

Evaluierung des kostengünstigen Rußsensors bcMeter

Luftgetragener schwarzer Kohlenstoff (Black Carbon, BC, auch Ruß genannt) kann erhebliche Auswirkungen auf das Klima und die menschliche Gesundheit haben. Mit der Ende 2024 veröffentlichten neuen Luftqualitätsrichtlinie schreibt die EU nun erstmals auch die Messung der BC-Konzentration in der Außenluft vor, auch wenn hierfür bisher noch kein Grenzwert erlassen wurde. BC stammt überwiegend aus unvollständiger Verbrennung und kann über die Absorption von infrarotem Licht ($\lambda = 880 \text{ nm}$) bestimmt werden. In einem herkömmlichen Aethalometer werden hierzu luftgetragene Partikel auf einem Filterband abgeschieden und mit infrarotem Licht beschienen. Durch die Messung der Lichtintensität vor und hinter dem Filter wird unter Berücksichtigung der bekannten Absorption durch das Filtermaterial die Menge des abgeschiedenen schwarzen Kohlenstoffs mit hoher zeitlicher Auflösung von bis zu einigen Minuten bestimmt. Dieses Verfahren ist seit Jahrzehnten bekannt und wird sowohl in der Forschung als auch von verschiedenen Umweltämtern für orientierende Messungen genutzt. Aufgrund der hohen Anschaffungs- und Betriebskosten herkömmlicher Aethalometer werden diese bisher aber nur punktuell und nicht flächendeckend eingesetzt.

Eine kostengünstige Variante eines Aethalometers wurde vor wenigen Jahren veröffentlicht und kann zu einer flächendeckenderen Erfassung der BC-Konzentrationen beitragen. Alle zum Aufbau der als bcMeter bezeichneten Geräte benötigten Informationen sind über eine Webseite (<https://bcmeter.org/>) frei verfügbar. Neben einer Bauanleitung, Teileliste und Zeichnungen für den 3D-Druck des Gehäuses gehören hierzu auch die Codes der zum Betrieb des bcMeter benötigten Soft- und Firmware. Die Kosten für ein vollständiges bcMeter-Rußmessgerät liegen mit ca. 200 € (je nach Konfiguration) etwa um einen Faktor von 100 unter dem für ein professionelles Aethalometer. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung und ein Foto eines bcMeters.

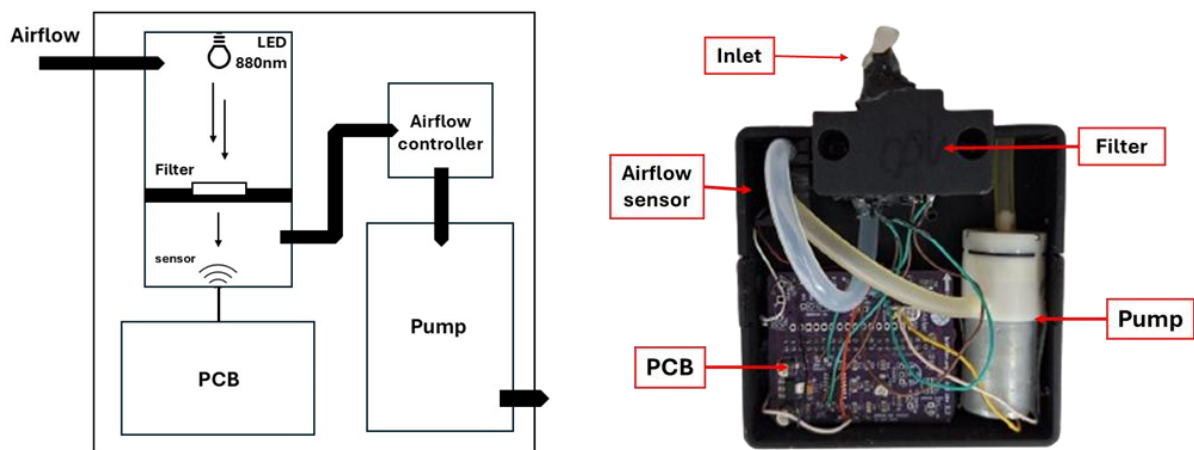


Abb. 1: Schematische Darstellung (links) und Foto eines bcMeter-Rußsensors (rechts)

Auf der o. a. Webseite sind zwar erste Ergebnisse vergleichender Untersuchungen des bcMeter mit hochwertigen Aethalometern angegeben. In der wissenschaftlichen Literatur hingegen finden sich bisher keinerlei unabhängigen Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der Sensoren. Im Rahmen eines 6-monatigen Gastaufenthalts zweier Doktoranden der Universität Milano-Bicocca wurden im IUTA zwei baugleiche bcMeter überprüft. Die Geräte wurden bereits an ihrer Heimatuniversität beschafft und für die Versuche mitgebracht. Nach einer Erstüberprüfung mit laborgenerierten Rußpartikeln im Vergleich zu einem tragbaren Rußmessgerät (MA200, MicroAeth) wurden beide Geräte im IUTA-Messcontainer im

städtischen Hintergrund in Mülheim-Styrum vom 17.05.2024 bis zum 30.09.2024 betrieben. In seinem benachbarten Messcontainer betreibt das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) NRW ein hochwertiges Aethalometer (AE33, Aerosol Magee Scientific) für orientierende Messungen. Die Messwerte wurden seitens des LANUV für diesen Vergleich zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die zeitlich hochaufgelösten Messwerte aufgrund zu starker Streuung nicht verwertbar waren. Auch beim Vergleich der Stundenmittelwerte war die Streuung noch sehr stark ausgeprägt und die Korrelation der Ergebnisse der beiden bcMeter entsprechend gering ($R^2 = 0,22$ bzw. $0,28$). Durch Mittelung über einen längeren Zeitraum konnte die Streuung der Ergebnisse verringert und Korrelation deutlich verbessert ($R^2 = 0,77$ bzw. $0,79$ für 24-h-Mittelwerte) werden. Allerdings lagen die Messwerte beider Sensoren im Mittel um einen Faktor von ca. zwei zu niedrig. Dieser systematische Fehler war darauf zurückzuführen, dass der zur Berechnung der Rußkonzentration angenommene (intern gemessene) nicht mit dem tatsächlichen Volumenstrom übereinstimmte. Durch eine entsprechende Anpassung der Auswerteroutine unter Verwendung des korrekten Volumenstroms konnte die Übereinstimmung der 24-h-Mittelwerte der beiden bcMeter mit denen des Referenz-Aethalometers deutlich verbessert werden. Die Steigungen der Korrelationen liegen somit nunmehr bei $0,94$ bzw. $1,02$ (siehe Abbildung 2).

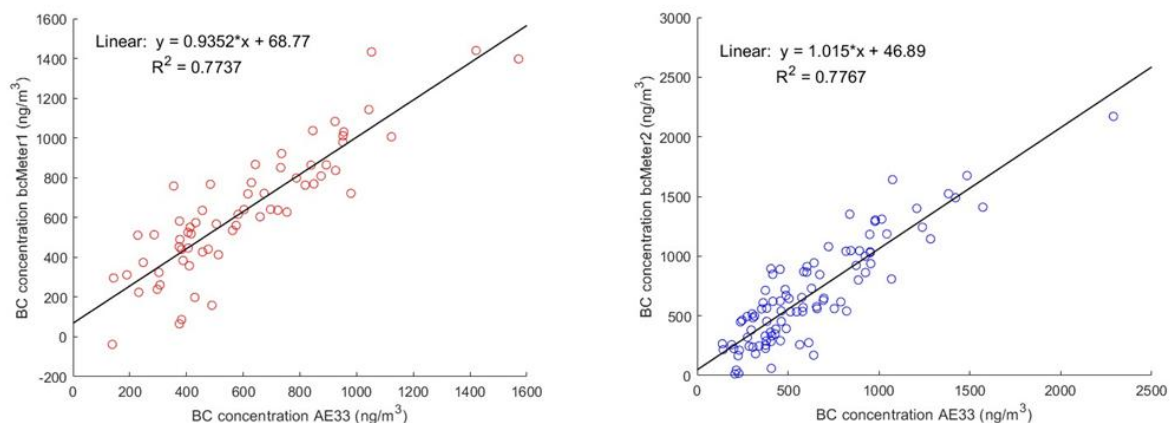


Abb. 2: Korrelationen der 24-h-Mittelwerte der BC-Konzentrationen, gemessen mit bcMeter 1 (links) und bcMeter 2 (rechts) gegen die mit dem Referenz-Aethalometer (AE33) gemessenen BC-Konzentrationen

Während der Untersuchungszeit kam es allerdings immer wieder zu Ausfällen der bcMeter, insbesondere aufgrund von Software- und Firmware-Problemen, sodass es zu verhältnismäßig großen Datenlücken kam (siehe Abbildung 3).

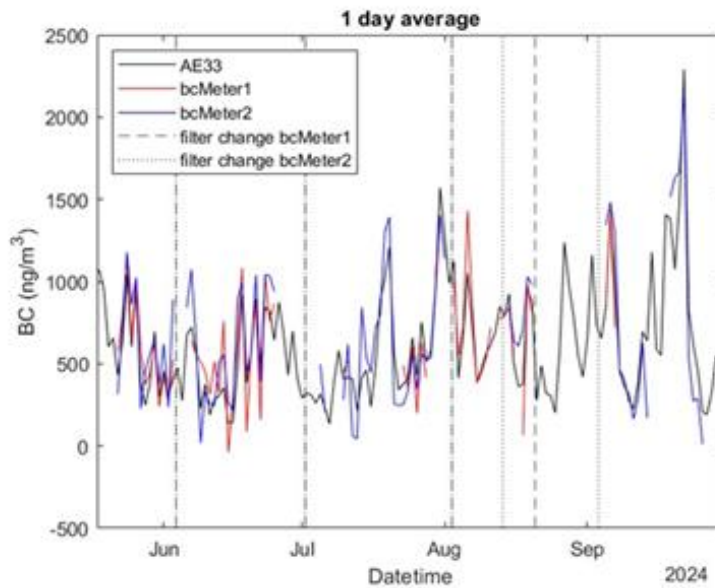


Abb. 3: Zeitreihe der mit den beiden bcMeter-Sensoren und dem Referenz-Aethalometer (AE33) gemessenen BC-Konzentrationen

Zusammenfassend haben die Untersuchungen gezeigt, dass sich mit dem bcMeter grundsätzlich gute Schätzwerte der Tagesmittelwerte der BC-Konzentration ermitteln lassen. Gleichzeitig stellte sich aber auch heraus, dass es noch deutlichen Spielraum zur Optimierung der Geräte im Hinblick auf Hardware, Firmware und Software gibt. Die Ergebnisse der Untersuchungen und die Erkenntnisse daraus wurde bei der Fachzeitschrift *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* unter dem Titel „Evaluating the performance of the low-cost carbon black sensor bcMeter at an urban background site“ veröffentlicht¹.

Die Abteilung Filtration & Aerosolforschung des IUTA plant, bcMeter-Sensoren auch im Rahmen eines Ende 2024 gestarteten UBA-Vorhabens zur sensorischen Erfassung von Innenraumlufschadstoffen einzusetzen. Die zusammen mit der Universität Milano-Bicocca und dem LANUV durchgeführten Untersuchungen haben hierfür wichtige Erkenntnisse geliefert. Einige der daraus entstandenen Ideen zur Optimierung der Sensoren, insbesondere zur Steigerung der Zuverlässigkeit im Betrieb, befinden sich derzeit in der Umsetzung.

¹ C. Asbach, A. M. Todea, E. Bolzacchini, A. Doldi, L. Ferrero, L. Pagliarulo, S. Freitag, L. Große Schute, K. Junk (2025). Evaluating the performance of the low-cost black carbon sensor bcMeter at an urban background site. *Gefahrstoffe* 85(01-02):5-11, DOI 10.37544/0949-8036-2025-01-02-7