

Hochschule  
München  
University of  
Applied Sciences

Fakultät 03  
Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik

# DOE-D - Design of Experiments

Erforschung des Einflusses relevanter  
Kaffeebezugsparameter auf die Entstehung der  
Crema bei Siebträger-Espressomaschinen

Felix Kistler  
27.01.23



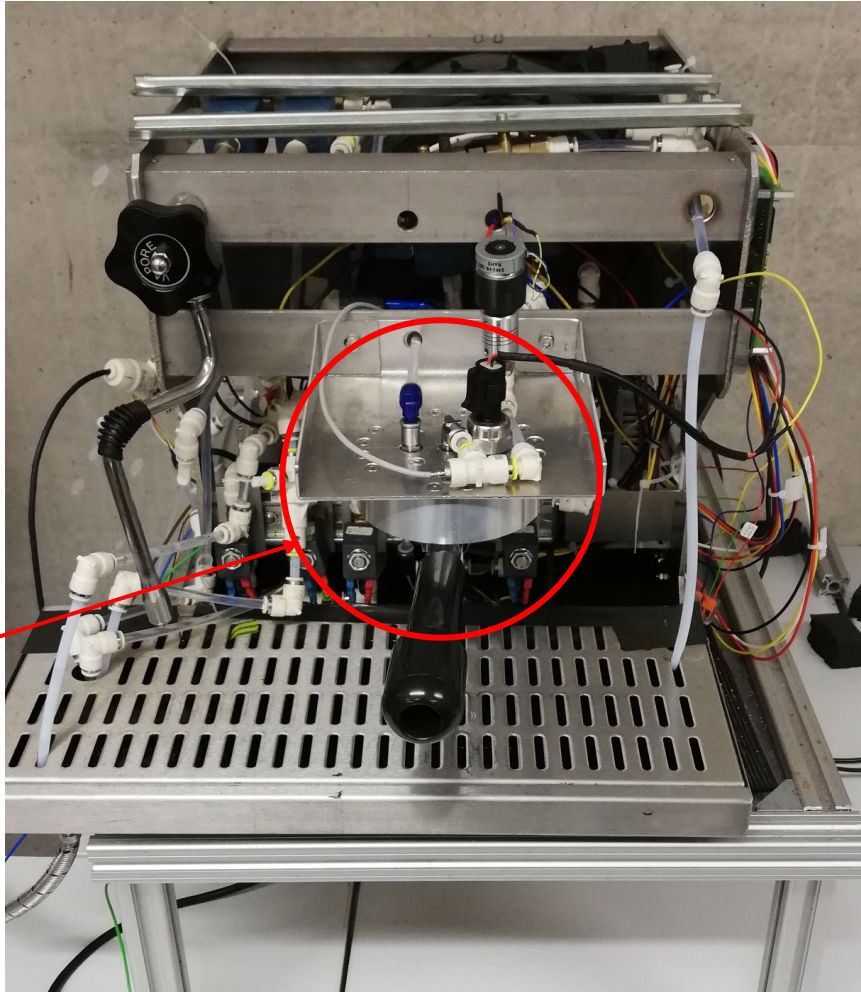
# Ausgangssituation

## Ideale Parameter für einen Espresso

Parameter	Einfacher Espresso	Doppelter Espresso	
• Input-Menge Kaffeepulver:	7 – 9 g	14 – 18 g	[1]
• Output-Menge Espresso:	14 – 22,5 ml	28 – 45 ml	
• Verhältnis Kaffeepulver/Wasser:	1:2 oder 1:2,5	1:2 oder 1:2,5	
• Brühtemperatur:	88 – 93 °C		
• Brühdruck:	8 – 11 bar		
• Extraktionsdauer:	20 – 30 s		[2]
• Extraktionsrate:	18 – 22 %		
• Tamperdruck:	12 – 20 kg		

# Ausgangssituation

Labortechnische Espressoemaschine, Kaffeemühle und Kaffeesorte



Brühgruppe  
m. Siebträger

Prototyp der labortechnischen Espressoemaschine



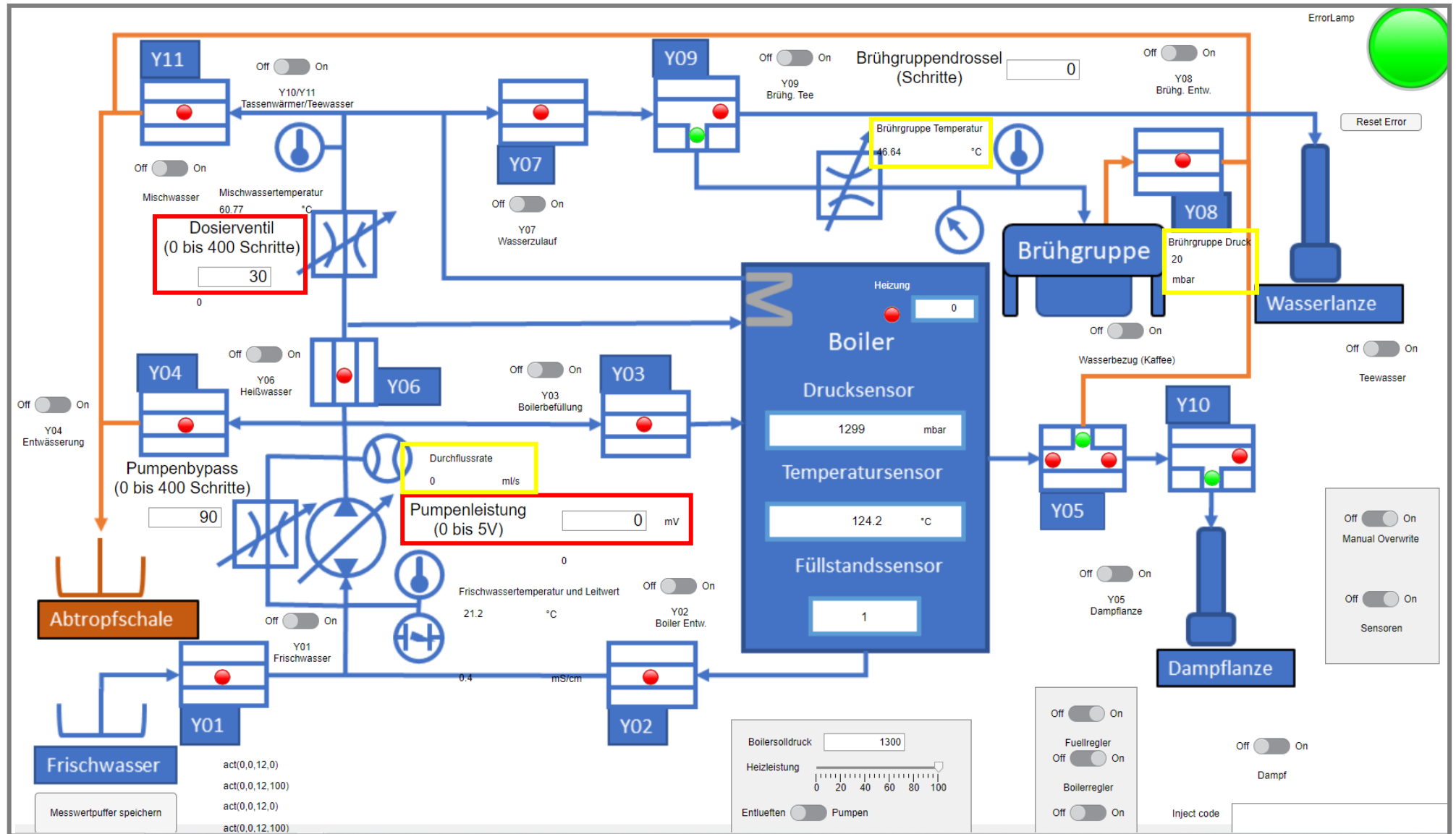
Kaffeemühle



Verwendete Kaffeesorte

# Ausgangssituation

## Grafische Benutzeroberfläche der Maschine in MATLAB



Steuergrößen

Zielgrößen



# Ausgangssituation

## Regelbare Kaffeebezugparameter innerhalb der Maschine

### Brühtemperatur [°C]:

- Kaltes Frischwasser wird innerhalb des Boilers auf 125 °C erhitzt
- Heißwasser aus dem Boiler wird über ein elektronisches Dosierventil mit kaltem Frischwasser vermischt
- Mischverhältnis von Heiß- und Kaltwasser bestimmt Brühtemperatur

➡ Steuerbar über Stellung des Dosierventils

### Brühdruck [mbar]:

- Brühdruck ergibt sich über die Pumpenleistung sowie über den Widerstand des Kaffeemehls im Siebträger [4]

➡ Steuerbar über Menge des Kaffeemehls, Mahlgrad und Tamperdruck

### Flowrate/Durchflussrate [ml/s]:

- Flowrate ergibt sich über den erzeugten Volumenstrom der Pumpe sowie über den Widerstand des Kaffeemehls

➡ Steuerbar über die Pumpenleistung

# Versuchsplanung

## Größen für die Brühgruppenversuche

### Übersicht

Störgrößen	Steuergrößen	Zielgrößen
Art der Kaffeeröstung/-mischung	Mahlgrad Kaffee	Brühdruck [bar]
Wasserqualität (Härte, pH-Wert)	Tamperdruck [kg]	Brühtemperatur [°C]
	Kaffeemenge IN [g]	Flowrate [ml/s]
	Extraktionsdauer [s]	Espressomenge OUT [ml]
	Pumpenleistung [mV]	Höhe der Crema [mm]
	Stellung des Dosierventils [Schritte]	

### Zielsetzung der Versuche

1. Evaluation des Einflusses von Pumpenleistung und Dosierventilstellung auf Brühdruck, Brühtemperatur und Flowrate
2. Evaluation des Einflusses von auf Brühdruck, Brühtemperatur und Flowrate auf Höhe der entstehenden Crema

# Versuchsplanung

## Übersicht der konstanten und nicht-konstanten Steuergrößen

### Konstante Steuergrößen:

1. Kaffeesorte = Tchibo Espresso
2. Mahlgrad = Stufe 3
3. Tamperdruck = 12 kg
4. Kaffeemenge IN = 17,5 g
5. Extraktionsdauer = 25 s

### Zu variierende Steuergrößen:

- Faktor 1 ( $k_1$ ):
- Pumpensteuerspannung = 2250 +/- 250 mV
- Faktor 2 ( $k_2$ ):
- Stellung Dosierventil = 40 +/- 10 Schritte

### Ideale Mittelwerte für Zielgrößen:

1. Brühtemperatur = Ø 90,5 °C
2. Brühdruck = Ø 9,5 bar
3. Durchflussmenge = Ø 1,5 ml/s
4. Espressomenge OUT: Ø 35 – 44 g
5. Höhe der Crema: Ø 10 % des Espressovolumens [4]



# Versuchsplanung

## Definition von Faktorstufenkombinationen und Realisierungen

### Anzahl Faktorstufenkombinationen

$$m = x^k \quad [5]$$

Mit  $m$  = Anzahl Faktorstufenkombinationen  
 $k$  = Anzahl Faktoren  
 $x$  = Anzahl Faktorstufen

→  $m = 3^2$   
 $m = 9$

### Anzahl Realisierungen je Faktorstufenkombinationen

$$n = \frac{N}{m} \quad [5]$$

Mit  $m$  = Anzahl Faktorstufenkombinationen  
 $n$  = Anzahl Realisierungen  
 $N$  = Anzahl Einzelversuche

→  $3 = \frac{N}{9}$   
 $N = 27$



# Versuchsplanung

## Blockbildung und Randomisierung der Einzelversuche

Liste der systematischen Einzelversuche je Block

Syst. Nr.	Block	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil-Stellung [Schritte]
1	1	2000	30
2	1	2250	30
3	1	2500	30
4	1	2000	40
5	1	2250	40
6	1	2500	40
7	1	2000	50
8	1	2250	50
9	1	2500	50



Liste der randomisierten Einzelversuche je Block

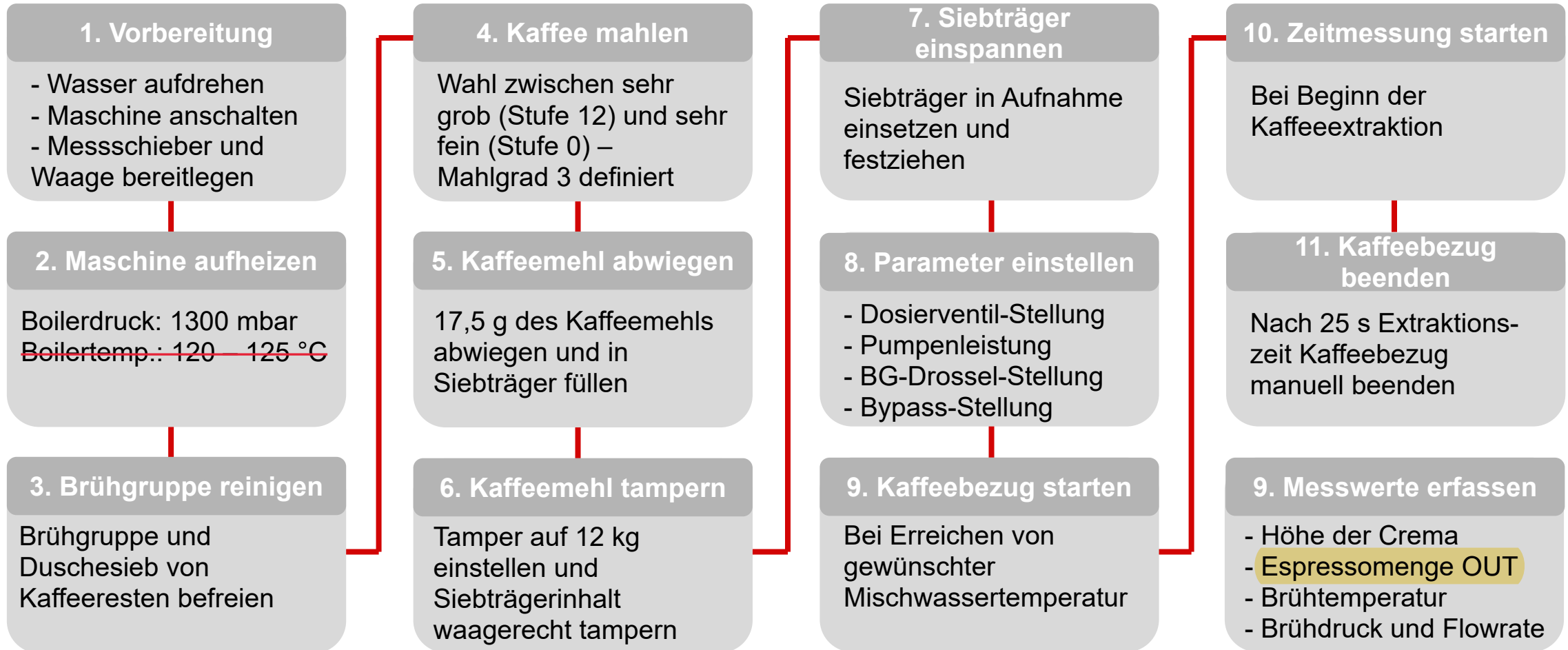
Vers. Nr.	Syst. Nr.	Block	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil-Stellung [Schritte]
1	5	1	2250	40
2	8	1	2250	50
3	2	1	2250	30
4	3	1	2500	30
5	7	1	2000	50
6	1	1	2000	30
7	9	1	2500	50
8	6	1	2500	40
9	4	1	2000	40

[5]

# Versuchsplanung

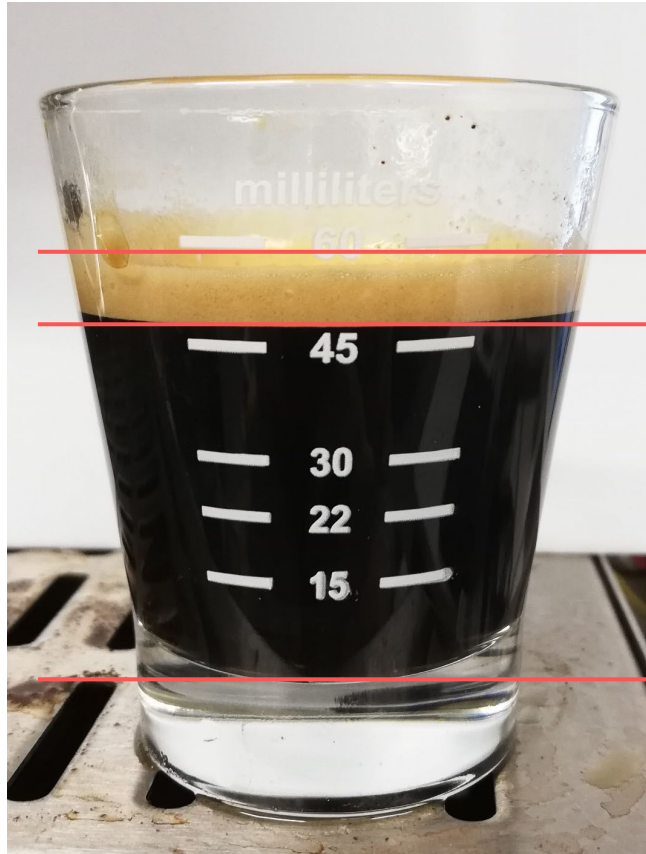
## Versuchsablauf

### Durchführung der Versuche



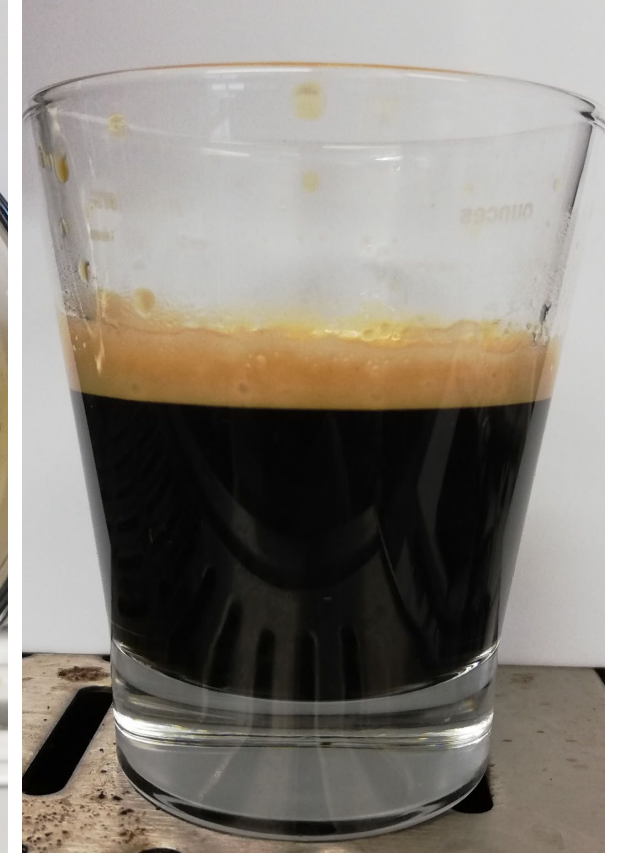
# Auswertung

## Zu messende Zielgrößen



Höhe der Crema [mm]

Espressomenge OUT [g]



Verlauf von Brühtemperatur in °C, Brühdruck in mbar und Flowrate in ml/s über Zeit des Kaffeebezugs in Sekunden

# Auswertung

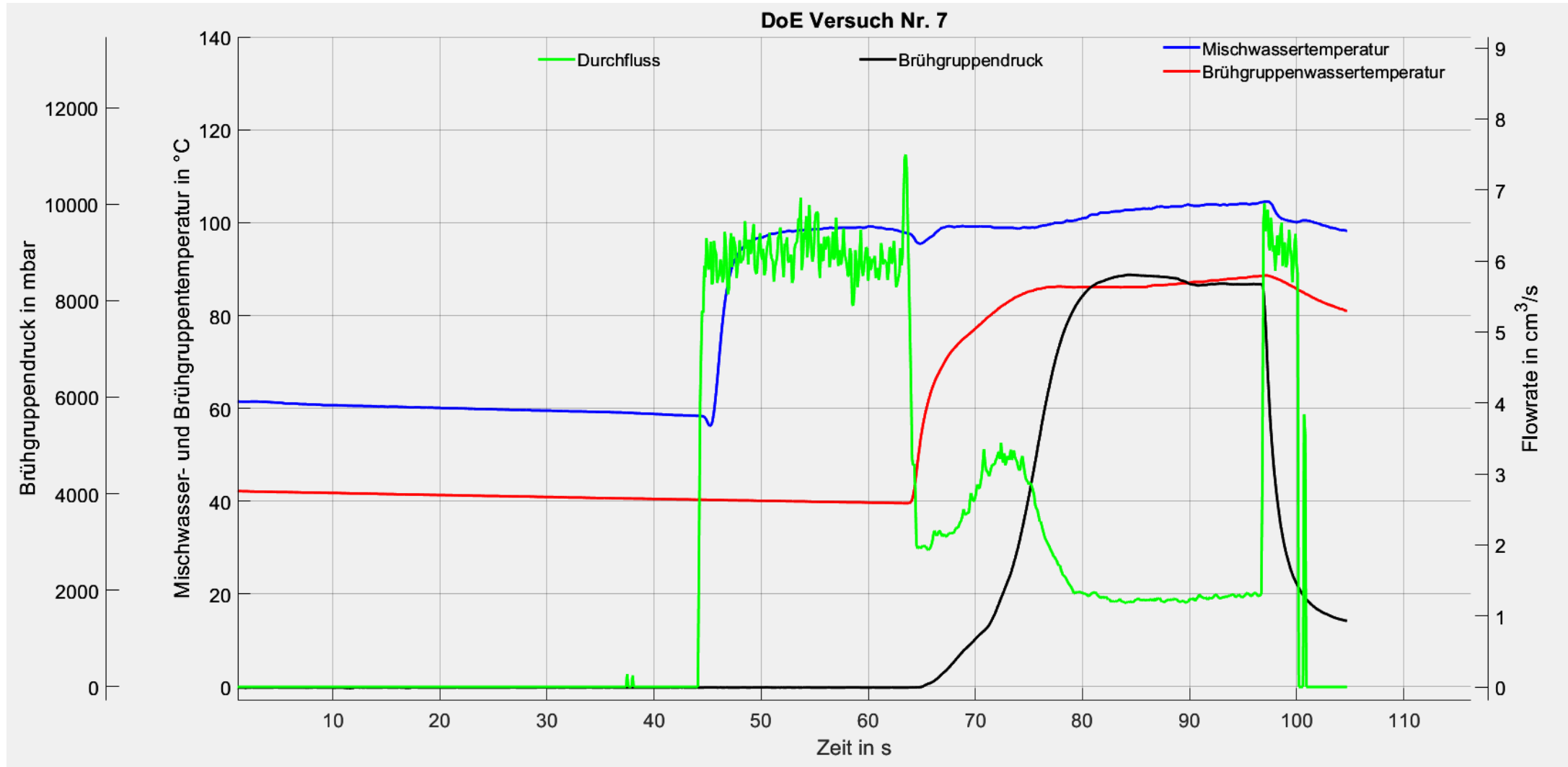
## Übersicht der Ergebnisse

Syst. Nr.	Pumpenleistung	Dosierventil	Espresso OUT			Mittel $\bar{y}_1$	Varianz	Standardabweichung
	[mV]	[Schritte]		[g]		[g]	[g]	[g]
1	2000	30	34,5	41,0	38,6	38,0	10,80	3,29
2	2250	30	49,1	30,3	36,2	38,5	92,44	9,61
3	2500	30	45,3	39,8	37,1	40,7	17,46	4,18
4	2000	40	37,9	34,3	42,0	38,1	14,84	3,85
5	2250	40	53,0	35,6	37,5	42,0	91,10	9,54
6	2500	40	42,2	45,1	45,2	44,2	2,90	1,70
7	2000	50	43,1	35,4	37,2	38,6	16,22	4,03
8	2250	50	47,7	39,8	36,8	41,4	31,70	5,63
9	2500	50	35,1	42,6	41,4	39,7	16,23	4,03

Syst. Nr.	Pumpenleistung	Dosierventil	Höhe Crema			Mittel $\bar{y}_2$	Varianz	Standardabweichung
	[mV]	[Schritte]		[mm]		[mm]	[mm]	[mm]
1	2000	30	2,0	3,3	3,3	2,9	0,56	0,75
2	2250	30	4,9	4,0	4,8	4,6	0,24	0,49
3	2500	30	5,3	5,4	4,6	5,1	0,19	0,44
4	2000	40	3,3	3,1	3,7	3,4	0,09	0,31
5	2250	40	4,4	4,4	4,1	4,3	0,03	0,17
6	2500	40	5,0	5,5	5,0	5,2	0,08	0,29
7	2000	50	1,2	3,5	3,3	2,7	1,62	1,27
8	2250	50	4,1	3,0	4,2	3,8	0,44	0,67
9	2500	50	5,7	5,4	5,5	5,5	0,02	0,15

# Auswertung

## Verlauf von Brühtemperatur, Brühdruck und Flowrate über Extraktionszeit



# Auswertung

## Effekt von Pumpenleistung und Dosierventilstellung auf die Ergebnisse

### Espressomenge OUT

Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_1$ [g]
1	2000	30	38,0
3	2500	30	40,7
4	2000	40	38,1
6	2500	40	44,2
7	2000	50	38,6
9	2500	50	39,7
<b>Effekt der Pumpenleistung</b>			<b>3,31</b>

Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_1$ [g]
1	2000	30	38,0
7	2000	50	38,6
2	2250	30	38,5
8	2250	50	41,4
3	2500	30	40,7
9	2500	50	39,7
<b>Effekt der Dosierventilstellung</b>			<b>0,80</b>

[5]

### Höhe der Crema

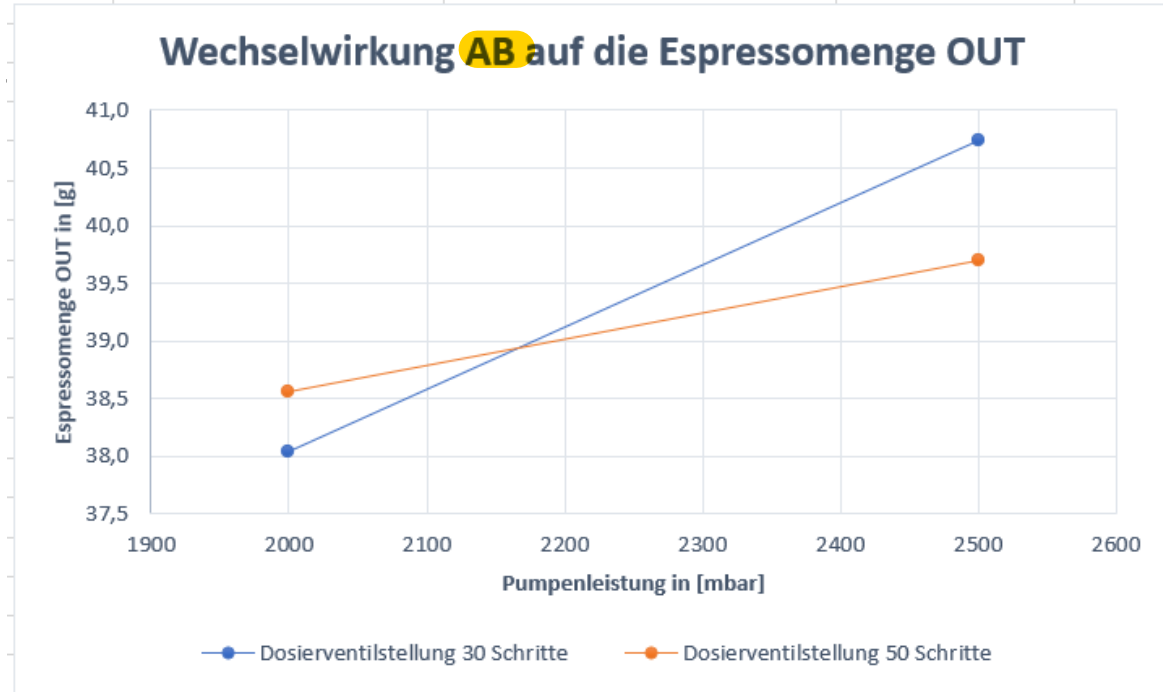
Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_2$ [mm]
1	2000	30	2,9
3	2500	30	5,1
4	2000	40	3,4
6	2500	40	5,2
7	2000	50	2,7
9	2500	50	5,5
<b>Effekt der Pumpenleistung</b>			<b>2,30</b>

Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_2$ [mm]
1	2000	30	2,9
7	2000	50	2,7
2	2250	30	4,6
8	2250	50	3,8
3	2500	30	5,1
9	2500	50	5,5
<b>Effekt der Dosierventilstellung</b>			<b>-0,19</b>

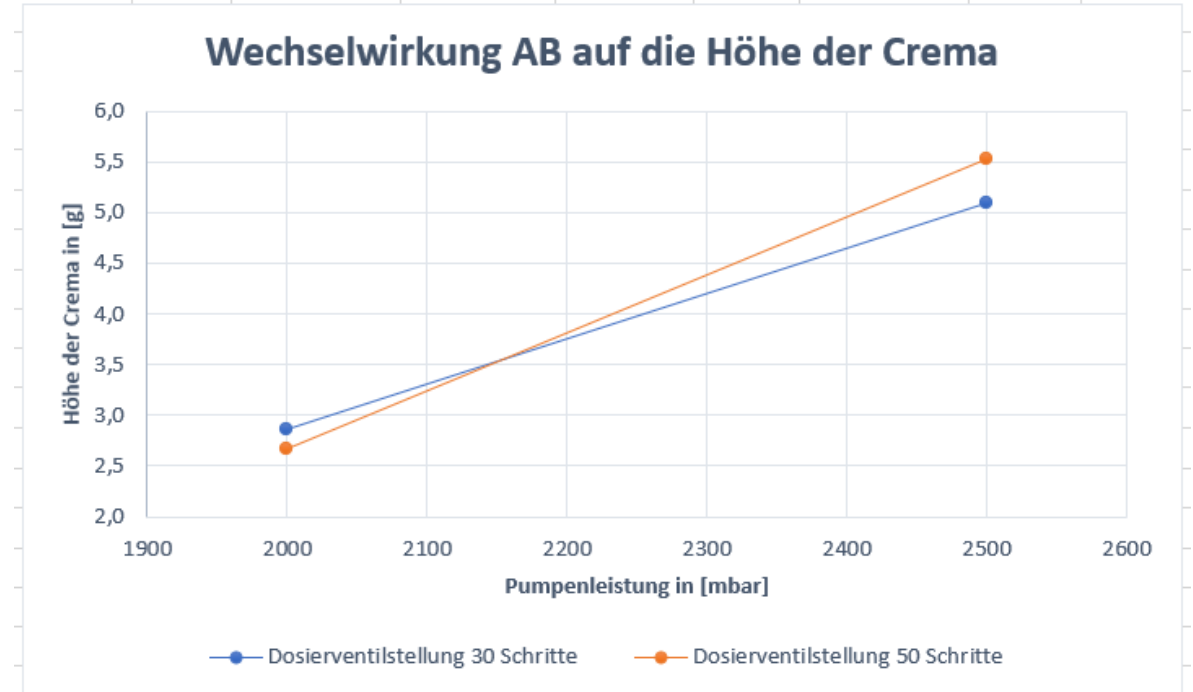
[5]

# Auswertung

## Wechselwirkung zwischen Pumpenleistung und Stellung des Dosierventils



Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_1$ [g]
1	2000	30	38,0
3	2500	30	40,7
7	2000	50	38,6
9	2500	50	39,7



Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Mittel $\bar{y}_2$ [mm]
1	2000	30	2,9
3	2500	30	5,1
7	2000	50	2,7
9	2500	50	5,5

# Auswertung

## Signifikanz der Ergebnisse

### Signifikanz der Pumpenleistung auf Espressomenge OUT [g]

n	N	Syst. Nr.	Pumpenleistung	Dosierventil	Espresso OUT			Mittel $\bar{y}_1$	Varianz $s^2$
			[mV]	[Schritte]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
3	6	1	2000	30	34,5	41,0	38,6	38,0	10,80
		3	2500	30	45,3	39,8	37,1	40,7	17,46

Schätzwert $\bar{d}$	Standardabweichung $s^2$	Standard error $sd$	Freiheitsgrad $f$
[g]			
2,7	14,13	11,54	4,00

Vertrauensniveau	95%		99%		99,90%		
t-Wert für $f = 4$	2,776		4,604		8,61		
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	
	-29,33	$\leq \mu \leq$ 34,73	-50,43	$\leq \mu \leq$ 55,83	-96,66	$\leq \mu \leq$ 102,06	-

[5]



In einem Vertrauensbereich von 95 % ist bereits der Wert 0 enthalten:

Kein Hinweis auf Unterschied



# Auswertung

## Signifikanz der Ergebnisse

### Signifikanz der Pumpenleistung auf Höhe der Crema [mm]

n	N	Syst. Nr.	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil [Schritte]	Höhe Crema [mm]			Mittel $\bar{y}_2$ [mm]	Varianz $s^2$ [mm]
3	6	3	2500	30	5,3	5,4	4,6	5,1	0,19
		9	2500	50	5,7	5,4	5,5	5,5	0,02

Schätzwert $\hat{g}$ [g]	Standardabweichung $s^2$	Standard error $sd$	Freiheitsgrad $f$
0,4	0,11	0,09	4,00

Vertrauensniveau	95%		99%		99,90%		
t-Wert für $f = 4$	2,776		4,604		8,61		
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	
	0,19	$\leq \mu \leq$ 0,68	0,03	$\leq \mu \leq$ 0,83	-0,32	$\leq \mu \leq$ 1,18	++

[5]



In einem Vertrauensbereich von 99,90 % ist der Wert 0 enthalten:






Signifikanter Unterschied

# Auswertung

## Zusammenfassung

	Espressomenge OUT	Höhe Crema
Pumpenleistung (A)	-	++
Dosierventilstellung (B)	-	++
Wechselwirkung (AB)	-	-

### Wichtigste Erkenntnisse:

1. Beste Ergebnisse mit einer Pumpenleistung von 2500 mV und einer Dosierventilstellung von 50 Schritten
2. Hohe Varianz der Espressomenge OUT mit einer Pumpenleistung von 2250 mV und einer Dosierventilstellung von 30, 40 und 50 Schritten  
➔ Eventuell unbekannter Einflussfaktor, muss weiter untersucht werden
3.  Pumpenleistung und  Dosierventilstellung haben keinen nennenswerten Effekt auf die Espressomenge OUT
4. Die Wechselwirkung zwischen Pumpenleistung und Dosierventilstellung haben keinen nennenswerten Effekt auf die Ergebnisse
5.  Pumpenleistung und  Dosierventilstellung haben signifikanten Effekt auf die Entwicklung der Crema  
➔ Eine  Pumpenleistung von 2500 mV resultiert im Schnitt mit einer höheren Crema von 2,3 mm

# Literaturverzeichnis

## Verwendete Quellen

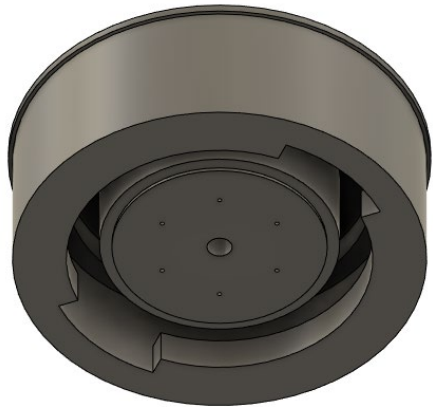
- [1] *Thorsten Heizmann, heizer-kaffee.de, Parameter für einen perfekten Espresso, [online], besucht am 16.01.2022*  
Link: <https://heizer-kaffee.de/blogs/kaffee-lehre/parameter-fur-einen-perfekten-espresso>
- [2] *Thorsten Weil, espressoguide.org, Extraktionszeit, [online], besucht am 16.01.2022*  
Link: <https://www.espressoguide.org/extraktionszeit/>
- [3] *Armin Rohnen, Physik der Espressomaschine, Institut für Kaffeetechnologie, [online], Besucht am 16.01.2023*  
Link: [http://www.institut-fuerkaffeetechnologie.de/Institut\\_fur\\_Kaffeetechnologie/Druck\\_in\\_der\\_Espressomaschine.html](http://www.institut-fuerkaffeetechnologie.de/Institut_fur_Kaffeetechnologie/Druck_in_der_Espressomaschine.html)
- [4] *Britta Folmer, Imre Blank, Thomas Hofmann: Crema – Formation, Stabilization, and Sensation. Elsevier Inc. 2017*
- [5] *Wilhelm Kleppmann: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. Hanser Verlag München 2020*

# Anhang

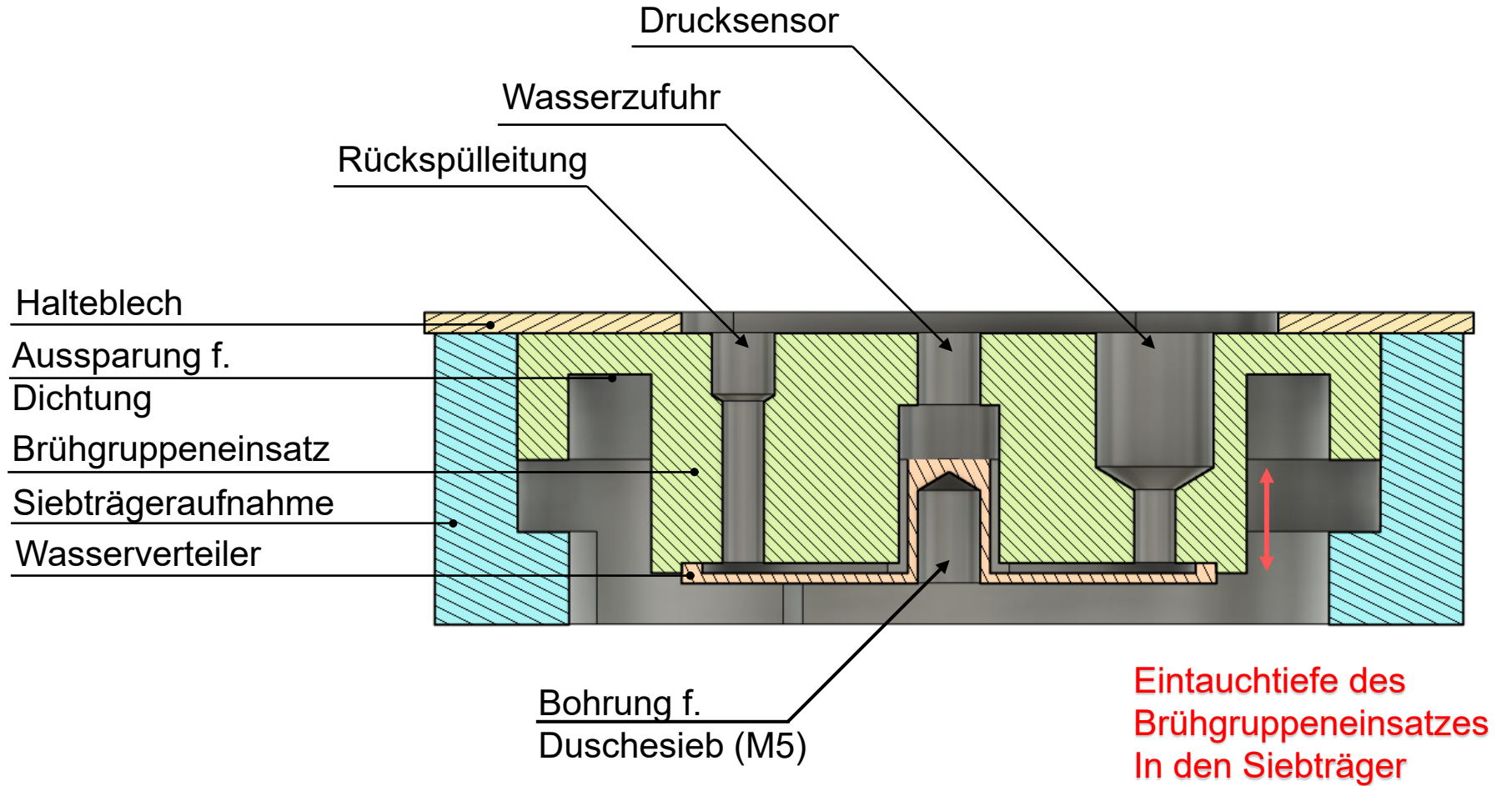
## Ansichten und Aufbau der Brühgruppe



Ansicht schräg oben



Ansicht schräg unten



# Anhang

## Randomisierung der Einzelversuche bei Block 1

### Liste der randomisierten Einzelversuche je Block

Vers.Nr.	Syst.Nr.	Block	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil-Stellung [Schritte]
1	5	1	2250	40
2	8	1	2250	50
3	2	1	2250	30
4	3	1	2500	30
5	7	1	2000	50
6	1	1	2000	30
7	9	1	2500	50
8	6	1	2500	40
9	4	1	2000	40

# Anhang

## Randomisierung der Einzelversuche bei Block 2

### Liste der randomisierten Einzelversuche je Block

Vers.Nr.	Syst.Nr.	Block	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil-Stellung [Schritte]
10	9	2	2500	50
11	6	2	2500	40
12	1	2	2000	30
13	8	2	2250	50
14	4	2	2000	40
15	3	2	2500	30
16	5	2	2250	40
17	7	2	2000	50
18	2	2	2250	30

# Anhang

## Randomisierung der Einzelversuche bei Block 3

### Liste der randomisierten Einzelversuche je Block

Vers.Nr.	Syst.Nr.	Block	Pumpenleistung [mV]	Dosierventil-Stellung [Schritte]
19	7	3	2000	50
20	8	3	2250	50
21	5	3	2250	40
22	2	3	2250	30
23	9	3	2500	50
24	4	3	2000	40
25	3	3	2500	30
26	1	3	2000	30
27	6	3	2500	40