

Else Kröner Fresenius Center for Digital Health
CLINICUM DIGITALE

Beteiligte Studierende: Arne Genzen
Betreuer:in: Dr. rer. medic. Dipl.-Ing. Robert Huhle
Arbeitsgruppe: Pulmonary Engineering Group

Schwere Luft - Ein Phantom für überbelüftete Lungenareale in der Computertomographie

Einleitung

Bei bestimmten Lungenerkrankungen, vor allem bei akutem Lungenversagen, ist es von Interesse, die Belüftungszustände der Lungenareale zu kennen. Dafür werden diese Areale anhand der Hounsfield Unit (HU, auch CT-Zahl genannt) in nicht-belüftete (100 bis -100 HU), minder-belüftete (-100 bis -500 HU), normal-belüftete (-500 bis -900 HU) und über-belüftete (-900...-1000 HU) Areale eingeteilt^[1]. Dabei kommt es allerdings bei der Ermittlung der HU und der aus diesen errechneten Lungenarealvolumina mit unterschiedlichen Rekonstruktionskernels zu teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnissen^[1]. Dieser Versuch gilt dem Aufzeigen der Eignung einer Sauerstoff-Gasflasche, als Phantom für Lungenareale unterschiedlicher Belüftungszustände zu dienen, um in Folgeversuchen mit diesem Phantom den Einfluss der verwendeten Rekonstruktionskernel auf die Bestimmung der Lungenarealvolumina zu untersuchen.

Vorbereitende Überlegungen

Das grundlegende Prinzip der Computertomographie (CT) ist das Errechnen von Schnittbildern aus den Schwächungswerten der von einer Röntgenstrahlenquelle gesendeten und von einem Röntgendetektor empfangenen Röntgenstrahlenintensität, wobei Quelle und Detektor kreisförmig um die Messstelle verfahren werden, um aus unterschiedlichen Winkeln Schwächungen aufzunehmen.

Maßgebend für die Schwächung ist die Elektronendichte des Messgegenstandes, da Röntgenstrahlen hauptsächlich mit Elektronen wechselwirken (z.B. Photoabsorption). Messgegenstände unterschiedlicher Elektronendichten erzeugen folglich unterschiedliche Schwächungen in der CT, woraus wiederum unterschiedliche HU errechnet werden.

Soll ein Lungenphantom also geeignet sein, im Computertomogramm Lungenareale darzustellen, so muss es die gleichen Elektronendichten aufweisen, wie die Lungenareale, die es simuliert.

Vereinfacht möge für die Lunge nun angenommen werden, dass Lungengewebe mit Wasser gut genähert dargestellt ist und folglich die gleiche Elektronendichte wie Wasser hat. Als Phantom wird hier eine Sauerstoff-Gasflasche verwendet, wobei das Gas derart verdichtet ist, dass es in der Elektronendichte einer Lunge entspricht, wenn diese ein Lungengewebe-Atemluft-Stoffmengenverhältnis von 5/95, 10/90, 15/85, 20/80, 25/75 und 30/70 hat.

Überlegung zur Bestimmung des benötigten Druckes in der Flasche:

Um in einem Liter Sauerstoff die gleiche Elektronendichte wie in einem Liter Wasser zu erreichen, wird zuerst ausgerechnet, wie viele Elektronen sich in einem Mol Sauerstoff befinden. Danach wird die Menge an Elektronen in einem Liter Wasser errechnet. Das Verhältnis aus Elektronenmenge eines Liters Wasser zur Elektronenmenge eines Mols Sauerstoff entspricht dann der benötigten Stoffmengenendichte von Sauerstoff. (Eine ähnliche Überlegung gilt für den Atemluftanteil der Lunge.)

Diese Stoffmengenendichten sind im angestrebten Verhältnis zu addieren, um mit verdichtetem Sauerstoff das Lungengewebe-Atemluft-Verhältnis zu simulieren.

Damit gilt dann für den Druck für ideales Gas:

$$P_{\text{ideal}} = R \cdot T \cdot \begin{bmatrix} 0,05 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,95 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \\ 0,10 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,90 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \\ 0,15 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,85 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \\ 0,20 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,80 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \\ 0,25 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,75 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \\ 0,30 * n_{O_2 \text{ als } H_2O} + 0,70 * n_{O_2 \text{ als } Luft} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 43,965 \\ 86,931 \\ 129,897 \\ 172,863 \\ 215,829 \\ 258,796 \end{bmatrix} \text{ bar}$$

Bzw. erweitert um die Realgasfaktor-Matrix für die jeweiligen Drücke:

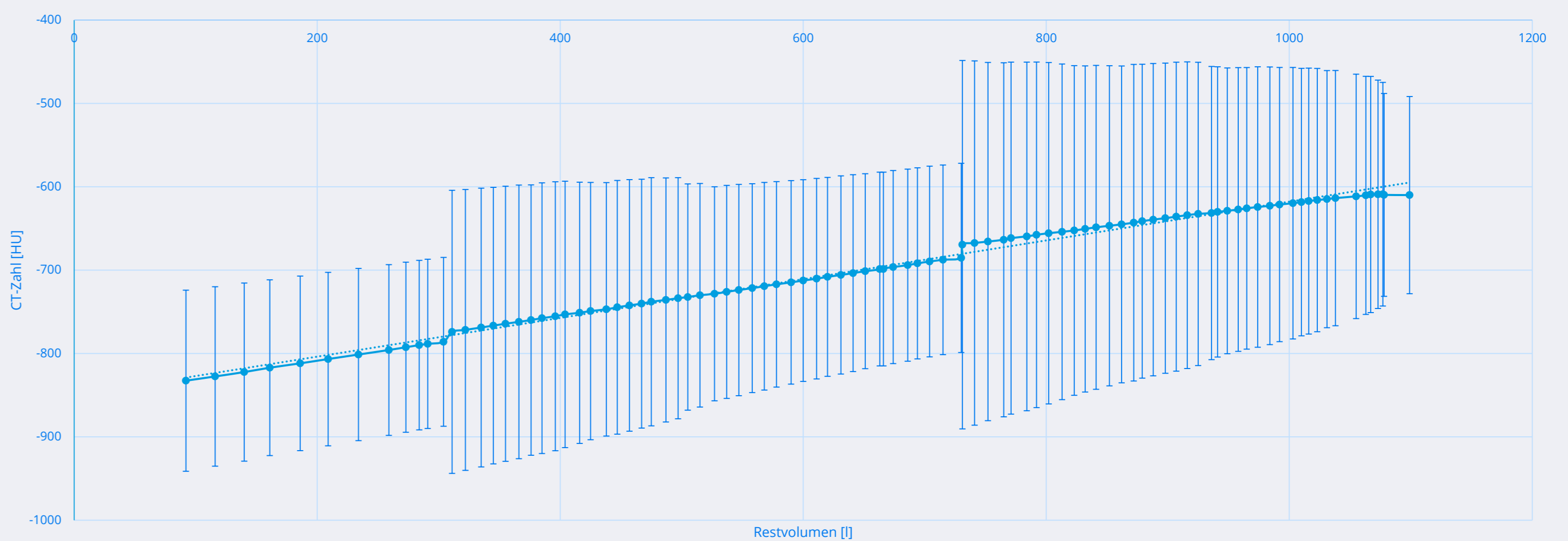
$$P_{\text{real}} = P_{\text{ideal}} \cdot \begin{bmatrix} 1,0104 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,0232 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0352 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,0486 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,063 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0782 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 44,423 \\ 88,948 \\ 134,47 \\ 181,265 \\ 229,427 \\ 279,033 \end{bmatrix} \text{ bar}$$

Um also beispielsweise ein 20/80-Verhältnis zu simulieren, ist ein Druck von 181,47 bar von Nöten.

Versuch

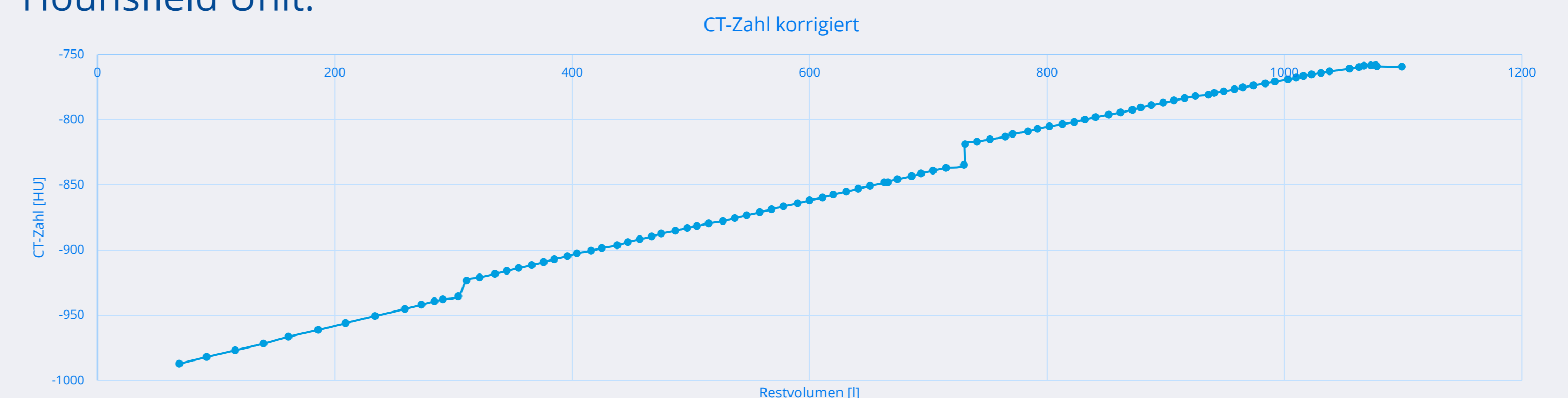
Die Gasflasche wurde im Computertomographen platziert und in der Breite eines Voxels vermessen. Dann wurde etwas Druck abgelassen und die Flasche erneut vermessen. Dies wurde so lange wiederholt, bis die Flasche geleert war.

Ergebnis

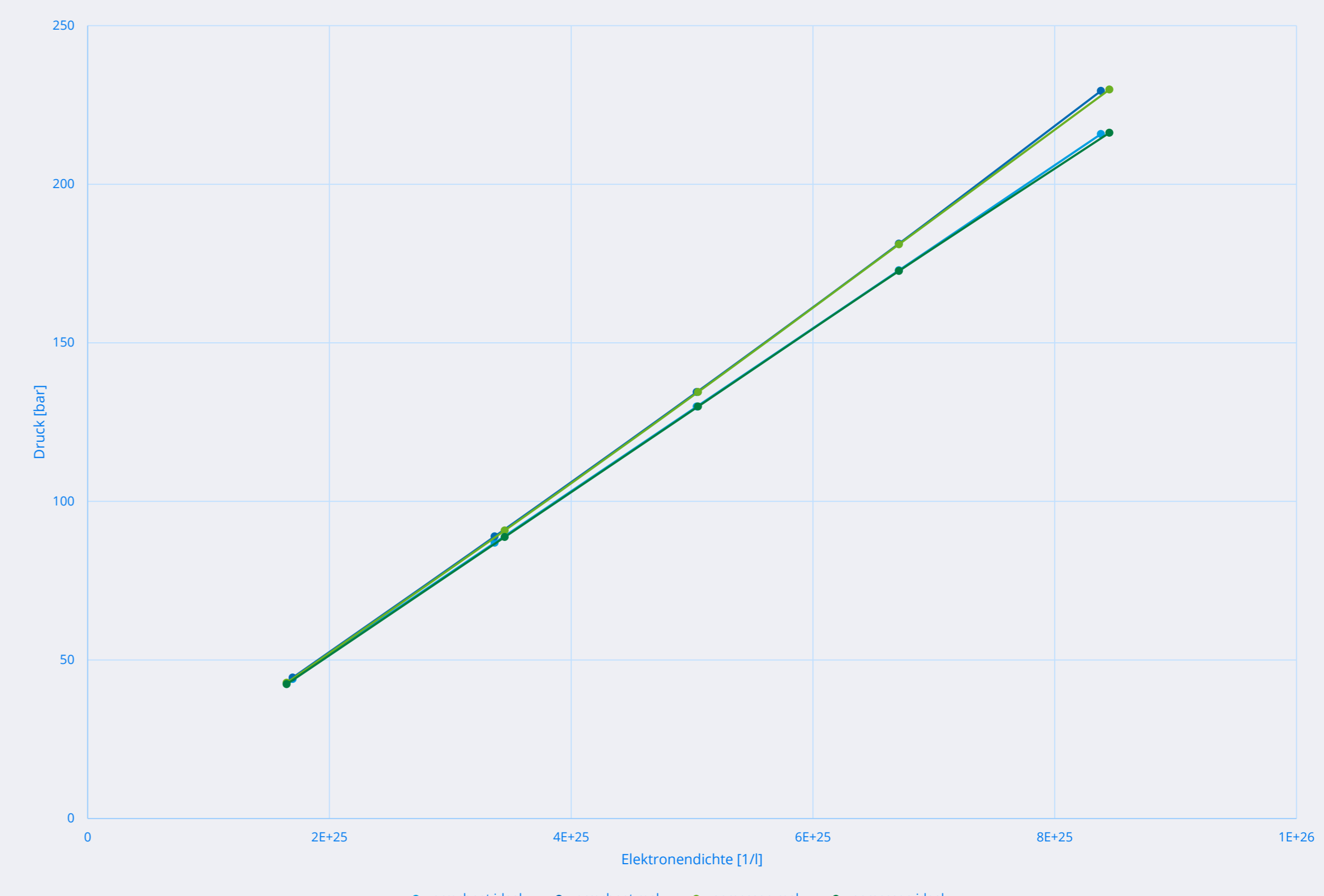


Auswertung

Die Messwerte zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen entnehmbarem Restvolumen, also Stoffmenge, und Hounsfield Unit; entsprechen also den Erwartungen. Die sichtbaren Sprünge sind beim Wechsel der Scanserie entstanden. Wie man erkennen kann, liegt die Hounsfield Unit für die leere Flasche bei ungefähr -850 HU statt bei erwarteten ungefähr -1000 HU. Das Material der Flasche scheint also Einfluss zu nehmen auf die Messdatenerfassung des Gases, eine Korrektur um die 150 HU Differenz ergibt folgenden Zusammenhang zwischen Restvolumen und Hounsfield Unit:



Des Weiteren lässt das Restvolumen direkten Rückschluss auf die noch vorhandene Stoffmenge zu und diese lässt auf die noch vorhandene Elektronendichte schließen:



Die Messwerte entsprechen sehr gut den theoretisch errechneten Werten; das Phantom ist also geeignet, um in Folgeversuchen verwendet zu werden.