Mal innerhalb von etwa einer Stunde alle zwei Minuten je 20 Seiten (insgesamt ca. 800 Blatt) gedruckt wurden. Der Impaktor befand sich während der Messungen etwa 1,5 m vom Drucker entfernt. Die Konzentration von feinen und ultrafeinen Partikeln wurde gleichzeitig direkt an der Lüfteröffnung des Druckers und in der Raummitte, etwa 2 m vom Drucker entfernt, gemessen. Nach der Sammlung der Partikel mit dem Impaktor wurde die UFP-Messung bei gleicher Druckleistung noch einmal wiederholt, wobei auf der Lüfteröffnung des Druckers ein handelsübliches Nachrüstfilter montiert war. Anschließend wurden die in der Außenluft enthaltenen Partikel mit dem

Tabelle 1. Prüfumfang des Umweltzeichens „Blauer Engel“ (Experiment 1).

Substanz	Anforderung RAL-UZ 171		Experiment 1	
	Σ Druck- und Bereitschaftsphase	Bereitschaftsphase	Σ Druck- und Bereitschaftsphase	Bereitschaftsphase
TVOC	10 mg/h	1 mg/h	6,13 mg/h	0,03 mg/h
Benzol	0,05 mg/h	–	0,01 mg/h	–
Styrol	1 mg/h	–	0,07 mg/h	–
Ozon	1,5 mg/h	–	0,02 mg/h	–
Staub	4 mg/h	–	1,84 mg/h	–
UFP	3,5 x 10 ¹¹ /10 min	–	30,88 x 10 ¹¹ /10 min	–

Impaktor gesammelt, sodass je Größenklasse der Partikel drei Proben erhalten wurden. Die PM₁₀-, PM_{2,5}- und UFP-Gehalte der Außenluft wurden parallel zur Messung der Ausgangsbelastung des Büros gemessen.

2.3 Experiment 3

Die Experimente 1 und 2 erforderten jeweils den Druck einer großen Anzahl von Seiten innerhalb kurzer Zeit. Ausnahmsweise mag eine solch hohe Druckleistung mit einem Tischgerät im Alltagsbetrieb vorkommen, die Regel ist dies jedoch ganz sicher nicht. Deshalb wurde in einem dritten Experiment versucht, einen realitätsnäheren Betrieb des Druckers zu simulieren. Im Experiment 3 wurden über einen Zeitraum von drei Stunden alle 10 min je zehn Seiten gedruckt. Nach zwei Stunden wurde das Büro für 10 min intensiv gelüftet. Während des Druckbetriebs wurde die Belastung der Raumluft mit CO₂, VOC, Aldehyden und Ketonen sowie mit PM₁₀, PM_{2,5} und mit UFP gemessen. Die Ausgangsbelastung wurde vor dem Druckbetrieb gemessen, die Außenluftbelastung mit Feinstaub und UFP parallel zum Druckbetrieb. Um einen möglichen Einfluss des verwendeten Papiers auf die Raumluftbelastung im Druckbetrieb zu ermitteln, wurde das Experiment mit drei verschiedenen Papierfabrikaten durchgeführt.

Die angewendeten Analysemethoden sind in einem ergänzenden Dokument beschrieben, das im Internet abrufbar ist¹⁾.

3 Ergebnisse

Das untersuchte Exemplar des Druckers würde in der Kombination mit dem verwendeten Toner und dem hier benutzten Papier das Umweltzeichen „Blauer Engel“ nach den derzeit geltenden Prüfvorschriften nicht erhalten. Wie in **Bild 1** zu erkennen ist, erzeugte diese Kombination in der Prüfkammer bereits nach 4 min Druck eine UFP-Konzentration von über 1 Million Partikel pro ml. Die Emissionsrate betrug 30,88 x 10¹¹ Partikel in 10 min (**Tabelle 1**) und damit etwa das Neunfache des in der RAL-UZ 171 genannten Maximalwerts. Pro gedruckter Seite bedeutet dieses

Messergebnis eine Emission von 12,55 Mrd. UFP. Wäre die UFP-Emission tatsächlich maßgeblich auf Tonerbestandteile zurückzuführen, sollte sie sich beim „Weißdruck“, also dem Druck ohne Zugabe von Tonerpulver, erheblich vom normalen Druck unterscheiden. Dies ist aber nicht der Fall, wie **Bild 1** zeigt.

Tabelle 1 zeigt, dass die weiteren Kriterien der RAL-UZ 171 eingehalten wurden. Die getestete Drucker/Toner/Papier-Kombination emittierte erheblich weniger VOC, darunter Benzol und Styrol, sowie Staub als das Umweltzeichen zulässt. Die Ozonemissionen lagen im Bereich der Bestimmungsgrenze des Messgeräts. Die Gesamtkonzentration aller emittierten VOC in der Prüfkammer lag mit 282 µg/m³ noch im Bereich des als „hygienischer Vorsorgebereich“ bezeichneten Zielwerts der Innenraumlufthygienekommission (IRK) beim Umweltbundesamt [15].

Im Experiment 2 zeigte sich bei hoher Druckleistung des Geräts ebenfalls eine sehr hohe UFP-Emission (**Bild 2**). Die Grundbelastung stieg in der Raummitte im Lauf des Experiments auf etwa 150 000 UFP/ml an. Durch den Einsatz eines Filters auf der Lüfteröffnung des Druckers konnten die UFP-Emission an der Lüfteröffnung und die Belastung der Luft in der Raummitte auf etwa 70 000 UFP/ml gesenkt werden. Die Spitzenwerte der Außenluftbelastung (70 000 bis 90 000 UFP/ml) sind auf Raucher zurückzuführen, die etwa 20 m von den Messgeräten entfernt waren. Die Messung der VOC-Gehalte der Raumluft¹⁾ zeigte, dass selbst bei sehr hoher Druckleistung die Belastung der Raumluft unterhalb des Zielwerts der IRK bleibt. Die Gesamtbelastung mit VOC

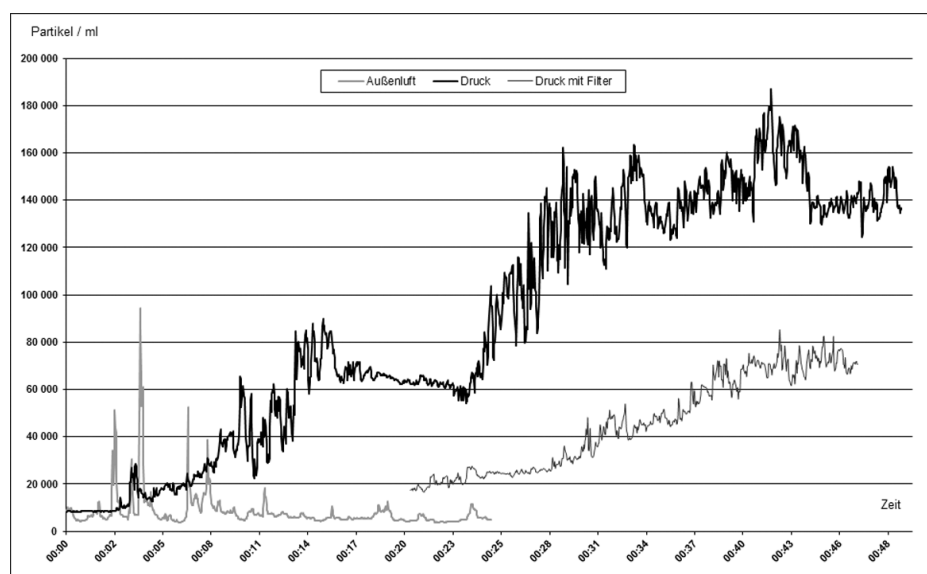


Bild 2. Vergleich UFP Innenraumlufte ohne und mit Filter; Außenluft Experiment 2; Messung in Raummitte.

¹⁾ [www.gefahrstoffe.de/gest/special_articles.php?data\[category_id\]=198](http://www.gefahrstoffe.de/gest/special_articles.php?data[category_id]=198)

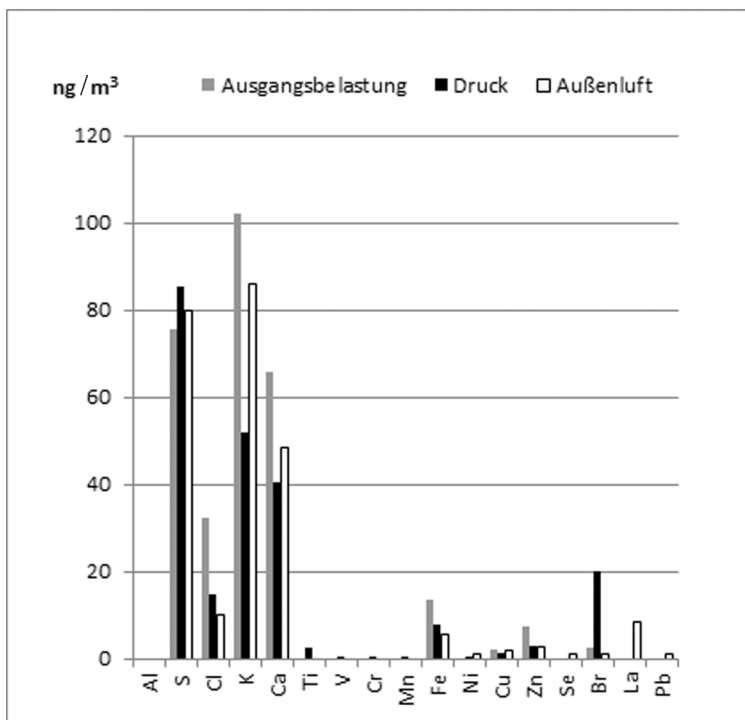


Bild 3. Elementgehalte der Partikelfraktionen 0,012 bis 0,3 µm; Experiment 2.

blieb während des Druckvorgangs kleiner als die vor der Lüftung des Raums gemessene Ausgangsbelastung.

Die Untersuchung der UFP durch Totalreflexionsröntgenfluoreszenzanalyse (TXRF) (Bild 3) ergab, dass die Mehrzahl der gefundenen Elemente in der Außenluft und in der Ausgangsbelastung des Büros in höherer Konzentration vorhanden waren als während des Druckbetriebs. Dieser überraschende Befund könnte ein Artefakt sein, da nach einer intensiven Lüftung erwartet wird, dass die gemessene Belastung im Bereich der Außenluftbelastung liegt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Impaktormessung der Außenluft erst nach der Messung im Druckbetrieb erfolgte und in diesem Zeitraum Schwankungen der Außenluftbelastung denkbar sind. Innerhalb dieser Unsicherheit lässt sich aber sicher feststellen, dass die sehr hohe Druckleistung nicht zu einer signifikanten Emission der betroffenen Elemente geführt hat.

Eine geringe Konzentration von Titan (2,44 ng/m³) sowie sehr geringe Konzentrationen von Vanadium (610 pg/m³), Chrom (240 pg/m³) und Mangan (300 pg/m³) traten ausschließlich bei den im Druckbetrieb aufgefangenen UFP auf. Titan, Chrom, Mangan und vor allem Eisen (7,93 ng/m³ in den aufgefangenen UFP) wurden als wesentliche Bestandteile im Toner gefunden (Tabelle 2). Während des Druckbetriebs wurden also die Metalle, die aus dem Toner stammen könnten, nur in sehr geringen Mengen in Form von UFP in der Raumluft gefunden. Es liegt auf der Hand, dass diese geringen Massen auch nur sehr wenige UFP bilden können. Nach den Ergebnissen von Barthel et al. [6] und Salthammer et al. [8] kann man davon ausgehen, dass der größte Teil der emittierten UFP einen Durchmesser von etwa 40 bis 70 nm hat. Daher wird für die folgenden Angaben eine mittlere UFP-Größe von 50 nm angenommen. Die gefundenen Metalle ergeben in Form ihrer jeweiligen Oxide die folgenden Partikelzahlen: Eisen: 32 Partikel/ml (0,015 %), Titan: 15 Partikel/ml (~ 0,01 %), Chrom: 1 Partikel/ml (0,0006 %), Mangan: 1,4 Partikel/ml (0,0007 %)¹). In Klammern ist je-

Tabelle 2. Metallgehalt des Toners.

Element	Gehalt in mg/kg	Gehalt in %
Eisen	70 000*	7
Chrom	730	0,07
Titan	950	0,1
Mangan	400	0,04
Vanadium	<	
Cobalt	4	
Kupfer	4	
Nickel	2	
Zink	15	
Zinn	85	

Erläuterungen:

<: kleiner Bestimmungsgrenze

*: Aufgrund des hohen Gehalts beträgt der Messfehler bei der angewendeten Analysenmethode bis zu 30 %.

weils der relative Anteil bezogen auf die im Bereich des Impaktors gemessene mittlere Partikelkonzentration von 212 000 Partikeln/ml angegeben.

Da schon die Ausgangsbelastung mit Eisen höher war als die Raumluftbelastung während des Druckens und auch die Außenluftbelastung kaum niedriger lag, ist

davon auszugehen, dass nur ein kleiner Teil des in den UFP aufgefangenen Eisens tatsächlich aus dem Toner stammt. Aus dem Toner könnte eventuell auch Vanadium stammen, das nur in den während der Druckphase aufgefangenen UFP auftrat. Im Toner selbst wurde jedoch kein Vanadium nachgewiesen. Nickel ist im Toner in Spuren vorhanden (Tabelle 2), trat jedoch in den UFP in der Außenluft in etwas höherer Konzentration auf als beim Druck. Die im Toner vorhandenen Elemente Kupfer und Zink fanden sich jeweils in der Ausgangsbelastung in höherer Konzentration als während der Druckphase, Kupfer auch in der Außenluft. Für diese Elemente kann deshalb angenommen werden, dass sie wie Chrom zu höchstens 0,0006 % zur UFP-Emission des Druckers beitragen.

Als Farbpigment wird in diesem Toner wahrscheinlich zusätzlich Ruß (Carbon Black) benutzt. Die Sicherheitsdatenblätter sowohl für den Originaltoner [16] als auch für ein Alternativprodukt [17] geben Carbon Black als Inhaltsstoff mit < 5 und < 8 % an. Der Anteil des Pigments Carbon Black und des Kieselgels an den aufgefangenen UFP kann mit den eingesetzten Messmethoden nicht direkt bestimmt werden. Nach den Angaben der Sicherheitsdatenblätter und der Tabelle 2 dürfte der Gehalt des Toners an Kieselgel etwa das 20- bis 50-Fache und der Gehalt an Carbon Black etwa das 50- bis 80-Fache des Titandioxidgehalts betragen. Unter der weiteren Annahme, dass Carbon Black und Kieselgel im gleichen Maße beim Druck freigesetzt werden wie Titandioxid, ergibt sich ein Anteil von festen Tonerbestandteilen an der UFP-Emission dieses Druckers von ca. 1,2 %. Selbst dann, wenn zur Berücksichtigung von Schätz- und Messfehlern ein Aufschlag von 100 % erfolgte, läge die Emission immer noch im Bereich der literaturbekannten Daten [6; 8; 9; 11].

In den größeren Partikelfraktionen 130 nm bis 2 µm und 2 bis 16 µm¹⁾ lagen für alle nachgewiesenen Elemente sowohl die Ausgangsbelastung des Büros als auch die Belastung der Außenluft wesentlich höher als die Belastung der beim

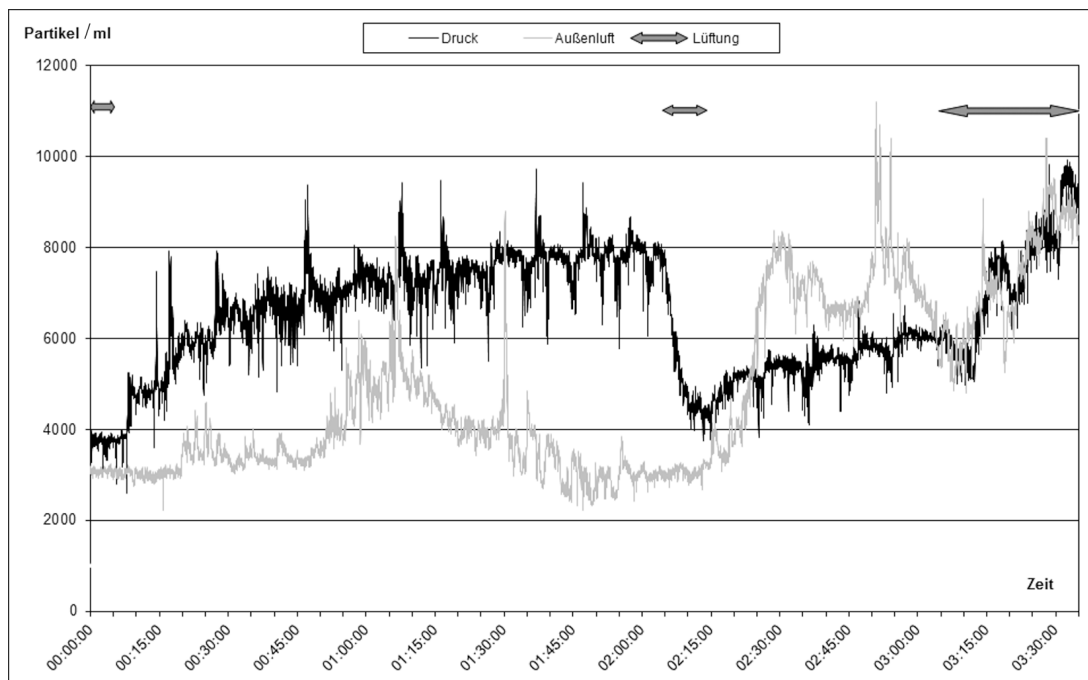


Bild 4. Vergleich UFP Innenraumluf/Außenluft; Experiment 3; no-name-Papier weiß.

Druck aufgefangenen Partikel, sodass für diese Partikelfraktionen kein Beitrag des Toners nachgewiesen werden kann. Anders als bei der UFP-Fraktion kann für die größeren Fraktionen gezeigt werden, dass Partikel, die mit der Außenluft eingetragen werden, recht schnell sedimentieren¹⁾. Niedrigere Messwerte während der Druckphase zeigen also an, dass der Drucker selbst nur sehr wenig zur Raumluftbelastung beiträgt. Die höhere Ausgangsbelastung korreliert mit der bei den Ausgangsmessungen höheren Anzahl der anwesenden Personen (personal cloud, [18]).

In Laserdruckern und Kopiergeräten werden der Toner und das Papier beim Aufschmelzen des Toners kurzzeitig stark erhitzt. Sowohl der Toner als auch das Papier enthalten signifikante Mengen an VOC, die bei diesem Prozess freigesetzt werden können: im vorliegenden Experiment 7 560 µg/kg (Toner) und 725 µg/kg (Papier 1)¹⁾. Da die erhitzte Papiermasse aber wesentlich größer ist als die aufgeschmolzene Tonermasse, übersteigt der Beitrag des Papiers zur VOC-Emission des Druckers den des Toners erheblich.

Bei dem verwendeten Druckmuster mit 5 % Schwärzung, die einem durchschnittlichen Text entspricht, werden auf 800 Druckseiten insgesamt ca. 30 g Toner aufgeschmolzen. Die aus dieser Tonermasse beim Drucken freisetzbare Menge an VOC ist so gering, dass sie im realen Büroraum nicht mehr nachgewiesen werden kann¹⁾. Gleichzeitig können jedoch beim Drucken VOC aus insgesamt 4 kg Papiermasse freigesetzt werden. Im vorliegenden Experiment war zum Beispiel die aus dem Papier freisetzbare Menge an n-Hexanal etwa 250-mal so groß wie die aus dem Toner¹⁾. Plakativ ausgedrückt zeigt dieses Beispiel: Beim Drucken riecht es nicht nach Ozon und auch nicht nach Toner, sondern nach erhitztem Papier.

Obwohl die aus dem Toner und aus dem Papier freisetzbaren Mengen an VOC im realen Büroraum kaum einen Einfluss auf die gemessene Raumluftbelastung haben, reichen sie sehr wohl aus, um die hohe Anzahl der freigesetzten UFP zu erklären. Pro Druckseite konnten aus dem verwendeten Papier $3,63 \times 10^{-6}$ g und aus dem verwendeten Toner

$2,85 \times 10^{-7}$ g VOC freigesetzt werden. Insgesamt sind dies pro Druckseite $3,91 \times 10^{-6}$ g VOC, aus denen sich $7,5 \times 10^{10}$ Partikel mit einem Durchmesser von 50 nm bilden können¹⁾. In Experiment 1 wurden durchschnittlich $12,35 \times 10^9$ Partikel pro gedruckter Seite gemessen. Diese Anzahl lässt sich also zwanglos aus der Kondensation der beim Aufschmelzen des Toners auf das Papier freigesetzten VOC erklären. Die unterschiedliche UFP-Emission verschiedener Druckertypen könnte nach diesem Erklärungsmodell durch die unterschiedliche Wärmebelastung [6] vor allem des Papiers beim Aufschmelzen des Toners bedingt sein. Das Beispiel verdeutlicht auch, warum sich – wie im Experiment 1 gezeigt – die UFP-Emission während des „Weißdrucks“ nur wenig von der des normalen Drucks unterscheidet: Der weitaus größte Teil der zu UFP kondensierten VOC stammt aus dem Papier. Dass es sich bei den freigesetzten UFP tatsächlich größtenteils um flüssige Kondensate von VOC handelt, konnten z. B. *Morawska et al.* [5], *Barthel et al.* [6] und *Salthammer et al.* [8] durch Erhitzen der UFP auf über 400 °C zeigen, wodurch diese UFP mit nur sehr wenig Rückstand verdampften.

Das Experiment 3 zeigt, dass die UFP-Konzentration der Raumluft (Bild 4) bei der Simulation eines realen Bürobetriebs (Druck von zehn Seiten alle 10 min) erheblich niedriger bleibt als bei den unrealistisch hohen Druckleistungen der Experimente 1 und 2. Interessant ist, dass bei allen untersuchten Papieren¹⁾ die UFP-Belastung der Raumluft nach der Lüftung des Büros (jeweils nach zwei Stunden Druckbetrieb) nicht wieder auf die vorherigen Werte anstieg, obwohl noch eine Stunde lang in gleicher Weise wie vor der Lüftung weiter gedruckt wurde. Die Ursache dieses Phänomens ist unklar. Die Messung des CO₂-Gehalts der Raumluft¹⁾ zeigt, dass die Lüftung nicht erst nach zwei Stunden, sondern bereits deutlich früher hätte erfolgen müssen. Nach der intensiven Lüftung über 10 min stieg der CO₂-Gehalt bald wieder auf über 1 000 ppm an, sodass wieder eine Lüftung notwendig gewesen wäre. In dem vor drei Jahren nach dem aktuellen energetischen Standard renovierten und relativ großen Büro (ca. 70 m³) war während der

Messungen nur eine Person anwesend. Die für einen einwandfreien CO₂-Gehalt notwendige Lüftung reicht offensichtlich aus, um die Raumluftbelastung mit UFP beim Drucken mit dem Samsung ML-3471ND annähernd auf dem Niveau der Außenluftbelastung zu halten.

4 Zusammenfassung

Bis heute ließ sich nicht belegen, dass Laserdrucker beim Drucken gefährliche Mengen an Tonerstaub freisetzen. Der Samsung ML-3471ND macht hierbei keine Ausnahme. Die vorliegenden Untersuchungen mit diesem Drucker bestätigen die Ergebnisse der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und des Umweltbundesamts [6; 11], des Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Instituts [4; 5; 8] und weiterer, auch internationaler Arbeitsgruppen [7; 9], wonach die UFP-Emission von Laserdruckern im Gegenteil zum größten Teil aus flüssigen Kondensaten flüchtiger organischer Stoffe besteht. Die freigesetzten Stoffe stammen zu einem erheblich größeren Anteil aus dem Papier als aus dem Toner. Die Gesamtmenge der beim Drucken freigesetzten Stoffe ist so

gering, dass selbst bei hohem Druckaufkommen die Raumluft kaum messbar belastet wird. Es entstehen jedoch spezifische Gerüche, die die Nutzer beunruhigen können [19]. Durch die in jedem Fall notwendige Lüftung wird bei einem üblichen Druckaufkommen gleichzeitig die UFP-Belastung der Raumluft auf Werte im Bereich der Außenluftbelastung begrenzt.

Es ist verständlich, dass Gutachter es als problematisch ansehen, gesundheitliche Risiken auszuschließen, denn theoretisch ist es immer denkbar, dass es besonders empfindliche Menschen gibt, die auf einen gegebenenfalls noch nicht beschriebenen Parameter reagieren. Die Belastung der Raumluft bei der Benutzung des Samsung ML-3471ND bleibt jedoch nach den heute allgemein wissenschaftlich akzeptierten Bewertungsschemata zur Prüfung der Innenraumlufthygiene im hygienisch einwandfreien Bereich. Es ist kein Anhaltspunkt ersichtlich, der es erforderlich macht, dieses Druckermodell im Büroalltag nicht mehr zu benutzen.

Literatur

- [1] *Stelling, H.-J.*: Krank durch Toner – Erfahrungen mit einer Nanopathologie. *Umweltmed. Forsch. Prax.* 11 (2006) Nr. 5, S. 329-337.
- [2] *He, C.; Morawska, L.; Taplin, L.*: Particle emission characteristics of office printers. *Environ. Sci. Technol.* 41 (2007) Nr. 17, S. 6039-6045.
- [3] *Theegarten, D.; Boukercha, S.; Philippou, S.; Anhenn, O.*: Submesothelial deposition of carbon nanoparticles after toner exposition: Case report. *Diagn. Pathol.* (2010) Nr. 5:77.
- [4] *Wensing, M.; Schripp, T.; Uhde, E.; Salthammer, T.*: A comment on "Theegarten et al.: Submesothelial deposition of carbon nanoparticles after toner exposition: Case report.", *Diagn. Pathol.* (2010) Nr. 6:20.
- [5] *Morawska, L.; He, C.; Johnson, G.; Jayaratne, R.; Salthammer, T.; Wang, H.; Uhde, E.; Bostrom, T.; Modini, R.; Ayoko, G.; McGarry, P.; Wensing, M.*: An investigation into the characteristics and formation mechanisms of particles originating from the operation of laser printers. *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009) Nr. 4, S. 1015-1022.
- [6] *Barthel, M.; Pedan, V.; Hahn, O.; Rothhardt, M.; Bresch, H.; Jann, O.; Seeger, S.*: XRF-analysis of fine and ultrafine particles emitted from laserprinting devices. *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011), S. 7819-7825.
- [7] *Castellano, P.; Canepari, S.; Ferrante, R.; L'Episcopo, N.*: Multiparametric approach for an exemplary study of laser printer emissions. *J. Environ. Monit.* 14 (2012), S. 446-454.
- [8] *Salthammer, T.; Schripp, T.; Uhde, E.; Wensing, M.*: Aerosols generated by hardcopy devices and other electrical appliances. *Environ. Poll.* (2012) Nr. 169, S. 167-174.
- [9] *Bello, D.; Martin, J.; Santeufemio, C.; Sun, Q.; Bunker, K. L.; Shafer, M.; Demokritou, P.*: Physicochemical and morphological characterization of nanoparticles from photocopiers: Implications for environmental health. *Nanotoxicology* 7 (2013) Nr. 5, S. 989-1003.
- [10] RAL-UZ 171. Bürogeräte mit Druckfunktion. Hrsg.: RAL, Sankt Augustin. www.blauer-engel.de/de/produkte_marken/vergabegrundlage.php?id=259
- [11] *Barthel, M.; Fiedler, J.; Giacomini, M.; Moriske, H.-J.; Seeger, S.; Thurner, J.-U.*: Partikelemissionen aus Laserdruckern – Aktueller Sachstand. *UMID* (2012) Nr. 1, S. 23-29.
- [12] Grundsätze zur Vergabe des Umweltzeichens Blauer Engel. Hrsg.: RAL, Sankt Augustin. www.blauer-engel.de/_downloads/publikationen/Vergabegrundsaeetze.pdf
- [13] Schleswig-Holsteinischer Landtag, Drucksache 18/686. www.landtag.ltsh.de/infothek/wahl18/drucks/0600/drucksache-18-0686.pdf
- [14] Niedersächsischer Landtag, Drucksache 17/397. www.niedersachsen.de/starweb/NILAS/servlet.starweb?path=NILAS/lisshfl.web&id=nilaswebfastlink&format=WEB-LANGFL&search=WP=17%20AND%20DART=D%20AND%20DNR=397#?
- [15] *Seifert, B.*: Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). *Bundesgesundheitsbl.* 42 (1999), S. 270-278.
- [16] Sicherheitsdatenblatt ML-D3470A, ML-D3470B, ML-D3477B. Hrsg.: Samsung Electronics GmbH, Schwalbach. http://www.syspac.de/samsung/datenblaetter/msds_ml-d3470a_ml-d3470b_ml-d3477b.pdf
- [17] Material Safety data sheet Samsung ML 3470/3471. Hrsg.: Clover Technologies, Ottawa, Illinois, USA. www.clovertech.com/product/b/1532/0
- [18] *Ferro, A. R.; Kopperud, R. J.; Hildemann, L. M.*: Elevated personal exposure to particulate matter from human activities in a residence. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* 14 (2004), Suppl. 1, S. S34-S40.
- [19] *Mayer, S.*: Die gesundheitliche Relevanz von Innenraumbelastungen – Die Bedeutung von Gerüchen. *Zbl. Arbeitsmed.* 63 (2013), S. 312-323.