

Bericht zu Ref./AZ 0/3/33/33/-05-027

Messprogramm zur Identifizierung von Leistungsverlusten bei der Partikelmessung

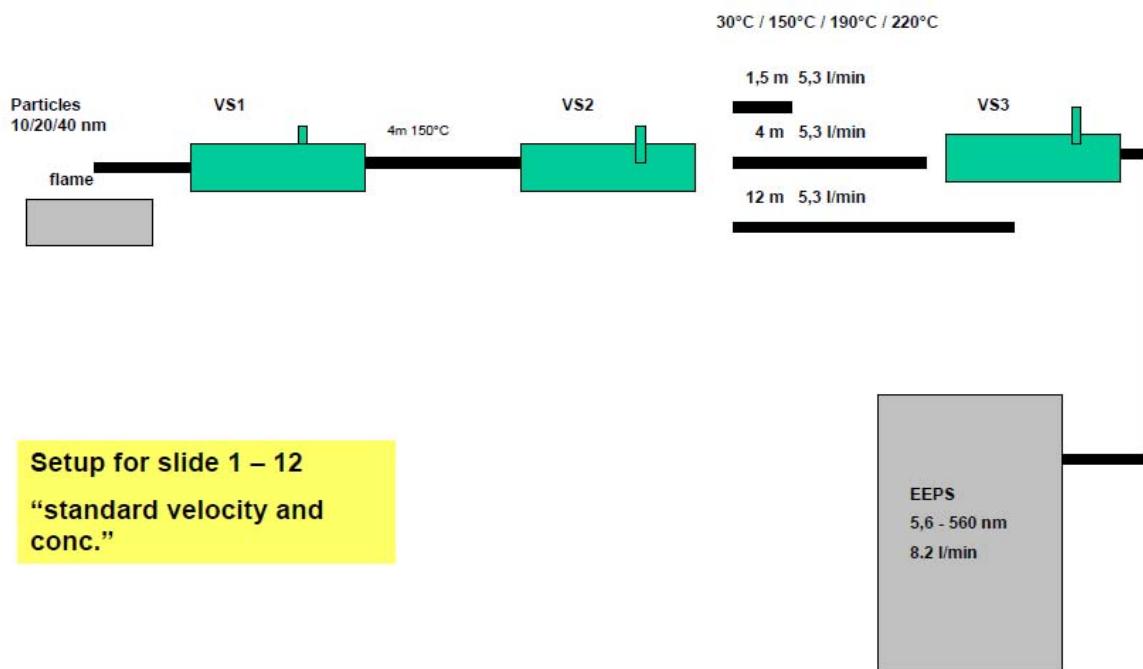
1. Versuchsaufbau:

Als Rußquelle dient eine vorgemischte atmosphärische Ethylenflamme. Die Flamme wird durch eine Prallplatte stabilisiert. Der gewünschte Partikeldurchmesser wird über die Stöchiometrie der vorgemischten Flamme eingestellt. Die Partikel werden über eine Ejektor-Verdünnungsstufe (VS1) aus der Flamme abgesaugt. Es folgt eine 4 m lange Heizleitung die auf 150°C thermostatisiert ist. Durch diese Heizleitung sollen zum einen Volatiles entfernt werden, zum anderen dient die Verweilzeit in dieser Leitung der Agglomeration. So wird eine ungefähre Log-Normal-Verteilung der Partikeldurchmesser erzeugt. Die dann folgenden Messleitungen werden jeweils auf entsprechende Temperatur gebracht und dann nacheinander mit dem Abgas der jeweiligen "Russgenerator - Einstellung" (10nm, 20 nm, 40 nm) durchströmt.

Im **Messaufbau 1** folgt auf VS1 eine weitere Ejektor-Verdünnungsstufe (VS2). Am Ausgang dieser Verdünnungsstufe (VS2) befinden sich dann abwechselnd die zu untersuchenden Messleitungen mit den Längen 1,5 m / 4 m / 12 m. (Der Innendurchmesser aller eingesetzten Edelstahlmessleitungen beträgt 6 mm.) Nach den Messleitungen und vor dem EEPS ist eine weitere Ejektor-Verdünnungsstufe (VS3) installiert.

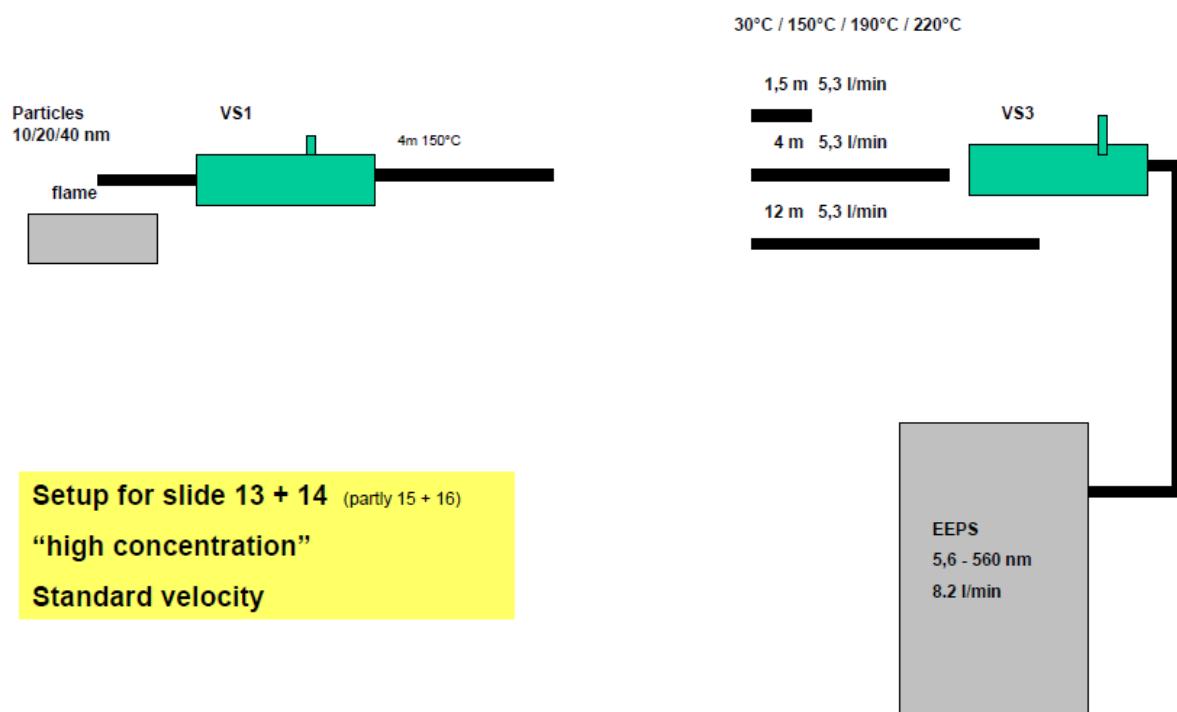
Nach der Messleitung folgt eine weitere Verdünnungsstufe (VS3) um die Temperatur wieder auf EEPS verträgliche Werte herabzusetzen

Messaufbau 1 (Bilder 1- 12)



Im **Messaufbau 2** ist die zweite Ejektor-Verdünnungsstufe herausgenommen. Dadurch wird die Anzahlkonzentration am Messleitungseingang um ~ den Faktor 10 erhöht. Alle anderen Parameter bleiben konstant.

Messaufbau 2 (Bild 13 + 14 / teilweise 15+16) **Anzahlkonzentration ~ 10 x höher**



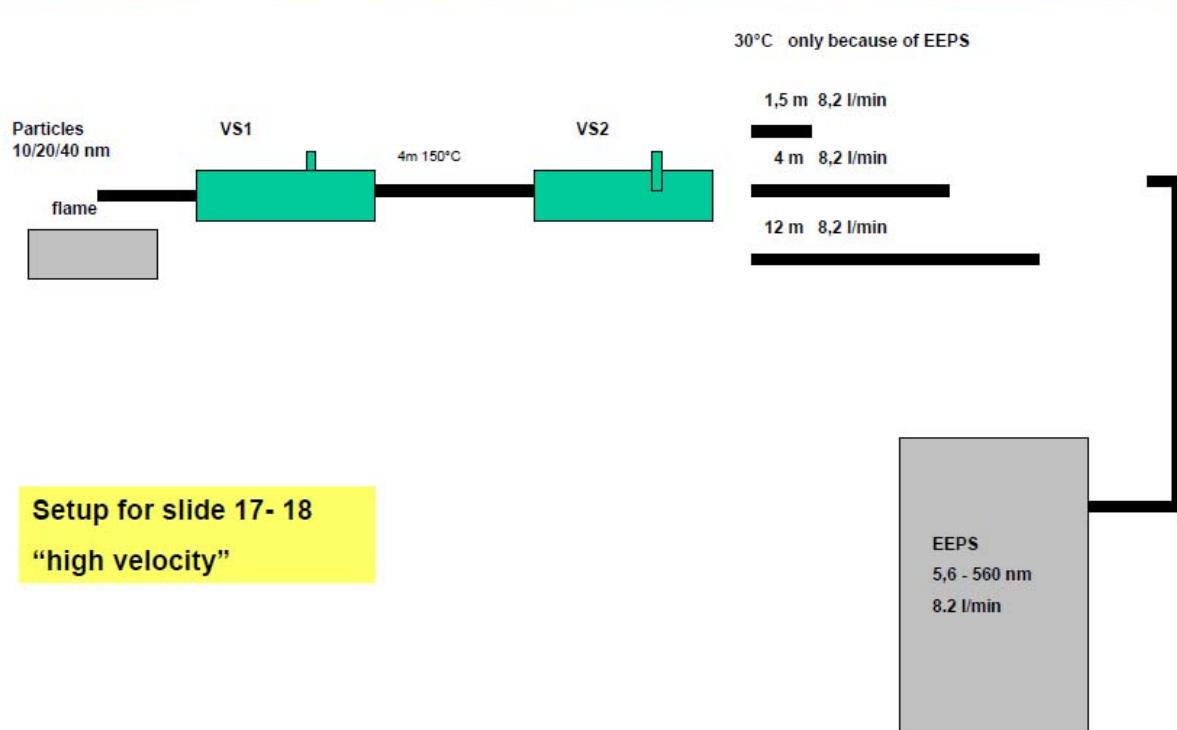
Strömungsparameter für Messaufbau 1+2 bei 30°C

Line length (m)	Line volume (cc)	Vol. Flow (l/min)	Vol. Flow (cc/s)	Residence time (s)	Velocity (m/s)	Reynolds Number (Re)
1,5	42,39	5,32	88,67	0,48	3,14	1245,88
4	113,04	5,31	88,50	1,28	3,13	1243,53
12	339,12	5,16	86,00	3,04	3,04	1208,41

Messaufbau 3:

Zur Variation der Strömungsgeschwindigkeit wurde die Verdünnungsstufe vor dem EEPS entfernt. Dadurch wird der Fluß durch die Messleitung von 5,3 l/min auf 8,2 l/min erhöht. Das entspricht der geregelten Fördermenge des EEPS. Allerdings kann dieser **Messaufbau 3** nur für die 30°C Versuche eingesetzt werden, da die maximale „Einlasstemperatur“ des EEPS 50°C beträgt.

Messaufbau 3 (Bild 17 + 18) „hohe Strömungsgeschwindigkeit“



Strömungsparameter für Messaufbau 3 bei 30°C:

Line length (m)	Line volume (cc)	Vol. Flow (l/min)	Vol. Flow (cc/s)	Residence time (s)	Velocity (m/s)	Reynolds Number (Re)
1,5	42,30	8,20	136,67	0,31	4,84	1920,34
4	113,04	8,20	136,67	0,83	4,84	1920,34
12	339,12	8,20	136,67	2,48	4,84	1920,34

2. Versuchspараметer:

Die Messleitungen waren alle in Edelstahl ausgeführt. Der frei Innendurchmesser betrug bei allen Leitungen 6 mm. Aus praktischen Gründen waren die Messleitungen aufgerollt. Die Radien waren aber stets $> 0,5$ m. Trägheitsabscheidung von Partikeln kann deshalb ausgeschlossen werden.

Leitungslänge :	1,5m / 4 m / 12 m
Leitungstemperatur:	30°C / 150°C / 190°C / 220°C
Partikeldurchmesser.	10 nm / 20 nm / 40 nm / geo. Mean (Mobilitätsdurchmesser)
Anfangskonzentration:	~ 7.5 E6 / (~ 7.0 E 7 für 20 nm Partikel)
Durchstömungsgeschwindigkeit:	3,1 m/s / 4,8 m/s
Verweilzeit:	0,3 s – 4,4 s

3. Diskussion der Ergebnisse:

Die bei den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse sind in den folgenden vier EXCEL Tabellen **EXCEL 1** bis **EXCEL 4** zusammengefasst. Zunächst fällt auf, dass sich die Mobilitätsdurchmesser zwischen Leitungseingang und Leitungsausgang, bei Temperaturvariation, nur geringfügig ändern. D.h., dass die Volatiles durch die vorgeschaltete Konditionierungsleitung (4m, 150°C) weitestgehend beseitigt sind. Es werden also wirklich Partikelverluste erfasst und nicht etwa „Abdampfverluste“ der Partikel! Auch die 10 nm Partikel sind „echte Russpartikel“!

3.1 Änderung des Durchmessers

Je länger die Verweilzeit in der Leitung und je höher die Partikelanzahlkonzentration, desto mehr Agglomeration wird beobachtet. Dies wird deutlich, wenn man die Zunahme der Partikeldurchmesser zwischen Leitungseingang und Leitungsausgang betrachtet. Besonders deutlich logischerweise bei der 12 m Leitung und wenn man hohe Konzentration und niedere Konzentration vergleicht.

3.2 Änderung der Partikelanzahlkonzentration

Da, wie oben erwähnt, Partikelverdampfung ausgeschlossen ist, sind Partikelverluste nur durch Agglomeration und durch Wandverluste zu erwarten. Dabei ist zu beachten, dass kleine Partikel schneller diffundieren und deshalb häufiger untereinander, aber auch mit der Wand stoßen. Das heißt, je kleiner die Partikel, je höher die Konzentration und je länger die Verweilzeit, desto höher die Verluste.

3.3 Änderung der Massenkonzentration

Da, wie oben bereits erwähnt, Partikelverdampfung ausgeschlossen ist, kommt die Abnahme der Massenkonzentration ausschließlich durch Wandverluste.

Die prozentuale Abnahme der Massenkonzentration ist geringer als die prozentuale Abnahme der Partikelanzahlkonzentration, da die Agglomeration nicht zur Massenabnahme führt.

Die Bezeichnung der EEPS Files ist wie vereinbart z.B.

12T20L150C das bedeutet:

12m Leitungslänge// **T**ip = Leitungseingang// **20** nm Partikeldurchmesser// **L**= Low flow // **150°C**

Der entsprechende File am Leitungsexit wäre dann: **12E20L150C**

EXCEL 1: Messaufbau 1

Leitungsverluste für 10 nm Partikel

Leitungstemp °C	...10L30C 30	...10L150C 150	...10L190C 190	...10L220C 220
1,5 m Leitung / # Verlust in %	20,36	30,24	28,7	29,92
1,5 m Leitung / Massenverlust in %	23,06	34,03	28,80	35,84
Geo Mean d in nm (Tip)	10,7	10,7	10,4	10,4
Geo Mean d in nm (EXIT)	10,8	10,6	10,4	10,2
# Tip /cm3	3,34E+05	3,34E+05	2,72E+05	2,54E+05
# Exit / cm3	2,66E+05	2,33E+05	1,94E+05	1,78E+05
mass Tip in µg/ m3	0,36	0,338	0,243	0,226
mass EXIT in µg/ m3	0,277	0,223	0,173	0,145
4,5 m Leitung / # Verlust in %	28,23	38,73	40,27	37,95
4,5 m Leitung / Massenverlust in %	22,61	37,65	41,34	29,17
Geo Mean d in nm (Tip)	10,4	10,4	10,1	9,93
Geo Mean d in nm (Exit)	10,7	10,5	10,2	10,4
# Tip /cm3	2,87E+05	2,84E+05	2,26E+05	2,24E+05
# Exit / cm3	2,06E+05	1,75E+05	1,35E+05	1,39E+05
mass Tip in µg/ m3	0,261	0,255	0,179	0,168
mass EXIT in µg/ m3	0,202	0,159	0,105	0,119
12 m Leitung / # Verlust in %	56,7	63,1	70,78	71,33
12 m Leitung / Massenverlust in %	45,54	58,24	66,94	67,89
Geo Mean d in nm (Tip)	10,2	10,2	9,88	10,1
Geo Mean d in nm (Exit)	11	10,8	10,4	10,6
# Tip /cm3	2,63E+05	2,60E+05	2,03E+05	2,26E+05
# Exit / cm3	1,14E+05	9,60E+04	5,93E+04	6,48E+04
mass Tip in µg/ m3	0,224	0,221	0,147	0,18
mass EXIT in µg/ m3	0,122	0,0923	0,0486	0,0578

EXCEL 2: Messaufbau 1

Leitungsverluste für 20 nm Partikel

Leitungstemp °C	...20L30C 30	...20L150C 150	...20L190C 190	...20L220C 220
1,5 m Leitung / # Verlust in %	9,45	15,91	20,25	22,74
1,5 m Leitung / Massenverlust in %	7,36	15,53	21,67	18,56
Geo Mean d in nm (Tip)	19,7	19,5	19,2	19,8
Geo Mean d in nm (EXIT)	20	19,6	19,2	19,7
# Tip /cm3	7,62E+05	8,11E+05	7,95E+05	1,06E+06
# Exit / cm3	6,90E+05	6,82E+05	6,34E+05	8,19E+05
mass Tip in µg/ m3	8,29	8,63	8,12	11,8
mass EXIT in µg/ m3	7,68	7,29	6,36	9,61
4,5 m Leitung / # Verlust in %	15,65	24,12	27,1	30,57
4,5 m Leitung / Massenverlust in %	11	14,05	24,77	29,29
Geo Mean d in nm (Tip)	19,3	19	19,1	19,5
Geo Mean d in nm (Exit)	20	20	19,5	19,9
# Tip /cm3	7,35E+05	7,96E+05	7,75E+05	1,06E+06
# Exit / cm3	6,20E+05	6,04E+05	5,65E+05	7,36E+05
mass Tip in µg/ m3	7,73	7,9	7,75	11,2
mass EXIT in µg/ m3	6,88	6,79	5,83	7,92
12 m Leitung / # Verlust in %	40,55	48,91	52,08	53,34
12 m Leitung / Massenverlust in %	25,14	39,45	44,95	46,44
Geo Mean d in nm (Tip)	19,2	19,4	19,5	19,1
Geo Mean d in nm (Exit)	21,3	21,1	21,1	20,6
# Tip /cm3	7,30E+05	8,24E+05	7,70E+05	7,48E+05
# Exit / cm3	4,34E+05	4,21E+05	3,69E+05	3,49E+05
mass Tip in µg/ m3	7,36	8,62	8,61	7,86
mass EXIT in µg/ m3	5,51	5,22	4,74	4,21

EXCEL 3: Messaufbau 1

Leitungsverluste für 40 nm Partikel

Leitungstemp °C	...40L30C 30	...40L150C 150	...40L190C 190	...40L220C 220
1,5 m Leitung / # Verlust in %	5,22	14,88	16,11	20,42
1,5 m Leitung / Massenverlust in %	7,38	16,94	19,89	25,07
Geo Mean d in nm (Tip)	39,5	36,6	40,2	38
Geo Mean d in nm (EXIT)	39,5	36,6	39,8	37,1
# Tip /cm3	9,59E+05	9,67E+05	8,94E+05	9,55E+05
# Exit / cm3	9,09E+05	8,23E+05	7,50E+05	7,60E+05
mass Tip in µg/ m3	81,3	67,9	75,4	71,8
mass EXIT in µg/ m3	75,3	56,4	60,4	53,8
4,5 m Leitung / # Verlust in %	13,08	21,76	19,4	23,83
4,5 m Leitung / Massenverlust in %	8,98	22,73	20,24	27,11
Geo Mean d in nm (Tip)	40	38	39,6	37,7
Geo Mean d in nm (Exit)	41,4	38,4	38,2	37,4
# Tip /cm3	8,87E+05	9,33E+05	8,52E+05	9,36E+05
# Exit / cm3	7,71E+05	7,30E+05	6,87E+05	7,13E+05
mass Tip in µg/ m3	74,6	70,4	68,2	70,1
mass EXIT in µg/ m3	67,9	54,4	54,4	51,1
12 m Leitung / # Verlust in %	27,11	24,28	41,8	45,03
12 m Leitung / Massenverlust in %	14,58	13,55	21,53	41,87
Geo Mean d in nm (Tip)	38,9	39,2	35	37,2
Geo Mean d in nm (Exit)	42,5	42,2	40,6	39,3
# Tip /cm3	9,70E+05	8,36E+05	9,69E+05	9,15E+05
# Exit / cm3	7,07E+05	6,33E+05	5,64E+05	5,03E+05
mass Tip in µg/ m3	77,5	66,4	59	66,4
mass EXIT in µg/ m3	66,2	57,4	46,3	38,6

EXCEL 4:

L= Messaufbau 2

M= Messaufbau 3

Leistungsverluste für 20 nm Partikel, nur zwei Verdünnungsstufen, d.h. höhere Konzentration

In der rechten Spalte ist keine VS vor dem EEPS, deshalb höhere Geschwindigkeit **M**.

Lediglich in der rechten Spalte entsprechen die gemessenen Konzentrationen den tatsächlichen Konzentrationen.

(Alle anderen Massen und Konz. *8,5 nehmen)

Geschwindigkeit	L ...20L30C- 2VS	L ...20L150C- 2VS	L ...20L190C- 2VS	L ...20L220C- 2VS	M ...20M30C- 2VS
Leitungstemp °C	30	150	190	220	30
1,5 m Leitung / # Verlust in %	15,14	18,37	21,69	23,99	9,46
1,5 m Leitung / Massenverlust in %	5,97	15,54	18,42	26,77	10,26
Geo Mean d in nm (Tip)	19,9	20,6	21,3	21,1	20,1
Geo Mean d in nm (EXIT)	20,9	21	21,8	20,9	20,1
# Tip /cm ³	6,87E+06	6,26E+06	6,50E+06	6,43E+06	6,45E+06
# Exit / cm ³	5,83E+06	5,11E+06	5,09E+06	4,88E+06	5,84E+06
mass Tip in µg/ m ³	77,1	72,7	82,5	79,2	72,1
mass EXIT in µg/ m ³	72,5	61,4	67,3	58	64,7
4,5 m Leitung / # Verlust in %	27,72	31,5	32,19	34,24	15,08
4,5 m Leitung / Massenverlust in %	3,55	18,47	18,65	23,4	8
Geo Mean d in nm (Tip)	19,5	20,9	21	20,3	19,7
Geo Mean d in nm (Exit)	21,9	22,5	22,6	21,7	20,5
# Tip /cm ³	6,71E+06	6,35E+06	6,43E+06	6,22E+06	6,30E+06
# Exit / cm ³	4,85E+06	4,35E+06	4,36E+06	4,09E+06	5,35E+06
mass Tip in µg/ m ³	70,4	76,9	77,2	68,8	67,5
mass EXIT in µg/ m ³	67,9	62,7	62,8	52,7	62,1
12 m Leitung / # Verlust in %	56,43	57,48	58,34	60,22	32,32
12 m Leitung / Massenverlust in %	13,67	32,37	38,22	41,55	22,54
Geo Mean d in nm (Tip)	20,3	21,1	20,7	20,5	20,1
Geo Mean d in nm (Exit)	27	25,7	24,5	24,3	21,5
# Tip /cm ³	7,39E+06	6,35E+06	6,36E+06	6,31E+06	6,25E+06
# Exit / cm ³	3,33E+06	2,70E+06	2,65E+06	2,51E+06	4,23E+06
mass Tip in µg/ m ³	87,1	79,1	74,3	72,2	71
mass EXIT in µg/ m ³	75,2	53,5	45,9	42,2	55

Die in den vorstehenden Tabellen aufgelisteten Ergebnisse sind in den folgenden Bildern 1- 18 graphisch dargestellt. Aufgetragen sind immer die Partikelanzahlverluste und die Massenverluste in Prozent und zwar über dem Durchmesser oder über der Leitungslänge.

In Bild 15 und 16 ist die Problematik der Partikelmessung wunderschön zu erkennen. Betrachtet man die prozentualen Änderungen bei Erhöhung der Partikelanzahlkonzentration, so erkennt man das gegenläufige Verhalten für Anzahlverluste und Massenverluste.

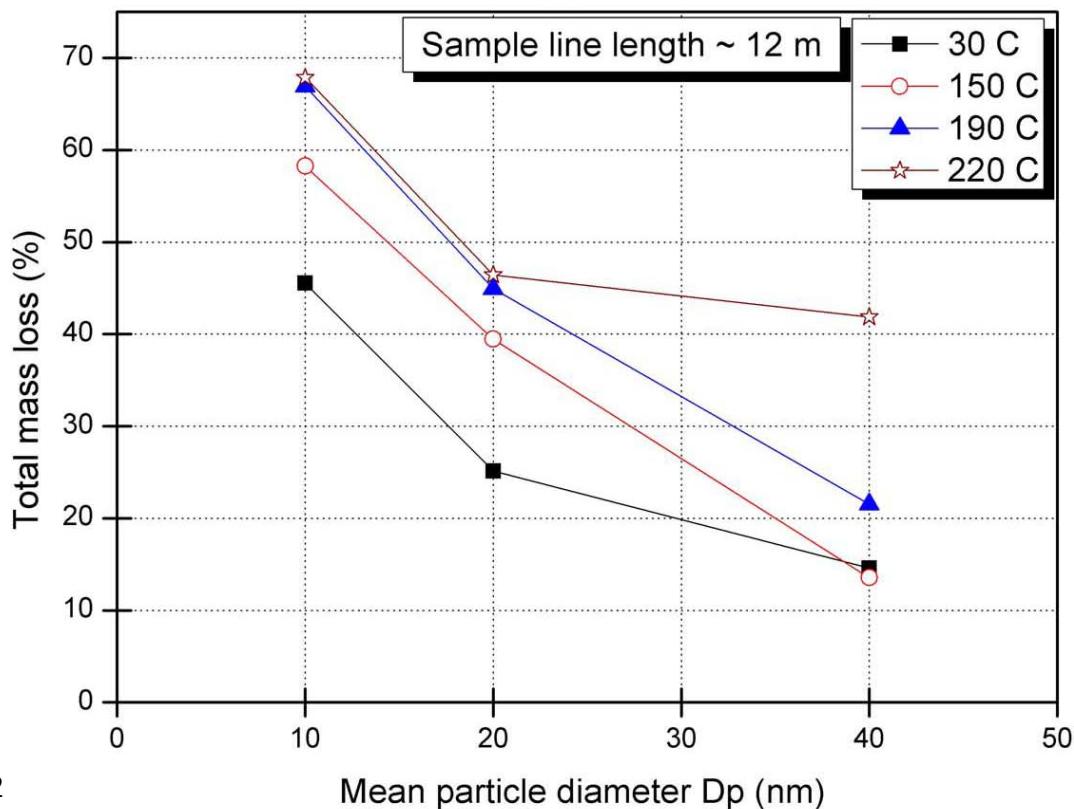
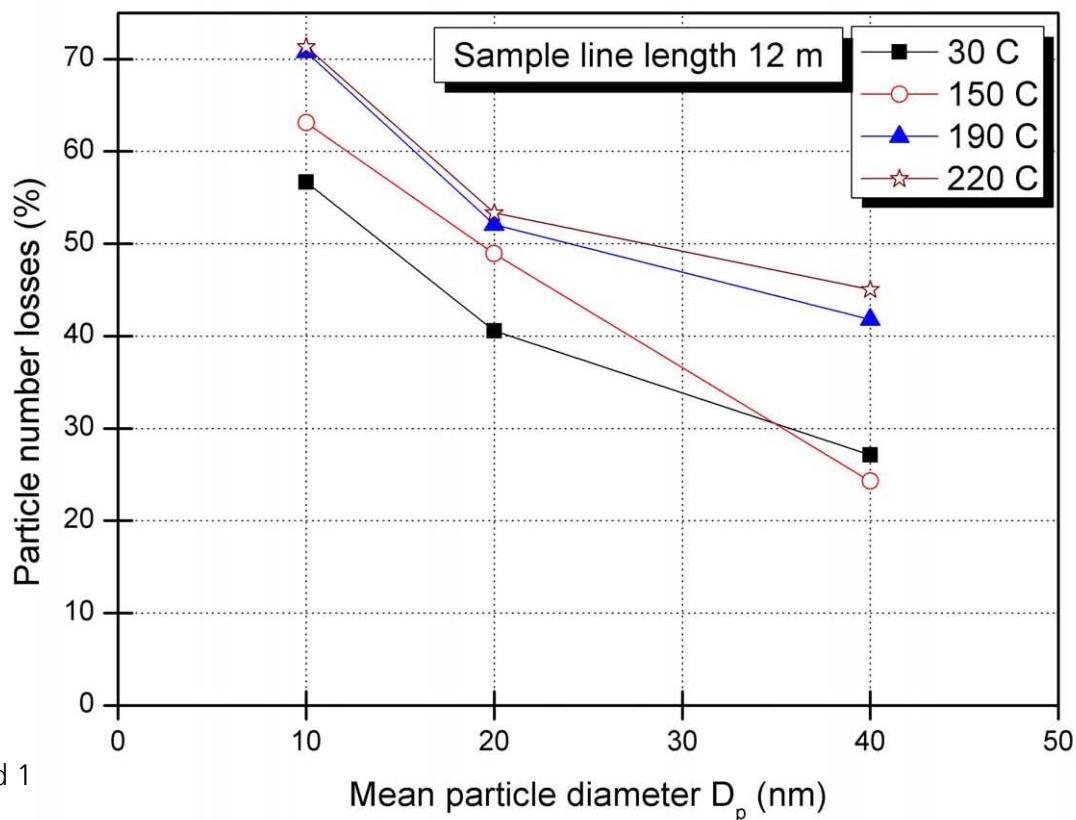
a) prozentuale Anzahlverluste

Erhöhung der Anzahlkonzentration führt zu mehr Wandstößen und vor allem zu vermehrter Agglomeration. Dadurch nehmen die prozentualen Partikelanzahlverluste bei Erhöhung der Anzahlkonzentration zu.

b) prozentuale Massenverluste

Die agglomerierten Teilchen sind größer, diffundieren somit langsamer und stoßen deshalb weniger häufig mit der Wand. Die Agglomeration führt **nicht** zur Massenabnahme in der Gasphase. Nur Wandstöße führen zu Masseverlusten. Deshalb nehmen die prozentualen Massenverluste mit zunehmender Anzahlkonzentration ab!

Alle anderen Bilder sind selbsterklärend.



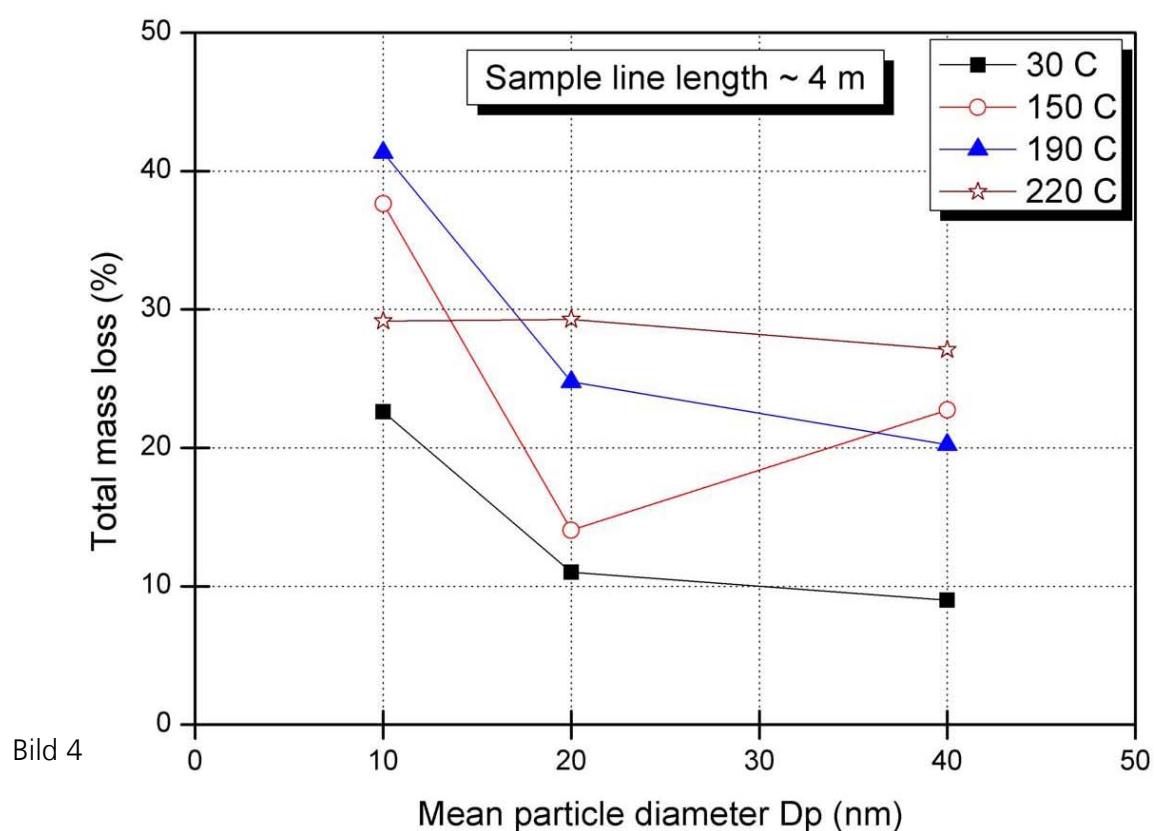
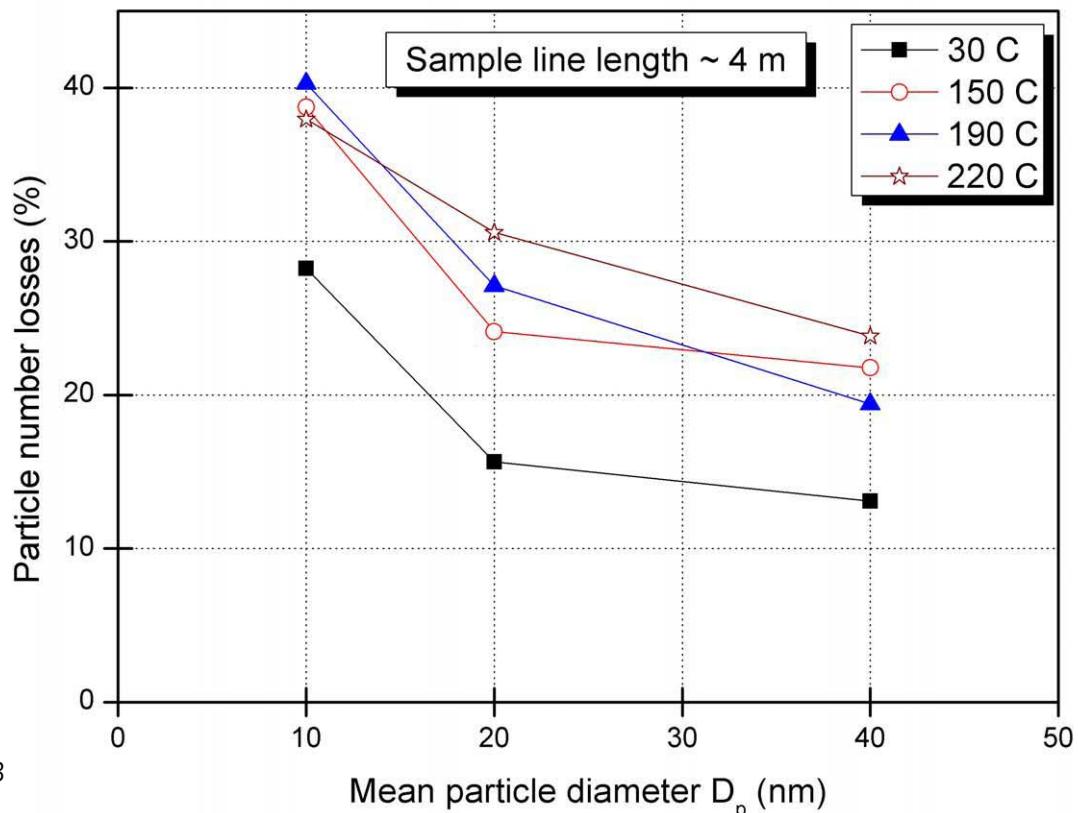


Bild 5

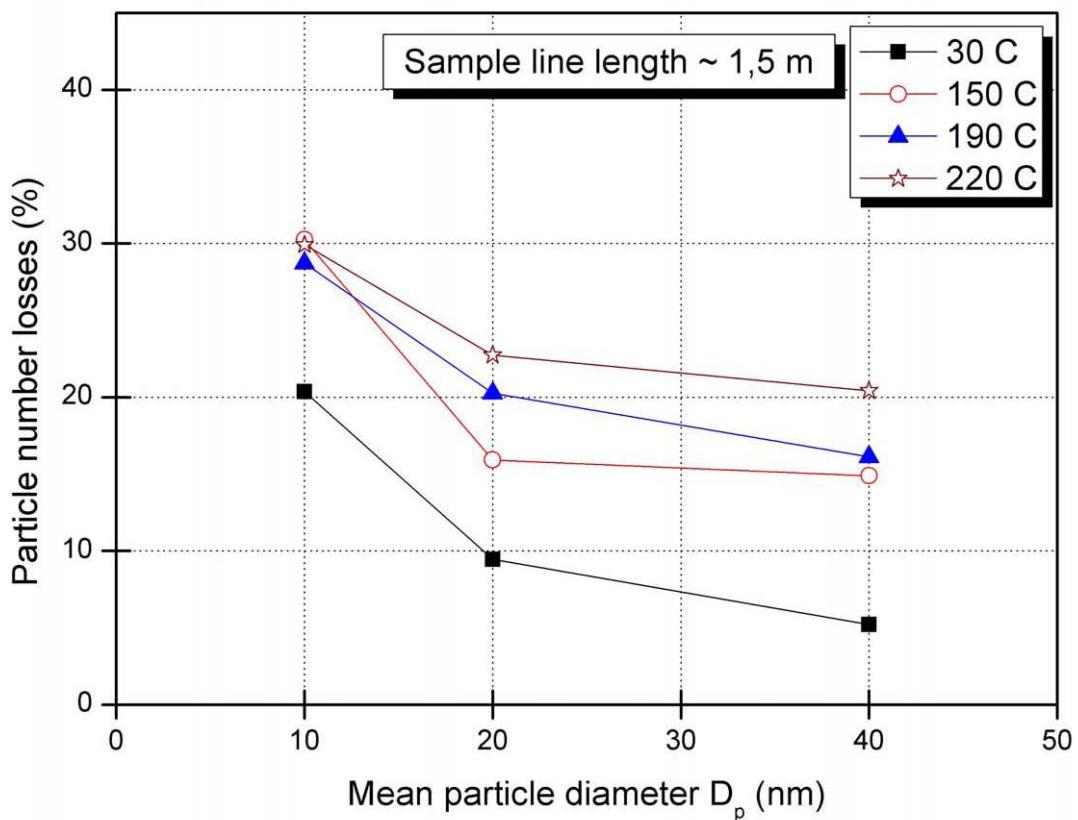
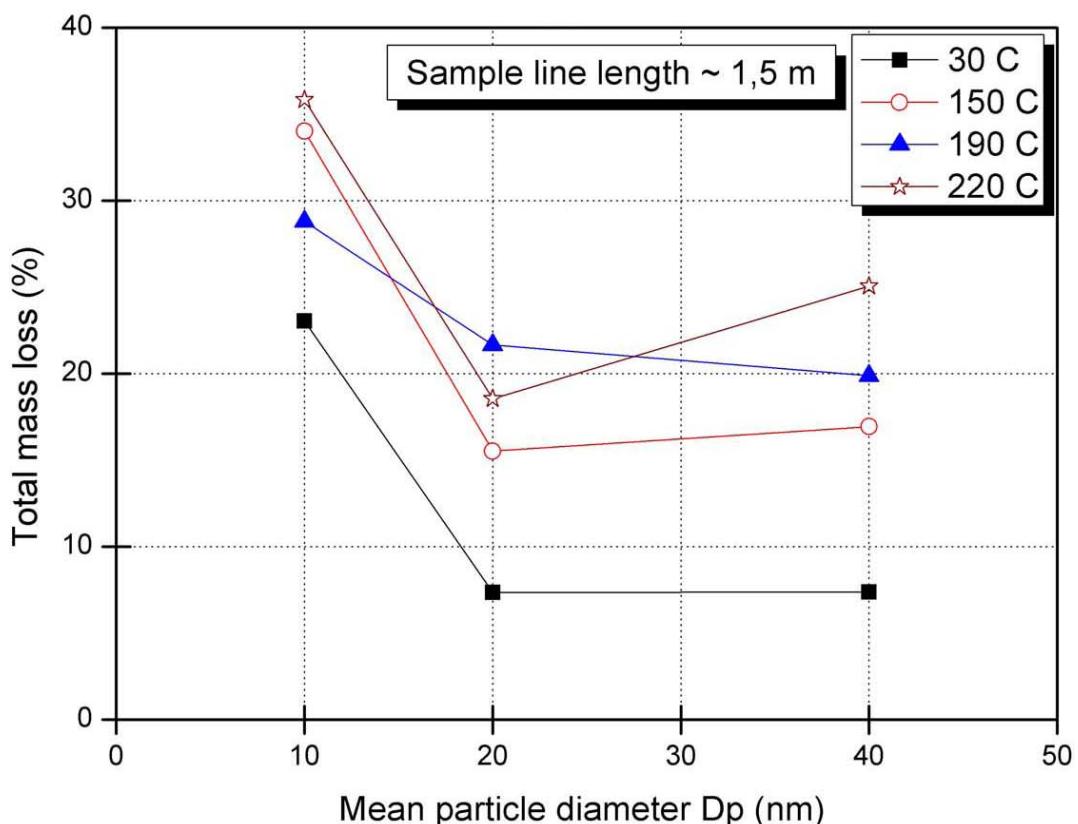


Bild 6



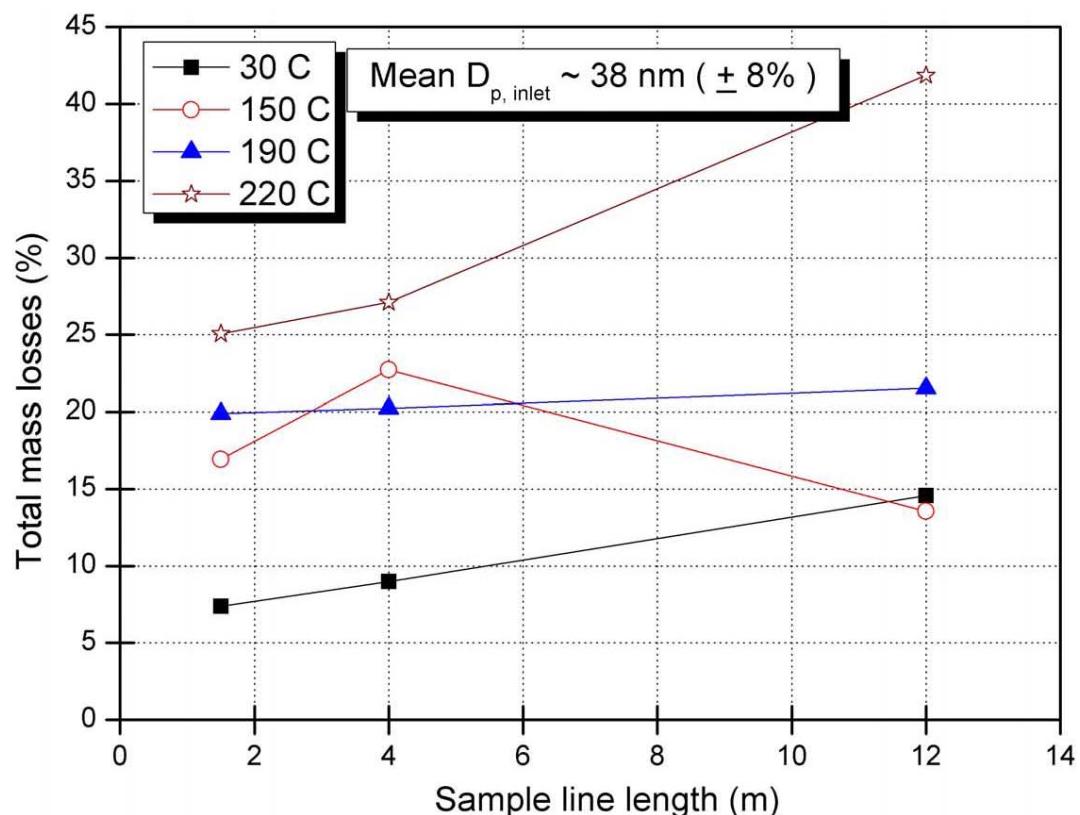
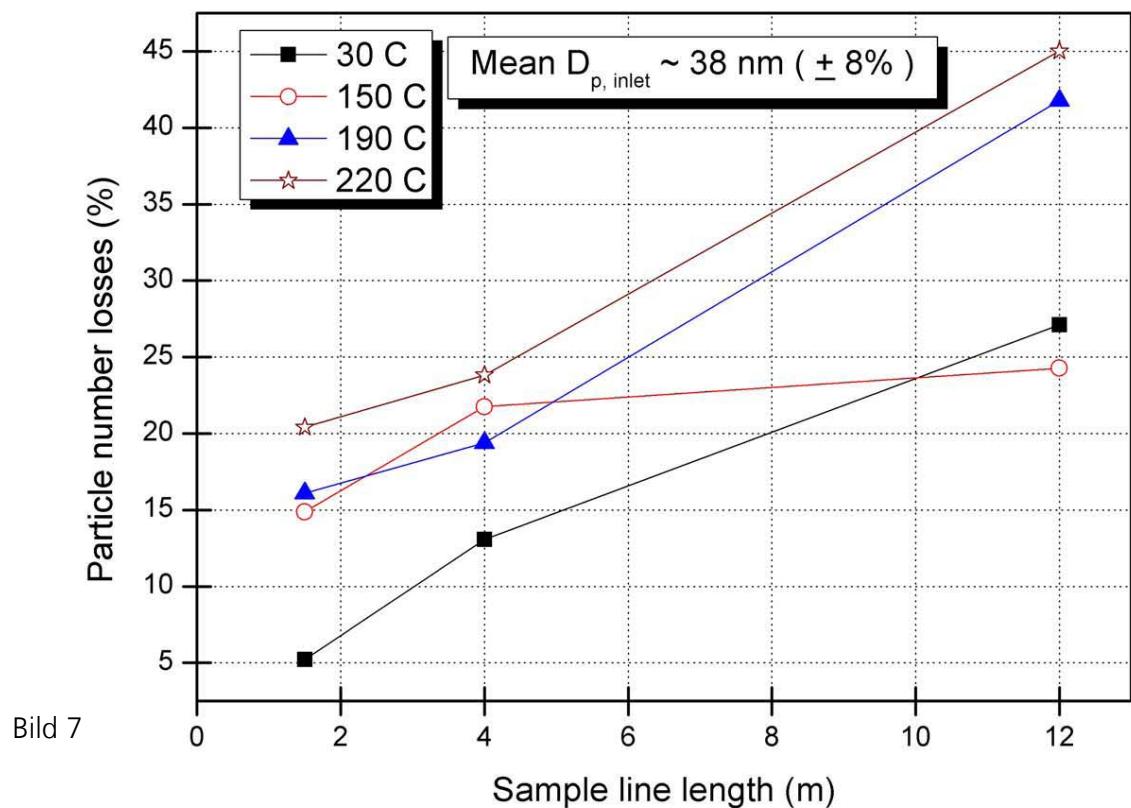
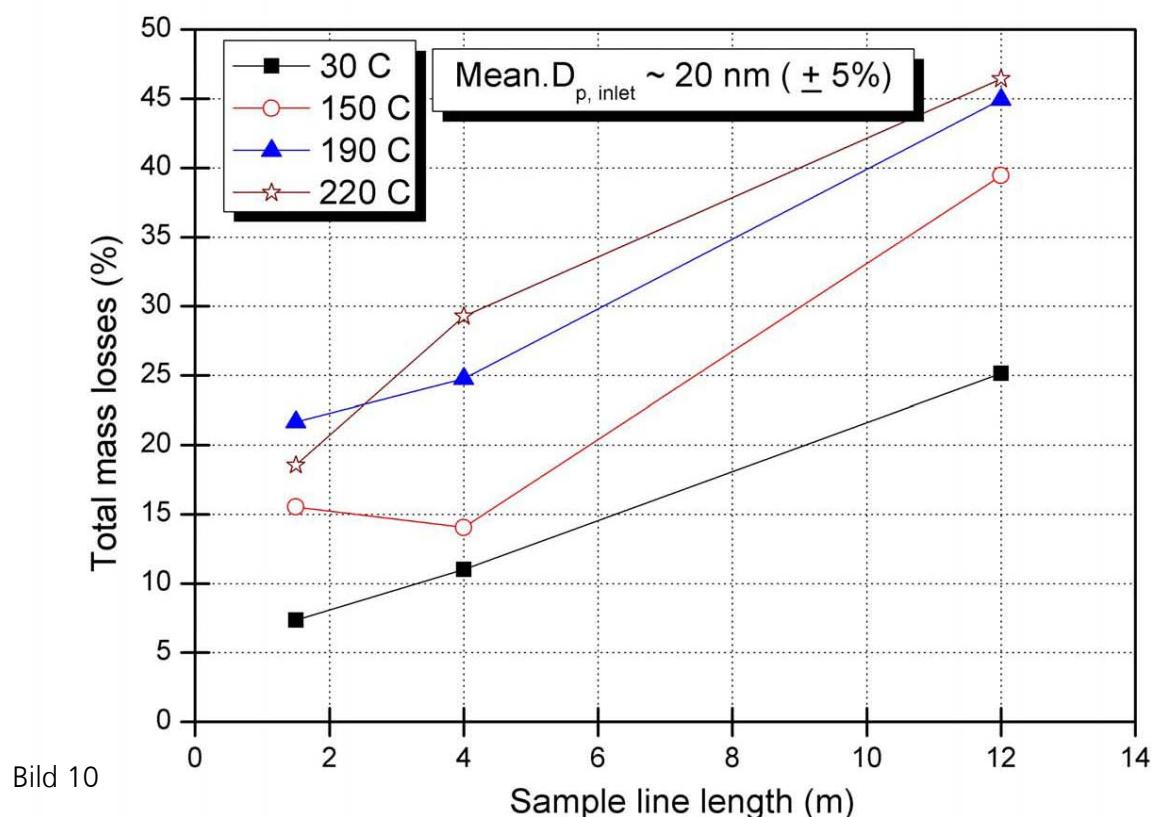
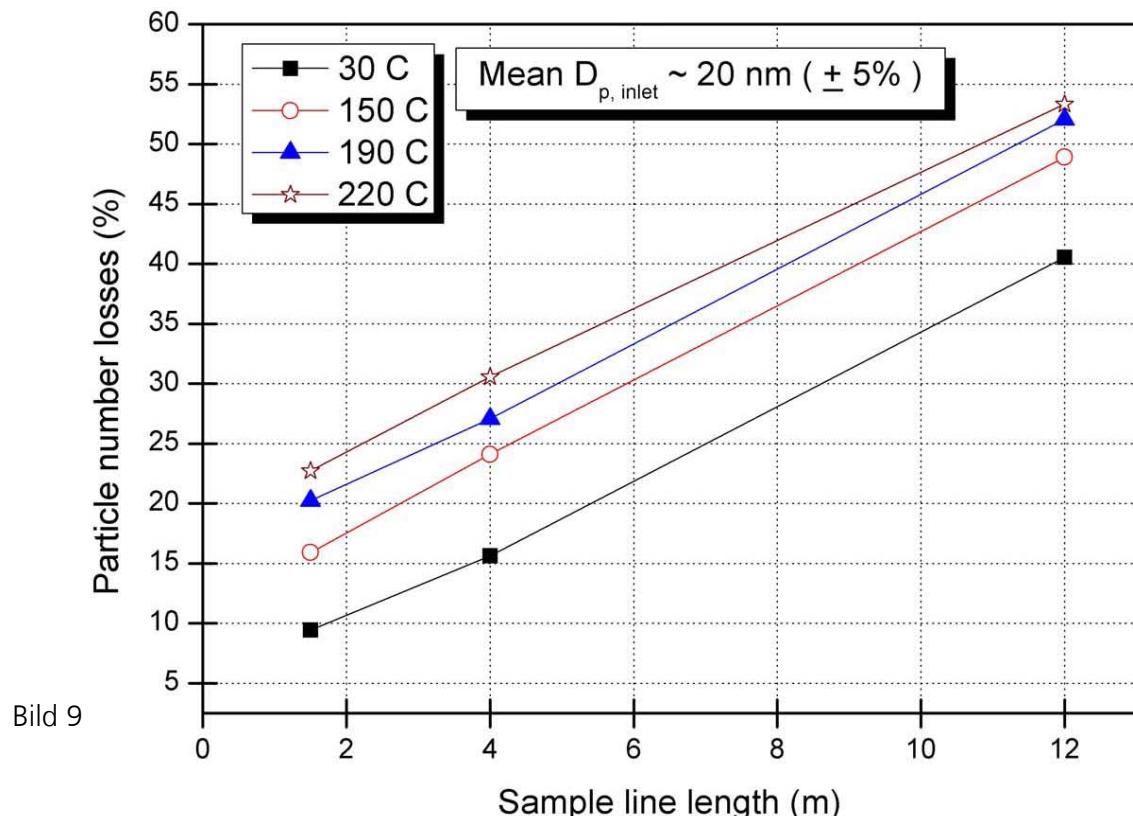


Bild 8



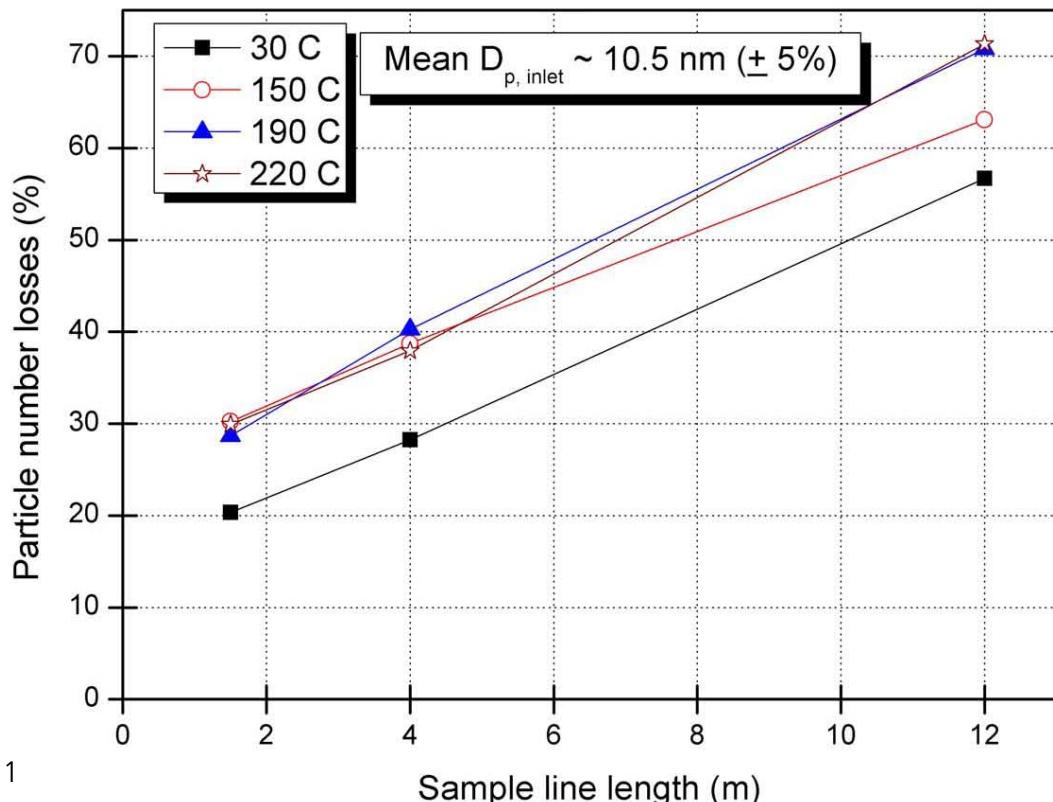


Bild 11

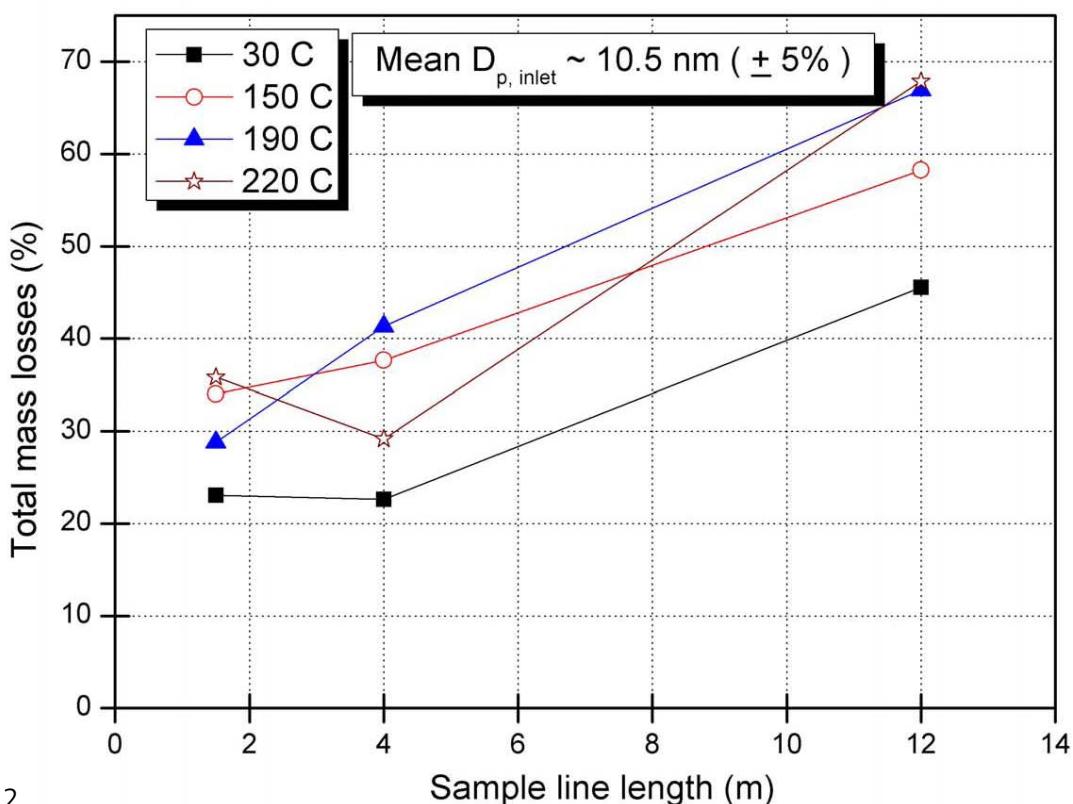


Bild 12

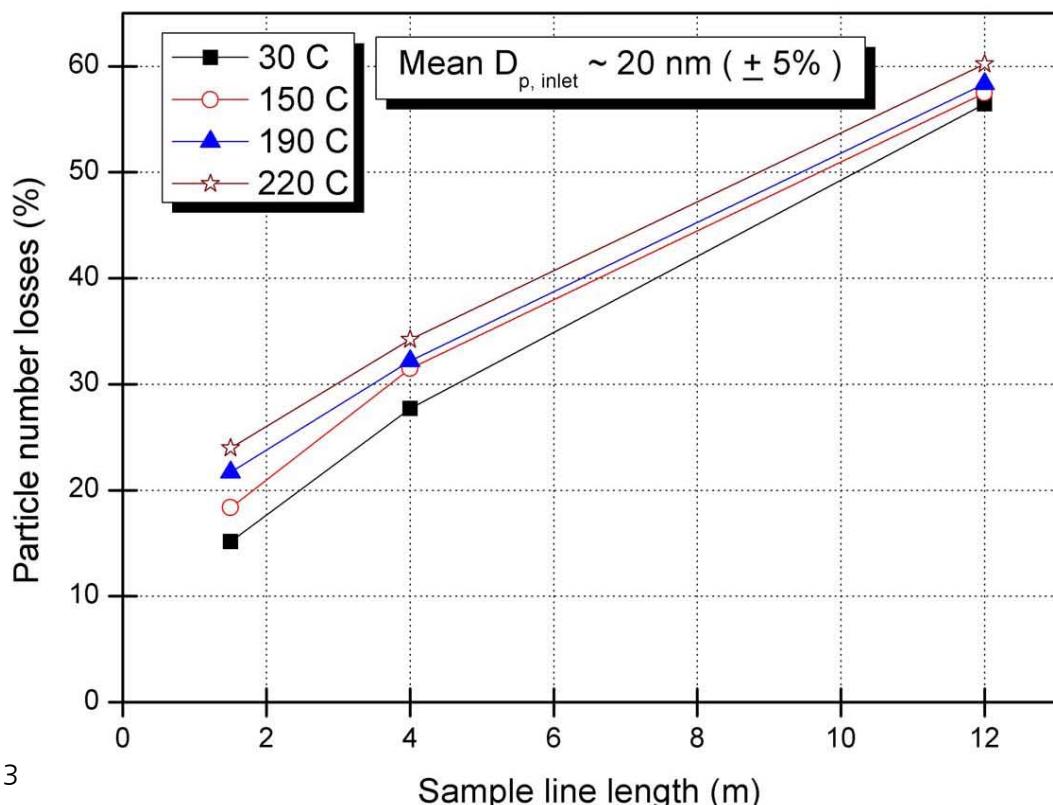


Bild 13

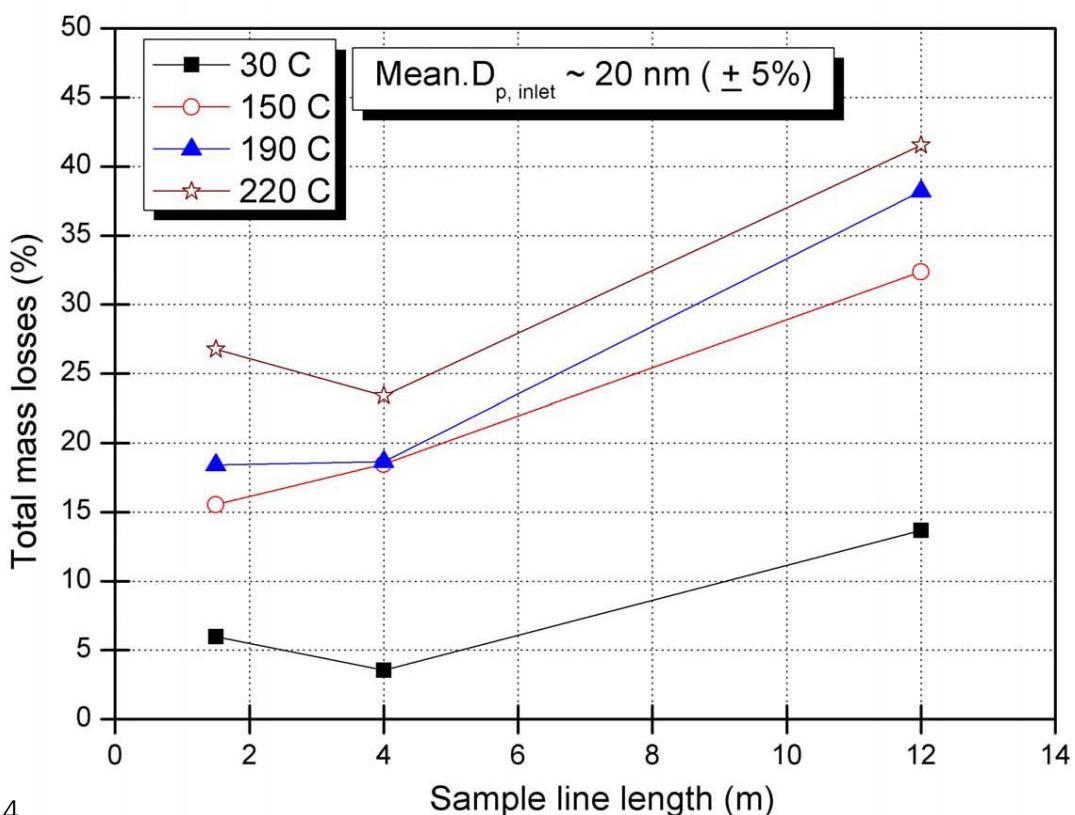


Bild 14

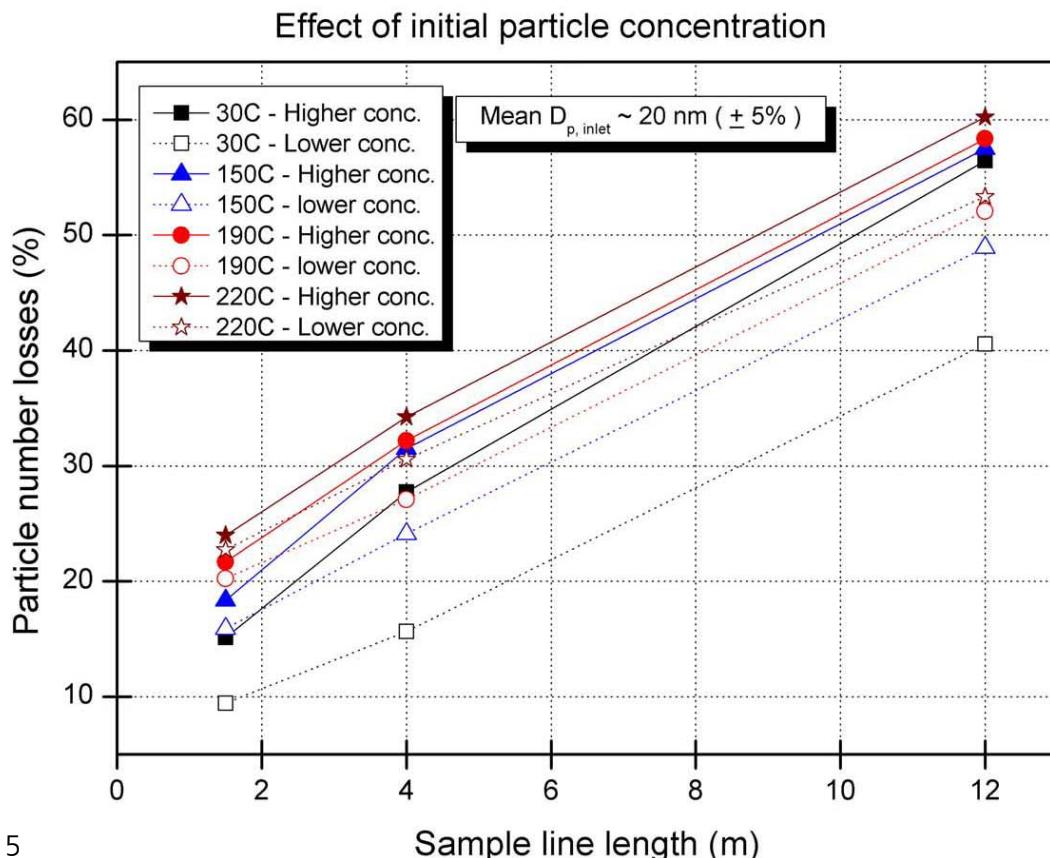


Bild 15

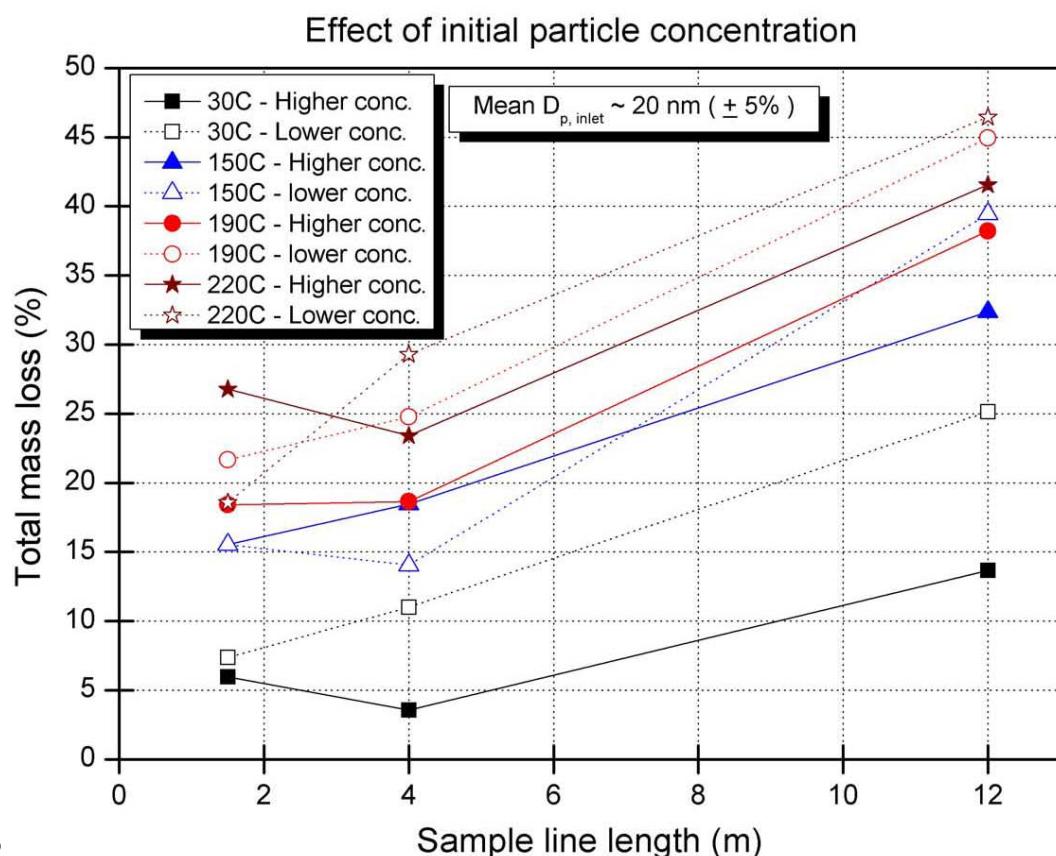
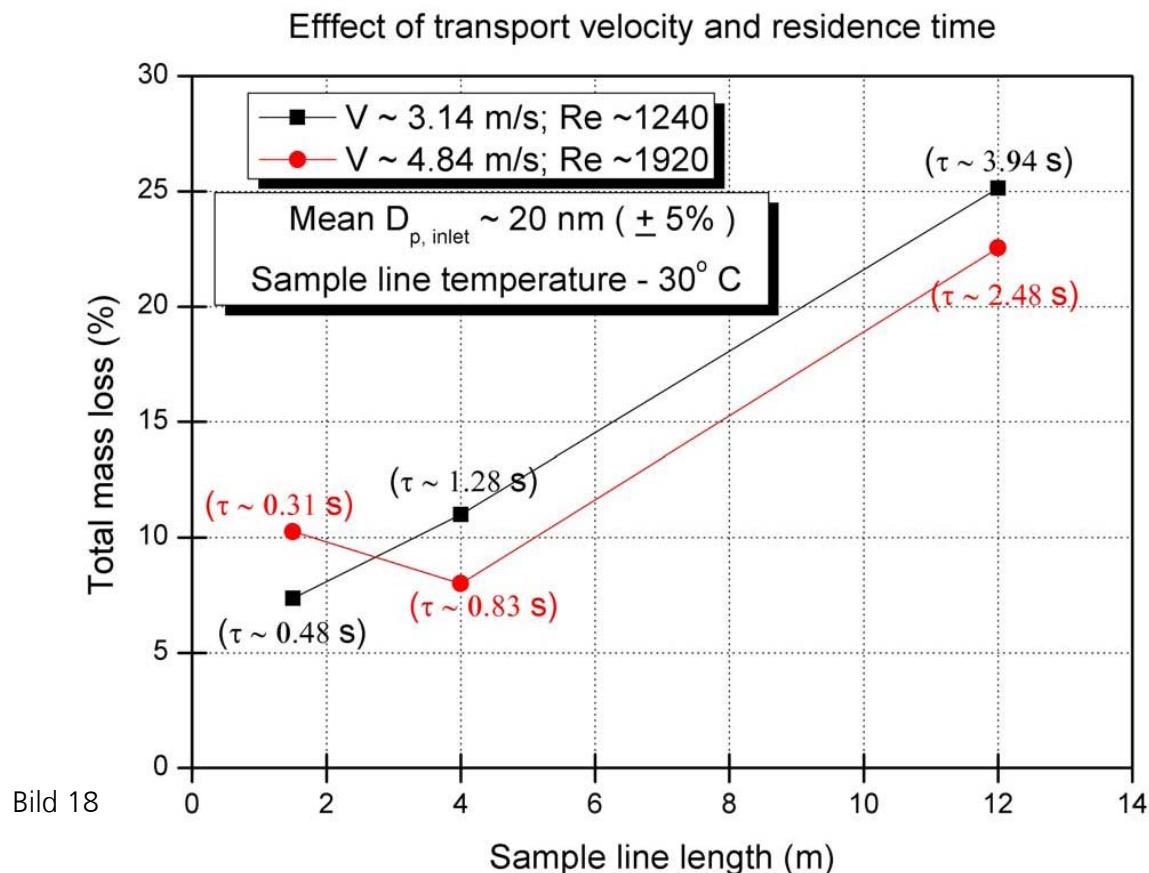
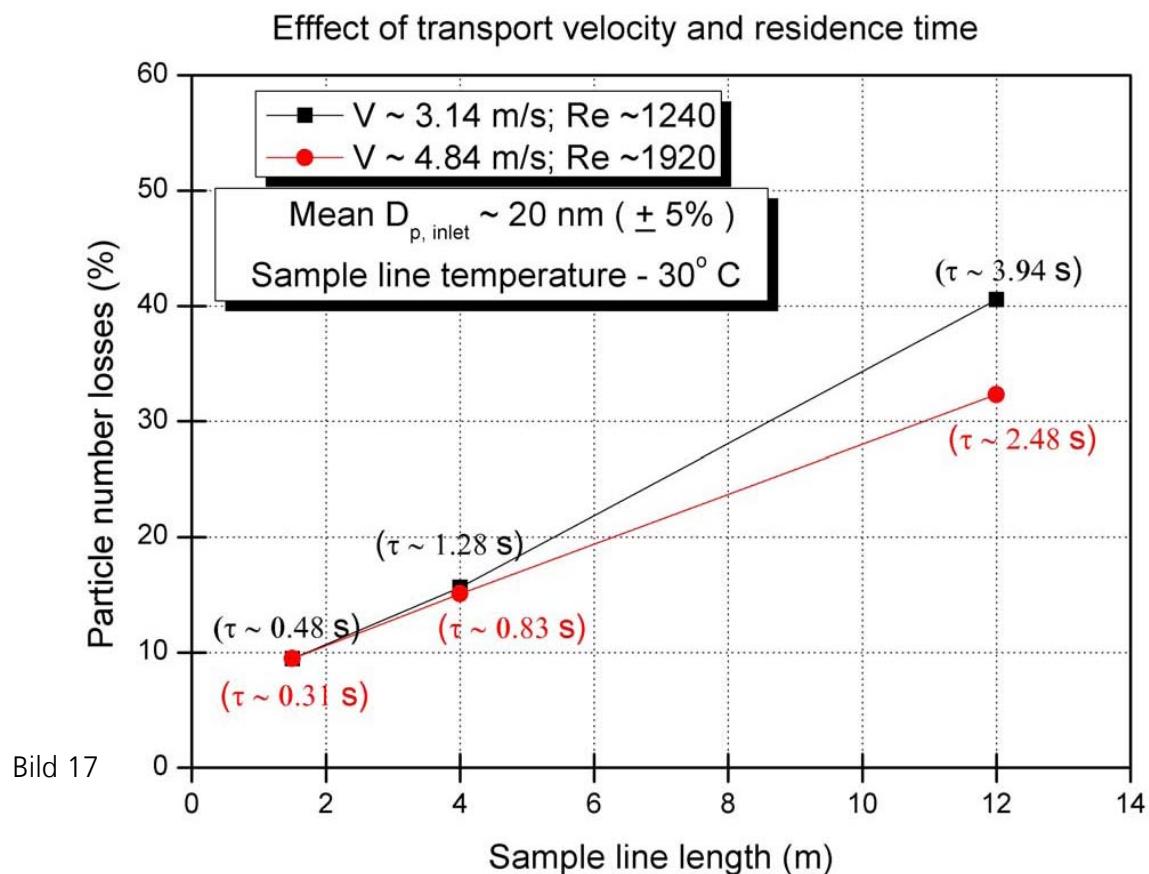


Bild 16



Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt klar den extremen Einfluß von Leitungslänge, Temperatur, Verweilzeit, Konzentration und Partikeldurchmesser auf die Partikel- und Masseverluste bei der Probenahme. Diese Verluste treten natürlich bei den derzeitig üblichen Smoke Number Messungen ebenso auf!

Bei Messungen an realen Brennkammern und Triebwerken lassen sich Leitungslängen von 10m bis 15m oft nicht vermeiden. Um Russ- und Partikelmessungen wirklich vergleichen zu können, sollten daher bei künftigen Messvorschriften die Probenahmebedingungen exakt vorgeschrieben werden.

Insbesondere sollten für folgende Parameter **feste** Werte vorgegeben werden die dann zusammen mit den gemessenen Partikelmassen und Anzahlkonzentrationen angegeben werden müssen:

- 1) Leitungslänge 5 / 10 / 15 / 20m
- 2) Leitungsmaterial Edelstahl (Teflonleitungen laden sich statisch auf und scheiden dadurch Partikel ab)
- 3) Temperatur 191°C (wird in der Automobilindustrie für Dieselabgasmessungen verwendet)
- 4) Verweilzeit oder Strömungsgeschwindigkeit

Ob eine Verdünnung bereits an der Probenahmesonde erfolgen sollte ist zumindest diskussionswürdig.