

Untersuchungen zur Freisetzung feiner und ultrafeiner Partikel beim Betrieb von Laserdruck-Geräten

D. Bake und H.-J. Moriske
Februar 2006

1 Einleitung

Im Zuge der aktuellen Feinstaubdiskussion wird auch die Frage diskutiert, ob der Betrieb von PC-Laserdruckern feine Partikel (Partikeldurchmesser von 0,1 bis 10 Mikrometern (μm) – ein Mikrometer ist ein Tausendstel Millimeter) und ultrafeine Staubpartikel (Partikeldurchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$) in die Innenraumluft freisetzt. Das zur Zeit angewendete „Prüfverfahren für die Bestimmung von Emissionen aus Hardcopygeräten“ zur Vergabe des Umweltzeichens „Blauer Engel“ schreibt vor, die Staubemissionsrate gravimetrisch – das heißt nach Gewicht – zu bestimmen. Danach darf ein Gerät bei einer standardisierten Prüfung und ununterbrochenem Druckbetrieb nicht mehr als 4 Milligramm (mg) Staub pro Stunde ausstoßen. Diese gravimetrische Messmethode lehnt sich an die gesetzlichen Regelungen für die Messungen in der Außenluft an. Sie liefert jedoch keine Auskunft darüber, in welchem Umfang das Drucken ultrafeine Partikel freisetzt, denn diese tragen kaum zur Masse bei. Feine Partikel können aber bei hoher Partikelzahl gesundheitlich relevant sein. Die Zahl der Partikel zu messen, ist im Hinblick auf die Bewertung möglicherweise hilfreicher, als die Masse zu bestimmen.

Das Umweltbundesamt (UBA) hat daher stichprobenartig in einer Prüfkammer und in einem Büroraum die Emissionen (Partikelzahl) feiner und ultrafeiner Partikel beim Betrieb handelsüblicher Laserdrucker unterschiedlicher Herkunft und Alters gemessen. Im Folgenden wird über die Ergebnisse der Messungen berichtet. Die Ergebnisse sind lediglich beschreibender und vergleichender Art. Sie liefern zunächst keine Aussage über die Art und chemische Zusammensetzung der Partikel und darüber, welches Gesundheitsrisiko die freigesetzten Partikel in sich bergen – ja ob der Druckerbetrieb überhaupt zu einem zusätzlichen Gesundheitsrisiko führt. Dazu bedarf es weiterer und intensiverer Untersuchungen unter realen Bedingungen (Druckerbetrieb in normalen Büro- und Wohnräumen, Einfluss der Raumgröße, des Luftwechsels, von Senken, Sekundärquellen im Raum etc.) und einer genauen Risikoanalyse und -bewertung.

2 Methodik

Bisher gibt es keine standardisierten Vorschriften über die Messung der Partikelanzahlkonzentrationen bei feinen und ultrafeinen Partikeln aus Druckgeräten. Das UBA hat daher neue Wege beschritten. Wegen vorliegender Erfahrungen hat das UBA eine Methode gewählt, die gewährleistet, dass wirklich nur die durch den Druckbetrieb freigesetzten Partikel gemessen werden (vgl. 2.2): Die Drucker kamen in eine hermetisch abgeschlossene Prüfkammer. Damit waren jegliche Störeinflüsse

von außen – sonstiger Feinstaub anderer Quelle in der Innenraumluft – ausgeschlossen.

2.1 Untersuchte Drucker

Die Auswahl der Drucker erfolgte nach dem Zufallsprinzip und der Verfügbarkeit der Geräte. Sie ist keine Marktübersicht. Das UBA hat mehrere Drucker untersucht:

Drucker (Druckertyp)	Herstellungsjahr	Seitendurchsatz
A (Laser)	1993	3 Seiten / min
B (Laser)	1999	4 Seiten / min
C (Laser)	2000	15 Seiten / min
D (Laser)	2004	19 Seiten / min
E (Laser)	2005 (fabrikneu)	21 Seiten / min
F (Laser)	2005 (fast neu, ca. 1000 Seiten gedruckt)	28 Seiten / min
G (Laser)	2005 (fast neu, ca. 1000 Seiten gedruckt)	16 Seiten / min
H (Tintenstrahl)	2000	3 Seiten / min

Der Seitendurchsatz wurde während der Versuche ermittelt. Alle Drucker mit Ausnahme des Druckers H sind Laserdrucker mit Schwarz-Weiß-Druck. Der Drucker G druckt auch in Farbe. Der Drucker H wurde als Tintenstrahldrucker zu Vergleichszwecken untersucht. Alle Drucker kamen in eine Prüfkammer, Drucker E zusätzlich in einen normalen Büroraum.

2.2 Messverfahren

Folgende Messverfahren kamen zum Einsatz:

Messobjekt	Gerät	Messbereich	Volumenstrom
Feine Partikel (FP)	API Aerosizer	0,1 – 10 µm	2,5 l / min
Ultrafeine Partikel (UFP)	GRIMM SMPS+C	5 – 350 nm	0,3 l / min

Das Gerät API Aerosizer ist ein optischer Partikelzähler, der die Partikel nach ihrem aerodynamischen Durchmesser klassiert. Der Messbereich umfasst Partikelgrößen von 0,1 µm bis etwa 10 µm. Das Gerät GRIMM SMPS+C¹ klassiert die Partikel nach ihrer elektrischen Mobilität und misst Partikelkorngrößen von ca. 5-350 nm (Nanometer, das heißt ein Millionstel Millimeter). Beide Geräte wurden auf ein Messzeitintervall von 230 Sekunden zur Aufnahme einer kompletten Partikelgrößenverteilung eingestellt. Dieses Messzeitintervall war kurz genug, um die verschiedenen Betriebszustände der Drucker -wie Leerlauf, Drucken und Nachlauf - unterscheiden zu können.

¹ Das hier verwendete Gerät GRIMM SMPS+C wurde bei der Auswertung von Vergleichsmessungen mit anderen Geräten zum Messen von ultrafeinen Partikeln im Dezember 2004 (IfT, Leipzig) wegen seiner sehr guten Übereinstimmung mit einem Referenzgerät als Standardsystem ausgewählt.

Die Prüfkammer (Glaskubus) hat eine Größe von 1 Kubikmeter, ist nicht klimatisiert und ohne Zwangsbelüftung (auch keine interne Ventilation). Als Ausgleich für die entnommene Probeluft von zusammen etwa 180 Liter pro Stunde (l/h) wurde der Prüfkammer durch ein HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Air) gereinigte Luft von außen zugeführt, und zwar so, dass sich ein Luftwechsel von etwa 0,2-fach pro Stunde einstellte. Die Probeluft wurde jeweils ca. 30 cm oberhalb der Papierausgabe der Drucker entnommen.

2.3 Versuchsablauf

Damit sich über Nacht in der Prüfkammer eine hinreichend kleine Partikelzahlkonzentration einstellen konnte, wurden die Drucker jeweils am Vortag in die Prüfkammer gestellt und komplett angeschlossen. Für die Versuche konnten sie zum Anschalten und Übermitteln der Druckbefehle angesteuert werden, ohne die Kammer erneut zu öffnen. Diese Vorgehensweise war erforderlich, weil die Messmethode der Partikelzählung sehr empfindlich auf Störeinflüsse reagiert und nur so die Partikelemissionen der Prüflinge zu erfassen waren.

Als Papiersorte kam IGEPA Recycling Copy, 80 g/m² DIN-A4 weiß, „Blauer Engel“-zertifiziert, zum Einsatz. Je nach Druckerkapazität wurden 30 oder 50 Seiten „leer“ und „voll“ gedruckt. Als „volle“ Seiten wurden ganzseitige Excel-Tabellen mit ganz ausgefüllten Zellen (Ziffernfolge 0 bis 9), Schrifttype Arial 10 normal, gedruckt (Schwarz-Weiß-Druck (S/W-Druck)).

Mit dem Drucker G wurden zusätzlich Partikelmessungen bei Farbdruck vorgenommen. Als Druckvorlage diente dieselbe Vorlage, die auch für die Prüfung beim Blauen Engel für Hardcopygeräte (RAL-UZ 114) verwendet wird.

Das getrennte Drucken „leerer“ und „voller“ Seiten sollte eine Unterscheidung zwischen Partikelemissionen des reinen Papiers (Papierstaub) und zusätzlicher Partikelemissionen beim Verbrauch des Toners ermöglichen.

Nach jedem Druckvorgang wurde das Abklingen der Partikelzahlkonzentration in der Kammer gemessen, so dass ein kompletter Messzyklus insgesamt jeweils ca. 6 bis 7 Stunden dauerte. Jeder Drucker wurde zwischen 3- und 7-mal nach diesem Programm untersucht.

Der Drucker E wurde zusätzlich 3-mal in einem Büroraum bei normaler Raumnutzung getestet, wobei auch hier die Probeluft ca. 30 cm oberhalb der Papierausgabe genommen wurde.

3 Ergebnisse und Diskussion

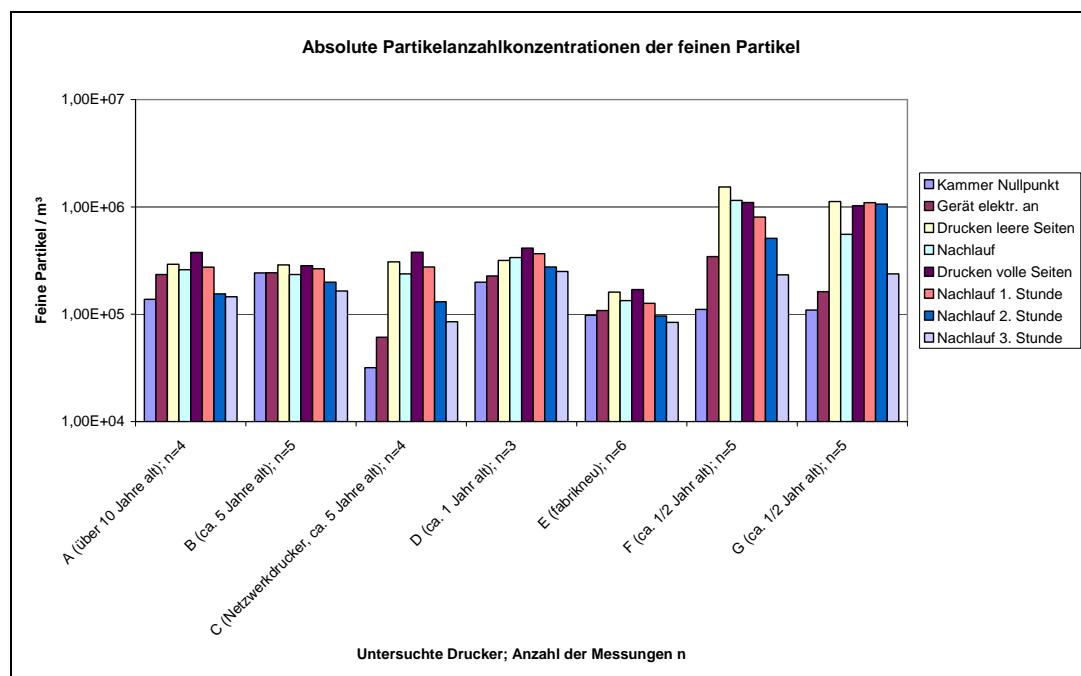
Die Messergebnisse der Partikelanzahlkonzentrationen werden im Folgenden a) für alle feinen Partikel (hier: 0,1 bis 10 µm) und b) für die Fraktion der ultrafeinen Partikel (hier: 5 bis 350 nm) angegeben, weil sich unterschiedlich hohe Emissionen für beide Partikelgrößenbereiche zeigten.

3.1 Feine Partikel

Einen Überblick über die Emissionen der feinen Partikel gibt die Abbildung 1. Dort sind die absoluten Partikelkonzentrationen in Partikeln pro Kubikmeter (m^3) für die untersuchten Drucker, aufgeteilt in die einzelnen Schritte der Messzyklen, dargestellt. Die Partikelanzahlkonzentrationen der einzelnen Wiederholungsversuche ($n = 3-7$) wurden dabei gemittelt. Der erste (jeweils linke) Balken stellt die Anfangskonzentration in der Prüfkammer vor Beginn der Versuche dar („Kammernullpunkt“). Ausgehend von dieser Anfangskonzentration steigen die Konzentrationen je nach Druckertyp in einer Bandbreite von „geringfügig“ bis etwa zum 13-fachen an. Dabei wurde bei einigen Druckern kein Unterschied zwischen dem Drucken „leerer“ und „voller“ Seiten festgestellt. Der relative Anstieg der Partikelemissionen lag beim Drucken „voller“ Seiten zwischen 20 und 30 % in Bezug auf das Drucken „leerer“ Seiten (relative Standardabweichung ca. 20 bis 30 %). Das bedeutet, dass sich die Feinstaubemissionen beim Drucken „voller“ Seiten im Vergleich zum Drucken „leerer“ Seiten nicht signifikant erhöhen.

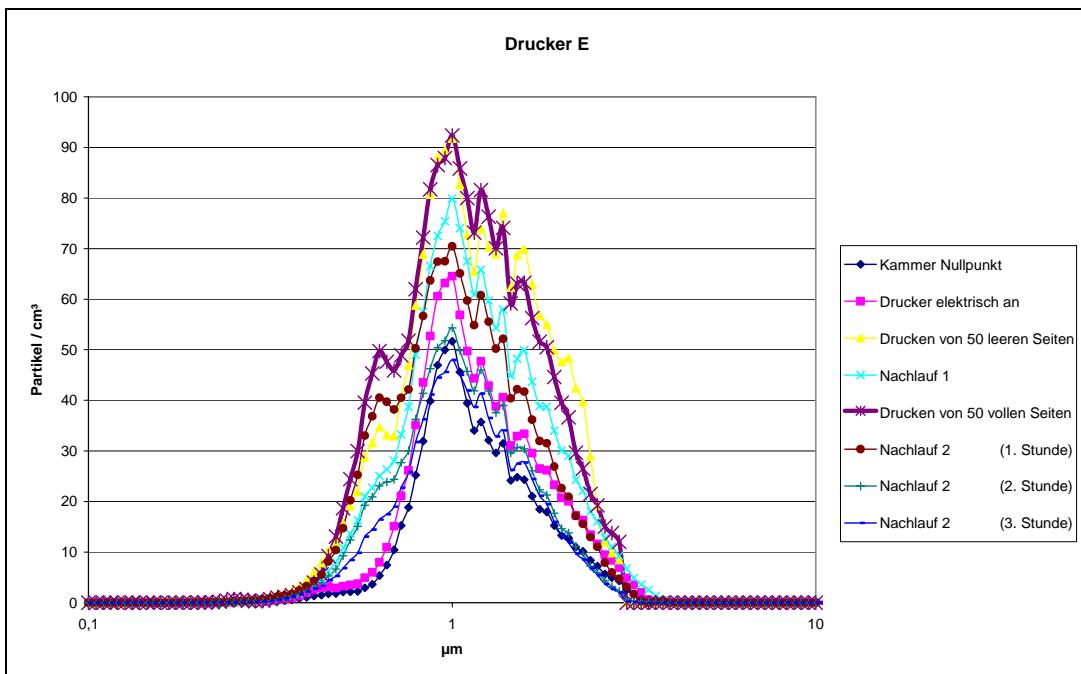
Das Maximum der Partikelgrößen der feinen Partikel lag bei allen Messungen etwa bei $1 \mu m$ (siehe Abb. 2). Mit Hilfe dieser gemessenen Partikelgrößenverteilung lassen sich auch Partikelmassenkonzentrationen berechnen. Eine Umrechnung der Partikelzahlkonzentrationen in Partikelmassenkonzentrationen ergab bei einer angenommenen Partikeldichte von 1 Gramm pro Kubikzentimeter (g/cm^3) eine Größenordnung von $0,1 \mu g/m^3$ und damit eine nur sehr geringe zusätzliche Staubkonzentration in der Raumluft durch den Druckvorgang.

Abb.1: Absolute Partikelemissionen (Feine Partikel) für die einzelnen Messprogrammteile der Messzyklen (Prüfkammermessungen)



Quelle: Umweltbundesamt

Abb. 2: Typische Partikelgrößenverteilungen (feine Partikel) bei den einzelnen Messprogrammteilen für den Drucker E (Prüfkammermessungen)

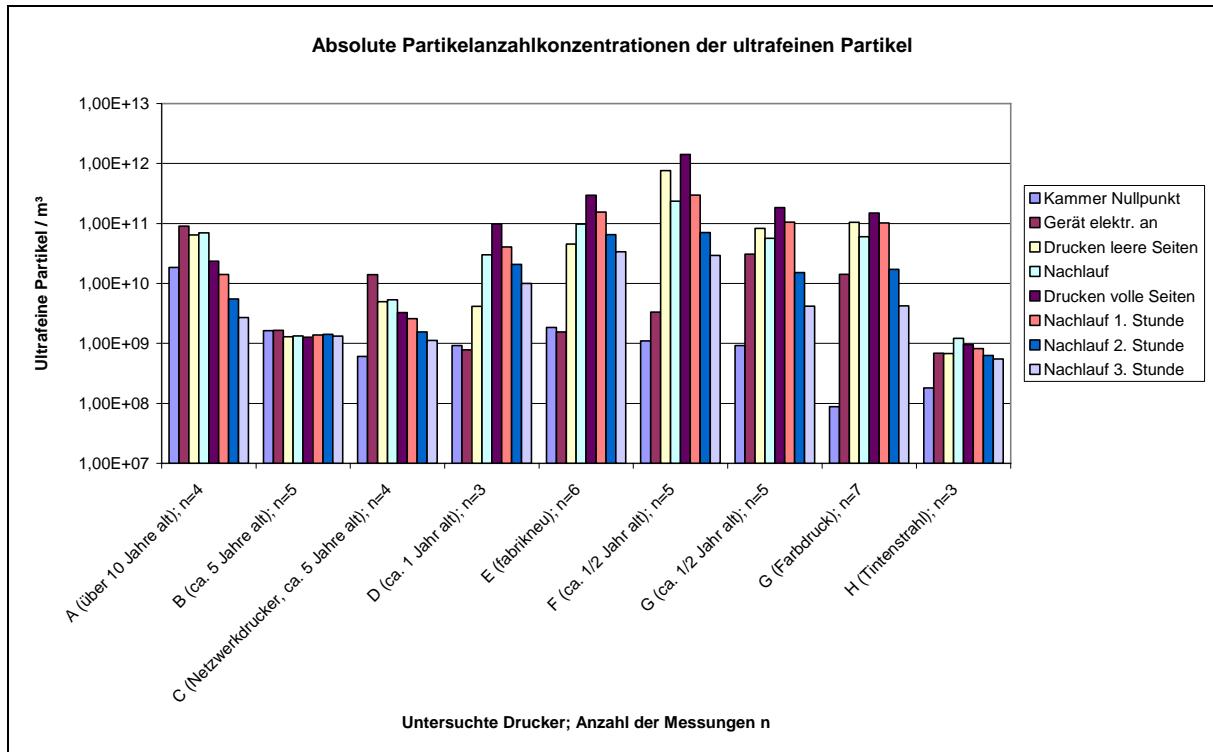


Quelle: Umweltbundesamt

3.2 Ultrafeine Partikel

Einen Überblick über die absoluten Partikelzahlkonzentrationen der ultrafeinen Partikel (hier: Partikelgrößenbereich von 5 bis 350 nm) gibt die Abbildung 3. Dort sind die Partikelanzahlkonzentrationen in Partikeln/m³ für die untersuchten Drucker, aufgeteilt in die einzelnen Schritte der Messzyklen, dargestellt. Die Partikelanzahlkonzentrationen der einzelnen Wiederholungsversuche ($n= 3-7$) wurden gemittelt.

Abb. 3: Absolute Partikelemissionen (ultrafeine Partikel) für die einzelnen Messprogrammteile der Messzyklen (Prüfkammermessungen)

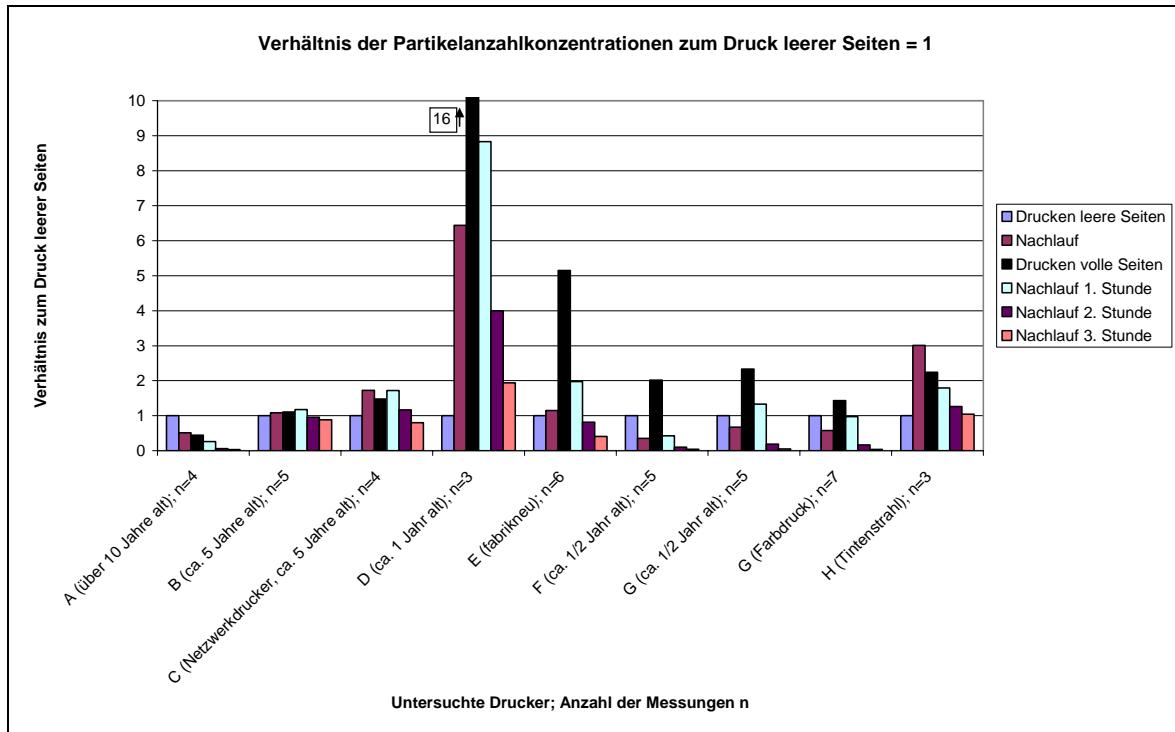


Quelle: Umweltbundesamt

Bei einigen Druckern zeigt sich, dass schon die Inbetriebnahme eine Emission ultrafeiner Partikel hervorruft, die so hoch ist, dass sich für die nachfolgenden Messungen des Messzyklus keine zusätzlichen Konzentrationserhöhungen feststellen lassen. Das könnte zum Beispiel durch Ablagerungen im Gerät begründet sein, weil beim Aufheizen und Anlaufen des Ventilators die Partikel in die Umgebungsluft gelangen.

Um einen besseren Vergleich zwischen den Drucker-Ergebnissen zu ermöglichen, ist in Abbildung 4 die Partikelanzahl beim Drucken „leerer“ Seiten gleich „1“ gesetzt worden und das Verhältnis der Partikelkonzentrationen im Vergleich zum Druck „leerer“ Seiten abgebildet.

Abb. 4: Verhältnis der Partikelzahlkonzentrationen (Ultrafeine Partikel) der verschiedenen Betriebszustände zur Zahlkonzentration beim Druck leerer Seiten

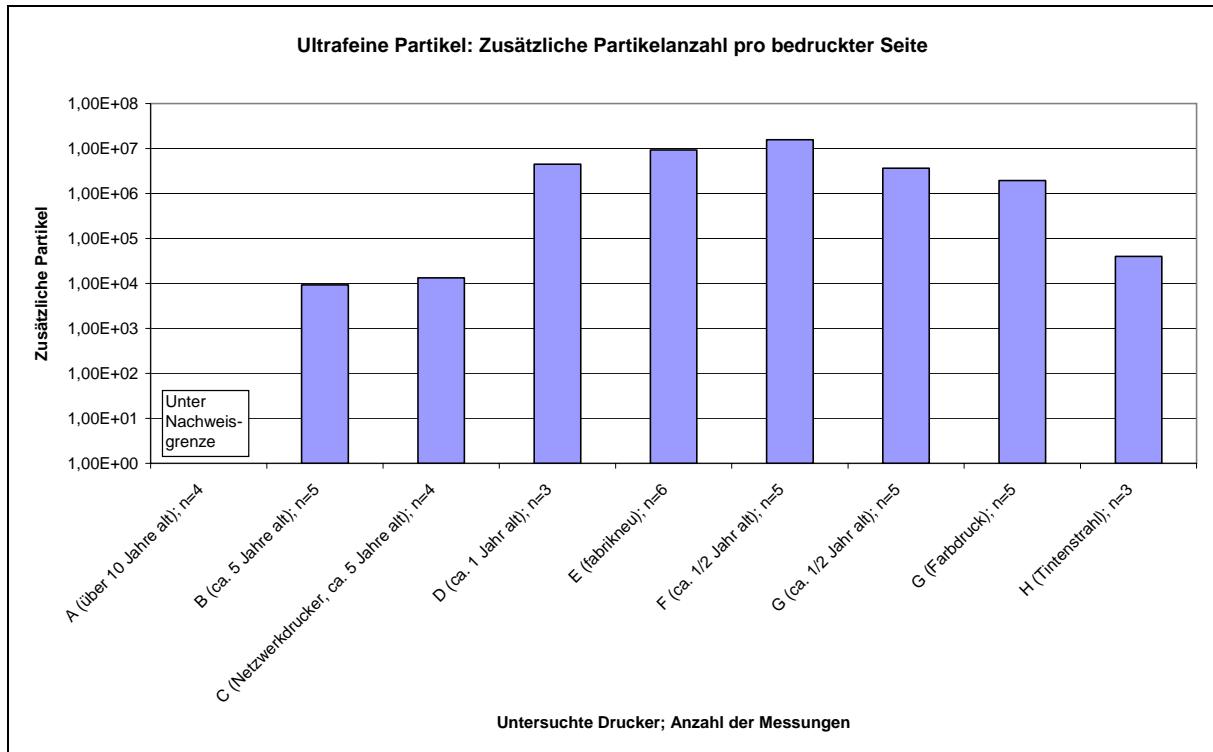


Quelle: Umweltbundesamt

Es ist erkennbar, dass bei einigen Druckern beim Drucken voller Seiten die Partikelzahlkonzentrationen im Vergleich zum Drucken leerer Seiten ansteigen. Allerdings ist dieser Anstieg recht unterschiedlich. Es ergeben sich hier auch Unterschiede zum Feinstaub insgesamt (vgl. 3.1).

Um den Einfluss der unterschiedlichen Druckgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, wurden die während des Druckens der vollen Seiten gemessenen Partikelzahlkonzentrationen umgerechnet und auf das Drucken einer Seite bezogen. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 5.

Abb. 5: Partikelzahl in der Prüfkammerluft beim Drucken voller Seiten - umgerechnet auf gleiche Druckleistung (1 Seite)



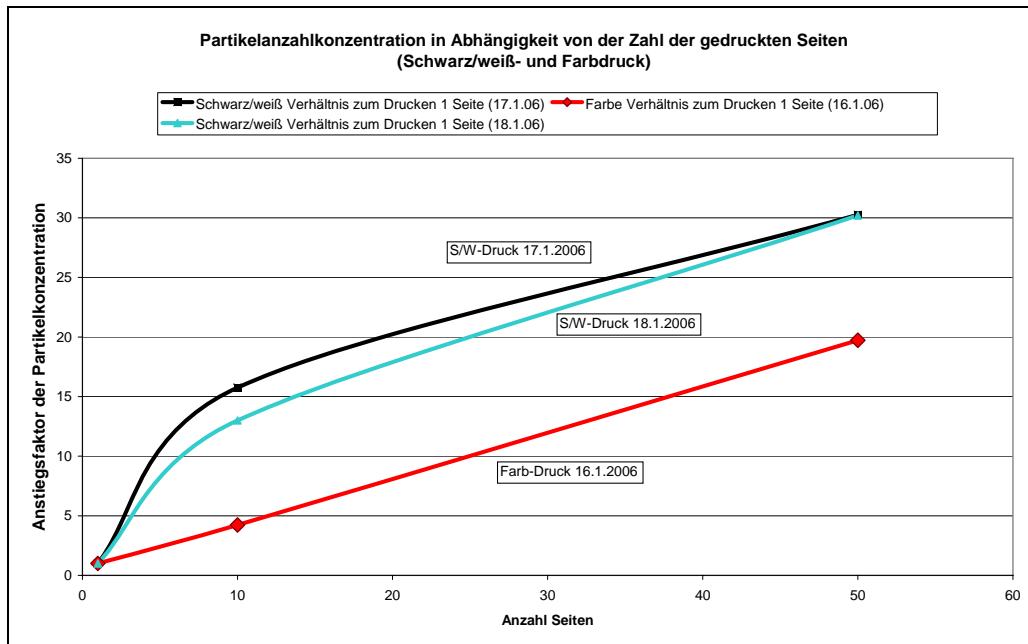
Quelle: Umweltbundesamt

Die einzelnen Drucker weisen auch hier unterschiedliche Ergebnisse auf. Die Emissionen neuer Geräte (D, E, F und G) liegen nicht unter denen der älteren Geräte; im Gegenteil, der Drucker F hatte im Vergleich die deutlichsten Partikelzahlerhöhungen. Der Tintenstrahldrucker H emittiert - bezogen auf den Druck einer Seite - deutlich weniger ultrafeine Partikel als neuere Laserdrucker.

Um einen möglichen Einfluss der Zahl gedruckter Seiten zu ermitteln, wurden mit dem Drucker G jeweils 1, 10 und 50 volle Seiten gedruckt. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 6. Aufgetragen sind zwei Versuche mit im S/W-Druck bedruckten Seiten und ein Versuch mit Farbdruck.

Beim Farbdruck liegt möglicherweise ein linearer Zusammenhang zwischen der Zahl der bedruckten Seiten und der Partikelzahlkonzentration vor. Der S/W-Druck zeigt einen nicht linearen Zusammenhang. Dafür ist eventuell ein anderes thermisches Verhalten des Drucksystems der Grund, was hier aber nicht weiter untersucht werden konnte.

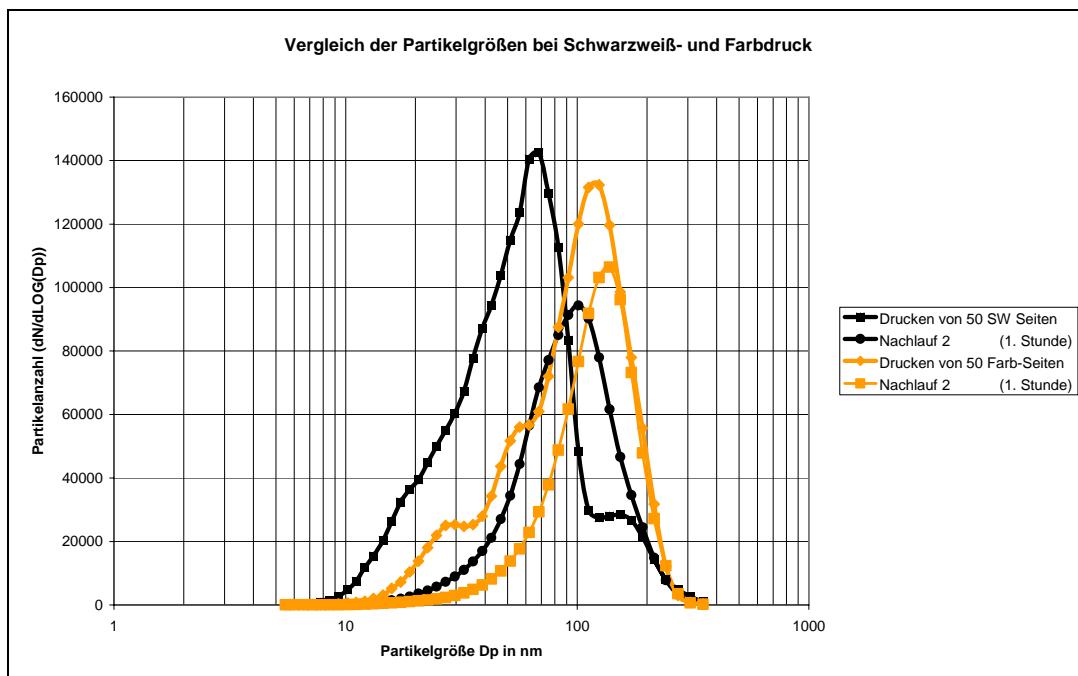
Abb. 6: Abhängigkeit der Partikelzahlkonzentrationen von der Zahl der bedruckten Seiten (Drucker G); Anstiegsfaktor als Angabe für die Zunahme der Partikelzahlkonzentrationen



Quelle: Umweltbundesamt

Ein Unterschied zwischen S/W-Druck und Farbdruck zeigt sich auch in den Partikelgroenspektren. Die Abbildung 7 zeigt, dass beim Farbdruck das Maximum der Partikelgrößen bei etwa 110 nm liegt, während es beim S/W-Druck etwa bei 65 nm ist. Möglicherweise kommt hier eine – in dieser Studie nicht näher untersuchte – unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Partikel beim S/W- und Farbdruck zum Tragen.

Abb. 7: Vergleich der Partikelgrößenspektren bei Schwarzweiß- und Farbdruck (Drucker G)

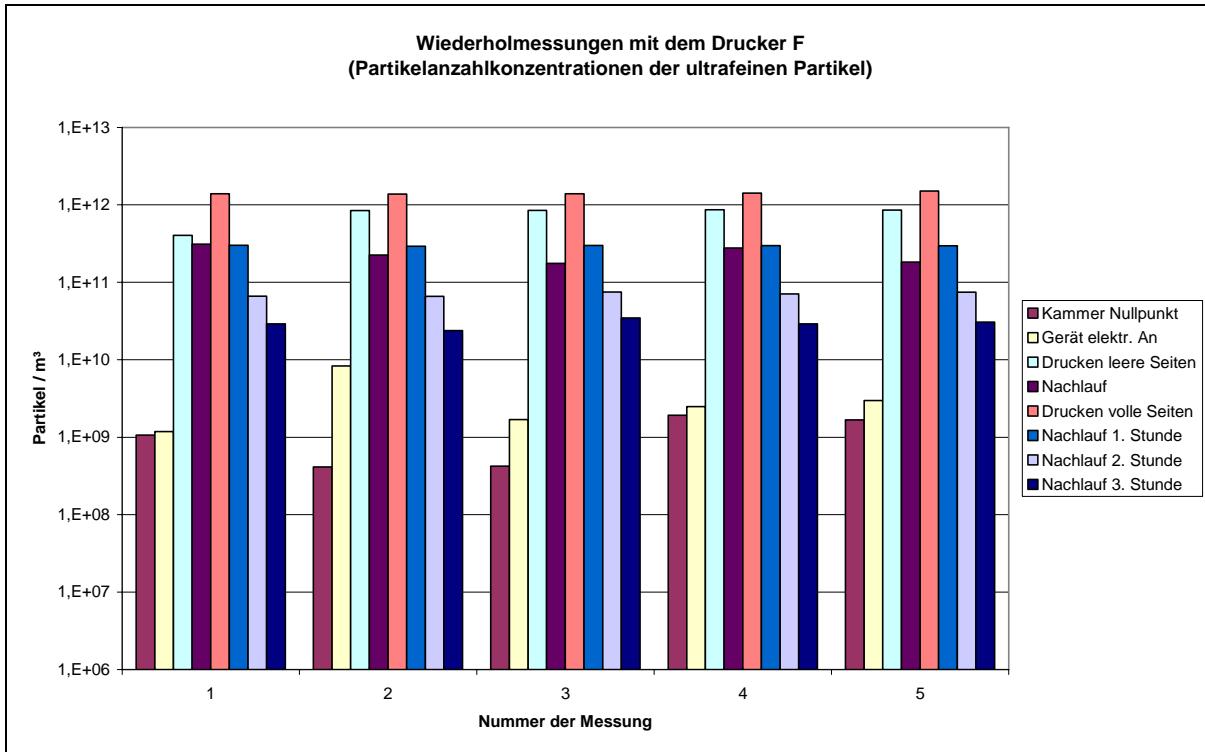


Quelle: Umweltbundesamt

In beiden Fällen ist aber gleich, dass in der Nachlaufphase die Partikelgrößenspektren sich zu größeren Partikeln hin verschieben. Das lässt auf eine Agglomeration (Zusammenballen) der Partikel schließen.

Die Frage der Reproduzierbarkeit der Messungen sei am Beispiel des Druckers F betrachtet (siehe Abb. 8). Fünf Messungen an verschiedenen Tagen zeigen eine gute Übereinstimmung bei Wiederholung der Versuche. Bei den anderen Druckern zeigten sich ähnliche Ergebnisse. Die Reproduzierbarkeit ist damit hinreichend gegeben.

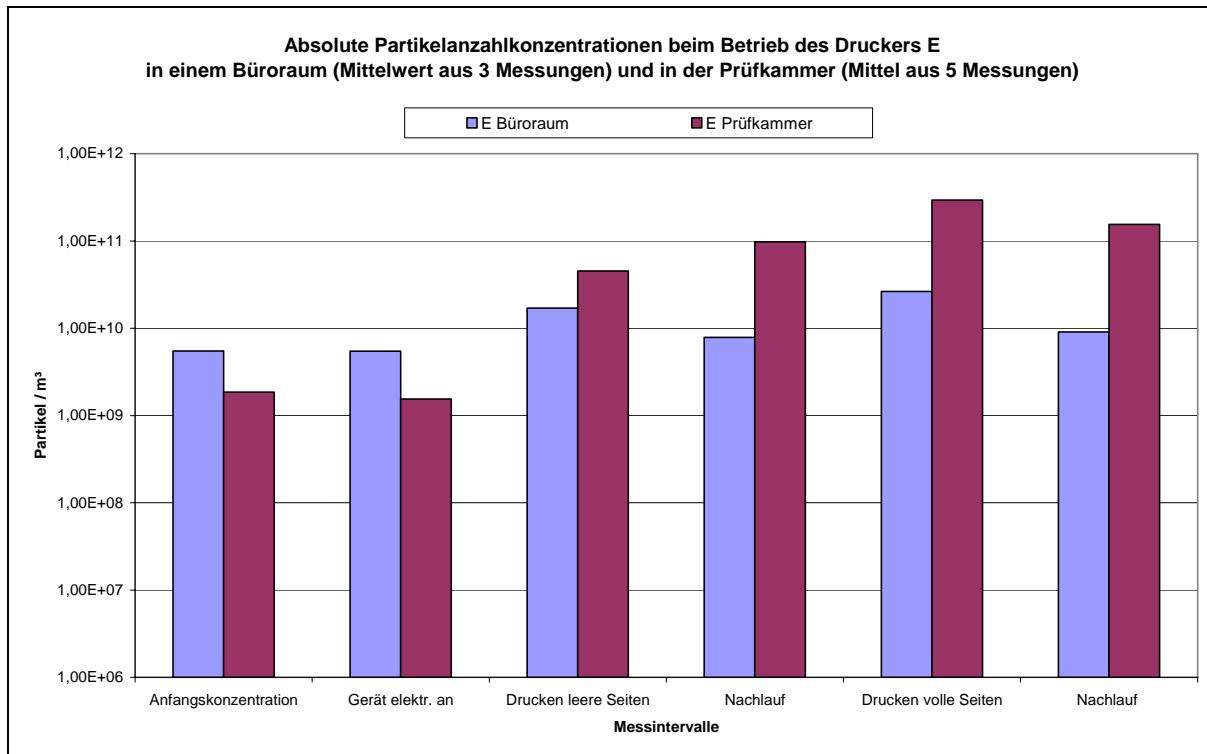
Abb. 8: Reproduzierbarkeit der Messungen am Beispiel des Druckers F (Prüfkammermessungen)



Quelle: Umweltbundesamt

Die mit dem Drucker E in einem Büroraum durchgeführten Messungen zeigen, dass die Partikelzahlkonzentrationen beim Drucken niedriger sind als bei den Prüfkammermessungen (siehe Abb. 9). Das ist auf den Verdünnungseffekt in einem größeren und bewegten Luftvolumen zurückzuführen. Dennoch zeigten sich auch hier Erhöhungen der Partikelzahlen im Vergleich zur Hintergrundbelastung.

Abb. 9: Absolute Partikelzahlkonzentrationen der ultrafeinen Partikel bei Messungen mit dem Drucker E in einem Büroraum; zum Vergleich sind auch die Messungen in der Prüfkammer aufgetragen



Quelle: Umweltbundesamt

4 Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass der Betrieb von Laserdruckern zu einer Freisetzung feiner und ultrafeiner Partikel führen kann. Die Höhe der Partikelfreisetzung ist dabei recht unterschiedlich. Je nach Gerätehersteller und Gerätealter variieren die Ergebnisse. Neuere Gerätetypen führen nicht unbedingt zu besseren Resultaten als ältere. Im Gegenteil: Teilweise trat hier eine höhere Emission ultrafeiner Partikel auf als bei nach Herstelljahr und Gebrauch älteren Geräten. Es ist denkbar, dass die thermischen Prozesse in neuen Geräten anders gestaltet sind als bei älteren Druckern. Vielleicht ergaben sich höhere Emissionen auch wegen der oft höheren Druckgeschwindigkeiten neuerer Geräte und anders gearteter Tonerzusammensetzung.

Dass der thermische Prozess wahrscheinlich ultrafeine Partikel generiert, lässt sich daran erkennen, dass bei einigen älteren Druckern schon das elektrische Anschalten eine Partikelemission hervorrief. Diese war in einigen Fällen bereits so hoch, dass die Emissionen der folgenden Druckprozesse gar nicht mehr ins Gewicht fielen. Allerdings gab es auch hier Unterschiede von Drucker zu Drucker.

Erhöhungen der Partikelzahlkonzentrationen waren auch bei den Druckprozessen zu beobachten, wobei zu bemerken ist, dass diese Erhöhungen bei den verschiedenen Druckertypen sehr unterschiedlich sind. Auch der zu Vergleichszwecken untersuchte

Tintenstrahldrucker (H) zeigte eine Erhöhung der Partikelzahlkonzentrationen beim Druckprozess. Diese war aber geringer als bei den Laserdruckern.

Da das UBA nur eine begrenzte Zahl von Druckermodellen untersuchen konnte und auch die Zahl der Versuche je Gerät aus Kapazitätsgründen begrenzt war (max. 7 Wiederholungsversuche pro Gerät), sind die Ergebnisse zunächst nur auf die untersuchten Drucker zu beziehen und nur in der fett gedruckten Eingangsaussage verallgemeinerbar.

Die Versuche erfolgten in einer Prüfkammer, da nur so standardisierte Vergleichsmessungen möglich waren. In der Realität stehen die Drucker aber in wesentlich größeren Büro- oder Arbeitsräumen. Dann wirken sich zusätzlich Senkeneffekte – etwa Bindung der Partikel an Pflanzen – Raumvolumina, Luftaustausch etc. auf die Höhe der Partikelanzahlkonzentrationen aus. Dennoch traten auch bei den Versuchen in einem Büroraum Erhöhungen der Partikelanzahlkonzentrationen auf. Die Kernaussage bleibt daher auch unter realen Bedingungen bestehen.

Die Ergebnisse liefern keine Aussage im Hinblick auf eine mögliche gesundheitliche Gefährdung durch die Partikelemissionen. Massenmäßig sind die Partikelemissionen gering.

Um das Gesundheitsrisiko genauer zu ermitteln, wird auf Veranlassung des Bundesinstituts für Risikobewertung unter Mitwirkung des Umweltbundesamtes derzeit ein Pilotprojekt an der Universität Gießen, Lehrstuhl für Innenraum- und Umweltoxikologie (Prof. Mersch-Sundermann) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser UBA-Studie wurden bei der Projektplanung berücksichtigt.

Weiterhin werden derzeit von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Umweltbundesamtes Untersuchungen zu Partikelemissionen aus Bürodruckern durchgeführt.