Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Seit 25 Jahren haben wir nunmehr Marktwirtschaft.

Marktwirtschaft, wie es der Name schon sagt, bedeutet im Wesentlichen das Vorhandensein von Märkten, auf denen gehandelt wird.

Dabei wird nicht nur mit Obst und Gemüse, Autos, Möbeln usw. sondern eben auch mit CO_2 gehandelt.

CO_2-Handel

Vorbemerkungen

Die Handelsgebaren des Volumenstrom und Treibhausgas-Emissions-Handels-Gesetztes (TEHG) mit der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt soll hierbei nicht Gegenstand des Vortrages sein.

Es geht eher darum, den richtigen Preis bzw. die präzise Menge für CO_2 zu ermitteln, damit fair gehandelt werden kann.

CO_2 ist ein Gas, was eigentlich kein Mensch braucht. Es entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und ist im Rauchgas enthalten. Es ist als Klimakiller eingestuft und schädigt die Atmosphäre.

Auf das Verbrennen fossiler Stoffe kann auch nicht so einfach verzichtet werden, da hiermit der größte Teil des Wärme- und Energiebedarfs auf der Erde abgedeckt wird.

Es geht eher darum den CO_2-Ausstoß zu minimieren. Dass bedeutet auch diesen messtechnisch genau zu erfassen.

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Entstehung: **Hauptprodukt bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Holz, Kohle, Öl, Gas)**

$CO + O_2 \rightarrow CO_2 \rightarrow$ **Wärme** → **aber Klimakiller**

CO_2 – Ausstoß: **CO_2 – Fracht = CO_2 – Konzentration x Volumenstrom**

$$CO_2 - Konz\left[\frac{g}{Nm^3}\right] = CO_2[Vol.\%] \cdot 19{,}77 \frac{g}{Vol.\% \cdot Nm^3}$$

Beispiel: Erdgaskessel 100 MW (ca. 10.000 Nm³/h Erdgasverbrauch, ca. 100.000 Nm³/h Rauchgasvolumen, .ca. 11 Vol.-% CO_2 bei ca. 3 Vol.-% O_2)

CO_2-Konz. = 11 Vol.-% · 19,77 g/(Vol.% · Nm³) = 217 g/Nm³

CO_2 – Fracht = 217 g/Nm³ · 100.000 Nm³/h

CO_2 – Fracht = ca. 22 t/h → ca. 530 t/Tag → ca. 193.450 t/Jahr

ca. ⇗ schlecht für Betreiber, wenn zu viel bezahlt

ca. ⇘ schlecht für Behörde und Umwelt, wenn zu wenig bezahlt

→ **hohe Anforderungen an Messgenauigkeit !**

Die Aufteilung erfolgt gemäß Anhang VIII Abschnitt 1 in Ebenen:

Max. Messunsicherheiten für CO2:

Ebene 1 = 10 %,
Ebene 2 = 7,5 %,
Ebene 3 = 5 %,
Ebene 4 = 2,5 %

Die Messunsicherheit < 2,5 % stellt besonders hohe Anforderungen an die Messtechnik. Dabei weicht die Unsicherheits-betrachtungen der DEHST von denen der QAL 1 nach DIN EN 15267 ab.

Quelle Dr. Födisch

CO_2 – Kalibrierung:

Maßnahmen zur Minimierung der Messunsicherheit

- Verwendung von SRM- Messgeräten mit sehr hoher Genauigkeit
- Prüfung und Kalibrierung der SRM-Messtechnik an jedem Messtag ggf. mit DKD zertifiziertem CO_2-Prüfgas
- event. 2 parallel messende SRM – Analysatoren verwenden
- Durchführung von Netzmessung trotz erfüllter Homogenitätsprüfung
- bei insitu messenden AMS-Messgeräten exakte Ermittlung der Rauchgasfeuchte $\left(CO_{2tr} = CO_{2feu} \cdot \frac{100}{100 - F}\right)$

Umweltlabor

Vol.-strom – Kalibrierung:

Maßnahmen zur Minimierung der Messunsicherheit

- Verwendung von SRM- Messgeräten mit sehr hoher Genauigkeit
- Prüfung der Messtechnik vor Kalibrierung im Windkanal
- Verwendung von 2 SRM-Messsätzen zur zeitgleichen Netzmessung auf 2 Messachsen
- unbedingt Abgasrandbedingungen (Temp., Druck, ggf. Feuchte) mit kalibrieren
- exakte Ermittlung des Messquerschnittes (wenn möglich nachmessen) → sonst systematischer Fehler

Umweltengineering

Ermittlung der Messunsicherheit: z.B. nach Relativmethode $\left(\frac{u_{v,i}}{v_i}\right)^2 = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{u_{\Delta p,i}}{\Delta p_i}\right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{u_\rho}{\rho}\right)^2$

Luftreinhaltung

bei Kalibrierung einzuhaltende maximal zulässige Standardabweichung:

$$s_D \leq (1{,}2 \cdot \text{maximaler Messwert}) \cdot \frac{2{,}5\ \%}{100} \cdot k_v$$

Beispiel: $s_D \leq (1{,}2 \cdot 160.000\ Nm^3/h] \cdot 0{,}025 \cdot 0{,}9761$

$\underline{s_D \leq 4.685\ Nm^3/h}$

Dieser Wert wurde bei durchgeführten Kalibrierungen eingehalten.

Volumenstrommessung

Der Volumenstrom ist keine messbare Größe.

Dieser berechnet sich aus der ermittelten Geschwindigkeit und dem Querschnitt des Messkanals.

Die Geschwindigkeit wird in der Regel bei solchen Anlagen aus dem dynamischen Druck (Druck des bewegten Gases) nach Bernoulli berechnet. Der dynamische Druck ist dabei immer die Druckdifferenz aus dem Gesamtdruck und dem statischen Kanalinnendruck.

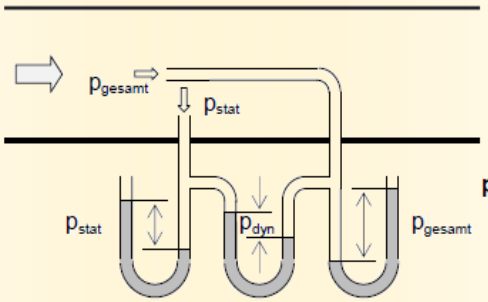
Typische Messgeräte sind dabei das Prandtl-Rohr oder eine Dreilochsonde.

Volumenstromberechnung

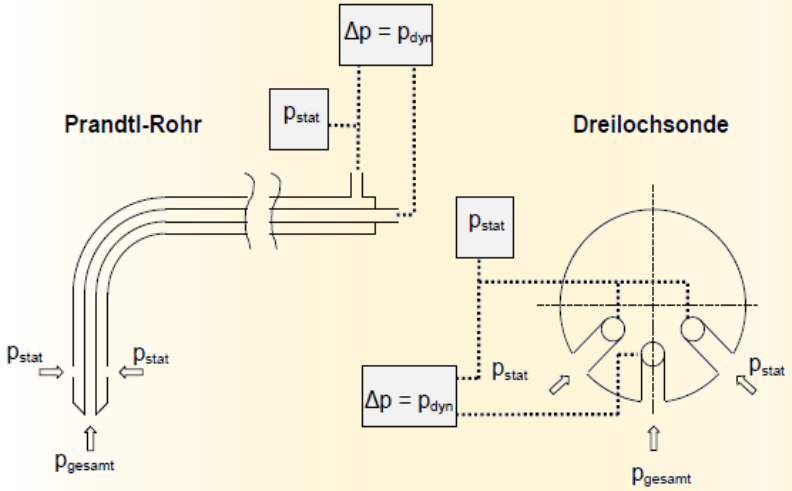
$\dot{V}\,[m^3/h] = v\,[m/s] \cdot A\,[m^2] \cdot 3600\,[s/h]$

V … Volumenstrom
v … Geschwindigkeit
A … Querschnitt

Differenzdruckmessung (Staudruck)



$p_{dyn} = p_{gesamt} - p_{stat}$



Bernoulli-Gleichung

$$v\,[m/s] = \sqrt{\frac{200 \cdot p_{dyn}\,[mbar]}{\rho_B\,[kg/m^3]}}$$

v … Geschwindigkeit

p_{dyn} … dynamischer Druck
ρ_B … Dichte im Betriebszustand

Messgerät für Druck: Druckdose mit Transmitter

Stromausgang x (4 – 20 mA) stellt den Wert des Druckes von 0 – Endwert dar.

Volumenstromkalibrierung

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Die Messung des dyn. Druckes erfolgt mit Druckaufnehmern, die mit einem Drucktransmitter gekoppelt sind, der den Wert des Druckes in der Regel als Stromwert zwischen 4 und 20 mA darstellt.

Bei einem linearen Transmitter kann aufgrund der Tatsache, dass der dynamische Druck, der die Geschwindigkeit im Wesentlichen bestimmt, in der Bernoulli-Gleichung unter der Wurzel steht, ist **keine lineare** Kalibrierung mit den Messwertpaaren

$$v_{SRM} \cap x_{AMS} = f(p_{dyn})$$

durchgeführt werden.

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

	AMS	SRM
Messsystem	Staudrucksonde mit - **linearem** Differenzdrucktransmitter - Temperaturmessung und - Absolutdruckmessung	Dreilochsonde mit Auswerteeinheit (Gravimat Fa. SICK) - Geschwindigkeit - Temperaturmessung und - Absolutdruckmessung
Messwerte	- p_{dyn}: $0 \le x\,[mA] \le p\,[mbar]$ $4 \le x \le 20\,mA$ - Temperatur T [°C] - Absolutdruck p_{stat} [mbar]	- Geschwindigkeit v [m/s] - Temperatur T [°C] - Absolutdruck p_{stat} [mbar]
Messwertpaare für Kalibrierung	Regression der Wertepaare: $\left\| \frac{v^2_{SRM}\,[m/s]^2}{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p_{stat}}} \right\| \cap \left\| x_{AMS}\,[mA] = f(p_{dyn}) \right\|$ Regressionsfunktion: $v\,[m/s] = f(x) = \sqrt{(b \cdot x\,[mA] + c)\cdot\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p_{stat}}}$	

Volumenstromnormierung

$$\dot{V}_{i.N.tr}\,[Nm^3/h] = \dot{V}_{i.B.feu}\,[m^3/h]\cdot\frac{273{,}15}{273{,}15+T}\cdot\frac{p_{stat}}{1013}\cdot\frac{100-F}{100} \qquad \text{ggf.} \cdot\left(\frac{21-O_{2\text{-Gehalt}}}{21-O_{2\text{-Bezug}}}\right)$$

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

linearer Transmitter 3 mbar

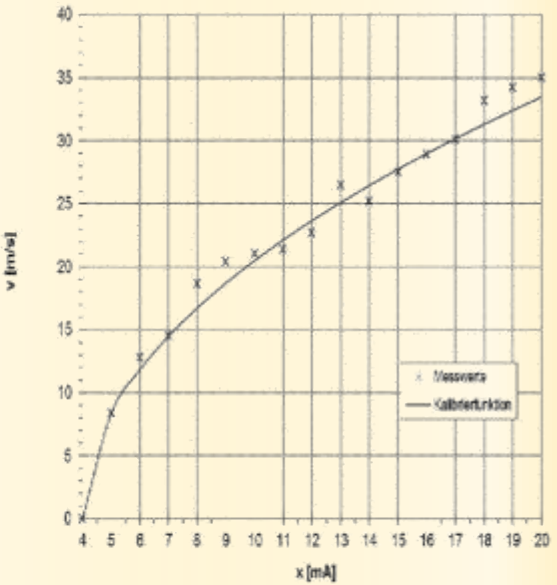
AMS	SRM				kalibrierte AMS-Werte
x [mA]	$\frac{v^2}{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p}}$	v [m/s]	T [°C]	p [mbar]	$v=\sqrt{(b\cdot x+c)\cdot\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p}}$
4	0,0	0,0	220	980	0,0
5	37,5	8,4	225	979	8,4
6	75,0	12,8	302	979	12,8
7	113	14,5	221	980	14,5
8	150	18,7	352	999	18,7
9	188	20,4	322	999	20,4
10	225	21,0	256	1.000	21,0
11	263	21,3	195	1.000	21,3
12	300	22,7	200	1.025	22,7
13	338	26,5	301	1.024	26,5
14	375	25,2	196	1.025	25,2
15	413	27,5	235	1.025	27,5
16	450	28,9	239	1.025	28,9
17	488	30,1	240	1.025	30,1
18	525	33,1	305	1.025	33,1
19	563	34,2	300	1.021	34,2
20	600	35,0	285	1.015	35,0

Regression

b = 37,60 **c = - 150,0**

Standardabweichung v_{AMS} I v_{SRM} = 0,0 m/s

Diagramm v = f(x)



Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Um solche Kalibrierungen linear darstellen zu können, werden durch die Industrie radizierte Drucktransmitter angeboten.

Diese Transmitter stellen den Wurzelwert des Druckes linear über dem mA-Ausgangssignal dar.

$$v = \sqrt{\frac{200 \cdot p_{dyn}}{\rho_{N\,feu} \cdot \frac{273{,}15}{273{,}15 + T} \cdot \frac{p_{stat}}{1013}}} = \sqrt{p_{dyn}} \cdot \sqrt{\frac{200}{\rho_{N\,feu}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{273{,}15}{273{,}15 + T} \cdot \frac{p_{stat}}{1013}}}$$

$$v = (b \cdot x + c) \cdot \sqrt{\frac{273{,}15 + T}{273{,}15} \cdot \frac{1013}{p_{stat}}}$$

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

radizierter Drucktransmitter

$$m_{lin} = \frac{p-0}{20-4} \qquad n_{lin} = -m_{lin} \cdot 4 + 0$$

Messbereich p: 0 - 12,50 mbar — $y = f(x_{lin}) =$ 0,781 $\cdot x_{lin} +$ -3,125

$$m_{rad} = \frac{\sqrt{p}-\sqrt{0}}{20-4} \qquad n_{rad} = -m_{rad} \cdot 4 + 0$$

Messbereich $\sqrt{p}$: 0 - 3,54 $\sqrt{mbar}$ — $y = f(x_{rad}) =$ 0,221 $\cdot x_{rad} +$ -0,884

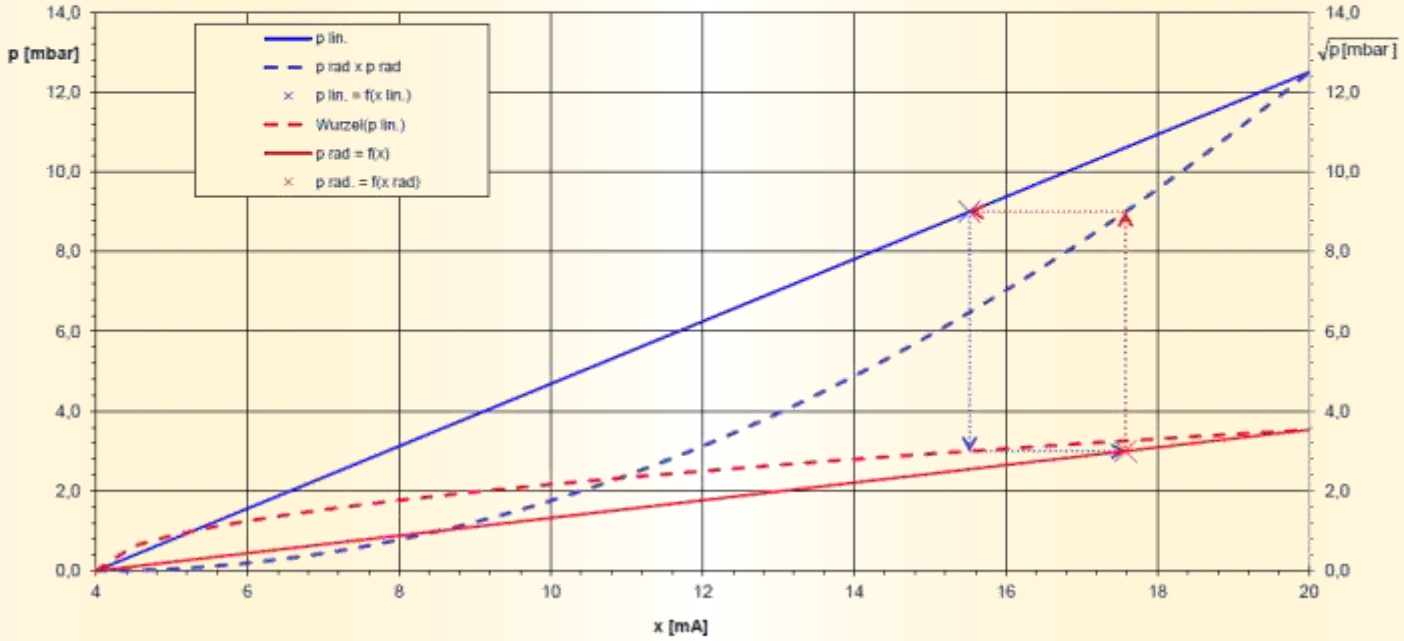
Strom: 4 - 20 mA

$$v = f(x_{lin}) = \sqrt{\frac{200 \cdot (m_{lin} \cdot x_{lin} + n_{lin})}{\rho_B}}$$

ρ_N tr = 1,33 kg/Nm³
ρ_N feu = 1,32 kg/Nm³
ρ_B = 1,23 kg/m³

p =	9,00	mbar	x_{lin} =	15,520 mA	v = f(x_{lin}) = 38,32 m/s
$\sqrt{p}$ =	3,00	$\sqrt{mbar}$	x_{rad} =	17,576 mA	v = f(x_{rad}) = 38,32 m/s

$$v = f(x_{rad}) = (m_{rad} \cdot x_{rad} + n_{rad}) \cdot \sqrt{\frac{200}{\rho_B}}$$



Kalibrierung

	AMS	SRM
Messsystem	Staudrucksonde mit - **radiziertem** Differenzdrucktransmitter - Temperaturmessung und - Absolutdruckmessung	Dreilochsonde mit Auswerteeinheit (Gravimat Fa. SICK) - Geschwindigkeit - Temperaturmessung und - Absolutdruckmessung
Messwerte	- p_{dyn}: $0 \le x\,[mA] \le \sqrt{p}\,[\sqrt{mbar}]$ $4 \le x \le 20$ mA - Temperatur T [°C] - Absolutdruck p_{stat} [mbar]	- Geschwindigkeit v [m/s] - Temperatur T [°C] - Absolutdruck p_{stat} [mbar]
Messwertpaare für Kalibrierung ***einfache Methode***	Regression der Wertepaare: $\|v_{SRM}\,[m/s]\| \cap \|x_{AMS}\,[mA] = f(\sqrt{p_{dyn}})\|$ Regressionsfunktion: $v\,[m/s] = f(x) = b\left[\frac{m/s}{mA}\right] \cdot x\,[mA] + c\,[m/s]$	
Messwertpaare für Kalibrierung ***genauere Methode***	Regression der Wertepaare: $\left\|\frac{v_{SRM}\,[m/s]}{\sqrt{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p_{stat}}}}\right\| \cap \|x_{AMS}\,[mA] = f(\sqrt{p_{dyn}})\|$ Regressionsfunktion: $v\,[m/s] = f(x) = \left\{b\left[\frac{m/s}{mA}\right] \cdot x\,[mA] + c\,[m/s]\right\} \cdot \sqrt{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p_{stat}}}$	

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Umweltlabor

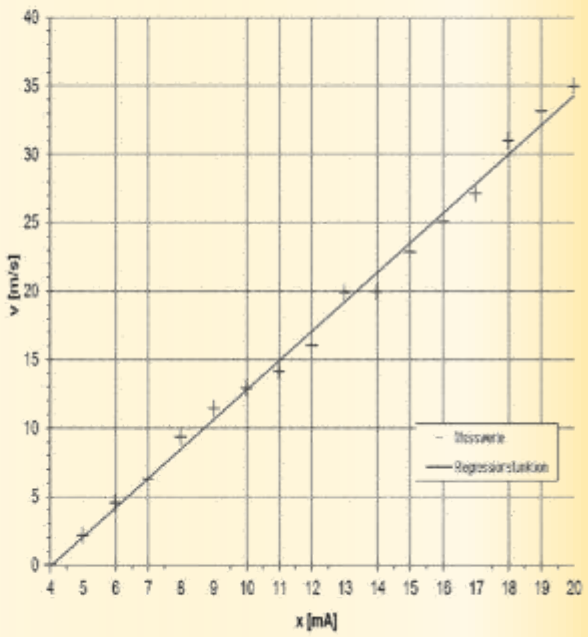
Umweltengineering

Luftreinhaltung

radizierter Transmitter 3 mbar (genaue Methode)

AMS	SRM				kalibrierte AMS-Werte
x [mA]	$\frac{v}{\sqrt{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p}}}$	v [m/s]	T [°C]	p [mbar]	$v=(b\cdot x+c)\cdot\sqrt{\frac{273{,}15+T}{273{,}15}\cdot\frac{1013}{p}}$
4	0,0	0,0	220	980	0,0
5	1,5	2,1	225	979	2,1
6	3,1	4,5	302	979	4,5
7	4,6	6,3	221	980	6,3
8	6,1	9,3	352	999	9,3
9	7,7	11,4	322	999	11,4
10	9,2	12,9	256	1.000	12,9
11	10,7	14,1	195	1.000	14,1
12	12,2	16,0	200	1.025	16,0
13	13,8	19,9	301	1.024	19,9
14	15,3	19,9	196	1.025	19,9
15	16,8	22,8	235	1.025	22,8
16	18,4	25,0	239	1.025	25,0
17	19,9	27,1	240	1.025	27,1
18	21,4	31,0	305	1.025	31,0
19	23,0	33,1	300	1.021	33,1
20	24,5	35,0	285	1.015	35,0
Regression					
b = 1,531	**c = - 6,124**	Standardabweichung v_{AMS} I v_{SRM} = 0,0 m/s			

Diagramm v = f(x)



Umweltlabor

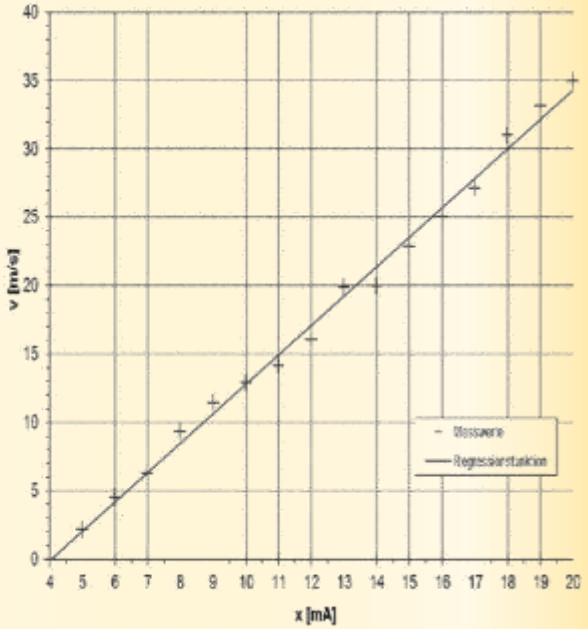
Umweltengineering

Luftreinhaltung

radizierter Transmitter 3 mbar (einfache Methode)

AMS	SRM				kalibrierte AMS-Werte
x [mA]	v = v	v [m/s]	T [°C]	p [mbar]	$v = b \cdot x + c$
4	0,0	0,0	220	980	-0,1
5	2,1	2,1	225	979	2,0
6	4,5	4,5	302	979	4,2
7	6,3	6,3	221	980	6,3
8	9,3	9,3	352	999	8,5
9	11,4	11,4	322	999	10,6
10	12,9	12,9	256	1.000	12,8
11	14,1	14,1	195	1.000	14,9
12	16,0	16,0	200	1.025	17,1
13	19,9	19,9	301	1.024	19,2
14	19,9	19,9	196	1.025	21,4
15	22,8	22,8	235	1.025	23,5
16	25,0	25,0	239	1.025	25,7
17	27,1	27,1	240	1.025	27,8
18	31,0	31,0	305	1.025	30,0
19	33,1	33,1	300	1.021	32,1
20	35,0	35,0	285	1.015	34,3
Regression		Standardabweichung v_{AMS} I v_{SRM} = 0,78 m/s			
b = 2,150 **c = - 8,708**					

Diagramm v = f(x)



Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

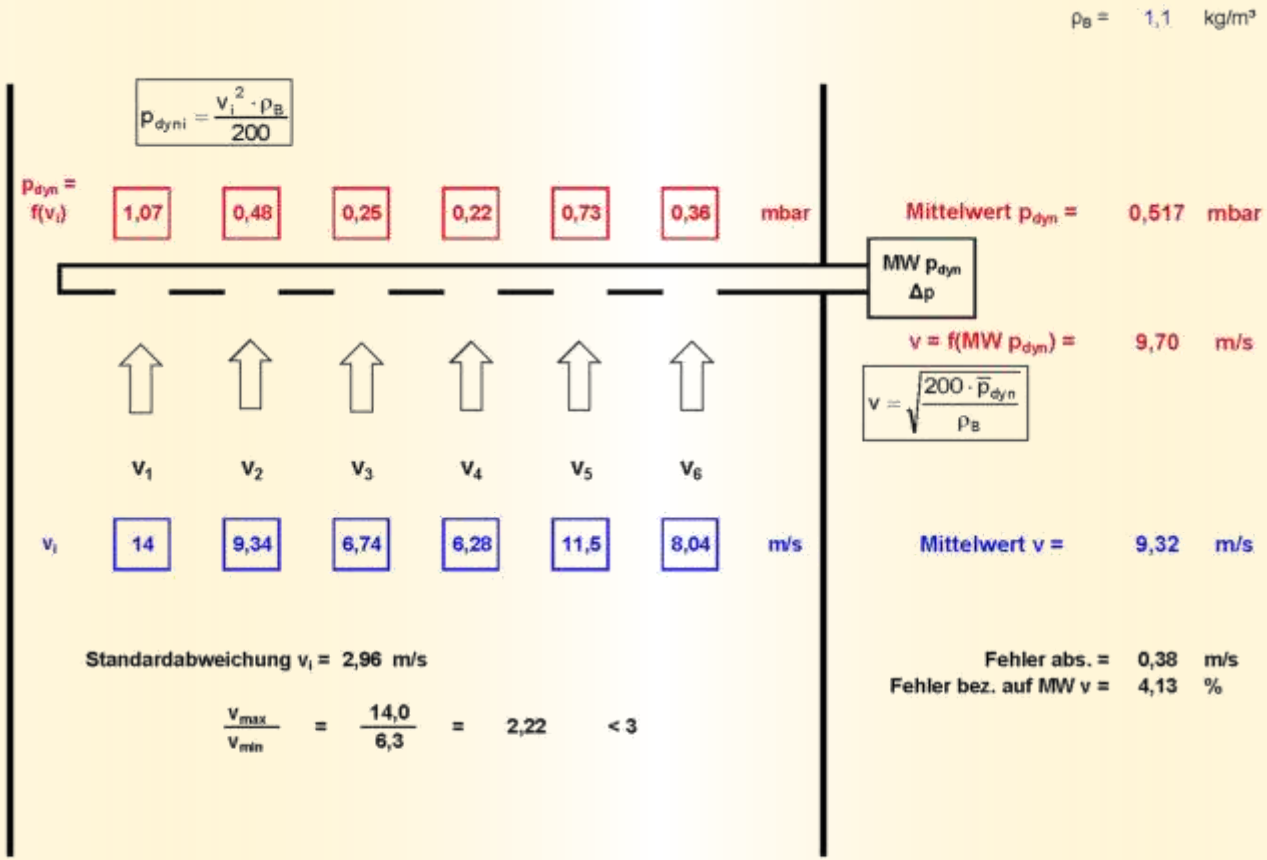
Weiterhin sei noch darauf hin gewiesen, dass sogenannte Kammlochsonden, deren Messprinzip in parallel über den Querschnitt verteilten Messbohrungen (ähnlich einer Dreilochsonde) besteht und den dynamischen Druck über diese Messstrecke mitteln, **nicht** den Mittelwert der Geschwindigkeit messen.

Sie verbessern zwar die Genauigkeit der Messung, ersetzen aber keine echte Netzmessung.

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung



Fehler bei Geschwindigkeitsmessungen nach Staudruckprinzip mit Mehrlochsonde

Umweltlabor

Umweltengineering

Luftreinhaltung

Abschließend kann eingeschätzt werden, dass die Einhaltung der Messunsicherheit von 2,5 % für die Komponente CO_2 und den Volumenstrom unter Anwendung aufwendigerer Maßnahmen (siehe Folie 5) machbar ist.

Für den Massenstrom, der das Produkt aus beiden Komponenten ist, ist die Einhaltung von 2,5 % Gesamtmessunsicherheit eher als schwierig machbar einzuschätzen.