

## **A) Allgemeines**

### **1. Schadstoffe bei der Verwendung von Tonern bei Laserdruckern**

Laserdrucker besitzen heute im Allgemeinen eine Druckauflösung von etwa 1200 dpi, das heißt von mindestens 1200 Punkten auf einer Strecke von 2.54 cm (= 1 inch). Der einzelne Druckpunkt muss also deutlich weniger als 0.02 mm oder 20 µm groß sein, damit überhaupt ein scharfes Druckbild erzeugt werden kann. Weitere Anforderungen, wie die Haftung auf dem Papierträger, die Druck- und Hitzebeständigkeit machen es erforderlich, dass Druckertoner aus einem Gemisch unterschiedlicher Komponenten zusammengesetzt ist. Dazu gehören als Hilfsstoffe Styrol-Polyacrylat-Kunststoffe, zinnorganische Verbindungen sowie in Spuren Schwermetalle und evtl. weitere Trägermaterialien. Hauptsächlich besteht Toner jedoch aus ultrafeinen Kohlenstoff-Partikeln, die für den eigentlichen Druckprozess und die Auflösung des Druckers maßgeblich sind. Diese komplexe Zusammensetzung des Toners bedeutet aber auch, dass das Potential für die Emission verschiedenster potentiell schädlicher Verbindungen besteht. Nachgewiesen (Quelle: [http://nano-control.de/pdf\\_htm/Augsburger\\_Journal-Toner\\_2010Okt.pdf](http://nano-control.de/pdf_htm/Augsburger_Journal-Toner_2010Okt.pdf)) sind „ein Mix aus Feinstäuben, winzigsten Nanopartikeln und Schadstoffen, z.B. Schwermetallen, gefährlichen flüchtigen organischen Verbindungen, ... Di- und Tributylzinn, krebserregenden PAKs [= Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, teils krebserregend] und Weichmachern ...“.

Gerade für empfindliche Menschen stellen diese Emissionen ein potentielles gesundheitliches Risiko dar. Insbesondere Krankheiten in Verbindung mit den Atemorganen, wie Asthma, wurden mit dem Einatmen der Emissionen aus Laserdruckern in Verbindung gebracht. Zumindest in einem dieser Fälle wurde eine irreparable Lungenschädigung im Zusammenhang mit der Verwendung von Laserdruckern als Berufskrankheit anerkannt.

Verschiedene Vorsichtsmaßnahmen sind deshalb vorgeschlagen worden, um die gesundheitliche Gefährdung durch Laserdrucker zu minimieren. Neben ausreichendem Lüften der Räume, dem räumlichen Isolieren der Drucker – Methoden, die nicht immer praktikabel sind – ist eine Alternative auch die Verwendung geeigneter Luftfilter, die Schadstoffe am Entstehungsort neutralisieren.

Im Folgenden wird der „Dust Buster“ der Firma ECO Service, Pesaro (Italien) mit Hilfe verschiedener mobilen Messgeräte in einfachen, vorläufigen Experimenten auf seine Eignung getestet, ein Teil dieser Emissionen auf der Abluft der Druckers herauszufiltern.

### **2. Feinstaubbelastung und Nanopartikel**

Unter Feinstaub versteht man Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm bis hinunter zu etwa 1 µm. Kleinere Partikel, insbesondere Teilchen mit einer Partikelgröße von weniger als 0.1 µm bezeichnet man als Nanopartikel oder als Ultrafeine Stäube. Wichtig dabei ist zum einen die Tatsache, dass Partikel ab etwa 2.5 nm nicht mehr durch die mechanischen und physikalischen Filtermechanismen der Atemwegsorgane zurückgehalten werden, sondern ungehindert das Bronchialsystem passieren, sie sind „lungengängig“. Nanopartikel stehen überdies in dem Ruf, trotz oder gerade aufgrund ihrer Winzigkeit aufgrund der aktiven Oberfläche zusätzliches schädigendes Potential zu besitzen.

In bisherigen Untersuchungen durch diverse Institute wurde nachgewiesen, dass während des Ausdrucks durch einen Laserdrucker Partikelkonzentrationen von mehr als 1000 000 Teilchen/ml (Partikel im Nanometer-Größenbereich) freigesetzt werden können, wobei der Ausgangswert vor dem Drucken bei etwa maximal 10 000 Partikeln pro ml liegt.<sup>1</sup> Die Belastung beim Ausdrucken kann also im Vergleich zu „normaler“ Umgebungsluft durchaus um einen Faktor von 100 ansteigen.

Die Untersuchungen der Partikelzahlen im Nano-Bereich sind apparativ sehr aufwändig und wurden deshalb aus Kostengründen nicht wiederholt. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse wurden mit Hilfe eines Partikelmessgerätes bestimmt, das Emissionen im Bereich von 0,5 bis 5 µm bestimmen kann. Beim Drucken mit einem Laserdrucker entstehen Partikel im Bereich zwischen etwa 10 nm (=0.01 µm) und etwa 10 µm, so dass mit Hilfe dieses Messgerätes nur ein geringer Prozentsatz der gebildeten Schadstoffe, eben der größeren Partikel, erfasst werden kann. Trotzdem kann dieser messtechnisch leicht zu erfassende geringe Prozentsatz im oberen Größenbereich durchaus als geeigneter Indikator für eine potenziell schädliche Feinstaubbelastung bzw. Belastung mit Nanopartikeln erachtet werden.

Messtechnisch wird dabei durch ein Ansaugstück ein definiertes Luftvolumen durch eine Sonde geleitet. Per Laserstrahl werden die einzelnen Partikel gezählt und gleichzeitig deren Größe ausgewertet. Die erhaltenen Messwerte werden für einen Zeitraum von einer Minute aufsummiert, während derer ein Liter durch das Messgerät geströmt ist. Die folgenden Zahlen beziehen sich als immer auf ein Volumen von 1 Liter = 1000 ml.

---

<sup>1</sup> Untersuchungen an der Politecnico di Torino, siehe Flyer „ECO Service Office“, A. Levo, D. Stein, persönliche Mitteilung,

## B Versuchsergebnisse

### Vorversuche mit dem Partikelmessgerät

Vorversuche mit dem Partikelmessgerät in den Datenkanälen mit  $0,5\ \mu\text{m}$  (an der Grenze zu Nanopartikeln) und  $5\ \mu\text{m}$  (typischer Feinstaub) ergaben als „Nullwert“ in einem geschlossenen Raum eine Ruhebelastung von etwa 2000 ( $0,5\ \mu\text{m}$ , **blaue Linie in Abb. 1**) bzw. 200 ( $5\ \mu\text{m}$ , **grüne Linie in Abb. 1**) Partikeln pro Liter (Partikel/l). Störungen, wie z. B. das Aufschütteln eines Kissens oder Umhergehen auf einem Teppichboden machen sich unmittelbar in einem beträchtlichen Anstieg an Partikeln bei beiden Messkanälen bemerkbar (siehe Abbildung 1).

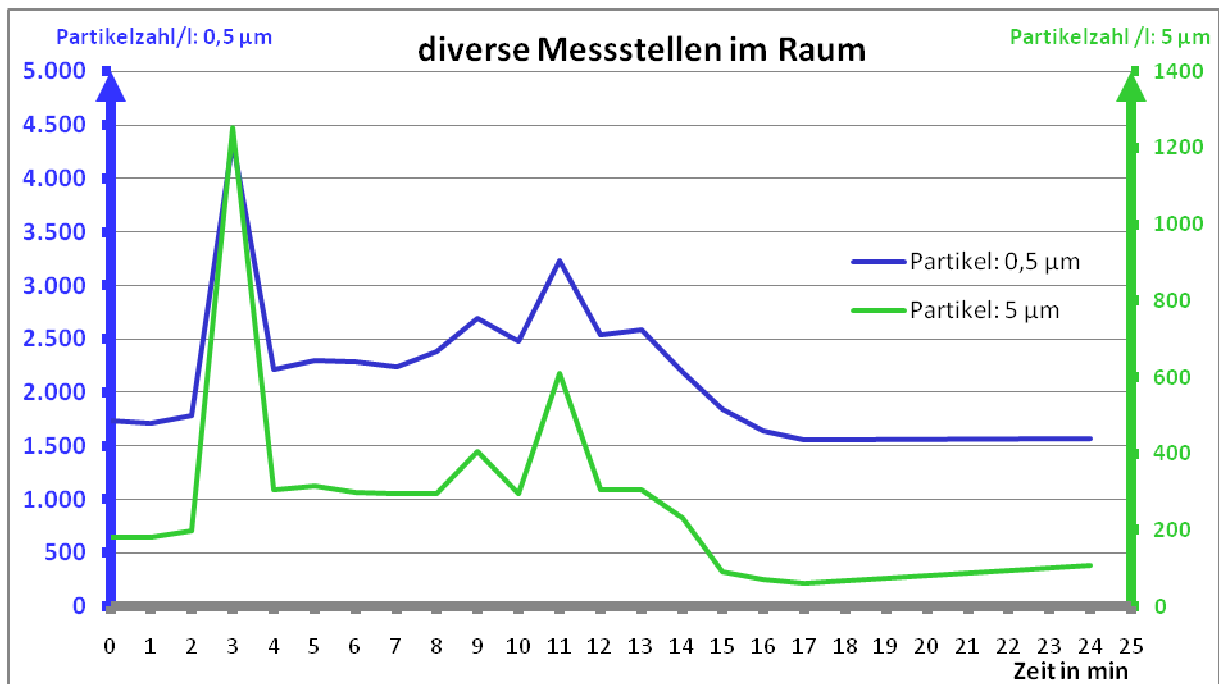


Abb. 1: Vorversuche mit dem Partikelmessgerät

*T = 0 – 1 min: Ruhebelastung*

*T = 2 min: Sofakissen aufgeschüttelt, ergibt einen scharfen Anstieg der Schwebepartikel*

*T = 3 – 10 min: Ausbreitung der Partikel im Raum*

*T = 11 min: Gehen über den Teppichboden*

*T = 14 – 17 min: Lüften des Raumes (Durchzug)*

*T = 24 min: Geschlossener Raum, allmähliche Rückkehr zur Ruhebelastung*

## Versuchsergebnisse beim Drucken

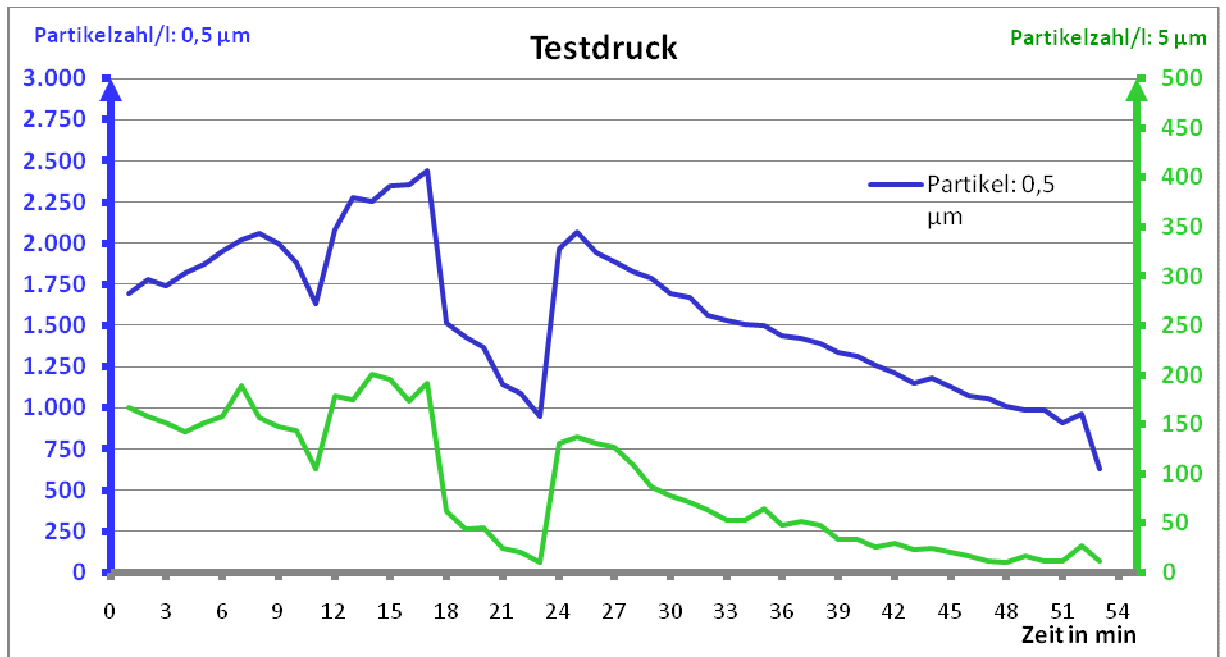


Abb. 2

Nachdem sich im Raum ein Gleichgewicht mit einer Ruhebelastung von etwas mehr als 1500 Partikeln pro Liter (**Messkanal 0.5 µm**) eingependelt hat ( $t = 1$  min), wurde zunächst der Drucker eingeschaltet ( $t = 2 - 3$  min). Während der folgenden 3 min ( $t = 4 - 6$  min) wurden nun - zunächst mit ausgeschaltetem Luftfilter - 100 Seiten ausgedruckt. Die Partikelzahl, gemessen am Lüfter-Auslass des *Dust-Busters* steigt dabei zunächst nur leicht an auf etwa 2000 Partikel pro Liter ( $t = 7$  min) an. Der darauf folgende Abfall ist darauf zurückzuführen, dass das Messgerät nun vom unmittelbaren Entstehungsort der Emissionen am Drucker in die Raummitte verlagert wurde. Es dauert etwas länger, bis sich die Druckerstaub-Wolke gleichmäßig im ganzen Raum verteilt hat. Zum Zeitpunkt  $t = 17$  min hat sich ein maximaler Wert von 2500 Partikel pro Liter eingestellt.

Zu diesem Zeitpunkt wurde nun der Luftfilter eingeschaltet. Während der folgenden Minuten ( $t = 18 - 22$  min) wurde nun die gereinigte Luft direkt am Luftauslass des Luftfilters gemessen. Dort ist innerhalb kürzester Zeit ein dramatischer Abfall der Luftbelastung bis auf einen Wert, der mit 1000 Partikeln sogar deutlich unterhalb der Anfangsbelastung zu liegen kommt, zu verzeichnen.

Es war jedoch auch wichtig zu ermitteln, ob der Luftfilter in der Lage ist, die Raumluft so umzuwälzen und zu reinigen, dass auch bereits im Raum verteilten Tonerpartikel allmählich herausgefiltert werden. Aus diesem Grunde wurde der Luftfilter weiter laufen gelassen, wobei nun ab der 23. Minute in der Raummitte, etwa 1 m vom Laserdrucker entfernt, gemessen wurde (siehe Abb. 2, rechter Teil).

Auch hierbei ist das Ergebnis beeindruckend: Die Luftreinigung erfolgte zwar nicht unmittelbar, wie vorher am Luftauslass beschrieben. Innerhalb der folgenden 30 min sank die Luftbelastung jedoch kontinuierlich ab. Erstaunlicherweise erreicht die Partikelzahl im Raum zu dieser Zeit mit 1000 denselben Wert, wie er direkt am Luftauslass beobachtet wurde.

Der Luftfilter ist demnach unter den verwendeten Versuchsbedingungen (Bürraum, ca.  $40 \text{ m}^3$  Luft) in der Lage, innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne auch schon belastete Luft gründlich zu reinigen.

Für die Partikel mit einer Partikelgröße von 5  $\mu\text{m}$  (grüne Linie in Abb. 2) gilt in etwa derselbe Verlauf, wenn auch die Veränderungen insgesamt deutlich weniger ausgeprägt sind. Dafür ist der Luftfilter aber in der Lage, nahezu sämtliche Partikel dieser Größe aus der Raumluft herauszufiltern (Anfangswert: ca. 500 Partikel pro Liter, Endwert: ca. 10 Partikel pro Liter)

## Weitere Versuche

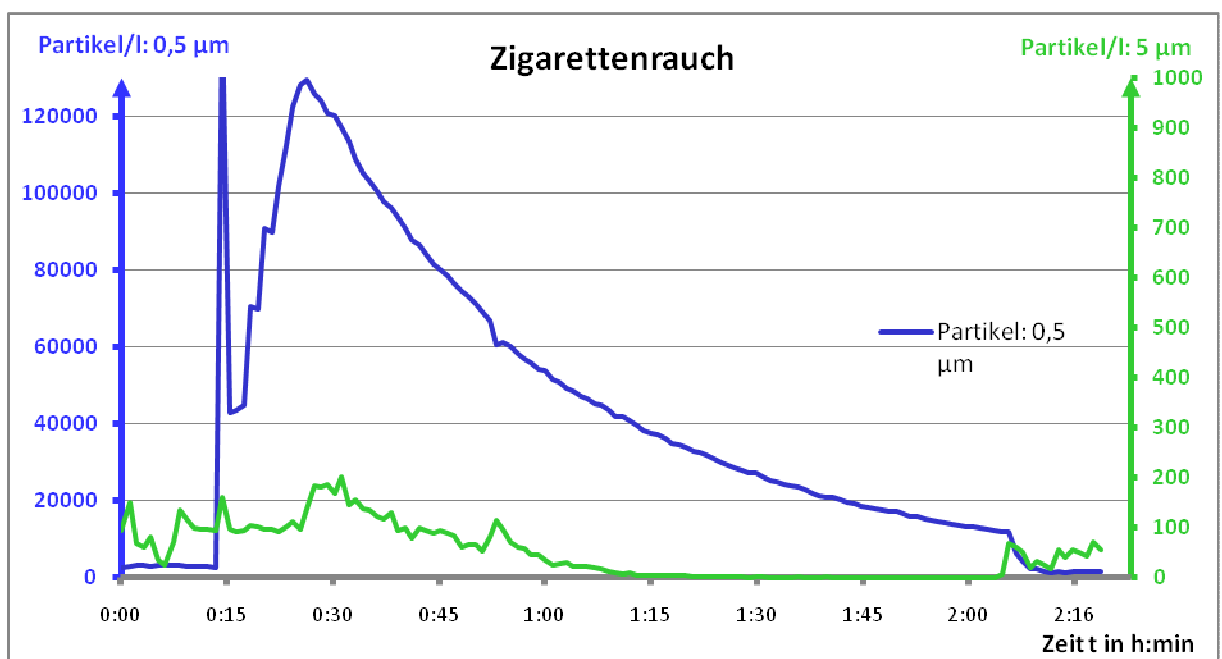
### Versuche mit Zigarettenrauch

Mit den vorgestellten Versuchen war es nicht möglich, die in der Literatur beschriebene Vervielfachung der Partikelzahl um mindestens den Faktor 100 zu reproduzieren. Dies mag damit zusammenhängen, dass – wie bereits erwähnt – das verwendete Messgerät lediglich einen Bruchteil aus dem erzeugten, breiten Partikelspektrum zu messen in der Lage ist. Der größte Teil der kleineren Partikel bleibt somit unentdeckt. Diese Partikel könnten lediglich mit einem erheblich größeren, nicht mehr vertretbarem apparativen Aufwand quantitativ gemessen werden. Das vorhandene Messgerät ist also lediglich in der Lage, die Partikel im Grenzbereich von Feinstaub und Nanopartikel zu messen und zu quantifizieren. Aber auch in diesem Bereich konnte eine signifikante Erhöhung der Luftbelastung, wenn auch nur um den Faktor 2 – 3 nachgewiesen werden. Diese Verdopplung bzw. Verdreifachung bezieht sich aber nicht nur auf die unmittelbare, begrenzte Umgebung des Laserdruckers, sondern betrifft, für den Fall, dass die Raumluft ungefiltert bleibt, den ganzen Raum, im vorliegenden Fall sind das immerhin etwa 40  $\text{m}^3$  Raumluft, die mit der Abluft des Laserdruckers verunreinigt werden.

Bei einem Testversuch in der freien Natur wurde beiläufig festgestellt, dass Zigarettenrauch selbst in mehr als 5 m Entfernung eine deutliche Erhöhung der Feinstaub-Belastung zur Folge hatte.

Aus dieser Beobachtung heraus entstand die Idee, die Luftverunreinigung durch Tonerpartikel durch leicht messtechnisch zu erfassenden Zigarettenrauch zu simulieren. Dadurch könnte auch die Leistungsfähigkeit des eingesetzten Luftfilters getestet werden.

Der Raum wurde also mit dem Rauch einer Zigarette geflutet und nach der Messung der anfänglichen Luftbelastung wurde der *Dust-Buster* mit seinem Luftfilter in Betrieb genommen. Das erhaltene Ergebnis ist in der Abb. 3 dargestellt.



*Abb. 3 (Erläuterungen im Text)*

In den ersten zehn Minuten ist die Ruhebelastung des Raumes von etwa 1000 Partikeln/l ( $0,5 \mu\text{m}$ ) bzw. 100 Partikeln/l ( $5 \mu\text{m}$ ) zu sehen. Der scharfe Anstieg nach etwa 15 min ist einer Messung direkt in der Fahne des Zigarettenqualms zu verdanken. Dabei werden Spitzenwerte von 145 000 Partikeln pro Liter ( $0,5 \mu\text{m}$ ) erhalten. Der Rest der Kurve bis zu einer Zeit von etwa 25 min bildet das allmähliche Ansteigen der Luftbelastung durch den Zigarettenrauch ab. Im Maximum ist der Raum mit einer Menge von etwa 120 000 Partikeln/l ( $0,5 \mu\text{m}$ ) belastet.

Zu diesem Zeitpunkt, als die Zigarette herunter gebrannt war, wurde nun wiederum der Luftfilter eingeschaltet, um dessen Wirkung bei dieser immensen Belastung zu testen. In der Messkurve erkennt man eine eindeutige Reduktion des Zigarettenqualms im Verlaufe der nächsten beiden Stunden. Zu diesem Zeitpunkt ist die Belastung auf einen Wert von etwa 12 000 Partikeln/l ( $0,5 \mu\text{m}$ ) gesunken. Interessanterweise wurden die größeren Feinstaubpartikel (grüne Linie) bereits nach einer knappen Stunde komplett (Werte: 0 – 2 Partikel pro Liter) aus der Luft heraus gewaschen. Erst das darauf folgende ausgiebige Lüften (nach gut 2 Stunden) führt aus der Außenluft wieder neue Partikel dieser Größe zu.

## Langzeitversuche mit der Umgebungsluft

Im Verlaufe einer Messung wurde festgestellt, dass die Ruhebelastung tageszeitlichen Schwankungen unterworfen war. Dieser Befund sollte genauer untersucht und es sollte geprüft werden, inwieweit die insbesondere untertags auftretende allgemeine Belastung mit Hilfe des Luftfilters reduziert werden kann.

Für diesen Versuch wurde das Messgerät jeweils für etwa drei Tage im geschlossenen Raum ununterbrochen laufen gelassen, wobei einmal ohne Einsatz des Luftfilters und zum anderen bei kontinuierlichem Einsatz des Luftfilters gearbeitet wurde. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

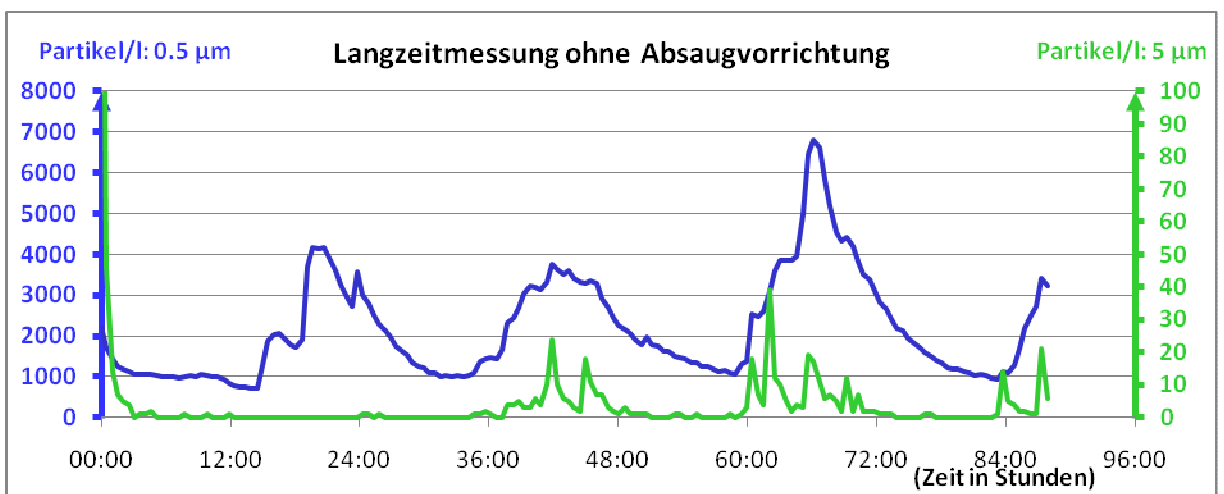


Abb. 4: Messungen von Mittwoch – Samstag (ohne Dust-Buster)

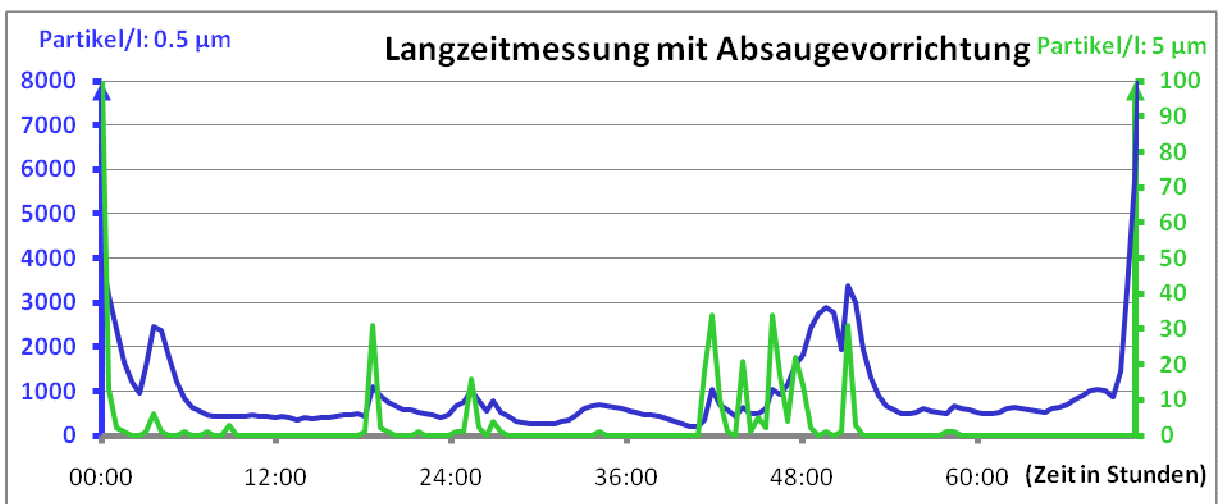


Abb. 5: Messungen von Samstag – Mittwoch (mit Dust-Buster)

Beide Abbildungen: Grafik-Legenden wie in Abb. 1 – 3; Zeit in Stunden

Ohne die Absaugvorrichtung des Luftfilters (Abb. 4) ergibt sich, wie bereits angedeutet, ein ausgeprägter tageszeitlicher Verlauf der Belastung. Die Grundbelastung liegt nachts bei etwa 900 Partikeln/l ( $0,5 \mu\text{m}$ ) und steigt tagsüber bis auf etwa 4000, in einem Fall sogar auf Spitzenwerte von 7000 an, um abends langsam wieder auf den Normalwert zurück zu kehren. Die Belastung mit Partikeln von  $5 \mu\text{m}$  Partikelgröße ist recht gering, sie enthält aber untertags immer wieder deutliche Spitzen, die allerdings mit einem Maximum von 40 Partikeln/l auf einem sehr niedrigen Niveau liegen.

Unter Einsatz der Absaugvorrichtung des Luftfilters sieht das Bild deutlich anders aus (Abb. 5). Zum einen sinkt die Grundbelastung deutlich auf Werte von etwa 400 Partikeln pro Liter. Zum anderen ist zwar auch hier ein Tagesverlauf zu erkennen, die Ausschläge sind aber im Vergleich zur Abb. 4 deutlich gedämpft. Zum Teil sind nur ganz geringe Ausschläge zu erkennen; ist die Belastung sehr hoch, stößt der Luftfilter aber auch an seine Grenzen, was die kontinuierliche Luftreinigung anbelangt. Aber auch hier sind die Spitzenwerte erniedrigt.

Anmerkung:

Der drastische Partikel-Anstieg am Ende des Messzeitraumes (Abb. 5) ist durch den Wochenend-Betrieb im Hof des Hauses (LKW) bedingt.

## Versuchsergebnisse bei der Messung von Formaldehyd

Durch das Erhitzen des Toners entsteht bei Druckprozess als toxisches Nebenprodukt ebenfalls in geringen Spuren gasförmiges Formaldehyd. Bei Literaturversuchen wurden während des Druckprozesses Werte von  $0,0116 \text{ mg/ m}^3$  gemessen; durch die Verwendung des Luftfilters wurde die Konzentration auf  $0,0063 \text{ mg/ m}^3$  reduziert. In etwa die Hälfte des in der Luft befindlichen Formaldehyds wurde also entfernt.

Mit Hilfe eines Messgerätes, das mit einem selektiven Detektor für Formaldehyd ausgestattet war, wurden Konzentrationen von etwa  $1.11 - 1.14 \text{ ppm}$  in der Raumluft gemessen. Weshalb die Konzentration so hoch lag ( $0.1 \text{ ppm}$  ist der empfohlene Grenzwert für Innenräume), konnte nicht geklärt werden. Möglicherweise handelt es sich dabei auch um einen Kalibrierfehler des Gerätes.

Bei einem Druckversuch mit 100 Seiten, die per Laserdrucker ausgedruckt wurden, konnte ein Ansteigen des Formaldehydgehaltes in der Abluft des Druckers unmittelbar nach Druckbeginn innerhalb von Sekunden auf  $1.8 - 2.2 \text{ ppm}$  (Mittelwert:  $1.9 \text{ ppm}$ ) beobachtet werden.

Durch die Luftbewegung verteilte sich der Formaldehyd nach Beendigung des Druckvorganges im gesamten Raum und erreichte schließlich eine Endkonzentration von  $1.4 \text{ ppm}$ .

Nach dem Zuschalten des Luftfilters reduziert sich der Formaldehyd-Gehalt allmählich und erreicht schließlich eine Minimalkonzentration von  $0.6 - 0.7 \text{ ppm}$ . Dieser Wert unter Einsatz des *Dust Busters* lag in der Tat niedriger als der Wert, der am Messtag für die betreffende Außenluft gemessen wurde ( $1.0 \text{ ppm}$ ).

Bei einer Wiederholung des Versuches wurde ein Anfangswert von  $1.5 \text{ pp}$  in der Raumluft gemessen. Beim Drucken ohne Filtereinsatz stieg der Gehalt in der Raumluft auf durchschnittlich  $2.7 \text{ ppm}$  mit einem Spitzenwert von  $2.7$  an. Beim Einsatz des Luftfilters ging der Wert schließlich zurück auf  $1.1 \text{ ppm}$ .