



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Marc Lingenhoff

Untersuchung des Spritzgießprozesses
mittels Design of Experiment (DoE)

Marc Lingenhoff

**Untersuchung des Spritzgießprozesses
mittels Design of Experiment (DoE)**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

IES GmbH - Innovative Erodier Systeme
Großer Kamp 3a
22885 Barsbüttel

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell
Zweitprüfer: M.Eng. Nestorius Wiegandt

Abgabedatum: 02. Juni 2017

Zusammenfassung

Marc Lingenhoff

Thema der Masterarbeit

Untersuchung des Spritzgießprozesses mittels
Design of Experiment (DoE)

Stichworte

Spritzgießen, Spritzgießprozess, Mikrospritzgießmaschine, Kunststoffverarbeitung, Energieverbrauch des Spritzgießprozesses, Statistische Versuchsplanung, ANOVA, RSM, Multiple Regression, Statistik mit R

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden mittels der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiment (DoE)) die Auswirkungen der wichtigsten Prozessparameter auf den Energieverbrauch untersucht, mit Berücksichtigung der Bauteilqualität sowie der Prozesseffizienz und Prozessstabilität des Spritzgießprozesses. Die Bauteilqualität ist durch das Gewicht des Bauteils repräsentiert, die Prozesseffizienz durch den Energieverbrauch und die Zykluszeit und die Prozessstabilität durch die Entformung des Bauteils.

Master Thesis title

Investigation of the injection molding process by means of
Design of Experiment (DoE)

Keywords

Injection molding, Injection molding process, Micro injection molding machine, polymer processing, Energy consumption of the injection molding process, Design of experiments, ANOVA, RSM, Multiple regression, Statistics with R

Abstract

Inside this thesis, the impact of the most important process parameters on the energy consumption is examined. The investigation is performed with Design of experiments (DoE), considering the quality of the injection moulded part as well as the process efficiency and process stability of the injection molding process. The quality of the injection moulded part is represented by the weight, the process efficiency by the energy consumption and cycle time and the process stability by the demoulding of the injection moulded part.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	i
Formelzeichen, Symbole und Indizes	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Methodische Vorgehensweise	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Spritzgießen	2
2.1.1 Spritzgießmaschine	2
2.1.2 Spritzgießprozess	3
2.2 Statistische Versuchsplanung	6
2.2.1 Grundbegriffe der Statistik	6
2.2.2 Grundbegriffe der Versuchsplanung	12
3 Versuchsaufbau	22
3.1 Spritzgießmaschine	22
3.2 Testwerkzeug, Testbauteil und Testmaterial	23
3.3 Aufbau der Messensorik, Datenerfassung und Datenverarbeitung	26
4 Versuchsplanung und Modellbildung	30
4.1 Auswahl der Zielgrößen und Faktoren	32
4.2 Vorversuche und Screening	34
4.2.1 Vorversuche	34
4.2.2 Screening	38
4.3 Hauptversuche und Modellbildung	43
4.3.1 Fraktioniert faktorieller Versuchsplan	43
4.3.2 Orthogonal zusammengesetzter Versuchsplan 2. Ordnung	56
4.3.3 Signifikanzprüfung	63
4.3.4 Untersuchung des Energieverlaufs	66
5 Modellvalidierung und Optimierungspotenziale	69
5.1 Validierung des Modells	69
5.1.1 Validierung der Geometrieunabhängigkeit	69
5.1.2 Validierung der Materialunabhängigkeit	76
5.2 Ergebniszusammenfassung und Optimierungspotenziale	83
6 Schlussbetrachtung und Ausblick	87
Literaturverzeichnis	89
Anhang	90

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
CCD	Central-Composite-Design
DF	Degree of Freedom
DoE	Design of Experiment
G	Generator
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PVDF	Polyvinylchlorid
Q	Quantil
RSM	Response Surface Methodology
S	Sternpunktversuch
SFTP	Secure File Transfer Protocol
SSB	Sum of Squares Between Groups
SSE	Sum of Squares due to error (residual)
SSH	Secure Shell Protocol
SSR	Sum of Squares due to regression
SST	Total Sum of Squares
SSW	Sum of Squares Within Groups
SVP	Statistische Versuchsplanung
W	Würfelpunktversuch
Z	Zentralpunktversuch
2FWW	Zweifachwechselwirkung
3FWW	Dreifachwechselwirkung
4FWW	Vierfachwechselwirkung
5FWW	Fünffachwechselwirkung
6FWW	Sechsfachwechselwirkung

Formelzeichen, Symbole und Indizes

Formelzeichen und Symbole

E	–	Effekt
\bar{e}	Ws	gemittelter Energieverbrauch
\overline{ent}	–	gemittelte Entformung
f	–	Freiheitsgrad
F	–	F-Testgröße
g	–	Gruppenanzahl
\bar{g}	kg	gemittelttes Bauteilgewicht
H	–	Hypothese
m	–	Realisation
med	–	Median
n	–	Anzahl
n	–	Versuchsanzahl
N	–	Versuchsumfang
N	–	Gesamtanzahl Einzelversuche
p	bar	Druck
r	–	Fehlerschätzung (Residuum)
R^2	%	Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}	%	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
s	–	Schätzwert für die Standardabweichung
s	mm	Weg
s^2	–	Schätzwert für die Varianz
t	s	Zeit
t	–	t-Testgröße
T	°C	Temperatur
v	%	Spritzgeschwindigkeit
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
x	–	x-Koordinate
x	–	kontrollierbarer Faktor
\bar{x}	–	Schätzwert für den Mittelwert
y	–	Zielgröße
\hat{y}_i	–	Geschätzter Einzelwert der Zielgröße
y_i	–	Beobachteter Einzelwert der Zielgröße
\bar{y}	–	Mittelwert der Zielgröße
\bar{y}	–	Mittelwert der Zielgröße innerhalb der Gruppen
$\bar{\bar{y}}$	–	Gesamtmittelwert der Zielgröße über alle Gruppen
z	–	unkontrollierbarer Faktor
z	–	Störgröße
\bar{z}	s	gemittelte Zykluszeit
α	%	Irrtumswahrscheinlichkeit
α	–	Sternpunktastand
β	%	Wahrscheinlichkeit für Alternativhypothese

β	–	Regressionskoeffizient
$\hat{\beta}$	–	Schätzung Regressionskoeffizient
Δp	<i>bar</i>	Druckverlust
$\Delta\mu$	–	zu erkennender Unterschied der Zielgröße
ϵ	–	Fehler
μ	–	Mittelwert
σ	–	Standardabweichung
σ^2	–	Varianz
$1 - \beta$	%	Macht

Indizes

<i>A</i>	Alternativ
<i>D</i>	Düse
<i>E</i>	Einspritzen / 1. Druckstufe
<i>f</i>	Faktoren
<i>H</i>	Heisskanal
<i>j</i>	innerhalb der Gruppe
<i>K</i>	Restkühlen
<i>l</i>	Faktorstufen
<i>N</i>	Nachdrücken / 2. Druckstufe
<i>P</i>	Plastifizierung
<i>r</i>	Versuchsläufe
<i>U</i>	Umlenkkopf, Umschaltpunkt 2. Druckstufe
<i>Uv</i>	Umschaltpunkt Geschwindigkeit
<i>v</i>	Variablen
<i>W</i>	Würfel
$\hat{\beta}$	Schätzung Regressionskoeffizient
0	Null, Zentralpunkt, Achsenabschnitt
1	1. Spritzgeschwindigkeit
2	2. Spritzgeschwindigkeit

Abbildungsverzeichnis

2.1	Spritzgießmaschine	2
2.2	Zeitlicher Zyklusverlauf	3
2.3	Fahrwege der Spritzeinheit	4
2.4	Prozessfenster	5
2.5	Standardnormalverteilung mit $\mu = 0$ und $\sigma = 1$	8
2.6	Verteilungsfunktion zur Standardnormalverteilung	8
2.7	Konfidenzintervalle für 10 normalverteilte Stichproben	9
2.8	Generelles Vorgehen beim statistischen Test	10
2.9	Systemdarstellung als Blackbox	12
2.10	Veranschaulichung eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans	16
3.1	Spritzgießmaschine Babyplast 6/10P	22
3.2	Versuchsbauteil	24
3.3	Versuchswerkzeug	24
3.4	Schematischer Versuchsaufbau	26
3.5	Schaltplan der Maschinenhydraulik	27
3.6	Arbeitsablaufdiagramm	29
4.1	Flussdiagramm zur Versuchsplanung	31
4.2	Ursache-Wirkungs-Diagramm für das zu untersuchende System	33
4.3	Energieverlauf	36
4.4	Muster zur Entformung des Bauteils	37
4.5	Screening: Effektplot zum Gewicht \bar{g}	39
4.6	Screening: Effektplot zum Energieverbrauch \bar{e}	39
4.7	Screening: Effektplot zur Entformung \overline{ent}	40
4.8	Screening: Effektplot zur Zykluszeit \bar{z}	41
4.9	Screening: Normalplots zu allen Zielgrößen	42
4.10	Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zum Gewicht \bar{g}	45
4.11	Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zum Energieverbrauch \bar{e}	46
4.12	Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zur Entformung \overline{ent}	47
4.13	Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zur Zykluszeit \bar{z}	48
4.14	Fraktionierter Versuchsplan: Normalplots zu allen Zielgrößen	49
4.15	Fraktionierter Versuchsplan: Wechselwirkungsmatrix zur Entformung \overline{ent}	50
4.16	Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zum Gewicht \bar{g}	52
4.17	Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zum Energieverbrauch \bar{e}	53
4.18	Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zur Entformung \overline{ent}	54
4.19	Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zur Zykluszeit \bar{z}	55
4.20	Faktoren B, D und E zum Gewicht \bar{g}	58
4.21	Wechselwirkungen B:E und C:H zum Gewicht \bar{g}	59
4.22	Faktoren A, C, E und H zum Energieverbrauch \bar{e}	60
4.23	Wechselwirkung E:H zum Energieverbrauch \bar{e}	61
4.24	Faktoren B und C zur Entformung \overline{ent}	62
4.25	Faktoren D und E sowie Wechselwirkungen A:D und A:E zur Entformung \overline{ent}	62
4.26	Faktoren C, E, F und G zur Zykluszeit \bar{z}	63

4.27	Versuche mit hohem Energieverbrauch	66
4.28	Versuche mit niedrigem Energieverbrauch	67
5.1	Vergleich des Faktors H zum Gewicht \bar{g}	72
5.2	Einfluss der Spritzgeschwindigkeit und der Abkühlung auf den Druckverlust beim Spritzgießen	73
5.3	Vergleich der Faktoren B und E zum Gewicht \bar{g}	73
5.4	Vergleich der Wechselwirkung D:E zum Gewicht \bar{g}	74
5.5	pvT-Diagramme für amorphe und teilkristalline Kunststoffe	76
5.6	Materialvergleich	77
5.7	Vergleich der Wechselwirkung B:D zum Gewicht \bar{g}	80
5.8	Vergleich der Wechselwirkung E:F zum Gewicht \bar{g}	81
5.9	Vergleich der Wechselwirkung F:G zum Gewicht \bar{g}	81
5.10	Vergleich der Wechselwirkung E:H zum Energieverbrauch \bar{e}	82

Tabellenverzeichnis

2.1	Fehler beim statistischen Testen	11
2.2	Vollfaktorieller Versuchsplan mit 3 Faktoren auf jeweils 2 Faktorstufen	13
2.3	Auflösung eines Versuchsplans	15
2.4	Erreichbare Auflösungen eines Versuchsplans	15
2.5	Zentral zusammengesetzter Versuchsplan, basierend auf vollfaktoriellem Versuchsplan 3^2	17
3.1	Technische Daten Babyplast 6/10P	23
3.2	Materialdaten Repsol ISPLEN PP 094 N2M	25
3.3	Bitmuster Hydraulikventilsignale	28
4.1	Ausgangsparameterset und Machbarkeitsgrenzen	35
4.2	Screening: Faktoren und Faktorstufen	38
4.3	Screening: Ergebnis der Effektuntersuchung	42
4.4	Fraktionierter Versuchsplan: Faktoren und Faktorstufen	43
4.5	Ermittlung des Versuchsumfangs	44
4.6	Modell 1. Ordnung: Numerische Modellbewertung	51
4.7	Modell 1. Ordnung: Verteilung der Residuen	56
4.8	Zentral zusammengesetzter Versuchsplan: Faktoren und Faktorstufen	56
4.9	Modell 2. Ordnung: Numerische Modellbewertung	57
4.10	Modell 2. Ordnung: Verteilung der Residuen	57
4.11	ANOVA-Tabelle	64
4.12	Versuche mit hohem Energieverbrauch	66
4.13	Versuche mit niedrigem Energieverbrauch	67
5.1	Bauteil- und Werkzeugvergleich	69
5.2	Validierung der Geometrieunabhängigkeit: Faktoren und Faktorstufen	70
5.3	ANOVA-Tabelle: Signifikanzvergleich bezüglich Geometrie	71
5.4	Materialdaten Covestro Apec 1745 - PC	77
5.5	Validierung der Materialunabhängigkeit: Faktoren und Faktorstufen	78
5.6	ANOVA-Tabelle: Signifikanzvergleich bezüglich Material	79
5.7	Ergebniszusammenfassung	83
5.8	Optimierungstabelle	85
5.9	Optimierung des Serienbauteils „Sicherungsstopfen“	86

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

Das Verfahren des Spritzgießens ist der am häufigsten verwendete Urformprozess für Kunststoffprodukte. Dessen Komplexität macht es bis heute nötig, den Prozess auf subjektiver Basis zu optimieren. Hierfür ist viel Erfahrung und empirisches Wissen erforderlich. Die Parametrierung und Optimierung des Spritzgießprozesses erfolgt in konventioneller Weise durch die One-factor-at-a-time-Methode, bei der ein Prozessparameter bzw. Faktor verändert und die Auswirkungen beobachtet werden. Je nach Bauteilgeometrie, Werkzeugaufbau und Material kann es hier zu einem erheblichen Aufwand kommen. Zudem ist die Einstellung von Parametern an der Spritzgießmaschine stark abhängig von den Fähigkeiten des Einrichters. Eine objektive Aussage darüber, ob es sich bei den hierdurch genutzten Einstellungen um gute oder optimale Einstellungen handelt, kann daher nicht getroffen werden.

Abhilfe schafft die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiment (DoE)). Diese ermöglicht es, statistisch gesicherte und objektive Ergebnisse zu erhalten. Ziel dieser Arbeit ist es, mittels der statistischen Versuchsplanung die Auswirkungen der wichtigsten Prozessparameter auf den Energieverbrauch unter Berücksichtigung der Bauteilqualität, Prozesseffizienz und Prozessstabilität zu untersuchen. Die erhaltenen Erkenntnisse sollen dem Einrichter in Zukunft eine Hilfe bieten, den Prozess unter genannten Gesichtspunkten optimal einzustellen. Die dadurch gewonnene hohe Prozessgüte bei gleichzeitig geringem Energieverbrauch stellt einen Beitrag zur Ressourceneinsparung in der Prozessindustrie dar.

1.2 Methodische Vorgehensweise

Die Thesis beinhaltet 3 Phasen, welche im Folgenden näher erläutert werden.

In Phase 1 wird ein Überblick über die Grundlagen des Spritzgießprozesses sowie der statistischen Grundlagen gezeigt. Es werden die generelle Vorgehensweise bei der statistischen Versuchsplanung und ihre wichtigsten Methoden erläutert. Für relevante Begrifflichkeiten werden die englischen Pendanten angegeben, da die verwendete Analysesoftware für die statistische Auswertung ausschließlich in englischer Sprache angeboten wird.

In Phase 2 ist der Versuchsaufbau dargestellt und erläutert. Hierbei wird auf die Art der verwendeten Spritzgießmaschine, den Aufbau der Messsensorik und die Ermittlung der Energiemessdaten eingegangen. Zudem wird auf das Vorgehen bei der Versuchsdurchführung Bezug genommen.

Die Phase 3 bildet das Kernthema der Arbeit. Hierin folgt die Durchführung der Versuchsplanung, der Modellaufbau sowie die Auswertung mittels statistischer Methoden. Darüber hinaus wird die Modellvalidierung durchgeführt. Abschließend werden Optimierungsempfehlungen abgeleitet.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel umfasst wesentliche Grundlagen hinsichtlich des Spritzgießprozesses und der statistischen Versuchsplanung.

2.1 Spritzgießen

Spritzgießen ist ein Herstellungsverfahren, bei dem Kunststoffgranulat aufgeschmolzen und in einen formgebenden Hohlraum gespritzt wird. Das Spritzgießen wird nachfolgend anhand der verarbeitenden Spritzgießmaschine und dem Spritzgießprozess erläutert.

2.1.1 Spritzgießmaschine

Die Spritzgießmaschine lässt sich grundlegend in drei Einheiten unterteilen (Abbildung 2.1).

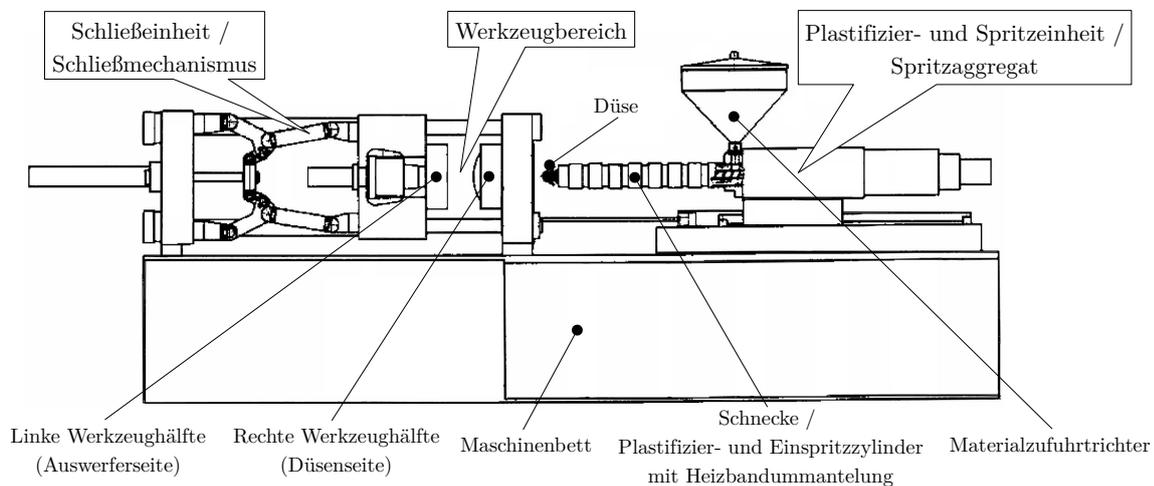


Abbildung 2.1: Spritzgießmaschine, angepasst nach [7]

In der *Plastifizier- und Spritzeinheit* wird das Kunststoffgranulat aufgeschmolzen und in Richtung Werkzeug gefördert. Die Plastifizier- und Spritzeinheit wird auch *Spritzaggregat* genannt. Beginnend mit der Materialzufuhr über einen Trichter, fällt das Material durch Schwerkraft in Richtung Einzugsbereich der Schnecke. Mithilfe der Schnecke wird das Material homogenisiert, durch Friktions- und Aufschmelzwärme plastifiziert und in Richtung Düse befördert. Dies wird durch die Rotationsbewegung der Schnecke sowie durch außenliegende Heizbänder realisiert.

Der *Werkzeugbereich* dient dazu, das Spritzgießwerkzeug aufzunehmen. Ein Spritzgießwerkzeug setzt sich aus einer düsenseitigen und auswerferseitigen Formhälfte zusammen und umschließt

das Formnest. Das Formnest ist der für das Bauteil formgebende Hohlraum. Über die *Schließeinheit* wird das Werkzeug mithilfe einer kraftumleitenden Mechanik und hydraulischem Druck geschlossen. Auf der Seite der Schließeinheit befinden sich ebenfalls die Auswerfer, über welche das Bauteil entformt wird.

2.1.2 Spritzgießprozess

Der Spritzgießprozess wird durch ein Ablaufschema verdeutlicht. Das Schema ist in Abbildung 2.2 abgebildet.

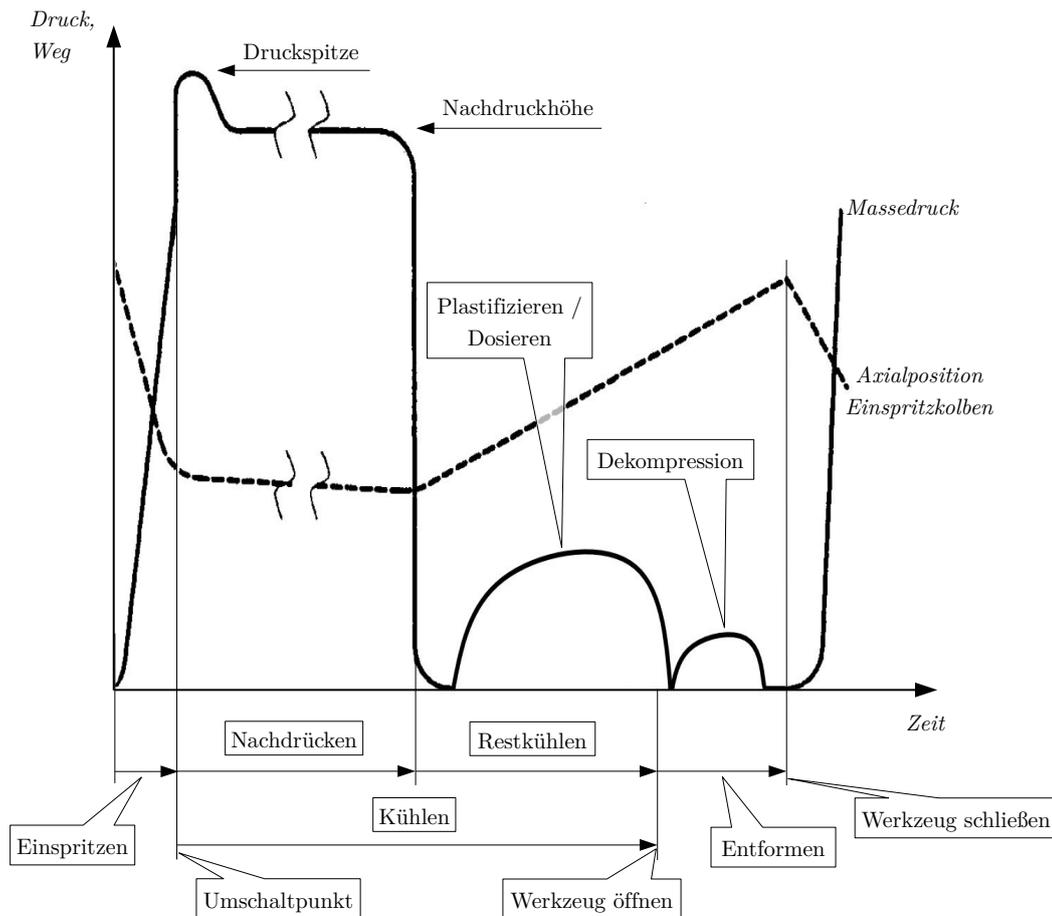


Abbildung 2.2: Zeitlicher Zyklusverlauf, modifiziert nach [8]

Der Massedruck und die Axialposition des Einspritzkolbens sind über dem zeitlichen Zyklusverlauf dargestellt. Der Massedruck liegt an der Düsen Spitze an. Die Schnecke dient gleichzeitig als Einspritzkolben.

Während des *Einspritzvorgangs* wird das Formnest mit der plastifizierten Kunststoffmasse komplett gefüllt. Hierzu führt der Einspritzkolben eine große Axialbewegung in Richtung Formnest aus, wodurch gleichzeitig der Massedruck innerhalb kürzester Zeit stark ansteigt. Ist die Form vollständig gefüllt, wird auf den *Nachdruck* umgeschaltet. Der Einspritzvorgang ist geschwindigkeitsgeführt, d.h. der Einspritzdruck und die Einspritzzeit ergeben sich aus der eingestellten Einspritzgeschwindigkeit. Die Nachdruckphase ist dagegen druckgeführt.

Der *Umschaltzeitpunkt* für den Nachdruck ist über die Volumenberechnung des Bauteils meist wegbahängig gewählt, eine zeit- sowie druckabhängige Umschaltung ist jedoch auch möglich. Die

sich hier ergebende Druckspitze liegt idealerweise erst im Nachdruckbereich, da somit eine vollständige Formfüllung erreicht wird. [1] Der Nachdruck wird nun auf konstantem Niveau für eine festgelegte Zeit gehalten, bis der *Siegelpunkt* erreicht ist. Ab dem Siegelpunkt ist die Gewichtszunahme des Bauteils abgeschlossen. Der Nachdruck ist die kritischste Phase im gesamten Prozess, da dieser entscheidend ist für die Qualitätsmerkmale des Bauteils. Dies sind unter anderem das Gewicht, die Abmaße, die Schwindung, der Verzug, die Einfallstellen und die Gratbildung. [1] Reicht die bisherige *Kühlung* des Bauteils nicht aus, ist das Bauteil also nicht formstabil genug um es zu entformen, so schließt sich eine *Restkühlphase* an den Nachdruck an. Während der Restkühlphase wird bereits der nächste „Schuss“ vorbereitet, indem neu *aufdosiert*, *plastifiziert* und die Schnecke *dekomprimiert* wird. Das Dekomprimieren verhindert, dass Material aus der Düse leckt. Ist das Bauteil ausreichend abgekühlt, wird das *Werkzeug geöffnet* und das Bauteil *entformt*. Ein neuer Zyklus startet mit dem *Schließen des Werkzeugs*.

Die Fahrbewegungen der Spritzeinheit sind in Abbildung 2.3 abgebildet.

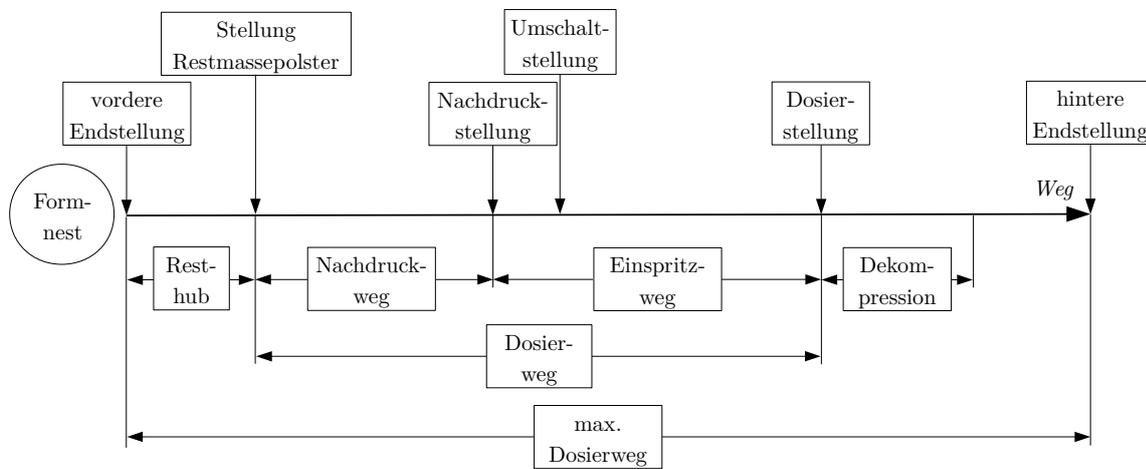


Abbildung 2.3: Fahrwege der Spritzeinheit, eigene Darstellung nach [6]

Der Koordinatenursprung der Fahrwege liegt düsenseitig auf der Seite des Formnests. Zusätzlich zum Einspritz- und Nachdruckweg gibt es den *Resthub*, der gegen Ende des Nachdruckvorgangs ein *Restmassepolster* zwischen Düse und Einspritzkolben hinterlässt. Dieses Restmassepolster ist notwendig, um bis zum Ende des Nachdrucks Druck auf das Bauteil ausüben zu können. Der *Dosierweg* (Einspritz- und Nachdruckweg) wird somit um den Resthub und zusätzlich um den Fahrweg für die Dekompression verlängert. Aus dem maximalen Hub des Einspritzkolbens ergibt sich der *max. Dosierweg*.

Die Einstellung der Prozessparameter erfordert die Kenntnis von Daten über das zu fertigende Bauteil, über das Werkzeug und die Spritzgießmaschine. Berücksichtigt werden bauteilspezifische Daten, wie das Material, das Teilevolumen, die Formteilabmessungen und an der Maschine einstellbare Temperaturen, Wege, Spritzgeschwindigkeiten und Drücke. Mit der so erhaltenen Grundeinstellung werden erste Zyklen durchgeführt, bei denen sichergestellt werden muss, dass das Bauteil sicher entformt wird und ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet ist.

Hat sich ein stabiler Prozess eingestellt, kann mit der Optimierung gewünschter Qualitätsmerkmale oder Prozessmerkmale begonnen werden. Es wird angestrebt, Einstellungen für die verschiedenen Maschinenparameter zu finden, die sich nah am Optimum befinden. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 2.4.

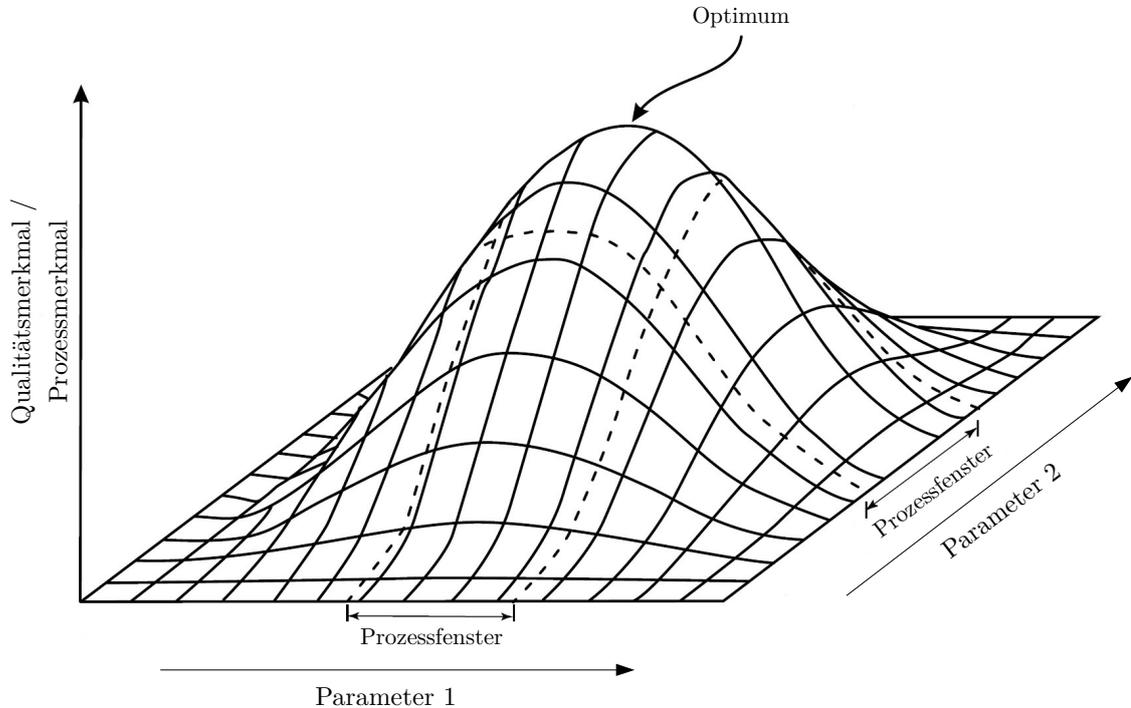


Abbildung 2.4: Prozessfenster, modifiziert nach [13]

Die Maschinenparameter werden im weiteren Verlauf der Arbeit als *Faktoren* bezeichnet, gemäß der in der statistischen Versuchsplanung üblichen Fachsprache. Typische Qualitätsmerkmale sind das Gewicht, die Schwindung, der Oberflächenglanz oder die Abmessungen. Zudem sollen Prozessmerkmale wie die Zykluszeit so gering wie möglich gehalten werden. Die interessierenden Qualitäts- und Prozessmerkmale werden in der vorliegenden Arbeit *Zielgrößen* genannt, ebenfalls gemäß der in der statistischen Versuchsplanung üblichen Fachsprache. Jede Parametereinstellung stellt einen Kompromiss dar und es kommt zu mehr oder weniger idealen Einstellungen bezüglich des Optimums. Hieraus ergibt sich ein *Prozessfenster*. Das Prozessfenster charakterisiert den Einstellbereich, innerhalb dessen unter den gewünschten Ansprüchen entsprechende Bauteile erzeugt werden. Es ist je nach Parameter unterschiedlich groß. Die Parameter beeinflussen sich gegenseitig, es bestehen *Wechselwirkungen*. Eine hohe Spritzgeschwindigkeit führt z.B. zu geringeren Drücken und es müssen höhere Temperaturen gewählt werden, um die Viskosität der Kunststoffschmelze zu verringern.

2.2 Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung (SVP, engl. Design of Experiment (DoE)) beinhaltet Methoden zur Versuchsdurchführung und darauffolgender Auswertung sowie Optimierung von Prozessen, i.d.R. im Sinne gewünschter Qualitätsansprüche. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die wichtigsten Begrifflichkeiten der statistischen Datenanalyse und Versuchsplanung.

2.2.1 Grundbegriffe der Statistik

2.2.1.1 Grundgesamtheit und Stichprobe

Die *Grundgesamtheit* ist in der Statistik der Begriff für die Gesamtheit aller Vorkommnisse eines interessierenden Zusammenhangs und kann damit als die „Wahrheit“ aufgefasst werden. Die *Stichprobe* ist ein Ausschnitt aus dieser Gesamtheit. Das Ziel ist es, anhand der Stichprobe mit möglichst geringem Aufwand die Grundgesamtheit so genau wie möglich abzubilden.

Die Stichprobe setzt sich aus den gemachten Beobachtungen zusammen:

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n. \quad (2.1)$$

Die Anzahl der Beobachtungen heißt dann *Stichprobenumfang*. [22] Ein geläufigerer Ausdruck für den Begriff Beobachtung ist *Zufallsvariable*, da die Stichprobenergebnisse dem Zufall unterliegen. Werden zwei oder mehrere Stichproben aus derselben Grundgesamtheit entnommen, so wird es nie zu gleichen Ergebnissen kommen. Eine Zufallsvariable kann ebenso zusammengefasste Beobachtungen beschreiben, die sich einer Gruppe oder *Klasse* zuordnen lassen.

In der statistischen Versuchsplanung wird bei den Beobachtungen von den Ergebnissen einer experimentellen Untersuchung gesprochen. Experimentelle Untersuchungen können entweder Experimente praktischer Natur (Messungen) oder rein theoretischer Natur (computergestützte Berechnungen) sein. In dieser Arbeit handelt es sich um experimentell gewonnene Ergebnisse von Messungen.

2.2.1.2 Kennzahlen einer Stichprobe

Die bekannteste Kennzahl, die eine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit charakterisiert, ist der arithmetische *Mittelwert*.

Der arithmetische Mittelwert ist wie folgt definiert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.2)$$

Da der so gewonnene Mittelwert aus einer endlichen Stichprobe gewonnen wird, stellt dieser eine Schätzung für die Grundgesamtheit dar. Dies gilt ebenso für die folgenden Kennzahlen. Die Schätzung statistischer Kennzahlen wird in der Literatur zumeist mit lateinischen und die exakten Werte mit griechischen Symbolen bezeichnet. Ebenfalls geläufig ist die Bezeichnung von Schätzungen durch griechische Symbole, die mit einem Dach versehen sind.

Eine weitere wichtige Kennzahl einer Stichprobe ist die Streuung. Die Streuung ist groß, wenn die Beobachtungen weit vom arithmetischen Mittelwert entfernt liegen. Die Streuung ist dagegen klein, wenn die Werte nah am arithmetischen Mittelwert liegen. [22]

Die *Varianz* beschreibt die quadratischen Abweichungen vom Mittelwert und ist folgendermaßen definiert:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1} (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.3)$$

Eine geläufigere, weil anschaulichere, Form für die Streuung ist die Quadratwurzel der Varianz: Die *Standardabweichung* (engl. standard deviation)

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.4)$$

2.2.1.3 Median und Quantile

Der *Median*, oder auch Zentralwert, teilt die Stichprobe in zwei gleiche Hälften: Unterhalb und oberhalb vom Median liegen gleich viele Werte. Per Definition gilt der in Gleichung 2.5 gezeigte Zusammenhang.

$$\text{med} = \begin{cases} x_{[(n+1)/2]} & \text{falls } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2}(x_{[n/2]} + x_{[n/2+1]}) & \text{falls } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2.5)$$

Analog dazu bilden sich *Quantile*. Die Stichprobe lässt sich an jeder beliebigen Stelle teilen, sodass eine bestimmte Anzahl an Beobachtungen unterhalb und oberhalb dieser Grenze liegen (wie z.B. eine Hunderterteilung, der Perzentile). Besondere Bedeutung haben die *Quartilen*. Das untere oder erste Quartil teilt die Stichprobe im Verhältnis 1:3 und das obere oder dritte Quartil teilt die Stichprobe im Verhältnis 3:1. [22]

Anschaulich verdeutlicht findet sich dies in Abbildung 2.6, hier jedoch für die eine Grundgesamtheit beschreibende Verteilungsfunktion und nicht für eine Stichprobe.

2.2.1.4 Normalverteilung und Vertrauensintervalle

Die *Normalverteilung* nach Gauß spielt eine zentrale Rolle in der Statistik und gilt ebenso für viele Zufallsvariablen in Natur und Technik. In guter Näherung können Messwerte, deren Zufallsstreuung die Summe vieler Einflüsse ist, mit der Normalverteilung beschrieben werden. [15] In dieser Arbeit sind derartige Einflüsse schwankende Umgebungsbedingungen, Materialinhomogenitäten, Wiederholungsungenauigkeiten der Spritzgießmaschine oder der Werkzeugverschleiß.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung ist gegeben durch:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.6)$$

mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ .

Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* der Standardnormalverteilung und Abbildung 2.6 die zugehörige *Verteilungsfunktion*. Die Standardnormalverteilung hat den Mittelwert $\mu = 0$ und die Standardabweichung $\sigma = 1$. Dieser Sonderfall der Normalverteilung bietet den Vorteil, dass deren Werte vertafelt sind und jede beliebige Normalverteilung über eine lineare Transformation errechnet werden kann. Neben der Normalverteilung sind in der Versuchsplanung die *F-* und *t-* *Verteilungen* von besonderer Bedeutung.

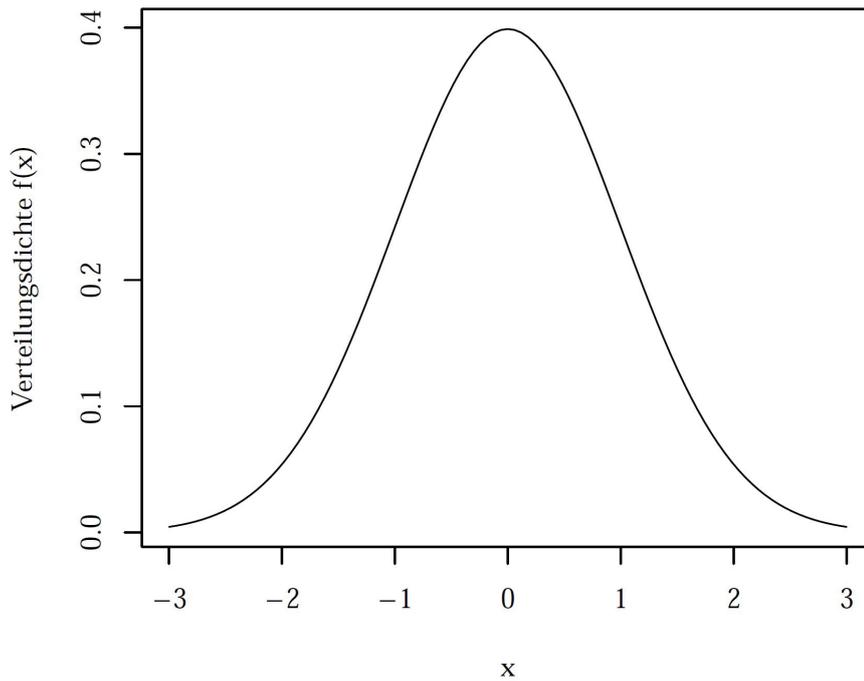


Abbildung 2.5: Standardnormalverteilung mit $\mu = 0$ und $\sigma = 1$

Die Verteilungsfunktion stellt die relativen Wahrscheinlichkeiten in kumulierter Form dar. Die Wahrscheinlichkeiten ergeben in der Summe immer 1 bzw. 100 %.

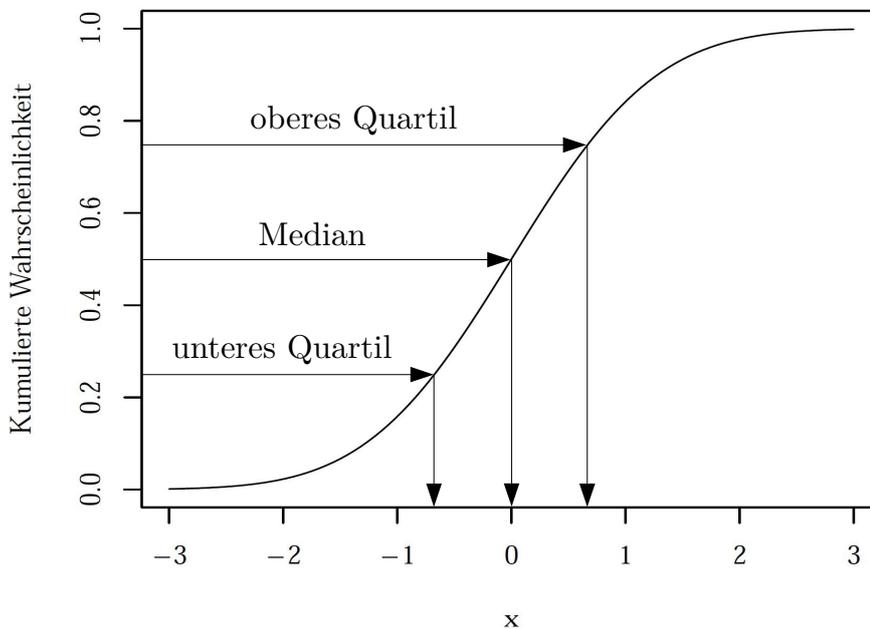


Abbildung 2.6: Verteilungsfunktion zur Standardnormalverteilung

Wie bereits eingangs in Abschnitt 2.2.1.1 erwähnt, streuen Versuchsergebnisse aufgrund von zufälligen Einflüssen. Daher unterliegen die aus den Ergebnissen errechneten Mittelwerte oder Standardabweichungen dem Zufall. Das heißt, dass sich aus jeder Stichprobe derselben Grundgesamtheit immer andere Mittelwerte und Standardabweichungen ergeben. Der zentrale Begriff

des *Vertrauens- / Konfidenzintervalls* gibt Auskunft darüber, wie viele Stichproben der gleichen Grundgesamtheit den wahren Wert enthalten. Das folgende Beispiel verdeutlicht Konfidenzintervalle für einen Mittelwert. Konfidenzintervalle können jedoch auch für weitere Schätzgrößen festgelegt werden.

Die in Abbildung 2.7 gezeigten Stichproben, mit dem jeweiligen Stichprobenumfang von 10, sind aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit $\mu = 0$ und $\sigma = 3$ per Zufallsgenerator generiert.

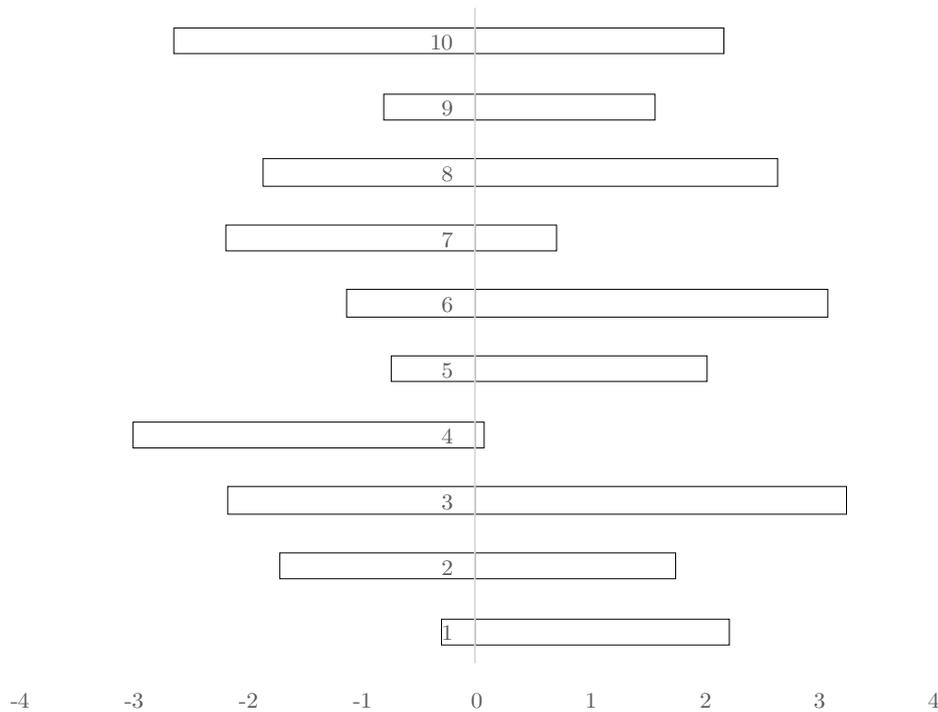


Abbildung 2.7: Konfidenzintervalle für 10 normalverteilte Stichproben mit $n = 10$ und $\alpha = 5 \%$

Für jede Stichprobe ist der Absolutbetrag des Konfidenzintervalls bei einer *Irrtumswahrscheinlichkeit* von $\alpha = 5 \%$ errechnet und ergibt sich relativ für alle Stichproben zu:

$$\text{Konfidenzintervall} = 1 - \alpha = 95 \%. \tag{2.7}$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit wird auch *Signifikanzniveau* genannt.

Das Konfidenzintervall schließt also 95 % der in der Mitte liegenden Beobachtungen jeder Stichprobe ein und 5 % werden als Irrtumswahrscheinlichkeit zugebilligt. Bei einem zweiseitigen Konfidenzintervall sind dies die ersten 2,5 % und die letzten 2,5 % des Stichprobenbereichs. Alle Stichproben überstreichen dabei in diesem Fall den wahren Mittelwert der Grundgesamtheit von $\mu = 0$. Die Stichprobenmittelwerte und Standardabweichungen unterscheiden sich jedoch sehr stark voneinander. Das Konfidenzintervall kann auch so interpretiert werden, dass 95 % der Stichproben den wahren Mittelwert einschließen. Je größer der Stichprobenumfang gewählt wird, desto kleiner werden auch die Konfidenzintervalle, da sich mit zunehmendem Stichprobenumfang eine zunehmende Annäherung an die Grundgesamtheit ergibt. [12]

Dem Sachverhalt entsprechend wird das Vertrauensintervall definiert. Weiterhin üblich sind 90 % oder 99 %.

2.2.1.5 Hypothesentests

Das Vorgehen beim statistischen Testen folgt immer den gleichen Schritten und kann daher durch das in Abbildung 2.8 gezeigte Schema beschrieben werden.

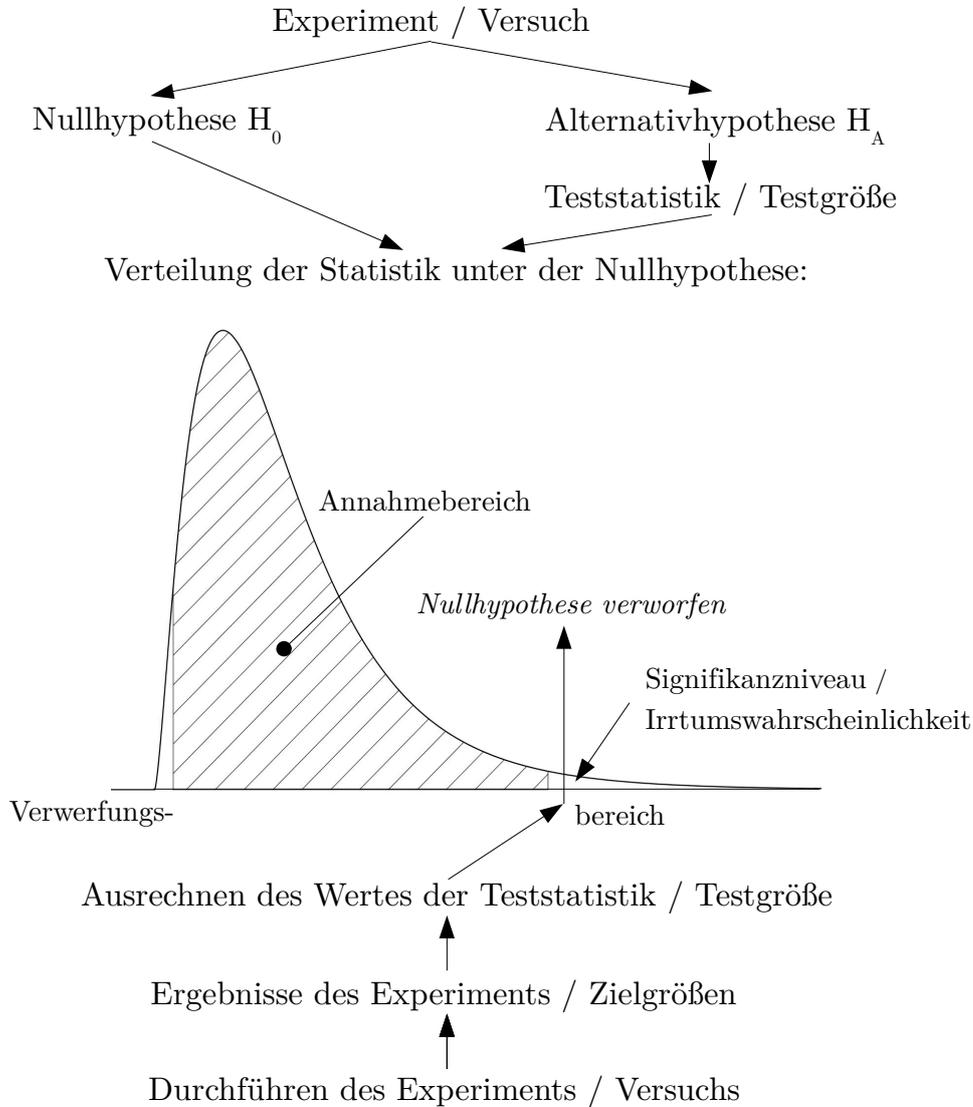


Abbildung 2.8: Generelles Vorgehen beim statistischen Test, eigene Darstellung nach [22]

Ausgehend von dem Experiment wird die *Nullhypothese* H_0 aufgestellt. Die Fragestellung könnte z.B. lauten, ob zwei Mittelwerte zweier Stichproben mit hinreichender Wahrscheinlichkeit gleich sind ($\mu_1 = \mu_2$). Die *Alternativhypothese* H_A wäre nun: $\mu_1 \neq \mu_2$. Je nach Fragestellung wird die Teststatistik gewählt und deren Berechnungsgrößen aus den Stichproben bestimmt.

Liegt die Testgröße in dem *Verwerfungsbereich* (hier zweiseitig), so wird unter einer zuvor festgelegten Wahrscheinlichkeit, ein Ergebnis im Verwerfungsbereich zu erhalten, die Nullhypothese verworfen. Diese Wahrscheinlichkeit wird mit α bezeichnet und heißt *Irrtumswahrscheinlichkeit* oder *Signifikanzniveau*. [22]

Der statistische Test beweist nie, ob eine Nullhypothese stimmt oder nicht. Er gibt Auskunft darüber, ob die Hypothese plausibel ist. Es wird also die Entscheidung getroffen, ob die Nullhypothese angenommen oder verworfen wird.

Daraus ergibt sich, dass beim Testen zwei Fehlerarten auftreten können. Dies wird veranschaulicht in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Fehler beim statistischen Testen

Testergebnis	H_0 ist wahr	H_0 ist falsch
Testgröße nimmt einen Wert im Annahmehereich an	richtige Entscheidung: H_0 ist wahr und wird beibehalten	falsche Entscheidung: H_0 ist falsch und wird zu Unrecht beibehalten (Fehler 2. Art)
Testgröße nimmt einen Wert im Verwerfungsbereich an	falsche Entscheidung: H_0 ist wahr und wird zu Unrecht verworfen (Fehler 1. Art)	richtige Entscheidung: H_0 ist falsch und wird verworfen

Der *Fehler 1. Art* wird durch die Irrtumswahrscheinlichkeit α beschrieben, also der Wahrscheinlichkeit der Verwerfung einer zutreffenden Nullhypothese.

Der *Fehler 2. Art* besteht darin, eine Nullhypothese anzunehmen, obwohl die Alternativhypothese richtig ist. Wenn eine Alternativhypothese angenommen wird, so ist die Wahrscheinlichkeit hierfür β . Die Gegenwahrscheinlichkeit zu dieser Wahrscheinlichkeit wird als *Macht* $1 - \beta$ bezeichnet.

Es wird angestrebt, die Irrtumswahrscheinlichkeit α möglichst klein zu halten. Verkleinert sich α , so verkleinert sich auch die Macht $1 - \beta$ und die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 2. Art ist größer. Die Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit wird daher anhand der untersuchten Daten abgewogen. Die Irrtumswahrscheinlichkeit α wird in vielen naturwissenschaftlichen Gebieten auf 5 % festgelegt, da dies einen guten Kompromiss zwischen niedriger Irrtumswahrscheinlichkeit und hoher Macht darstellt. [22]

2.2.2 Grundbegriffe der Versuchsplanung

2.2.2.1 System, Zielgrößen und Faktoren

Das System stellt das zu untersuchende Gebilde dar (Abbildung 2.9).

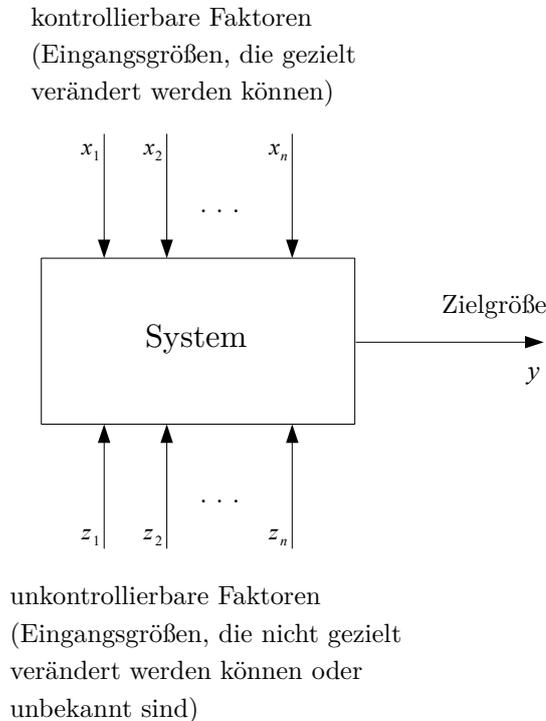


Abbildung 2.9: Systemdarstellung als Blackbox, in Anlehnung an [14, 16]

Auf das System wirken kontrollierbare und unkontrollierbare *Faktoren*. Kontrollierbare Faktoren sind Prozessparameter, die vorgegeben werden können. Diese werden auch *Steuergrößen* genannt. Die unkontrollierbaren Faktoren sind zum einen die das System umgebenden klimatischen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck oder schwankende Materialeigenschaften und Wiederholungsungenauigkeiten des Prozesses (*Störgrößen*). Die unkontrollierbaren Faktoren beinhalten zum anderen einstellbare Prozessparameter, die einer hohen Streuung unterliegen und somit eine geringe Reproduzierbarkeit aufweisen. Ein Effekt dieser Parameter ist nicht sicher nachweisbar.

Unter den *Zielgrößen* werden in der Versuchsplanung interessierende Ausgabewerte eines zu untersuchenden Systems verstanden, welche sich in Abhängigkeit von den Faktoren ändern. Zielgrößen sind Einzelmerkmale der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Qualitäts- und Prozessmerkmale. Diese Zielgrößen können einzelne Ergebnisse von Messungen oder zu einem Mittelwert zusammengefasste Ergebnisse sein, z.B. Maße und Gewichte eines Bauteils. Zumeist ist bei einem Versuch mehr als nur eine Zielgröße von Interesse.

2.2.2.2 Versuchspläne

In diesem Abschnitt werden nur die für industrielle Anwendungen wichtigsten Versuchspläne behandelt. Dies sind die faktoriellen Versuchspläne bzw. die fraktioniert faktoriellen Versuchspläne. [10] Nach HAMAN und BOURDON werden diese Versuchspläne für den Spritzgießprozess bevorzugt verwendet. [2, 11] Darüber hinaus kommen zentral zusammengesetzte Versuchspläne

(engl. Central-Composite-Design (CCD)) zum Einsatz, die zur Abbildung der Nichtlinearitäten und zur Prozessoptimierung verwendet werden.

Vollfaktorielle Versuchspläne

In Tabelle 2.2 ist ein *vollständiger faktorieller Versuchsplan* mit drei Faktoren (A, B und C) auf zwei *Faktorstufen* (+ und -) abgebildet.

Tabelle 2.2: Vollfaktorieller Versuchsplan mit 3 Faktoren auf jeweils 2 Faktorstufen

Versuch n	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	y
1	-	-	-	+	+	+	-	y ₁
2	+	-	-	-	-	+	+	y ₂
3	-	+	-	-	+	-	+	y ₃
4	+	+	-	+	-	-	-	y ₄
5	-	-	+	+	-	-	+	y ₅
6	+	-	+	-	+	-	-	y ₆
7	-	+	+	-	-	+	-	y ₇
8	+	+	+	+	+	+	+	y ₈

In diesem Beispiel handelt es sich um qualitative (kategorische) Faktorstufen, in der praktischen Umsetzung werden diese durch quantitative (numerische) Faktorstufen ersetzt. Darüber hinaus ist es üblich, Faktorbezeichnungen zu kodieren. In diesem Fall sind die Faktoren mit A, B, C usw. kodiert. Zudem sind die *Zweifachwechselwirkungen* (2FWW) und eine *Dreifachwechselwirkung* (3FWW) mit angegeben. Die Anzahl der Versuche entspricht den 8 *Faktorstufenkombinationen*. Die Zielgröße ist y.

Die Anzahl der Versuchsläufe ergibt sich über die nachstehende Gleichung:

$$n_r = n_l^{n_f}, \tag{2.8}$$

mit der Anzahl der Versuche n_r , der Anzahl der Faktorstufen n_l und der Anzahl der Faktoren n_f . [14]

Mit 3 Faktoren bei jeweils 2 Faktorstufen werden 8 Versuche benötigt, für jede mögliche Faktorstufenkombination ein Versuch. Wiederholungen von Faktorstufenkombinationen resultieren in zusätzlichen *Realisationen*. Der gesamte *Versuchsumfang* ergibt sich über Gleichung 2.9.

$$N = n_r m \tag{2.9}$$

Hierin ist N der Versuchsumfang, n_r die Versuchsanzahl und m die Anzahl der Realisationen.

Es muss unterschieden werden, ob die Realisationen echte Wiederholungen sind oder lediglich Wiederholungen bei einmaliger Einstellung der Faktorstufenkombination. Für echte Wiederholungen wird eine abermalige Einstellung der Faktorstufenkombination vorgenommen. Das Ziel mehrerer Realisationen ist immer die Annäherung an den wahren Wert bzw. an die Grundgesamtheit.

Die Wechselwirkungen errechnen sich durch Multiplikation der entsprechenden Faktorstufen, hierbei gelten die gleichen Rechenregeln wie in der Arithmetik.

Ein Versuchsplan macht es möglich, mehrere Faktoren gleichzeitig zu variieren, ganz im Gegensatz zur One-factor-at-a-time-Methode. Grundlage hierfür ist die *Orthogonalität* und die *Ausgewogenheit* eines Versuchsplans. Orthogonal ist ein Versuchsplan, wenn keine Kombination aus jeweils zwei Spalten miteinander korreliert. Ausgewogen ist ein Versuchsplan, wenn für die Faktorstufen jedes beliebigen Faktors die Einstellungen der anderen Faktoren gleichmäßig aufgeteilt sind. [14]

Erste Anhaltspunkte, ob ein Faktor signifikanten Einfluss auf die Zielgröße hat, gibt die Effektberechnung. Der *Effekt* eines Faktors auf eine Zielgröße lässt sich mit Gleichung 2.10 berechnen.

$$E = \bar{y}(+) - \bar{y}(-) \quad (2.10)$$

Es wird der Mittelwert aller Einzelwerte der Zielgröße bei negativer Faktorstufe vom Mittelwert aller Einzelwerte bei positiver Faktorstufe subtrahiert. Analog wird für die Wechselwirkungen verfahren. [14]

Die Effekte der einzelnen Faktoren werden in *Effektdiagrammen* dargestellt und auf Relevanz untersucht. Zur zusätzlichen Absicherung helfen *Normal-Plots*. Die theoretischen Normalquantilen werden bei dieser Art von Plots über den Effekten dargestellt, da die Summendifferenz der Effekte (Gleichung 2.10) als annähernd normalverteilt angesehen wird. [17] Unter der Nullhypothese, dass alle Effekte gleich sind, werden die Effekte als relevant angesehen, wenn diese nicht der Normalverteilung folgen.

Um möglichst repräsentative Stichproben durch die Pläne zu erhalten, wird die *Randomisierung* und *Blockbildung* eingesetzt. [15] Durch die Randomisierung wird die Reihenfolge der Faktorstufenkombinationen per Zufallsgenerator verändert, um Trends, die sich über die Versuchsspanne entwickeln könnten, zu unterdrücken. Mit zunehmender Faktoranzahl steigt auch der Versuchsumfang, sodass eine Aufteilung auf mehrere Tage oft nötig ist. Da an den Tagen die unkontrollierbaren Faktoren unterschiedlich sein können und somit auch die Streuungen, wird der Versuchsplan in Blöcke unterteilt.

Fraktionierte faktorielle Versuchspläne

Vollfaktorielle Versuchspläne mit vielen Faktoren haben hohe Versuchsumfänge. Zur Reduzierung des Versuchsumfangs werden *fraktionierte faktorielle Versuchspläne* eingesetzt. Der Versuchsumfang wird dadurch verringert, dass unwichtige Wechselwirkungen durch weitere Faktoren ersetzt werden. Zu vernachlässigende Wechselwirkungen sind im Allgemeinen die höherwertigen Wechselwirkungen, ab 3FWW aufwärts. [2, 11]

Zur Veranschaulichung sei ein Experiment gegeben, bei dem der Einfluss von 5 Faktoren auf eine Zielgröße untersucht werden soll. Würde hierfür ein vollständig faktorieller Versuchsplan verwendet werden, so ergäben sich nach Gleichung 2.8: 32 Versuchsläufe für 2 Faktorstufen (2^5). Um den Umfang zu verringern, wird beispielsweise die *Vierfachwechselwirkung* (4FWW) ABCD durch den fünften Faktor E ersetzt. Für die Zuordnung werden *Generatoren* verwendet, für jeden zusätzlichen Faktor jeweils ein Generator. Der Generator für den Faktor E ist: $G = ABCDE$. Dieser Vorgang führt zur *Vermengung* (engl. aliasing) des Versuchsplans. Die vermengten Faktoren oder Wechselwirkungen werden über die im Vorabschnitt erwähnte Multiplikationsregel ermittelt, indem diese mit dem jeweiligen Generator multipliziert werden.

Für Faktor A in diesem Beispiel ergibt sich folgende Vermengung:

$$A \cdot \text{Generator Faktor E} = A \cdot (ABCDE) = AABCDE = BCDE. \quad (2.11)$$

Der Faktor A ist hier mit der 4FWW BCDE vermenget. Dies bedeutet, dass der Effekt von Faktor A (ein Haupteffekt) nicht mehr von dem Effekt dieser 4FWW unterschieden werden kann. Analog dazu erfolgt die Berechnung für alle weiteren Faktoren und übrigen Wechselwirkungen.

In diesem Beispiel führt die Verwendung des Generators für den zusätzlichen Faktor E zu einem fraktionierten 2^{5-1} -Plan. Der Versuchsumfang ist halbiert auf 16 Versuchsläufe, entsprechend einem vollfaktoriellen 2^4 -Plan. Für jeden zusätzlichen Faktor halbiert sich der Versuchsumfang. Auf diese Art entstehen Versuchspläne mit unterschiedlichen *Auflösungen*. Eine Übersicht ist in Tabelle 2.3 zu sehen. Die erreichbaren Auflösungen in Abhängigkeit der Anzahl der Versuchsläufe n_r und Faktoren n_f sind in Tabelle 2.4 zu finden.

Tabelle 2.3: Auflösung eines Versuchsplans, eigene Darstellung nach [11, 15]

Auflösung	Vermengung	Bewertung
<u>III</u>	Faktor mit 2FWW	kritisch
<u>IV</u>	Faktor mit 3FWW 2FWW mit 2FWW	weniger kritisch
<u>V</u>	Faktor mit 4FWW 2FWW mit 3FWW	unkritisch
<u>VI</u>	Faktor mit 5FWW 2FWW mit 4FWW 3FWW mit 3FWW	unkritisch
<u>VII</u>	Faktor mit 6FWW 2FWW mit 5FWW 3FWW mit 4FWW	unkritisch

Wird ein Experiment untersucht, bei dem es gewünscht ist, alle Effekte der Faktoren (Haupteffekte) und 2FWW voneinander unterscheiden und einwandfrei bestimmen zu können, so muss nach Tabelle 2.3 mindestens ein Versuchsplan mit der Auflösung V gewählt werden. Jedoch steigt auch mit zunehmender Auflösung der Versuchsumfang (siehe Tabelle 2.4), sodass eine möglichst geringe Auflösung dem Zweck entsprechend gewählt werden sollte.

Tabelle 2.4: Erreichbare Auflösungen eines Versuchsplans, eigene Darstellung nach [19]

$n_f \backslash n_r$	8	16	32	64	128	...
3	Voll					...
4	<u>IV</u>	Voll				...
5	<u>III</u>	<u>V</u>	Voll			...
6	<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>VI</u>	Voll		...
7	<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>VII</u>	Voll	...
8		<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>V</u>	<u>VIII</u>	...
9		<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>VI</u>	...
10		<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>V</u>	...
11		<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>V</u>	...
12		<u>III</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	<u>IV</u>	...
.
.
.

Zentral zusammengesetzte Versuchspläne

Zentral zusammengesetzte Versuchspläne (engl. Central-Composite-Design (CCD)) werden zur

- Untersuchung von Nichtlinearitäten auf mindestens 3 Stufen,
- Findung des Optimums
- und zur Herleitung des quadratischen Modells

eingesetzt.

Es handelt sich bei diesen Plänen 2. Ordnung um stark reduzierte 5^{n_f} - Pläne, die zur Schätzung der Haupt-, Wechsel- und quadratischen Wirkungen dienen. [11]

Diese Pläne basieren auf den zuvor beschriebenen vollständigen oder fraktionierten Versuchsplänen 1. Ordnung, welche um einen *Zentralpunktversuch* und *Sternpunktversuche* ergänzt werden, veranschaulicht dargestellt in Abbildung 2.10.

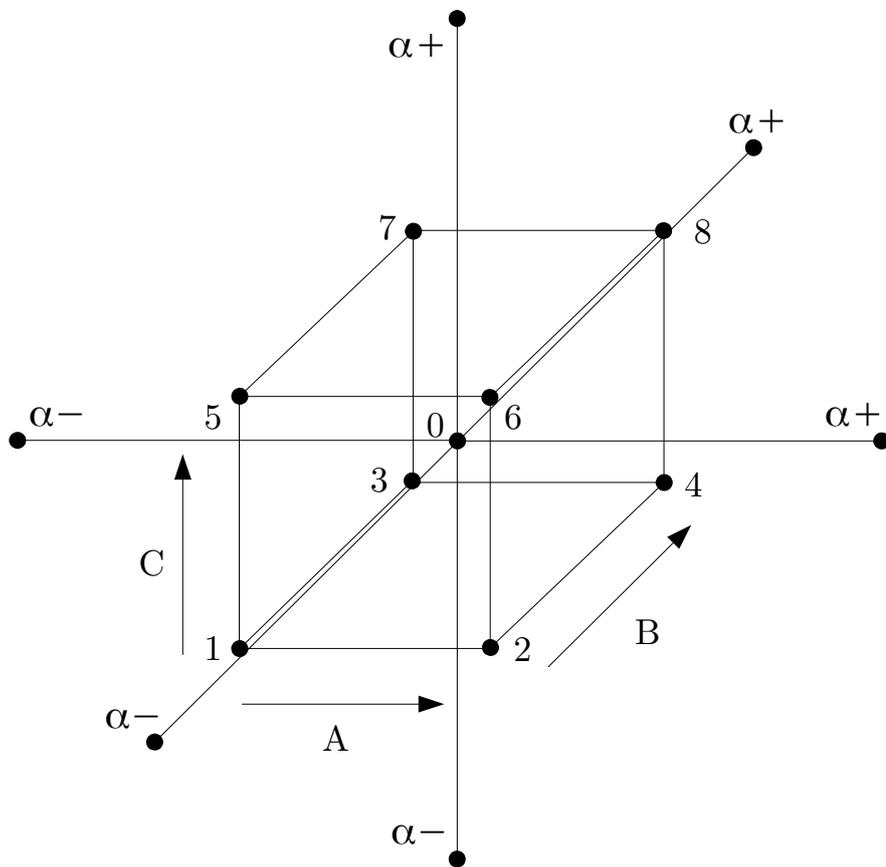


Abbildung 2.10: Veranschaulichung eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans

Zugrunde liegt der in Tabelle 2.2 gezeigte vollständige faktorielle Versuchsplan mit drei Faktoren. Im Würfel werden die drei Faktoren A, B, C auf jeweils zwei Faktorstufen variiert. Ergänzend finden sich der mittig liegende Zentralpunkt und die Sternpunkte außerhalb des Würfels. Die Sternpunkte müssen nicht zwangsläufig außerhalb des Würfels angeordnet sein, diese könnten auch zwischen den Würfelpunkten und dem Zentralpunkt liegen oder jeweils flächenzentriert auf den Würfelflächen.

Abbildung 2.10 entsprechend ist der zugehörige Versuchsplan in Tabelle 2.5 abgebildet.

Tabelle 2.5: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan, basierend auf vollfaktoriellem Versuchsplan 3^2

Versuch n	A	B	C
Würfelpunktversuche			
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
Zentralpunktversuch			
9	0	0	0
Sternpunktversuche			
10	$-\alpha$	0	0
11	$+\alpha$	0	0
12	0	$-\alpha$	0
13	0	$+\alpha$	0
14	0	0	$-\alpha$
15	0	0	$+\alpha$

Von oben nach unten sind der Block mit den Würfelpunktversuchen, dann der Zentralpunktversuch und abschließend der Block mit den Sternpunktversuchen ersichtlich. Jeder Faktor hat zwei Sternpunktversuche, einen auf minimaler Faktorstufe und einen auf maximaler Faktorstufe des zentral zusammengesetzten Versuchsplans.

Der Sternpunktabstand α kann willkürlich gewählt werden. Um allerdings eine Orthogonalität im Plan 2. Ordnung zu gewährleisten, empfiehlt es sich, diesen über die folgende nach KLEPPMANN angegebene Gleichung zu bestimmen:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{N N_W} - N_W)}. \quad [15] \tag{2.12}$$

N_W entspricht der Anzahl der Einzelversuche im Würfel und N entspricht der Gesamtanzahl der Einzelversuche ($N = N_W + 2 n_f + n_0$).

2.2.2.3 Beschreibungsmodelle

Modellgleichung

Mithilfe der *multiplen Regression* wird ein mathematisches Modell für den Zusammenhang zwischen der Zielgröße und den Faktoren an die Daten aus dem Versuchsplan angepasst. Da die multiple Regression in vielen Quellen ausführlich behandelt wird (vgl. STAHEL in [22]), wird hier nicht auf deren Herleitung eingegangen. Es werden nur die wichtigsten Ideen für die Modellbildung erläutert.

Entscheidend für die Modellbildung ist die Erkenntnis, dass bei der Durchführung experimenteller Versuche niemals die Realität zu 100 % abgebildet werden kann. Das erhaltene Ergebnis einer Messung (Zielgröße) besteht aus einem zuvor vermuteten mathematischen Zusammenhang und einem Fehleranteil. [18] Vereinfachend lässt sich folgende Beziehung aufstellen:

$$\text{Ergebnis einer Messung} = \text{math. Zusammenhang} \pm \text{Fehler.} \quad (2.13)$$

Für Versuchspläne 1. Ordnung (vollfaktorielle oder fraktioniert faktorielle Versuchspläne) ergibt sich mit den Wechselwirkungen Gleichung 2.14 (Modell 1. Ordnung).

$$y = \underbrace{\beta_0}_{\text{Absolutglied}} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_i x_i}_{\text{Lineares Glied}} + \underbrace{\sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j}_{\text{Wechselwirkungsterm}} + \underbrace{\epsilon}_{\text{Fehlerterm}} \quad (2.14)$$

Versuchspläne 2. Ordnung (zentral zusammengesetzte Versuchspläne) folgen Gleichung 2.15 (Modell 2. Ordnung).

$$y = \underbrace{\beta_0}_{\text{Absolutglied}} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_i x_i}_{\text{Lineares Glied}} + \underbrace{\sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j}_{\text{Wechselwirkungsterm}} + \underbrace{\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2}_{\text{Quadratisches Glied}} + \underbrace{\epsilon}_{\text{Fehlerterm}} \quad (2.15)$$

Die Koeffizienten β werden bei Modellen 1. Ordnung durch die multiple lineare Regression und bei Modellen 2. Ordnung durch die multiple quadratische Regression dem vermuteten Modell so angepasst, dass die Abstandsquadrate zwischen den tatsächlichen Beobachtungen und dem Modell so klein wie möglich werden (Methode der kleinsten Quadrate). Die Koeffizienten können bei Modellen 1. Ordnung auch aus den Effekten ermittelt werden, da es sich um gleichartige Größen handelt. Der Koeffizient eines Faktors ist bei Modellen 1. Ordnung immer halb so groß wie dessen Effekt. Es handelt sich bei dieser Anpassung um eine Schätzung, daher ergibt sich für β der Schätzwert $\hat{\beta}$. [11, 16]

Da die zufälligen Fehler ϵ nicht beobachtet werden können, muss auch hier eine Schätzung bzw. Näherung vorgenommen werden. Die Schätzung erfolgt durch die *Residuen*. Es handelt sich bei den Residuen um die Differenzen zwischen den gemachten Beobachtungen und den angepassten Werten der Modellgleichung (engl. *fitted values*). Die Residuen werden aufgrund ihrer Zufälligkeit als normalverteilt angenommen. [22]

Kontroll- und Prüfverfahren zur Bewertung der Modellgüte

Zur Bewertung der Modelle kommen einerseits numerische Methoden und andererseits graphische Methoden zum Einsatz.

Das *Bestimmtheitsmaß* definiert die Güte eines Beschreibungsmodells. Ausgangspunkt ist die Zerlegung der Gesamtvarianz ($SST = \text{Total Sum of Squares}$) in die erklärte Varianz ($SSR = \text{Sum of Squares due to regression, Modellwerte}$) und die nicht erklärte Varianz ($SSE = \text{Sum of Squares due to error, Residuen}$). Die Gesamtvarianz SST ist das Ergebnis der experimentellen Untersuchung (Zielgröße). Das Bestimmtheitsmaß ist wie folgt definiert:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2.16)$$

Das Bestimmtheitsmaß ist damit eine normierte Größe, deren Wert zwischen 0 und 1 liegt. Es sagt aus, wie gut sich die Regressionsfunktion an die Beobachtungen anpasst. Ein niedriger Wert entspricht einer schlechten Anpassung und umgekehrt. [11]

Mit dem adjustierten Bestimmtheitsmaß lässt sich eine Verbesserung der Bewertung erreichen, indem die Anzahl der Variablen (n_v) berücksichtigt wird. Mit zunehmender Variablenanzahl steigt auch R^2 , aber das Modell kann trotz dessen eine schlechte Güte besitzen. In Gleichung 2.17 ist die Definitionsgleichung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes zu sehen. [11]

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n_r - 1}{n_r - n_v} (1 - R^2) \quad (2.17)$$

Eine weitere numerische Bewertungsmöglichkeit bietet das Adäquatheitsmaß. Hierfür wird eine F-Testgröße, analog zu Gleichung 2.23 auf Seite 21, für das gesamte Modell berechnet. Die Testgröße ist der Quotient aus einem Modellanpassungswert und der Summe der Modellfehler. Je größer dieser Wert ist bzw. je entfernter dieser zur 1 liegt, desto wahrscheinlicher entsprechen die Koeffizientenschätzungen $\hat{\beta}$ des Modells den realen Koeffizienten β .

Die graphische Analyse wird über die Untersuchung der Residuen realisiert. Da die Residuen dem Zufall unterliegen und daher näherungsweise eine Normalverteilung derselben angenommen werden kann, werden die Residuen in *QQ-Plots* (Quantil-Quantil-Plots) über den theoretischen Quantilen der Normalverteilung dargestellt. Bildet die Punkteschar eine Linie, so bestätigt sich die Normalverteilung der Residuen. Zur Prüfung der Unabhängigkeit der Residuen voneinander werden diese in gesonderten Plots über den angepassten Werten der Zielgröße und der Versuchsabfolge aufgetragen. Hierdurch können Trends im Verlauf des Versuchs identifiziert werden. Für eine Unabhängigkeit muss die Streuung in diesen beiden Plots homogen erscheinen. Die graphischen Bewertungsmethoden können bei Modellen höherer Ordnung nicht angewendet werden. Für reduzierte Modelle höherer Ordnung werden numerische Lack-of-fit-Tests verwendet. [22]

Über die graphische Residuenanalyse kann zudem nach *Ausreißern* gefahndet werden. Ausreißer sind Beobachtungen mit außergewöhnlich hohem Abstand zu den übrigen Residuen. Es kann sich bei den Ausreißern um Messfehler, Fehler in der Datenübertragung oder aber auch um Singularitäten handeln. Die Singularitäten können wertvolle Informationen des zugrundeliegenden Prozesses beinhalten. Es muss daher eine sorgfältige Überprüfung der Ausreißer erfolgen und beurteilt werden, ob diese entfernt werden oder nicht. Neben dem Abstand zu den übrigen Residuen, ist ebenso die Stärke der verfälschenden Wirkung des Residuums auf das Modell

bedeutend. Die Stärke der verfälschenden Wirkung wird *Hebelwirkung* (engl. leverage) genannt. Ein Bewertungsmaß, welches beides vereint, ist die *Cook's Distanz*. [16, 17]

2.2.2.4 Signifikanzprüfung

Signifikanzprüfung mittels Regressionskoeffizienten

Die Signifikanzprüfung kann bei Versuchsplänen höherer Ordnung mittels der Regressionskoeffizienten des Beschreibungsmodells erfolgen. [11] Unter der Voraussetzung, dass

- die Residuen aufgrund ihrer Zufälligkeit als normalverteilt anzunehmen und unabhängig voneinander sind (kein Trend o.Ä.),
- der vermutete mathematische Zusammenhang zwischen den Faktoren x_i und der Zielgröße y besteht,
- die Standardabweichung konstant ist (d.h. unabhängig von den Faktoren x_i)

sind die Schätzwerte $\hat{\beta}$ für die Koeffizienten β erwartungstreu, d.h. $\hat{\beta}$ stimmt mit β überein. [15]

Die t-Verteilung wird verwendet um Konfidenzintervalle mittels der t-Testgröße für die Koeffizienten zu ermitteln. Die t-Verteilung ist eine symmetrische Verteilung mit dem Mittelwert 0, wie die Standardnormalverteilung. Der Unterschied zur Normalverteilung besteht darin, dass die Varianz unbekannt ist und geschätzt werden muss.

Das Konfidenzintervall für jeden einzelnen Koeffizienten ergibt sich mit der t-Testgröße zu:

$$\text{Konfidenzintervall} = \hat{\beta} \pm t(f, \alpha/2) s_{\hat{\beta}}. \quad (2.18)$$

Die Testgröße ist abhängig von dem Freiheitsgrad $f = n_r - 1$ (engl. Degree of Freedom (DF)) und dem Signifikanzniveau α .

Als signifikant wird ein Faktor angesehen, wenn

$$|\hat{\beta}| > t(f, \alpha/2) s_{\hat{\beta}} \quad (2.19)$$

ist. [18]

Die Konfidenzintervalle für alle Koeffizienten ergeben ein Konfidenzband, das das Beschreibungsmodell umschließt. Ein solches Konfidenzband kann auch für Mittel- und Einzelwerte der Zielgröße y ermittelt werden.

Signifikanzprüfung mittels Varianzanalyse

Die bewährteste Methode in der Versuchsplanung zur Feststellung der Signifikanz ist die *Varianzanalyse* (engl. Analysis of Variance (ANOVA)). Ziel der Varianzanalyse ist es, Mittelwerte in verschiedenen Gruppen auf signifikante Unterschiede zu vergleichen. Die Gruppen sind in diesem Fall die Faktoren auf ihren jeweiligen Faktorstufen. Dazu wird die gesamte in den Versuchsdaten vorhandene Variation in zwei Teile zerlegt, in die Variation zwischen den Gruppen, verursacht durch die Effekte, und die Variation innerhalb der Gruppen. Die Variation innerhalb der Gruppen wird nicht durch die Effekte beschrieben. Diese beiden Varianzen werden verglichen und mittels F-Test auf Signifikanz geprüft. Die Nullhypothese lautet hierbei, dass alle Gruppen den gleichen Mittelwert haben. Ein Effekt ist dann signifikant, wenn die Alternativhypothese, dass die Gruppen nicht den gleichen Mittelwert haben, zutrifft.

Die in den Daten vorhandene Gesamtvariabilität wird durch die *Total Sum of Squares* (SST) bestimmt:

$$\underbrace{SST}_{\text{Total Sum of Squares}} = \sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2 = \underbrace{SSB}_{\text{Sum of Squares Between Groups}} + \underbrace{SSW}_{\text{Sum of Squares Within Groups}}, \quad (2.20)$$

wobei n_r der Gesamtanzahl der Versuchsläufe, y_i den Einzelergebnissen der Zielgröße und \bar{y} dem Gesamtmittelwert entspricht.

Der Anteil der Varianz, welcher durch Effekte entsteht, ist durch die *Sum of Squares Between Groups* (SSB) beschrieben. Der restliche „Fehleranteil“ ist durch die *Sum of Squares Within Groups* (SSW) beschrieben. Gleichung 2.21 und Gleichung 2.22 zeigen beide Definitionsgleichungen.

$$SSB = \sum_{i=1}^g n_j (\bar{y} - \bar{y})^2 \quad (2.21)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (2.22)$$

Hierin ist g die Gruppenanzahl, n_j die Anzahl der Versuche innerhalb der Gruppe und \bar{y} der Mittelwert innerhalb der Gruppe.

Der Vergleich dieser beiden Varianzen erfolgt unter Hinzunahme der Freiheitsgrade $f_1 = g - 1$ und $f_2 = n_r - g$ durch die F-Testgröße:

$$F = \frac{SSB/f_1}{SSW/f_2}. \quad (2.23)$$

Fällt diese Testgröße für eine Gruppe (einen Effekt) nun größer aus als die in den theoretischen F-Quantilen der F-Verteilung tabellierten Werte, so ist der Effekt signifikant. [14]

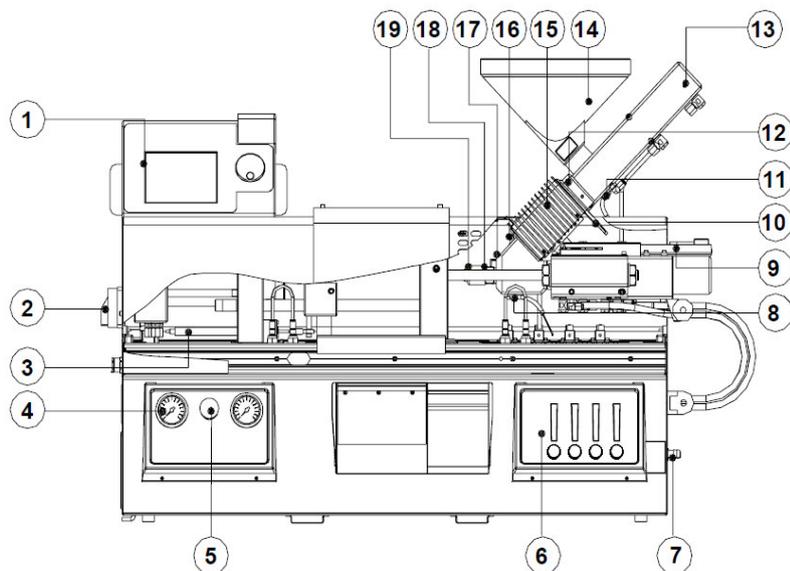
Kapitel 3

Versuchsaufbau

In diesem Kapitel ist der Versuchsaufbau dargestellt und erläutert. Es wird auf die Art der verwendeten Spritzgießmaschine und den Aufbau der Datenerfassung und Datenverarbeitung eingegangen. Ebenfalls wird das Testwerkzeug, das Testbauteil und das Testmaterial beschrieben.

3.1 Spritzgießmaschine

Die verwendete Spritzgießmaschine ist eine Mikrospritzgießmaschine des Typs Babyplast 6/10P, siehe Abbildung 3.1.



1 Display	11 Thermoelement Materialzufuhrtrichter
2 Hauptschalter	12 Hitzeschutzummantelung Plastifikation
3 Wegmesssystem Schließeinheit	13 Hydraulikkolben / -zylinder Plastifikation
4 Druckanzeigen	14 Materialzufuhrtrichter
5 Notschalter	15 Heizelement Plastifikation
6 Tableau Kühlwasserventile	16 Heizelement Umlenkopf
7 Kühlwasserein- und auslass	17 Spritzeinheit
8 Thermoelement Umlenkkopf	18 Thermoelement Düse
9 Wegmesssystem Einspritzkolben	19 Heizelement Düse
10 Thermoelement Plastifikation	

Abbildung 3.1: Spritzgießmaschine Babyplast 6/10P, modifiziert nach [3]

Die Wahl der Spritzgießmaschine ist durch den Kooperationsbetrieb festgelegt, trotzdem wird diese Wahl kurz begründet. Diese Spritzgießmaschine hat sehr kleine thermische Massen, wodurch bei Temperaturänderungen schneller das thermische Gleichgewicht erreicht ist. Dadurch sind die Versuchszeiträume kurz. Zudem verfügt diese Maschine über stark begrenzte Möglichkeiten der Parametrierung im Vergleich zu Maschinen größerer und aufwendigerer Bauart. Dies erleichtert die Faktorwahl. Des Weiteren hat dieser Maschinentyp aufgrund geringerer Produktionsauslastung eine höhere Verfügbarkeit im Betrieb.

Eine konstruktive Besonderheit der Maschine ist das Spritzaggregat. Üblicherweise wird die Plastifizierung über eine rotierende Schnecke vorgenommen, die gleichzeitig als Einspritzkolben dient. Bei dieser Standardbauart wird ca. 60 % der Aufschmelzenergie durch Friktion und der verbleibende Rest durch zugegebene Wärmeenergie aufgebracht. [5] Dieser Aufbau sorgt dafür, dass das eingestellte Temperaturgefälle zum Formnest hin zunimmt, da im Einzugsbereich der Schnecke die größte Reibenergie erzeugt wird. Bei der Babyplast 6/10P findet die Plastifizierung dagegen in einem getrennten Zylinder statt. Dieser Zylinder ist am Auslassende mit Kugeln dicht gepackt, um einen homogenen Wärmefluss in der Schmelze zu gewährleisten. Der Großteil der Aufschmelzenergie wird also, ganz im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Variante, durch zugegebene Wärmeenergie gebildet. Dadurch steigt das eingestellte Temperaturgefälle zum Formnest hin an. Die so plastifizierte Masse wird mittels Plastifizierkolben in den darauffolgenden Einspritzzylinder und von dort aus per Einspritzkolben in das Formnest gedrückt. Die wichtigsten technischen Daten der Maschine sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Technische Daten Babyplast 6/10P [3]

Spezifikation	Wert	Einheit
Kolbendurchmesser	12	mm
Volumen	6,5	cm ³
Spezifischer Spritzdruck	1830	bar
Schließkraft	62,5	kN
Auffahrkraft	4	kN
Öffnungsweg	20 - 110	mm
Auswerferkraft	5	kN
Auswerferhub	45	mm
Hydraulischer Systemdruck	130	bar
Installierte Leistung	3	kW
Gewicht	150	kg

3.2 Testwerkzeug, Testbauteil und Testmaterial

BOURDON empfiehlt eine möglichst einfache Formteilgeometrie zu wählen, um die Überlagerung von konstruktiv bedingten Effekten mit den Effekten aufgrund der Faktorvariationen weitgehend zu vermeiden. [2] Es wird daher eine einfache kreuzförmige Geometrie gewählt, wie sie in Abbildung 3.2 zu sehen ist. Hierdurch wird der konstruktive Aufwand des Versuchswerkzeugs (Abbildung 3.3) sehr gering gehalten.

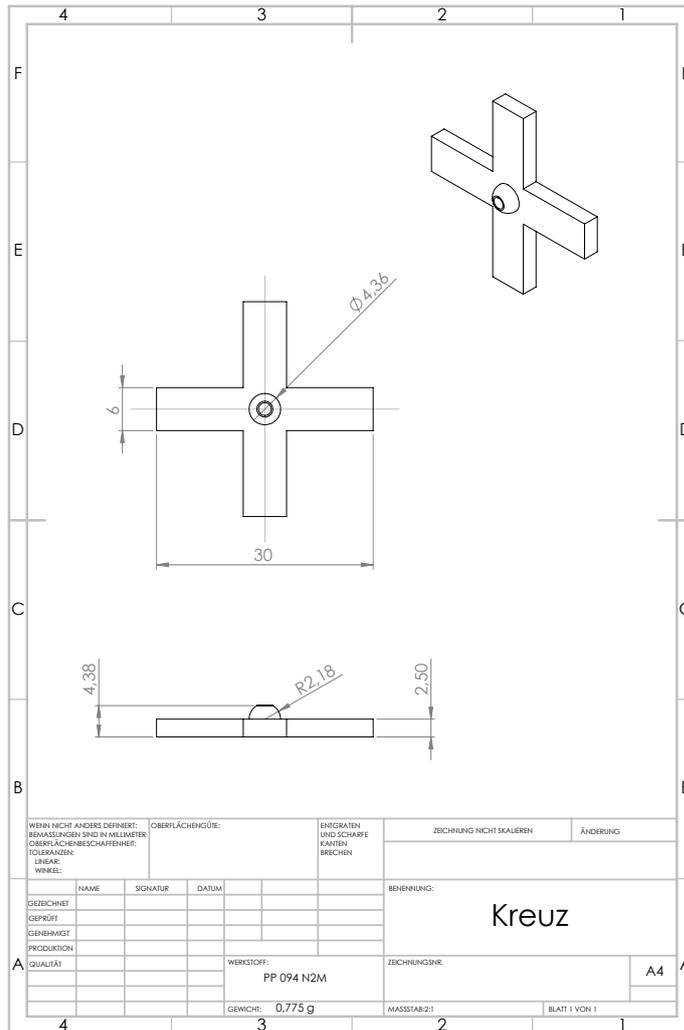


Abbildung 3.2: Versuchsbauteil

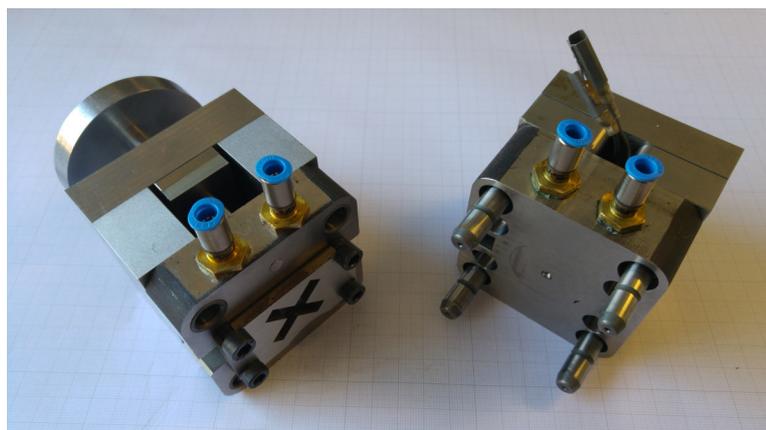


Abbildung 3.3: Versuchswerkzeug

In Abbildung 3.3 ist rechts die düsenseitige Werkzeughälfte und links die auswerferseitige Werkzeughälfte mit dem Formnest zu sehen. Das Werkzeug verfügt über eine Direkteinspritzung ohne Anguss, einen Heisskanal und einen zentral liegenden Auswerfer. Abgesehen von den außenliegenden Einspannflächen besitzt das Werkzeug keine Wärmeisolationsplatten.

Das Werkzeug hat keinerlei konstruktive Merkmale, die die Entformung begünstigen. Serienwerkzeuge sind, wenn es die geforderten Spezifikationen zulassen, meist mit Entformungsschrägen versehen oder die Position der Auswerfer und die Oberflächenrauheit sind optimiert. Da diese Anpassungen bei dem Versuchswerkzeug fehlen, wird die Untersuchung der Bauteilentformung ermöglicht. Es kommt zu differenzierbarem Entformungsverhalten.

Als Versuchsmaterial wird ein Polypropylen (PP), ein teilkristalliner Thermoplast, eingesetzt. Es handelt sich bei diesem Material um einen Massenkunststoff, welcher weite und häufige Verwendung findet und zudem aufgrund niedriger Kosten eine hohe Wirtschaftlichkeit bietet. Die Versuchskosten sind daher gering. Massenkunststoffe lassen sich im Vergleich zu technischen Kunststoffen i.d.R. einfacher verarbeiten. So ist z.B. das Temperieren des Werkzeugs nicht zwingend notwendig. Sie besitzen gute Fließeigenschaften und sind speziell für den Spritzgießprozess entwickelt. Darüber hinaus verfügt das Material über eine hohe chemische Resistenz und gute mechanische Eigenschaften. Durch die gute Lagerbeständigkeit und geringe Hygroskopizität von PP können über den gesamten Versuchszeitraum gleichbleibende Materialeigenschaften gewährleistet werden. Außerdem entfällt eine Materialtrocknung. Ein Auszug aus dem Herstellerdatenblatt ist in Tabelle 3.2 gezeigt.

Tabelle 3.2: Materialdaten Repsol ISPLEN PP 094 N2M [20]

Eigenschaft	Wert	Einheit
Schmelzflussindex (230 °C; 2,16 kg)	40	<i>g/10 min</i>
Empfohlene Verarbeitungstemperatur	190 - 250	<i>°C</i>
Dichte	905	<i>kg/m³</i>
Biegemodul	1700	<i>MPa</i>
Schlagzähigkeit (genutet; 23 °C)	2,5	<i>kJ/m²</i>
Wärmeformbeständigkeit (0,45 MPa)	95	<i>°C</i>

3.3 Aufbau der Messsensorik, Datenerfassung und Datenverarbeitung

Vor der eigentlichen Durchführung der Versuchsplanung ist es notwendig, die Messsensorik aufzubauen sowie die Datenerfassung und -verarbeitung zu planen. Eine schematische Übersicht über den gesamten Versuchsaufbau mit den Datenströmen, verwendeten Geräten und Verarbeitungsprogrammen ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

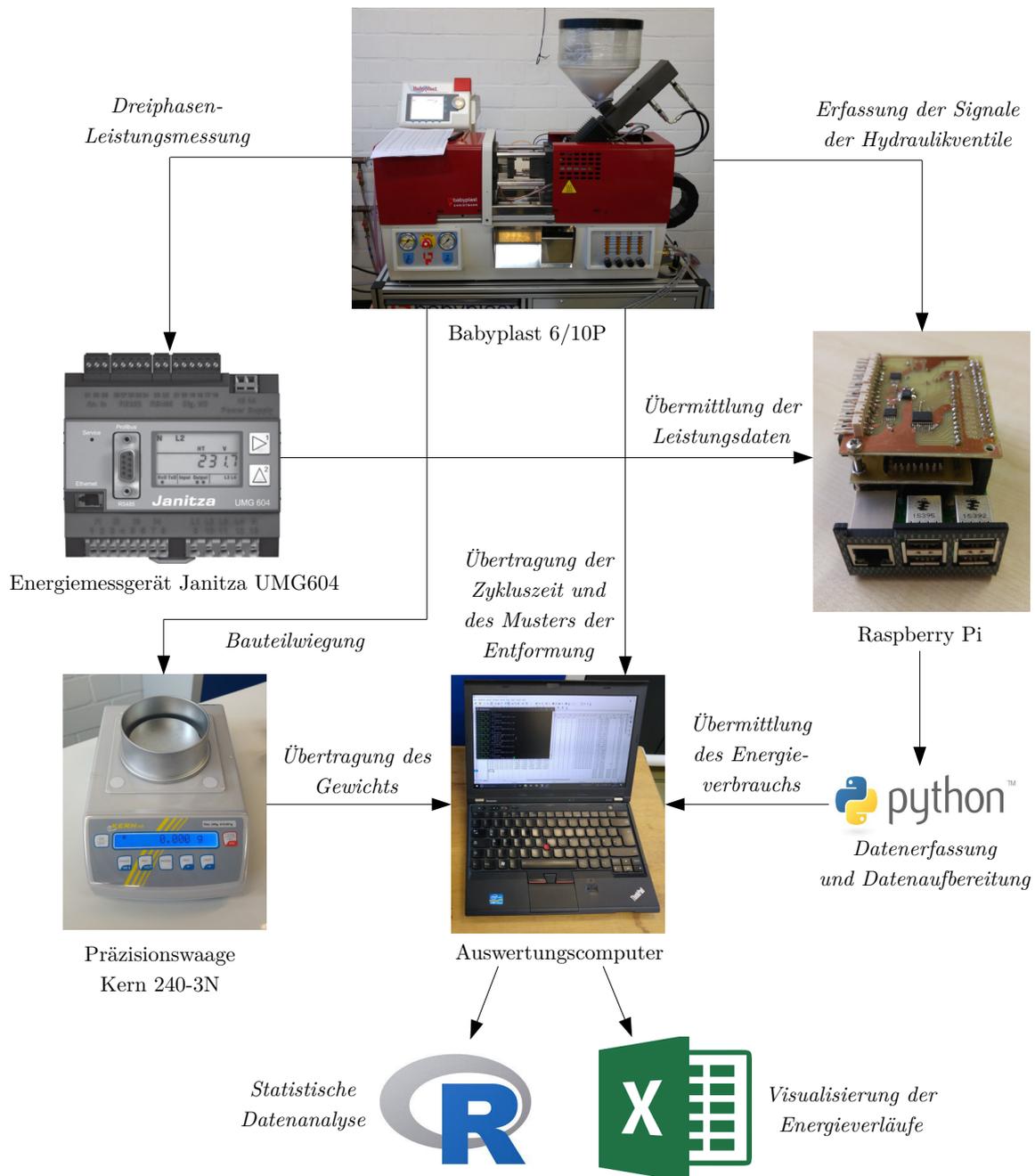


Abbildung 3.4: Schematischer Versuchsaufbau

Die Messung der Energie erfolgt über das Energiemessgerät UMG604 der Firma Janitza. Das Messgerät ist in Reihe zur Hauptstromversorgung der Spritzgießmaschine geschaltet (siehe Anhang A.1).

Um die Energie einzelner Zyklen gezielt messen zu können, werden parallel die Signale der Maschinenhydraulik erfasst (Abbildung 3.5).

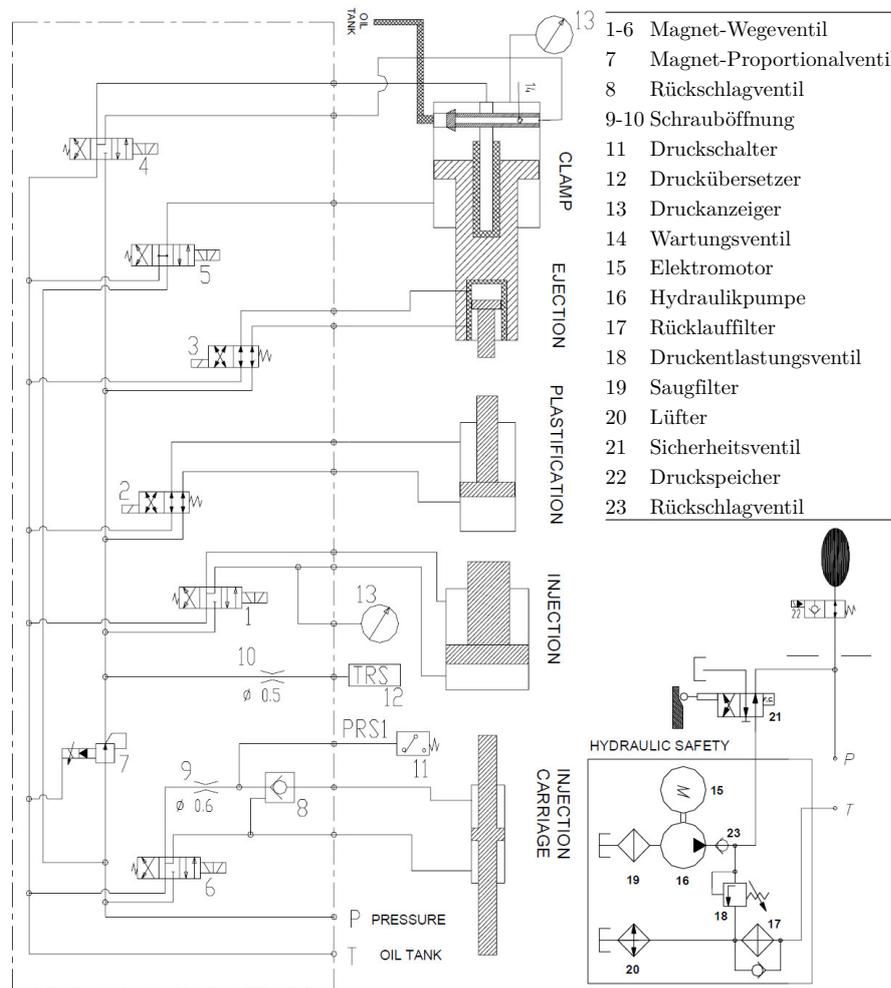


Abbildung 3.5: Schaltplan der Maschinenhydraulik, angepasst nach [3]

Das System besteht aus fünf separat angesteuerten Hydraulikkolben: Dem Kolben für die Schließeinheit (clamp), dem Auswerferkolben (ejection), dem Plastifizierkolben (plastification), dem Einspritzkolben (injection) und dem Kolben zur Fahrbewegung des Spritzaggregats (injection carriage). Um die Trägheit des Hydrauliksystems zu verringern ist ein Druckspeicher eingebunden. Die Hydraulikventilsignale werden über die entsprechende Ausgangsleiste der Maschinenelektrik erfasst (siehe Anhang A.2). Die Ausgänge sind mit folgender Bitabfolge belegt:

- bit 0 = Form geschlossen im Niederdruck (mould close in low pressure),
- bit 1 = Form geschlossen im Hochdruck (mould close in high pressure),
- bit 2 = Druckaufbau (pressure release),
- bit 3 = Form öffnet (mould open),
- bit 4 = Vorwärtsbewegung Spritzaggregat (injection carriage forward),
- bit 5 = Rückwärtsbewegung Spritzaggregat (injection carriage back),
- bit 6 = Einspritzen (injection),
- bit 7 = Dekompression (decompression),
- bit 8 = Plastifikation (plastification),
- bit 9 = Auswerfen (ejection).

In Tabelle 3.3 ist die qualitative Abfolge der Hydraulikventilsignale eines beispielhaften Maschinenzyklus in Bitmustern dargestellt.

Tabelle 3.3: Bitmuster Hydraulikventilsignale

byte	2 nd byte		1 st byte								Zyklusphase	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0		
sec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Leerlaufzustand
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Zyklus Start (Druckaufbau)
.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	Werkzeug schließt
.	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	Werkzeug geschlossen
.	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	Spritzaggregat vorfahren
.	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	Einspritzen / Nachdrücken
.	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	Plastifikation
.	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	Spritzaggregat Druckhaltung
10	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	Dekompression
.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Druckhaltung
.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	Werkzeug geschlossen
.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	Form öffnet
.	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Entformen / Auswerferhub
.	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Druckhaltung
.	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Entformen / Auswerferhub
20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	Zyklus Ende (Druckabbau)
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Leerlaufzustand

- ¹ Signal AN
- ⁰ Signal AUS

Die Bitmuster setzen sich aus den vorgenannten bits zusammen und indizieren die momentane Zyklusphase. Es ist nur die Abfolge dargestellt, nicht jedoch die Länge der jeweiligen Zyklusphase.

Ein Raspberry Pi fungiert als Datenaufnahme- und Datenaufbereitungsserver und wird per Fernzugriff über SSH und SFTP vom Auswertungscomputer aus bedient. Pythonskripte übernehmen die Aufgabe der Datenverarbeitung (siehe Anhang B). Anhand der in Tabelle 3.3 dargestellten, immer gleich verlaufenden Abfolge der Signale der Hydraulikventile, wird mittels Datenloggerskript Start und Ende eines Zyklus ermittelt und die Gesamtmaschinenleistung während des Zyklus alle 0,05 s aufgezeichnet. Ein Aufbereitungsskript integriert die Leistungswerte und errechnet die über den Zyklus verbrauchte Energie. Die Bauteilgewichte werden über eine Präzisionswaage der Firma Kern, Modell 240-3N, gewogen. Die Entformung wird nach jedem Zyklus ihrem Muster zugeordnet und die Zykluszeit der Qualitätsüberwachung der Maschine entnommen. Die so ermittelten Werte werden in die Versuchspläne übertragen.

Zur statistischen Datenanalyse wird die freie Programmiersprache **R** verwendet. Diese Sprache ist speziell für statistische Anwendungen entwickelt worden. Standardmäßig wird **R** mit einem Interpreter als Kommandozeilenumgebung mit rudimentären grafischen Schaltflächen ausgeführt. Zusätzlich werden die Energieverläufe mit Excel visualisiert.

Die Arbeitsschritte, die zum Aufbau der Messtechnik nötig sind, sind in Abbildung 3.6 abgebildet.

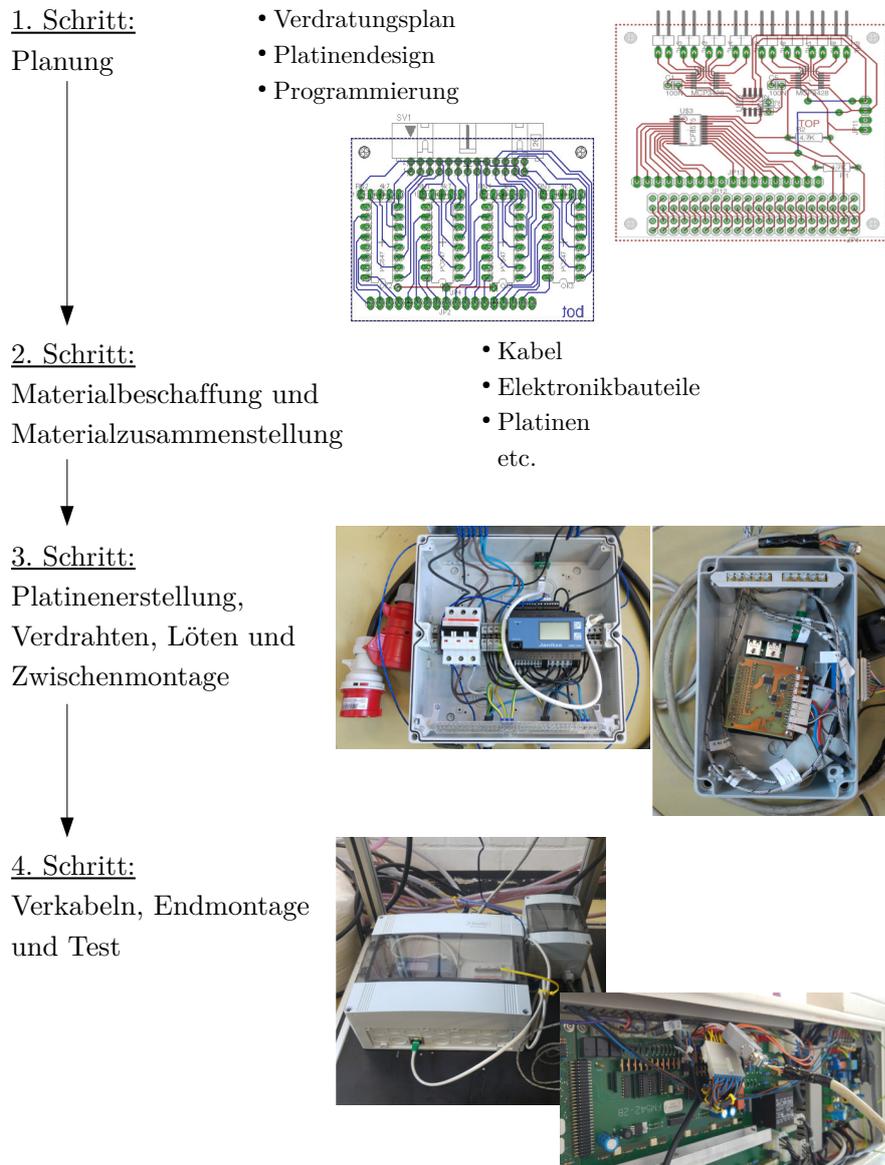


Abbildung 3.6: Arbeitsablaufdiagramm

Zu Beginn der Planung steht die Überlegung, ob ein gewöhnlicher PC als Datenserver dienen soll, oder der Raspberry Pi. Der Raspberry Pi wird bevorzugt, da er über digitale Ein- und Ausgänge verfügt, insbesondere über solche, die die i^2c -Bus-Struktur besitzen. Durch Erweiterung der i^2c -Pins auf der Platine des Raspberry Pi über einen Portexpander ist es möglich, jedes Signal der Hydraulikventile einzeln zu erfassen. Weitere Arbeitsschritte sind die Planung der Verdrahtung, das Design der Platinen, die Einrichtung des Raspberry Pi und die Programmierung der Pythonskripte.

Auf die Planung folgt die Beschaffung und Zusammenstellung der fehlenden Bauteile sowie der Zusammenbau. Die Erweiterungsplatinen für den Raspberry Pi werden mittels UV-Belichtung und Ätzbad hergestellt, anschließend verlötet und auf den Raspberry Pi montiert. Das Janitza-Energiemessgerät ist auf allen drei Phasen als Zwischenstecker verdrahtet. Der Raspberry Pi sowie das Energiemessgerät sind in separaten Gehäusen untergebracht. Die Messtechnik wird schließlich an die Spritzgießmaschine angeschlossen und auf Funktion geprüft.

Kapitel 4

Versuchsplanung und Modellbildung

Die Vorgehensweise bzw. die grundsätzlichen Fragestellungen bei der Versuchsplanung und Modellbildung zeigt die nachfolgende Aufzählung. Dieser Prozess wird mitunter mehrmals durchlaufen, bis das für die Zwecke des Spritzgießens richtige Modell gefunden ist.

1. Versuchsplan
 - Erfüllt der Versuchsplan die Erwartungen an die Versuchsreihe ?
2. Beschreibungsmodell
 - Welche Faktoren spielen eine Rolle ?
 - Sind die Effekte reproduzierbar ?
 - Treten Wechselwirkungen auf, sind diese signifikant ?
 - Sind Nichtlinearitäten vorhanden ?
3. Genauigkeit
 - Eine nicht vorhandene Reproduzierbarkeit der Versuchsstreuung führt zu Abweichungen bzw. Ungenauigkeiten zwischen Vorhersage und Testergebnis.
 - Weiterhin führen folgende Gegebenheiten zu Ungenauigkeiten: Ausreißer, Modellvereinfachungen, nicht konstant gehaltene Einflussfaktoren, Güte des Beschreibungsmodells, Pannen bei der Versuchsdurchführung. [14]

Zur besseren Übersichtlichkeit dient das Flussdiagramm in Abbildung 4.1 als roter Faden für die kommenden zwei Kapitel (Kapitel 4 und 5). Ausgehend von den Eingangsdaten werden zunächst die Zielgrößen und Faktoren ausgewählt. Darauf folgend werden Vorversuche unternommen, um erste Erkenntnisse hinsichtlich der Faktoren, Faktorstufen, Zielgrößen, Prozessfenster etc. zu erhalten. Mithilfe eines Screenings, einem Versuchsplan der Auflösung \overline{IV} , wird festgestellt, ob Haupteffekte relevant sind und ob Faktoren vernachlässigt oder zusammengelegt werden können. Nachdem die Faktoren eingegrenzt und zusammengelegt sind, folgen die Hauptversuche mit der höheren Auflösung \overline{V} , zunächst auf zwei Faktorstufen (Versuchsplan 1. Ordnung) und schließlich auf fünf Faktorstufen (Versuchsplan 2. Ordnung). Die Relevanz der Faktoren wird bei dem Versuchsplan 1. Ordnung mittels Effektuntersuchung festgestellt und bei dem Versuchsplan 2. Ordnung mittels RSM-Analyse (Response Surface Methodology). Die Modelle der Hauptversuche werden statistisch bewertet und die Effekte der Faktoren mittels Varianzanalyse (ANOVA) auf Signifikanz geprüft. Der Verlauf der Energie wird ebenso untersucht. Durch weitere Versuche werden die Modelle aus den Hauptversuchen hinsichtlich Geometrie- und Materialunabhängigkeit validiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden abschließend Optimierungspotenziale abgeleitet und erprobt.

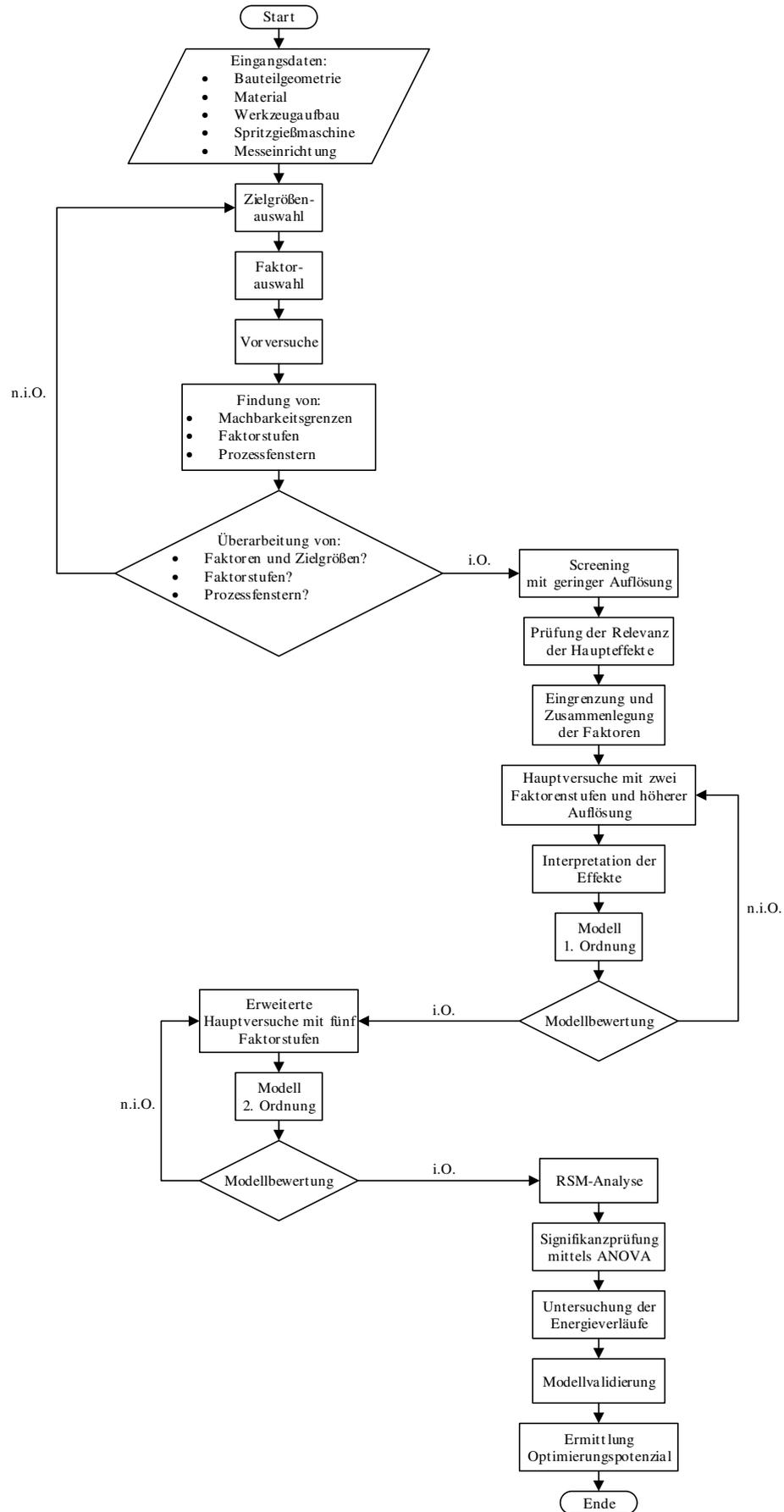


Abbildung 4.1: Flussdiagramm zur Versuchsplanung

4.1 Auswahl der Zielgrößen und Faktoren

Zu Beginn der statistischen Versuchsplanung (SVP) steht die Auswahl der Zielgrößen und Faktoren. Die Aufgabenstellung lautet, den Energieverbrauch unter Berücksichtigung der Bauteilqualität, Prozesseffizienz und Prozessstabilität zu untersuchen. Es werden daher die folgenden vier als interessant eingestufte Zielgrößen entsprechend ihrer Bedeutung für den Prozess bzw. des Bauteils festgelegt:

1. Gewicht \bar{g} (Bauteilqualität),
2. Energieverbrauch \bar{e} (Prozesseffizienz),
3. Entformung \overline{ent} (Prozessstabilität, Störungsanfälligkeit),
4. Zykluszeit \bar{z} (Prozesseffizienz).

Die Auflistung enthält zusätzlich die Symbole der Zielgrößen. Es handelt sich um gemittelte Ergebnisse mehrerer Realisationen. Bei der Wahl der Zielgrößen ist es entscheidend, gut quantifizierbare und reproduzierbare Zielgrößen auszuwählen.

Es wäre hinsichtlich der Bauteilqualität theoretisch möglich, weitere Zielgrößen wie z.B. die Schwindung oder die Bauteilmaße mit in die Untersuchung aufzunehmen. Vorversuche ergaben jedoch insbesondere bei der Schwindung einen unverhältnismäßig hohen Versuchsaufwand und eine sehr große Streuung, sodass eine einwandfreie Effektbestimmung nicht gewährleistet gewesen wäre. Die Schwindung variiert von Versuchsteil zu Versuchsteil, zudem zieht sich der Schwindungsprozess, sodass eine Vermessung erst nach 24 Stunden empfohlen wird. [1]

Die Zykluszeit weist die höchste Reproduzierbarkeit auf, da diese direkt abhängig ist von den in den Maschineneinstellungen vorgenommenen Eingaben. Dies bestätigt sich auch in der Untersuchung.

Der Energieverbrauch hat eine annähernd ähnlich hohe Reproduzierbarkeit. Die Genauigkeit hängt von dem Messintervall des Messgeräts ab.

Die Entformung erfüllt eigentlich nicht die beiden genannten Kriterien, sie verbleibt jedoch in der Auswahl, da ein stabiler Prozess entscheidend ist für die Serienproduktion. Die Aufzeichnung dieser Zielgröße ist zudem mit sehr geringem Aufwand möglich.

Theoretische Überlegungen, Vorversuche (Abschnitt 4.2.1) und eine Literaturrecherche führen in erster Instanz zu den wichtigsten Faktoren für die gewählten Zielgrößen. Die Faktoren sind mit Bedacht gewählt, um deren Anzahl und somit auch den Versuchsumfang möglichst klein zu halten.

Nach JAROSCHEK sind

- Schmelztemperatur,
- Werkzeugtemperatur,
- Nachdruck,
- Einspritzzeit,
- Nachdruckzeit
- und Kühlzeit

entscheidend für die Maße, den Verzug, die Bindehaftfestigkeit, die Eigenspannung, das Gewicht und die Schwindung des Bauteils. [13]

BOURDON gibt folgende Faktoren als relevant für die Bauteilqualität an:

- Werkzeugtemperatur,
- Zylindertemperatur,
- Nachdruck,
- Restkühlzeit,
- Umschaltpunkt. [2]

Über das Bauteilgewicht hinaus sind die Maße, die Schwindung, die Oberflächengüte und die mechanischen Eigenschaften des Bauteils in dieser Aufzählung berücksichtigt.

Die einstellbaren Zeiten, die Fahrwege und die Zylindertemperatur haben starken Einfluss auf die Zykluszeit und sollten optimiert werden. [23]

SPIERING gibt unter den Prozessparametern die Schließkraft und den Kühlmitteldurchfluss als wichtig für den Energieverbrauch an. [21]

Diese Erkenntnisse und gesammelte Erfahrungen während der Vorversuche ergeben das in Abbildung 4.2 dargestellte Schema. Das System ist in seiner Gesamtheit mit den Faktoren und Zielgrößen als Ishikawa-Diagramm dargestellt.

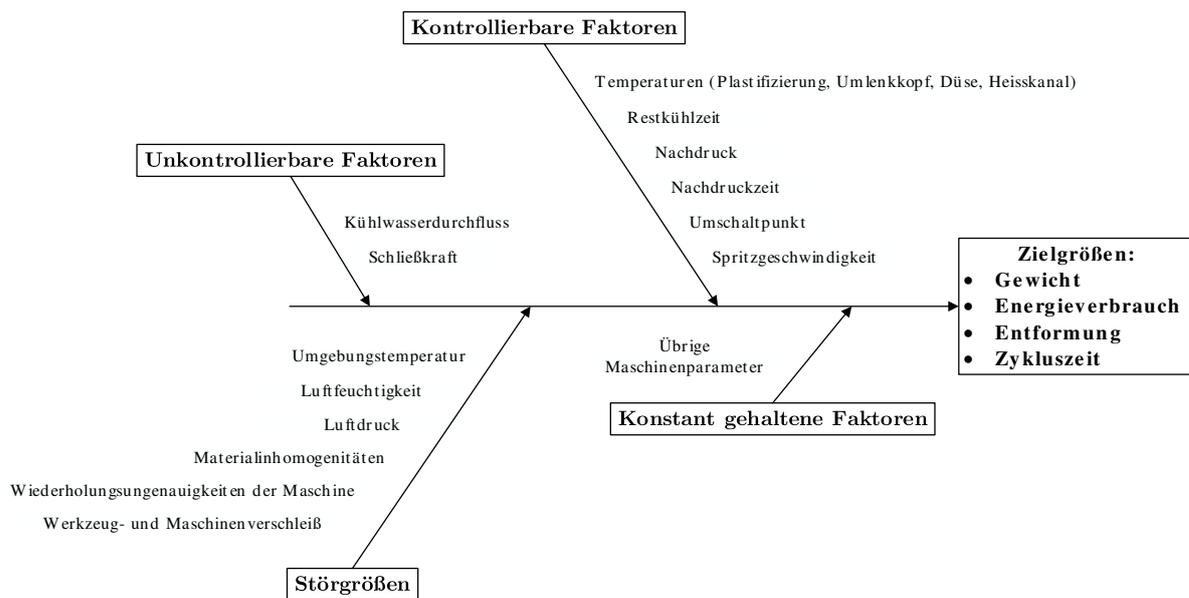


Abbildung 4.2: Ursache-Wirkungs-Diagramm für das zu untersuchende System

Unter den kontrollierbaren Faktoren, sind alle Faktoren zusammengefasst, die variiert werden sollen. Bis auf die Werkzeugtemperatur, die Schließkraft, die Fahrwege und den Kühlmitteldurchfluss sind alle vorgenannten Ergebnisse aus der Literaturrecherche enthalten. Die Werkzeuge werden i.d.R mit einem externen Aggregat temperiert. Dadurch entspricht die am Aggregat eingestellte Temperatur der Temperatur am Werkzeug erst, nachdem viel Zeit verstrichen ist. Die Variation der Werkzeugtemperatur ist somit für die Versuchszwecke ungeeignet. Bei PP ist selten eine Beheizung des Werkzeugs notwendig. Bei der Verarbeitung von PP wird sogar mitunter empfohlen, die Werkzeugtemperatur weit unter Umgebungstemperatur einzustellen. [13] Zur Validierung der Materialunabhängigkeit wird die Werkzeugtemperatur im Abschnitt 5.1 als konstanter Faktor hinzugezogen.

Zu den unkontrollierbaren Faktoren gehören die Schließkraft und der Kühlwasserdurchfluss. Eine Anpassung der Schließkraft ist bei der Babyplast 6/10P nicht vorgesehen. Die Schließkraft beträgt immer 62,5 kN. Bei dem Kühlwasserdurchfluss handelt es sich genau genommen nicht um einen unkontrollierbaren Faktor. Die Durchflussmengen werden über einfache Durchflussventile eingestellt, die nicht selbsttätig nachregeln. Dadurch kommt es bei Vor- und Nachdruckschwankungen zu veränderten Durchflussraten. Die Durchflussrate kann also nicht ausreichend konstant gehalten werden und lässt sich nicht exakt einstellen. Diese ungenügende Genauigkeit bei der Einstellung führt zu statistisch nicht auswertbaren Ergebnissen. Der Kühlwasserdurchfluss wurde nach jedem Versuch von Hand nachjustiert, um eine Ergebnisverfälschung so weit wie möglich zu unterdrücken.

Die Störgrößen entziehen sich i.d.R. immer der Kontrollierbarkeit. Mittels Klimazelle könnten Umgebungsbedingungen angepasst werden, dies bleibt aufgrund des hohen Aufwands jedoch nur Forschungseinrichtungen o.Ä. vorbehalten.

Alle übrigen Maschinenparameter werden bei den Versuchen konstant gehalten, um eine Ergebnisverfälschung zu unterbinden. Bei der vorgenommenen Faktorwahl handelt es sich nicht um alle beeinflussenden Faktoren für die gewählten Zielgrößen. Um den Versuchsumfang zu reduzieren muss jedoch eine Einschränkung in dieser Hinsicht in Kauf genommen werden. Ferner ist eine Extrapolation über das in den Versuchen gewählte Prozessfenster hinweg nicht möglich. Es können nur Aussagen über die Faktor-Zielgrößen-Beziehungen innerhalb des Prozessfensters getroffen werden.

4.2 Vorversuche und Screening

Vorversuche dienen in der SVP zum einen dazu, ein Ausgangsparameterset zu finden, von dem aus die Faktorstufen festgelegt werden. Dieses Parameterset wird über die konventionelle One-factor-at-a-time-Methode in Verbindung mit einem gängigen, konventionellen Optimierungsschema ermittelt. Zum anderen dienen Screeningversuche dazu, die im Abschnitt 4.1 festgelegten Faktoren in ihrer Wichtigkeit zu bestätigen und geeignete Prozessfenster der Faktoren zu finden. Hierdurch wird gewährleistet, dass jede Einstellung in den Versuchsplänen praktisch umsetzbar ist und brauchbare Bauteile erzeugt werden.

4.2.1 Vorversuche

Folgendes Versuchsschema wird angewendet, um das Ausgangsparameterset zu finden. Dieses Schema bildet die Suche der Spritzparameter bei konventioneller Vorgehensweise ab. Das Bauteil wird hierbei hinsichtlich Gewicht, Oberfläche, Schwindung und Grat beurteilt und optimiert.

1. Die Temperaturen werden anhand des Materialdatenblatts festgelegt.
2. Die projizierte Fläche des Bauteils wird berechnet und anhand derer die Schließkraft ermittelt. Die Schließkraft ist bei der Babyplast 6/10P nicht variierbar, daher entfällt in diesem Fall dieser Punkt.
3. Das Volumen des Bauteils wird bestimmt. Der Dosierweg wird berechnet und zusätzlich das Restmassepolster und die Dekompression berücksichtigt. Das verbleibende Restmassepolster sollte so gering wie möglich gehalten werden. Gegebenenfalls wird zusätzlich eine Formfüllstudie durchgeführt. Die Zyklen werden bei der Formfüllstudie nur mit Einspritzdruck ausgeführt und der Nachdruck abgeschaltet.
4. Die Einspritzgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie gewählt. Der Einspritzdruck und die Einspritzzeit ergeben sich aus der eingestellten Einspritzgeschwindigkeit.

5. Der Nachdruck wird bei zunächst kurzer Nachdruckzeit festgelegt.
6. Es wird nachgeprüft, ob der Einspritzdruck und das Dosiervolumen ausreichen, um das Formnest zu füllen. Gegebenenfalls wird der Umschaltpunkt in Richtung Nachdruckbereich bei gleichzeitigem Anpassen des Einspritzdrucks verschoben. Hierdurch ergibt sich wiederum ein höheres Dosiervolumen.
7. Durch Anpassen des Nachdrucks und der Nachdruckzeit ergibt sich nun die Optimaleinstellung. Der Nachdruck wird zunächst erhöht, bis ein optisch befriedigendes Bauteil produziert wird. Anschließend wird die Nachdruckzeit so lange verlängert, bis der Siegelpunkt erreicht ist und die Gewichtszunahme beendet ist.
8. Die Prozessstabilität wird über die Zykluszeit und das Restmassepolster kontrolliert. Ist der Prozess stabil, ergeben sich konstante Werte für die Zykluszeit und das Restmassepolster.

Die durch diese Vorgehensweise gefundenen optimalen Einstellungen finden sich in Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Ausgangsparameterset und Machbarkeitsgrenzen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Optimum	Machbarkeitsgrenzen		Einheit
			oben	unten	
Plastifizierungstemperatur	T_P	230	220	250	°C
Umlenkkopftemperatur	T_U	230	220	250	°C
Düsentemperatur	T_D	230	220	250	°C
Heisskanaltemperatur	T_H	230	220	250	°C
Restkühlzeit	t_K	4	0	8	s
Nachdruck	p_N	30	20	40	bar
Nachdruckzeit	t_N	17	13	21	s
Umschaltpunkt Nachdruck	s_U	9	7	11	mm
Spritzgeschwindigkeit	v	40	10	70	%

In der Tabelle sind zusätzlich die umsetzbaren Prozessober- und untergrenzen der einzelnen Maschinenparameter angegeben, welche über weitere Versuche ermittelt wurden. Im Fall der Temperaturen kann die im Datenblatt (siehe Tabelle 3.2 auf Seite 25) angegebene Temperaturuntergrenze nicht erreicht werden, da der Kunststoff ab ca. 215 - 220 °C im Heisskanal erstarrt. Ebenso müssen die Nachdruckzeit t_N und die Restkühlzeit t_K ausreichen, um eine sichere Entformung zu gewährleisten. Die Spritzgeschwindigkeit v muss bei einem geringen Nachdruck p_N entsprechend hoch gewählt werden, respektive die Temperaturen, da die Kunststoffschmelze bei niedrigen Temperaturen eine höhere Viskosität aufweist. Der einstellbare Nachdruck p_N entspricht dem hydraulischen Systemdruck, der am Einspritzkolben anliegt. Dieser kann in den spezifischen Spritzdruck per Spritzdruckdiagramm umgerechnet werden. Das Verhältnis vom hydraulischen Systemdruck zum Spritzdruck beträgt ca. 1:10. Die Lage des Umschaltpunktes s_U ist auf den Bereich der gerade abgeschlossenen Formfüllung festgelegt. Die Spritzgeschwindigkeit kann an der Spritzgießmaschine nicht durch Absolutwerte eingestellt werden. Es wird die relative Höhe der Frequenz des Frequenzumrichters der Hydraulikpumpe eingestellt.

Ausgehend von den Werten in Tabelle 4.1 werden erste Versuchspläne erstellt und durchgeführt. Hieraus können die Erkenntnisse aus folgender Aufzählung gewonnen werden. Die Erkenntnisse und ggfs. angewandte Maßnahmen sind der Übersicht halber in gekürzter Form dargestellt.

1. Erkenntnis: Ein erster Versuchsplan offenbart einen hohen Einfluss der Spritzgeschwindigkeit v auf den Energieverbrauch. Die Energieverläufe in Abbildung 4.3 zeigen dies sehr anschaulich.

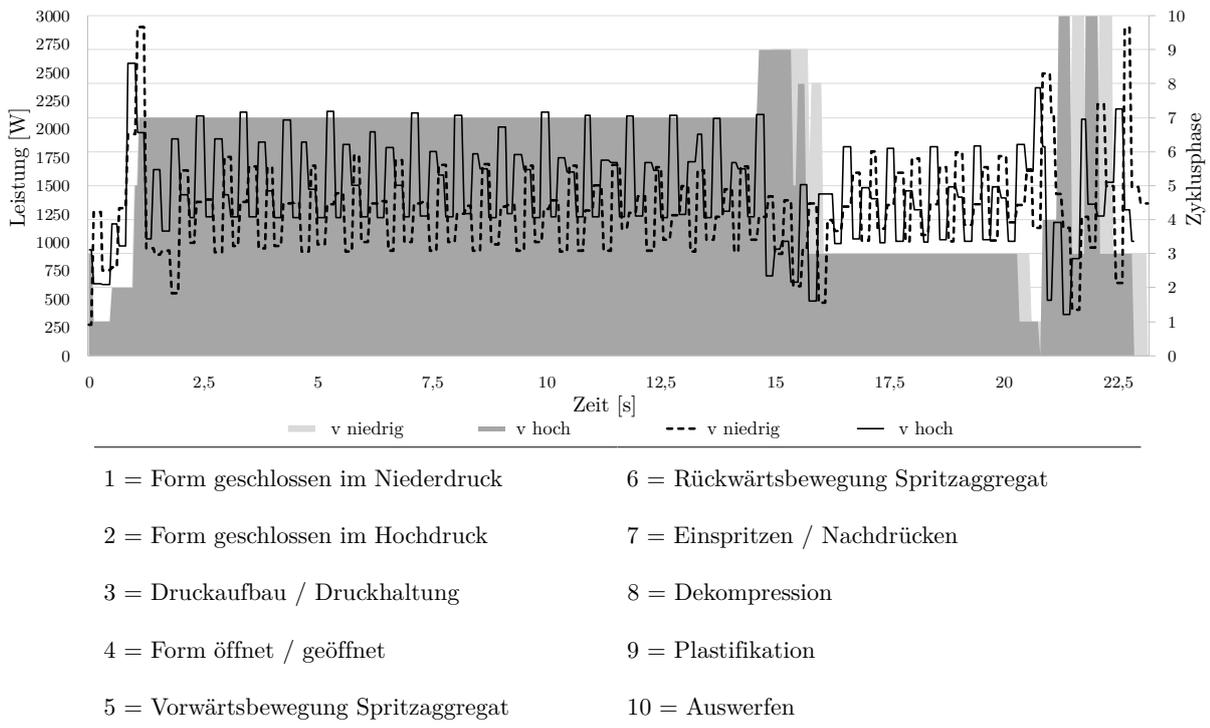


Abbildung 4.3: Energieverlauf

Zu sehen ist der Verlauf eines exemplarischen Zyklus bei geringer und hoher Spritzgeschwindigkeit v (gestrichelter und durchgezogener Graph). Die Zyklusphasen sind durch die grau hinterlegten Flächen gekennzeichnet. Die benötigte Leistung fällt insbesondere im Nachdruckbereich durchweg höher aus, da die Hydraulikpumpe die eingestellte Drehzahl über den gesamten Zyklus beibehält.

Maßnahme: Die Spritzgeschwindigkeit v wird in zwei Spritzgeschwindigkeiten (v_1 und v_2) unterteilt. Die Babyplast 6/10P lässt eine Unterteilung in maximal zwei Spritzgeschwindigkeiten zu. Der Umschaltzeitpunkt für die Spritzgeschwindigkeiten s_{Uv} wird zunächst konstant im Bereich der vollständigen Formfüllung belassen.

2. Erkenntnis: Ein weiterer Versuchsplan deutet auf einen signifikanten Einfluss des Umschaltzeitpunktes der Spritzgeschwindigkeit s_{Uv} auf den Energieverbrauch hin. Da die Spritzgeschwindigkeiten v_1 und v_2 als signifikante Einflüsse vermutet werden, erscheint dies schlüssig.

Maßnahme: Der Faktor „Umschaltzeitpunkt Geschwindigkeit s_{Uv} “ wird hinzugenommen.

3. Erkenntnis: Es wird versucht, den Versuchsumfang durch Ausschluss der Plastifizierungs- und Düsentemperatur T_P und T_D zu reduzieren, da diese die niedrigste Relevanz unter den Temperaturen besitzen. Kritisch hierbei sind die Wechselwirkungen. Werden diese beiden Temperaturen (T_P und T_D) auf konstantem Niveau gehalten, hat dies Einfluss auf die beiden als Faktor behandelten Temperaturen (T_U und T_H).

Maßnahme: Zunächst werden alle vier Temperaturen als Faktoren beibehalten, da dies beim Screening aufgrund der geringen Auflösung der Versuchspläne unproblematisch ist.

4. Erkenntnis: Die Entformung hat eine weite Streuung und somit geringe Reproduzierbarkeit.

Maßnahme: Die Anzahl der Realisationen der Entformung werden erhöht und die Entformung in drei, bei zuvor zwei Mustern (0 und 1), Muster eingeteilt:

- 0 = Nicht entformt (Düsenseite),
- 0,8 = Nicht entformt (Auswerferseite),
- 1 = Entformt.

Die Entformung ist eine normierte Größe, deren Wert zwischen 0 und 1 liegt. Die beiden Muster, bei denen das Bauteil nicht entformt wird, sind in Abbildung 4.4 zu sehen.

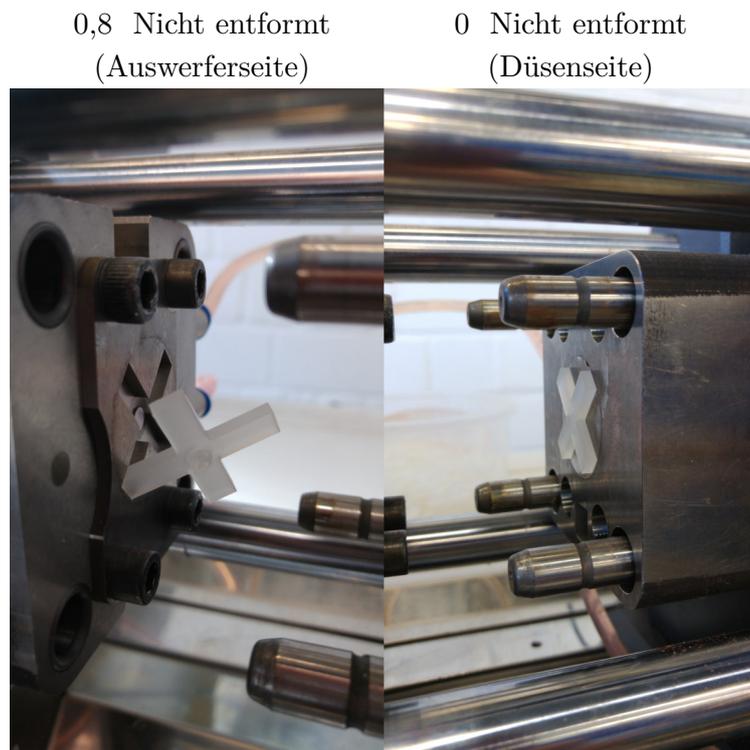


Abbildung 4.4: Muster zur Entformung des Bauteils

Die Größenordnung für das zweite Muster (0,8 = Nicht entformt (Auswerferseite)) ist über Testmodelle entstanden. Die besten Modellgüten ergeben sich mit diesem Wert.

5. Erkenntnis: Das thermische Gleichgewicht stellt sich nach ca. 5 - 10 „Schüssen“ ein, je nach variierten Faktoren. Verifiziert wird dies durch annähernd stationäre Zustände des Energieverbrauchs, des Restmassopolsters und der Zykluszeit.

4.2.2 Screening

Für den Screeningplan wird ein fraktionierter Versuchsplan mit der Auflösung $\overline{\text{IV}}$ und 32 Versuchen gewählt. Die Eigenschaften des Versuchsplans werden in Anhang D.1 detailliert erläutert. Mit diesem Plan lassen sich nur relevante Haupteffekte identifizieren, keine Wechselwirkungseffekte. Eine Übersicht über die Faktoren und Faktorstufen des Versuchsplans ist in Tabelle 4.2 gegeben.

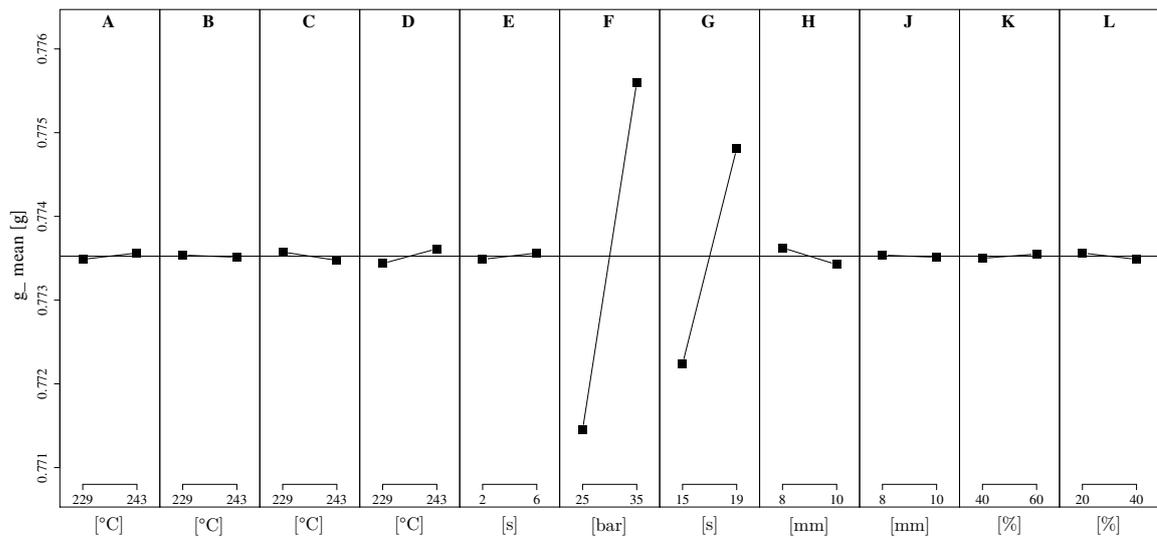
Tabelle 4.2: Screening: Faktoren und Faktorstufen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Kodierung	Faktorstufe		Einheit
			–	+	
Plastifizierungstemperatur	T_P	A	229	243	°C
Umlenkkopftemperatur	T_U	B	229	243	°C
Düsentemperatur	T_D	C	229	243	°C
Heisskanaltemperatur	T_H	D	229	243	°C
Restkühlzeit	t_K	E	2	6	s
Nachdruck	p_N	F	25	35	bar
Nachdruckzeit	t_N	G	15	19	s
Umschaltpunkt Nachdruck	s_U	H	8	10	mm
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	s_{Uv}	J	8	10	mm
1. Spritzgeschwindigkeit	v_1	K	40	60	%
2. Spritzgeschwindigkeit	v_2	L	20	40	%

Es handelt sich demnach um einen 2^{11-6} -Plan, da 11 Faktoren untersucht werden und nur 32 Versuche benötigt werden ($2^{11-6} = 2^5 = 32$). Der vollständige Screening-Plan findet sich in Anhang E.1. Die Abstimmung der Faktorstufen findet unter Berücksichtigung der ergänzenden Sternpunktversuche des zentral zusammengesetzten Versuchsplans (Abschnitt 4.3.2) statt, sodass ein Großteil des Machbarkeitsbereichs eingeschlossen ist. Der Abstand zwischen den Faktorstufen darf einerseits nicht zu klein gewählt werden, da hiermit eine Überdeckung der Effekte durch deren Zufallsstreuung eintreten kann. Andererseits führen zu groß gewählte Abstände zwischen den Faktorstufen zu Ungenauigkeiten bei der Abbildung des funktionalen Zusammenhangs. Darüber hinaus wird dafür Sorge getragen, dass das Restmassepolster für alle möglichen Faktorstufenkombinationen ausreicht. Durch diese Vorgehensweise werden Extremwerte der Drücke und Temperaturen berücksichtigt.

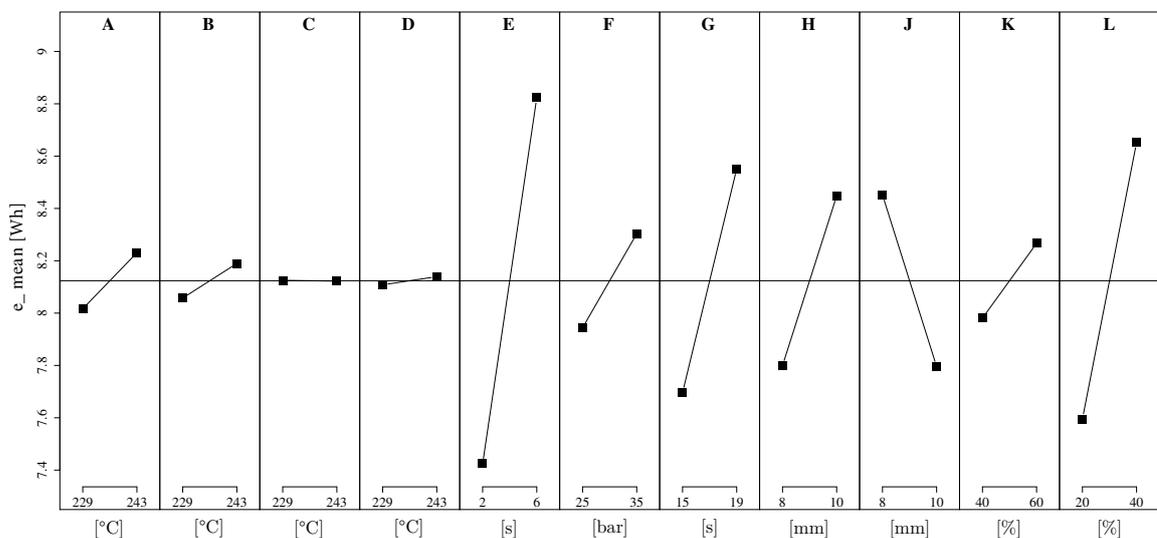
Zur Untersuchung der Haupteffekte dienen die folgenden Effektplots jeder einzelnen Zielgröße (Abbildung 4.5 bis Abbildung 4.8) und der Normalplot für alle vier Zielgrößen in Abbildung 4.9. Die Effektplots bilden die Effekte zwischen niedriger und hoher Faktorstufe der Faktoren ab (vgl. Gleichung 2.10 auf Seite 14). Ein Effekt ist demnach umso stärker, je größer der Unterschied zwischen unterer und oberer Faktorstufe ausfällt. In den Plots deutet eine hohe Steigung der Verbindungslinie auf einen starken Effekt hin. In den Normalplots werden von dem Berechnungsprogramm zusätzlich die Wechselwirkungen ausgegeben. Die Wechselwirkungen haben für das Screening keine Bedeutung, da aufgrund der niedrigen Versuchsplanauflösung und der damit verbundenen hohen Vermengung nur unter den Faktoren unterschieden werden kann, nicht aber unter den Wechselwirkungen.

Für das Gewicht \bar{g} haben nach Abbildung 4.5 insbesondere der Nachdruck p_N (Faktor F) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor G) starken Effekt.


 Abbildung 4.5: Screening: Effektplot zum Gewicht \bar{g}

Ist der Nachdruck hoch und die Nachdruckzeit lang, erhöht sich das Gewicht \bar{g} maßgeblich. Dies ist plausibel, da der Nachdruck entscheidenden Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Es wird ein möglichst hohes Gewicht angestrebt. Durch den hohen Nachdruck und die lange Verweilzeit des Nachdrucks, wird mehr Material in das Formnest gedrückt. Es kommt zur Annäherung an den Siegelpunkt. Weiterhin ist ein sehr schwacher Effekt der Heisskanaltemperatur T_H (Faktor D) und des Umschaltzeitpunktes für den Nachdruck s_U (Faktor H) gegeben. Eine hohe Heisskanaltemperatur erhöht leicht das Gewicht \bar{g} , da die Temperatur unmittelbar vor dem Formnest durch Abnahme der Viskosität der Schmelze und dem damit verbundenen niedrigeren Druckverlust die Formfüllung erleichtert. Frühzeitiges Umschalten führt zu geringerem Gewicht \bar{g} , da weniger Material eingespritzt wird (bei 10 mm Kolbenweg). Der Kolbenweg entspricht dem Abstand vom Formnest aus gesehen (vgl. Abbildung 2.3 auf Seite 4). Der Normalplot (oben links in Abbildung 4.9) bestätigt die Ergebnisse aus dem Effektplot.

Der Energieverbrauch \bar{e} wird von deutlich mehr Faktoren maßgeblich beeinflusst, als das Gewicht \bar{g} (Abbildung 4.6).


 Abbildung 4.6: Screening: Effektplot zum Energieverbrauch \bar{e}

Beginnend von links in Abbildung 4.6 haben die Plastifizierungstemperatur T_P (Faktor A) und die Umlenkkopftemperatur T_U (Faktor B) einen vergleichsweise geringen, aber erkennbaren, Effekt. Die Düsentemperatur T_D (Faktor C) und die Heisskanaltemperatur T_H (Faktor D) haben keinen relevanten Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} . Die Restkühlzeit t_K (Faktor E) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor G) haben neben der zweiten Spritzgeschwindigkeit v_2 (Faktor L) den stärksten Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} . Längere Zeitspannen verursachen einen hohen Energieverbrauch. Ebenso verhält es sich bei der Spritzgeschwindigkeit. Der Einfluss der beiden Spritzgeschwindigkeiten ist gleichwertig, da der Umschaltzeitpunkt für die Geschwindigkeit s_{Uv} (Faktor J) lediglich die Dauer der Spritzgeschwindigkeiten ändert. Dies lässt der Unterschied im Effektplot zwischen 1. Spritzgeschwindigkeit v_1 (Faktor K) und 2. Spritzgeschwindigkeit v_2 (Faktor L) nicht erahnen. Eine höhere Spritzgeschwindigkeit führt zu einer höheren Drehzahl der Hydraulikpumpe und damit zu einem höheren Energieverbrauch. Der Nachdruck p_N (Faktor F) hat einen geringen Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} , welcher sich im Laufe der weiteren Versuche als nicht relevant herausstellen wird. Dass der Effekt hier zu erkennen ist, lässt sich durch die veränderten Systemgrenzen im Vergleich zu den folgenden Versuchen erklären. Die Feststellung der Relevanz bzw. Signifikanz mit statistischen Tests ist nur aufgrund der Verhältnisse innerhalb des zu untersuchenden Systems möglich. Die Effekte der beiden Umschaltzeitpunkte s_U und s_{Uv} (Faktor H und J) erklären sich durch den Einfluss des Nachdrucks und der Spritzgeschwindigkeiten. Je früher auf den Nachdruck umgeschaltet wird (Umschaltzeitpunkt Nachdruck s_U (Faktor H)), desto höher fällt der Energieverbrauch aus, da dies auch bei hohem Nachdruck der Fall ist. Umgekehrt verhält es sich bei dem Umschaltzeitpunkt für die Geschwindigkeit s_{Uv} (Faktor J): Dadurch, dass die 1. Spritzgeschwindigkeit v_1 (Faktor K) auf höherem Niveau variiert wird, und damit durchweg höher (oder gleich) ausfällt, ist der Energieverbrauch \bar{e} bei frühem Umschalten niedriger.

Ebenso wie der Energieverbrauch \bar{e} hängt auch die Entformung \overline{ent} des Bauteils von vergleichbar vielen Faktoren ab (Abbildung 4.7).

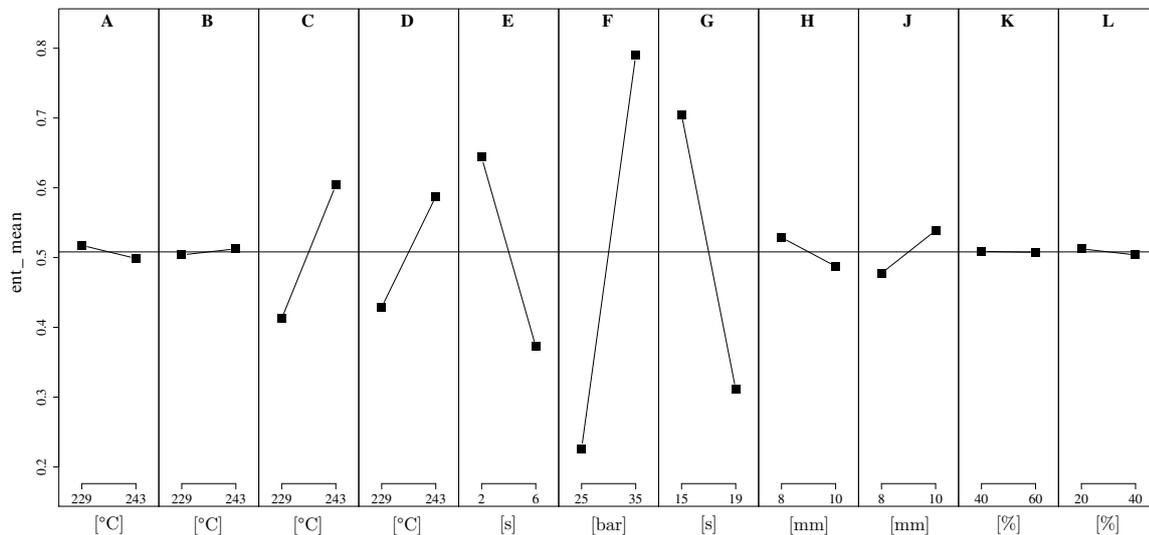


Abbildung 4.7: Screening: Effektplot zur Entformung \overline{ent}

Stärksten Effekt hat der Nachdruck p_N (Faktor F). Ist der Nachdruck hoch, so wird das Bauteil gut entformt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Bauteil durch höheren Druck stärker in das Formnest gepresst wird und der Entformungsimpuls durch die Auswerfer schlagartiger ausfällt. Es kommt zu einem „Herausschießen“ aus dem Formnest. Längere Restkühlzeiten t_K (Faktor E) und Nachdruckzeiten t_N (Faktor G) verschlechtern die Entformung \overline{ent} . Durch die

damit verbundene stärkere Abkühlung schwindet das Bauteil und sitzt somit gelockert im Formnest. Die Temperaturen direkt vor dem Formnest, die Düsentemperatur T_D (Faktor S) und die Heisskanaltemperatur T_H (Faktor D), verbessern die Entformung \overline{ent} . Höhere Temperaturen führen zu weniger viskosem Material und damit zu einem geringeren Druckverlust, die Form füllt sich stärker und das Teil hat einen festeren Sitz (höhere Pressung). Die Plastifizierungstemperatur T_P (Faktor A), die Umlenkkopftemperatur T_U (Faktor B) sowie beide Spritzgeschwindigkeiten v_1 und v_2 (Faktor K und L) haben keinerlei bzw. sehr schwachen Effekt auf die Entformung \overline{ent} .

Lediglich die Restkühlzeit t_K (Faktor E) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor G) haben einen starken Effekt auf die resultierende Zykluszeit \bar{z} (Abbildung 4.8).

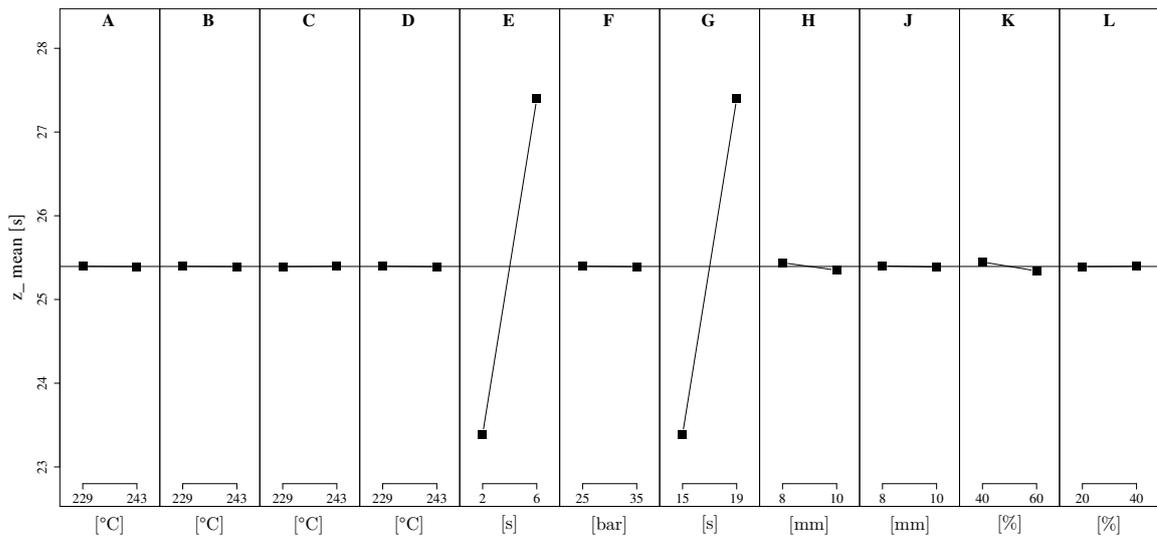


Abbildung 4.8: Screening: Effektplot zur Zykluszeit \bar{z}

Der Effektplot lässt Effekte erahnen, und der Normalplot in Abbildung 4.9 (unten rechts) bestätigt schwache Effekte der Umschaltpunkte s_U und s_{Uv} (Faktor H und J) und der ersten Spritzgeschwindigkeit v_1 (Faktor K) auf die Zykluszeit \bar{z} . In den Normalplots ist die theoretische Normalverteilung über den beobachteten Effekten aufgetragen. Unter der Nullhypothese, dass alle Effekte gleich sind, werden die Effekte als relevant angesehen, wenn diese nicht der Normalverteilung folgen. Dies sind die mit den Bezeichnungen der Faktoren versehenen Sternchen. Die Abweichung der Effekte der Faktoren H, J und K von der Normalverteilung fällt im Plot unten rechts schwach aus. Es handelt sich um schwache Effekte bei einer gegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$.

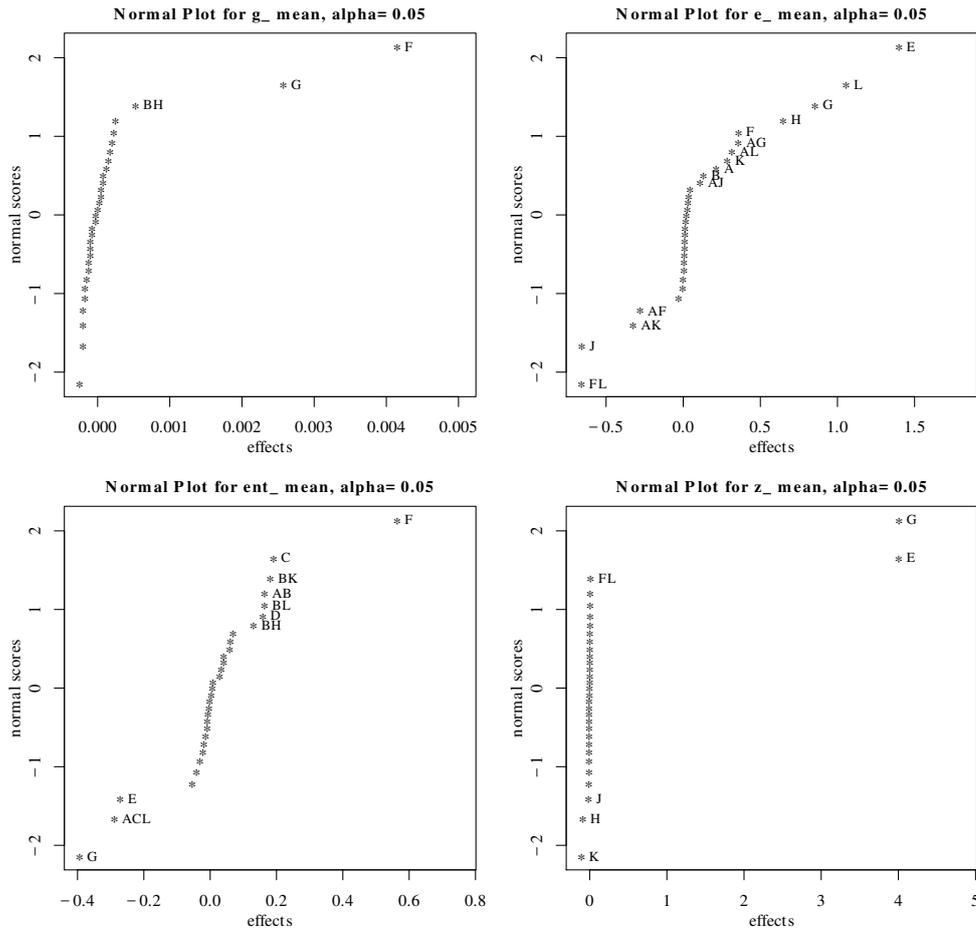


Abbildung 4.9: Screening: Normalplots zu allen Zielgrößen

Die Ergebnisse der Effektuntersuchung werden in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Screening: Ergebnis der Effektuntersuchung

Faktor	Zielgröße			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
A		X		
B		X		
C			X	
D	X		X	
E		X	X	X
F	X	X	X	
G	X	X	X	X
H	X	X	X	X
J		X	X	X
K		X		X
L		X		

X Faktor mit relevantem Effekt auf die Zielgröße

Es wird deutlich, dass alle Faktoren für die Gesamtheit der Zielgrößen wichtig sind und eine generelle Vernachlässigung eines oder mehrerer Faktoren nicht vorgenommen werden sollte.

4.3 Hauptversuche und Modellbildung

In diesem Abschnitt wird sowohl die Vorgehensweise bei der Durchführung der Hauptversuche als auch bei der Bildung der Beschreibungsmodelle dargestellt.

4.3.1 Fraktioniert faktorieller Versuchsplan

4.3.1.1 Festlegung der Faktoren, Faktorstufen und des Versuchsumfangs

Mit dem vorangegangenen Screeningversuchsplan wurden relevante Haupteffekte ermittelt. Um nun in den Hauptversuchen auch die Zweifachwechselwirkungen (2FWW) in die Untersuchung aufnehmen zu können, erfordert dies einen Versuchsplan mit einer Mindestauflösung von \bar{V} . Bei dieser Auflösung und 11 Faktoren ergäbe sich eine Versuchsanzahl von $n_r = 128$ (vgl. Tabelle 2.4 auf Seite 15). Da ein Versuch mit 32 Versuchen schon einen vollen Tag in Anspruch nimmt, wurde beschlossen, die Faktoranzahl zu verringern. Durch Zusammenlegung der folgenden 6 Faktoren zu nunmehr 3 Faktoren reduziert sich die Faktoranzahl auf 8 Faktoren:

- Der Plastifizierungs- und Umlenkkopftemperatur T_P und T_U zur Schmelzetemperatur $T_P + T_U$,
- der Düsen- und Heisskanaltemperatur T_D und T_H zur Zylindertemperatur $T_D + T_H$,
- und der Umschaltpunkte Nachdruck und Geschwindigkeit s_U und s_{Uv} zum Umschaltpunkt Nachdruck & Geschwindigkeit $s_U + s_{Uv}$.

Die eingegrenzte Faktorwahl für den fraktioniert faktoriellen Versuchsplan des Hauptversuchs fasst Tabelle 4.4 zusammen.

Tabelle 4.4: Fraktionierter Versuchsplan: Faktoren und Faktorstufen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Kodierung	Faktorstufe		Einheit
			–	+	
Schmelzetemperatur	$T_P + T_U$	A	229	243	°C
Zylindertemperatur	$T_D + T_H$	B	229	243	°C
Restkühlzeit	t_K	C	2	6	s
Nachdruck	p_N	D	25	35	bar
Nachdruckzeit	t_N	E	15	19	s
Umschaltpunkt Nachdruck & Geschwindigkeit	$s_U + s_{Uv}$	F	8	10	mm
Einspritzgeschwindigkeit	v_E	G	40	60	%
Nachdruckgeschwindigkeit	v_N	H	20	40	%

Das Zusammenlegen der Temperaturen bietet den Vorteil, die Temperaturen in eine Schmelzetemperaturzone ($T_P + T_U$) und eine Zylindertemperaturzone ($T_D + T_H$) einteilen zu können. Die Schmelzetemperatur ist die Verarbeitungstemperatur des Kunststoffes und befindet sich im Bereich der Plastifizierung. [13] Die Zylindertemperatur entspricht in diesem Fall den Temperaturen der Zylinderzonen direkt vor dem Formnest. Die Zusammenfassung der Umschaltpunkte ermöglicht die separate Betrachtung des Einflusses einer einheitlichen Spritzgeschwindigkeit sowohl in der Einspritzphase (Einspritzgeschwindigkeit v_E) als auch in der Nachdruckphase (Nachdruckgeschwindigkeit v_N). Der „Umschaltpunkt Nachdruck & Geschwindigkeit $s_U + s_{Uv}$ “

wird im weiteren Verlauf der Arbeit als „Umschalt­punkt $s_U + s_{Uv}$ “ bezeichnet. Die Nachdruck­geschwindigkeit ist von Bedeutung, wenn die „Seele“ des Bauteils auch im Nachdruck zu Beginn noch flüssig ist und dann schnell abkühlt bzw. erstarrt. Die „Seele“ ist der Bereich um die Querschnittsmitt­e des Bauteils. Nach *Hagen-Poiseuille* hängt die Höhe des Drucks mit der Spritzgeschwindigkeit zusammen, daher erscheint eine Variation der Spritzgeschwindigkeit zusätzlich zum Druck zunächst nicht sinnvoll. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass dies nur für isotherme Vorgänge gilt, bei denen die Viskosität konstant bleibt. [13] Der Vorgang des Erstarrens der Kunststoffschmelze beim Spritzgießen ist kein isothermer Vorgang, somit hat die Viskosität neben der Geschwindigkeit maßgeblichen Einfluss auf den Druckverlust. Gerechtfertigt erscheint die Zusammenlegung der Faktoren auch, da im Screening gleichartige Effekte der zusammengelegten Faktoren festgestellt wurden.

Aus den in Tabelle 4.4 gezeigten Faktoren lässt sich die Mindestgröße des fraktioniert faktoriellen Versuchsplans ermitteln. Die Eigenschaften des Versuchsplans finden sich in Anhang D.2. Die Versuche sind innerhalb des zentral zusammengesetzten Versuchsplans in Anhang E.2 sowie die Einstellwerte der übrigen, konstant gehaltenen, Maschinenparameter in Anhang C.1 aufgelistet. Es wird der Einfluss von 8 Faktoren auf das System untersucht. Dafür wären nach Gleichung 2.8 auf Seite 13 mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan $2^8 = 256$ Versuche notwendig. Eine Mindestauflösung von \bar{V} ist weiterhin gefordert, um alle Effekte der Faktoren und 2FWW voneinander einwandfrei unterscheiden zu können. Nach Tabelle 2.4 auf Seite 15 ergibt sich diese Auflösung für 8 Faktoren bei einem 2^{8-2} -Plan. Somit liegt die Anzahl der Würfelpunktversuche mit 64 Versuchen fest und damit bei $\frac{1}{4}$ der Versuche eines vollständig faktoriellen Versuchsplans.

Darüber hinaus ist es wichtig, den Versuchsumfang auf eine ausreichende Anzahl an Realisationen festzulegen. Dadurch wird gewährleistet, dass die Macht der Tests, die auf den Versuchsplan angewendet werden, groß genug ist. Die einführenden Erläuterungen in Abschnitt 2.2.1, Unter­punkt „Hypothesentests“, gehen auf den Begriff der Macht ein. Folgende Näherungsgleichung ergibt nach KLEPPMANN einen ausreichenden Versuchsumfang für zweistufige Versuchspläne:

$$N = n_r m = 60 \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2 \cdot [15] \tag{4.1}$$

σ ist die in den Vorversuchen ermittelte, daher empirische, Standardabweichung der Zielgröße. $\Delta\mu$ ist der tatsächlich vorhandene Unterschied der ermittelten Werte dieser Zielgröße, der mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt werden soll. In Tabelle 4.5 ist die erforderliche Anzahl der Realisationen für alle vier Zielgrößen angegeben. $\Delta\mu$ entspricht hierin einer eigenen Vorgabe. Dieser Unterschied soll für die jeweilige Zielgröße erkannt werden.

Tabelle 4.5: Ermittlung des Versuchsumfangs

Zielgröße	σ	$\Delta\mu$	N	n_r				
				m=2	m=3	m=4	m=5	m=10
Gewicht \bar{g}	0,001598 g	0,001 g	153	77	51	38	30	15
Energieverbrauch \bar{e}	0,068500 Wh	0,03 Wh	313	156	104	78	63	31
Entformung \overline{ent}	0,299446	0,1	538	269	179	135	108	54
Zykluszeit \bar{z}	0,029761 s	0,1 s	5	3	2	1	1	0,5

Für das Gewicht \bar{g} sind nach Tabelle 4.5 bei 3 Realisationen mindestens 51 Versuche nötig, für den Energieverbrauch \bar{e} bei 5 Realisationen mindestens 63 Versuche, für die Entformung \overline{ent} bei 10 Realisationen mindestens 54 Versuche und für die Zykluszeit \bar{z} reicht bereits eine Realisation

aus. Es wird beschlossen für die Zielgrößen Gewicht \bar{g} , Energieverbrauch \bar{e} sowie Zykluszeit \bar{z} 5 Realisationen durchzuführen, da das Gewicht \bar{g} und die Zykluszeit \bar{z} leicht aufzuzeichnen sind. Für die Entformung \overline{ent} sind 10 Realisationen ausreichend. Es bestätigt sich die Erkenntnis aus den Vorversuchen, dass die Entformung \overline{ent} einer weiten Streuung unterliegt und somit eine höhere Anzahl an Realisationen notwendig ist.

4.3.1.2 Effektuntersuchung

Für den zweistufigen fraktioniert faktoriellen Versuchsplan sind, wie bereits bei dem Screening, die Effekte mittels Effektdiagrammen dargestellt. Darüber hinaus werden die 2FWW bei Bedarf mittels Wechselwirkungsmatrizen, ohne Bildung eines Modells, untersucht.

Als die wichtigsten Haupteffekte für das Gewicht \bar{g} erscheinen die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B), der Nachdruck p_N (Faktor D) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E). Der Effekplot zum Gewicht \bar{g} findet sich in (Abbildung 4.10).

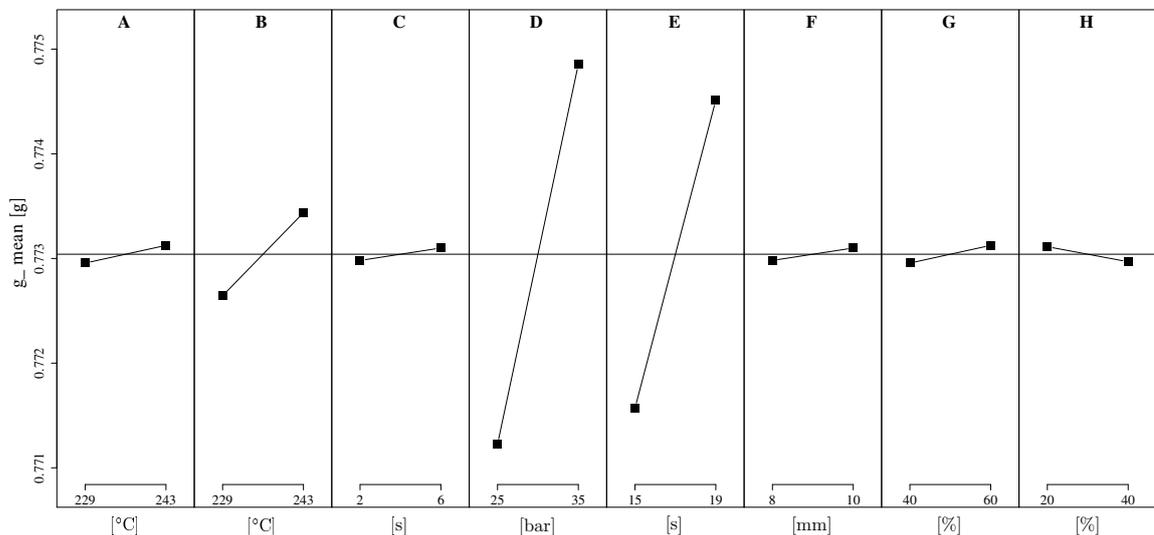


Abbildung 4.10: Fraktionierter Versuchsplan: Effekplot zum Gewicht \bar{g}

Es ergeben sich Resultate, die denen aus dem Screening ähneln. Die Nachdruckphase (Nachdruck und Nachdruckzeit) ist prägend für das Gewicht \bar{g} . Durch den höheren Nachdruck und die längere Verweilzeit (Nachdruckzeit) des Nachdrucks wird mehr Kunststoff in das Formnest gedrückt. Eine wärmere Zylindertemperatur ($T_D + T_H = 243$ °C) führt durch die geringere Viskosität der Masse und dem resultierenden geringeren Druckverlust, zur höheren Materialeinbringung in das Formnest. Alle weiteren Faktoren haben einen schwachen bzw. nicht vorhandenen Effekt auf das Gewicht \bar{g} .

Das Effektdiagramm für den Energieverbrauch ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

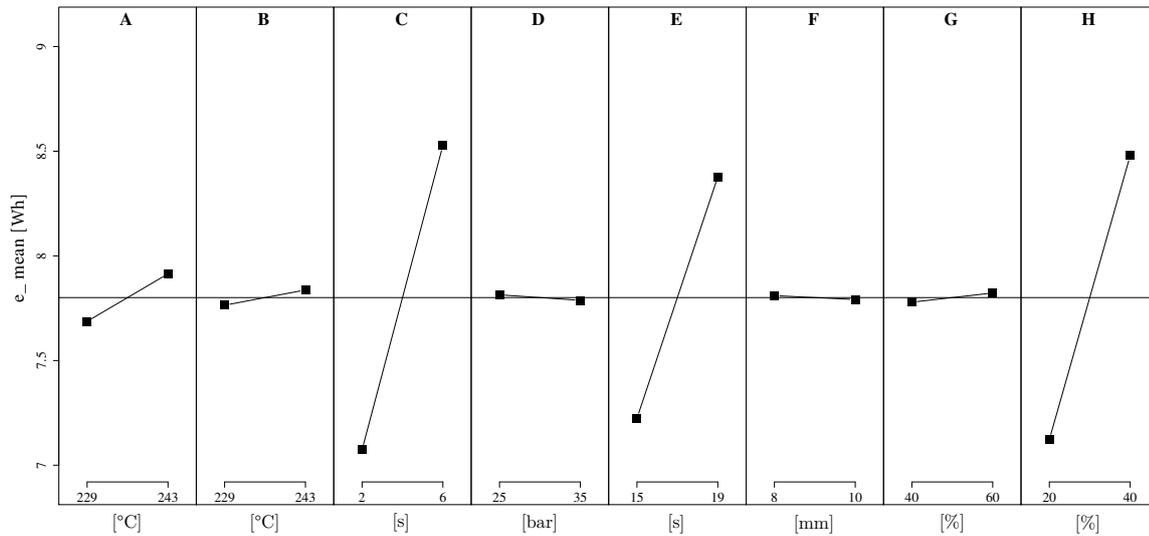


Abbildung 4.11: Fraktionierter Versuchsplan: Effektdiagramm zum Energieverbrauch \bar{e}

Der Energieverbrauch ist maßgeblich durch die Restkühlzeit t_K (Faktor C) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) beeinflusst. Sind lange Zeitspannen eingestellt, so ergibt sich auch ein hoher Energieverbrauch. Die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) hat einen ähnlich starken Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} , wie bereits bei dem Screening. Dies wird verursacht durch die erhöhte Drehzahl der Hydraulikpumpe. Ebenso hat die Schmelztemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) einen geringen Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} . Bei hoher Schmelztemperatur ($T_P + T_U = 243 \text{ °C}$) ist der Energieverbrauch hoch ($\bar{e} = 7,9 \text{ Wh}$). Dies hängt mit den größeren thermischen Massen und frei liegenden Wärmeabstrahlflächen um den Bereich der Plastifizierung des Spritzaggregats zusammen. Die Temperaturregelung der Schmelztemperatur ist dadurch träger. Im Gegensatz zum Screening hat der zusammengelegte Umschaltwinkel $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) keinen Effekt auf den Energieverbrauch \bar{e} . Wo zuvor der Umschaltwinkel des Nachdrucks s_U einen erhöhenden Effekt und der Umschaltwinkel der Geschwindigkeit s_{Uv} einen senkenden Effekt in gleicher Stärke auf den Energieverbrauch \bar{e} aufwies, kommt es zu einer gegenseitigen Neutralisierung beider Effekte. Die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B), der Nachdruck p_N (Faktor D) sowie der Einspritzdruck v_E (Faktor G) haben schwache bis nicht ersichtliche Effekte auf den Energieverbrauch \bar{e} .

Auf die Entformung \overline{ent} haben nach Abbildung 4.12 nahezu alle Faktoren einen Effekt, abgesehen von der Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) und dem Umschaltzeitpunkt $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F).

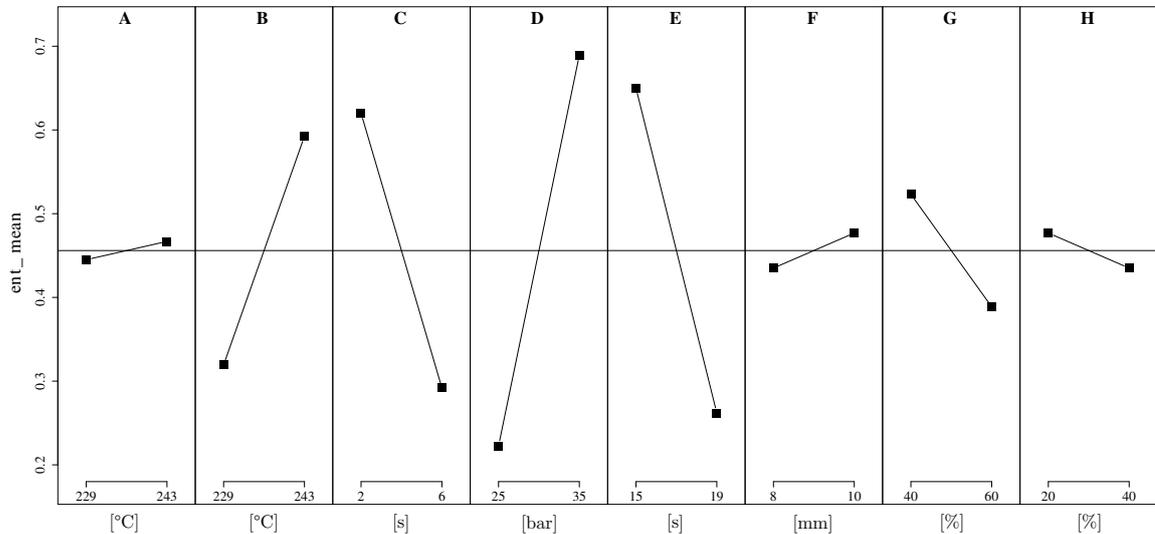


Abbildung 4.12: Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zur Entformung \overline{ent}

Mit steigender Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) und steigendem Nachdruck p_N (Faktor D) wird die Entformung begünstigt. Durch die höhere Zylindertemperatur ($T_D + T_H = 243$ °C) unmittelbar vor dem Formnest und der damit abnehmenden Viskosität der Masse sowie dem abnehmenden Druckverlust wird mehr Masse in das Formnest eingebracht. Durch Zunahme beider Faktoren wird das Bauteil stärker in das Formnest gepresst, was zu einer guten Entformung \overline{ent} führt ($\overline{ent} = 0,6$ bzw. $0,7$). Zu lange Restkühlzeiten t_K (Faktor C) und Nachdruckzeiten t_N (Faktor E) verringern diese günstigen Voraussetzungen, da das Bauteil mehr Zeit zur Abkühlung hat, am erstarrten Anguss festklebt (Muster 0) oder sich in der Form verkeilt (Muster 0,8). Eine hohe Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) wirkt sich nachteilig auf die Entformung \overline{ent} aus. Durch eine ausreichende Einspritzgeschwindigkeit wird sowohl der Zyklus beschleunigt, als auch ausreichend Masse in das Formnest eingebracht. Ist die Einspritzgeschwindigkeit jedoch zu hoch ($v_E = 60$ %), sinkt der Einspritzdruck. Da der Prozess während des Einspritzens als isotherm angenommen werden kann, gilt hier die Gesetzmäßigkeit nach *Hagen-Poiseuille* mit konstanter Viskosität. Durch den resultierenden geringen Einspritzdruck wird weniger Masse in das Formnest eingebracht und die geringere Flächenpressung des Bauteils im Formnest führt zur schlechten Entformung ($\overline{ent} = 0,4$). Dieser Effekt fällt jedoch gering aus.

4.3 Hauptversuche und Modellbildung

Die Zykluszeit \bar{z} erfährt maßgebliche Beeinflussung durch die Restkühlzeit t_K (Faktor C) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) (Abbildung 4.13). Alle übrigen Faktoren sind ohne nennenswerten Effekt auf die Zykluszeit \bar{z} .

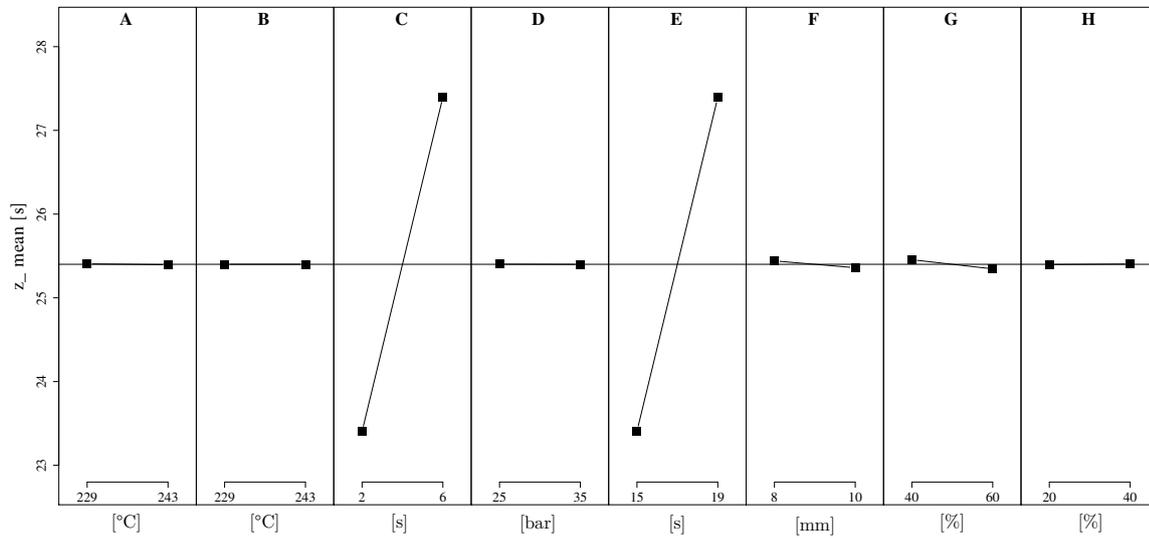


Abbildung 4.13: Fraktionierter Versuchsplan: Effektplot zur Zykluszeit \bar{z}

In Abbildung 4.14 sind die Normalplots aller vier Zielgrößen zusammengefasst. Die Verhältnisse aus den Effektplots werden bestätigt.

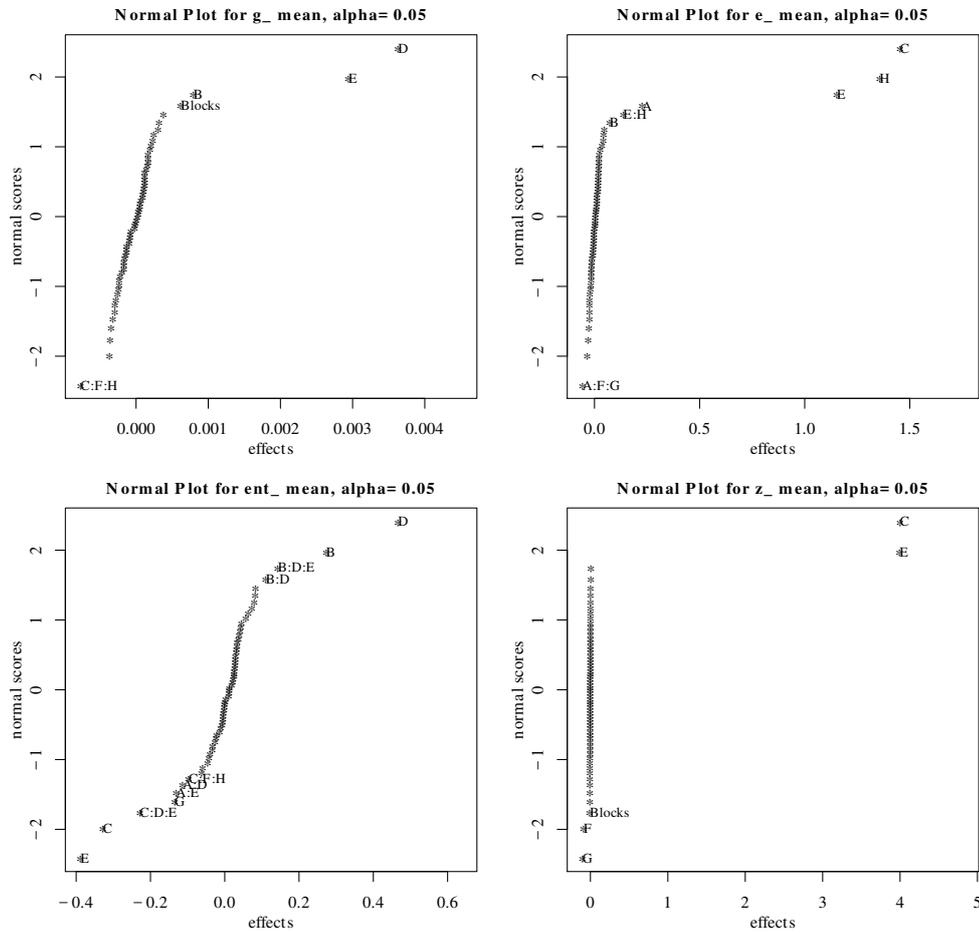


Abbildung 4.14: Fraktionierter Versuchsplan: Normalplots zu allen Zielgrößen

Zusätzlich zu den Haupteffekten können in dem Normalplot zudem wichtige Wechselwirkungseffekte identifiziert werden. Die Effekte der Dreifachwechselwirkungen (3FWW) sind nicht relevant, da die Auflösung des zugrundeliegenden Versuchsplans nur eine Unterscheidung von Haupteffekten und der Effekte der Zweifachwechselwirkungen (2FWW) zulässt.

Die hohe Anzahl der relevanten Wechselwirkungseffekte in dem Normalplot der Entformung \overline{ent} in Abbildung 4.14 legt nahe, die Wechselwirkungen anhand einer Wechselwirkungsmatrix näher zu betrachten.

Die Wechselwirkungsmatrix in Abbildung 4.15 zeigt alle Wechselwirkungen der Entformung \overline{ent} . Die Bildung der Wechselwirkungseffekte erfolgt analog zu denen der Haupteffekte. Die Faktoren sind vertikal und horizontal aufgetragen. In aufsteigender Reihenfolge von oben nach unten folgt der erste Faktor der Wechselwirkung, jeweils festgesetzt auf der oberen und unteren Faktorstufe. Die Wechselwirkungen finden sich durch Kreuzen der interessierenden Faktoren. Soll beispielsweise die Wechselwirkung B:D untersucht werden, so wird von Zeile B in horizontaler Richtung nach rechts gegangen, bis Spalte D gekreuzt wird. Soll umgekehrt die Wechselwirkung D:B untersucht werden, so wird von Zeile D horizontal nach links gegangen, bis Spalte B gekreuzt wird. Eine Wechselwirkung ist dann als wichtig einzustufen, wenn sich die Steigungen der zwei verbindenden Geraden zwischen erster und zweiter Faktorstufe in einem Wechselwirkungsfeld stark voneinander unterscheiden.

Dem Normalplot in Abbildung 4.14 entsprechend sind die Wechselwirkungseffekte A:D, A:E und B:D von Bedeutung für die Entformung \overline{ent} . Eine sowohl niedrige als auch hohe Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) führt bei gleichzeitig niedrigem Nachdruck p_N (Faktor D) von 25 bar zu einer schlechten Entformung \overline{ent} von 0,3. Die Entformung ist bei hoher Temperatur ($T_P + T_U = 243$ °C) nur geringfügig besser ($\overline{ent} = 0,5 - 0,6$). Befindet sich der Nachdruck allerdings auf der höheren Faktorstufe ($p_N = 35$ bar), so ist die Entformung bei niedriger Temperatur ($T_P + T_U = 229$ °C) besser. Es handelt sich der Abbildung nach um einen schwachen Wechselwirkungseffekt.

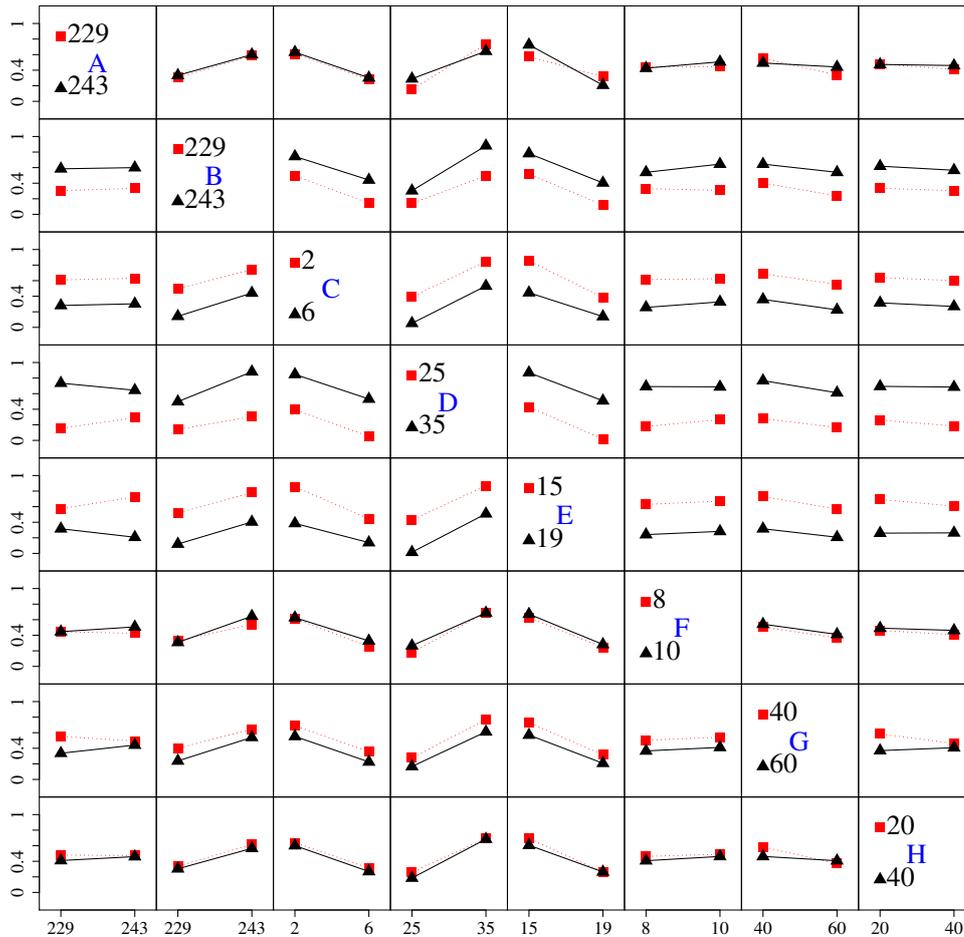


Abbildung 4.15: Fraktionierter Versuchsplan: Wechselwirkungsmatrix zur Entformung \overline{ent}

Ein ähnliches Bild, dem Effekt nach jedoch entgegengesetzt, ergibt der Wechselwirkungseffekt A:E. Die Entformung ist etwas besser mit kurzer Nachdruckzeit t_N (Faktor E) bei hoher Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A), als mit niedriger Schmelzetemperatur. Ist die Nachdruckzeit lang ($t_N = 19$ s), fällt die Entformung \overline{ent} bei niedriger Temperatur ($T_P + T_U = 229$ °C) etwas besser aus ($\overline{ent} = 0,6$ statt 0,5). Zu keiner Überschneidung der Wechselwirkungslinien kommt es bei Wechselwirkung B:D. Ist der Nachdruck t_N (Faktor D) und die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) niedrig ($p_N = 25$ bar bzw. $T_P + T_U = 229$ °C), dann ist die Entformung \overline{ent} schlecht ($\overline{ent} = 0,2 - 0,3$). Ist der Nachdruck hoch ($p_N = 35$ bar), dann verhält es sich genau wie bei der niedrigen Faktorstufe, jedoch ist die Entformung bei höheren Temperaturen begünstigt. Auch diese Wechselwirkungseffekte sind als schwach anzusehen.

Folglich sind die identifizierten Effekte der Faktoren und Wechselwirkungen aus technischen Gesichtspunkten plausibel.

4.3.1.3 Modelle 1. Ordnung

Basierend auf dem zweistufigen fraktioniert faktoriellen Versuchsplan werden die Modelle 1. Ordnung erstellt, welche die Faktoren und alle 2FWW enthalten. Die Koeffizienten für die Modellgleichungen, gemäß Gleichung 2.14 auf Seite 18, finden sich in Anhang F. Für jede einzelne Zielgröße wird ein separates Modell erstellt und mittels Bewertungsverfahren auf seine Güte untersucht. Für die Modelle 1. Ordnung wird eine numerische und graphische Modellbewertung durchgeführt. Die Ergebnisse der numerischen Modellbewertung sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 4.6: Modell 1. Ordnung: Numerische Modellbewertung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,95	0,99	0,85	1
R_{adj}^2	0,88	0,99	0,65	1
F-Testwert	13,6	298,5	4,1	93.970

Die Ergebnisse der numerischen Modellbewertung erscheinen plausibel. Die beste Modellgüte hat das Modell für die Zykluszeit \bar{z} , diese kann zu 100 % vorhergesagt werden. Dies hängt damit zusammen, dass sich die Zykluszeit direkt aus den Einstellwerten der Maschine, insbesondere den Zeiten, den Spritzgeschwindigkeiten und dem Umschaltpunkt ergibt. Eine nicht viel schlechtere Güte besitzt das Modell für den Energieverbrauch \bar{e} ($R_{adj}^2 = 0,99$), gefolgt von dem Modell für das Gewicht \bar{g} ($R_{adj}^2 = 0,88$). Eine im Vergleich schlechte, aber akzeptable Güte, besitzt das Modell für die Entformung \overline{ent} ($R_{adj}^2 = 0,65$). Auf diese Problematik wurde bereits in Abschnitt 4.2.1 hingewiesen und Maßnahmen ergriffen, um die Güte dieses Modells zu verbessern.

Die graphische Modellbewertung wird anhand jeder Zielgröße vorgenommen und erläutert (Abbildung 4.16 bis Abbildung 4.19). Je Modell sind drei Plots mit unterschiedlichen Aussagen abgebildet. Im Plot oben links sind jeweils die Residuen über den angepassten Modellwerten der jeweiligen Zielgröße aufgetragen. Sind in diesem Plot die Residuen über dem gesamten Bereich der Zielgröße gleichmäßig verteilt, so spricht das für ein Modell mit hoher Güte. Der eingetragene rote Graph ergibt dann idealerweise eine Waagerechte. Im jeweiligen Plot oben rechts (QQ-Plot) ist die beobachtete Verteilung der Residuen über der theoretischen Normalverteilung aufgetragen. Im Idealfall entspricht die beobachtete Verteilung der theoretischen Normalverteilung. Die Punkteschar bildet dann eine Diagonale ohne starke Abweichungen. Im jeweils dritten Plot ist die Cook's Distanz über den Versuchen in chronologischer Reihenfolge aufgetragen. Die Cook's Distanz ist bei einem Modell mit hoher Güte über die gesamte Länge aller Versuche gleichmäßig. Unter 1 ist die Cook's Distanz als unkritisch zu bewerten. Dann ist der Abstand des betreffenden Residuums zu den übrigen Residuen sowie die Hebelwirkung auf das Modell gering. Einleitende Erklärungen zu den Kontroll- und Prüfverfahren finden sich in Abschnitt 2.2.2.3, Unterpunkt „Kontroll- und Prüfverfahren zur Bewertung der Modellgüte“.

Betrachtet werden zunächst die Diagnostikplots des Gewichts \bar{g} in Abbildung 4.16.

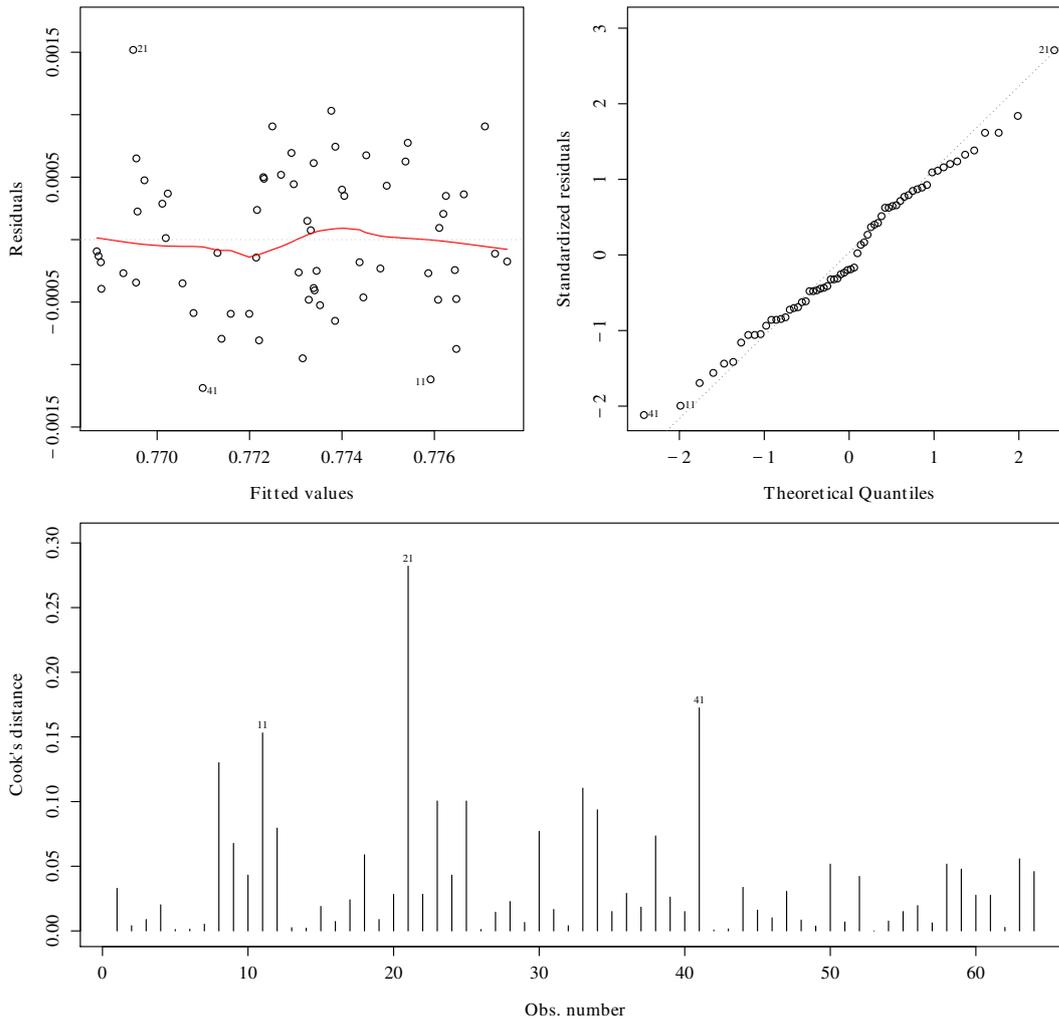


Abbildung 4.16: Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zum Gewicht \bar{g}

Es zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung der Residuen. Es ist keinerlei Trend über die gesamte Versuchsdauer ersichtlich. Lediglich Residuen dreier Versuche besitzen eine relativ hohe Abweichung zu den übrigen Residuen. Die Abweichungen liegen aber im akzeptablen Rahmen, ein großer Einfluss dieser Versuche auf das Modell lässt sich ausschließen. Der Abstand sowie die Hebelwirkung sind schwach. Es handelt sich nicht um Ausreißer. Der QQ-Plot zeigt zudem, dass die Normalverteilung als geeignete Näherung für die Verteilung der Residuen angenommen werden kann. Damit bestätigt sich die Annahme der Zufälligkeit der Residuen, also der Modellfehler.

Ein ähnliches Bild liefert die graphische Analyse des Energieverbrauchs \bar{e} in Abbildung 4.17.

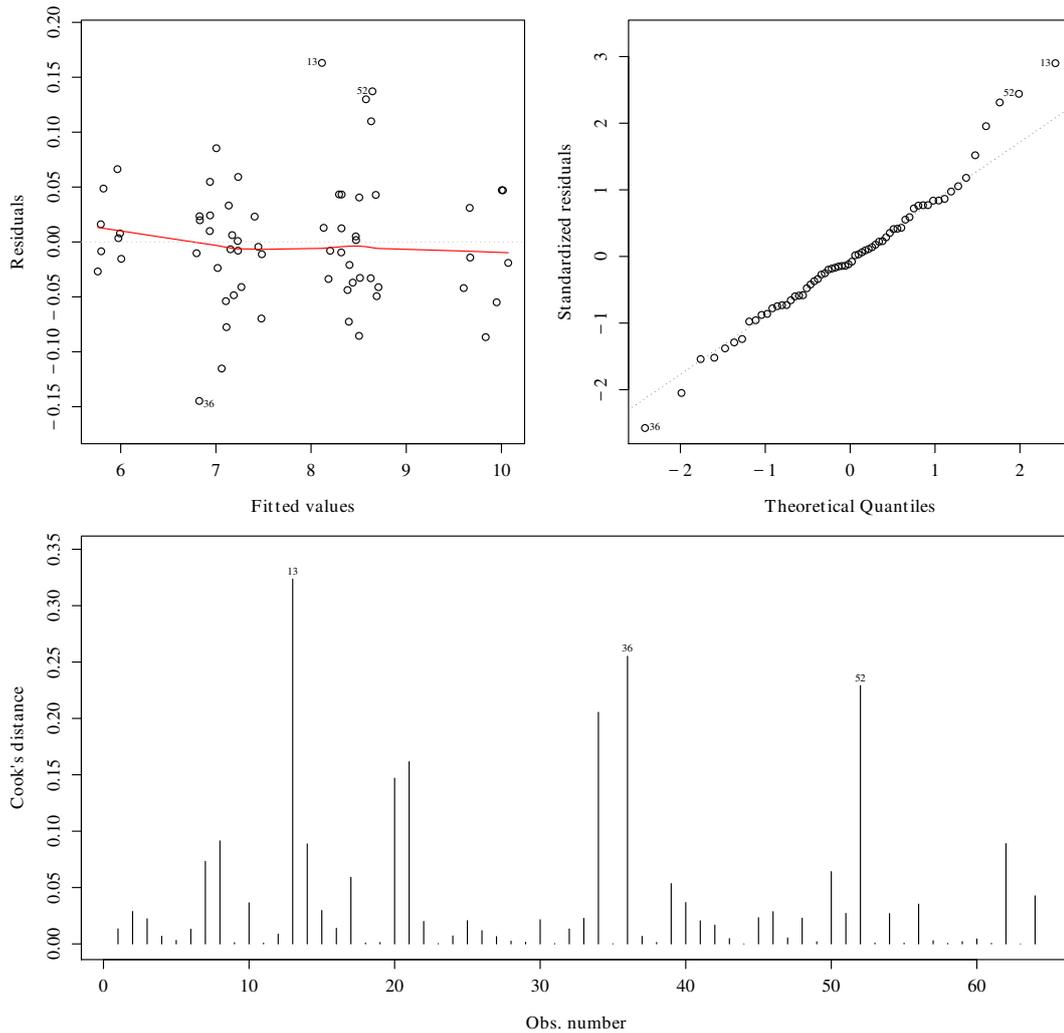


Abbildung 4.17: Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zum Energieverbrauch \bar{e}

Die Verteilung der Residuen ist gleichmäßig, mit einem minimal abfallenden Trend in Richtung des höheren Wertebereichs der Zielgröße. Es stechen drei Versuche mit größeren Residuen heraus, jedoch ebenfalls in vertretbarer Höhe. Auffälliger erscheint eine leichte Rechtsschiefe der Verteilung, zum Großteil getragen durch die besonders hohen Residuen (QQ-Plot oben rechts). Aufgrund der geringen Schiefe kann auch hier eine Normalverteilung der Residuen angenommen werden. Die Cook's Distanz befindet sich im niedrigen, nicht kritischen Bereich. Die Hebelwirkungen der Residuen sind gering, sodass eine Verfälschung des Modells ausgeschlossen werden kann.

Die Ergebnisse der Analyse des Modells der Entformung \overline{ent} (Abbildung 4.18) stimmt mit den Erkenntnissen der numerischen Modellbewertung überein.

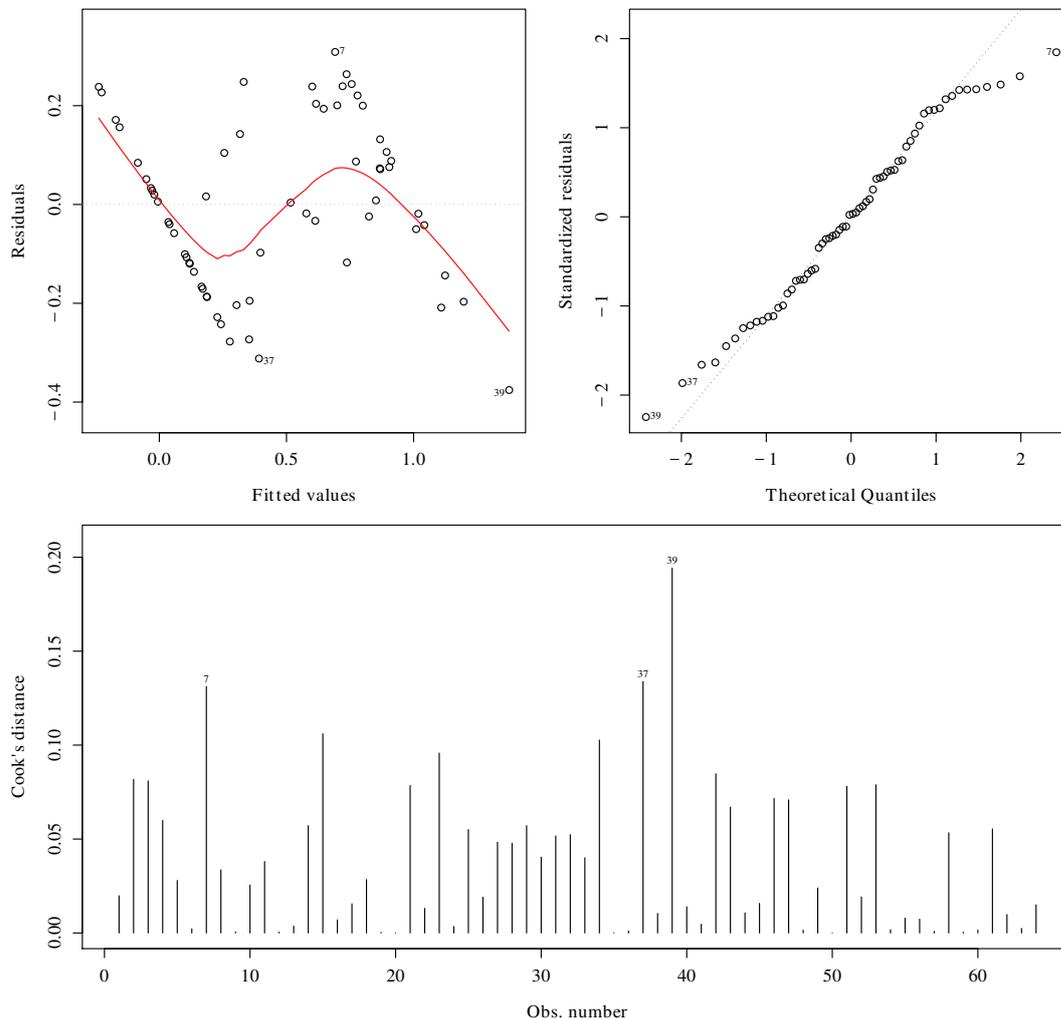


Abbildung 4.18: Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zur Entformung \overline{ent}

Die Modellgüte ist deutlich schlechter, als die Güte der übrigen Modelle. Der Plot oben links zeigt eine klare Trendkurve hin zu den drei festgelegten Mustern der Entformung (S-förmiger Verlauf). Man muss berücksichtigen, dass die Ergebnisse von zehn Einzelmessungen zu \overline{ent} gemittelt werden. Die gemittelten Werte entsprechen vermehrt den Werten zwischen 0 und 0,5 und 0,5 und 1. Die Verteilung der Residuen weist eine deutliche Rechtsschiefe auf. Im höheren Wertebereich fallen die Residuen kleiner aus, als bei der angenommenen Normalverteilung. Trotzdem kann die Normalverteilung in guter Näherung für die Verteilung der Residuen angenommen werden. Die Cook's Distanz ist nochmals niedriger als bei den vorangegangenen Modellen und bewegt sich damit im unkritischen Bereich. Eine verfälschende Wirkung der größeren Residuen auf das Modell kann ausgeschlossen werden.

Für die Zykluszeit \bar{z} ergibt sich das beste Modell (Abbildung 4.19).

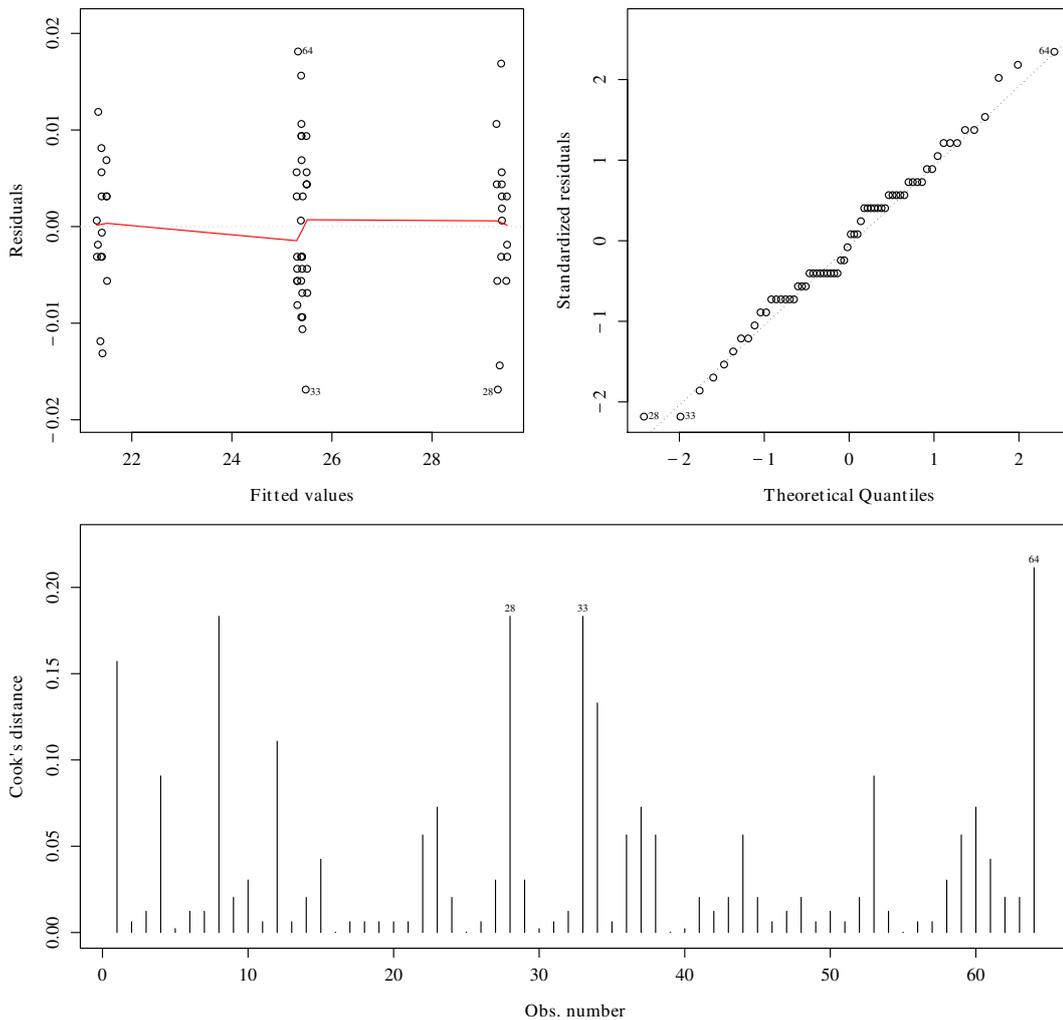


Abbildung 4.19: Fraktionierter Versuchsplan: Modell-Diagnostikplots zur Zykluszeit \bar{z}

Die Residuen sind gleichmäßig über die Versuche verteilt. Da die Zykluszeit maßgeblich durch die eingestellten Zeiten beeinflusst wird, kommt es zu den drei immer wiederkehrenden Zykluszeiten. Gut zu erkennen ist dies im Plot oben links. Die Verteilung der Residuen lässt sich näherungsweise durch die Normalverteilung beschreiben. Die Cook's Distanz weist, ebenso wie bei der Entformung \overline{ent} , sehr geringe Werte auf. Das Modell ist geeignet, um aussagekräftige Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Die Untersuchung der Residuen offenbart einen Ausreißer im Modell der Zykluszeit \bar{z} . Ein Ergebnis wurde fehlerhaft in den Versuchsplan übertragen und nach Prüfung korrigiert. Bei den Residuen, die eine besonders hohe Abweichung zu den übrigen Residuen aufweisen, handelt es sich um tolerierbare Schwankungen in der Genauigkeit der Versuchsdurchführung der jeweiligen Zielgröße. Dies sind keine Singularitäten.

In Tabelle 4.7 ist die Verteilung der Residuen zusammenfassend für alle vier Zielgrößen dargestellt.

Tabelle 4.7: Modell 1. Ordnung: Verteilung der Residuen

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-1,1875e-03	-3,969e-04	-1,094e-04	4,344e-04	1,5187e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-1,44806e-01	-3,4532e-02	-5,543e-03	3,1570e-02	1,63082e-01
Entformung \overline{ent}	-3,7562e-01	-1,2406e-01	4,69e-03	1,3453e-01	3,0875e-01
Zykluszeit \bar{z}	-1,6875e-02	-5,625e-03	0	4,687e-03	1,8125e-02

¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil

Es sind die Minimal- und Maximalwerte, die Werte am unteren und oberen Quartil, sowie am Median angegeben. Sind die Werte vom Median aus betrachtet gleichmäßig nach oben und unten verteilt, deutet dies auf ein Modell mit hoher Güte hin. Dies ist bei allen vier Modellen der Fall. Lediglich bei dem Modell für das Gewicht \bar{g} ist der Minimal- und Maximalwert stark verschieden. Der Unterschied ist tolerierbar.

4.3.2 Orthogonal zusammengesetzter Versuchsplan 2. Ordnung

Der zweistufige Versuchsplan aus Abschnitt 4.3.1 wird um drei Faktorstufen erweitert, um festzustellen, ob nichtlineares Verhalten vorliegt. Über die Sternpunktversuche lässt sich darüber hinaus das Verhalten der Faktor-Zielgrößen-Beziehung in den Extrembereichen der Faktoren untersuchen. Es entsteht ein Versuchsplan 2. Ordnung auf insgesamt 5 Faktorstufen. Der vollständige Versuchsplan findet sich in Anhang E.2 und die Eigenschaften des Versuchsplans in Anhang D.3. In dem Versuchsplan wird der Zentralpunktversuch einmal je Block der Würfel-punktversuche durchgeführt, insgesamt zweimal. Entsprechend den acht untersuchten Faktoren sind dem Plan 16 Sternpunktversuche angehängt. Die Berechnung des Sternpunktabstands α erfolgt über die Gleichung 2.12 auf Seite 17. Der berechnete Wert für α beträgt 2. Der Abstand zwischen Zentralpunkt und zweiter Faktorstufe macht damit das Zweifache des Abstands zwischen Zentralpunkt und erster Faktorstufe aus. Eine Übersicht über die Faktoren und deren Faktorstufen ist in Tabelle 4.8 aufgeführt.

Tabelle 4.8: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan: Faktoren und Faktorstufen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Kodierung	Faktorstufe					Einheit
			$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Schmelzetemperatur	$T_P + T_U$	A	222	229	236	243	250	°C
Zylindertemperatur	$T_D + T_H$	B	222	229	236	243	250	°C
Restkühlzeit	t_K	C	0	2	4	6	8	s
Nachdruck	p_N	D	20	25	30	35	40	bar
Nachdruckzeit	t_N	E	13	15	17	19	21	s
Umschaltzeit Nachdruck & Geschwindigkeit	$s_U + s_{Uv}$	F	7	8	9	10	11	mm
Einspritzgeschwindigkeit	v_E	G	30	40	50	60	70	%
Nachdruckgeschwindigkeit	v_N	H	10	20	30	40	50	%

Wie bereits im zweistufigen Versuchsplan werden für die Zielgrößen Gewicht \bar{g} , Energieverbrauch \bar{e} und Zykluszeit \bar{z} 5 und für die Entformung \overline{ent} 10 Realisationen ausgeführt. Die Effekte

können bei den Versuchsplänen 2. Ordnung aufgrund der Faktorstufenanzahl (>2) nicht durch Effektdiagramme dargestellt werden. Ebenso wird die Modellbewertung nicht mehr graphisch durchgeführt. Als Äquivalent für die Effektuntersuchung dient die auf dem Modell 2. Ordnung basierende RSM-Analyse (Response Surface Methodology), welche in Abschnitt 4.3.2.2 folgt.

4.3.2.1 Modelle 2. Ordnung

Auf Grundlage des orthogonal zusammengesetzten Versuchsplans werden die Modelle 2. Ordnung erstellt. Die Modelle enthalten die linearen und quadratischen Terme sowie die Wechselwirkungsterme der 2FWW, gemäß Gleichung 2.15 auf Seite 18. Die Koeffizienten für die Modellgleichungen finden sich in Anhang H. Wie bereits bei den Modellen 1. Ordnung wird für jede einzelne Zielgröße ein separates Modell erstellt und mittels Bewertungsverfahren auf seine Güte untersucht. Für die Modelle 2. Ordnung wird nur die numerische Modellbewertung durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tabelle 4.9 aufgeführt.

Tabelle 4.9: Modell 2. Ordnung: Numerische Modellbewertung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,95	0,99	0,85	1
R^2_{adj}	0,89	0,98	0,65	1
F-Testwert	15,7	99,8	4,3	443,3

Die Ergebnisse der numerischen Modellbewertung erscheinen plausibel. Wie es bei den Modellen 1. Ordnung der Fall ist, hat das Modell für die Zykluszeit \bar{z} die beste Modellgüte ($R^2_{adj} = 1$). Die Modelle für den Energieverbrauch \bar{e} und das Gewicht \bar{g} besitzen ebenso eine hohe Güte ($R^2_{adj} = 0,98$ bzw. $0,89$). Die Entformung \overline{ent} wird schlecht beschrieben, wie bei dem Modell 1. Ordnung ($R^2_{adj} = 0,65$). Die Modelle 2. Ordnung des Gewichts \bar{g} , des Energieverbrauchs \bar{e} sowie der Entformung \overline{ent} beschreiben die Zusammenhänge besser gegenüber den Modellen 1. Ordnung. Die Zykluszeit \bar{z} wird schlechter durch das Modell 2. Ordnung beschrieben, jedoch immer noch herausragend gut.

In Tabelle 4.10 ist die Verteilung der Residuen zusammenfassend für alle vier Zielgrößen dargestellt. Bezogen auf den Median sind die Werte gleichmäßig nach oben und unten verteilt. Die Modelle werden daher als gut befunden.

Tabelle 4.10: Modell 2. Ordnung: Verteilung der Residuen

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-1,191e-03	-2,896e-04	-4,506e-05	3,437e-04	1,605e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-3,00368e-01	-4,2623e-02	-1,495e-03	4,0058e-02	3,00368e-01
Entformung \overline{ent}	-4,0558e-01	-1,2795e-01	1,104e-02	1,3345e-01	3,8944e-01
Zykluszeit \bar{z}	-4,9778e-01	-1,483e-02	1,4e-04	1,205e-02	4,9778e-01

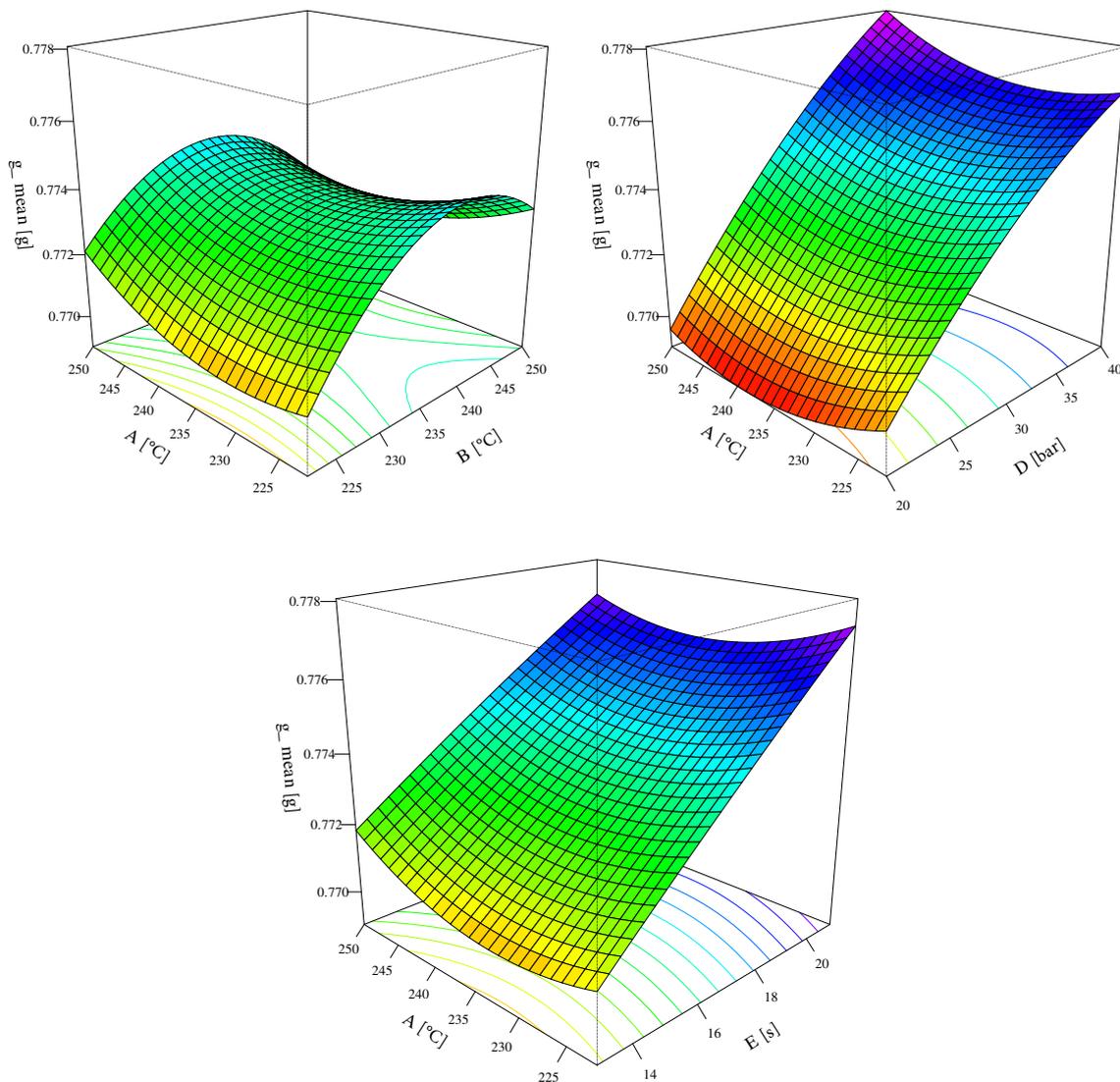
¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil

4.3.2.2 RSM-Analyse

Die Response Surface Methodology (RSM) dient der Visualisierung und Veranschaulichung der Faktor-Zielgrößen-Beziehungen. Grundlage sind die Modellgleichungen der Modelle 2. Ordnung. Dargestellt sind die Funktionskurven für jeweils zwei Faktoren (horizontale Achsen) und deren Auswirkung auf die betrachtete Zielgröße (vertikale Achse). Die weiteren Faktoren, die in dem jeweiligen Plot nicht auftauchen, befinden sich auf den Einstellwerten der Zentralpunktversuche. Es können Funktionsmerkmale sowie der Funktionstyp erkannt und darüber hinaus Wechselwirkungen untersucht werden. Es sind nur die Plots dargestellt, welche für die angegebene Zielgröße einen möglicherweise signifikanten Faktor enthalten oder zwei Faktoren, die eine Wechselwirkung miteinander aufweisen. Eine statistisch aussagekräftige Prüfung der Signifikanz wird mittels Varianzanalyse (ANOVA) in Abschnitt 4.3.3 sowie Abschnitt 5.1 durchgeführt. Alle übrigen RSM-Plots können zu Vergleichszwecken dem Anhang J entnommen werden.

In Abbildung 4.20 sind die Faktoren mit starkem Einfluss auf das Gewicht \bar{g} dargestellt. Dies sind die Faktoren B, D und E.



Slice at: A = 236 °C, B = 236 °C, C = 4 s, D = 30 bar, E = 17 s, F = 9 mm, G = 50 %, H = 30 %

Abbildung 4.20: Faktoren B, D und E zum Gewicht \bar{g}

Diese drei Faktoren weisen auch einen großen Effekt auf, siehe Abbildung 4.10 auf Seite 45. In dem Plot oben links lässt sich ein starker nichtlinearer Verlauf der Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) erkennen. Das Gewicht steigt zunächst an und sinkt ab ca. 235 °C ab. Die Schmelztemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) hat einen gegenläufigen, abgeschwächten Einfluss auf das Gewicht \bar{g} . Bei ca. 235 °C der Schmelze- und Zylindertemperatur befindet sich ein Sattelpunkt. Der Nachdruck p_N (Faktor D) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) haben großen linearen Einfluss auf das Gewicht \bar{g} . Steigt der Nachdruck von 20 bar auf 40 bar, so erhöht sich das Gewicht von 0,77 g auf 0,778 g. Wird die Nachdruckzeit von 13 s auf 21 s verlängert, dann erhöht sich das Gewicht von 0,772 g auf 0,778 g.

In Abbildung 4.21 sind die Faktoren zu sehen, die eine Wechselwirkung im Bezug auf das Gewicht \bar{g} besitzen.

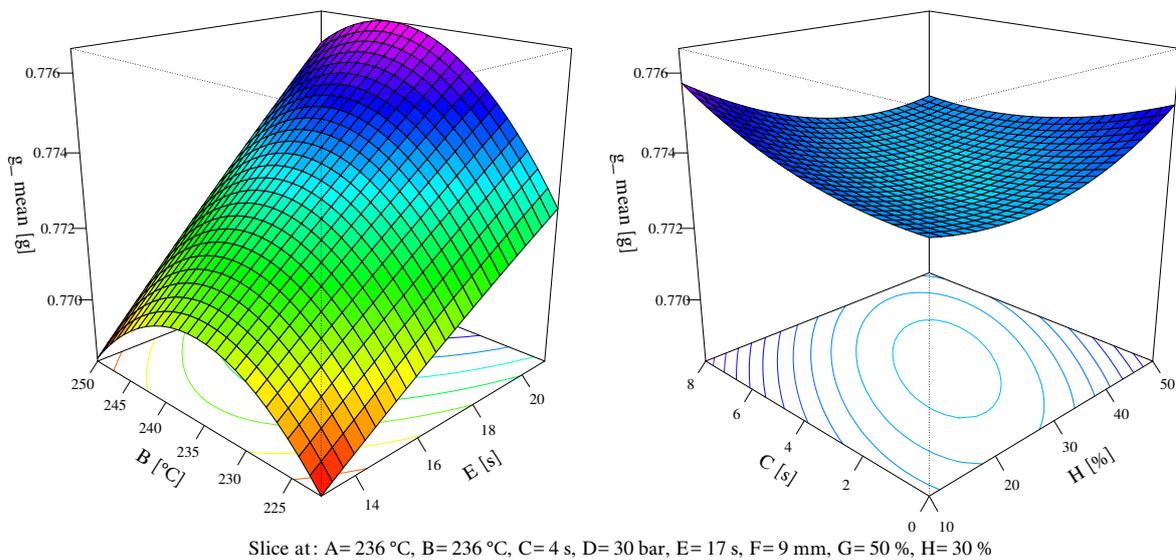
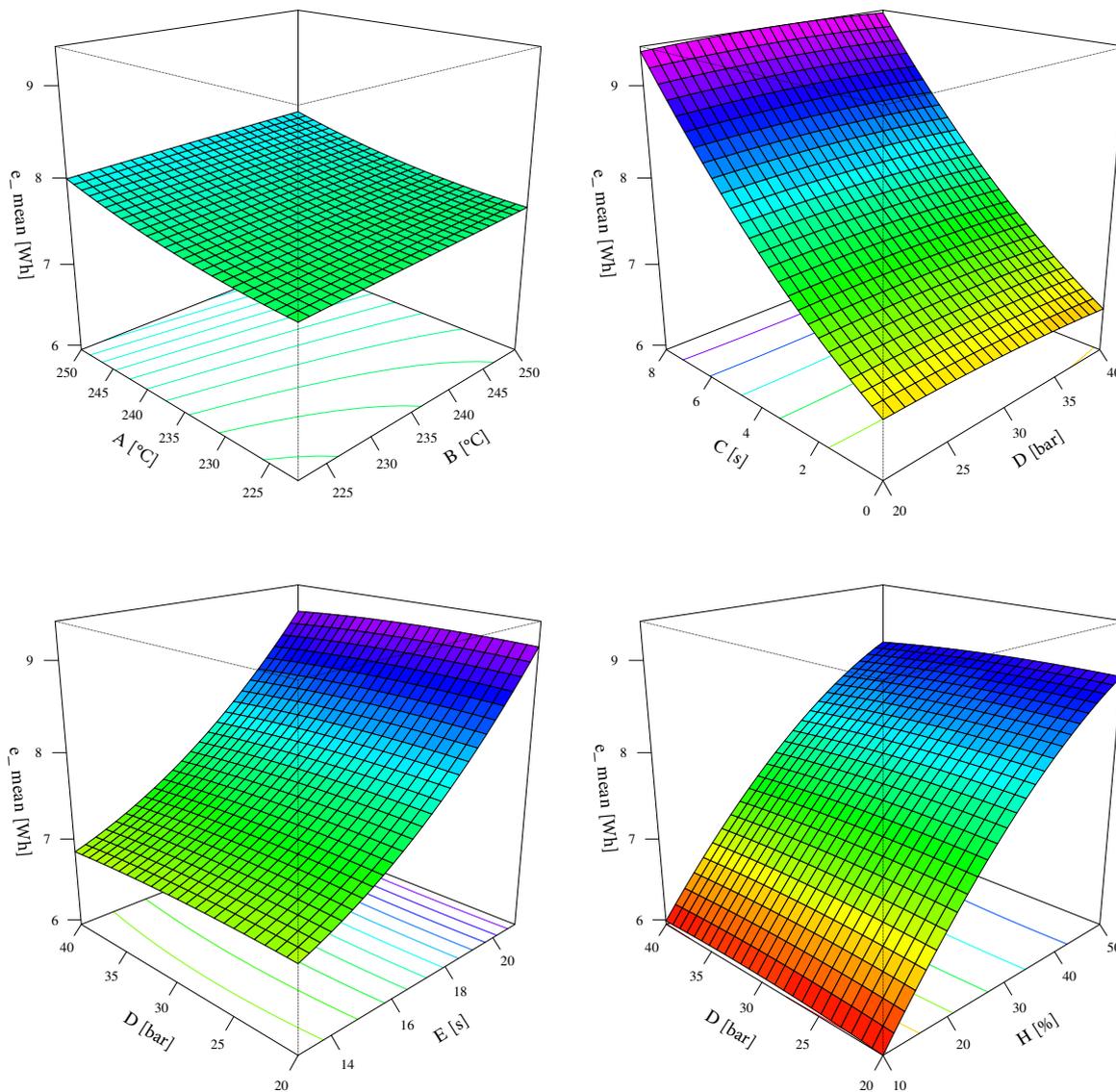


Abbildung 4.21: Wechselwirkungen B:E und C:H zum Gewicht \bar{g}

Die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) haben dem linken Plot in Abbildung 4.21 nach eine starke Wechselwirkung zueinander. Die Einstellungen dieser Faktoren bedingen sich stark gegenseitig. Befindet sich die Zylindertemperatur am unteren Ende ($T_D + T_H = 222$ °C) oder am oberen Ende ($T_D + T_H = 250$ °C) des Prozessfensters, dann fällt das Gewicht \bar{g} klein aus. Im mittleren Bereich, bei ca. 235 °C, ist das Gewicht am höchsten. Mit längerer Nachdruckzeit erhöht sich das Gewicht linear. Eine schwache Wechselwirkung hingegen weisen die Restkühlzeit t_K (Faktor C) und die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) auf. Das Gewicht wird durch diese Wechselwirkung nur in einer zu vernachlässigenden Höhe von 0,001 g beeinflusst.

Um die Bauteilqualität zu verbessern, sollte das Gewicht erhöht werden. Das Gewicht erhöht sich im signifikanten Maße durch einen hohen Nachdruck p_N (Faktor D), eine mittlere Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) sowie durch eine lange Nachdruckzeit t_N (Faktor E). Der Zylindertemperatur und der Nachdruckzeit sollten bei Optimierungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da beide Faktoren in Wechselwirkung treten. Dies ist insbesondere gegeben, wenn diese gleichzeitig variiert werden.

Der Energieverbrauch \bar{e} wird maßgeblich durch die Faktoren A, C, E, H beeinflusst, siehe Abbildung 4.22.



Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %

Abbildung 4.22: Faktoren A, C, E und H zum Energieverbrauch \bar{e}

Sehr schwach fällt die Wirkung der Schmelztemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) aus. Der Energieverbrauch \bar{e} liegt bei niedriger Schmelztemperatur ($T_P + T_U = 222 \text{ °C}$) bei ca. 7,5 Wh und steigt auf 8 Wh bei hoher Temperatur ($T_P + T_U = 250 \text{ °C}$) an. Im Vergleich zu den übrigen Faktoren handelt es sich um einen schwachen Einfluss. Im Plot oben rechts ist der Einfluss der Restkühlzeit t_K (Faktor C) ersichtlich. Ist die Restkühlzeit ausgeschaltet, wird das Bauteil also direkt nach der Nachdruckphase entformt, dann liegt der Energieverbrauch \bar{e} bei ca. 6,5 Wh. Die maximale Restkühlzeit von 8 s bewirkt einen Verbrauch von ca. 9,5 Wh je Zyklus. Zwischen minimaler und maximaler Einstellung liegt eine Differenz von ca. 3 Wh. Die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) wird um den gleichen Gesamtbetrag von 8 s verlängert, verursacht allerdings nur eine Erhöhung um 2 - 2,5 Wh des Energieverbrauchs \bar{e} . Wird die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) von 10 % auf 50 % angehoben, vergrößert sich der Energieverbrauch \bar{e} je Zyklus ebenfalls um ca. 3 Wh. Alle vier Faktoren haben einen linearen Verlauf.

Die Wechselwirkung der Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) führt zu dem höchsten gemessenen Energieverbrauch \bar{e} über die gesamte Versuchsreihe des orthogonal zusammengesetzten Versuchsplans (Abbildung 4.23).

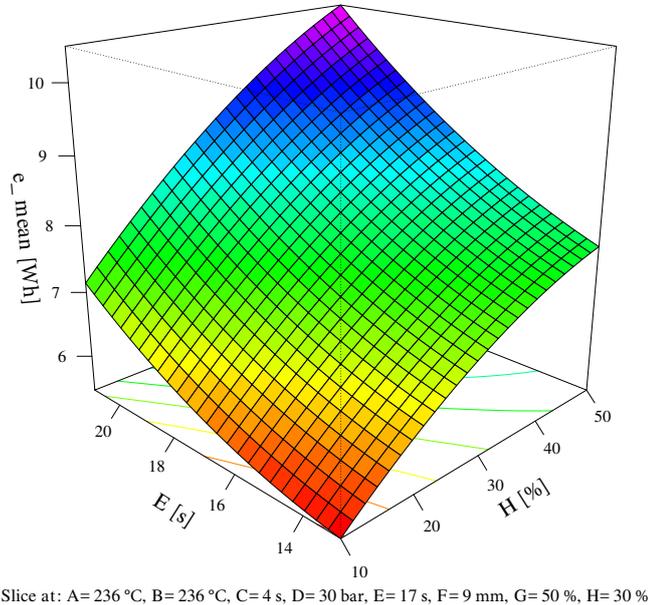


Abbildung 4.23: Wechselwirkung E:H zum Energieverbrauch \bar{e}

Wenn die Nachdruckgeschwindigkeit bei kurzer Nachdruckzeit ($t_N = 13$ s) hoch eingestellt ist ($v_N = 50$ %), führt dies zu einem Energieverbrauch von ca. 8 Wh. Ist jedoch auch die Nachdruckzeit lang ($t_N = 21$ s), kommt es zu einem deutlich höheren Energieverbrauch von 10,5 - 11 Wh.

Verringert wird der Energieverbrauch \bar{e} sowohl durch die Schmelztemperatur (Faktor A), die Restkühl- und Nachdruckzeit (Faktor C und E), als auch durch die Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H). Die Faktoren E und H treten in Wechselwirkung und verursachen die höchsten Energieverbrauchswerte.

Faktoren, die die Entformung \overline{ent} beeinflussen, sind in Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25 dargestellt. In Abbildung 4.25 sind zusätzlich die Wechselwirkungen A:D und A:E gezeigt. Inbegriffen sind alle Faktoren, die bereits starke Effekte besitzen (vgl. Abbildung 4.12 auf Seite 47).

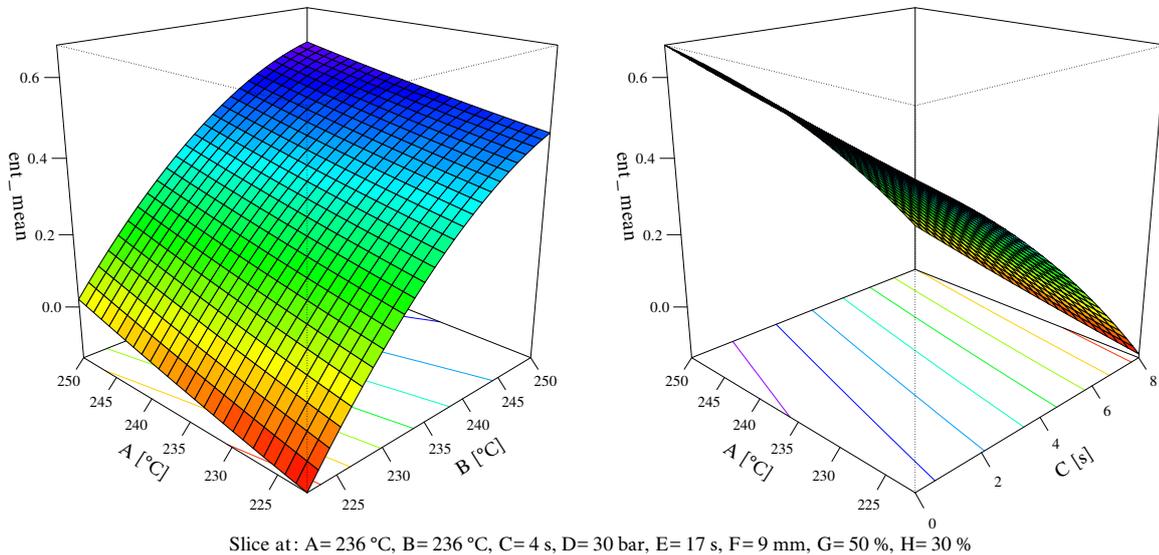


Abbildung 4.24: Faktoren B und C zur Entformung \overline{ent}

Es wird ersichtlich, dass die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) auch über den erweiterten Bereich des höherwertigen Modells linearen Einfluss auf die Entformung \overline{ent} hat. Mit 225 °C der Zylindertemperatur entformt das Bauteil nicht. Liegt die Zylindertemperatur jedoch bei 250 °C, ist es wahrscheinlicher, dass das Bauteil entformt. Durch die höhere Temperatur unmittelbar vor dem Formnest wird mehr Material in die Form gespritzt. Dadurch steht das Bauteil unter höherer Spannung und entformt besser.

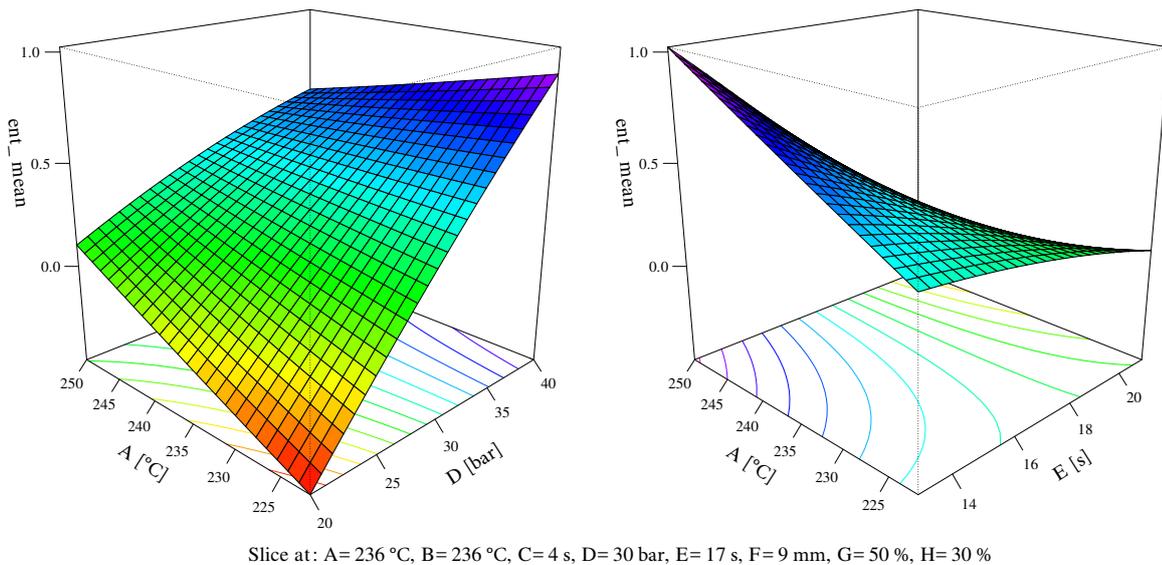


Abbildung 4.25: Faktoren D und E sowie Wechselwirkungen A:D und A:E zur Entformung \overline{ent}

Eine lange Restkühlzeit t_K (Faktor C) und lange Nachdruckzeit t_N (Faktor E) begünstigen die Entformung \overline{ent} nicht. Das Bauteil kühlt durch die längeren Zeitspannen mehr ab und

schrumpft bereits im Formnest. Die Bauteilspannung im Formnest nimmt dadurch ab. Die größte Einwirkung erfährt die Entformung \overline{ent} durch den Nachdruck p_N (Faktor D).

Eine niedrige Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) scheint die Entformung \overline{ent} bei niedrigem Nachdruck p_N (Faktor D) zu benachteiligen, siehe Wechselwirkung A:D. Eine hohe Schmelzetemperatur (250 °C) begünstigt dagegen die Entformung bei niedrigem Nachdruck ($p_N = 20$ bar). Die umgekehrte Tendenz ergibt sich bei einem hohen Nachdruck ($p_N = 40$ bar). Diametral dazu verhält es sich mit der Nachdruckzeit, siehe die Wechselwirkung A:E. Da die Nachdruckzeit bereits als Faktor einen gegenläufigen Effekt zum Nachdruck aufweist, erscheint dies schlüssig.

Eine Veränderung der Zykluszeit \bar{z} ergibt sich aus den in Abbildung 4.26 gezeigten Faktoren.

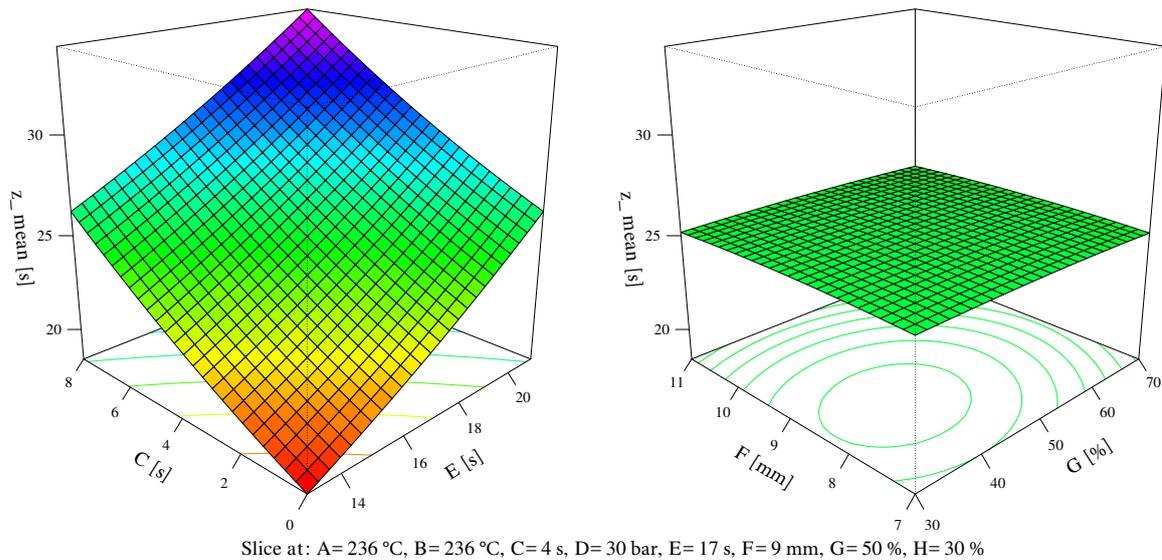


Abbildung 4.26: Faktoren C, E, F und G zur Zykluszeit \bar{z}

Dargestellt sind alle Faktoren, die bereits Effekte besitzen (vgl. Abbildung 4.13 auf Seite 48). Hierbei haben der Umschaltzeitpunkt $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) und die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) einen sehr geringen Effekt. Dies bestätigt auch der rechte Plot in Abbildung 4.26. Ausschlaggebend ist nur die Restkühl- und Nachdruckzeit (Faktor C und E). Der RSM-Analyse nach ist für die Zykluszeit keine Wechselwirkung von Relevanz.

4.3.3 Signifikanzprüfung

Mithilfe der Varianzanalyse (ANOVA) wird eine statistisch aussagekräftige Signifikanzprüfung der Effekte durchgeführt. In Tabelle 4.11 sind die Ergebnisse der ANOVA vom Modell 1. Ordnung sowie vom Modell 2. Ordnung tabelliert.

Die Ergebnisse sind je Faktor bzw. Wechselwirkung und je Zielgröße im Vergleich nebeneinander angeordnet. Die schwarzen Sternchen entsprechen hierbei den Ergebnissen aus dem Modell 1. Ordnung und die roten Sternchen den Ergebnissen aus dem Modell 2. Ordnung. Signifikante quadratische Faktoren können nur den Ergebnissen des Modells 2. Ordnung entnommen werden. Zusätzlich ist die Stärke jeder einzelnen Signifikanz angegeben. Die Stärke ergibt sich aus der Höhe der Irrtumswahrscheinlichkeit α . Die Irrtumswahrscheinlichkeiten können der Legende entnommen werden. Je niedriger die Irrtumswahrscheinlichkeit ist, desto größer ist der Annahmehereich. Daher ist die Signifikanz eines Faktors bzw. einer Wechselwirkung umso stärker je kleiner die Irrtumswahrscheinlichkeit ausfällt.

Tabelle 4.11: ANOVA-Tabelle

Faktor / Wechselwirkung	Zielgröße							
	Gewicht \bar{g}		Energieverbrauch \bar{e}		Entformung \bar{ent}		Zykluszeit \bar{z}	
A			****	****				
B	***	****	***	*	****	****	**	
C			****	****	****	****	****	****
D	****	****			****	****		
E	****	****	****	****	****	****	****	****
F							****	**
G			*		*	*	****	**
H			****	****				
A:B								
A:C								
A:D					*	*		
A:E					*	*		
A:F								
A:G							**	
A:H								
B:C								
B:D								
B:E	*	*						
B:F								
B:G								
B:H								
C:D								
C:E								
C:F								
C:G								
C:H		*						
D:E								
D:F								
D:G								
D:H								
E:F								
E:G								
E:H			****	****			**	
F:G								**
F:H								
G:H								
A ²								
B ²		****						
C ²				**				****
D ²								
E ²				***				***
F ²						*		
G ²						**		
H ²				***				

SCHWARZ	Modell 1. Ordnung
ROT	Modell 2. Ordnung
****	Starke Signifikanz ($\alpha = 0 \%$)
***	Hohe Signifikanz ($\alpha = 1 \%$)
**	Geringe Signifikanz ($\alpha = 5 \%$)
*	Schwache Signifikanz ($\alpha = 10 \%$)

Nach Tabelle 4.11 sind für das Gewicht \bar{g} folgende Faktoren signifikant:

- Die Zylindertemperatur (Faktor B),
- der Nachdruck (Faktor D)
- und die Nachdruckzeit (Faktor E).

Die Zylindertemperatur ist zusätzlich als quadratischer Faktor signifikant (Faktor B²). Der Einfluss der Zylindertemperatur ist also quadratisch im Bezug auf das Gewicht \bar{g} . Schwach signifikant ist die Wechselwirkung B:E.

Starke signifikante Auswirkungen auf den Energieverbrauch \bar{e} haben:

- Die Schmelztemperatur (Faktor A),
- die Zylindertemperatur (Faktor B),
- die Restkühlzeit (Faktor C),
- die Nachdruckzeit (Faktor E)
- und die Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H).

Die Restkühlzeit, die Nachdruckzeit sowie die Nachdruckgeschwindigkeit sind darüber hinaus als quadratische Faktoren gering und hoch signifikant (Faktor C², E² und H²). Stark signifikant ist die Wechselwirkung E:H.

Die Entformung \overline{ent} ist durch die nachstehenden stark signifikanten Faktoren beeinflusst:

- Die Zylindertemperatur (Faktor B),
- die Restkühlzeit (Faktor C),
- den Nachdruck (Faktor D)
- und die Nachdruckzeit (Faktor E).

Die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) hat eine schwache Signifikanz (vgl. Abbildung 4.12 auf Seite 47). Die quadratischen Effekte des Umschaltpunktes $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F²) und der Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G²) sowie die Wechselwirkungen A:D und A:E weisen ebenfalls eine schwache bis geringe Signifikanz auf.

Die Zykluszeit \bar{z} bedingt sich überwiegend durch diese vier Faktoren:

- Die Restkühlzeit (Faktor C),
- die Nachdruckzeit (Faktor E),
- den Umschaltpunkt (Faktor F)
- sowie der Einspritzgeschwindigkeit (Faktor G).

Es ist keine Wechselwirkung signifikant. Die Restkühl- und Nachdruckzeit haben zusätzlich hohen bis starken signifikanten quadratischen Effekt (Faktor C² und E²). Der Umschaltpunkt und die Einspritzgeschwindigkeit haben trotz geringer bis starker Signifikanz keinen maßgeblichen Einfluss auf die Zykluszeit (vgl. Abbildung 4.13 auf Seite 48 und Abbildung 4.26 auf Seite 63). Dies hängt damit zusammen, dass bei statistischen Tests die Verhältnisse zwischen den Faktoren innerhalb des zu untersuchenden Systems eine Rolle spielen.

Die Ergebnisse aus der Effektuntersuchung sowie der RSM-Analyse werden bestätigt. Die Erkenntnisse erscheinen im gebotenen technischen Zusammenhang plausibel. Die Einordnung und Plausibilisierung lässt sich den Ausführungen zu der Effektuntersuchung in Abschnitt 4.3.1.2 und der RSM-Analyse in Abschnitt 4.3.2.2 entnehmen. Die Ergebnisse der Hauptversuche werden in Abschnitt 5.1 validiert.

4.3.4 Untersuchung des Energieverlaufs

In diesem Abschnitt wird auf den Verlauf der Energie während eines Zyklus eingegangen. Es werden die fünf Versuche des orthogonal zusammengesetzten Versuchsplans mit den jeweils höchsten und niedrigsten Energieverbräuchen betrachtet. Zusätzlich wird der Energieverbrauch \bar{e} ins Verhältnis zu den anderen Zielgrößen gesetzt.

Die fünf Verläufe mit den niedrigsten Energieverbräuchen sind in Abbildung 4.27 abgebildet. Dazu finden sich die Werte der Zielgrößen und der vorgenommenen Faktorstufenkombination in absteigender Reihenfolge, beginnend bei dem Versuch mit dem höchsten Energieverbrauch, in Tabelle 4.12.

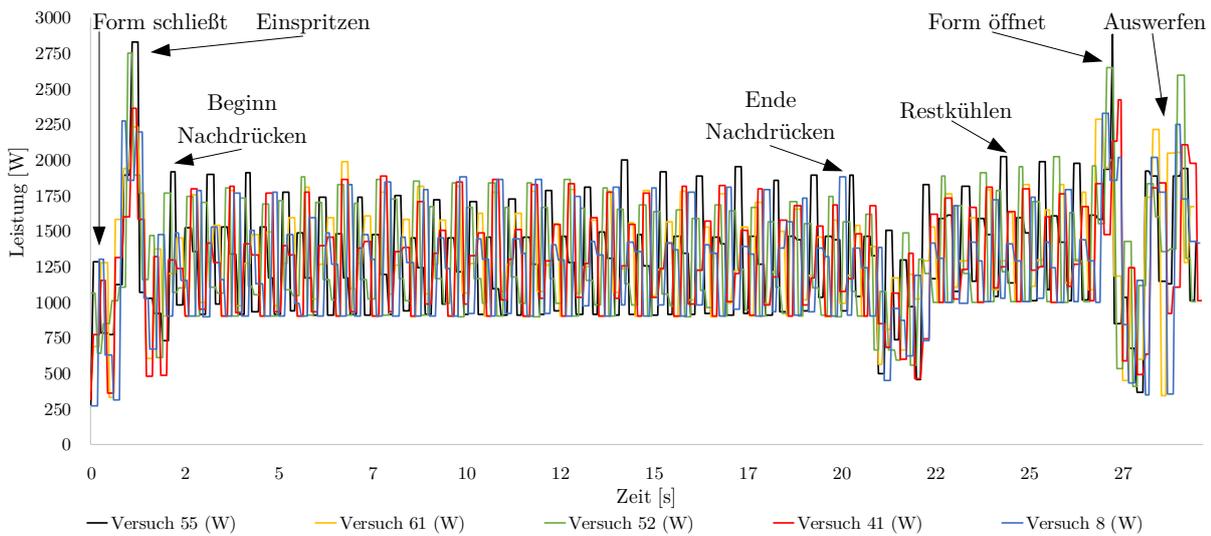


Abbildung 4.27: Versuche mit hohem Energieverbrauch

Tabelle 4.12: Versuche mit hohem Energieverbrauch

Versuch	Zielgröße				Faktorstufenkombination							
					A	B	C	D	E	F	G	H
	\bar{e}	\bar{g}	\overline{ent}	\bar{z}	$T_P + T_U$	$T_D + T_H$	t_K	p_N	t_N	$s_U + s_{Uv}$	v_E	v_N
55 (W)	10,06 Wh	0,773 g	0	29,4 s	243	243	6	25	19	10	40	40
61 (W)	10,05 Wh	0,776 g	0,58	29,3 s	243	243	6	35	19	10	60	40
52 (W)	10,05 Wh	0,772 g	0	29,4 s	243	229	6	25	19	8	60	40
41 (W)	9,89 Wh	0,777 g	0	29,5 s	243	229	6	35	19	8	40	40
8 (W)	9,75 Wh	0,775 g	0	29,4 s	229	243	6	25	19	8	60	40

^W Würfelpunktversuch

Alle Versuche in Tabelle 4.12 haben gemein, dass die Restkühlzeit t_K (Faktor C), die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) auf oberster Faktorstufe stehen. Vier Werte der Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) befinden sich auch auf der obersten Faktorstufe. Die übrigen Faktoren stehen zwischen oberer und unterer Faktorstufe im Gleichgewicht. Das Gewicht des Bauteils ist bei allen fünf Versuchen im mittleren bis oberen Bereich zwischen minimalem und maximalem Gewicht des zentral zusammengesetzten Versuchsplans angesiedelt. Dies lässt sich durch die langen Nachdruckzeiten erklären (vgl. Abbildung 4.10 auf Seite 45). Das Bauteil wird bei diesen Versuchen nie gut entformt. Vier Werte der Entformung \overline{ent} stehen auf dem Minimalwert. Dies hängt mit den langen Restkühl- und

Nachdruckzeiten zusammen (vgl. Abbildung 4.12 auf Seite 47). Die Zykluszeiten \bar{z} haben alle-
samt die höchsten Werte des gesamten Versuchsplans, da lange Restkühl- und Nachdruckzeiten
die Zykluszeit erhöhen.

Um die Ergebnisse der Zielgrößen besser einordnen zu können, sind im Folgenden Referenzwerte
aus dem zentral zusammengesetzten Versuchsplan des Hauptversuchs aufgelistet:

- Gewicht \bar{g} : Max.: 0,778 g Min.: 0,768 g,
- Energieverbrauch \bar{e} : Max.: 10,06 Wh Min.: 5,72 Wh,
- Entformung \overline{ent} : Max.: 1 Min.: 0,
- Zykluszeit \bar{z} : Max.: 29,5 s Min.: 21,3 s.

Die Verläufe mit den niedrigsten Energieverbräuchen finden sich in Abbildung 4.28. Zugehörig
dazu sind die Zielgrößen und Faktorstufenkombinationen in Tabelle 4.13 angegeben.

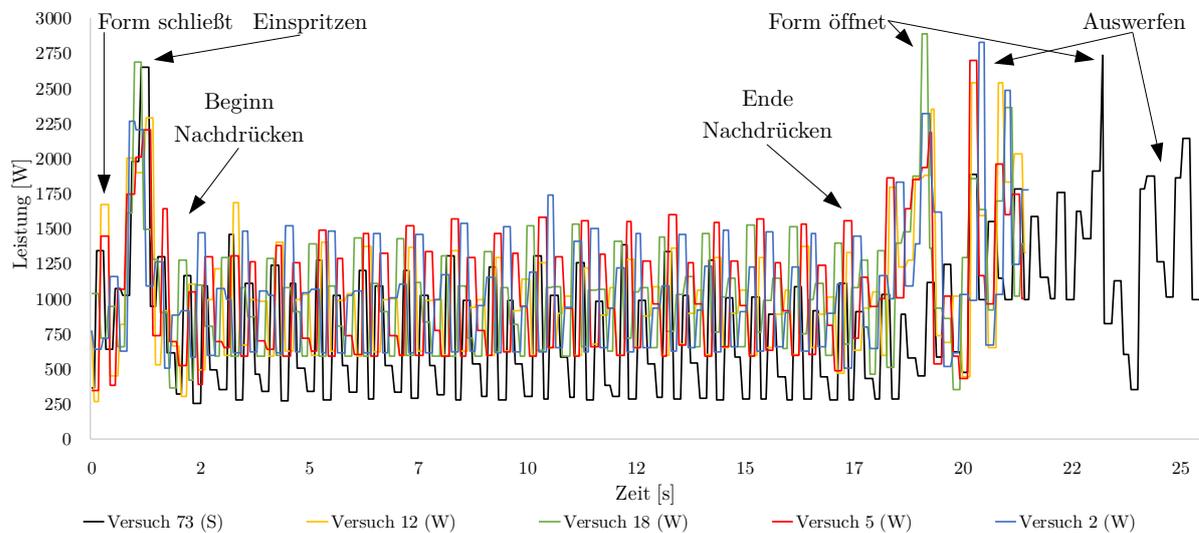


Abbildung 4.28: Versuche mit niedrigem Energieverbrauch

Tabelle 4.13: Versuche mit niedrigem Energieverbrauch

Versuch	Zielgröße				Faktorstufenkombination							
	\bar{e}	\bar{g}	\overline{ent}	\bar{z}	A	B	C	D	E	F	G	H
					$T_P + T_U$	$T_D + T_H$	t_K	p_N	t_N	$s_U + s_{Uv}$	v_E	v_N
73 (S)	5,72 Wh	0,775 g	0,66	25,4 s	236	236	4	30	17	9	50	10
12 (W)	5,73 Wh	0,771 g	1	21,4 s	229	229	2	35	15	10	40	20
18 (W)	5,79 Wh	0,774 g	0,98	21,4 s	229	243	2	35	15	8	60	20
5 (W)	5,81 Wh	0,769 g	0,46	21,3 s	229	229	2	25	15	10	60	20
2 (W)	5,87 Wh	0,769 g	1	21,5 s	229	243	2	25	15	8	40	20

^W Würfelpunktversuch
^S Sternpunktversuch

Unter den Versuchen mit den niedrigsten Energieverbräuchen befindet sich an erster Stelle ein
Sternpunktversuch. Alle Faktoren dieses Versuchs stehen auf den Werten der Zentralpunktein-
stellung, abgesehen von der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H). Dieser Faktor steht auf
der niedrigsten Faktorstufe. Hierdurch kommt auch der sehr niedrige Energieverbrauch zustande,
insbesondere in der Nachdruckphase. Im Vergleich zu den übrigen Versuchen ist der Energie-
verlauf des Versuchs 73 nochmals niedriger. Die Schmelzetemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A), die

Restkühl- und Nachdruckzeit (Faktor C und E) sowie die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) stehen bei den übrigen Würfelpunktversuchen auf niedrigster Faktorstufe. Die weiteren Faktoren sind zwischen oberer und unterer Faktorstufe auch hier im Gleichgewicht. Die Zykluszeiten \bar{z} sind die kürzesten im gesamten Versuchsplan, das Gewicht \bar{g} ist im Mittel allerdings ebenfalls niedriger, als bei den Versuchen mit den höchsten Energieverbräuchen \bar{e} , verursacht durch die kurzen Nachdruckzeiten. Die Entformung \overline{ent} ist besser bei den Versuchen in Tabelle 4.13. Dies bestätigt die nachteilige Wirkung auf die Entformung \overline{ent} durch lange Restkühl- und Nachdruckzeiten, die bereits bei der Effektuntersuchung sowie RSM-Analyse festgestellt wurde (vgl. Abbildung 4.12 auf Seite 47 und Abbildung 4.24 sowie Abbildung 4.25 aus Seite 62).

Kapitel 5

Modellvalidierung und Optimierungspotenziale

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Hauptversuche auf ihre Übertragbarkeit und Unabhängigkeit untersucht und Optimierungsempfehlungen abgeleitet. Die Validierung erfolgt auf Basis weiterer Versuchspläne. Zusätzlich zum Testwerkzeug wird ein Serienwerkzeug zur Validierung der Geometrieunabhängigkeit eingesetzt. Die Validierung der Materialunabhängigkeit wird mit einem zweiten Material in demselben Testwerkzeug aus den Hauptversuchen realisiert.

5.1 Validierung des Modells

5.1.1 Validierung der Geometrieunabhängigkeit

Für die Validierung der Materialunabhängigkeit wird ein Serienbauteil eines Auftraggebers verwendet. Da dieser Artikel einer Verschwiegenheitsvereinbarung unterliegt, dürfen keine Bildveröffentlichungen in dieser Arbeit gezeigt werden. Daher soll eine kurze vergleichende Beschreibung der Einordnung des Bauteils dienen. Der Vergleich der Bauteil- und Werkzeugmerkmale zwischen dem Versuchs- und Serienbauteil ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Bauteil- und Werkzeugvergleich

Eigenschaft	Versuchsbauteil „Kreuz“	Serienbauteil „Sicherungsstopfen“
Min. Bauteilquerschnitt	2,5 mm	0,65 mm
Max. Bauteilquerschnitt	6 mm	3,2 mm
Größte Abmessung	30 mm	44,2 mm
Gewicht	0,775 g	0,390 g
Geometrieform	Kreuzförmig, flach	T-förmig, flach
Material	PP	PP + 2 % PE-Farbatch*
Anzahl Formnester		Eins
Angussystem	Direkteinspritzung im Knotenpunkt	
Zusätzlicher Heisskanal		Ja
Auswerferanzahl / -positionierung	Einer, zentral	Sechs, gleichmäßig verteilt
Wärmeisolierung	Stirnseitig zwischen Spannflächen	

* Farbatch: ROWALID PE-22121 ROT

Das Serienbauteil hat im Vergleich zu dem Testbauteil deutlich geringere Querschnitte. Die Fließwege sind bei dem Serienbauteil durch die größere Gesamtabmessung geringfügig länger. Das Gewicht des Serienbauteils liegt ungefähr bei der Hälfte des Gewichts des Testbauteils. Beide Bauteile sind aus PP, wobei dem Serienbauteil zur Färbung ein Farbatch aus Polyethylen (PE) beigemischt ist. Es wird angenommen, dass dieser sehr geringe Anteil an PE keinen Einfluss auf

das Materialverhalten des PP hat. Zumal beide Kunststoffe eine teilkristalline Molekülstruktur besitzen und sich im Aufschmelz- und Erstarrungsverhalten stark ähneln (vgl. Abbildung 5.5 auf Seite 76). Die Geometrie des Serienbauteils ist T-förmig, flach und hat eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von ca. 12 mm vom Knotenpunkt ausgehend.

Beide Werkzeuge haben einen Heisskanal und nur ein Formnest. Das Material wird am Knotenpunkt per Direkteinspritzung eingespritzt. Auch das Werkzeug des Serienbauteils besitzt lediglich Wärmeisolationsplatten stirnseitig zwischen den Spannplatten. Die sechs Auswerfer des Serienwerkzeugs sind gleichmäßig verteilt und sorgen für eine optimale Entformung des Bauteils. Dadurch ist es nicht möglich das Entformungsverhalten zu validieren. Der Betriebsmeister bestätigt jedoch aus langjähriger Berufserfahrung, dass alle Parameter, die dafür sorgen, dass das Bauteil fester in das Formnest gepresst wird, die Entformung begünstigen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Nachdruckhöhe p_N (Faktor D) zu nennen. Bei hohem Nachdruck wird das Bauteil stärker in das Formnest gepresst und besser entformt. Die Untersuchungen am Testbauteil bestätigen dies (vgl. Abbildung 4.12 auf Seite 47).

In Tabelle 5.2 sind die Faktoren und Faktorstufen des Versuchsplans angegeben.

Tabelle 5.2: Validierung der Geometrieunabhängigkeit: Faktoren und Faktorstufen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Kodierung	Faktorstufe					Einheit
			$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Schmelzetemperatur	$T_P + T_U$	A	222	229	236	243	250	°C
Zylindertemperatur	$T_D + T_H$	B	280	287	294	301	308	°C
Restkühlzeit	t_K	C	0	1	2	3	4	s
Nachdruck	p_N	D	15	20	25	30	35	bar
Nachdruckzeit	t_N	E	3	5	7	9	11	s
Umschaltpunkt Nachdruck & Geschwindigkeit	$s_U + s_{Uv}$	F	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	mm
Einspritzgeschwindigkeit	v_E	G	30	40	50	60	70	%
Nachdruckgeschwindigkeit	v_N	H	10	20	30	40	50	%

Die Validierungsversuche werden mit den gleichen Versuchsplaneinstellungen vorgenommen, wie bereits bei den Hauptversuchen (siehe Anhang D.3). Dadurch ist sichergestellt, dass keinerlei Verfälschung durch den Versuchsplan selbst entsteht. Es wird der Versuchsplan 2. Ordnung aus Anhang E.2 mit den geänderten Faktorstufen wiederholt. Die Prozessfenster für alle Faktoren entstehen analog zur Vorgehensweise der Hauptversuche über das konventionelle Optimierungsschema und eine Füllstudie (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Einstellungen für den Zentralpunktversuch und das Prozessfenster sind das Ergebnis dieser Vorgehensweise. Die Lage des Umschaltpunktes befindet sich am Zentralpunkt im Bereich der gerade abgeschlossenen Formfüllung. Der Siegelpunkt liegt bei 7 s Nachdruckzeit, mit 25 bar Nachdruck und den übrigen Einstellungen am Zentralpunkt. Aufgrund sehr geringer Querschnitte im Heisskanal muss das Werkzeug mit höherer Zylindertemperatur betrieben werden. Dadurch erstarrt das Material nicht bereits vor dem Formnest. Ein stetiger Durchsatz muss garantiert werden, um die Verweilzeiten zu minimieren und das Verbrennen von Material zu verhindern. Die Einstellungen der übrigen, konstant gehaltenen, Maschinenparameter sind in Anhang C.2 aufgelistet.

Aus den Daten des Versuchsplans werden die Modelle 1. und 2. Ordnung erstellt und bewertet. Zur Bewertung werden die gleichen Kontrollverfahren angewendet wie bei den Hauptversuchen. Es sind ausschließlich die Ergebnisse der numerischen Modellbewertung sowie die Verteilung der Residuen in Anhang K.1 und K.2 zusammengefasst. Die Modelle besitzen eine ebenso hohe Güte wie die Modelle des Testbauteils. Wie bereits erwähnt, ist es nicht möglich, ein Modell für die Entformung zu bilden.

Der Signifikanzvergleich zu den Ergebnissen der Hauptversuche ist in Tabelle 5.3 abgebildet.

Tabelle 5.3: ANOVA-Tabelle: Signifikanzvergleich bezüglich Geometrie

Faktor / Wechselwirkung	Zielgröße											
	Gewicht \bar{g}				Energieverbrauch \bar{e}				Zykluszeit \bar{z}			
A					****	****	****	****				
B	***		****		***	**	*	*	**			
C					****	****	****	****	****	****	****	****
D	****	****	****	****						*		
E	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****
F								*	****	****	**	**
G					*				****	****	**	**
H					****	****	****	****				
A:B												
A:C		*										
A:D												
A:E												
A:F												
A:G									**			
A:H												
B:C												
B:D												
B:E	*	****	*	****								
B:F												
B:G												
B:H												
C:D												
C:E												
C:F						*						
C:G												
C:H			*									
D:E		***		*								
D:F												
D:G												
D:H												
E:F												
E:G												
E:H					****	****	****	****				
F:G									**	****		
F:H												
G:H												
A ²												
B ²			****									
C ²								**		****	****	
D ²												
E ²				****				***		***		
F ²												
G ²												
H ²				****				***	**			

SCHWARZ	Modell 1. Ordnung Versuchsbauteil „Kreuz“
BLAU	Modell 1. Ordnung Serienbauteil „Sicherungsstopfen“
ROT	Modell 2. Ordnung Versuchsbauteil „Kreuz“
GRÜN	Modell 2. Ordnung Serienbauteil „Sicherungsstopfen“
****	Starke Signifikanz ($\alpha = 0 \%$)
***	Hohe Signifikanz ($\alpha = 1 \%$)
**	Geringe Signifikanz ($\alpha = 5 \%$)
*	Schwache Signifikanz ($\alpha = 10 \%$)

Der Aufbau der ANOVA-Tabelle ist analog zu der ANOVA-Tabelle der Hauptversuche (vgl. Tabelle 4.11 auf Seite 64). Die ANOVA-Tabelle ist um die Ergebnisse der Signifikanzprüfung der Geometrievalidierung erweitert. Die schwarzen Sternchen entsprechen hierbei den Ergebnissen aus dem Modell 1. Ordnung des Versuchsbauteils, die blauen Sternchen den Ergebnissen aus dem Modell 1. Ordnung des Serienbauteils, die roten Sternchen den Ergebnissen aus dem Modell 2. Ordnung des Testbauteils und die grünen Sternchen den Ergebnissen aus dem Modell 2. Ordnung des Serienbauteils. Die Bedeutung der Signifikanzniveaus kann der Legende entnommen werden. An geeigneter Stelle sind die Erläuterungen zu der ANOVA-Tabelle zusätzlich durch graphische Vergleiche (RSM-Plots) unterstützt. Es werden nur die Faktoren graphisch miteinander verglichen, bei denen ein deutlicher Unterschied zu der RSM-Analyse der Hauptversuche besteht (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Je Abbildung sind auf der linken Seite die Faktoren der Hauptversuche abgebildet und auf der rechten Seite die Faktoren der Validierungsversuche.

Für das Gewicht \bar{g} werden der Nachdruck p_N (Faktor D) und die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) als stark signifikante Faktoren bestätigt.

Die Signifikanz der Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) wird nicht bestätigt. Die quadratischen Effekte der Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) sind bei dem Serienbauteil stark signifikant. In Abbildung 5.1 ist der Vergleich der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) zwischen dem Versuchsbauteil und dem Serienbauteil dargestellt.

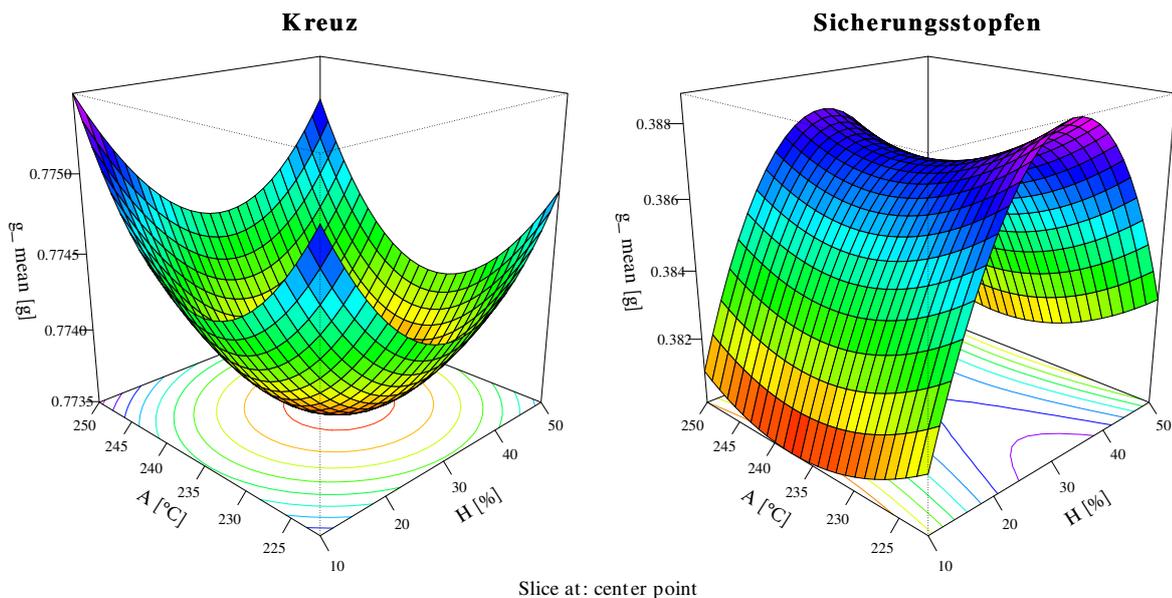


Abbildung 5.1: Vergleich des Faktors H zum Gewicht \bar{g}

Die vertikalen Achsen der Zielgröße sind in Abbildung 5.1 unterschiedlich skaliert. Die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) hat keinen signifikanten quadratischen Effekt auf das Gewicht \bar{g} des Versuchsbauteils „Kreuz“. Der Unterschied im linken Plot zwischen unterster und oberster Koordinate beträgt lediglich 0,002 g. Anders verhält es sich im rechten Plot des Serienbauteils „Sicherungsstopfen“. Hier hat die Nachdruckgeschwindigkeit einen starken signifikanten Effekt auf das Gewicht \bar{g} . Mit ca. 30 % Nachdruckgeschwindigkeit ist das Maximalgewicht von 0,388 g erreicht. Wird die Nachdruckgeschwindigkeit allerdings über 30 % angehoben, sinkt das Gewicht wieder. Durch die wesentlich geringeren Querschnitte des Serienbauteils kühlt die eingespritzte Masse schneller ab. Somit ist eine ausreichend hohe Nachdruckgeschwindigkeit entscheidend, um mehr Masse in kürzerer Zeit in das Formnest einzubringen. Eine zu hohe Nachdruckgeschwindigkeit hat jedoch einen gegenläufigen Effekt. Dies lässt sich zum Großteil durch die Überlagerung des Verhaltens nach *Hagen-Poiseuille* (vgl. Abschnitt 4.3.1.1) mit dem

Abkühlereinfluss (Temperatureinfluss) erklären. In Abbildung 5.2 ist diese Überlagerung qualitativ dargestellt.

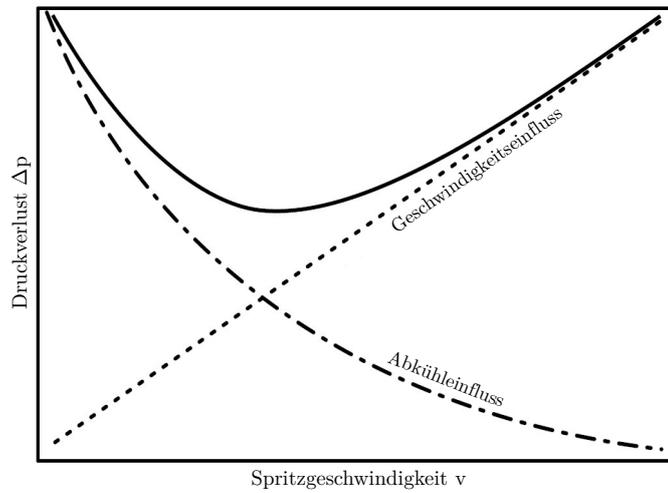


Abbildung 5.2: Einfluss der Spritzgeschwindigkeit und der Abkühlung auf den Druckverlust beim Spritzgießen, modifiziert nach [13]

Aus der Überlagerung ergibt sich die Kurve mit der durchgezogenen Linie. Durch die Abkühlung des Kunststoffes in der Form, kommt es bei niedrigen und hohen Spritzgeschwindigkeiten zu einem hohen Druckverlust. Genau dieser Einfluss sorgt für den Verlauf des rechten Plots in Abbildung 5.1. Mit 30 % Spritzgeschwindigkeit wird der geringste Druckverlust erzeugt und durch den resultierenden höheren Nachdruck wird mehr Kunststoff in das Formnest eingebracht. Verstärkt wird der Effekt dieser Überlagerung durch den Einfluss der dünnen Bauteilquerschnitte, da hierdurch der Druckverlust bei einer hohen Nachdruckgeschwindigkeit (30% - 50%) nochmals ansteigt.

Die Verläufe der Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) sowie der Nachdruckzeit t_N (Faktor E) werden in Abbildung 5.3 verglichen.

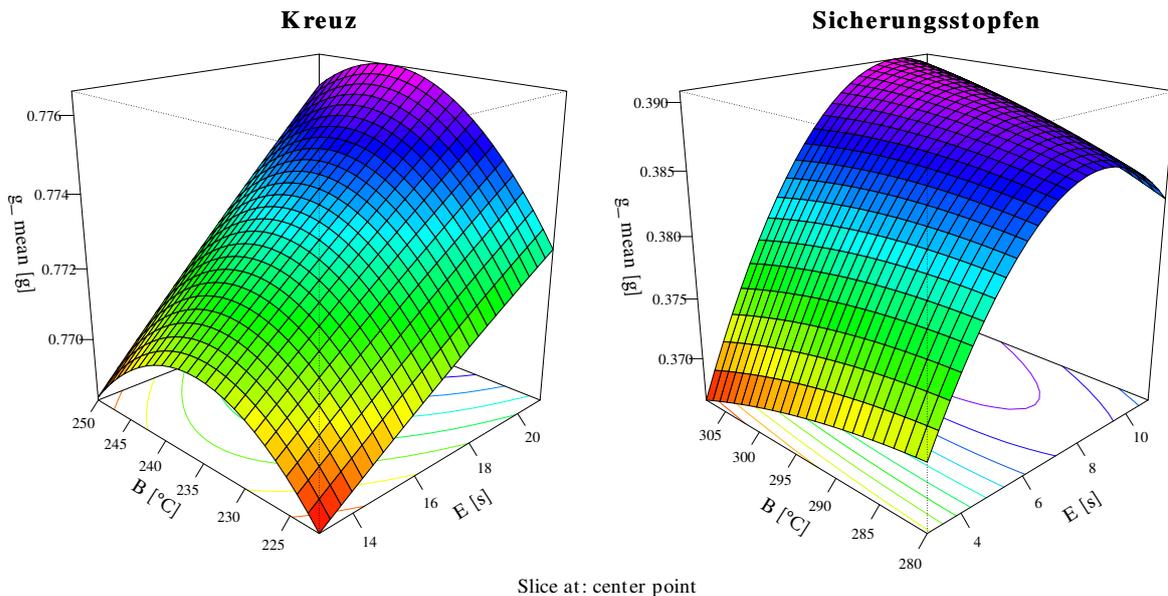


Abbildung 5.3: Vergleich der Faktoren B und E zum Gewicht \bar{g}

Der Effekt der Zylindertemperatur ist bei dem Serienbauteil „Sicherungsstopfen“ nicht signifikant und hat auch keinen quadratischen Verlauf. Die Zylindertemperatur muss, wie bereits einleitend erklärt, abweichend zur Herstellerempfehlung eingestellt werden. Die Zylindertemperatur wird auf viel höherem Niveau variiert, als eigentlich für das Material nötig wäre. Die Viskosität der Schmelze verändert sich dann nur noch im unbedeutenden Umfang. Daher hat die Zylindertemperatur keinen signifikanten Effekt auf das Gewicht \bar{g} des Sicherungsstopfens. Das Gewichtsoptimum ist bereits weit unter 280 °C erreicht. Wahrscheinlich hat die Zylindertemperatur auch unabhängig von der Geometrie einen signifikanten Effekt auf das Gewicht \bar{g} . Dies ist plausibel, kann jedoch nur vermutet werden. Die Nachdruckzeit besitzt dagegen in beiden Fällen einen starken signifikanten Effekt auf das Gewicht \bar{g} . Ab ca. 8 s Nachdruckzeit ist die Gewichtszunahme des Sicherungsstopfens abgeschlossen. Die Plots zeigen zudem den signifikanten Wechselwirkungseffekt zwischen der Zylindertemperatur und der Nachdruckzeit.

Die deutlichen Unterschiede zwischen dem Versuchs- und Serienbauteil bezüglich der Wechselwirkung zwischen dem Nachdruck p_N (Faktor D) und der Nachdruckzeit t_N (Faktor E) werden in Abbildung 5.4 abgebildet.

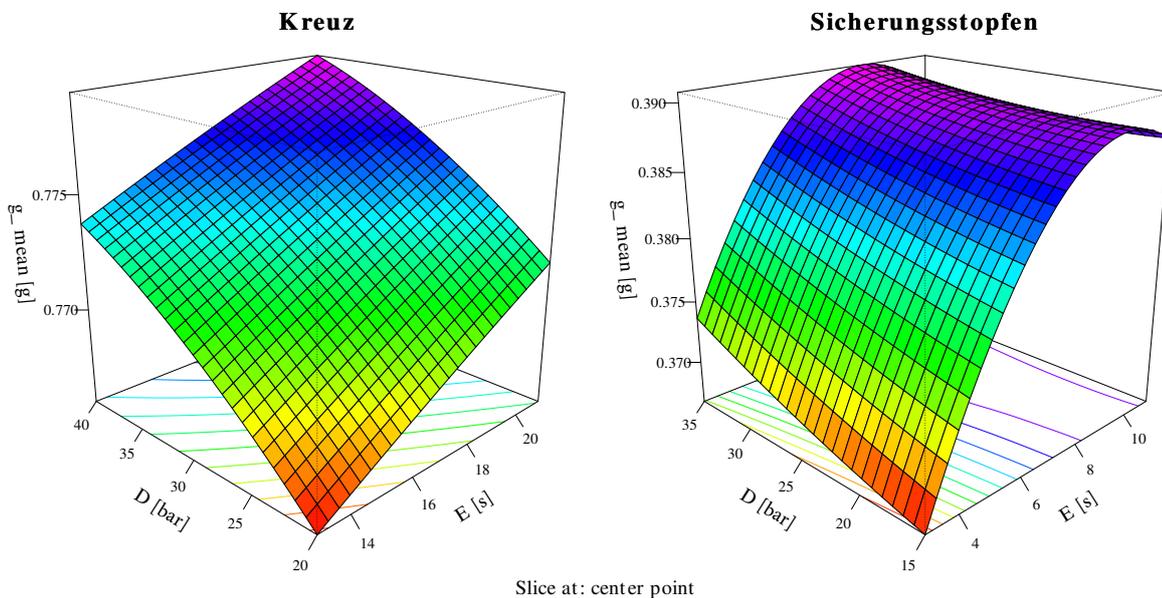


Abbildung 5.4: Vergleich der Wechselwirkung D:E zum Gewicht \bar{g}

Es kommt zu einer Veränderung der Haupteffekte des Nachdrucks p_N (Faktor D) und der Nachdruckzeit t_N (Faktor E). Im Falle des Versuchsbauteils ist der Effekt beider Faktoren als gleichwertig einzuordnen. Das Gewicht \bar{g} des Serienbauteils jedoch wird sehr viel stärker durch die Nachdruckzeit beeinflusst als durch den Nachdruck.

Der Signifikanzvergleich bezüglich der Geometrie bestätigt stark signifikante Effekte

- der Schmelztemperatur (Faktor A),
- der Zylindertemperatur (Faktor B),
- der Restkühlzeit (Faktor C),
- der Nachdruckzeit (Faktor E)
- und der Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H)

auf den Energieverbrauch \bar{e} .

Die Signifikanz der quadratischen Effekte der Restkühl- und Nachdruckzeit sowie der Nachdruckgeschwindigkeit werden nicht bestätigt. Die Wechselwirkung zwischen Nachdruckzeit und Nachdruckgeschwindigkeit ist stark signifikant.

Für die Zykluszeit \bar{z} bestätigt sich die starke Signifikanz für

- die Restkühlzeit (Faktor C),
- die Nachdruckzeit (Faktor E),
- den Umschaltzeitpunkt (Faktor F)
- sowie die Einspritzgeschwindigkeit (Faktor G).

Die Effekte des Umschaltzeitpunktes und der Einspritzgeschwindigkeit haben einen schwachen Einfluss auf die Zykluszeit \bar{z} (vgl. Abbildung 4.26 auf Seite 63). Darüber hinaus wird der quadratische Effekt der Restkühlzeit bestätigt. Dessen quadratischer Anteil ist jedoch trotz festgestellter starker Signifikanz sehr schwach und nur deshalb als signifikant eingestuft, weil alle übrigen Faktoren einen rein linearen Effekt aufweisen. Die RSM-Plots der Hauptversuche in Anhang J.4 verdeutlichen dies.

5.1.2 Validierung der Materialunabhängigkeit

Die Validierung der Materialunabhängigkeit wird in dem Testwerkzeug vollzogen, um nur die Auswirkungen auf die Zielgrößen zu erhalten, die durch den geänderten Kunststoff zustande kommen.

Es wird kein weiterer Massenkunststoff, wie PE, PS oder PVC verwendet. Die drei genannten Kunststoffe haben eine teilkristalline Molekülstruktur. Daher ähneln sich diese Kunststoffe im Aufschmelz- und Erstarrungsverhalten. Kunststoffe für das Spritzgießen werden hauptsächlich nach ihrer Molekülstruktur unterschieden. Der Unterschied zwischen Kunststoffen mit teilkristalliner und amorpher Molekülstruktur ist in Abbildung 5.5 veranschaulicht.

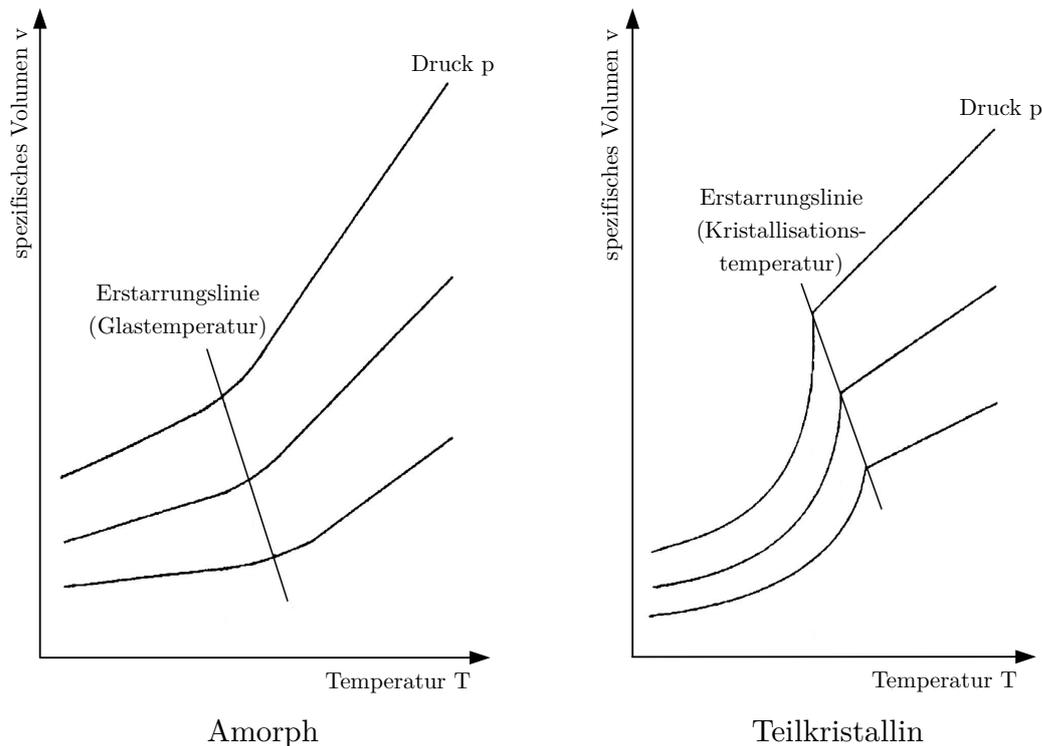


Abbildung 5.5: pvT-Diagramme für amorphe und teilkristalline Kunststoffe, abgeändert nach [9]

Die teilkristallinen Kunststoffe verändern sprunghaft ihr Gefüge im Verlauf des Aufschmelzens und Erstarrens. Dies wird durch die schlagartige Kristallisation verursacht. Kühlt das Bauteil ab, nimmt das spezifische Volumen bei Erreichen der Kristallisationstemperatur stark ab bzw. die Dichte nimmt stark zu. Die Änderung des spezifischen Volumens ist zudem unterhalb der Kristallisationstemperatur sehr viel höher. Die amorphen Kunststoffe dagegen zeigen nur einen „Knick“ im Aufschmelz- und Erstarrungsverlauf. Dieser Punkt wird Glastemperatur genannt. Unterhalb der Glastemperatur ist die Änderung des spezifischen Volumens geringer.

Für die Validierungsversuche kommt ein technischer Kunststoff mit amorpher Molekülstruktur zum Einsatz. Technische Kunststoffe sind anspruchsvoller in der Verarbeitung und bedürfen i.d.R. einer vorangegangenen Trocknung zur Ausscheidung des Wasseranteils. In Betracht gezogen werden PVDF (Polyvinylchlorid), PMMA (Polymethylmethacrylat, „Plexiglas“) und PC (Polycarbonat). PVDF und PMMA werden ausgeschlossen, da PVDF bei längeren Verweilzeiten schnell verbrennt und somit für Versuche als ungeeignet einzustufen ist. PMMA fällt mangels ausreichenden Materialbestands aus der Auswahl. PC ist ein transparenter Kunststoff und unter

den technischen Kunststoffen als einfach zu verarbeitender Kunststoff einzustufen. Die Automobilindustrie setzt ihn beispielsweise im großen Umfang für Beleuchtungsgehäuse ein. Gegenüber PMMA, welches ebenfalls transparent ist, besitzt es bessere mechanische Eigenschaften, eine höhere chemische Resistenz sowie eine bessere UV-Beständigkeit. Ein Vergleich bezüglich des Aussehens der Bauteile aus PP und PC ist in Abbildung 5.6 abgebildet.

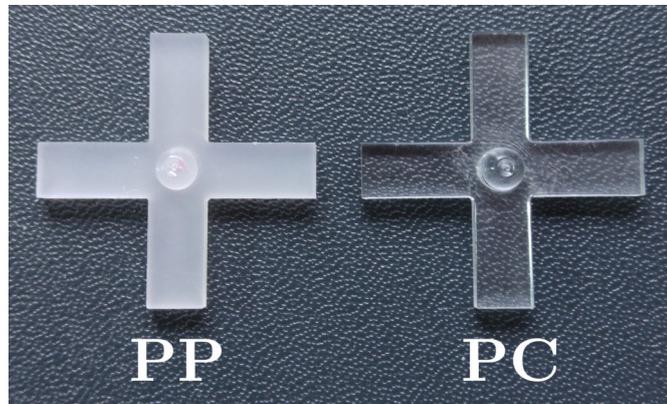


Abbildung 5.6: Materialvergleich

Die Daten des verwendeten Kunststoffs sind in Tabelle 5.4 aufgelistet (vgl. Tabelle 3.2 auf Seite 25).

Tabelle 5.4: Materialdaten Covestro Apec 1745 - PC [4]

Eigenschaft	Wert	Einheit
Schmelzflussindex (330 °C; 2,16 kg)	17	$cm^3/10\ min$
Empfohlene Verarbeitungstemperatur	310 - 350	°C
Dichte	1170	kg/m^3
Biegemodul	2400	MPa
Wärmeformbeständigkeit (0,45 MPa)	160	°C
Werkzeugtemperatur	110 - 130	°C
Max. Trocknungstemperatur	130	°C
Trocknungszeit (Umluftofen)	4 - 12	h

Das Material ist im Vergleich zu PP zähflüssiger, erstarrt schneller und hat bessere mechanische Eigenschaften. Die empfohlene Verarbeitungstemperatur beträgt zwischen 310 - 350 °C. Das Werkzeug muss beheizt werden, um die Abkühlung des Materials zu verzögern. Durch eine zu schnelle Abkühlung kann es zu Einfallstellen und schlechten Oberflächengüten durch Erstarren der Fließfront o.Ä. kommen. Das Kunststoffgranulat muss zudem vor Gebrauch getrocknet werden. Wird das eingesetzte Kunststoffgranulat nicht ausreichend getrocknet, verdampft die Restfeuchtigkeit im Spritzaggregat und es kommt zu Schaumbildung an der Düse. Das Bauteil wird bei schlecht getrocknetem Material von Schlieren durchzogen und erfüllt nicht mehr seinen Einsatzzweck. Das Material wird bei 90 °C im Umluftofen getrocknet.

In Tabelle 5.5 sind die Faktoren und Faktorstufen des Versuchsplans angegeben.

Tabelle 5.5: Validierung der Materialunabhängigkeit: Faktoren und Faktorstufen

Faktorbezeichnung	Zeichen	Kodierung	Faktorstufe					Einheit
			$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Schmelzetemperatur	$T_P + T_U$	A	326	332	338	344	350	°C
Zylindertemperatur	$T_D + T_H$	B	326	332	338	344	350	°C
Restkühlzeit	t_K	C	4	6	8	10	12	s
Nachdruck	p_N	D	20	25	30	35	40	bar
Nachdruckzeit	t_N	E	7	9	11	13	15	s
Umschaltpunkt Nachdruck & Geschwindigkeit	$s_U + s_{Uv}$	F	8	9	10	11	12	mm
Einspritzgeschwindigkeit	v_E	G	40	50	60	70	80	%
Nachdruckgeschwindigkeit	v_N	H	20	30	40	50	60	%

Die Validierung der Materialunabhängigkeit wird unter den gleichen Voraussetzungen wie die Validierung der Geometrieunabhängigkeit realisiert. Es wird erneut der gesamte Versuchsplan 2. Ordnung (siehe Anhang D.3 und Anhang E.2) mit den Faktorstufen aus Tabelle 5.5 wiederholt. Der Umschaltpunkt der Einstellung des Zentralpunkts liegt bei 10 mm Einspritzweg. Dann ist die Form gerade vollständig gefüllt. Der Siegelpunkt ist bei 11 s Nachdruckzeit erreicht, wenn die übrigen Parameter den Werten am Zentralpunkt entsprechen. Da der Siegelpunkt am Zentralpunkt ermittelt wird, müssen der Nachdruck, die Nachdruckzeit sowie die Temperaturen entsprechend gewählt werden, sodass der Siegelpunkt auch bei der minimalen und maximalen Faktorstufe erreicht wird. Es ist auch hier wieder besonders wichtig, dass alle Faktorstufenkombinationen realisierbar sind. Das bedeutet, dass das Restmassepolster zum einen nicht zu groß ausfallen darf, sollte der Nachdruck und die Temperaturen niedrig sein. Zum anderen muss ein ausreichendes Restmassepolster vorhanden sein, falls der Nachdruck und die Temperaturen hoch sind. Da das Werkzeug über ein externes Aggregat (HB-Therm, Typ HB-0 250) mit warmem Öl konstant auf 120 °C beheizt wird, ist die Restkühlzeit länger. Dadurch wird bei hohen Drücken, und den damit einhergehenden höheren Temperaturen, gewährleistet, dass das Bauteil vor dem Öffnen des Werkzeugs abgekühlt ist und sicher entformt. Die Leistung des Aggregats wird über ein Zangen-Multimeter (Reichelt, Typ UT 203) ermittelt. Aufgrund der hohen Ströme kann die Leistung nicht über das Energiemessgerät ermittelt werden. Zu Beginn eines jeden Versuchstages muss daher darauf geachtet werden, dass das Werkzeug das konstante Temperaturniveau von 120 °C erreicht hat, denn die Temperatur des Temperiermediums entspricht erst nach einer Zeitspanne von ca. 10 - 15 min. der Temperatur des Werkzeugs. Die Schmelze- und Zylindertemperatur liegt ca. 100 °C über den Temperaturen der Hauptversuche. Die Einstellungen der übrigen, konstant gehaltenen, Maschinenparameter befinden sich in Anhang C.3.

Aus den Daten des Versuchsplans werden die Modelle 1. und 2. Ordnung erstellt und bewertet. Zur Bewertung werden die gleichen Kontrollverfahren angewendet wie bei den Hauptversuchen. Die Ergebnisse der numerischen Modellbewertung sowie die Verteilung der Residuen sind in Anhang K.3 und K.4 zusammengefasst. Das Modell für die Entformung \overline{ent} hat eine nicht ausreichende Güte. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß R_{adj}^2 für das Modell der Entformung beträgt 0,31. Die Aussagen des Modells entsprechen der Realität damit nur zu 31 %. Trotz dessen sind die Ergebnisse der Signifikanzprüfung der Entformung \overline{ent} in der Validierungstabelle enthalten.

Der Signifikanzvergleich zu den Ergebnissen der Hauptversuche ist in Tabelle 5.6 abgebildet.

Tabelle 5.6: ANOVA-Tabelle: Signifikanzvergleich bezüglich Material

Faktor / Wechselwirkung	Zielgröße			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \bar{ent}	Zykluszeit \bar{z}
A		****	****	****
B	***	*	****	****
C		****	****	****
D	****	****	****	****
E	****	****	****	****
F		****		****
G		*	*	****
H	**	*	****	****
A:B				
A:C		***		
A:D		***	*	*
A:E			*	*
A:F				
A:G				**
A:H				
B:C				
B:D	*	*		
B:E				
B:F				
B:G				
B:H				
C:D			***	***
C:E		**		
C:F				
C:G				
C:H		*	**	**
D:E				
D:F				
D:G	*	**		
D:H				
E:F	*	*		
E:G				
E:H		****	****	****
F:G	**	**		**
F:H				
G:H				
A ²				
B ²	****			
C ²		**		**
D ²				****
E ²		***	***	***
F ²				*
G ²				**
H ²			***	

SCHWARZ Modell 1. Ordnung „Kreuz PP“
 BLAU Modell 1. Ordnung „Kreuz PC“
 ROT Modell 2. Ordnung „Kreuz PP“
 GRÜN Modell 2. Ordnung „Kreuz PC“
 **** Starke Signifikanz ($\alpha = 0 \%$)
 *** Hohe Signifikanz ($\alpha = 1 \%$)
 ** Geringe Signifikanz ($\alpha = 5 \%$)
 * Schwache Signifikanz ($\alpha = 10 \%$)

Der Aufbau der ANOVA-Tabelle folgt demselben Schema wie der ANOVA-Tabelle zum Signifikanzvergleich bezüglich der Geometrie (vgl. Tabelle 5.3 auf Seite 71). Die Bedeutung der Signifikanzniveaus (Sternchen) und die Modellzuordnungen können der angehängten Legende entnommen werden. An geeigneter Stelle sind die Erläuterungen zu der ANOVA-Tabelle auch hier zusätzlich durch graphische Vergleiche (RSM-Plots) unterstützt. Es werden nur die Faktoren graphisch miteinander verglichen, bei denen ein deutlicher Unterschied zu der RSM-Analyse der Hauptversuche besteht (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Dies gilt jedoch aufgrund der schlechten Modellgüte nicht für das Modell der Entformung \overline{ent} . Je Abbildung sind auf der linken Seite die Faktoren der Hauptversuche abgebildet und auf der rechten Seite die Faktoren der Validierungsversuche.

Die starke Signifikanz der folgenden Faktoren kann bzgl. des Gewichts \bar{g} bestätigt werden:

- Der Zylindertemperatur (Faktor B),
- des Nachdruck (Faktor D)
- und der Nachdruckzeit (Faktor E).

Zusätzlich ist der Effekt der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) schwach bis gering signifikant. In den Ergebnissen der Hauptversuche ist er das nicht. Hier hat die Nachdruckgeschwindigkeit einen signifikanten Effekt auf das Gewicht \bar{g} , weil PC schneller erstarrt. Somit ist eine ausreichend hohe Nachdruckgeschwindigkeit entscheidend, um mehr Masse in kürzerer Zeit in das Formnest einzubringen.

Der Wechselwirkungseffekt zwischen Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) und dem Nachdruck p_N (Faktor D) ist in den Validierungsversuchen schwach signifikant, Abbildung 5.7:

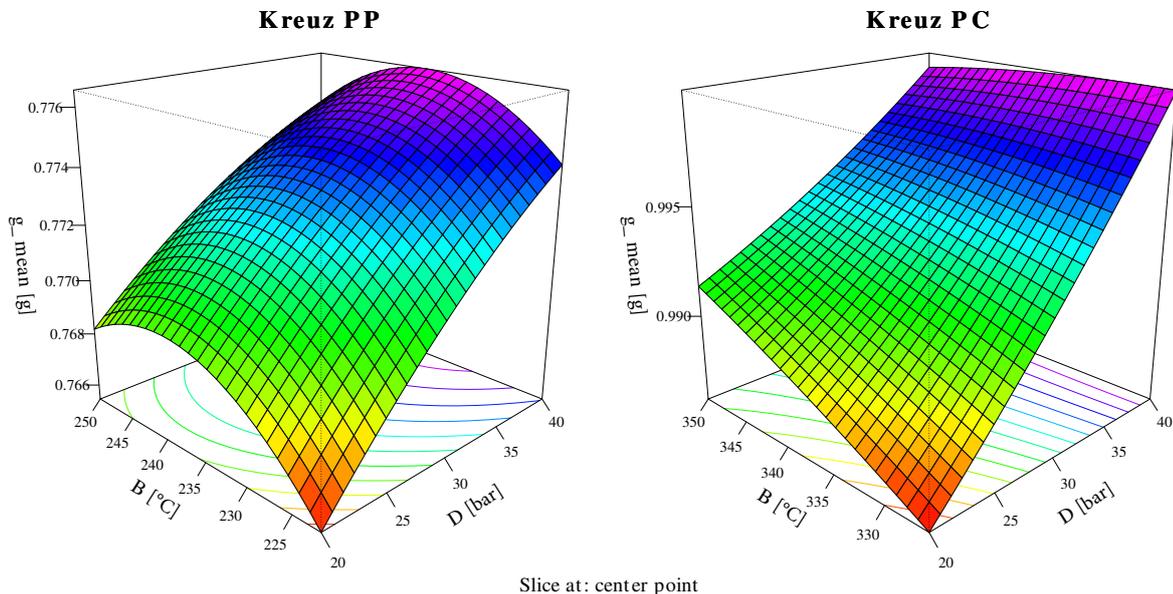


Abbildung 5.7: Vergleich der Wechselwirkung B:D zum Gewicht \bar{g}

Auf der linken Seite ist die Wechselwirkung der Hauptversuche („Kreuz PP“) abgebildet und auf der rechten Seite die der Validierungsversuche („Kreuz PC“). Der Verlauf der Zylindertemperatur im rechten Plot ist nicht quadratisch. Das Gewichtsoptimum müsste etwas oberhalb von 350 °C zu finden sein. Im rechten Plot ist ebenfalls der schwach signifikante Wechselwirkungseffekt B:D zu sehen. Das Gewicht \bar{g} ist am geringsten bei niedrigem Nachdruck ($p_N = 20$ bar) und niedriger Zylindertemperatur ($T_D + T_H = 326$ °C) oder aber bei hohem Nachdruck ($p_N = 40$ bar) und hoher Zylindertemperatur ($T_D + T_H = 350$ °C).

Die schwache Signifikanz des Wechselwirkungseffekts zwischen Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und Umschaltzeit $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) ist in Abbildung 5.8 zu sehen.

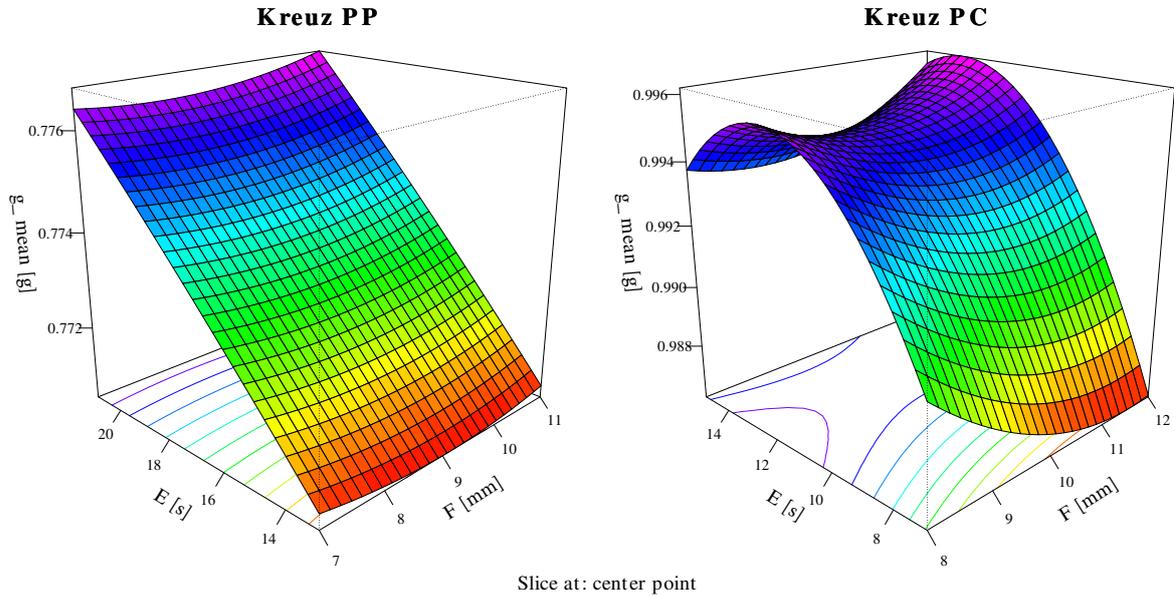


Abbildung 5.8: Vergleich der Wechselwirkung E:F zum Gewicht \bar{g}

Darüber hinaus zeigt der Plot auf der rechten Seite in Abbildung 5.8, dass die Nachdruckzeit einen zusätzlich signifikanten quadratischen Effekt auf das Gewicht \bar{g} hat. Dies hängt allerdings damit zusammen, dass bereits bei 12 s Nachdruckzeit das Maximum des Gewichts erreicht ist. Dies bestätigt, dass PC schneller erstarrt als PP.

Neben der Wechselwirkung E:F ist noch die Wechselwirkung zwischen dem Nachdruck p_N (Faktor D) und der Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) sowie die Wechselwirkung zwischen dem Umschaltzeit $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) und der Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) schwach signifikant. Die Wechselwirkung F:G ist im Vergleich in Abbildung 5.9 dargestellt.

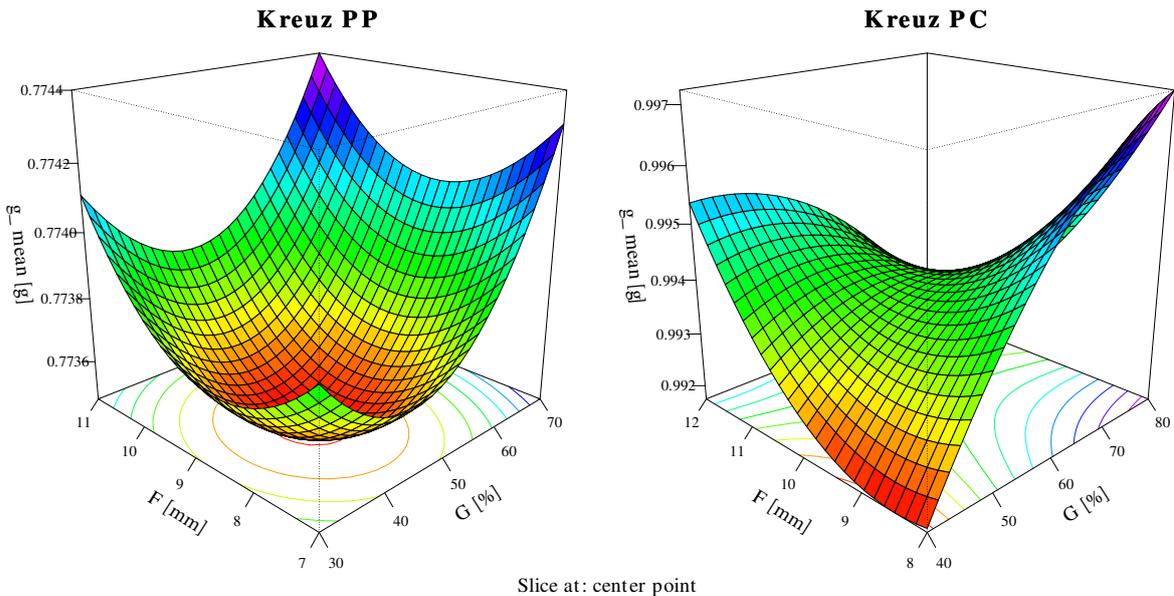


Abbildung 5.9: Vergleich der Wechselwirkung F:G zum Gewicht \bar{g}

In Abbildung 5.9 muss die unterschiedliche Skalierung der vertikalen Achsen beachtet werden.

Der Umschaltzeitpunkt $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) und die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) sind in den Hauptversuchen sowohl als Faktoren, als auch als Wechselwirkung nicht signifikant bezüglich des Gewichts \bar{g} . Der Unterschied im linken Plot zwischen unterster und oberster Koordinate beträgt ca. 0,001 g. Anders verhält es sich im rechten Plot des Validierungsbauteils „Kreuz PC“. Hier ist der Wechselwirkungseffekt F:G gering signifikant. Das Gewicht \bar{g} ist am geringsten bei einem niedrigen Umschaltzeitpunkt ($s_U + s_{Uv} = 7$ mm) und niedriger Einspritzgeschwindigkeit ($v_E = 30$ %) oder aber bei hohem Umschaltzeitpunkt ($s_U + s_{Uv} = 11$ mm) und hoher Einspritzgeschwindigkeit ($v_E = 70$ %). Dies erscheint plausibel, da sich mit früherem Umschalten die Nachdruckphase verlängert und somit der begünstigende Einfluss des Nachdrucks auf das Gewicht \bar{g} länger besteht.

Der Signifikanzvergleich bezüglich des Materials bestätigt starke signifikante Effekte

- der Schmelztemperatur (Faktor A),
- der Restkühlzeit (Faktor C),
- der Nachdruckzeit (Faktor E)
- und der Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H)

auf den Energieverbrauch \bar{e} .

Die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) hat keinen signifikanten Effekt, dieser fällt auch schon in den Hauptversuchen schwach aus. Die Signifikanz der quadratischen Effekte auf den Energieverbrauch \bar{e} sind allesamt gering bis hoch. Wie bereits in den Hauptversuchen und den Validierungsversuchen zur Geometrieunabhängigkeit ist die Wechselwirkung zwischen der Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und der Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) stark signifikant (Abbildung 5.10). Die Effekte beider Faktoren sind im rechten Plot jedoch weniger ausgewogen, der Effekt der Nachdruckzeit überwiegt deutlich.

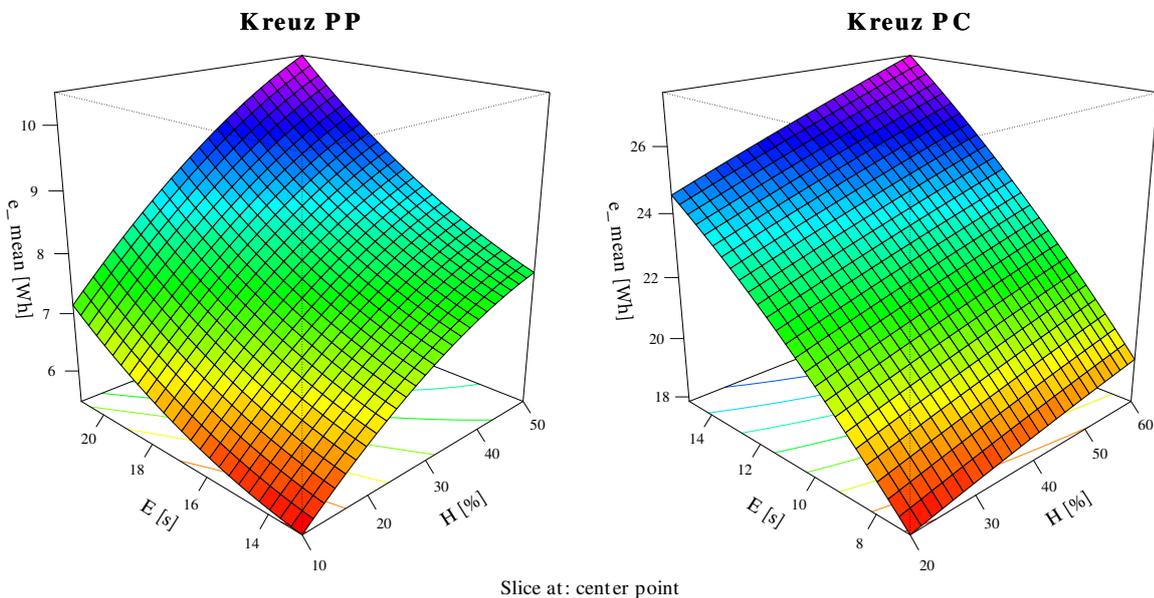


Abbildung 5.10: Vergleich der Wechselwirkung E:H zum Energieverbrauch \bar{e}

Trotz der schlechten Modellgüte werden die Ergebnisse des Signifikanzvergleichs der Entformung \overline{ent} , zumindest bezogen auf die starken Signifikanzen, genannt. Die Signifikanz bezüglich der Entformung \overline{ent} bestätigt sich bei folgenden Faktoren:

- Der Restkühlzeit (Faktor C)
- und dem Nachdruck (Faktor D).

Hinsichtlich der Zykluszeit \bar{z} bestätigt sich die Signifikanz für diese beiden Faktoren:

- Der Restkühlzeit (Faktor C)
- und der Nachdruckzeit (Faktor E).

5.2 Ergebniszusammenfassung und Optimierungspotenziale

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst und mittels derer Ansätze zur Optimierung abgeleitet. Darüber hinaus werden die Optimierungsansätze anhand des Serienbauteils aus Abschnitt 5.1.1 erprobt.

Die Übersicht in Tabelle 5.7 fasst die Ergebnisse der Untersuchung zusammen.

Tabelle 5.7: Ergebniszusammenfassung

Faktor	Zeichen	Signifikanter Effekt auf Zielgröße...			
		Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \bar{ent}	Zykluszeit \bar{z}
A	$T_P + T_U$		X		
B	$T_D + T_H$	X	X	(X)	
C	t_K		X	X	X
D	p_N	X		X	
E	t_N	X	X	(X)	X
F	$s_U + s_{Uv}$				X
G	v_E			(X)	X
H	v_N	X*	X		

X Signifikanter Faktor, Geometrie- und Materialunabhängigkeit validiert

X Signifikanter Faktor, Geometrieunabhängigkeit validiert

X Signifikanter Faktor, Materialunabhängigkeit validiert

(X) Signifikanter Faktor in den Hauptversuchen

* Signifikanter Faktor, wenn Bauteil durch begünstigende Umstände schnell erstarrt

Das Gewicht \bar{g} wird durch

- die Zylindertemperatur (Faktor B),
- den Nachdruck (Faktor D),
- die Nachdruckzeit (Faktor E)
- und die Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H)

maßgeblich verändert. Durch den höheren Nachdruck und die längere Nachdruckzeit wird mehr Kunststoff in das Formnest gedrückt. Für die Zylindertemperatur kann nur die Materialunabhängigkeit validiert werden. Eine wärmere Zylindertemperatur führt durch die geringere Viskosität der Masse und dem damit einhergehenden niedrigeren Druckverlust zur höheren Materialeinbringung in das Formnest. Die Nachdruckgeschwindigkeit weist keinen signifikanten Effekt in den Ergebnissen aus den Hauptversuchen auf, in den Ergebnissen aus den Validierungsversuchen jedoch schon. In den Versuchen zur Validierung der Geometrieabhängigkeit kommt dies durch die dünnen Bauteilquerschnitte des Serienbauteils zustande (vgl. Tabelle 5.1 auf Seite 69). In den Versuchen zur Validierung der Materialunabhängigkeit wiederum resultiert dies aus dem schnellen Erstarrungsverhalten von PC im Vergleich zum PP. Eine ausreichend hohe Nachdruckgeschwindigkeit ist daher entscheidend, wenn dünne Bauteilquerschnitte die eingespritzte Masse

schneller erstarren lassen oder das eingesetzte Material dazu neigt, schnell zu erstarren. Eine zu hohe Nachdruckgeschwindigkeit hat jedoch insbesondere bei dünnen Bauteilquerschnitten einen gegenläufigen Effekt. Dies lässt sich zum Großteil durch die Überlagerung des Verhaltens nach *Hagen-Poiseuille* mit dem Abkühlereinfluss erklären. In der Nachdruckphase ist die Viskosität, verursacht durch den Abkühlvorgang, nicht konstant. Die Viskosität hat neben der Geschwindigkeit maßgeblichen Einfluss auf den Druckverlust (vgl. Abbildung 5.2 auf Seite 73). Verstärkt wird der Effekt dieser Überlagerung durch den Einfluss der dünnen Bauteilquerschnitte, da hierdurch der Druckverlust bei einer hohen Nachdruckgeschwindigkeit nochmals ansteigt.

- Die Schmelztemperatur (Faktor A),
- die Zylindertemperatur (Faktor B),
- die Restkühlzeit (Faktor C),
- die Nachdruckzeit (Faktor E)
- und die Nachdruckgeschwindigkeit (Faktor H)

haben signifikante Effekte auf den Energieverbrauch \bar{e} . Die Zylindertemperatur kann nur hinsichtlich der Geometrieunabhängigkeit validiert werden und besitzt nur eine schwache Signifikanz. Dies hängt mit den kleinen thermischen Massen im Bereich um die Düse und den Heisskanal (Zylindertemperatur) zusammen. Die thermischen Massen im Bereich des Umlenkkopfs und der Plastifizierung (Schmelztemperatur) sind wesentlich größer und das Aufheiz- und Abkühlverhalten ist träger. Zudem sind die Wärmeabstrahlflächen im Bereich des Umlenkkopfs und der Plastifizierung größer. Eine höhere Nachdruckgeschwindigkeit führt zu einer höheren Drehzahl der Hydraulikpumpe und damit zu einem höheren Energieverbrauch. Die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) hat die gleiche Signifikanz wie die Nachdruckgeschwindigkeit, nur durch die kürzere Zeitspanne der Einspritzphase fällt dieser Effekt nicht ins Gewicht. Im Allgemeinen kann damit die Spritzgeschwindigkeit für den Energieverbrauch \bar{e} als signifikant betrachtet werden. Die Signifikanz des Wechselwirkungseffekts zwischen der Nachdruckzeit und der Nachdruckgeschwindigkeit ist stark. Dies ist auch der einzige Wechselwirkungseffekt, der hinsichtlich der Geometrie- und Materialunabhängigkeit mit Bestätigung einer starken Signifikanz validiert werden kann.

Die Restkühlzeit t_K (Faktor C) und der Nachdruck p_N (Faktor D) haben einen signifikanten Effekt auf die Entformung \overline{ent} . Es kann lediglich die Materialunabhängigkeit validiert werden. Das Modell der Entformung \overline{ent} zur Validierung der Materialunabhängigkeit hat eine unzureichende Modellgüte. In den Ergebnissen aus den Hauptversuchen sind zudem die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor F), die Nachdruckzeit t_N (Faktor E) und die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) signifikant. Die Entformung \overline{ent} wird begünstigt, wenn durch hohen Nachdruck und längere Nachdruckzeit mehr Druck auf das Bauteil ausgeübt wird. Eine wärmere Zylindertemperatur führt durch die geringere Viskosität der Masse zur höheren Materialeinbringung in das Formnest. Durch Zunahme beider Faktoren wird das Bauteil stärker in die Form gepresst, was zu einer guten Entformung \overline{ent} führt. Eine lange Restkühl- und Nachdruckzeit verschlechtert die Entformung \overline{ent} , da das Bauteil länger in der Form abkühlt und somit unter weniger Druck steht. Die Einspritzgeschwindigkeit ist in den Ergebnissen zu den Hauptversuchen schwach signifikant. Ist die Einspritzgeschwindigkeit zu hoch, so sinkt der Einspritzdruck. Da der Prozess während des Einspritzens noch als isotherm angenommen werden kann, gilt hier die Gesetzmäßigkeit nach *Hagen-Poiseuille* mit konstanter Viskosität. Durch den resultierenden geringen Einspritzdruck wird weniger Masse in das Formnest eingebracht und das Bauteil steht unter geringerem Druck, was wiederum zu einer schlechten Entformung \overline{ent} führt.

Signifikante Faktoren für die Zykluszeit sind:

- Die Restkühlzeit (Faktor C),
- die Nachdruckzeit (Faktor E),
- der Umschaltzeitpunkt (Faktor F)
- und die Einspritzgeschwindigkeit (Faktor G).

Für den Umschaltzeitpunkt und die Einspritzgeschwindigkeit kann nur die Materialunabhängigkeit bestätigt werden. Die Effekte dieser beiden Faktoren sind zudem nur schwach signifikant. Generell führen insbesondere kurze Zeitspannen zu kurzen Zykluszeiten. Wird früher auf den Nachdruck umgeschaltet und das Material schneller eingespritzt, reduziert sich die Zykluszeit in vernachlässigbarer Höhe. Sind die Schussgewichte höher und damit die Bauteile größer, dann werden diese beiden Faktoren mutmaßlich an Einfluss gewinnen.

Die Zielgrößen sind wie folgt als optimal anzusehen:

- Das Gewicht \bar{g} ist möglichst hoch \uparrow ,
- der Energieverbrauch \bar{e} ist möglichst klein \downarrow ,
- die Entformung \overline{ent} ist möglichst gut \uparrow
- und die Zykluszeit \bar{z} ist möglichst kurz \downarrow .

Um optimal eingestellte Zielgrößen bzw. Qualitäts- und Prozessmerkmale gemäß der vorangegangenen Aufzählung zu erhalten, sind die Faktoren bzw. Parameter nach Tabelle 5.8 einzustellen. Die Tabelle zeigt qualitative Optimierungsvorschläge.

Tabelle 5.8: Optimierungstabelle

Faktor	Zeichen	Einstellrichtung für optimale Zielgröße...			
		Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
A	$T_P + T_U$	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow
B	$T_D + T_H$	\uparrow	\searrow	\nearrow	\rightarrow
C	t_K	\rightarrow	\downarrow	\searrow	\downarrow
D	p_N	\uparrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow
E	t_N	\uparrow	\downarrow	\searrow	\downarrow
F	$s_U + s_{Uv}$	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\nearrow
G	v_E	\rightarrow	\searrow	\searrow	\nearrow
H	v_N	\nearrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow

- \rightarrow Verhält sich neutral, freie Einstellungswahl
- \uparrow Hohe Einstellung wählen
- \downarrow Niedrige Einstellung wählen
- \nearrow Tendenziell hohe Einstellung wählen
- \searrow Tendenziell niedrige Einstellung wählen

Jeder Faktor wird im Folgenden bezüglich der empfohlenen Einstellungen eingeordnet. Für einige Faktoren muss ein Kompromiss gefunden werden, um optimale Ergebnisse für alle vier Zielgrößen zu erhalten. Die Optimierung des Energieverbrauchs wird gemäß der Aufgabenstellung hierbei als vorrangig betrachtet.

Die Schmelztemperatur $T_P + T_U$ (Faktor A) sollte für einen niedrigen Energieverbrauch \bar{e} klein gehalten werden. Die übrigen Zielgrößen werden durch die Schmelztemperatur nicht beeinflusst. Die Zylindertemperatur $T_D + T_H$ (Faktor B) sollte für einen niedrigen Energieverbrauch möglichst klein sein. Es muss ein Kompromiss bezüglich des Gewichts \bar{g} und der Entformung \bar{ent} gefunden werden, da diese bei hoher Zylindertemperatur optimal ausfallen. Die Restkühlzeit t_K (Faktor C) sollte stets so kurz wie möglich ausfallen. Der Nachdruck p_N (Faktor D) verhält sich neutral zum Energieverbrauch \bar{e} , begünstigt jedoch das Gewicht \bar{g} und die Entformung \bar{ent} . Mit längerer Nachdruckzeit t_N (Faktor E) steigt das Gewicht \bar{g} , der Energieverbrauch \bar{e} und die Zykluszeit \bar{z} . Die Entformung \bar{ent} verschlechtert sich durch eine lange Nachdruckzeit. Ist die Lage des Umschaltpunktes $s_U + s_{Uv}$ (Faktor F) weiter vom Formnest entfernt, dann verkürzt sich die Zykluszeit \bar{z} . Die Lage des Umschaltpunktes hat einen schwachen Einfluss auf die Zykluszeit. Auf die übrigen Zielgrößen hat der Umschaltpunkt keine Auswirkung. Die Einspritzgeschwindigkeit v_E (Faktor G) beeinflusst den Energieverbrauch \bar{e} , die Entformung \bar{ent} und die Zykluszeit \bar{z} . Alle drei Zielgrößen werden jedoch nur schwach beeinflusst. Die Nachdruckgeschwindigkeit v_N (Faktor H) sollte niedrig eingestellt werden, um einen geringen Energieverbrauch \bar{e} zu erhalten. Bei Bauteilen, bei denen das Erstarren begünstigt ist, muss der Effekt der Nachdruckgeschwindigkeit auf das Gewicht \bar{g} berücksichtigt werden.

Anhand der Optimierungstabelle in Tabelle 5.8 und den RSM-Plots wird der Prozess des Serienbauteils „Sicherungsstopfen“ aus Abschnitt 5.1.1 optimiert. Jeder Faktor wird bezüglich der empfohlenen Einstellungen innerhalb der Faktorstufen des Versuchsplans zum Serienbauteil verortet. Voraussetzung für die Optimierung sonstiger Bauteile nach Tabelle 5.8 ist, dass die Prozessfenster nach der Vorgehensweise in Abschnitt 4.2.1 bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Optimierung des Serienbauteils sind in Tabelle 5.9 aufgelistet.

Tabelle 5.9: Optimierung des Serienbauteils „Sicherungsstopfen“

Einstellungen der Faktoren								Zielgröße		
A	B	C	D	E	F	G	H	\bar{e}	\bar{g}	\bar{z}
$T_P + T_U$	$T_D + T_H$	t_K	p_N	t_N	$s_U + s_{Uv}$	v_E	v_N			
222	294	0	30	5	6,5	60	20	2,703 Wh	0,386 g	8,80 s

Um die Ergebnisse aus Tabelle 5.9 besser einordnen zu können, sind im Folgenden die minimal und maximal erreichten Ergebnisse der Zielgrößen aus dem Versuchsplan zum Serienbauteil aufgelistet:

- Gewicht \bar{g} : Max.: 0,390 g Min.: 0,368 g,
- Energieverbrauch \bar{e} : Max.: 5,596 Wh Min.: 2,590 Wh,
- Zykluszeit \bar{z} : Max.: 16,8 s Min.: 8,8 s.

Der Energieverbrauch \bar{e} liegt mit 2,703 Wh nah am Minimalwert aus dem Versuchsplan von 2,590 Wh. Die Zykluszeit \bar{z} entspricht mit 8,8 s exakt dem Minimalwert aus dem Versuchsplan. Das Gewicht \bar{g} ist mit 0,386 g nah am Maximalwert des Versuchsplans von 0,39 g. Der Maximalwert des Gewichts aus dem Versuchsplan entspricht gleichzeitig dem theoretisch errechnetem Bauteilgewicht (vgl. Tabelle 5.1 auf Seite 69). Somit halten die Ergebnisse auch der praktischen Umsetzung stand.

Kapitel 6

Schlussbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels der statistischen Versuchsplanung die Auswirkungen der wichtigsten Prozessparameter, in der statistischen Versuchsplanung Faktoren genannt, auf den Energieverbrauch untersucht. Die Untersuchung fand unter Berücksichtigung der Bauteilqualität sowie der Prozesseffizienz und Prozessstabilität des Spritzgießprozesses statt.

Zunächst wurden die Zielgrößen festgelegt und die Auswahl der Faktoren eingegrenzt. Die eingegrenzte Auswahl der Faktoren wurde auf Umsetzbarkeit überprüft und mittels Screeningversuchen durch Zusammenlegen reduziert.

Die Bauteilqualität wurde durch das Gewicht des Bauteils repräsentiert, die Prozesseffizienz durch den Energieverbrauch und die Zykluszeit und die Prozessstabilität durch die Entformung des Bauteils. Es wurden die Auswirkungen von acht Faktoren auf die vier Zielgrößen untersucht, namentlich der Schmelze- und Zylindertemperatur, der Restkühl- und Nachdruckzeit, des Nachdrucks, des Umschaltpunktes sowie der Einspritz- und Nachdruckgeschwindigkeit.

Es wurden die folgenden Resultate erzielt und Erkenntnisse gewonnen.

Das Gewicht wird durch die Zylindertemperatur, den Nachdruck, die Nachdruckzeit und die Nachdruckgeschwindigkeit maßgeblich verändert. Durch den höheren Nachdruck und die längere Nachdruckzeit wird mehr Kunststoff in das Formnest gedrückt. Eine wärmere Zylindertemperatur führt durch die geringere Viskosität der Masse zur höheren Materialeinbringung in das Formnest. Eine ausreichend hohe Nachdruckgeschwindigkeit ist entscheidend für ein hohes Gewicht, wenn dünne Bauteilquerschnitte die eingespritzte Masse schneller erstarren lassen oder das eingesetzte Material dazu neigt, schnell zu erstarren. Eine zu hohe Nachdruckgeschwindigkeit hat jedoch insbesondere bei dünnen Bauteilquerschnitten einen gegenläufigen Effekt.

Die Schmelzetemperatur, die Zylindertemperatur, die Restkühlzeit sowie die Nachdruckzeit und die Nachdruckgeschwindigkeit haben signifikante Effekte auf den Energieverbrauch. Die Zylindertemperatur besitzt nur eine schwache Signifikanz. Dies hängt mit den kleineren thermischen Massen im Bereich der Zylindertemperatur im Vergleich zu den größeren thermischen Massen im Bereich der Schmelzetemperatur zusammen. Eine höhere Nachdruckgeschwindigkeit führt zu einer höheren Drehzahl der Hydraulikpumpe und damit zu einem höheren Energieverbrauch. Die Einspritzgeschwindigkeit hat die gleiche Signifikanz wie die Nachdruckgeschwindigkeit, nur durch die kürzere Zeitspanne der Einspritzphase fällt dieser Effekt nicht ins Gewicht. Die Signifikanz des Wechselwirkungseffekts zwischen der Nachdruckzeit und der Nachdruckgeschwindigkeit ist stark. Dies ist auch der einzige Wechselwirkungseffekt, der hinsichtlich der Geometrie- und Materialunabhängigkeit mit Bestätigung einer starken Signifikanz validiert werden kann.

Die Restkühlzeit und der Nachdruck haben einen signifikanten Effekt auf die Entformung. In den Ergebnissen aus den Hauptversuchen sind zudem die Zylindertemperatur, die Nachdruckzeit und die Einspritzgeschwindigkeit signifikant. Die Entformung wird begünstigt, wenn durch einen hohen Nachdruck und eine längere Nachdruckzeit mehr Druck auf das Bauteil ausgeübt wird. Eine wärmere Zylindertemperatur führt durch die geringere Viskosität der Masse zur höheren

Materialeinbringung in das Formnest. Durch Zunahme beider Faktoren wird das Bauteil stärker in die Form gepresst, was zu einer guten Entformung führt. Eine lange Restkühl- und Nachdruckzeit verschlechtert die Entformung, da das Bauteil länger in der Form abkühlt und somit unter weniger Druck steht. Ist die Einspritzgeschwindigkeit zu hoch, so sinkt der Einspritzdruck und weniger Masse wird in das Formnest eingebracht, was wiederum zu einer schlechten Entformung führt.

Signifikante Faktoren für die Zykluszeit sind: Die Restkühlzeit, die Nachdruckzeit, der Umschaltzeitpunkt und die Einspritzgeschwindigkeit. Generell führen insbesondere kurze Zeitspannen zu kurzen Zykluszeiten. Wird früher auf den Nachdruck umgeschaltet und das Material schneller eingespritzt, reduziert sich die Zykluszeit in vernachlässigbarer Höhe.

Die Schmelztemperatur und die Nachdruckgeschwindigkeit sind die einzigen Faktoren, die nur Effekte auf den Energieverbrauch haben. Im Fall der Nachdruckgeschwindigkeit ist dies nur unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrie und des Materials gegeben. Diese beiden Faktoren sollten so gering wie möglich gehalten werden, um niedrige Energieverbräuche zu erhalten.

Da Untersuchungen in dieser Form mit statistischen Mitteln durchgeführt werden, können die Aussagen nicht als absolut angesehen werden, da die Ergebnisse auf Wahrscheinlichkeiten basieren. Daher wurden die Ergebnisse einer technischen Plausibilitätskontrolle unterzogen.

Die signifikanten Faktoren wurden auf Geometrie- und Materialunabhängigkeit mittels zweier Kunststoffe und Bauteilgeometrien validiert. Die Geometrie und der Kunststoff zur Validierung wurden mit Bedacht ausgesucht, trotz dessen sind die gewonnenen Ergebnisse nur unter den Bedingungen der jeweiligen Validierung gültig. Es ist nicht möglich die Fülle an unterschiedlichen Kunststoffen, Bauteilgeometrien und Werkzeugkonstruktionen zu berücksichtigen. Ebenso konnte nicht festgestellt werden, ob sich die Ergebnisse auf sehr viel größere Bauteile, Werkzeuge und Maschinen übertragen lassen.

In weiterführenden Arbeiten sollten daher die Ergebnisse aus dieser Untersuchung durch weitere Versuche, insbesondere mit größeren Bauteilen und Maschinen, gestützt werden. Des Weiteren sollten Versuche an einer Spritzgießmaschine mit einer Plastifizier- und Einspritzschnecke durchgeführt werden, um einen Vergleich zur verwendeten Kolbenspritzgießmaschine zu erhalten.

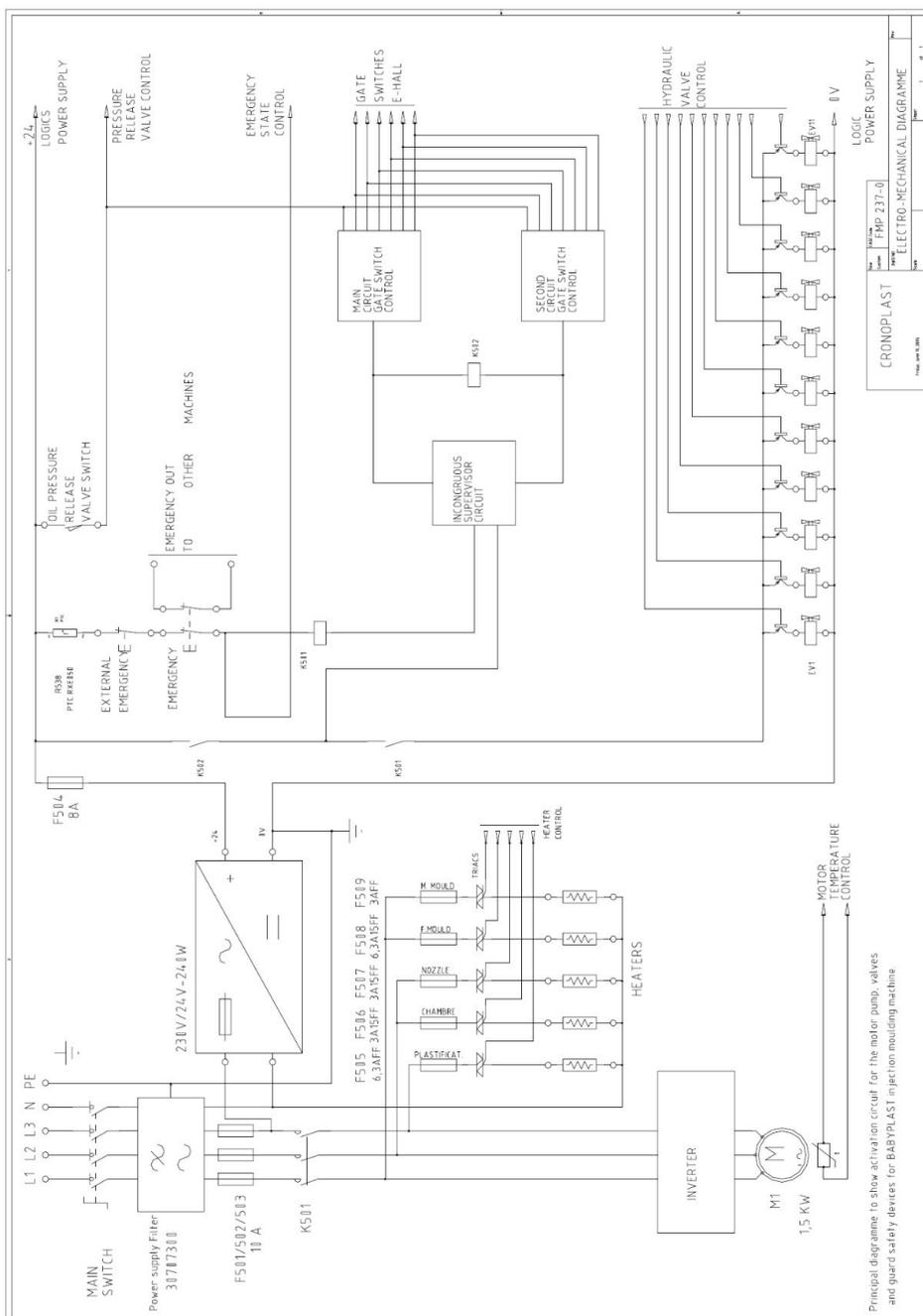
Literaturverzeichnis

- [1] BICHLER, MARTIN: *Qualitätssicherung beim Spritzgießen*. Hüthig Verlag, 2 Auflage, 2008.
- [2] BOURDON, RAINER: *Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen*. Doktorarbeit, 1994.
- [3] CHRONOPLAST S.L.: *Bedienungsanleitung Babyplast 6/10P*, 2010.
- [4] COVESTRO: *Materialdatenblatt Apec 1745 - PC*, 2015.
- [5] DEMAG ERGOTECH: *Handbuch Spritzgießtechnik*, 2000.
- [6] DIN 24450:1987-02: *Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk - Begriffe*, Februar 1987.
- [7] DIN EN 201:2010-02: *Kunststoff- und Gummimaschinen - Spritzgießmaschinen - Sicherheitsanforderungen*, Februar 2010.
- [8] EN ISO 294-1:1998-10: *Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben*, Oktober 1998.
- [9] ERICH WINTERMANTEL, SUK-WOO HA: *Medizintechnik*. Springer-Verlag, 4 Auflage, 2008.
- [10] GRÖMPING, ULRIKE: *Tutorial for designing experiments using the R package RcmdrPlugin.DoE*. Fachbereich II, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2011.
- [11] HAMAN, SOROMO: *Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen*. Doktorarbeit, 2003.
- [12] HOCHSCHULE AALEN: *Statistik erleben*. <http://www.elektronik.htw-aalen.de/statistik-erleben/>.
- [13] JAROSCHEK, CHRISTOPH: *Spritzgießen für Praktiker*. Carl Hanser Verlag, 2 Auflage, 2008.
- [14] KARL SIEBERTZ, DAVID VAN BEBBER, THOMAS HOCHKIRCHEN: *Statistische Versuchsplanung*. Springer-Verlag, 2010.
- [15] KLEPPMANN, WILHELM: *Versuchsplanung*. Carl Hanser Verlag, 8 Auflage, 2013.
- [16] MONTGOMERY, DOUGLAS C.: *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 8 Auflage, 2013.
- [17] NIST/SEMATECH: *e-Handbook of Statistical Methods*. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2013.
- [18] PETERS, CATHERINE A.: *Statistics for Analysis of Experimental Data*, 2001.
- [19] R CORE TEAM: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.
- [20] REPSOL: *Materialdatenblatt ISPLEN PP094N2M*, 2013.
- [21] SPIERING, TIM: *Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Kunststoffspritzgießen durch Energieeffizienz*. Doktorarbeit, 2014.
- [22] STAHEL, WERNER A.: *Statistische Datenanalyse*. Vieweg Verlag, 2 Auflage, 1999.
- [23] WINENERGY!: *Energiekennzahlen und -sarpotenziale in der Kunststoffverarbeitung*, 1997.

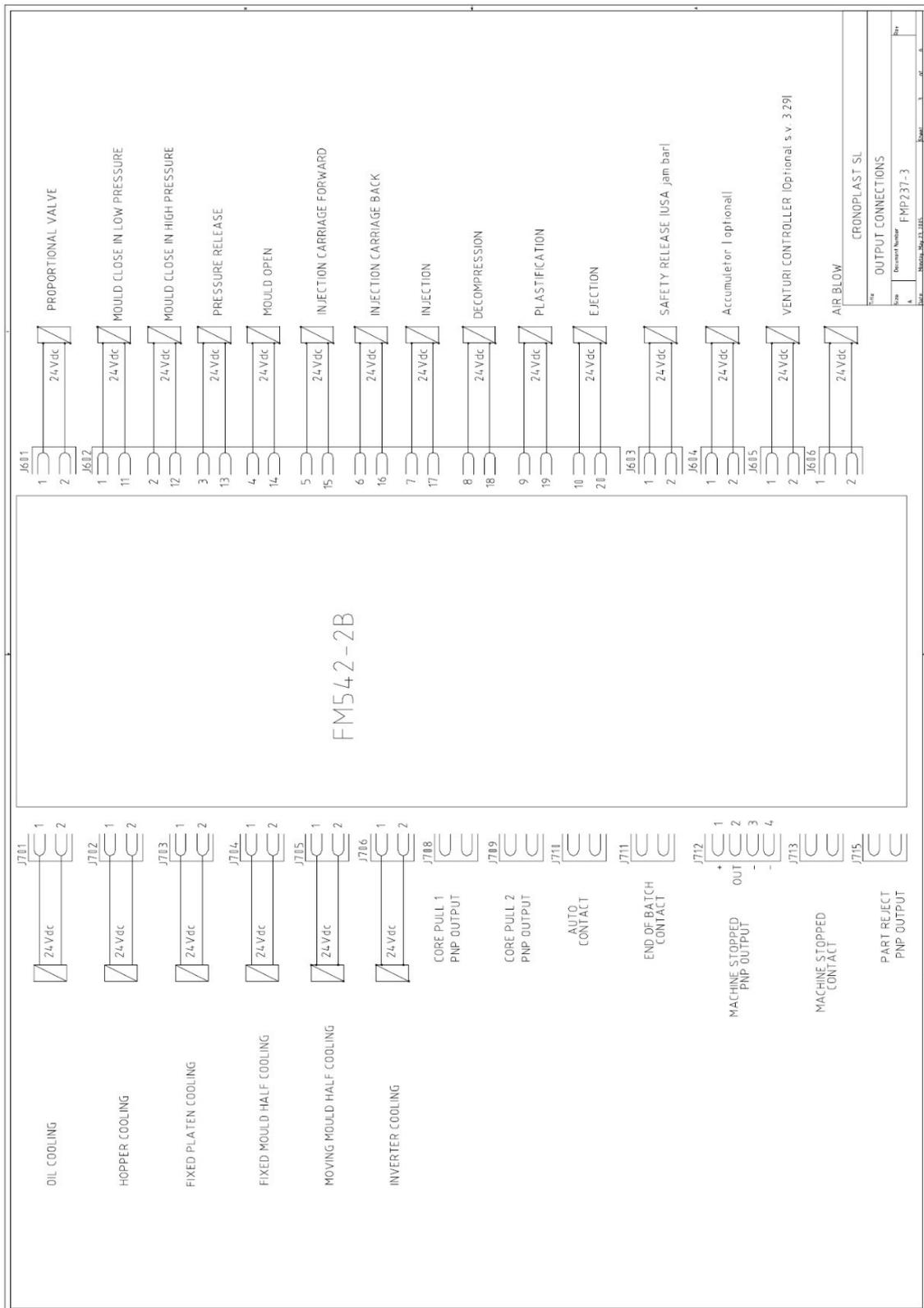
Anhang

A Schaltpläne Babyplast 6/10P

A.1 Elektromechanischer Schaltplan



A.2 Elektrische Ausgänge



B Python Programmskripte

B.1 Datenerfassungsskript (Datenlogger)

```
1 #Skriptzugriff per SSH
2 #!/usr/bin/python
3
4 #Laden der benoetigten Bibliotheken
5 import time, json, os
6 import smbus
7
8 from pymodbus.client.sync import ModbusTcpClient
9
10 from pymodbus.constants import Endian
11 from pymodbus.payload import BinaryPayloadDecoder
12
13 import numpy as np
14
15 import csv
16
17 #Festlegung des Verzeichnisses fuer die Logger-Datei
18 logfile=os.path.expanduser("/home/pi/Documents/test5.txt")
19
20 #Klasse fuer Modbus-Register anlegen
21 class UMG604_register:
22     Name=""
23     Address=0
24     Format=""
25     Unit=""
26     Description=""
27
28
29     def __init__(self, Name, Address, Format, Unit, Description):
30         self.name = Name
31         self.address = Address
32         self.format = Format
33         self.unit = Unit
34         self.description = Description
35         self.subplot = ""
36         self.subplot_color="b"
37         self.integrate= 0
38         self.state=0
39         #set count depending on Format
40         if Format=='float':
41             self.count=2
42         elif Format=='char':
43             self.count=1
44         elif Format=='byte':
45             self.count=1
46         elif Format=='short':
47             self.count=1
48         elif Format=='int':
49             self.count=2
50         elif Format=='uint':
51             self.count=2
52         elif Format=='long64':
53             self.count=4
54         elif Format=='double':
55             self.count=4
56
57
58     def get_value(self):
59         result = client.read_input_registers(self.address, self.count, unit=1)
60         decoder = BinaryPayloadDecoder.fromRegisters(result.registers, endian=Endian.Big)
61
62         if self.format=='float':
63             return decoder.decode_32bit_float()
64         elif self.format=='char':
65             return decoder.decode_8bit_char()
66         elif self.format=='byte':
67             return decoder.decode_32bit_float()
```

```

69     elif self.format=='short':
70         #print decoder.decode_8bit_int()
71         return result.registers[0]
72     elif self.format=='int':
73         return decoder.decode_16bit_int()
74     elif self.format=='uint':
75         return decoder.decode_16bit_uint()
76     elif self.format=='long64':
77         return decoder.decode_64bit_int()
78     elif self.format=='double':
79         return decoder.decode_32bit_float()
80
81     zeit=0
82     leistung=0
83
84     #Register belegen
85     Registers=[]
86     Registers.append(UMG604_register("_TIME_WH",9967, "float","2ns","Active and Apparent
87         Energy Measurement, Elapsed Time"))
88     Registers.append(UMG604_register("_G_P_SUM3", 19026, "float","W","Psum3=P1+P2+P3"))
89
90     #IP-Adresse UMG604
91     client = ModbusTcpClient('192.168.5.201')
92
93     #Buszuordnung
94     bus = smbus.SMBus(1) # Rev 2 Pi uses 1
95
96     #PCF8575 Adresskonstanten
97     DEVICE = 0x20 # Device address (0x20 = 0b00100000) (A0-A2 = 0(ground))
98     cmd1 = (255) # Pin direction register port 0 (first byte after address byte, P00-P07) (255
99         = 0xFF = 0b11111111)
100     cmd2 = (3) # Pin direction register port 1 (second byte after address byte, P10-P17) (3 =
101         0x03 = 0b00000011)
102
103     # Set first 10 pins as inputs
104     bus.write_word_data(DEVICE,cmd1,cmd2)
105
106     #Logging-Schleife
107     while True:
108
109         # Read state of PIO register
110         hydstats = bus.read_word_data(DEVICE, 1)
111         #print bin(hydstats)
112         #time.sleep(0.1)
113
114         if hydstats & 0b111111111 != 0b111111111:
115             zeit=Registers[0].get_value()
116             f=open(logfile,"a")
117             writer=csv.writer(f)
118             writer.writerow([zeit])
119             f.close()
120             while hydstats & 0b111111111 != 0b111111111:
121                 hydstats = bus.read_word_data(DEVICE, 1)
122                 leistung=Registers[1].get_value()
123                 #for UMG604_register in Registers1:
124                 #    leistung=UMG604_register.get_value()
125                 f=open(logfile,"a")
126                 writer=csv.writer(f)
127                 writer.writerow([leistung])
128                 f.close()
129                 time.sleep(0.05)
130             #if hydstats & 0b111111111 == 0b111111111:
131             #    break
132             zeit=Registers[0].get_value()
133             f=open(logfile,"a")
134             writer=csv.writer(f)
135             writer.writerow([zeit])
136             f.close()
137
138     client.close()

```

B.2 Datenaufbereitungsskript

```
1 #Skriptzugriff per SSH
2 #!/usr/bin/python
3
4 #Laden der benoetigten Bibliotheken
5 import time, json, os
6
7
8 import numpy
9
10 #Festlegung des Verzeichnisses fuer die Logger-Datei
11 logfile=os.path.expanduser("/home/pi/Documents/test5.txt")
12
13 #Logging-Datei oeffnen
14 f= open(logfile, "r")
15 lines=f.readlines()
16 f.close()
17
18 #Variablendefinition
19 leistung = 0
20 zeit1=float(lines[0])
21 zeit2=float(lines[-1])
22
23 #Auslesen der Leistungsdaten
24 for x in lines:
25     if abs(float(x))<3000:
26         leistung += abs(float(x))
27
28 #Energieberechnung
29 cycletime=zeit2-zeit1
30 print "Zykluszeit [s]:", cycletime
31 arbeit=leistung/(20*3600)
32 print "Energie [Wh]:", arbeit
33
34 #Loeschen alter Logging-Datei
35 os.remove("/home/pi/Documents/test5.txt")
```

C Maschinenparameter

C.1 Maschinenparameter Hauptversuch

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Schließeinheit						
Öffnungshub	/	/	41	/	/	mm
Zufahrdruck	/	/	56	/	/	bar
Werkzeugsicherung	/	/	40	/	/	bar
Beginn Wkz-Sicherung	/	/	2	/	/	mm
Schließgeschwindigkeit 1	/	/	50	/	/	%
Schließgeschwindigkeit 2	/	/	25	/	/	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	/	/	20	/	/	mm
Öffnungsgeschwindigkeit 1	/	/	65	/	/	%
Öffnungsgeschwindigkeit 2	/	/	50	/	/	%
Umschaltpunkt Öffnungsgeschw.	/	/	0	/	/	mm
Temperaturen						
Plastifizierung	222	229	236	243	250	°C
Umlenkkopf	222	229	236	243	250	°C
Düse	222	229	236	243	250	°C
Heisskanal	222	229	236	243	250	°C
Kühlwasser	/	/	18	/	/	°C
Kühlwasserventile						
Spannplatte Auswerferseite	/	/	5	/	/	Stellwert
Werkzeug Düsen­seite	/	/	5	/	/	Stellwert
Spannplatte Düsen­seite	/	/	5	/	/	Stellwert
Spritzaggregat Plastifizierung	/	/	5	/	/	Stellwert
Spritzaggregat						
Aggregatabhub (Düsenabhubzeit)	/	/	0	/	/	s
Aggregatgeschwindigkeit	/	/	80	/	/	%
Düsenabhubverzögerung	/	/	0	/	/	s
Plastifizierung						
Zeit 2. Ladung	/	/	0	/	/	s
Plastifiziergeschwindigkeit	/	/	50	/	/	%
Plastifizierverzögerung	/	/	0	/	/	s
Auswerfen						
Auswerfergeschwindigkeit	/	/	40	/	/	%
Auswerferhöhe	/	/	2	/	/	n
Auswerferdruck	/	/	20	/	/	bar
Zeit Auswerfer vor	/	/	0,32	/	/	s
Zeit Auswerfer zurück	/	/	0,32	/	/	s
Blasluftzeit	/	/	0	/	/	s
Pause vor Auswerfen	/	/	0	/	/	s
Pause Zyklusende	/	/	0,5	/	/	s

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	-	0	+	$+\alpha$	
Einspritzen						
Dosierweg	/	/	12	/	/	mm
Restkühlzeit	0	2	3	4	6	s
Maximaldruck 1. Druckstufe	/	/	65	/	/	bar
Maximalzeit 1. Druckstufe	/	/	2	/	/	s
Druck 2. Druckstufe	20	25	30	35	40	bar
Zeit 2. Druckstufe	13	15	17	19	21	s
Umschaltpunkt 2. Druckstufe	7	8	9	10	11	mm
Dekompression	/	/	3	/	/	mm
1. Spritzgeschwindigkeit	30	40	50	60	70	%
2. Spritzgeschwindigkeit	10	20	30	40	50	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	7	8	9	10	11	mm

C.2 Maschinenparameter Geometrievalidierung

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Schließeinheit						
Öffnungshub	/	/	41	/	/	mm
Zufahrdruck	/	/	56	/	/	bar
Werkzeugsicherung	/	/	40	/	/	bar
Beginn Wkz-Sicherung	/	/	2	/	/	mm
Schließgeschwindigkeit 1	/	/	50	/	/	%
Schließgeschwindigkeit 2	/	/	25	/	/	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	/	/	20	/	/	mm
Öffnungsgeschwindigkeit 1	/	/	65	/	/	%
Öffnungsgeschwindigkeit 2	/	/	50	/	/	%
Umschaltpunkt Öffnungsgeschw.	/	/	0	/	/	mm
Temperaturen						
Plastifizierung	222	229	236	243	250	°C
Umlenkkopf	222	229	236	243	250	°C
Düse	280	287	294	301	308	°C
Heisskanal	280	287	294	301	308	°C
Kühlwasser	/	/	18	/	/	°C
Kühlwasserventile						
Spannplatte Auswerferseite	/	/	5	/	/	Stellwert
Werkzeug Düsenseite	/	/	0 - 5	/	/	Stellwert
Spannplatte Düsenseite	/	/	/	/	/	Stellwert
Spritzaggregat Plastifizierung	/	/	5	/	/	Stellwert
Spritzaggregat						
Aggregatabhub (Düsenabhubzeit)	/	/	0	/	/	s
Aggregatgeschwindigkeit	/	/	80	/	/	%
Düsenabhubverzögerung	/	/	0	/	/	s
Plastifizierung						
Zeit 2. Ladung	/	/	0	/	/	s
Plastifiziergeschwindigkeit	/	/	50	/	/	%
Plastifizierverzögerung	/	/	0	/	/	s
Auswerfen						
Auswerfergeschwindigkeit	/	/	50	/	/	%
Auswerferhöhe	/	/	3	/	/	n
Auswerferdruck	/	/	20	/	/	bar
Zeit Auswerfer vor	/	/	0,25	/	/	s
Zeit Auswerfer zurück	/	/	0,20	/	/	s
Blasluftzeit	/	/	0	/	/	s
Pause vor Auswerfen	/	/	0	/	/	s
Pause Zyklusende	/	/	0	/	/	s
Einspritzen						
Dosierweg	/	/	7	/	/	mm

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	$-$	0	$+$	$+\alpha$	
Restkühlzeit	0	1	2	3	4	s
Maximaldruck 1. Druckstufe	/	/	65	/	/	bar
Maximalzeit 1. Druckstufe	/	/	2	/	/	s
Druck 2. Druckstufe	15	20	25	30	35	bar
Zeit 2. Druckstufe	3	5	7	9	11	s
Umschaltpunkt 2. Druckstufe	3,5	4,5	5,5	6,5	7,6	mm
Dekompression	/	/	3	/	/	mm
1. Spritzgeschwindigkeit	30	40	50	60	70	%
2. Spritzgeschwindigkeit	10	20	30	40	50	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	mm

C.3 Maschinenparameter Materialvalidierung

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	-	0	+	$+\alpha$	
Schließeinheit						
Öffnungshub	/	/	41	/	/	mm
Zufahrdruck	/	/	56	/	/	bar
Werkzeugsicherung	/	/	40	/	/	bar
Beginn Wkz-Sicherung	/	/	2	/	/	mm
Schließgeschwindigkeit 1	/	/	50	/	/	%
Schließgeschwindigkeit 2	/	/	25	/	/	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	/	/	20	/	/	mm
Öffnungsgeschwindigkeit 1	/	/	65	/	/	%
Öffnungsgeschwindigkeit 2	/	/	50	/	/	%
Umschaltpunkt Öffnungsgeschw.	/	/	0	/	/	mm
Temperaturen						
Plastifizierung	326	332	338	344	350	°C
Umlenkkopf	326	332	338	344	350	°C
Düse	326	332	338	344	350	°C
Heisskanal	326	332	338	344	350	°C
Werkzeug	/	/	120	/	/	°C
Kühlwasserventile						
Spannplatte Auswerferseite	/	/	/	/	/	Stellwert
Werkzeug Düsenseite	/	/	/	/	/	Stellwert
Spannplatte Düsenseite	/	/	/	/	/	Stellwert
Spritzaggregat Plastifizierung	/	/	5	/	/	Stellwert
Spritzaggregat						
Aggregatabhub (Düsenabhubzeit)	/	/	0	/	/	s
Aggregatgeschwindigkeit	/	/	80	/	/	%
Düsenabhubverzögerung	/	/	0	/	/	s
Plastifizierung						
Zeit 2. Ladung	/	/	0	/	/	s
Plastifiziergeschwindigkeit	/	/	50	/	/	%
Plastifizierverzögerung	/	/	0	/	/	s
Auswerfen						
Auswerfergeschwindigkeit	/	/	40	/	/	%
Auswerferhöhe	/	/	2	/	/	n
Auswerferdruck	/	/	20	/	/	bar
Zeit Auswerfer vor	/	/	0,32	/	/	s
Zeit Auswerfer zurück	/	/	0,32	/	/	s
Blasluftzeit	/	/	0	/	/	s
Pause vor Auswerfen	/	/	0	/	/	s
Pause Zyklusende	/	/	0,5	/	/	s
Einspritzen						
Dosierweg	/	/	13	/	/	mm

Parameter	Faktorstufe					Einheit
	$-\alpha$	-	0	+	$+\alpha$	
Restkühlzeit	4	6	8	10	12	s
Maximaldruck 1. Druckstufe	/	/	105	/	/	bar
Maximalzeit 1. Druckstufe	/	/	2	/	/	s
Druck 2. Druckstufe	20	25	30	35	40	bar
Zeit 2. Druckstufe	7	9	11	13	15	s
Umschaltpunkt 2. Druckstufe	8	9	10	11	12	mm
Dekompression	/	/	3	/	/	mm
1. Spritzgeschwindigkeit	40	50	60	70	80	%
2. Spritzgeschwindigkeit	20	30	40	50	60	%
Umschaltpunkt Geschwindigkeit	8	9	10	11	12	mm

D Eigenschaften der Versuchspläne (R-Output)

D.1 Screeningplan

```

Experimental design of type FrF2.generators
2
Design: 11-6.1
4 32 runs
11 factors
6 Resolution: IV
Randomization Seed: 6463
8
Factor settings:
10   A  B  C  D E  F  G  H  J  K  L
12 1 229 229 229 229 2 25 15  8  8 40 20
14 2 243 243 243 243 6 35 19 10 10 60 40

14 Design generating information:
$generators
16 F=ABC G=ABD H=ACD J=ABE K=ACE L=ADE

18 Alias structure:
$2fi
20 AB=CF=DG=EJ AC=BF=DH=EK AD=BG=CH=EL AE=BJ=CK=DL AF=BC=GH=JK AG=BD=
FH=JL
AH=CD=FG=KL AJ=BE=FK=GL AK=CE=FJ=HL AL=DE=GJ=HK BH=CG=DF BK=CJ=EF
22 BL=DJ=EG CL=DK=EH FL=GK=HJ

```

D.2 Fraktioniert faktorieller Versuchsplan

```

Experimental design of type FrF2.blocked
2
blocked design with 2 blocks of size 32
4
Design: 8-2.1
6 64 runs
8 factors
8 Resolution: V
Randomization Seed: 31974
10
Factor settings:
12   A  B C  D  E  F  G  H
14 1 229 229 2 25 15  8 40 20
16 2 243 243 6 35 19 10 60 40

16 Design generating information:
$generators
18 G=ABCD H=ABEF

20 $generators for design itself
F=b1ABC G=b1ADE H=b1BD
22
$block generators
24 block generators b1
from Yates matrix columns 21
26 of base design in catalogue

28 Alias structure:
no aliasing of main effects or 2fis among experimental factors
30
Aliased with block main effects:
32 none

```

D.3 Zentral zusammengesetzter Versuchsplan 2. Ordnung

```
1 Experimental design of type ccd
3 blocked design with 2 cube blocks and one star block of size 32
5 82 runs
   Randomization seed: 904
7 alpha: +-2
9 Factor settings (cube):
   A B C D E F G H
11 1 229 229 2 25 15 8 40 20
   2 243 243 6 35 19 10 60 40
13
15 Numbers of cube and star points:
   Cube Star
   64 17
17
19 Numbers of center points:
   Cube Star
   1 0
```

E Versuchspläne

E.1 Screeningplan

Versuchsabfolge		Faktoren										
		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
Random	Normal	T_P	T_U	T_D	T_H	t_K	p_N	t_N	s_U	s_{Uv}	v_1	v_2
1	4	243	243	229	229	2	25	15	10	8	60	40
2	10	243	229	229	243	2	35	15	8	10	60	20
3	20	243	243	229	229	6	25	15	10	10	40	20
4	18	243	229	229	229	6	35	19	10	8	40	20
5	32	243	243	243	243	6	35	19	10	10	60	40
6	15	229	243	243	243	2	25	15	8	10	60	40
7	21	229	229	243	229	6	35	15	10	10	40	40
8	2	243	229	229	229	2	35	19	10	10	60	40
9	12	243	243	229	243	2	25	19	8	8	60	20
10	24	243	243	243	229	6	35	15	8	10	60	20
11	14	243	229	243	243	2	25	15	10	10	40	20
12	5	229	229	243	229	2	35	15	10	8	60	20
13	17	229	229	229	229	6	25	15	8	10	60	40
14	8	243	243	243	229	2	35	15	8	8	40	40
15	31	229	243	243	243	6	25	15	8	8	40	20
16	3	229	243	229	229	2	35	19	8	10	40	20
17	23	229	243	243	229	6	25	19	10	8	40	40
18	9	229	229	229	243	2	25	19	10	8	40	40
19	11	229	243	229	243	2	35	15	10	10	40	40
20	1	229	229	229	229	2	25	15	8	8	40	20
21	28	243	243	229	243	6	25	19	8	10	40	40
22	19	229	243	229	229	6	35	19	8	8	60	40
23	26	243	229	229	243	6	35	15	8	8	40	40
24	6	243	229	243	229	2	25	19	8	10	40	40
25	27	229	243	229	243	6	35	15	10	8	60	20
26	16	243	243	243	243	2	35	19	10	8	40	20
27	7	229	243	243	229	2	25	19	10	10	60	20
28	13	229	229	243	243	2	35	19	8	8	60	40
29	29	229	229	243	243	6	35	19	8	10	40	20
30	22	243	229	243	229	6	25	19	8	8	60	20
31	25	229	229	229	243	6	25	19	10	10	60	20
32	30	243	229	243	243	6	25	15	10	8	60	40

E.2 Zentral zusammengesetzter Versuchsplan 2. Ordnung

Versuchsabfolge			Faktoren							
			A	B	C	D	E	F	G	H
Random	Normal	Block	$T_P + T_U$	$T_D + T_H$	t_K	p_N	t_N	$s_U + s_{Uv}$	v_E	v_N
1	W1.51	1	243	243	2	25	19	8	60	20
2	W1.17	1	229	243	2	25	15	8	40	20
3	W1.57	1	243	243	6	25	15	8	40	40
4	W1.22	1	229	243	2	35	15	10	60	40
5	W1.2	1	229	229	2	25	15	10	60	20
6	W1.35	1	243	229	2	25	19	8	40	40
7	W1.55	1	243	243	2	35	19	8	40	20
8	W1.27	1	229	243	6	25	19	8	60	40
9	W1.28	1	229	243	6	25	19	10	60	20
10	W1.36	1	243	229	2	25	19	10	40	20
11	W1.15	1	229	229	6	35	19	8	60	20
12	W1.6	1	229	229	2	35	15	10	40	20
13	W1.11	1	229	229	6	25	19	8	40	20
14	W1.1	1	229	229	2	25	15	8	60	40
15	W1.42	1	243	229	6	25	15	10	60	40
16	W1.32	1	229	243	6	35	19	10	40	20
17	W1.62	1	243	243	6	35	15	10	60	20
18	W1.21	1	229	243	2	35	15	8	60	20
19	W1.40	1	243	229	2	35	19	10	60	20
20	W1.46	1	243	229	6	35	15	10	40	40
21	W1.18	1	229	243	2	25	15	10	40	40
22	W1.39	1	243	229	2	35	19	8	60	40
23	W1.56	1	243	243	2	35	19	10	40	40
24	W1.5	1	229	229	2	35	15	8	40	40
25	W1.61	1	243	243	6	35	15	8	60	40
26	W1.31	1	229	243	6	35	19	8	40	40
27	W1.41	1	243	229	6	25	15	8	60	20
28	W1.16	1	229	229	6	35	19	10	60	40
29	W1.45	1	243	229	6	35	15	8	40	20
30	W1.12	1	229	229	6	25	19	10	40	40
31	W1.58	1	243	243	6	25	15	10	40	20
32	W1.52	1	243	243	2	25	19	10	60	40
33	Z1.65	1	236	236	4	30	17	9	50	30
34	W2.19	2	229	243	2	25	19	8	40	40
35	W2.63	2	243	243	6	35	19	8	60	20
36	W2.37	2	243	229	2	35	15	8	60	20
37	W2.3	2	229	229	2	25	19	8	60	20
38	W2.20	2	229	243	2	25	19	10	40	20
39	W2.7	2	229	229	2	35	19	8	40	20
40	W2.54	2	243	243	2	35	15	10	40	20
41	W2.47	2	243	229	6	35	19	8	40	40
42	W2.25	2	229	243	6	25	15	8	60	20
43	W2.13	2	229	229	6	35	15	8	60	40
44	W2.24	2	229	243	2	35	19	10	60	20

Versuchsabfolge			Faktoren							
			A	B	C	D	E	F	G	H
Random	Normal	Block	$T_P + T_U$	$T_D + T_H$	t_K	p_N	t_N	$s_U + s_{Uv}$	v_E	v_N
45	W2.30	2	229	243	6	35	15	10	40	40
46	W2.48	2	243	229	6	35	19	10	40	20
47	W2.10	2	229	229	6	25	15	10	40	20
48	W2.44	2	243	229	6	25	19	10	60	20
49	W2.4	2	229	229	2	25	19	10	60	40
50	W2.23	2	229	243	2	35	19	8	60	40
51	W2.9	2	229	229	6	25	15	8	40	40
52	W2.43	2	243	229	6	25	19	8	60	40
53	W2.26	2	229	243	6	25	15	10	60	40
54	W2.49	2	243	243	2	25	15	8	60	40
55	W2.60	2	243	243	6	25	19	10	40	40
56	W2.50	2	243	243	2	25	15	10	60	20
57	W2.38	2	243	229	2	35	15	10	60	40
58	W2.33	2	243	229	2	25	15	8	40	20
59	W2.53	2	243	243	2	35	15	8	40	40
60	W2.8	2	229	229	2	35	19	10	40	40
61	W2.64	2	243	243	6	35	19	10	60	40
62	W2.34	2	243	229	2	25	15	10	40	40
63	W2.59	2	243	243	6	25	19	8	40	20
64	W2.29	2	229	243	6	35	15	8	40	20
65	W2.14	2	229	229	6	35	15	10	60	20
66	Z2.65	2	236	236	4	30	17	9	50	30
67	S3.9	3	236	236	4	30	13	9	50	30
68	S3.2	3	250	236	4	30	17	9	50	30
69	S3.6	3	236	236	8	30	17	9	50	30
70	S3.13	3	236	236	4	30	17	9	30	30
71	S3.4	3	236	250	4	30	17	9	50	30
72	S3.12	3	236	236	4	30	17	11	50	30
73	S3.15	3	236	236	4	30	17	9	50	10
74	S3.14	3	236	236	4	30	17	9	70	30
75	S3.10	3	236	236	4	30	21	9	50	30
76	S3.7	3	236	236	4	20	17	9	50	30
77	S3.1	3	222	236	4	30	17	9	50	30
78	S3.5	3	236	236	0	30	17	9	50	30
79	S3.3	3	236	222	4	30	17	9	50	30
80	S3.8	3	236	236	4	40	17	9	50	30
81	S3.16	3	236	236	4	30	17	9	50	50
82	S3.11	3	236	236	4	30	17	7	50	30

F Modellkoeffizienten Modell 1. Ordnung (R-Output)

F.1 Zielgröße Gewicht \bar{g}

```

lm.default(formula = g_mean ~ Blocks + (A + B + C + D + E + F +
  2     G + H)^2, data = frf2_64_4.withresp)
  4
Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
  6 -0.0011875 -0.0003969 -0.0001094  0.0004344  0.0015187
  8
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
10 (Intercept)  7.730e-01  1.100e-04 7029.065 < 2e-16 ***
12 Blocks1     3.094e-04  1.100e-04   2.813  0.00922 **
14 A1          8.438e-05  1.100e-04   0.767  0.44987
16 B1          3.969e-04  1.100e-04   3.609  0.00129 **
18 C1          5.937e-05  1.100e-04   0.540  0.59387
20 D1          1.816e-03  1.100e-04  16.509 2.68e-15 ***
22 E1          1.472e-03  1.100e-04  13.383 3.60e-13 ***
24 F1          5.937e-05  1.100e-04   0.540  0.59387
26 G1          8.438e-05  1.100e-04   0.767  0.44987
28 H1         -7.187e-05  1.100e-04  -0.654  0.51915
30 A1:B1      -1.469e-04  1.100e-04  -1.335  0.19329
32 A1:C1      -1.594e-04  1.100e-04  -1.449  0.15925
34 A1:D1      1.219e-04  1.100e-04   1.108  0.27793
36 A1:E1      -8.438e-05  1.100e-04  -0.767  0.44987
38 A1:F1      5.312e-05  1.100e-04   0.483  0.63310
40 A1:G1     -1.469e-04  1.100e-04  -1.335  0.19329
42 A1:H1     -3.125e-06  1.100e-04  -0.028  0.97755
44 B1:C1      -8.438e-05  1.100e-04  -0.767  0.44987
46 B1:D1     -1.406e-04  1.100e-04  -1.279  0.21231
48 B1:E1      1.906e-04  1.100e-04   1.733  0.09489
50 B1:F1      1.156e-04  1.100e-04   1.051  0.30277
52 B1:G1      2.812e-05  1.100e-04   0.256  0.80017
    B1:H1      7.187e-05  1.100e-04   0.654  0.51915
    C1:D1     -6.562e-05  1.100e-04  -0.597  0.55586
    C1:E1     -9.687e-05  1.100e-04  -0.881  0.38646
    C1:F1     -1.219e-04  1.100e-04  -1.108  0.27793
    C1:G1     -1.719e-04  1.100e-04  -1.563  0.13019
    C1:H1     -1.781e-04  1.100e-04  -1.620  0.11738
    D1:E1     -6.562e-05  1.100e-04  -0.597  0.55586
    D1:F1     -7.813e-05  1.100e-04  -0.710  0.48380
    D1:G1     -1.156e-04  1.100e-04  -1.051  0.30277
    D1:H1     -4.688e-05  1.100e-04  -0.426  0.67345
    E1:F1      2.812e-05  1.100e-04   0.256  0.80017
    E1:G1      1.031e-04  1.100e-04   0.938  0.35703
    E1:H1      9.687e-05  1.100e-04   0.881  0.38646
    F1:G1     -9.375e-06  1.100e-04  -0.085  0.93272
    F1:H1      4.688e-05  1.100e-04   0.426  0.67345
    G1:H1      8.438e-05  1.100e-04   0.767  0.44987
  48
-----
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
  50
Residual standard error: 0.0008798 on 26 degrees of freedom
  52 Multiple R-squared:  0.9507, Adjusted R-squared:  0.8805
F-statistic: 13.55 on 37 and 26 DF, p-value: 7.064e-10

```

F.2 Zielgröße Energieverbrauch \bar{e}

```

1 lm.default(formula = e_mean ~ Blocks + (A + B + C + D + E + F +
  G + H)^2, data = frf2_64_4.withresp)
3
4 Residuals:
5      Min       1Q   Median       3Q      Max
6 -0.144806 -0.034532 -0.005543  0.031570  0.163082
7
8 Coefficients:
9      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
10 (Intercept)  7.800735   0.011027  707.450 < 2e-16 ***
11 Blocks1      0.002893   0.011027   0.262  0.79512
12 A1           0.113531   0.011027  10.296 1.15e-10 ***
13 B1           0.036265   0.011027   3.289  0.00289 **
14 C1           0.726806   0.011027  65.914 < 2e-16 ***
15 D1          -0.013288   0.011027  -1.205  0.23901
16 E1           0.576603   0.011027  52.292 < 2e-16 ***
17 F1          -0.009335   0.011027  -0.847  0.40493
18 G1           0.021913   0.011027   1.987  0.05752 .
19 H1           0.678440   0.011027  61.528 < 2e-16 ***
20 A1:B1       -0.001849   0.011027  -0.168  0.86810
21 A1:C1        0.010456   0.011027   0.948  0.35173
22 A1:D1        0.006240   0.011027   0.566  0.57634
23 A1:E1        0.017825   0.011027   1.617  0.11804
24 A1:F1       -0.011226   0.011027  -1.018  0.31801
25 A1:G1       -0.008614   0.011027  -0.781  0.44176
26 A1:H1        0.002307   0.011027   0.209  0.83589
27 B1:C1        0.004333   0.011027   0.393  0.69757
28 B1:D1       -0.007272   0.011027  -0.660  0.51535
29 B1:E1        0.011872   0.011027   1.077  0.29152
30 B1:F1        0.010964   0.011027   0.994  0.32925
31 B1:G1        0.006336   0.011027   0.575  0.57051
32 B1:H1        0.003736   0.011027   0.339  0.73744
33 C1:D1        0.008916   0.011027   0.809  0.42608
34 C1:E1       -0.010796   0.011027  -0.979  0.33657
35 C1:F1        0.008444   0.011027   0.766  0.45068
36 C1:G1        0.009270   0.011027   0.841  0.40820
37 C1:H1        0.010899   0.011027   0.988  0.33205
38 D1:E1       -0.001531   0.011027  -0.139  0.89065
39 D1:F1       -0.007020   0.011027  -0.637  0.52995
40 D1:G1       -0.005647   0.011027  -0.512  0.61286
41 D1:H1       -0.011894   0.011027  -1.079  0.29063
42 E1:F1       -0.011767   0.011027  -1.067  0.29572
43 E1:G1        0.009966   0.011027   0.904  0.37437
44 E1:H1        0.068839   0.011027   6.243 1.32e-06 ***
45 F1:G1        0.005402   0.011027   0.490  0.62828
46 F1:H1        0.008566   0.011027   0.777  0.44423
47 G1:H1        0.009039   0.011027   0.820  0.41980
48
49 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
50
51 Residual standard error: 0.08821 on 26 degrees of freedom
52 Multiple R-squared:  0.9977, Adjusted R-squared:  0.9943
53 F-statistic: 298.5 on 37 and 26 DF, p-value: < 2.2e-16

```

F.3 Zielgröße Entformung \overline{ent}

```

1 lm.default(formula = ent_mean ~ Blocks + (A + B + C + D + E +
3   F + G + H)^2, data = frf2_64_4.withresp)
5
6 Residuals:
7     Min       1Q   Median       3Q      Max
8  -0.37562  -0.12406   0.00469   0.13453   0.30875
9
10 Coefficients:
11      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
12 (Intercept)  0.4559375  0.0327836  13.907 1.49e-13 ***
13 Blocks1     -0.0015625  0.0327836  -0.048 0.962351
14 A1          0.0109375  0.0327836   0.334 0.741337
15 B1          0.1365625  0.0327836   4.166 0.000303 ***
16 C1         -0.1640625  0.0327836  -5.004 3.32e-05 ***
17 D1          0.2334375  0.0327836   7.121 1.46e-07 ***
18 E1         -0.1940625  0.0327836  -5.919 3.03e-06 ***
19 F1          0.0209375  0.0327836   0.639 0.528632
20 G1         -0.0671875  0.0327836  -2.049 0.050636 .
21 H1         -0.0209375  0.0327836  -0.639 0.528632
22 A1:B1       -0.0034375  0.0327836  -0.105 0.917296
23 A1:C1       -0.0003125  0.0327836  -0.010 0.992467
24 A1:D1       -0.0565625  0.0327836  -1.725 0.096338 .
25 A1:E1       -0.0653125  0.0327836  -1.992 0.056944 .
26 A1:F1       0.0196875  0.0327836   0.601 0.553354
27 A1:G1       0.0415625  0.0327836   1.268 0.216112
28 A1:H1       0.0140625  0.0327836   0.429 0.671494
29 B1:C1       0.0128125  0.0327836   0.391 0.699114
30 B1:D1       0.0553125  0.0327836   1.687 0.103528
31 B1:E1       0.0053125  0.0327836   0.162 0.872521
32 B1:F1       0.0315625  0.0327836   0.963 0.344542
33 B1:G1       0.0146875  0.0327836   0.448 0.657855
34 B1:H1      -0.0053125  0.0327836  -0.162 0.872521
35 C1:D1       0.0059375  0.0327836   0.181 0.857684
36 C1:E1       0.0409375  0.0327836   1.249 0.222896
37 C1:F1       0.0146875  0.0327836   0.448 0.657855
38 C1:G1       0.0003125  0.0327836   0.010 0.992467
39 C1:H1      -0.0021875  0.0327836  -0.067 0.947311
40 D1:E1       0.0134375  0.0327836   0.410 0.685249
41 D1:F1      -0.0228125  0.0327836  -0.696 0.492696
42 D1:G1      -0.0109375  0.0327836  -0.334 0.741337
43 D1:H1       0.0165625  0.0327836   0.505 0.617670
44 E1:F1      -0.0003125  0.0327836  -0.010 0.992467
45 E1:G1       0.0128125  0.0327836   0.391 0.699114
46 E1:H1       0.0228125  0.0327836   0.696 0.492696
47 F1:G1       0.0015625  0.0327836   0.048 0.962351
48 F1:H1       0.0065625  0.0327836   0.200 0.842900
49 G1:H1       0.0396875  0.0327836   1.211 0.236944
50
51 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
52
53 Residual standard error: 0.2623 on 26 degrees of freedom
54 Multiple R-squared:  0.8535, Adjusted R-squared:  0.6451
55 F-statistic: 4.095 on 37 and 26 DF, p-value: 0.0001778

```

F.4 Zielgröße Zykluszeit \bar{z}

```

1 lm.default(formula = z_mean ~ Blocks + (A + B + C + D + E + F +
  G + H)^2, data = frf2_64_4.withresp)
3
4 Residuals:
5     Min       1Q   Median       3Q      Max
6  -0.016875 -0.005625  0.000000  0.004687  0.018125
7
8 Coefficients:
9     Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
10 (Intercept)  2.540e+01  1.516e-03 16751.431 < 2e-16 ***
11 Blocks1      -4.375e-03  1.516e-03   -2.886  0.00775 **
12 A1          -2.500e-03  1.516e-03   -1.649  0.11120
13 B1          -3.125e-03  1.516e-03   -2.061  0.04942 *
14 C1           2.000e+00  1.516e-03 1319.140 < 2e-16 ***
15 D1           1.875e-03  1.516e-03    1.237  0.22726
16 E1           1.997e+00  1.516e-03 1317.079 < 2e-16 ***
17 F1          -4.375e-02  1.516e-03  -28.856 < 2e-16 ***
18 G1          -5.125e-02  1.516e-03  -33.803 < 2e-16 ***
19 H1          -2.481e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
20 A1:B1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
21 A1:C1       -1.250e-03  1.516e-03   -0.824  0.41718
22 A1:D1       -1.875e-03  1.516e-03   -1.237  0.22726
23 A1:E1        1.875e-03  1.516e-03    1.237  0.22726
24 A1:F1       -3.089e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
25 A1:G1       -3.750e-03  1.516e-03   -2.473  0.02024 *
26 A1:H1        1.250e-03  1.516e-03    0.824  0.41718
27 B1:C1       -1.875e-03  1.516e-03   -1.237  0.22726
28 B1:D1       -2.423e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
29 B1:E1        4.800e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
30 B1:F1        1.875e-03  1.516e-03    1.237  0.22726
31 B1:G1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
32 B1:H1        6.250e-04  1.516e-03    0.412  0.68355
33 C1:D1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
34 C1:E1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
35 C1:F1        2.626e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
36 C1:G1       -1.250e-03  1.516e-03   -0.824  0.41718
37 C1:H1        1.250e-03  1.516e-03    0.824  0.41718
38 D1:E1       -1.250e-03  1.516e-03   -0.824  0.41718
39 D1:F1        6.250e-04  1.516e-03    0.412  0.68355
40 D1:G1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
41 D1:H1        1.875e-03  1.516e-03    1.237  0.22726
42 E1:F1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
43 E1:G1       -6.250e-04  1.516e-03   -0.412  0.68355
44 E1:H1        6.250e-04  1.516e-03    0.412  0.68355
45 F1:G1        3.750e-03  1.516e-03    2.473  0.02024 *
46 F1:H1        4.909e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
47 G1:H1       -2.130e-16  1.516e-03    0.000  1.00000
48
49 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
50
51 Residual standard error: 0.01213 on 26 degrees of freedom
52 Multiple R-squared:  1, Adjusted R-squared:  1
53 F-statistic: 9.397e+04 on 37 and 26 DF, p-value: < 2.2e-16

```

G ANOVA-Tabellen Modell 1. Ordnung (R-Output)

G.1 Zielgröße Gewicht \bar{g}

```

1 Anova Table (Type II tests)
3 Response: g_mean
5
6      Sum Sq Df F value    Pr(>F)
7 Blocks 6.1260e-06 1  7.9134 0.009219 **
8 A      4.5600e-07 1  0.5886 0.449873
9 B      1.0081e-05 1 13.0226 0.001286 **
10 C     2.2600e-07 1  0.2915 0.593873
11 D     2.1098e-04 1 272.5479 2.680e-15 ***
12 E     1.3865e-04 1 179.1151 3.599e-13 ***
13 F     2.2600e-07 1  0.2915 0.593873
14 G     4.5600e-07 1  0.5886 0.449873
15 H     3.3100e-07 1  0.4271 0.519146
16 A:B    1.3810e-06 1  1.7836 0.193288
17 A:C    1.6260e-06 1  2.1001 0.159249
18 A:D    9.5100e-07 1  1.2281 0.277931
19 A:E    4.5600e-07 1  0.5886 0.449873
20 A:F    1.8100e-07 1  0.2333 0.633101
21 A:G    1.3810e-06 1  1.7836 0.193288
22 A:H    1.0000e-09 1  0.0008 0.977548
23 B:C    4.5600e-07 1  0.5886 0.449873
24 B:D    1.2660e-06 1  1.6350 0.212310
25 B:E    2.3260e-06 1  3.0043 0.094888
26 B:F    8.5600e-07 1  1.1053 0.302772
27 B:G    5.1000e-08 1  0.0654 0.800169
28 B:H    3.3100e-07 1  0.4271 0.519146
29 C:D    2.7600e-07 1  0.3561 0.555861
30 C:E    6.0100e-07 1  0.7759 0.386464
31 C:F    9.5100e-07 1  1.2281 0.277931
32 C:G    1.8910e-06 1  2.4424 0.130187
33 C:H    2.0310e-06 1  2.6233 0.117376
34 D:E    2.7600e-07 1  0.3561 0.555861
35 D:F    3.9100e-07 1  0.5046 0.483798
36 D:G    8.5600e-07 1  1.1053 0.302772
37 D:H    1.4100e-07 1  0.1817 0.673454
38 E:F    5.1000e-08 1  0.0654 0.800169
39 E:G    6.8100e-07 1  0.8793 0.357033
40 E:H    6.0100e-07 1  0.7759 0.386464
41 F:G    6.0000e-09 1  0.0073 0.932720
42 F:H    1.4100e-07 1  0.1817 0.673454
43 G:H    4.5600e-07 1  0.5886 0.449873
44 Residuals 2.0126e-05 26
45
46 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

G.2 Zielgröße Energieverbrauch \bar{e}

1 Anova Table (Type II tests)					
3 Response: e_mean					
	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
5 Blocks	0.001	1	0.0688	0.795123	
7 A	0.825	1	106.0113	1.151e-10	***
B	0.084	1	10.8166	0.002888	**
9 C	33.808	1	4344.6786	< 2.2e-16	***
D	0.011	1	1.4523	0.239012	
11 E	21.278	1	2734.4803	< 2.2e-16	***
F	0.006	1	0.7168	0.404925	
13 G	0.031	1	3.9493	0.057520	.
H	29.458	1	3785.6730	< 2.2e-16	***
15 A:B	0.000	1	0.0281	0.868102	
A:C	0.007	1	0.8992	0.351732	
17 A:D	0.002	1	0.3202	0.576340	
A:E	0.020	1	2.6133	0.118040	
19 A:F	0.008	1	1.0365	0.318014	
A:G	0.005	1	0.6102	0.441762	
21 A:H	0.000	1	0.0438	0.835885	
B:C	0.001	1	0.1544	0.697573	
23 B:D	0.003	1	0.4350	0.515349	
B:E	0.009	1	1.1592	0.291520	
25 B:F	0.008	1	0.9886	0.329246	
B:G	0.003	1	0.3301	0.570514	
27 B:H	0.001	1	0.1148	0.737443	
C:D	0.005	1	0.6538	0.426077	
29 C:E	0.007	1	0.9586	0.336575	
C:F	0.005	1	0.5865	0.450682	
31 C:G	0.005	1	0.7067	0.408205	
C:H	0.008	1	0.9770	0.332050	
33 D:E	0.000	1	0.0193	0.890652	
D:F	0.003	1	0.4053	0.529948	
35 D:G	0.002	1	0.2623	0.612855	
D:H	0.009	1	1.1636	0.290630	
37 E:F	0.009	1	1.1388	0.295720	
E:G	0.006	1	0.8170	0.374367	
39 E:H	0.303	1	38.9751	1.319e-06	***
F:G	0.002	1	0.2401	0.628277	
41 F:H	0.005	1	0.6036	0.444234	
G:H	0.005	1	0.6720	0.419797	
43 Residuals	0.202	26			
45 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

G.3 Zielgröße Entformung \overline{ent}

1 Anova Table (Type II tests)				
3 Response: ent_mean				
	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
5 Blocks	0.0002	1	0.0023	0.9623507
7 A	0.0077	1	0.1113	0.7413370
B	1.1936	1	17.3520	0.0003032 ***
9 C	1.7227	1	25.0440	3.322e-05 ***
D	3.4876	1	50.7022	1.461e-07 ***
11 E	2.4103	1	35.0404	3.031e-06 ***
F	0.0281	1	0.4079	0.5286324
13 G	0.2889	1	4.2001	0.0506357 .
H	0.0281	1	0.4079	0.5286324
15 A:B	0.0008	1	0.0110	0.9172963
A:C	0.0000	1	0.0001	0.9924673
17 A:D	0.2048	1	2.9768	0.0963375 .
A:E	0.2730	1	3.9690	0.0569442 .
19 A:F	0.0248	1	0.3606	0.5533535
A:G	0.1106	1	1.6073	0.2161124
21 A:H	0.0127	1	0.1840	0.6714939
B:C	0.0105	1	0.1527	0.6991145
23 B:D	0.1958	1	2.8466	0.1035285
B:E	0.0018	1	0.0263	0.8725214
25 B:F	0.0638	1	0.9269	0.3445415
B:G	0.0138	1	0.2007	0.6578548
27 B:H	0.0018	1	0.0263	0.8725214
C:D	0.0023	1	0.0328	0.8576844
29 C:E	0.1073	1	1.5593	0.2228955
C:F	0.0138	1	0.2007	0.6578548
31 C:G	0.0000	1	0.0001	0.9924673
C:H	0.0003	1	0.0045	0.9473108
33 D:E	0.0116	1	0.1680	0.6852485
D:F	0.0333	1	0.4842	0.4926964
35 D:G	0.0077	1	0.1113	0.7413370
D:H	0.0176	1	0.2552	0.6176699
37 E:F	0.0000	1	0.0001	0.9924673
E:G	0.0105	1	0.1527	0.6991145
39 E:H	0.0333	1	0.4842	0.4926964
F:G	0.0002	1	0.0023	0.9623507
41 F:H	0.0028	1	0.0401	0.8429004
G:H	0.1008	1	1.4655	0.2369435
43 Residuals	1.7884	26		
45 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				

G.4 Zielgröße Zykluszeit \bar{z}

1 Anova Table (Type II tests)					
3 Response: z_mean					
	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
5 Blocks	0.001	1	8.3268e+00	0.007755	**
7 A	0.000	1	2.7190e+00	0.111195	
B	0.001	1	4.2484e+00	0.049421	*
9 C	256.000	1	1.7401e+06	< 2.2e-16	***
D	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
11 E	255.201	1	1.7347e+06	< 2.2e-16	***
F	0.123	1	8.3268e+02	< 2.2e-16	***
13 G	0.168	1	1.1426e+03	< 2.2e-16	***
H	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
15 A:B	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
A:C	0.000	1	6.7970e-01	0.417177	
17 A:D	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
A:E	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
19 A:F	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
A:G	0.001	1	6.1176e+00	0.020238	*
21 A:H	0.000	1	6.7970e-01	0.417177	
B:C	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
23 B:D	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
B:E	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
25 B:F	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
B:G	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
27 B:H	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
C:D	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
29 C:E	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
C:F	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
31 C:G	0.000	1	6.7970e-01	0.417177	
C:H	0.000	1	6.7970e-01	0.417177	
33 D:E	0.000	1	6.7970e-01	0.417177	
D:F	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
35 D:G	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
D:H	0.000	1	1.5294e+00	0.227256	
37 E:F	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
E:G	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
39 E:H	0.000	1	1.6990e-01	0.683549	
F:G	0.001	1	6.1176e+00	0.020238	*
41 F:H	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
G:H	0.000	1	0.0000e+00	1.000000	
43 Residuals	0.004	26			
45 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

H Modellkoeffizienten Modell 2. Ordnung (R-Output)

H.1 Zielgröße Gewicht \bar{g}

```

1 lm.default(formula = g_mean ~ Block.ccd + (A + B + C + D + E +
3   F + G + H)^2 + I(A^2) + I(B^2) + I(C^2) + I(D^2) + I(E^2) +
   I(F^2) + I(G^2) + I(H^2), data = ccd_4.withresp)
5 Residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -1.191e-03 -2.896e-04 -4.506e-05  3.437e-04  1.605e-03
9 Coefficients:
   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
11 (Intercept)  2.280e-01  3.019e-01  0.755 0.455173
13 Block.ccd [T.2]  6.545e-04  2.020e-04  3.240 0.002620 **
15 Block.ccd [T.3]  1.544e-03  3.729e-04  4.141 0.000207 ***
17 A          -1.326e-03  1.583e-03  -0.838 0.407660
19 B           5.818e-03  1.583e-03  3.676 0.000788 ***
21 C           5.753e-03  2.581e-03  2.229 0.032348 *
23 D           1.355e-03  1.084e-03  1.250 0.219522
25 E          -1.046e-03  2.848e-03  -0.367 0.715611
27 F          -6.541e-03  5.761e-03  -1.135 0.263932
29 G           3.130e-04  5.333e-04  0.587 0.560947
31 H          -4.591e-04  5.204e-04  -0.882 0.383639
33 I(A^2)       4.504e-06  3.151e-06  1.430 0.161707
35 I(B^2)      -1.131e-05  3.151e-06  -3.590 0.001002 **
37 I(C^2)       3.018e-05  3.860e-05  0.782 0.439569
39 I(D^2)      -7.172e-06  6.175e-06  -1.161 0.253353
41 I(E^2)      -7.324e-06  3.860e-05  -0.190 0.850589
43 I(F^2)       7.070e-05  1.544e-04  0.458 0.649806
45 I(G^2)       9.570e-07  1.544e-06  0.620 0.539338
47 I(H^2)       1.957e-06  1.544e-06  1.268 0.213297
49 A:B         -2.997e-06  2.093e-06  -1.432 0.161019
51 A:C         -1.138e-05  7.326e-06  -1.554 0.129216
53 A:D          3.482e-06  2.931e-06  1.188 0.242739
55 A:E         -6.027e-06  7.326e-06  -0.823 0.416289
57 A:F          7.589e-06  1.465e-05  0.518 0.607751
   A:G         -2.098e-06  1.465e-06  -1.432 0.161019
   A:H         -4.464e-08  1.465e-06  -0.030 0.975867
   B:C         -6.027e-06  7.326e-06  -0.823 0.416289
   B:D         -4.018e-06  2.931e-06  -1.371 0.179088
   B:E          1.362e-05  7.326e-06  1.859 0.071520
   B:F          1.652e-05  1.465e-05  1.127 0.267282
   B:G          4.018e-07  1.465e-06  0.274 0.785535
   B:H          1.027e-06  1.465e-06  0.701 0.488087
   C:D         -6.563e-06  1.026e-05  -0.640 0.526454
   C:E         -2.422e-05  2.564e-05  -0.944 0.351389
   C:F         -6.094e-05  5.128e-05  -1.188 0.242739
   C:G         -8.594e-06  5.128e-06  -1.676 0.102705
   C:H         -8.906e-06  5.128e-06  -1.737 0.091242
   D:E         -6.563e-06  1.026e-05  -0.640 0.526454
   D:F         -1.563e-05  2.051e-05  -0.762 0.451345
   D:G         -2.312e-06  2.051e-06  -1.127 0.267282
   D:H         -9.375e-07  2.051e-06  -0.457 0.650483
   E:F          1.406e-05  5.128e-05  0.274 0.785535
   E:G          5.156e-06  5.128e-06  1.005 0.321588
   E:H          4.844e-06  5.128e-06  0.944 0.351389
   F:G         -9.375e-07  1.026e-05  -0.091 0.927693
   F:H          4.687e-06  1.026e-05  0.457 0.650483
   G:H          8.437e-07  1.026e-06  0.823 0.416289
59 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
61 Residual standard error: 0.0008205 on 35 degrees of freedom
63 Multiple R-squared:  0.9536, Adjusted R-squared:  0.8927
   F-statistic: 15.65 on 46 and 35 DF, p-value: 1.302e-13

```

H.2 Zielgröße Energieverbrauch \bar{e}

```

1 lm.default(formula = e_mean ~ Block.ccd + (A + B + C + D + E +
3   F + G + H)^2 + I(A^2) + I(B^2) + I(C^2) + I(D^2) + I(E^2) +
   I(F^2) + I(G^2) + I(H^2), data = ccd_4.withresp)

5 Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.300368 -0.042623 -0.001495  0.040058  0.300368

9 Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
11 (Intercept)   3.163e+01  5.321e+01  0.594  0.556068
   Block.ccd [T.2]  9.150e-03  3.560e-02  0.257  0.798639
13 Block.ccd [T.3]  2.090e-02  6.572e-02  0.318  0.752302
   A             -1.881e-01  2.789e-01 -0.675  0.504383
15 B             -1.155e-02  2.789e-01 -0.041  0.967209
   C             -7.391e-02  4.549e-01 -0.162  0.871859
17 D              5.401e-02  1.910e-01  0.283  0.779021
   E            -8.975e-01  5.019e-01 -1.788  0.082381
19 F            -5.078e-02  1.015e+00 -0.050  0.960387
   G            -6.681e-03  9.397e-02 -0.071  0.943725
21 H              3.406e-02  9.170e-02  0.371  0.712592
   I(A^2)         4.292e-04  5.552e-04  0.773  0.444635
23 I(B^2)        -1.019e-05  5.552e-04 -0.018  0.985461
   I(C^2)         1.521e-02  6.801e-03  2.236  0.031804 *
25 I(D^2)        -4.197e-04  1.088e-03 -0.386  0.702069
   I(E^2)         1.815e-02  6.801e-03  2.669  0.011456 *
27 I(F^2)         6.870e-03  2.721e-02  0.253  0.802125
   I(G^2)         1.979e-05  2.721e-04  0.073  0.942430
29 I(H^2)        -8.416e-04  2.721e-04 -3.093  0.003874 **
   A:B           -3.774e-05  3.689e-04 -0.102  0.919086
31 A:C              7.468e-04  1.291e-03  0.579  0.566628
   A:D              1.783e-04  5.164e-04  0.345  0.731997
33 A:E              1.273e-03  1.291e-03  0.986  0.330789
   A:F           -1.604e-03  2.582e-03 -0.621  0.538549
35 A:G           -1.231e-04  2.582e-04 -0.477  0.636632
   A:H              3.296e-05  2.582e-04  0.128  0.899151
37 B:C              3.095e-04  1.291e-03  0.240  0.811948
   B:D           -2.078e-04  5.164e-04 -0.402  0.689860
39 B:E              8.480e-04  1.291e-03  0.657  0.515577
   B:F              1.566e-03  2.582e-03  0.607  0.548038
41 B:G              9.051e-05  2.582e-04  0.351  0.728037
   B:H              5.338e-05  2.582e-04  0.207  0.837423
43 C:D              8.916e-04  1.807e-03  0.493  0.624874
   C:E           -2.699e-03  4.519e-03 -0.597  0.554154
45 C:F              4.222e-03  9.037e-03  0.467  0.643249
   C:G              4.635e-04  9.037e-04  0.513  0.611269
47 C:H              5.449e-04  9.037e-04  0.603  0.550384
   D:E           -1.531e-04  1.807e-03 -0.085  0.932984
49 D:F           -1.404e-03  3.615e-03 -0.388  0.700091
   D:G           -1.129e-04  3.615e-04 -0.312  0.756544
51 D:H           -2.379e-04  3.615e-04 -0.658  0.514790
   E:F           -5.883e-03  9.037e-03 -0.651  0.519278
53 E:G              4.983e-04  9.037e-04  0.551  0.584847
   E:H              3.442e-03  9.037e-04  3.809  0.000541 ***
55 F:G              5.403e-04  1.807e-03  0.299  0.766779
   F:H              8.566e-04  1.807e-03  0.474  0.638471
57 G:H              9.039e-05  1.807e-04  0.500  0.620119

---
59 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

61 Residual standard error: 0.1446 on 35 degrees of freedom
   Multiple R-squared:  0.9924, Adjusted R-squared:  0.9825
63 F-statistic: 99.79 on 46 and 35 DF, p-value: < 2.2e-16

```

H.3 Zielgröße Entformung \overline{ent}

```

1 lm.default(formula = ent_mean ~ Block.ccd + (A + B + C + D +
2   E + F + G + H)^2 + I(A^2) + I(B^2) + I(C^2) + I(D^2) + I(E^2) +
3   I(F^2) + I(G^2) + I(H^2), data = ccd_4.withresp)
4
5 Residuals
6   Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.40558 -0.12795  0.01104  0.13345  0.38944
8
9 Coefficients
10              Estimate Std. Error t value Pr(t)
11 (Intercept)  -1.098e+01  9.670e+01  -0.114  0.91028
12 Block.ccd [T.2]  9.697e-03  6.469e-02   0.150  0.88171
13 Block.ccd [T.3]  3.294e-01  1.194e-01   2.758  0.00919
14 A              7.528e-02  5.068e-01   0.149  0.88278
15 B              1.587e-01  5.068e-01   0.313  0.75602
16 C             -5.229e-01  8.267e-01  -0.632  0.53120
17 D              9.894e-02  3.471e-01   0.285  0.77731
18 E              8.386e-01  9.121e-01   0.919  0.36418
19 F             -3.676e+00  1.845e+00  -1.992  0.05419
20 G             -3.271e-01  1.708e-01  -1.915  0.06363
21 H             -1.294e-01  1.667e-01  -0.776  0.44278
22 I(A^2)         2.790e-05  1.009e-03   0.028  0.97810
23 I(B^2)        -4.823e-04  1.009e-03  -0.478  0.63564
24 I(C^2)        -3.408e-03  1.236e-02  -0.276  0.78438
25 I(D^2)        -4.453e-04  1.978e-03  -0.225  0.82316
26 I(E^2)        -2.158e-03  1.236e-02  -0.175  0.86240
27 I(F^2)         1.139e-01  4.944e-02   2.303  0.02734
28 I(G^2)         1.139e-03  4.944e-04   2.303  0.02734
29 I(H^2)         7.387e-04  4.944e-04   1.494  0.14415
30 AB            -7.015e-05  6.704e-04  -0.105  0.91725
31 AC            -2.232e-05  2.346e-03  -0.010  0.99246
32 AD            -1.616e-03  9.385e-04  -1.722  0.09391
33 AE            -4.665e-03  2.346e-03  -1.988  0.05464
34 AF            2.812e-03  4.693e-03   0.599  0.55281
35 AG            5.937e-04  4.693e-04   1.265  0.21413
36 AH            2.009e-04  4.693e-04   0.428  0.67120
37 BC            9.152e-04  2.346e-03   0.390  0.69887
38 BD            1.580e-03  9.385e-04   1.684  0.10111
39 BE            3.795e-04  2.346e-03   0.162  0.87245
40 BF            4.509e-03  4.693e-03   0.961  0.34322
41 BG            2.098e-04  4.693e-04   0.447  0.65754
42 BH            -7.589e-05  4.693e-04  -0.162  0.87245
43 CD            5.937e-04  3.285e-03   0.181  0.85760
44 CE            1.023e-02  8.212e-03   1.246  0.22095
45 CF            7.344e-03  1.642e-02   0.447  0.65754
46 CG            1.563e-05  1.642e-03   0.010  0.99246
47 CH            -1.094e-04  1.642e-03  -0.067  0.94728
48 DE            1.344e-03  3.285e-03   0.409  0.68498
49 DF            -4.562e-03  6.570e-03  -0.694  0.49197
50 DG            -2.188e-04  6.570e-04  -0.333  0.74115
51 DH            3.313e-04  6.570e-04   0.504  0.61728
52 EF            -1.563e-04  1.642e-02  -0.010  0.99246
53 EG            6.406e-04  1.642e-03   0.390  0.69887
54 EH            1.141e-03  1.642e-03   0.694  0.49197
55 FG            1.563e-04  3.285e-03   0.048  0.96233
56 FH            6.563e-04  3.285e-03   0.200  0.84281
57 GH            3.969e-04  3.285e-04   1.208  0.23507
58
59 Signif. codes  0 ' ' 0.001 ' ' 0.01 ' ' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
60
61 Residual standard error 0.2628 on 35 degrees of freedom
62 Multiple R-squared  0.8484, Adjusted R-squared  0.6491
63 F-statistic 4.257 on 46 and 35 DF, p-value 1.193e-05

```

H.4 Zielgröße Zykluszeit \bar{z}

```

1 lm.default(formula = z_mean ~ Block.ccd + (A + B + C + D + E +
3   F + G + H)^2 + I(A^2) + I(B^2) + I(C^2) + I(D^2) + I(E^2) +
   I(F^2) + I(G^2) + I(H^2), data = ccd_4.withresp)

5 Residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
7 -0.49778 -0.01483  0.00014  0.01205  0.49778

9 Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
11 (Intercept)  -7.104e+01  6.098e+01  -1.165  0.25193
   Block.ccd [T.2] -8.485e-03  4.080e-02  -0.208  0.83646
13 Block.ccd [T.3]  1.220e-01  7.532e-02   1.620  0.11424
   A              3.326e-01  3.196e-01   1.040  0.30528
15 B              3.289e-01  3.196e-01   1.029  0.31048
   C              8.260e-01  5.214e-01   1.584  0.12211
17 D              8.948e-02  2.189e-01   0.409  0.68523
   E              2.098e-01  5.752e-01   0.365  0.71755
19 F              5.799e-01  1.164e+00   0.498  0.62129
   G              3.654e-02  1.077e-01   0.339  0.73645
21 H              1.071e-02  1.051e-01   0.102  0.91942
   I(A^2)         -6.952e-04  6.364e-04  -1.092  0.28212
23 I(B^2)         -6.952e-04  6.364e-04  -1.092  0.28212
   I(C^2)         2.711e-02  7.795e-03   3.478  0.00137 **
25 I(D^2)        -1.263e-03  1.247e-03  -1.012  0.31838
   I(E^2)         2.211e-02  7.795e-03   2.836  0.00754 **
27 I(F^2)        -3.906e-02  3.118e-02  -1.253  0.21860
   I(G^2)        -2.906e-04  3.118e-04  -0.932  0.35770
29 I(H^2)        -3.156e-04  3.118e-04  -1.012  0.31838
   A:B           -1.276e-05  4.228e-04  -0.030  0.97610
31 A:C           -8.929e-05  1.480e-03  -0.060  0.95223
   A:D           -5.357e-05  5.919e-04  -0.091  0.92840
33 A:E           1.339e-04  1.480e-03   0.091  0.92840
   A:F           4.481e-15  2.959e-03   0.000  1.00000
35 A:G           -5.357e-05  2.959e-04  -0.181  0.85740
   A:H           1.786e-05  2.959e-04   0.060  0.95223
37 B:C           -1.339e-04  1.480e-03  -0.091  0.92840
   B:D           9.281e-16  5.919e-04   0.000  1.00000
39 B:E           -2.319e-15  1.480e-03   0.000  1.00000
   B:F           2.679e-04  2.959e-03   0.091  0.92840
41 B:G           -8.929e-06  2.959e-04  -0.030  0.97610
   B:H           8.929e-06  2.959e-04   0.030  0.97610
43 C:D           -6.250e-05  2.072e-03  -0.030  0.97610
   C:E           -1.562e-04  5.179e-03  -0.030  0.97610
45 C:F           -1.652e-14  1.036e-02   0.000  1.00000
   C:G           -6.250e-05  1.036e-03  -0.060  0.95223
47 C:H           6.250e-05  1.036e-03   0.060  0.95223
   D:E           -1.250e-04  2.072e-03  -0.060  0.95223
49 D:F           1.250e-04  4.143e-03   0.030  0.97610
   D:G           -1.250e-05  4.143e-04  -0.030  0.97610
51 D:H           3.750e-05  4.143e-04   0.091  0.92840
   E:F           -3.125e-04  1.036e-02  -0.030  0.97610
53 E:G           -3.125e-05  1.036e-03  -0.030  0.97610
   E:H           3.125e-05  1.036e-03   0.030  0.97610
55 F:G           3.750e-04  2.072e-03   0.181  0.85740
   F:H           -3.129e-15  2.072e-03   0.000  1.00000
57 G:H           3.278e-16  2.072e-04   0.000  1.00000

---
59 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

61 Residual standard error: 0.1657 on 35 degrees of freedom
   Multiple R-squared:  0.9983, Adjusted R-squared:  0.996
63 F-statistic: 443.3 on 46 and 35 DF, p-value: < 2.2e-16

```

I ANOVA-Tabellen Modell 2. Ordnung (R-Output)

I.1 Zielgröße Gewicht \bar{g}

```

1 Analysis of Variance Table
3 Response: g_mean
5      Df      Sum Sq    Mean Sq  F value    Pr(>F)
7 Block.ccd  2 2.7033e-05  1.3516e-05  20.0753  1.557e-06 ***
9 A          1 4.0500e-07  4.0500e-07   0.6015  0.4432050
11 B         1 1.1681e-05  1.1681e-05  17.3486  0.0001931 ***
13 C         1 2.9400e-07  2.9400e-07   0.4365  0.5131423
15 D         1 2.5463e-04  2.5463e-04 378.1859 < 2.2e-16 ***
17 E         1 1.5429e-04  1.5429e-04 229.1655 < 2.2e-16 ***
19 F         1 1.2500e-07  1.2500e-07   0.1857  0.6691985
21 G         1 6.0500e-07  6.0500e-07   0.8986  0.3496627
23 H         1 3.4700e-07  3.4700e-07   0.5157  0.4774428
25 I(A^2)     1 1.7240e-06  1.7240e-06   2.5609  0.1185253
27 I(B^2)     1 9.8370e-06  9.8370e-06  14.6103  0.0005202 ***
29 I(C^2)     1 3.4900e-07  3.4900e-07   0.5177  0.4766073
31 I(D^2)     1 1.2760e-06  1.2760e-06   1.8951  0.1773695
33 I(E^2)     1 1.1900e-07  1.1900e-07   0.1761  0.6773491
35 I(F^2)     1 4.7000e-08  4.7000e-08   0.0692  0.7939774
37 I(G^2)     1 1.5200e-07  1.5200e-07   0.2252  0.6380521
39 I(H^2)     1 1.0820e-06  1.0820e-06   1.6069  0.2132975
41 A:B        1 1.3810e-06  1.3810e-06   2.0506  0.1610191
43 A:C        1 1.6260e-06  1.6260e-06   2.4145  0.1292160
45 A:D        1 9.5100e-07  9.5100e-07   1.4119  0.2427388
47 A:E        1 4.5600e-07  4.5600e-07   0.6767  0.4162886
49 A:F        1 1.8100e-07  1.8100e-07   0.2683  0.6077509
51 A:G        1 1.3810e-06  1.3810e-06   2.0506  0.1610191
53 A:H        1 1.0000e-09  1.0000e-09   0.0009  0.9758671
    B:C        1 4.5600e-07  4.5600e-07   0.6767  0.4162886
    B:D        1 1.2660e-06  1.2660e-06   1.8798  0.1790878
    B:E        1 2.3260e-06  2.3260e-06   3.4541  0.0715197
    B:F        1 8.5600e-07  8.5600e-07   1.2708  0.2672823
    B:G        1 5.1000e-08  5.1000e-08   0.0752  0.7855355
    B:H        1 3.3100e-07  3.3100e-07   0.4911  0.4880869
    C:D        1 2.7600e-07  2.7600e-07   0.4094  0.5264543
    C:E        1 6.0100e-07  6.0100e-07   0.8921  0.3513891
    C:F        1 9.5100e-07  9.5100e-07   1.4119  0.2427388
    C:G        1 1.8910e-06  1.8910e-06   2.8081  0.1027045
    C:H        1 2.0310e-06  2.0310e-06   3.0160  0.0912425
    D:E        1 2.7600e-07  2.7600e-07   0.4094  0.5264543
    D:F        1 3.9100e-07  3.9100e-07   0.5802  0.4513452
    D:G        1 8.5600e-07  8.5600e-07   1.2708  0.2672823
    D:H        1 1.4100e-07  1.4100e-07   0.2089  0.6504835
    E:F        1 5.1000e-08  5.1000e-08   0.0752  0.7855355
    E:G        1 6.8100e-07  6.8100e-07   1.0109  0.3215881
    E:H        1 6.0100e-07  6.0100e-07   0.8921  0.3513891
    F:G        1 6.0000e-09  6.0000e-09   0.0084  0.9276933
    F:H        1 1.4100e-07  1.4100e-07   0.2089  0.6504835
    G:H        1 4.5600e-07  4.5600e-07   0.6767  0.4162886
51 Residuals 35 2.3565e-05  6.7300e-07
53 Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

I.2 Zielgröße Energieverbrauch \bar{e}

1 Analysis of Variance Table						
3 Response: e_mean						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
5 Block.ccd	2	0.005	0.002	0.1089	0.8971198	
7 A	1	0.899	0.899	42.9801	1.441e-07	***
B	1	0.068	0.068	3.2360	0.0806625	.
9 C	1	36.387	36.387	1740.4264	< 2.2e-16	***
D	1	0.012	0.012	0.5799	0.4514607	
11 E	1	22.599	22.599	1080.9437	< 2.2e-16	***
F	1	0.005	0.005	0.2497	0.6204064	
13 G	1	0.033	0.033	1.5610	0.2198056	
H	1	35.000	35.000	1674.0527	< 2.2e-16	***
15 I(A ²)	1	0.009	0.009	0.4531	0.5052751	
I(B ²)	1	0.000	0.000	0.0230	0.8802169	
17 I(C ²)	1	0.114	0.114	5.4298	0.0256875	*
I(D ²)	1	0.003	0.003	0.1482	0.7025846	
19 I(E ²)	1	0.186	0.186	8.8927	0.0051850	**
I(F ²)	1	0.007	0.007	0.3325	0.5678730	
21 I(G ²)	1	0.004	0.004	0.1922	0.6637586	
I(H ²)	1	0.200	0.200	9.5697	0.0038736	**
23 A:B	1	0.000	0.000	0.0105	0.9190859	
A:C	1	0.007	0.007	0.3347	0.5666277	
25 A:D	1	0.002	0.002	0.1192	0.7319969	
A:E	1	0.020	0.020	0.9727	0.3307889	
27 A:F	1	0.008	0.008	0.3858	0.5385494	
A:G	1	0.005	0.005	0.2271	0.6366322	
29 A:H	1	0.000	0.000	0.0163	0.8991510	
B:C	1	0.001	0.001	0.0575	0.8119476	
31 B:D	1	0.003	0.003	0.1619	0.6898595	
B:E	1	0.009	0.009	0.4314	0.5155772	
33 B:F	1	0.008	0.008	0.3680	0.5480377	
B:G	1	0.003	0.003	0.1229	0.7280373	
35 B:H	1	0.001	0.001	0.0427	0.8374229	
C:D	1	0.005	0.005	0.2434	0.6248735	
37 C:E	1	0.007	0.007	0.3568	0.5541537	
C:F	1	0.005	0.005	0.2183	0.6432487	
39 C:G	1	0.005	0.005	0.2630	0.6112690	
C:H	1	0.008	0.008	0.3636	0.5503843	
41 D:E	1	0.000	0.000	0.0072	0.9329840	
D:F	1	0.003	0.003	0.1508	0.7000905	
43 D:G	1	0.002	0.002	0.0976	0.7565436	
D:H	1	0.009	0.009	0.4331	0.5147897	
45 E:F	1	0.009	0.009	0.4238	0.5192775	
E:G	1	0.006	0.006	0.3041	0.5848467	
47 E:H	1	0.303	0.303	14.5062	0.0005409	***
F:G	1	0.002	0.002	0.0893	0.7667787	
49 F:H	1	0.005	0.005	0.2246	0.6384710	
G:H	1	0.005	0.005	0.2501	0.6201187	
51 Residuals	35	0.732	0.021			
53 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

I.3 Zielgröße Entformung \overline{ent}

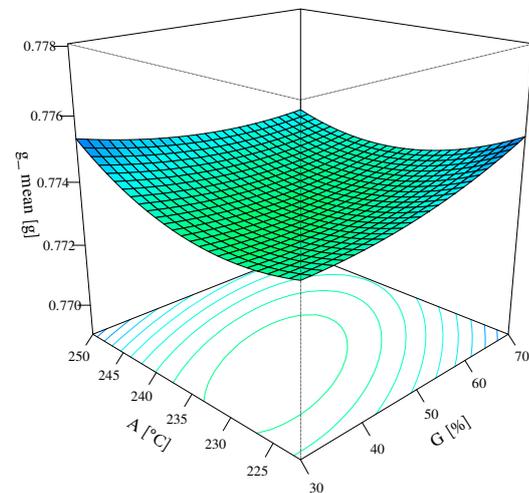
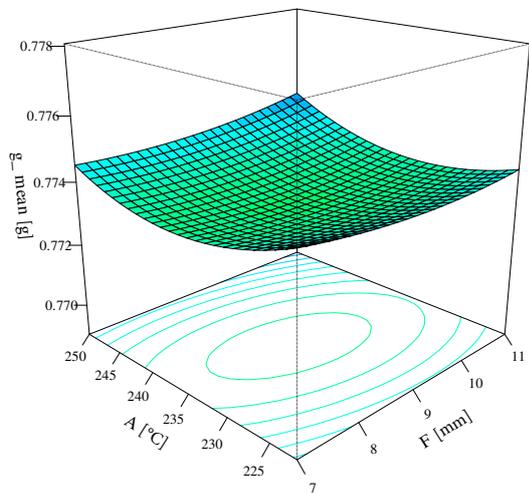
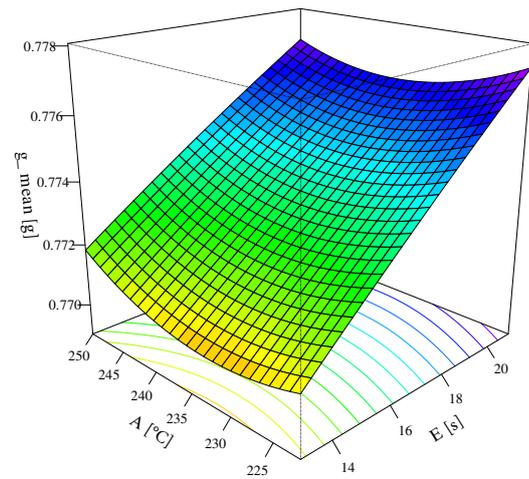
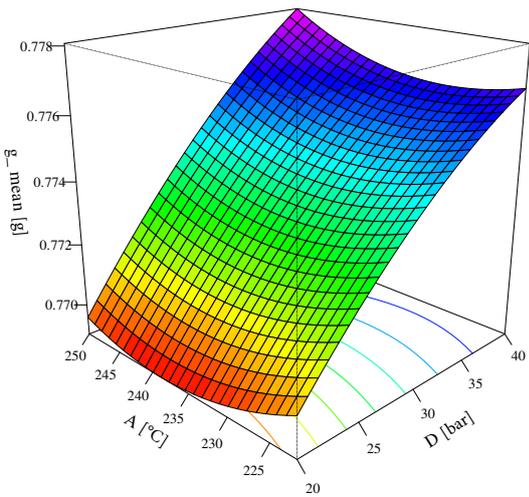
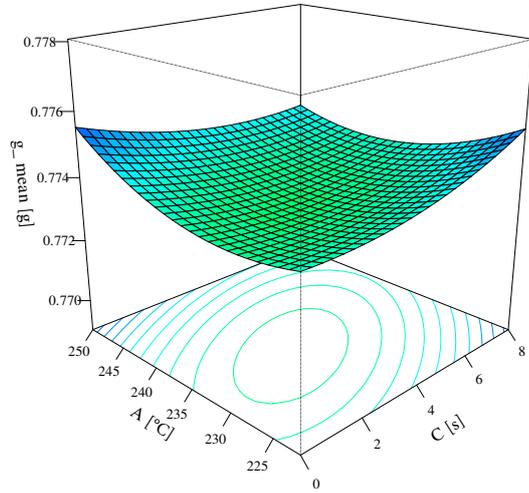
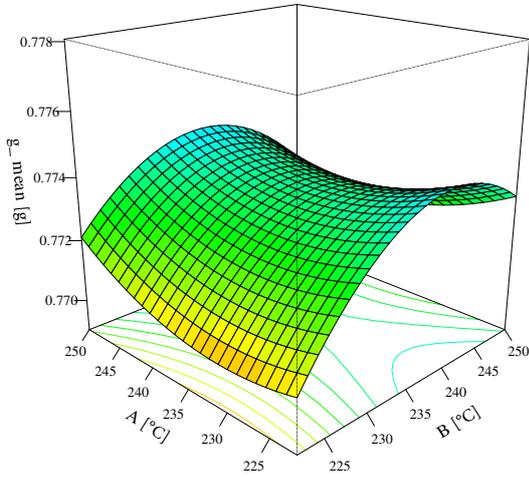
1 Analysis of Variance Table					
3 Response: ent_mean					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
5 Block.ccd	2	0.5642	0.2821	4.0847	0.02545 *
7 A	1	0.0896	0.0896	1.2975	0.26240
B	1	1.5312	1.5312	22.1734	3.853e-05 ***
9 C	1	2.0335	2.0335	29.4459	4.407e-06 ***
D	1	3.9668	3.9668	57.4417	6.946e-09 ***
11 E	1	2.8880	2.8880	41.8200	1.883e-07 ***
F	1	0.0265	0.0265	0.3830	0.54000
13 G	1	0.2521	0.2521	3.6498	0.06430 .
H	1	0.0060	0.0060	0.0876	0.76899
15 I(A ²)	1	0.0072	0.0072	0.1037	0.74935
I(B ²)	1	0.0563	0.0563	0.8148	0.37286
17 I(C ²)	1	0.0387	0.0387	0.5601	0.45923
I(D ²)	1	0.0393	0.0393	0.5694	0.45554
19 I(E ²)	1	0.0406	0.0406	0.5880	0.44832
I(F ²)	1	0.2568	0.2568	3.7187	0.06195 .
21 I(G ²)	1	0.3170	0.3170	4.5907	0.03918 *
I(H ²)	1	0.1541	0.1541	2.2319	0.14415
23 A:B	1	0.0008	0.0008	0.0110	0.91725
A:C	1	0.0000	0.0000	0.0001	0.99246
25 A:D	1	0.2048	0.2048	2.9650	0.09391 .
A:E	1	0.2730	0.2730	3.9533	0.05464 .
27 A:F	1	0.0248	0.0248	0.3592	0.55281
A:G	1	0.1106	0.1106	1.6009	0.21413
29 A:H	1	0.0127	0.0127	0.1833	0.67120
B:C	1	0.0105	0.0105	0.1521	0.69887
31 B:D	1	0.1958	0.1958	2.8354	0.10111
B:E	1	0.0018	0.0018	0.0262	0.87245
33 B:F	1	0.0638	0.0638	0.9232	0.34322
B:G	1	0.0138	0.0138	0.1999	0.65754
35 B:H	1	0.0018	0.0018	0.0262	0.87245
C:D	1	0.0023	0.0023	0.0327	0.85760
37 C:E	1	0.1073	0.1073	1.5531	0.22095
C:F	1	0.0138	0.0138	0.1999	0.65754
39 C:G	1	0.0000	0.0000	0.0001	0.99246
C:H	1	0.0003	0.0003	0.0044	0.94728
41 D:E	1	0.0116	0.0116	0.1673	0.68498
D:F	1	0.0333	0.0333	0.4823	0.49197
43 D:G	1	0.0077	0.0077	0.1109	0.74115
D:H	1	0.0176	0.0176	0.2542	0.61728
45 E:F	1	0.0000	0.0000	0.0001	0.99246
E:G	1	0.0105	0.0105	0.1521	0.69887
47 E:H	1	0.0333	0.0333	0.4823	0.49197
F:G	1	0.0002	0.0002	0.0023	0.96233
49 F:H	1	0.0028	0.0028	0.0399	0.84281
G:H	1	0.1008	0.1008	1.4597	0.23507
51 Residuals	35	2.4170	0.0691		
53 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

I.4 Zielgröße Zykluszeit \bar{z}

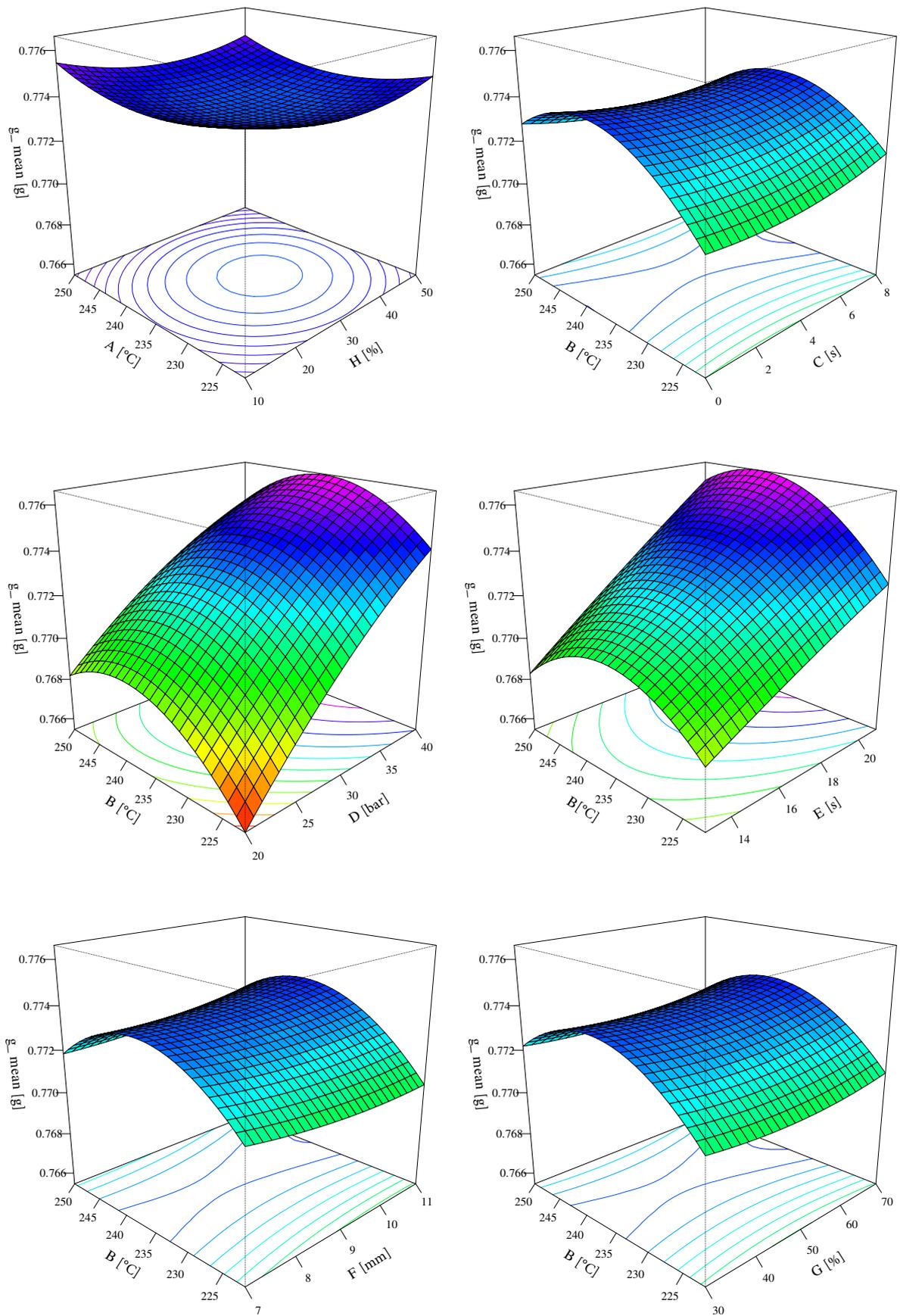
1 Analysis of Variance Table						
3 Response: z_mean						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
5 Block.ccd	2	0.210	0.105	3.8282	0.0313661	*
7 A	1	0.001	0.001	0.0202	0.8877194	
B	1	0.001	0.001	0.0291	0.8654679	
9 C	1	279.110	279.110	10162.1903	< 2.2e-16	***
D	1	0.000	0.000	0.0073	0.9324823	
11 E	1	279.582	279.582	10179.4022	< 2.2e-16	***
F	1	0.132	0.132	4.7971	0.0352595	*
13 G	1	0.184	0.184	6.7001	0.0139474	*
H	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
15 I(A ²)	1	0.039	0.039	1.4312	0.2396064	
I(B ²)	1	0.045	0.045	1.6428	0.2083683	
17 I(C ²)	1	0.371	0.371	13.4996	0.0007921	***
I(D ²)	1	0.028	0.028	1.0030	0.3234575	
19 I(E ²)	1	0.280	0.280	10.1993	0.0029690	**
I(F ²)	1	0.031	0.031	1.1276	0.2955706	
21 I(G ²)	1	0.018	0.018	0.6708	0.4183194	
I(H ²)	1	0.028	0.028	1.0246	0.3183811	
23 A:B	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
A:C	1	0.000	0.000	0.0036	0.9522280	
25 A:D	1	0.000	0.000	0.0082	0.9283978	
A:E	1	0.000	0.000	0.0082	0.9283978	
27 A:F	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
A:G	1	0.001	0.001	0.0328	0.8573958	
29 A:H	1	0.000	0.000	0.0036	0.9522280	
B:C	1	0.000	0.000	0.0082	0.9283978	
31 B:D	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
B:E	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
33 B:F	1	0.000	0.000	0.0082	0.9283978	
B:G	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
35 B:H	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
C:D	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
37 C:E	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
C:F	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
39 C:G	1	0.000	0.000	0.0036	0.9522280	
C:H	1	0.000	0.000	0.0036	0.9522280	
41 D:E	1	0.000	0.000	0.0036	0.9522280	
D:F	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
43 D:G	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
D:H	1	0.000	0.000	0.0082	0.9283978	
45 E:F	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
E:G	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
47 E:H	1	0.000	0.000	0.0009	0.9761028	
F:G	1	0.001	0.001	0.0328	0.8573958	
49 F:H	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
G:H	1	0.000	0.000	0.0000	1.0000000	
51 Residuals	35	0.961	0.027			
53 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

J RSM-Plots

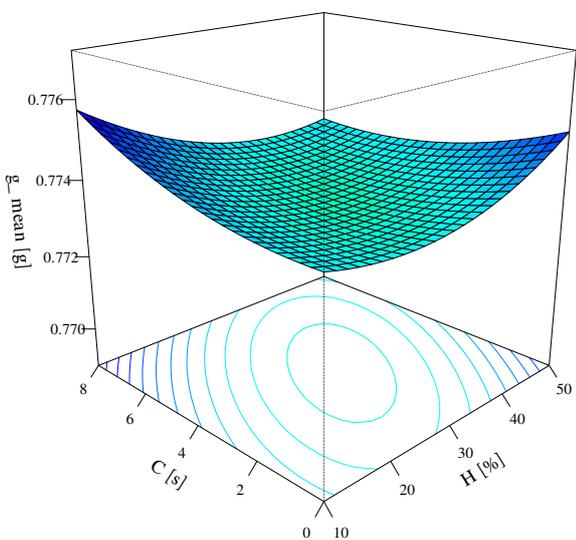
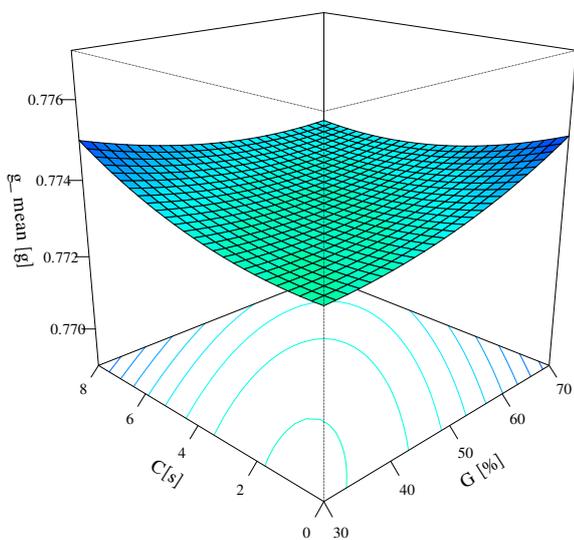
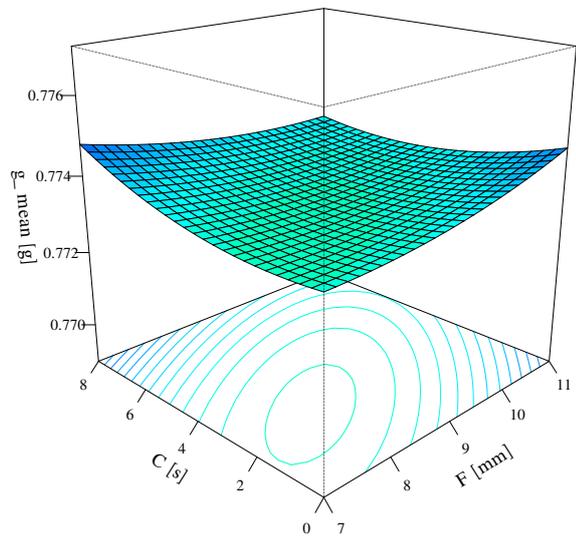
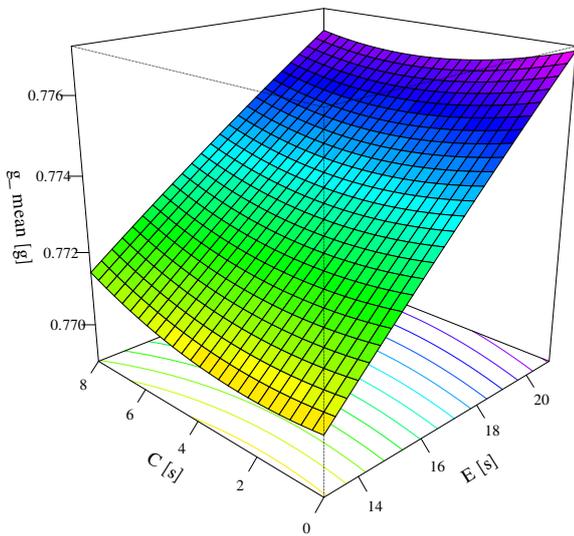
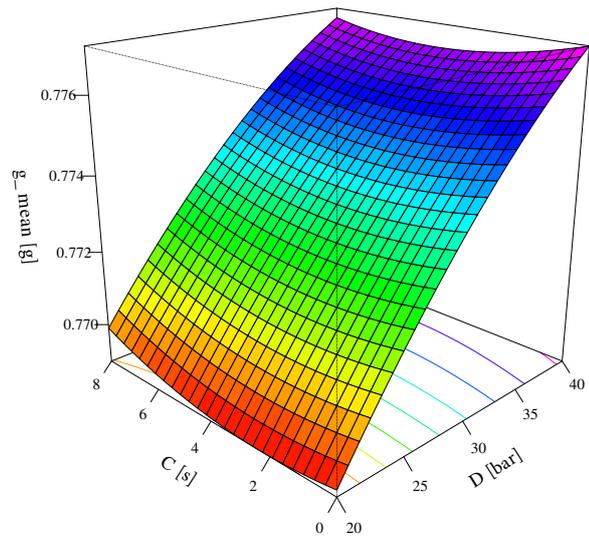
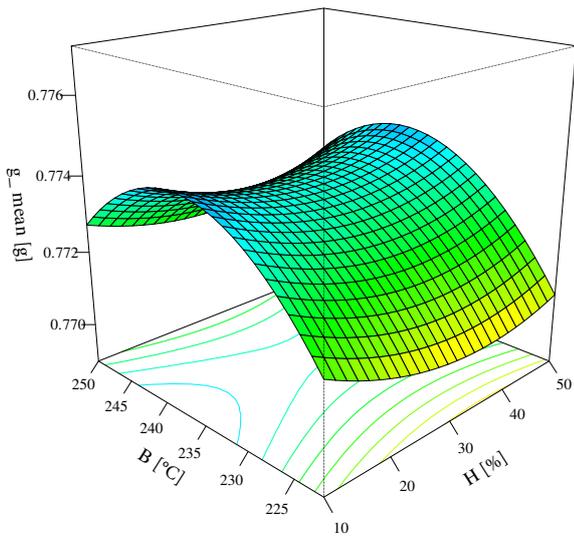
J.1 Zielgröße Gewicht \bar{g}



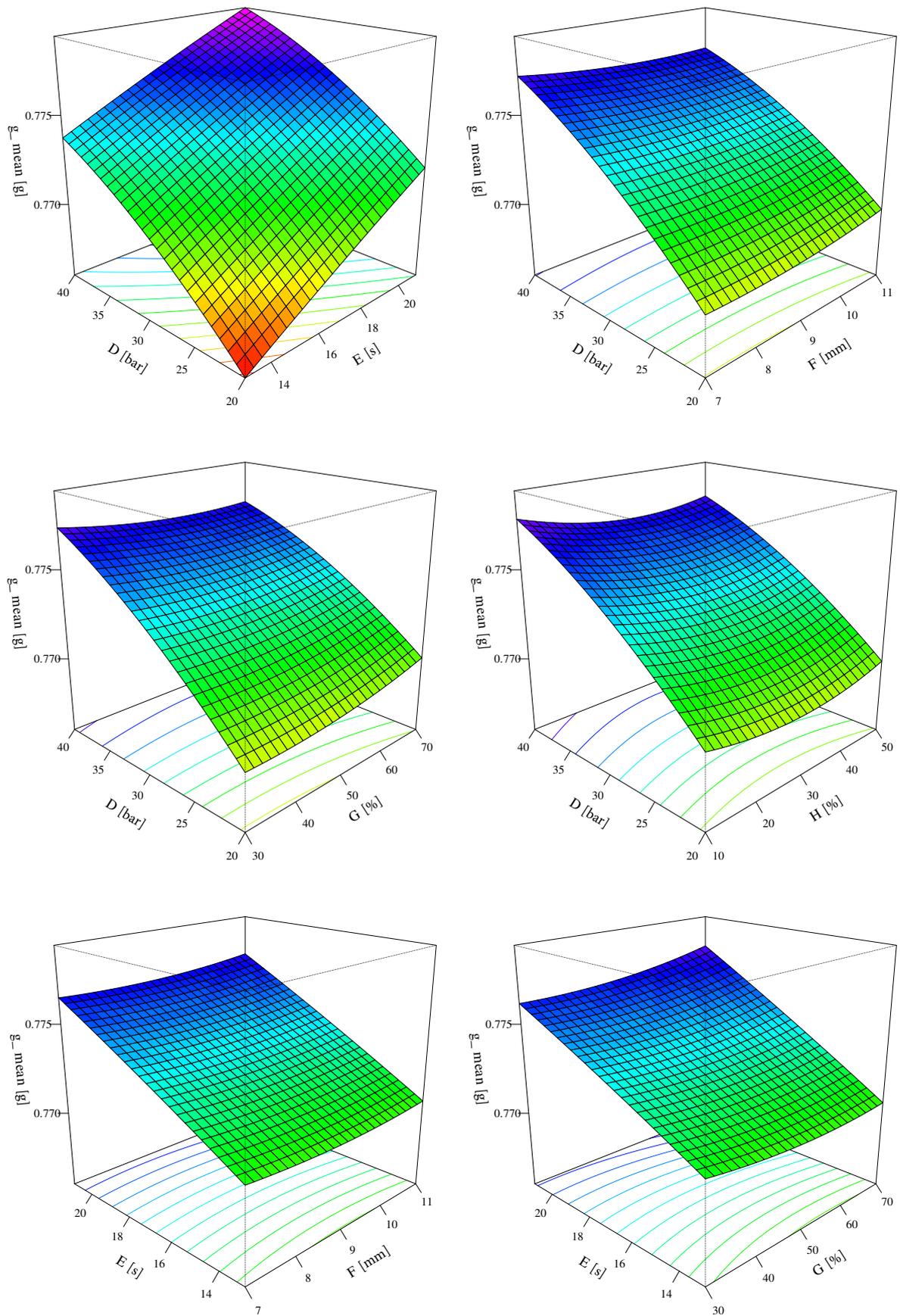
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



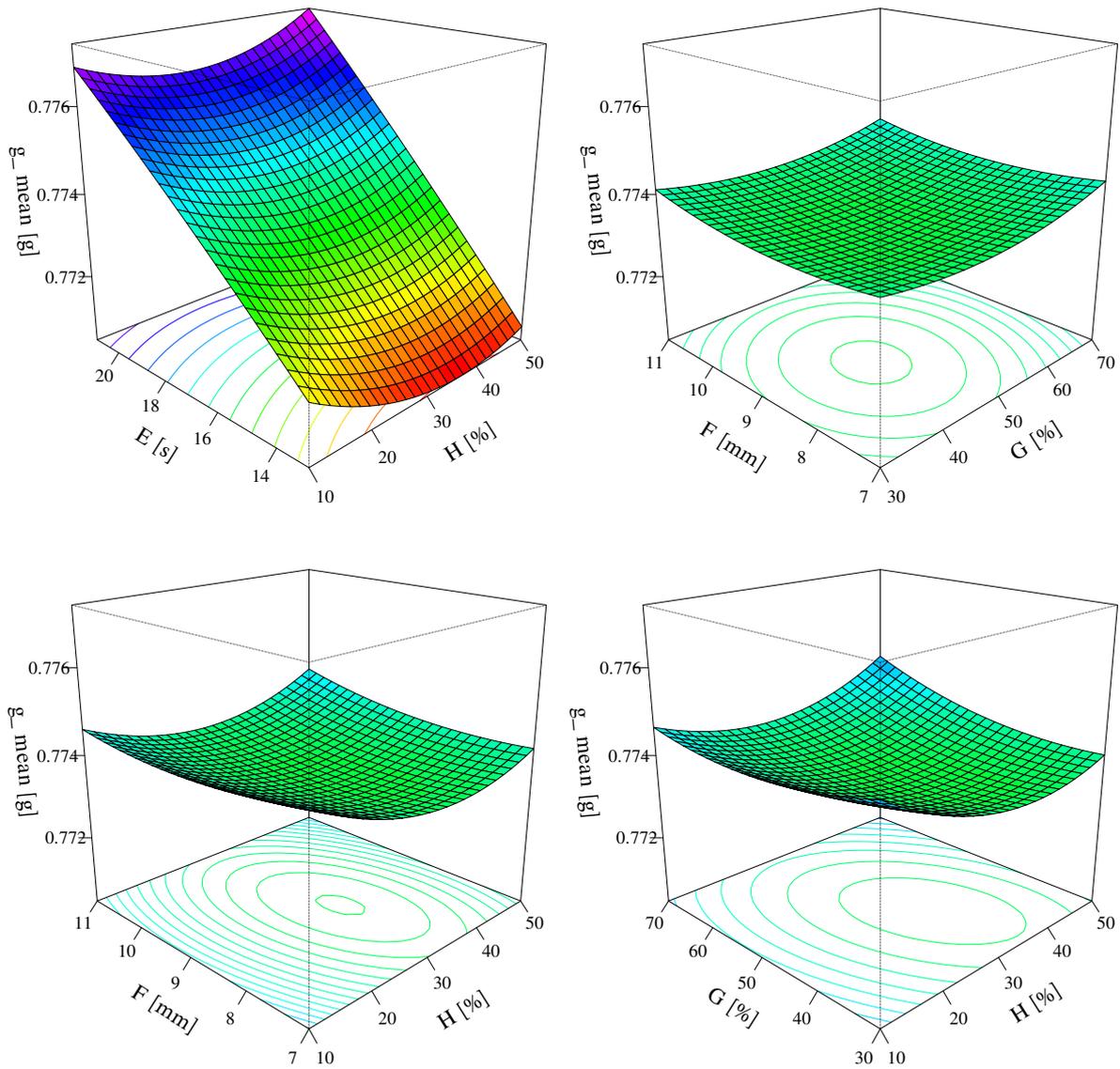
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



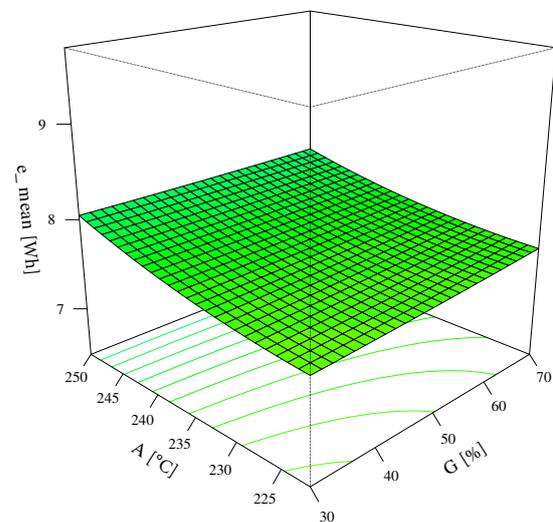
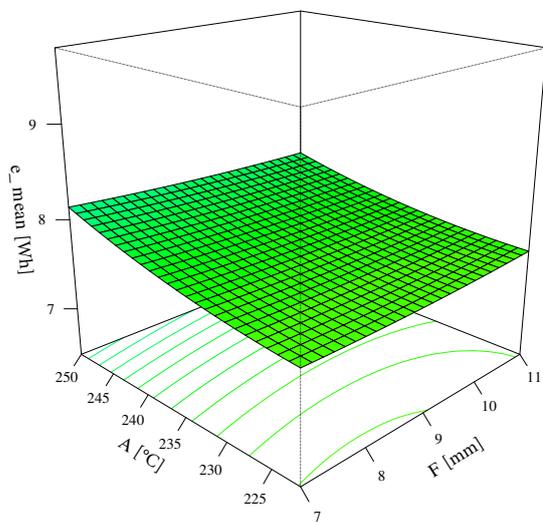
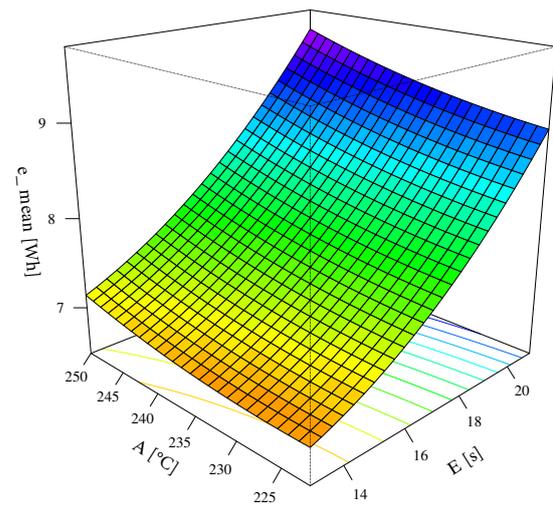
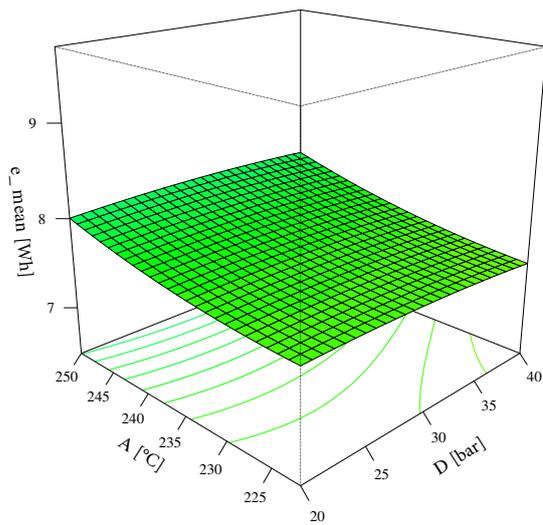
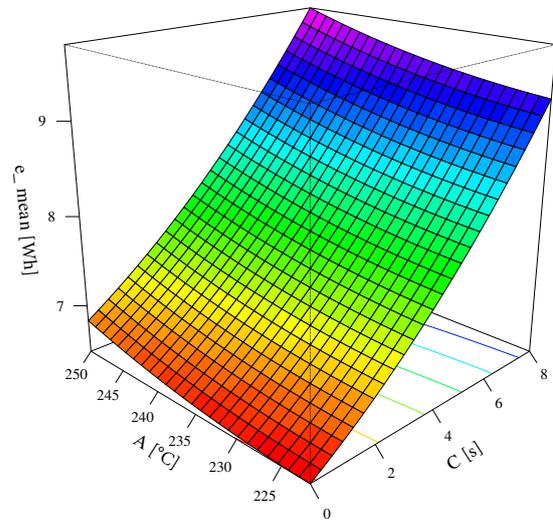
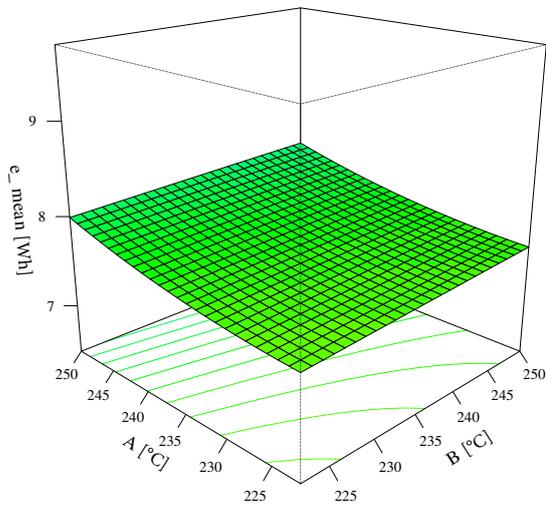
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



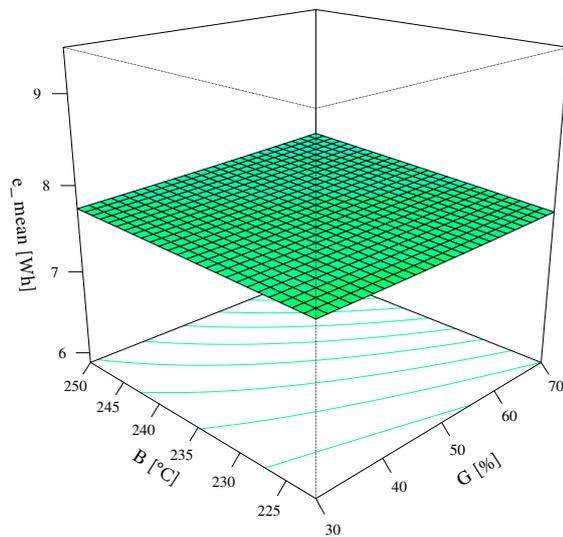
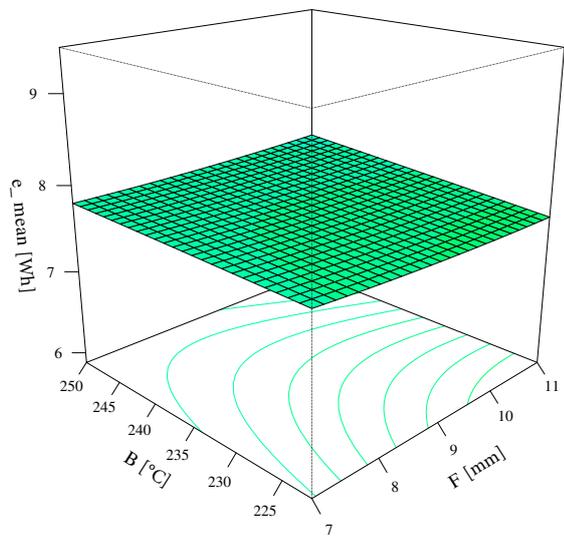
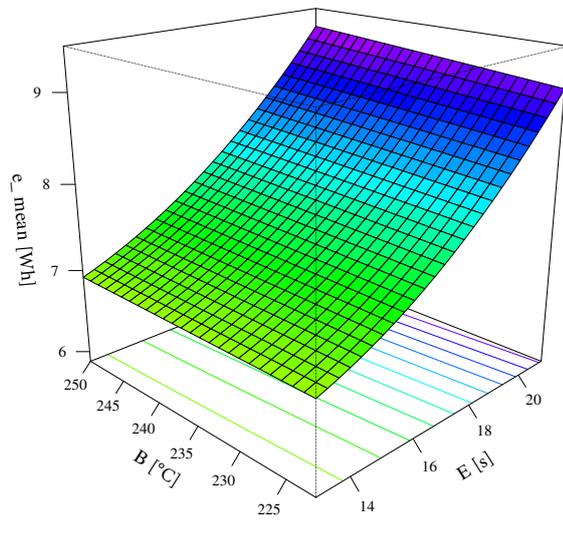
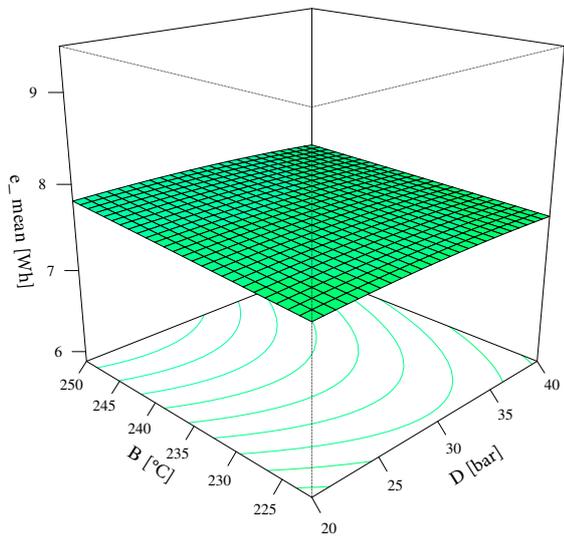
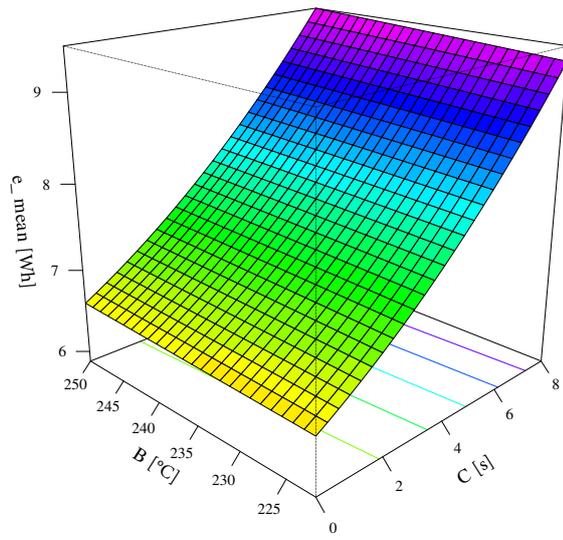
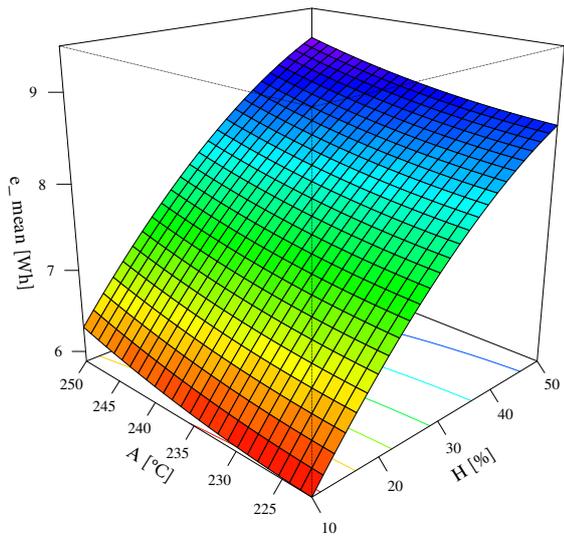
Slice at: A = 236 °C, B = 236 °C, C = 4 s, D = 30 bar, E = 17 s, F = 9 mm, G = 50 %, H = 30 %



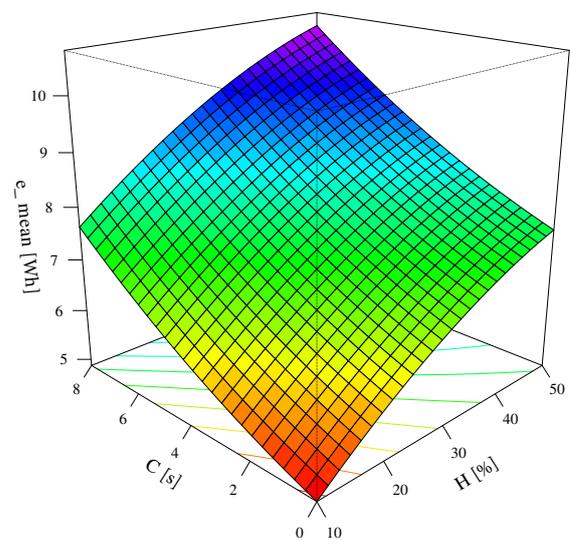
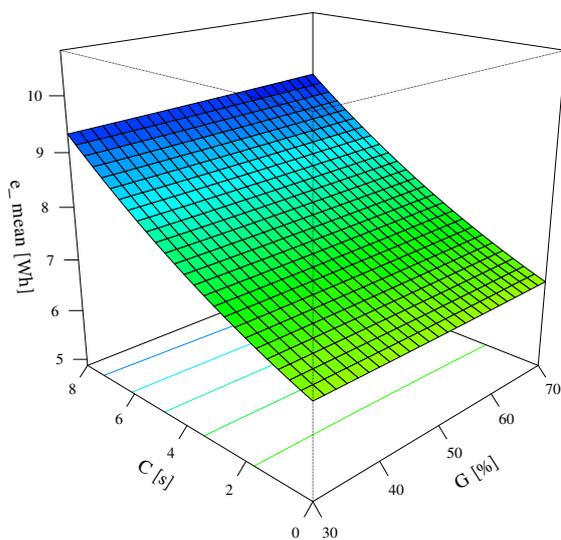
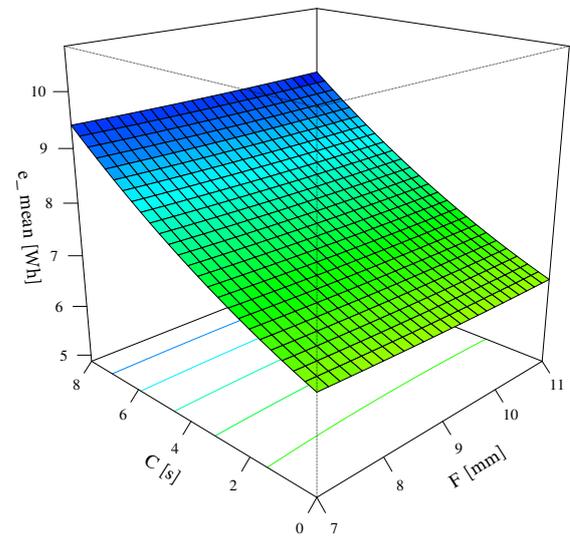
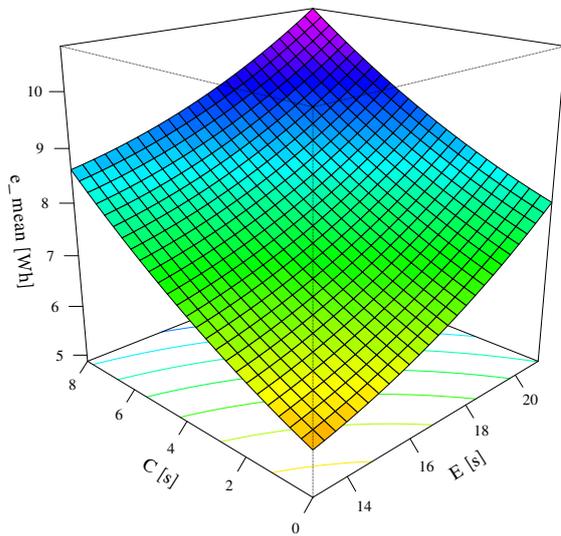
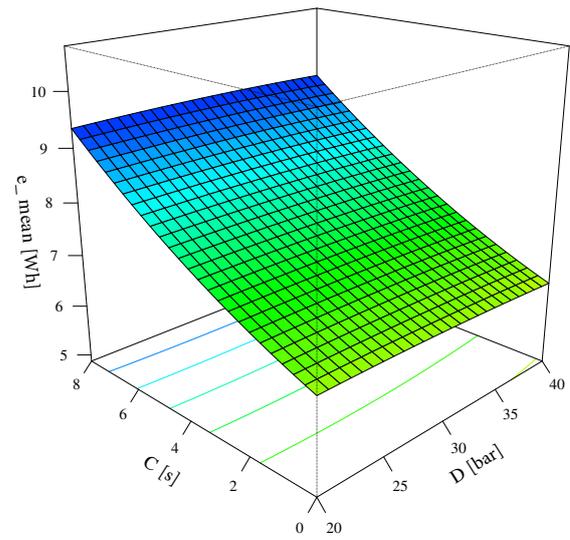
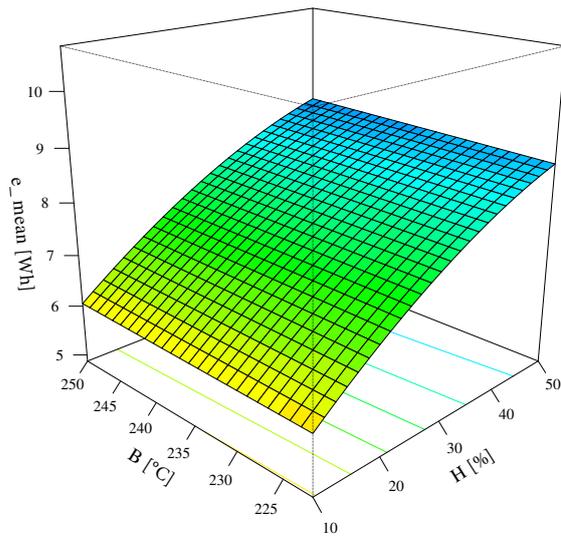
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %

J.2 Zielgröße Energieverbrauch \bar{e} 

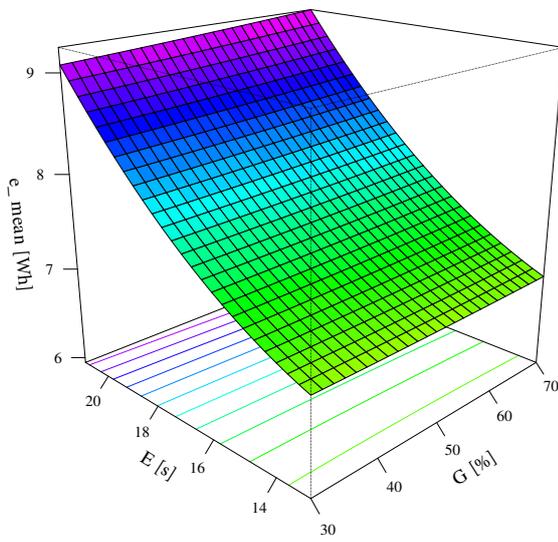
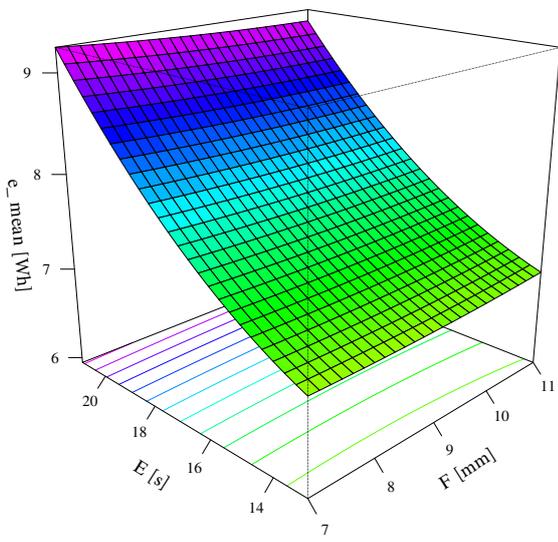
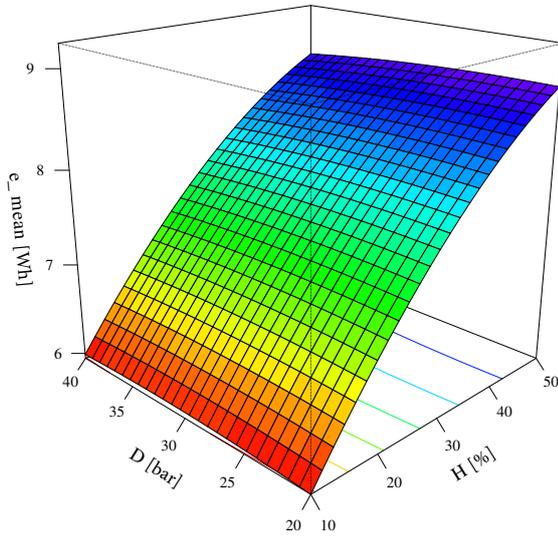
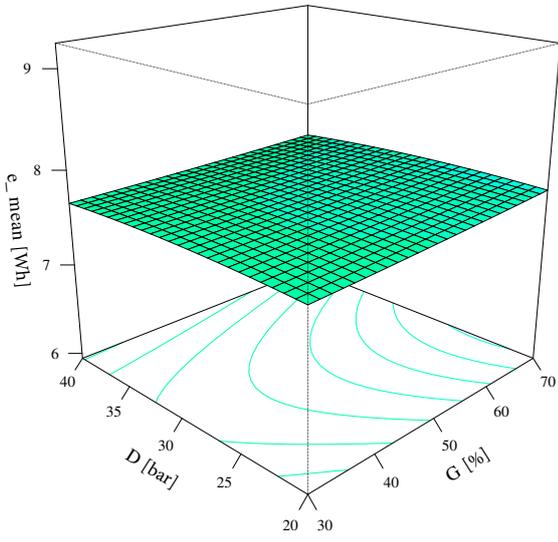
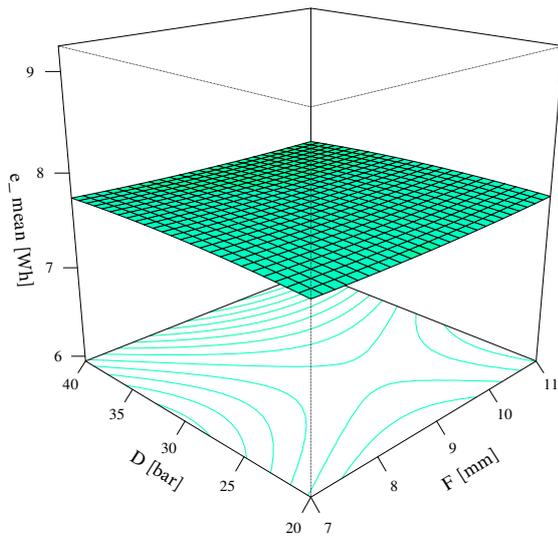
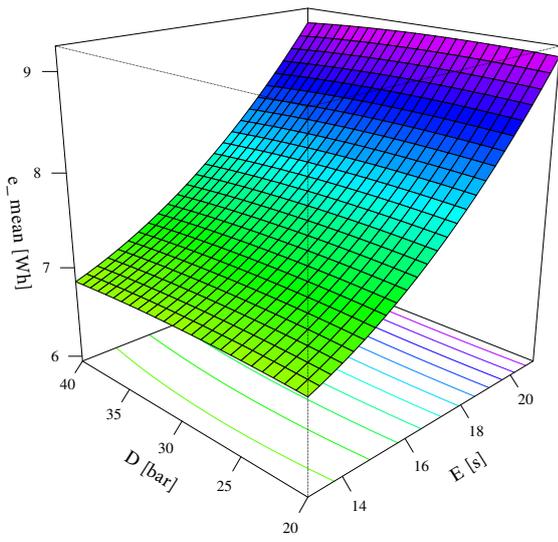
Slice at: $A=236$ °C, $B=236$ °C, $C=4$ s, $D=30$ bar, $E=17$ s, $F=9$ mm, $G=50$ %, $H=30$ %



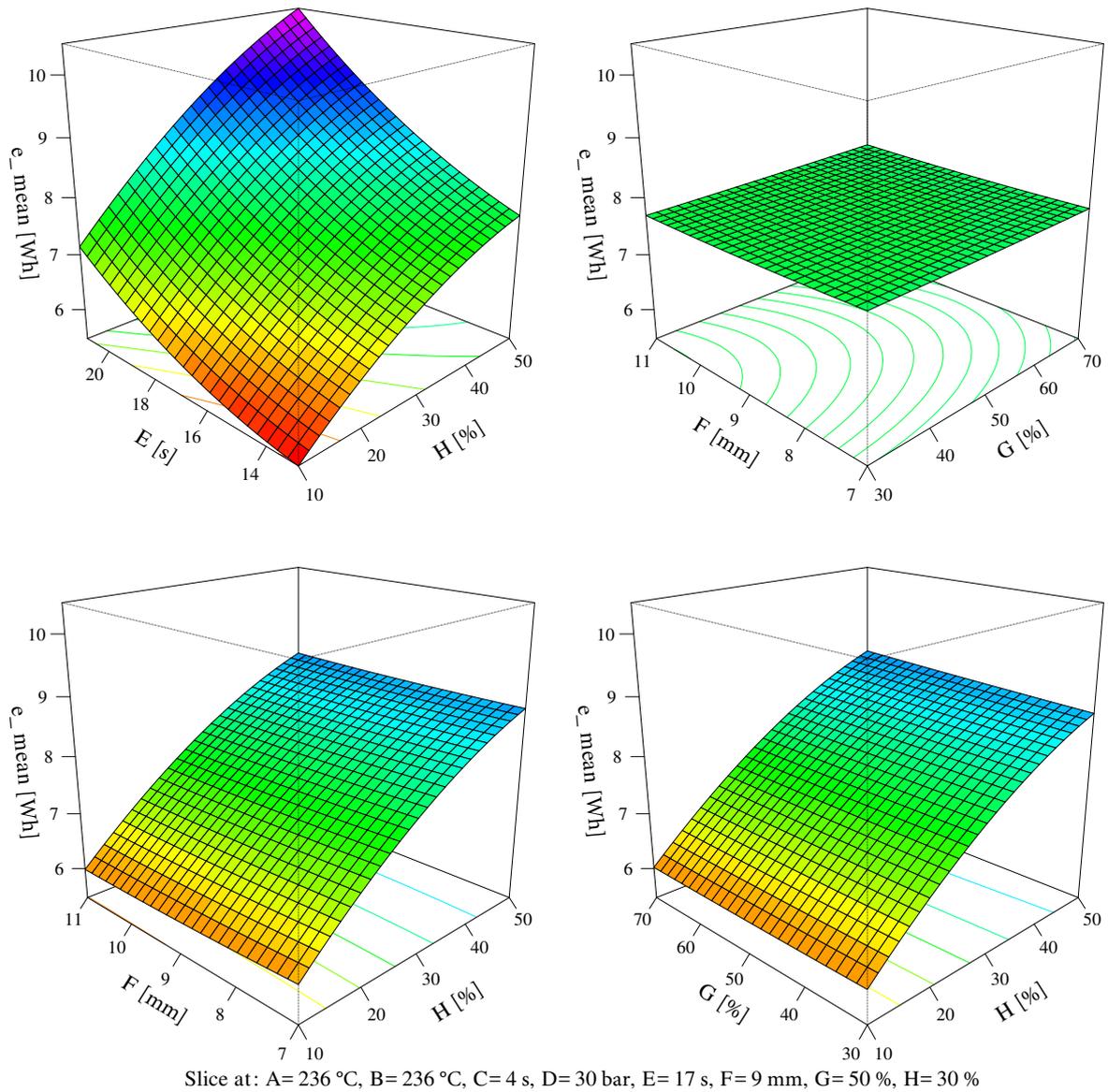
Slice at: $A = 236$ °C, $B = 236$ °C, $C = 4$ s, $D = 30$ bar, $E = 17$ s, $F = 9$ mm, $G = 50$ %, $H = 30$ %



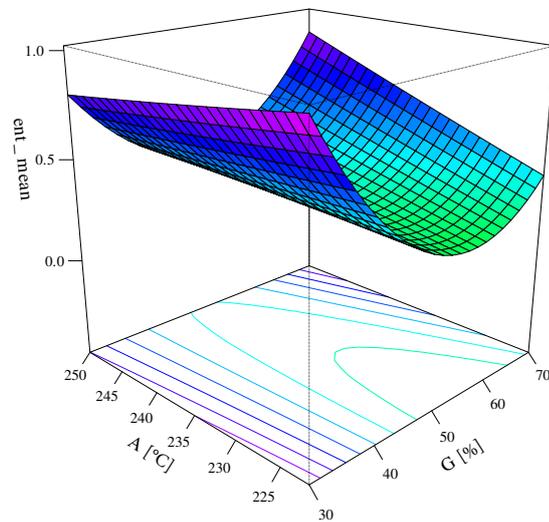
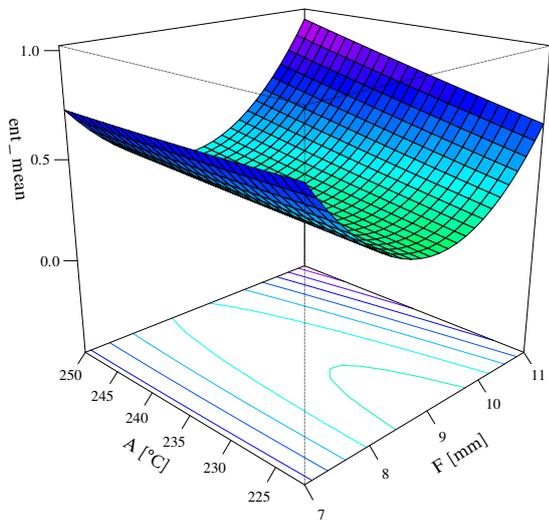
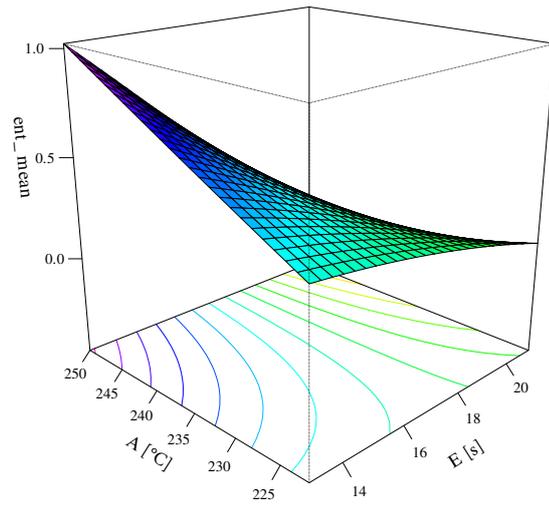
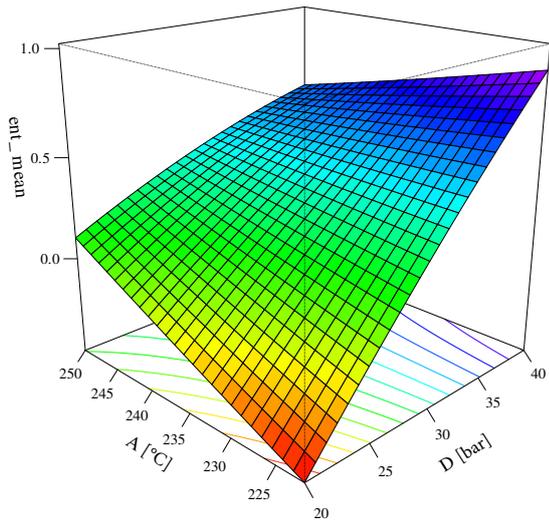
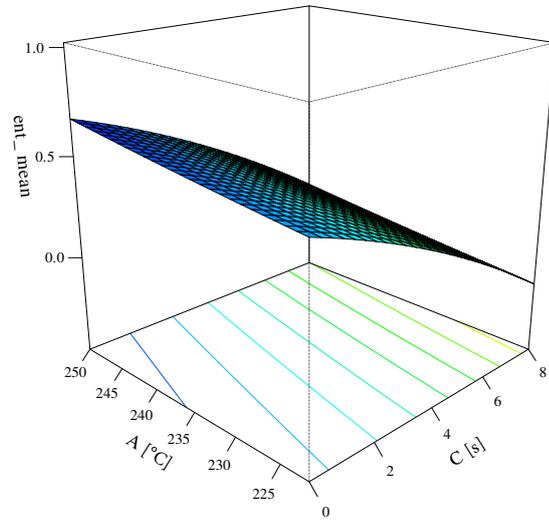
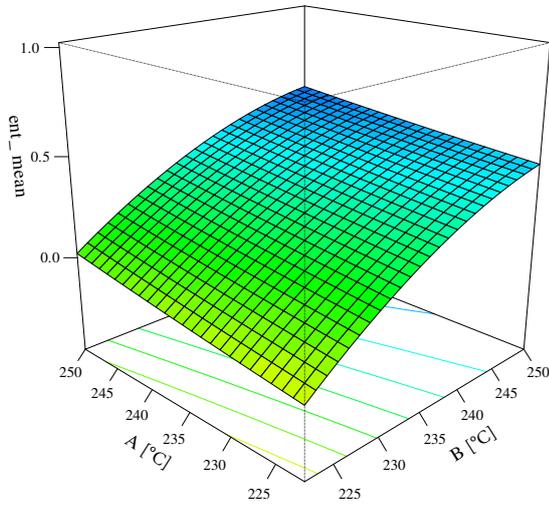
Slice at: $A = 236$ °C, $B = 236$ °C, $C = 4$ s, $D = 30$ bar, $E = 17$ s, $F = 9$ mm, $G = 50$ %, $H = 30$ %



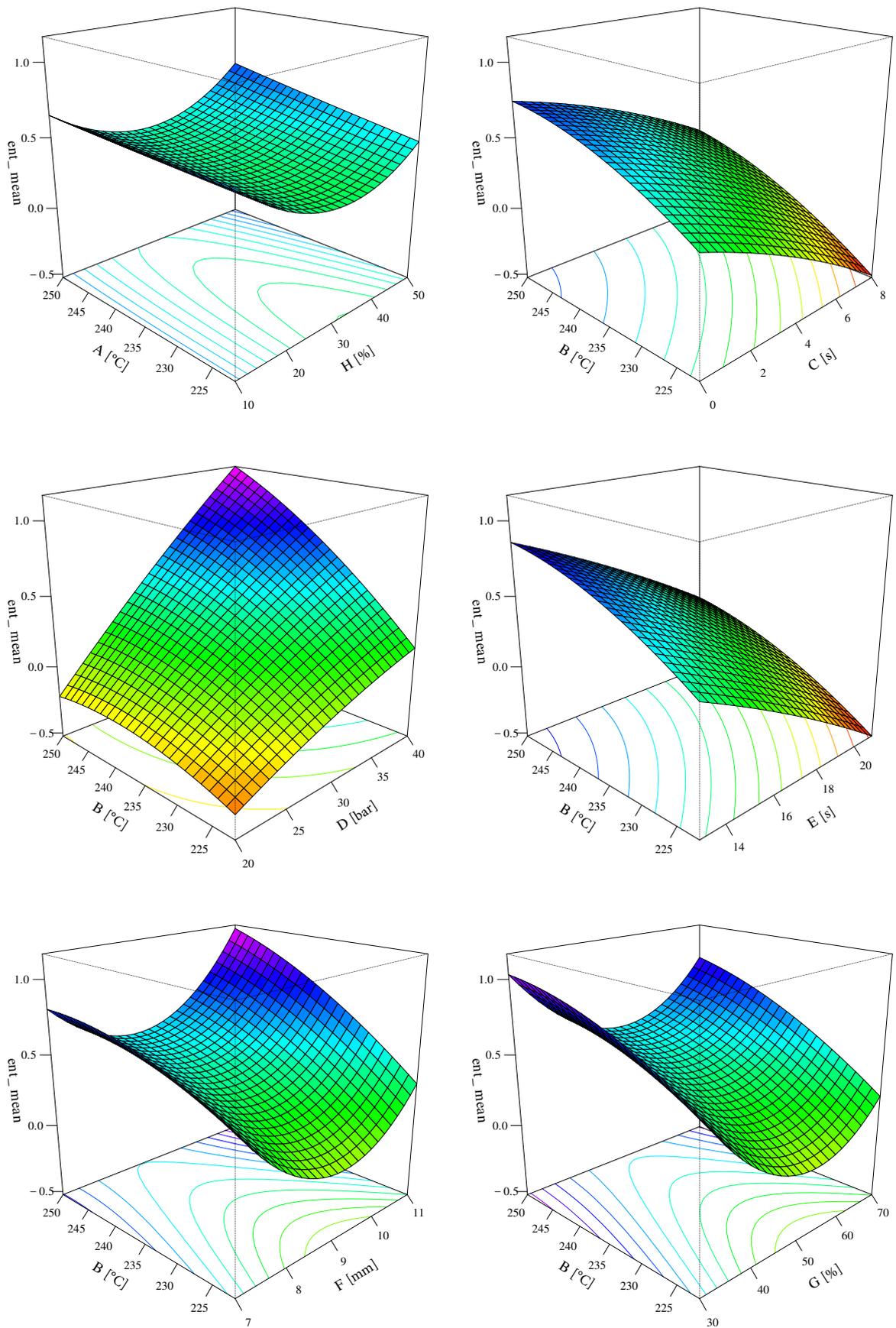
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



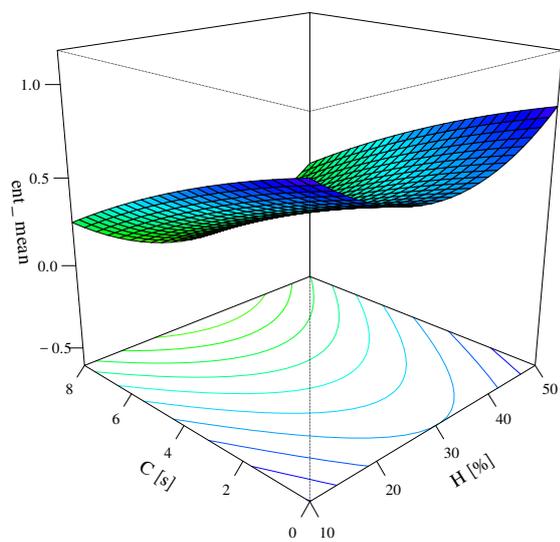
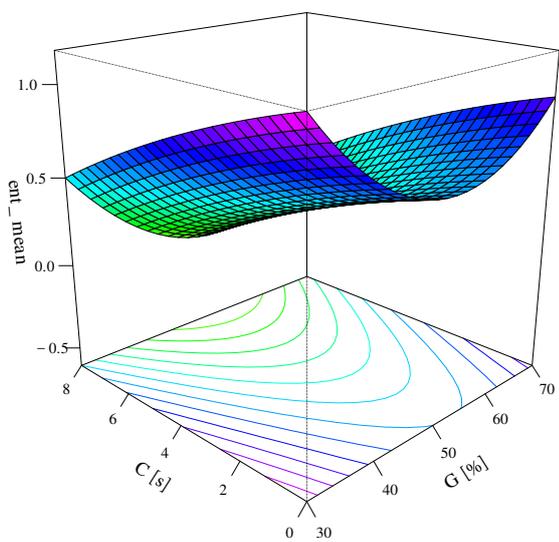
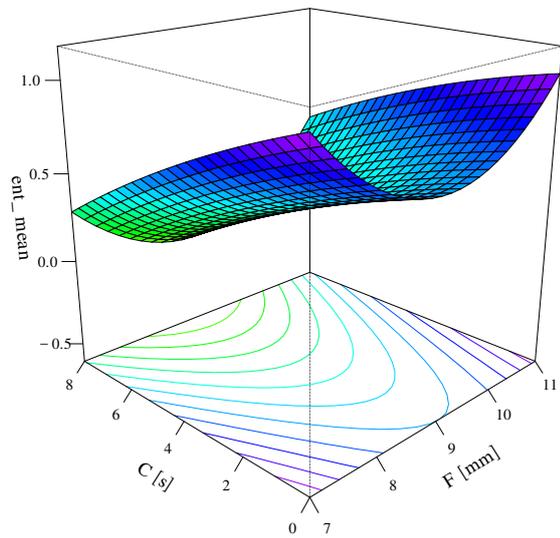
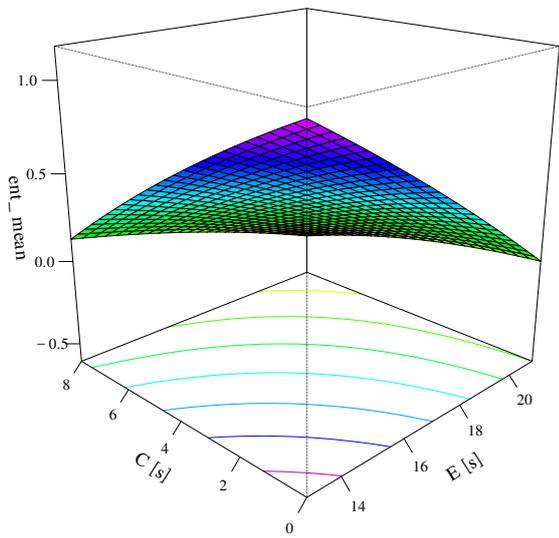
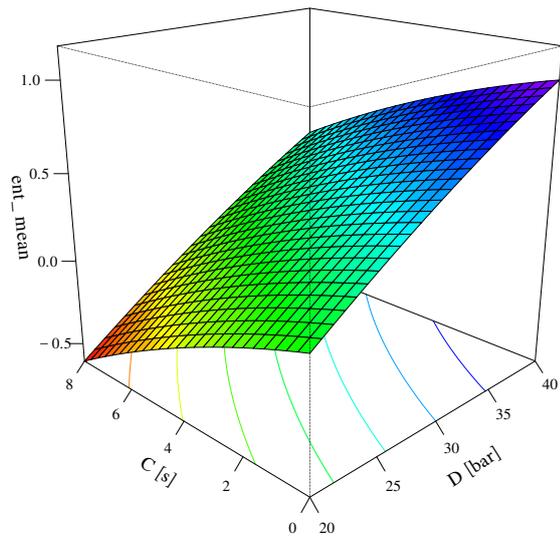
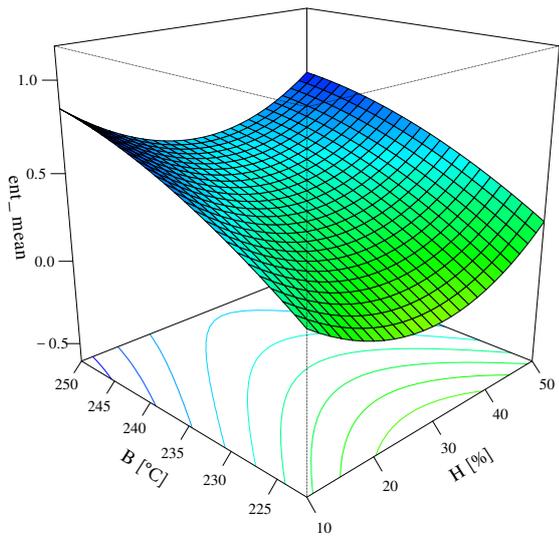
J.3 Zielgröße Entformung \overline{ent}



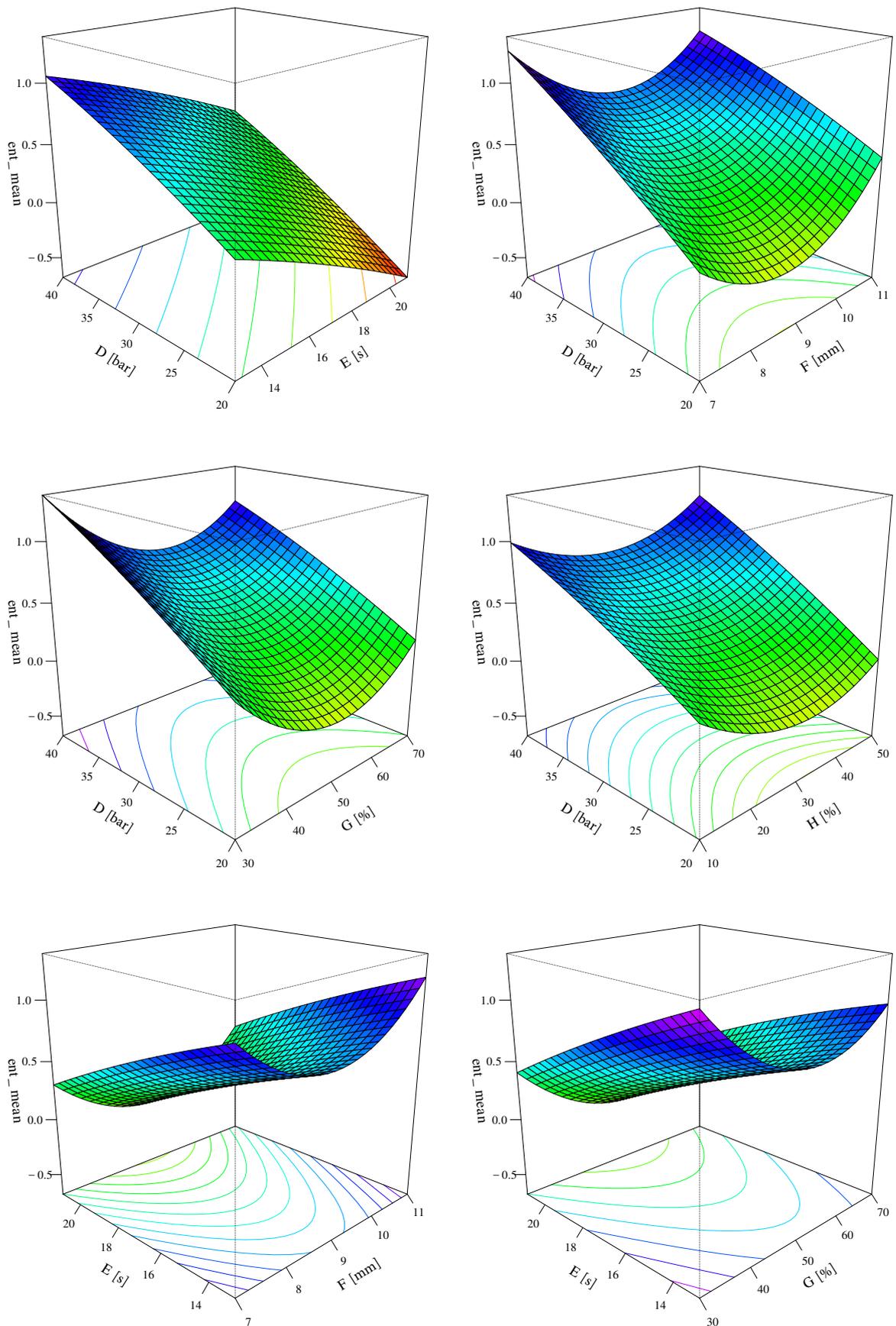
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



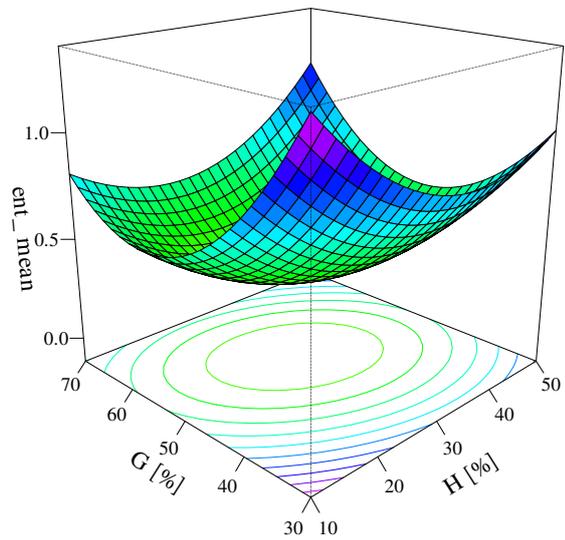
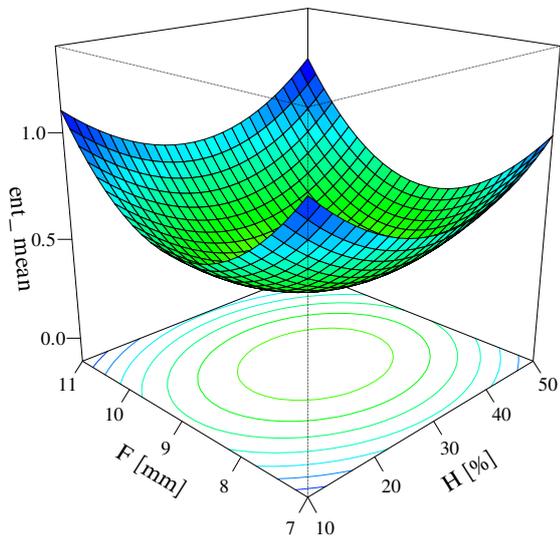
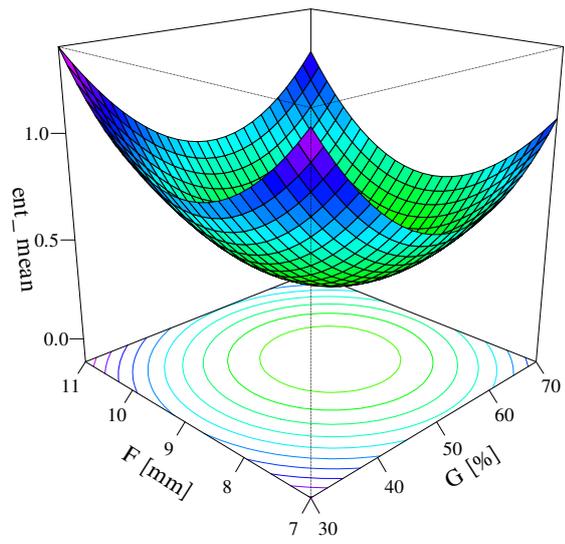
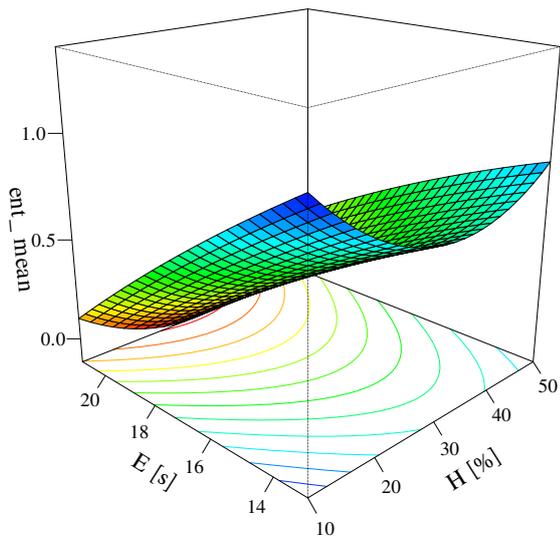
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



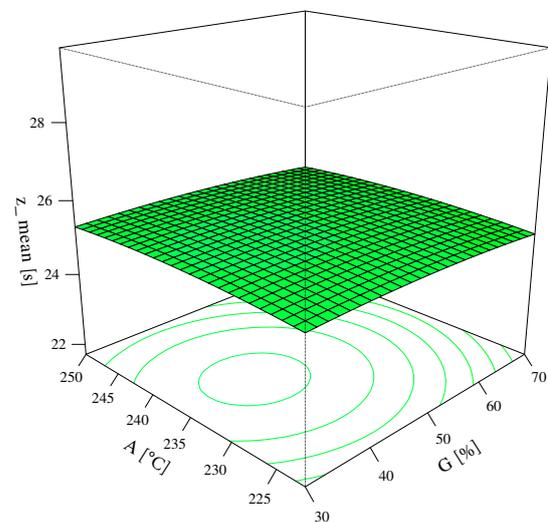
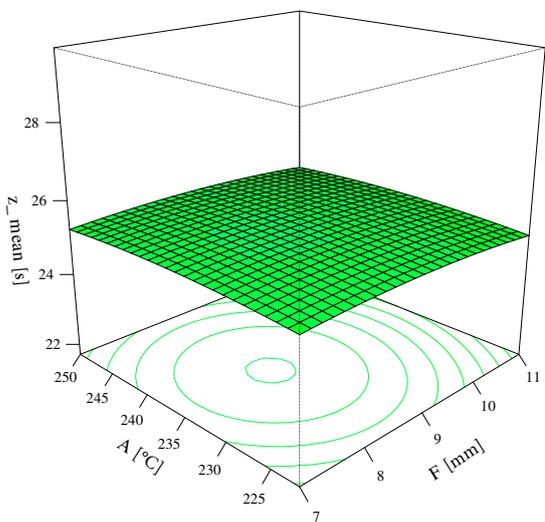
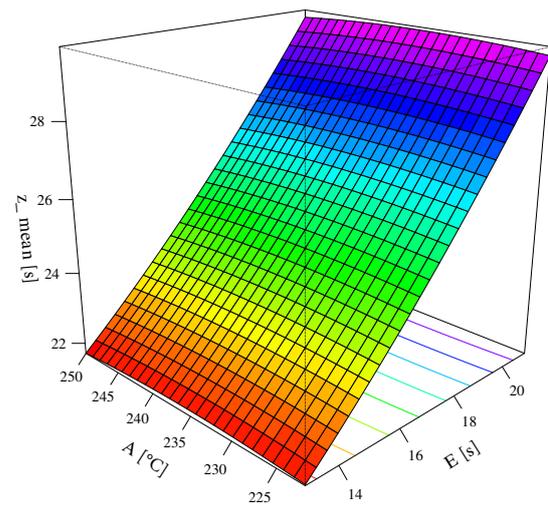
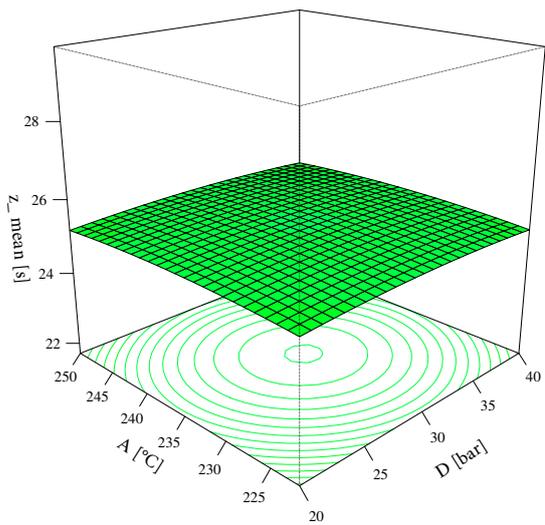
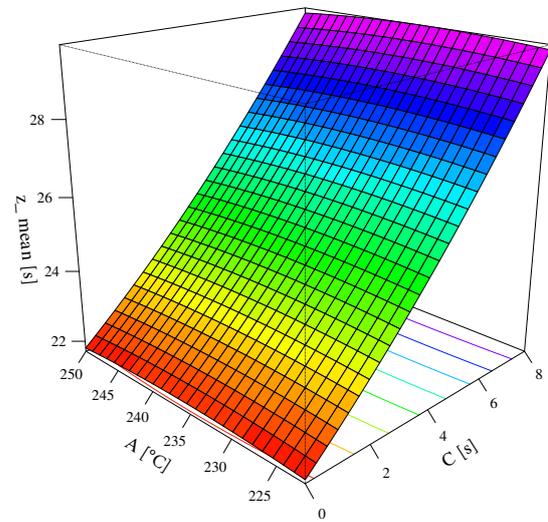
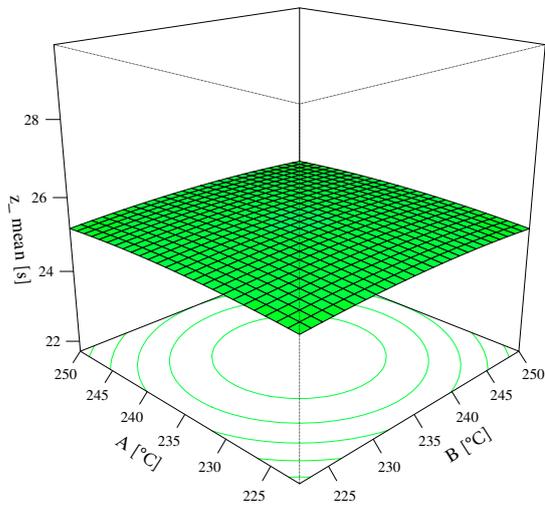
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



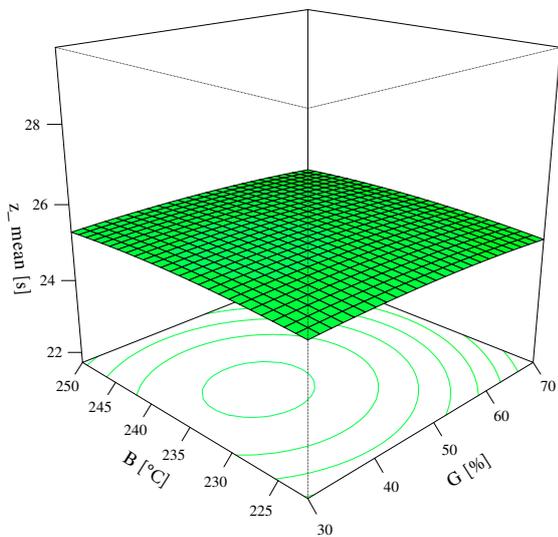
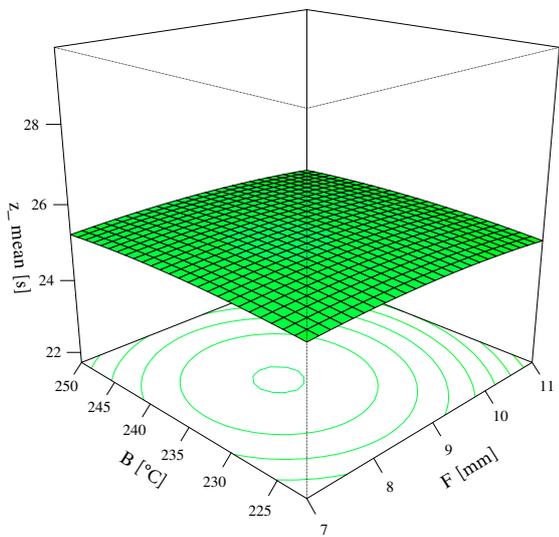
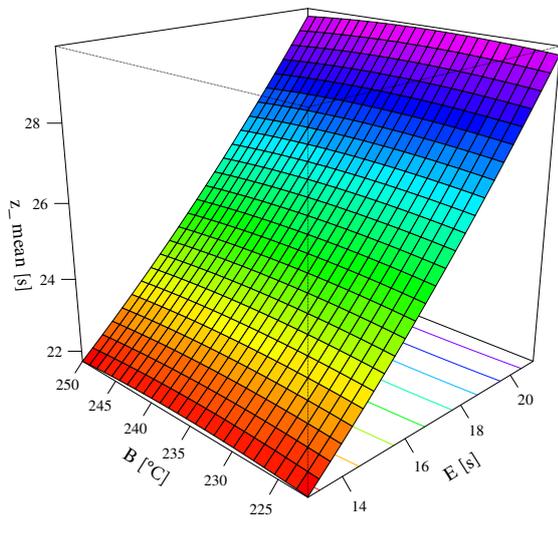
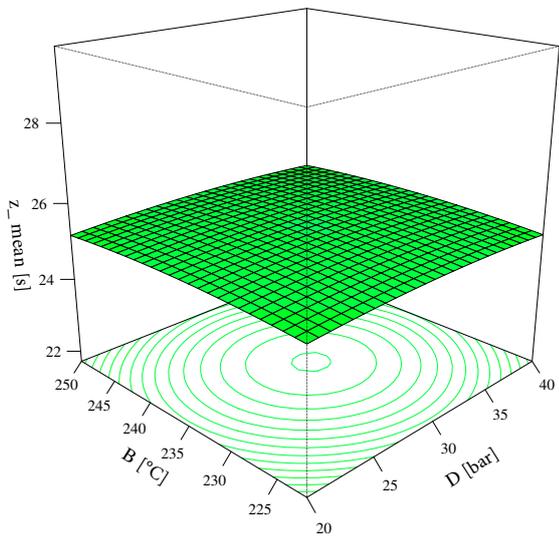
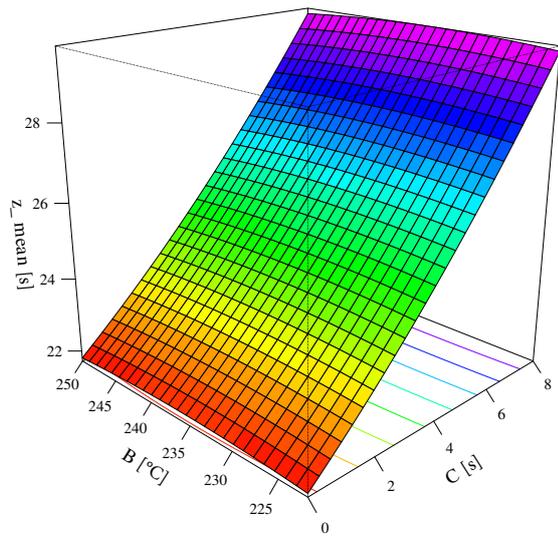
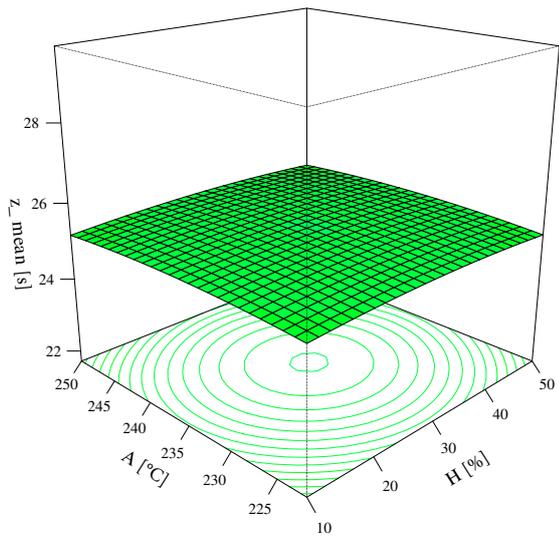
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



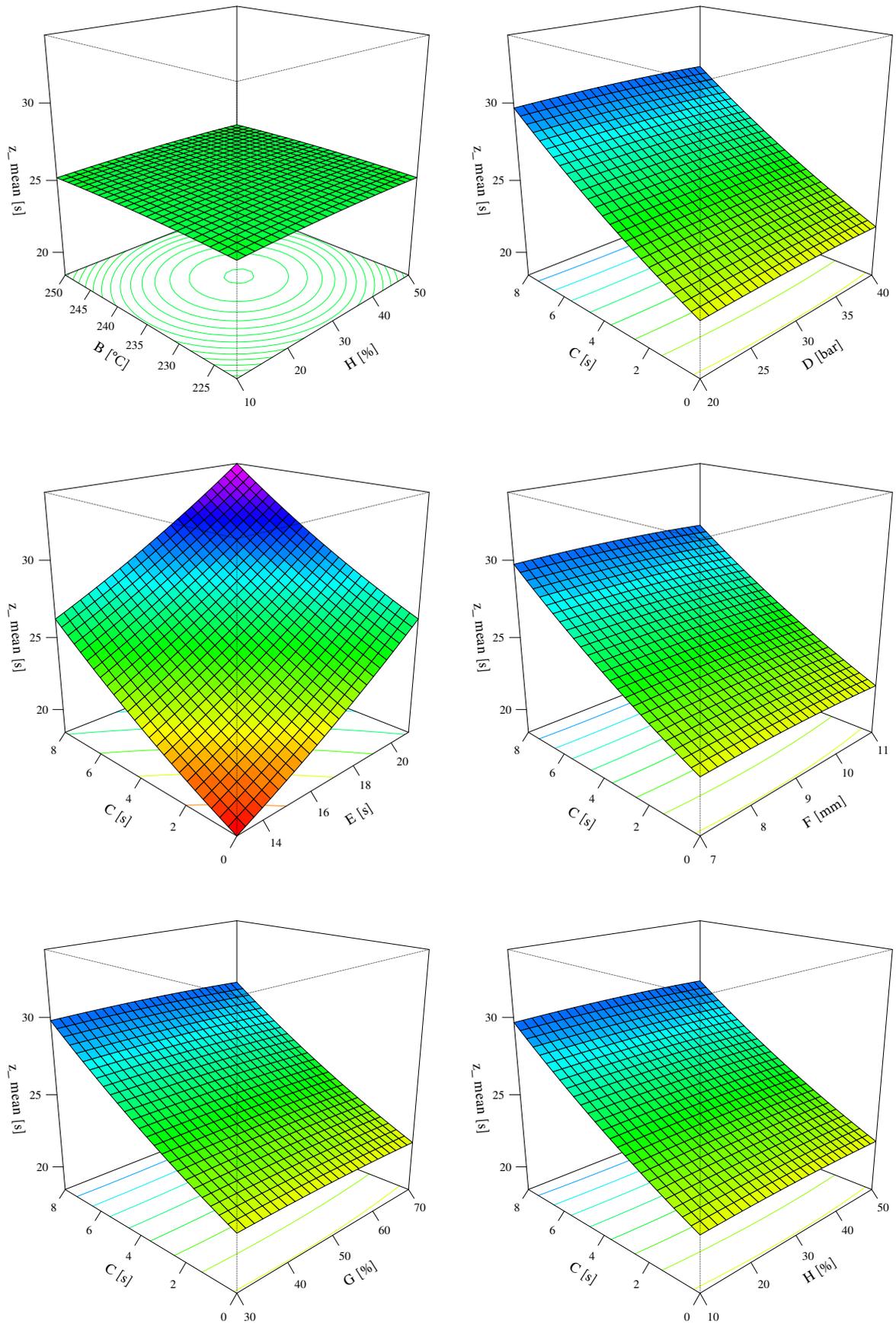
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %

J.4 Zielgröße Zykluszeit \bar{z} 

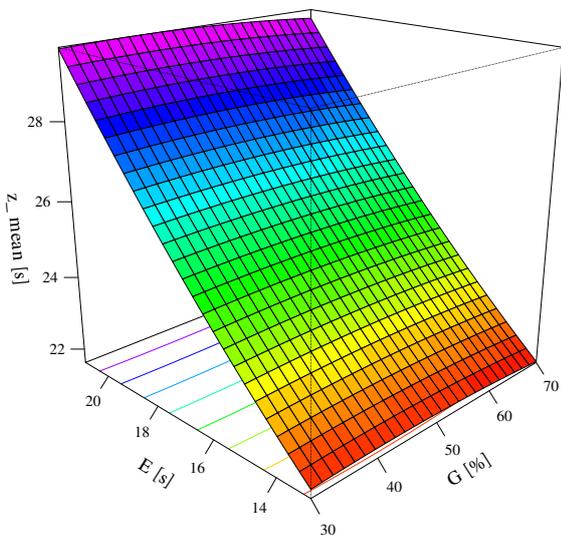
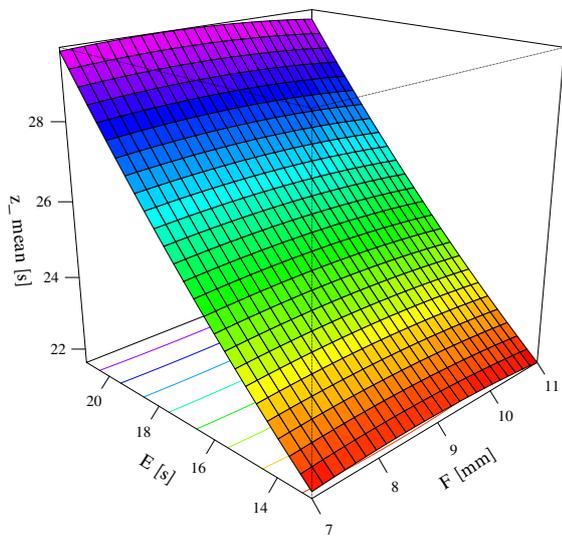
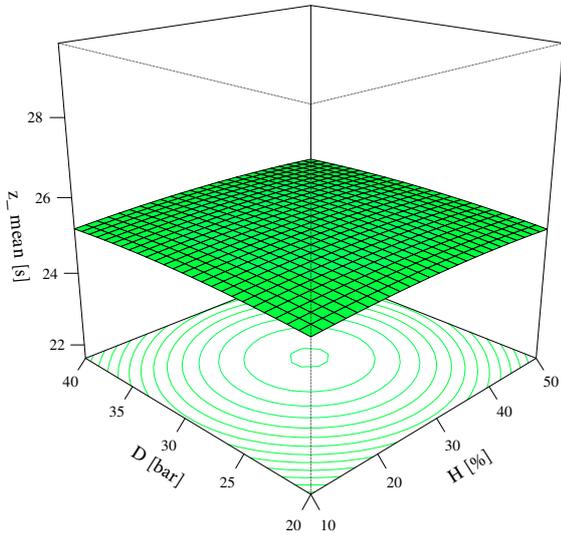
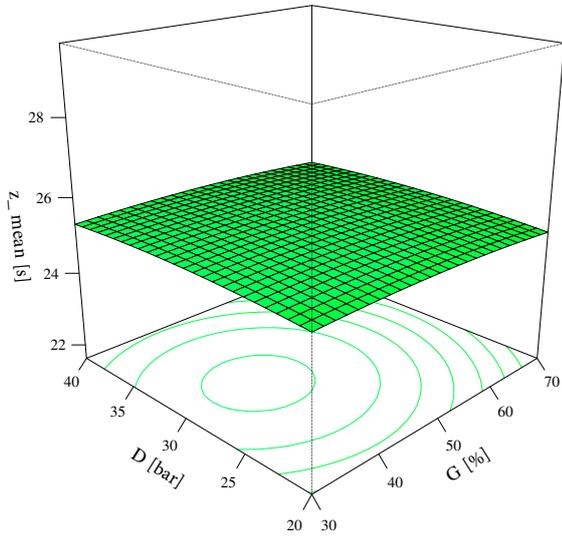
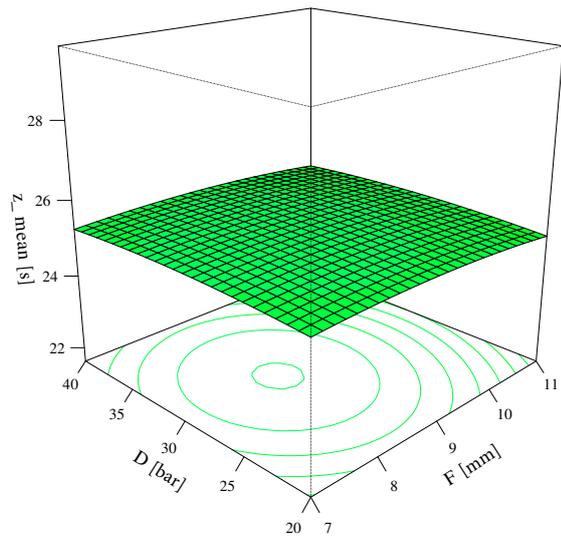
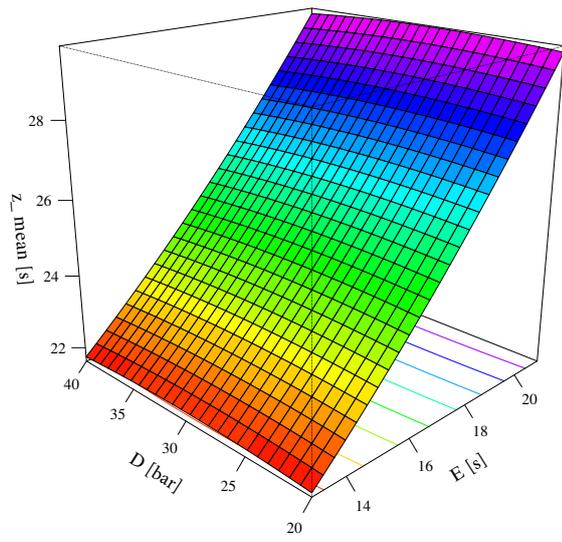
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



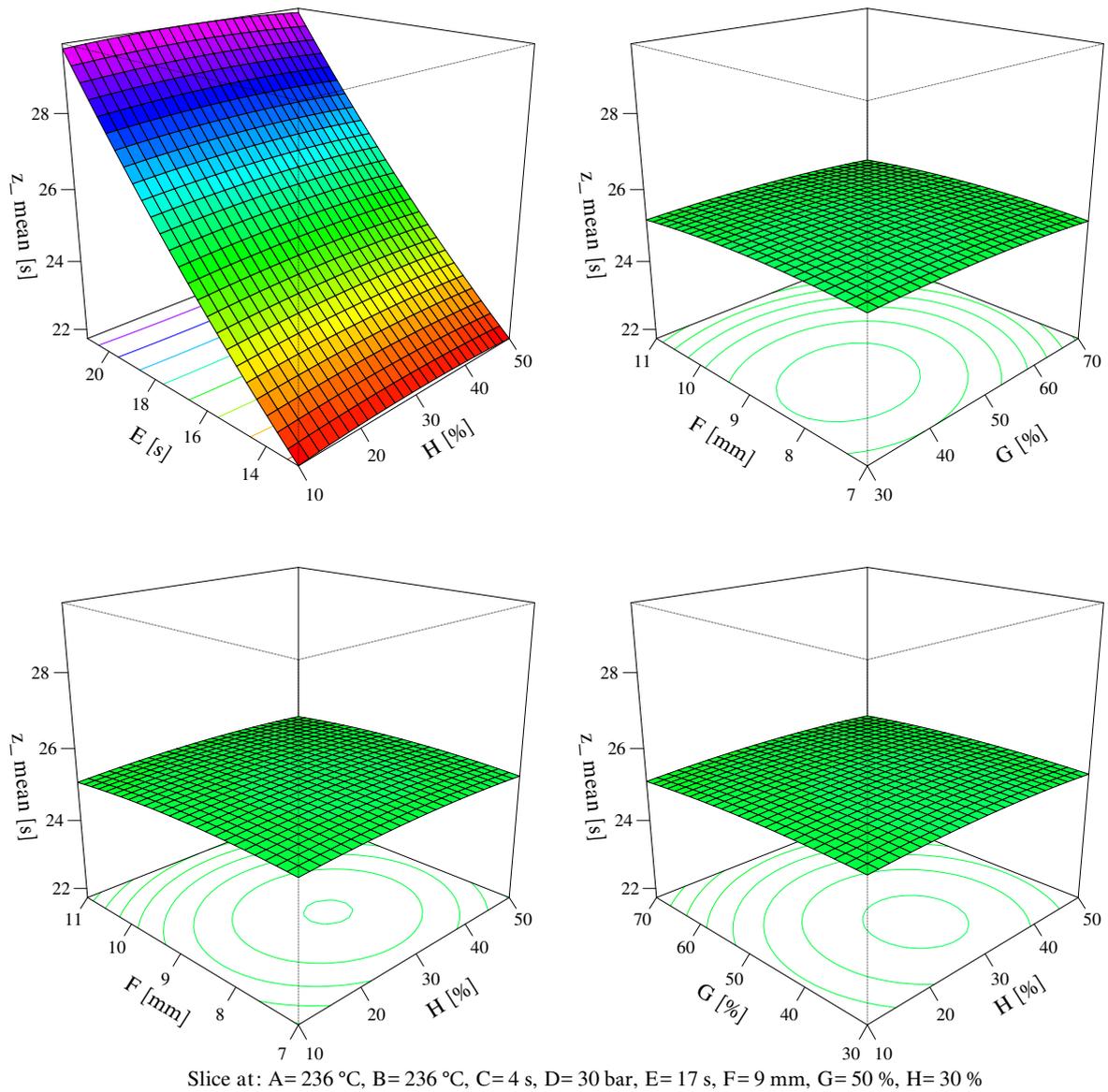
Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



Slice at: A= 236 °C, B= 236 °C, C= 4 s, D= 30 bar, E= 17 s, F= 9 mm, G= 50 %, H= 30 %



Slice at: $A=236\text{ }^{\circ}\text{C}$, $B=236\text{ }^{\circ}\text{C}$, $C=4\text{ s}$, $D=30\text{ bar}$, $E=17\text{ s}$, $F=9\text{ mm}$, $G=50\text{ }%$, $H=30\text{ }%$



K Bewertung der Validierungsmodelle

K.1 Modellbewertung des Modells 1. Ordnung zur Geometrieverifizierung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...		
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,98	0,99	1
R^2_{adj}	0,94	0,99	0,99
F-Testwert	29,2	369,2	32.520

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-1,5937e-03	-5,062e-04	-1,25e-05	4,094e-04	1,8437e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-8,4866e-02	-2,2291e-02	1,529e-03	2,3490e-02	6,3219e-02
Zykluszeit \bar{z}	-3,0625e-02	-5,625e-03	-6,25e-04	6,875e-03	2,6875e-02

¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil

K.2 Modellbewertung des Modells 2. Ordnung zur Geometrieverifizierung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...		
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,95	0,99	0,99
R^2_{adj}	0,88	0,99	0,99
F-Testwert	13,7	167,7	701

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-4,233e-03	-5,736e-04	-7,88e-05	5,613e-04	4,233e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-1,80164e-01	-2,9192e-02	3,01e-04	3,2856e-02	1,80164e-01
Zykluszeit \bar{z}	-4,100e-01	-2,440e-02	1,72e-03	2,286e-02	4,100e-01

¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil

K.3 Modellbewertung des Modells 1. Ordnung zur Materialvalidierung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,94	0,99	0,70	1
R_{adj}^2	0,86	0,99	0,27	0,99
F-Testwert	11,1	4.162	1,64	16.700

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-2,2062e-03	-4,984e-04	3,75e-05	5,578e-04	2,1625e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-9,0120e-02	-2,8597e-02	-3,5e-05	1,9985e-02	8,1133e-02
Entformung \overline{ent}	-8,563e-02	-2,469e-02	2,50e-03	2,219e-02	10,437e-02
Zykluszeit \bar{z}	-3,375e-02	-1,406e-02	1,25e-03	1,250e-02	4,250e-02

¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil

K.4 Modellbewertung des Modells 2. Ordnung zur Materialvalidierung

Bewertungsmaß	Modell für Zielgröße...			
	Gewicht \bar{g}	Energieverbrauch \bar{e}	Entformung \overline{ent}	Zykluszeit \bar{z}
R^2	0,91	0,99	0,70	1
R_{adj}^2	0,80	0,99	0,31	0,99
F-Testwert	7,9	383,3	1,80	237,1

Zielgröße	Residuen				
	Min	1Q	Median	3Q	Max
Gewicht \bar{g}	-3,4271e-03	-5,944e-04	2,8e-06	6,667e-04	3,0611e-03
Energieverbrauch \bar{e}	-6,4513e-01	-4,014e-02	-7,97e-03	4,031e-02	6,4513e-01
Entformung \overline{ent}	-8,996e-02	-1,5571e-02	2,778e-03	2,1405e-02	10,427e-02
Zykluszeit \bar{z}	-8,911e-01	-5,021e-02	0	5,174e-02	8,911e-01

¹Q unteres bzw. erstes Quartil

³Q oberes bzw. drittes Quartil