

Masterarbeit

**Experimentelle und simulationstechnische  
Evaluierung eines Qualitätsregelkonzeptes für das  
Spritzgießverfahren**

verfasst von

Michael Kipperer, BSc

eingereicht am



Institut für Kunststoffverarbeitung

Institutvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer

Montanuniversität Leoben

Leoben, September 2010

## **Eidesstattliche Erklärung**

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

20. September 2010

Datum

Michael Mägerer

Unterschrift

## **Danksagung**

An erster Stelle möchte ich mich beim Institutsvorstand des Instituts für Kunststoffverarbeitung der Montanuniversität Leoben Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit sowie für die kritische Begutachtung und Beurteilung derselben bedanken.

Mein besonderer Dank gebührt Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Thomas Lucyshyn für die Betreuung der vorliegenden Masterarbeit, die profunde fachliche Unterstützung während der Durchführung der Untersuchungen und den damit verbundenen Auswertungen und für seinen Einsatz bei der Durchsicht der Arbeit.

Desweiteren möchte ich Dipl.-Ing. Dr.mont. Christian Kukla vom Außeninstitut der Montanuniversität Leoben für die Überantwortung dieses Themenbereiches, die Zusammenarbeit und seinen fachlichen Input danken.

Dipl.-Ing. Artur Fertschej gebührt mein Dank für die Einführung in die Handhabung der Spritzgießmaschine.

Für ihre Unterstützung in maschinen- und werkzeug- und messtechnischen Belangen möchte ich Ing. Anja Caren Germuth und Ing. Rudolf Schatzer meinen herzlichen Dank aussprechen.

N. Krempel sei an dieser Stelle für ihren Einsatz bei der Erstellung des 3D-Modells des Formteiles gedankt.

Bei Ass.-Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat. Giesbert Rieß und Michael Silberhorn vom Institut für Chemie der Kunststoffe bedanke ich mich herzlichst für die Bereitstellung des Laborwägegetisches.

Meinen ausdrücklichen Dank spreche ich auch Ao. Univ.-Prof. Dr.phil. Arnold Kräuter vom Lehrstuhl für Mathematik und Statistik für sein Entgegenkommen und die wertvollen, klärenden Gesprächen aus.

Dipl.-Ing. Matthias Narnhofer sei für die Einführung in die Handhabung des Messdatenaufnahmesystems bedankt.

Bei Dipl.-Ing. Ramesh Kumar Selvarsankar und Dipl.-Ing. Leonhard Perko möchte ich mich für den kollegialen, allzeit konstruktiven Gedankenaustausch bedanken.

Elke Holler und Carina Benedikt gebührt mein Dank für ihre Geduld und ihr immer offenes Ohr in organisatorischen und administrativen Anliegen.

Darüber hinaus danke ich Gernot Weiss für die Hilfestellungen bei IT-Problemen und die immerzu angenehmen Gespräche.

Günther Kohlhuber spreche ich meinen Dank für die Anfertigung der Messlehre und die Bereitstellung des Materials für den Windschutz aus.

Insgesamt möchte ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Kunststoffverarbeitung für die kollegiale Aufnahme und das angenehme Arbeitsklima aufrichtig danken.

Ing. Erich Preiner, Harald Pölzl und Markus Bisanz danke ich für die Ratschläge zum Thema der elektrostatischen Aufladung und die stets ideenreichen Diskussionen.

Nicht zuletzt möchte ich an dieser Stelle die Gelegenheit wahrnehmen, meinen Eltern und Barbara meinen tiefsten Dank für ihre Unterstützung, ihre Geduld und ihr Verständnis aussprechen. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Die vorliegende Masterarbeit wurde im Rahmen des Förderprogrammes Research Studios Austria innerhalb des Projektes "PolySens - Eigenintelligente Hochleistungsmesstechnik für komplexe Fertigungsprozesse für die Kunststoffverarbeitung" durchgeführt.

## Kurzfassung

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen hatten zum Ziel, für das Spritzgießverfahren ein Konzept eines physikalischen Modells eines Qualitätsreglers, das sich auf die Formteilmasse bezieht, zu prüfen und um die Qualitätsgröße Formteillänge zu erweitern. Die Überprüfung der Gültigkeit des Modells erfolgte an einem repräsentativen Bauteil anhand definierter Einfaktorversuchspläne, in welchen die Abhängigkeit der beiden Qualitätsgrößen von den Einflussparametern Nachdruck, Düsentemperatur, Nachdruckzeit und Werkzeugtemperatur ermittelt wurde. Das in den Versuchen eingesetzte Material war eine ABS-Type. Den Ergebnissen des physikalischen Modells wurden Beziehungen gegenübergestellt, die über ein statistisches Modell nach einem vollfaktoriellen  $2^4$ -Faktorenversuchsplan mit Zentralpunkt bestimmt wurden. Dabei konnten gute Übereinstimmungen gefunden werden.

Ein weiteres Kernthema dieser Arbeit war es, die Experimente für das physikalische und das statistische Modell unter Verwendung der experimentellen Prozessparameter mit dem Simulationsprogramm Autodesk Moldflow Insight (AMI) zu simulieren und zu untersuchen, inwiefern die experimentell gefundenen Beziehungen numerisch vorhergesagt werden können.

Die Ergebnisse zeigten grundsätzlich gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Die ermittelten Verläufe unterschieden sich allerdings im Gesamtniveau ihrer Absolutwerte. In weiterer Folge konnte jedoch erfolgreich gezeigt werden, dass sich die vorausberechneten Daten auf das Niveau der realen Verläufe kalibrieren lassen, wobei diese in sehr guter Näherung abgebildet wurden.

Hierzu ist es zusätzlich zur Abwicklung der Versuchspläne in der Simulation lediglich nötig, die realen Messwerte der Qualitätsgrößen des Formteils im Zuge einer einzelnen Versuchsserie mit den Einstellungen des Zentralpunktes an der Spritzgießmaschine zu ermitteln. Die vorhergesagten Verläufe können sodann anhand dieses experimentell ermittelten Zentralpunktes auf das Niveau der realen Zusammenhänge übergeführt werden.

## Abstract

The investigations carried out in the course of this thesis had the aim to examine the concept of a physical model of a quality controller for injection molding, which refers to the molded part's mass, and to expand the model with the quality parameter molded part's length. The evaluation of the validity of the model was executed with a representative part on the basis of defined experimental planning, in which the two quality parameters' dependences on the influence parameters holding pressure, nozzle temperature, holding pressure time and mold temperature were identified. The material used in the investigations was an ABS grade. The results of the physical model were compared to relationships determined by a statistical model within a  $2^4$ -factorial design with center point. In doing so, good matches could be found.

The other basic issue of this thesis was to simulate the experiments for the physical and the statistical model with the simulation program Autodesk Moldflow Insight (AMI) using the experimental process parameters and to examine how the experimentally observed relations can be predicted numerically.

The results generally showed good correlation between experiment and simulation. The calculated curves however differed in the overall level of their absolute values. Subsequently it could be successfully verified, that the calculated data can be calibrated to the level of the real curves, matching these in very good approximation.

Therefore, in addition to the execution of the factorial design in the simulation, it is only necessary to determine the real values of the quality parameters of the molded part with the settings of the center point in the course of a single test series on the injection molding machine. The predicted curves can then be shifted to the level of the real relationships using this experimentally determined center point.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>	<b>3</b>
2.1	DIE pVT-REGELUNG UND IHRE WEITERENTWICKLUNGEN .....	4
2.1.1	<i>Erste pVT-Regelung .....</i>	4
2.1.2	<i>Zweite pVT-Regelungsvariante .....</i>	7
2.1.3	<i>Nachdruckfreies Spritzgießen .....</i>	9
2.1.4	<i>pmT-Regelung .....</i>	10
2.2	PHYSIKALISCHES MODELL EINES QUALITÄTSREGLERS .....	11
2.2.1	<i>Qualitätsgröße Masse .....</i>	12
2.2.2	<i>Qualitätsgröße Formteilabmessungen .....</i>	18
2.3	DAS STATISTISCHE MODELL .....	23
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTELLES.....</b>	<b>34</b>
3.1	BETRACHTETES FORMTEIL.....	34
3.2	MATERIAL.....	35
3.3	EINGESETZTE GERÄTE UND MASCHINEN .....	38
3.3.1	<i>Spritzgießmaschine.....</i>	38
3.3.2	<i>Temperiergerät .....</i>	39
3.3.3	<i>Druck-/Temperatursensor und Messdatenaufnahme .....</i>	39
3.3.4	<i>Trockenlufttrockner .....</i>	40
3.3.5	<i>Waage.....</i>	40
3.3.6	<i>Messschieber .....</i>	43
3.4	SIMULATION.....	43
3.5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	44
3.5.1	<i>Versuchskennungen .....</i>	44
3.5.2	<i>Messung von Masse und Länge .....</i>	46
3.5.3	<i>Versuchspläne.....</i>	50
3.5.4	<i>Versuchsroutine .....</i>	52
3.5.5	<i>Auswertemethode .....</i>	56
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>57</b>
4.1	PHYSIKALISCHES MODELL - EXPERIMENT .....	57
4.1.1	<i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck.....</i>	57
4.1.2	<i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur.....</i>	58
4.1.3	<i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit.....</i>	60
4.1.4	<i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur.....</i>	63
4.1.5	<i>Verknüpfung von Einspritz- und Nachdruckphase – Exponent N .....</i>	64
4.2	STATISTISCHES MODELL – EXPERIMENT .....	68

4.2.1 <i>Wirkungen und Signifikanz</i> .....	68
4.2.2 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck</i> .....	73
4.2.3 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur</i> .....	75
4.2.4 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit</i> .....	76
4.2.5 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur</i> .....	77
4.3 PHYSIKALISCHES MODELL – SIMULATION .....	79
4.3.1 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck</i> .....	79
4.3.2 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur</i> .....	80
4.3.3 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit</i> .....	82
4.3.4 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur</i> .....	85
4.3.5 <i>Verknüpfung von Einspritz- und Nachdruckphase – Exponent N</i> .....	86
4.4 STATISTISCHES MODELL – SIMULATION .....	89
4.4.1 <i>Wirkungen und Signifikanz</i> .....	89
4.4.2 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck</i> .....	96
4.4.3 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur</i> .....	97
4.4.4 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit</i> .....	99
4.4.5 <i>Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur</i> .....	100
<b>5 DISKUSSION DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>102</b>
5.1 VERGLEICHENDE BETRACHTUNG DER EXPERIMENTELLEN ERGEBNISSE DES PHYSIKALISCHEN UND DES STATISTISCHEN MODELLS.....	102
5.2 VERGLEICHENDE BETRACHTUNG DER SIMULATIONS-ERGEBNISSE DES PHYSIKALISCHEN UND DES STATISTISCHEN MODELLS .....	104
5.3 VERGLEICHENDE BETRACHTUNG DER EXPERIMENTELLEN UND NUMERISCHEN ERGEBNISSE DES PHYSIKALISCHEN MODELLS .....	106
5.4 VERGLEICHENDE BETRACHTUNG DER EXPERIMENTELLEN UND NUMERISCHEN ERGEBNISSE DES STATISTISCHEN MODELLS .....	111
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>115</b>
<b>7 LITERATURANGABE.....</b>	<b>118</b>
<b>8 ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE .....</b>	<b>120</b>
<b>9 ANHANG.....</b>	<b>124</b>
9.1 WERTETABELLE FÜR DIE T-VERTEILUNG.....	124
9.2 WERTETABELLEN ZUR LENTH’S METHOD .....	125
9.3 MATERIALDATENBLATTER.....	126
9.4 WERTETABELLEN ZUM VERGLEICH DER MODELLE (ABSCHNITT 5) .....	129

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts erkannte man die Notwendigkeit, in der Produktion von Spritzgießteilen von einer reinen statistischen Prozessregelung, die in der Regel „offline“, d. h. nach Produktion der Teile, stattfindet, prozess- und fertigungsnahe Konzepte zur Qualitätsüberwachung und –regelung zu entwickeln. Mit derartigen Methoden ist es möglich, den Spritzgießprozess „online“ zu regeln und somit Einflüsse von in der Fertigung auftretenden Störgrößen auf die Formteilqualität durch Anpassung des Prozesses zu eliminieren.

In QS-Systemen, die auf auf Statistical Process Control (SPC, oft auch IPC ... In-Process Control) basieren, bedarf es eines hohen Personal- und Prüfaufwandes, wobei eine Prüfung der Formteile im Nachhinein erfolgt und eine Unterscheidung in Gut- und Schlechtteile zum Ergebnis hat. Dies kann einerseits zu einem hohen Grad sicherstellen, dass letztlich ausschließlich Teile, welche die Qualitätsanforderungen des Kunden erfüllen, ausgeliefert werden, andererseits ist eine hohe Rate an Ausschussteilen gegeben. Dies ist dadurch bedingt, dass eine Entscheidung über die Qualität einer ganzen Charge oder der Produktion einer gesamten Schicht auf Basis einer Stichprobenprüfung im Allgemeinen einmal pro Charge oder Schicht und Artikel erfolgt. Eine Einflussnahme auf den Spritzgießprozess selbst ist nur verspätet möglich, kurzfristige Störungen können unbemerkt bleiben oder im anderen Extrem eine große Zahl an Ausschussteilen bedingen.

Moderne, prozessnahe Qualitätsregler zielen auf die Sicherstellung der Produktion von Gutteilen direkt im Spritzgießprozess ab. Dies kann den personellen Prüfaufwand und die durch Ausschuss verursachten Kosten erheblich reduzieren. Neben bestimmten artikelspezifischen optischen und funktionellen Qualitätsmerkmalen sind vor allem die Konstanz der Formteilmasse (ggf. das Schussgewicht incl. Anguss, falls vorhanden) und der charakteristischen Abmessungen des Formteils entscheidende und geeignete Zielgrößen zur Qualitätsüberwachung und -regelung in der Produktion eines Spritzgießartikels.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zunächst, ein bestehendes physikalisches Modell eines Qualitätsreglers zur Konstanthaltung der Formteilmasse zu evaluieren und auf die Zusammenhänge für konstante Formteilabmessungen zu erweitern. Das physikalische Modell ist experimentell anhand eines repräsentativen Formteils zu überprüfen und den ebenfalls experimentell ermittelten Beziehungen für ein statistisches Modell gegenüber zu stellen. Der Fokus dieser Arbeit liegt im Weiteren darin, sämtliche durchgeführte Experimente mit einem Simulationsprogramm unter

Verwendung der realen Einstellparameter nachzustellen, und die Ergebnisse aus Experiment und Simulation zu vergleichen, wobei zu beurteilen ist, wie gut sich die benötigten Parameter des Qualitätsreglers simulationstechnisch vorhersagen lassen, um zukünftig den Aufwand an experimentellen Untersuchungen durch den Einsatz von Simulationsprogrammen reduzieren zu können.

## 2 Theoretische Grundlagen

Die Regelstrategien für Spritzgießprozesse lassen sich im Groben in drei unterschiedliche Konzepte unterteilen (Abbildung 1). Die einfachste Form (Regelkreis I) stellt eine reine Maschinenregelung dar, bei der die Istwerte der Maschinendaten mit den Sollwerten verglichen und diese bei Abweichungen korrigiert werden. Diese Vorgehensweise allein kann noch keine Sicherstellung einer konstanten Formteilqualität gewährleisten. Regelkreis II geht einen Schritt weiter und nimmt über eine der Produktion nachgeschaltete Messung der Produktqualität eine Unterscheidung von Gut- und Schlechtteilen vor und verknüpft die Maschinendaten anhand eines direkt produktadaptiven Prozessmodells mit den Formteileigenschaften.

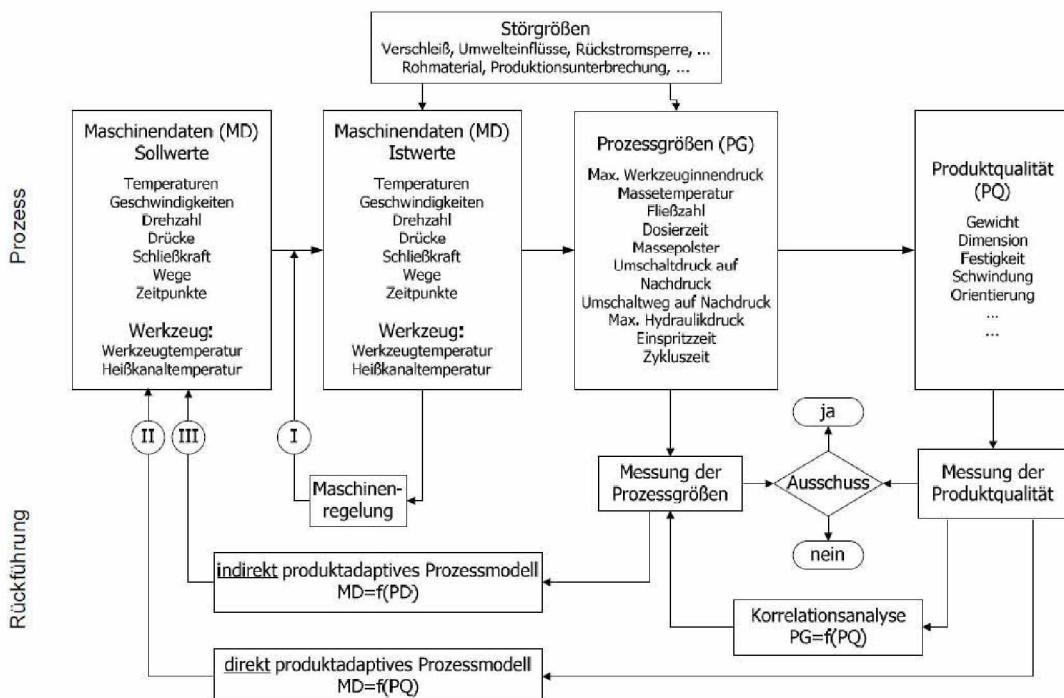


Abbildung 1: Regelstrategien im Spritzgießprozess, nach [4]

Regelkreis III stellt insofern eine weitere Verfeinerung dar, als es die Formteileigenschaften über eine Korrelationsanalyse mit den real auftretenden Prozessgrößen verknüpft, welche dann über ein indirekt produktadaptives Prozessmodell auf die Maschinendaten zurückgeführt werden. In weiterer Folge sind auf Basis der ermittelten Zusammenhänge von Formteileigenschaften und Prozessdaten eine Qualitätsentscheidung und eine Korrektur der Maschinengrößen bereits durch Messung der Prozessgrößen möglich.

Die in dieser Arbeit betrachteten Qualitätsregelkonzepte streben eine Funktionalität nach Regelkreis II an.

## 2.1 Die pVT-Regelung und ihre Weiterentwicklungen

### 2.1.1 Erste pVT-Regelung

Die erste Variante einer indirekt produktadaptiven Regelung stellt die pVT-Regelung dar. Sie gründet auf der Idee, den Spritzgießprozess anhand der werkstoffspezifischen Zusammenhänge des pVT-Diagrammes (Abbildung 2) zu führen bzw. zu regeln. Die ersten derartigen Systeme kamen ab 1983 zum Einsatz.

Ein Spritzgießzyklus lässt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, im pVT-Diagramm allgemein wie folgt gliedern: A – B: Einspritzphase, B – C: Nachdruckphase, wobei der Nachdruckverlauf anfänglich zumeist entlang einer Isobare geführt wird [6], und gegen Ende niedrigere Drücke eine Ausgleichung der Druckverhältnisse im Spritzgießwerkzeug ermöglichen sollen, C – D: isochore Abkühlphase nach Einfrieren des Anschnittes im Siegelpunkt C, D – E: isobare Abkühlphase bei Umgebungsdruck bis zur Entformungstemperatur.

Ziel der pVT-Regelung ist die Realisierung einer über alle Produktionszyklen konstanten volumetrischen Schwindung der Formteile und einer konstanten Formteilmasse. Dies soll dadurch gewährleistet werden, dass das bei Erreichen der 1-bar-Isobaren jeweils vorliegende spezifische Volumen von Zyklus zu Zyklus konstant gehalten wird [10].

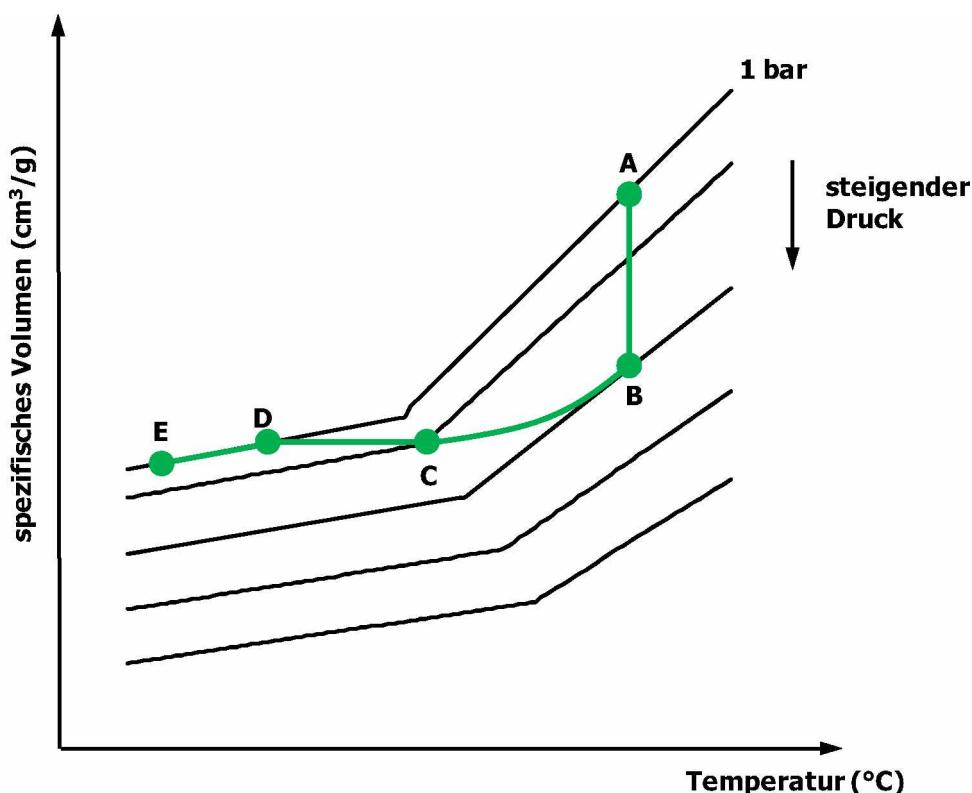


Abbildung 2: Der Spritzgießprozess im pVT-Diagramm

Als Störgrößen, die Abweichungen des spezifischen Gewichts bewirken können, werden Änderungen der im Schneckenvorraum gemessenen Massestemperatur und die Werkzeugwandtemperatur in der Kavität betrachtet (Gleichung 1).

$$T_{Mi} \neq T_{M0} \quad \text{bzw.} \quad T_{Wi} \neq T_{W0} \quad \text{mit } i = 1 \dots n \quad (1)$$

Hierin bedeuten:  $T_{M0}$  ... Massestemperatur im optimierten Betriebspunkt  
 $T_{Mi}$  ... Abweichende Massestemperatur  
 $T_{W0}$  ... Werkzeugwandtemperatur im optimierten Betriebspunkt  
 $T_{Wi}$  ... Abweichende Werkzeugwandtemperatur  
 $i$  ... Index der Temperaturstufe

Die Regelgröße dieser ersten pvT-Regelung ist die Nachdruckzeit  $t_N$ .

Als Vorgabedaten des Modells dienen:

- $p_N$  ... Nachdruck
- $t_N$  ... Nachdruckzeit
- $\bar{s}$  ... mittlere Wanddicke des Formteils
- $a_{eff}$  ... effektive Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes
- $T_E$  ... Entformungstemperatur

Durch Umformung der Kühlzeitgleichung für dünnwandige Formteile (Gleichung 2) [6] erhält man einen Ausdruck für die Berechnung der Siegeltemperatur  $T_C$  (Gleichung 3):

$$t_k = \frac{\bar{s}^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}(\bar{T}_w)} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - \bar{T}_w}{T_E - \bar{T}_w} \right) \quad (2)$$

Hierin bedeuten:  $t_k$  ... Kühlzeit  
 $\bar{s}$  ... mittlere Wanddicke des Formteils  
 $a_{eff}$  ... effektive Temperaturleitfähigkeit der Schmelze bei  $\bar{\vartheta}_w$   
 $T_M$  ... Schmelzetemperatur  
 $T_E$  ... Entformungstemperatur  
 $\bar{T}_w$  ... mittlere Werkzeugwandtemperatur

$$T_C = T_{W0} + \frac{8}{\pi^2} \cdot (T_{M0} - T_{W0}) \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot a_{eff}(T_{W0}) \cdot t_{N0}}{\bar{s}^2}} \quad (3)$$

Hierin bedeuten:  $T_C$  ... Siegeltemperatur  
 $T_{W0}$  ... Werkzeugwandtemperatur im optimierten Betriebspunkt  
 $T_{M0}$  ... Massestemperatur im optimierten Betriebspunkt

- $a_{\text{eff}}$  ... effektive Temperaturleitfähigkeit der Schmelze bei  $T_{w0}$   
 $t_{N0}$  ... Nachdruckzeit im optimierten Betriebspunkt  
 $\bar{s}$  ... mittlere Wanddicke des Formteils

Kommt es nun zu Abweichungen  $T_{M1}$  bzw.  $T_{W1}$  kann der neue Sollwert der Nachdruckzeit nach Gleichung 4 berechnet werden.

$$\frac{t_{N1}}{t_{N0}} = \frac{\ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{M1} - T_{W1}}{T_C - T_{W1}}\right)}{\ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{M0} - T_{W0}}{T_C - T_{W0}}\right)} \quad \text{bzw. } t_{N1} = t_{N0} \cdot \frac{\ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{M1} - T_{W1}}{T_C - T_{W1}}\right)}{\ln\left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_{M0} - T_{W0}}{T_C - T_{W0}}\right)} \quad (4)$$

- Hierin bedeuten:
- $t_{N1}$  ... neuer Sollwert der Nachdruckzeit
  - $t_{N0}$  ... Nachdruckzeit im optimierten Betriebspunkt
  - $T_{M1}$  ... abweichende Massetemperatur
  - $T_{M0}$  ... Massetemperatur im optimierten Betriebspunkt
  - $T_{W1}$  ... abweichende Werkzeugwandtemperatur
  - $T_{W0}$  ... Werkzeugwandtemperatur im optimierten Betriebspunkt
  - $T_C$  ... Siegeltemperatur

Zweckmäßigerweise wird die Nachdruckzeit  $t_{N0}$  in  $i$  äquidistante Intervalle der Breite  $\Delta t_{N0}$  unterteilt (Gleichung 5), wobei diese nicht beliebig verkleinert werden können, sondern sinnvoll im Rahmen der Einstellgenauigkeit der Spritzgießmaschine zu wählen sind.

$$i = \frac{t_{N0}}{\Delta t_{N0}} \quad \text{bzw. } t_{N0} = i \cdot \Delta t_{N0} \quad (5)$$

- Hierin bedeuten:
- $i$  ... Anzahl der Intervalle
  - $t_{N0}$  ... Nachdruckzeit im optimierten Betriebspunkt
  - $\Delta t_{N0}$  ... Nachdruckzeit-Teilintervall

Kommt es wie in Abbildung 3 angedeutet durch eine Änderung der Temperaturgrößen zu einer Verschiebung des Prozessverlaufs im  $pV$ -Diagramm, wird die Nachdruckzeit schrittweise in Vielfachen von  $\Delta t_{N0}$  erhöht oder vermindert, um die Störung zu kompensieren (nach [5] und [6]). Um sich dem gewünschten spezifischen Volumen (Punkt C in Abbildung 3) annähern zu können, muss die Anpassung der Nachdruckzeit im isobaren Teil des Nachdruckverlaufs erfolgen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Allgemeinen eine Änderung von Masse- oder Werkzeugwandtemperaturen zu einem veränderten Druckbedarf zum Einspritzen führt, und sich der Prozess in der Regel nicht entlang einer Isobaren verschiebt. Die

pVT-Regelung kann also nur für sehr geringe Temperaturabweichungen zufriedenstellende Ergebnisse liefern, da der Punkt C nicht exakt erreicht wird.

Darüber hinaus ist bei der genannten Vorgangsweise zu beachten, dass es bei Änderungen der Nachdruckzeit zwangsläufig auch zu Änderungen der Zykluszeit kommt. Für einen reproduzierbaren Spritzgießprozess ist in Hinblick auf die thermodynamischen Verhältnisse an der Spritzgießmaschine jedoch eine konstante Zykluszeit anzustreben.

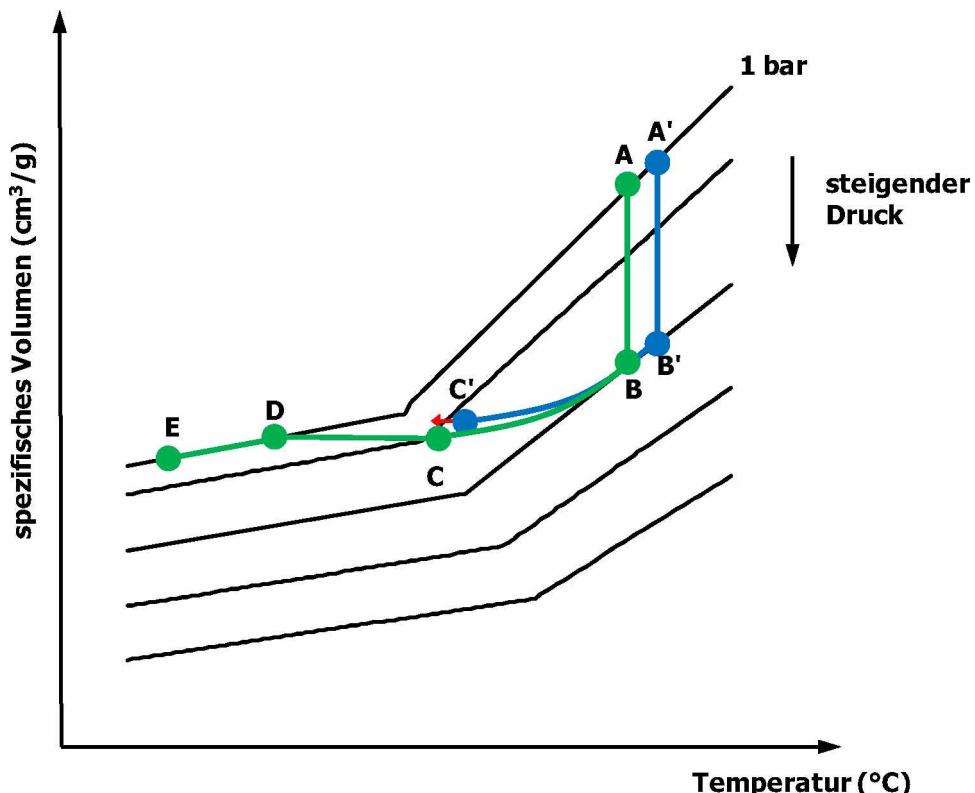


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Anpassung der Nachdruckzeit nach der ersten pVT-Regelvariante

### 2.1.2 Zweite pVT-Regelungsvariante

Die zweite, weiterentwickelte Variante der pVT-Regelung von 1985 berücksichtigt, wie in Abbildung 4 dargestellt, zusätzlich zur Anpassung der Nachdruckzeit auch eine Regelung des Nachdruckverlaufs [5].

Die Störgrößen dieses Modells sind wiederum die Masse- und die Werkzeugwandtemperatur.

Als Vorgabedaten des Modells dienen:

- $p_N$  ... Nachdruck
- $t_N$  ... Nachdruckzeit

- $\bar{s}$  ... mittlere Wanddicke des Formteils
- $a_{\text{eff}}$  ... effektive Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes
- $v_c$  ... spezifisches Volumen im Siegelpunkt
- $C_1 - C_8$  ... pvT-Koeffizienten des Tait-Ansatzes

Nach Gleichung 3 wird die Siegeltemperatur  $T_c$  im Betriebspunkt berechnet. Daraus und aus den Drücken im Umschaltpunkt B und Siegelpunkt C ergeben sich über das pvT-Verhalten des Kunststoffes die spezifischen Volumina  $v_B$  und  $v_c$ . Die Nachdruckphase wird für die Anpassung der Nachdruckzeit wiederum in  $i$  äquidistante Intervalle unterteilt. Über die Zustandsgleichung des pvT-Diagramms, hier am Beispiel des Tait-Ansatzes für den Schmelzbereich amorpher Thermoplaste (Gleichung 6 und 7), wird nun der bei der jeweiligen Temperatur  $T_i$  eines Teilintervalls vorherrschende Druck  $p_i$  berechnet.

$$v(T_i, p_i) = C_1 + C_2 \cdot T_i + C_3 \cdot e^{(C_4 \cdot T_i - C_5 \cdot p_i)} + C_6 \cdot p_i \cdot T_i^2 + \frac{C_7}{C_8 + p_i} \quad (6)$$

mit

$$v(T_i) = v_c + \frac{v_B - v_c}{T_M - T_c} \cdot T_i \quad (7)$$

- Hierin bedeuten:
- $v(T_i, p_i)$  ... spezifisches Volumen
  - $T_i$  ... MasseTemperatur des Teilintervalls
  - $p_i$  ... Druck
  - $v_c$  ... spezifisches Volumen im Siegelpunkt
  - $v_B$  ... spezifisches Volumen im Umschaltpunkt
  - $T_M$  ... MasseTemperatur
  - $C_1 - C_8$  ... pvT-Koeffizienten des Tait-Ansatzes

Es ist zu beachten dass  $v(T_i, p_i)$  in Gleichung 7 nach einer Geradengleichung berechnet wird. Je nach Prozessführung in der Nachdruckphase kann eine Annäherung durch ein geeignetes Polynom bessere Ergebnisse liefern [6].

Bei Abweichungen der Masse- oder Werkzeugwandtemperatur werden nun einerseits die Nachdruckzeit wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben angepasst und andererseits die über einen angussnahen Drucksensor [10] in der Kavität gemessenen Nachdruckwerte auf den idealisierten Verlauf nachgeregelt um das gewünschte spezifische Volumen  $v_c$  (Punkt C in Abbildung 4) zu erreichen [6].

Auch bei der verbesserten pvT-Regelung kommt es durch die Änderung der Nachdruckzeit zu unterschiedlichen Zykluszeiten.

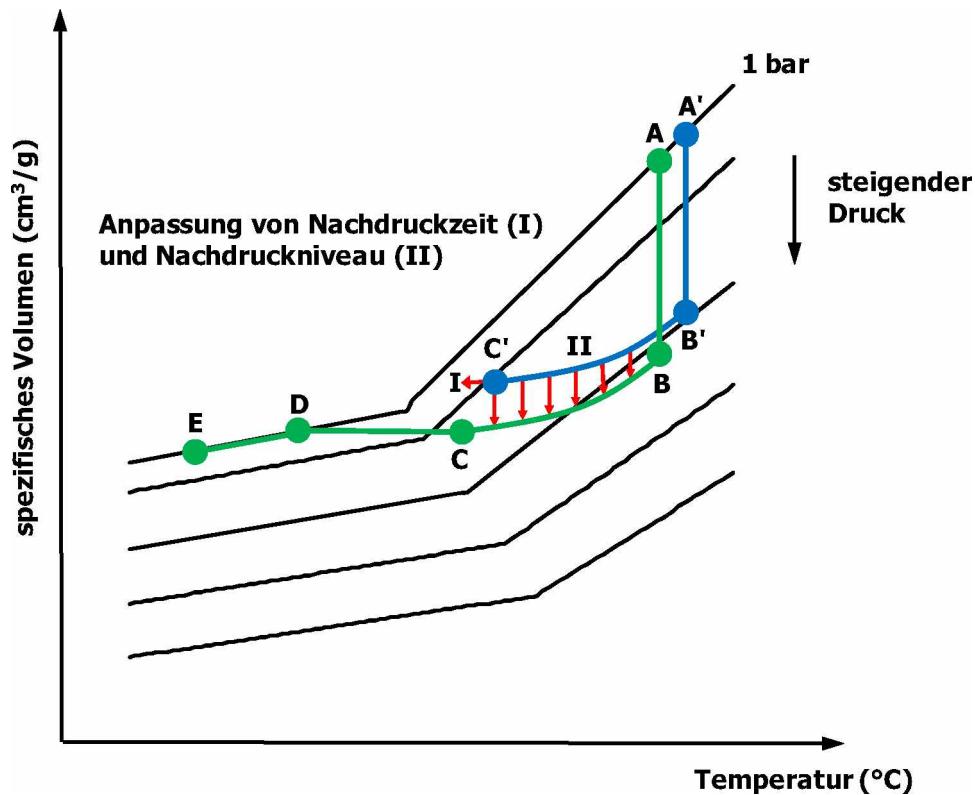


Abbildung 4: Anpassung des abweichenden Nachdruckkurve  $B' - C'$  an den gewünschten Verlauf  $B - C$

### 2.1.3 Nachdruckfreies Spritzgießen

Der in der Nachdruckphase gegebene Massestrom führt im Zusammenwirken mit der verschlechterten Druckübertragung in der Kavität zu inhomogenen Orientierungen und Eigenspannungen, die sich besonders in Angussnähe qualitätsmindernd auswirken können. In diesem Zusammenhang wurde das nachdruckfreie Spritzgießen entwickelt. Hierbei wird die Masse im Formnest unter sehr hohem Einspritzdruck verdichtet (Punkt  $B'$  in Abbildung 5) und bei Erreichen des gewünschten spezifischen Volumens nicht durch Einfrieren des Anschnitts sondern über Verriegelung der Maschinendüse mechanisch versiegelt [21]. Die isochore Abkühlphase setzt bei dieser Methode also ohne weiteren Massefluss bereits im Punkt  $B'$  ein. Mit diesem Verfahren lassen sich Formteile hoher Qualität bei hoher Reproduzierbarkeit herstellen, wobei aber hohe Anforderungen an Maschine und Werkzeug gegeben sind [5].

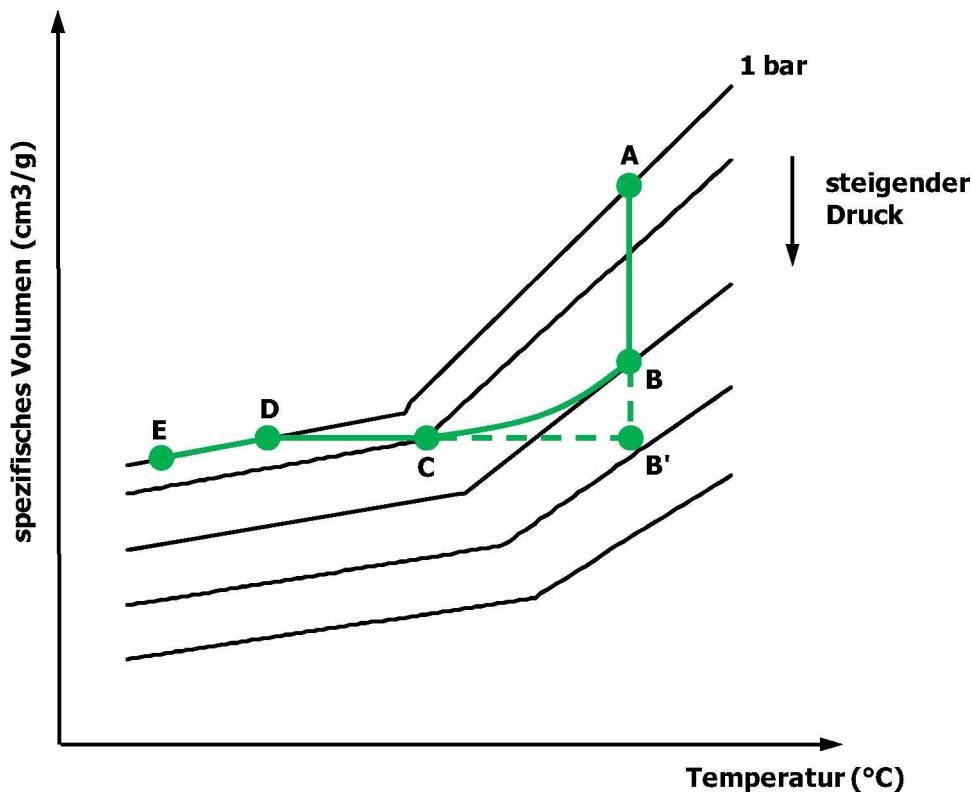


Abbildung 5: Prozessverlauf des nachdruckfreien Spritzgießens im pVT-Diagramm

#### 2.1.4 pmT-Regelung

Die pmT-Regelung kann als vierte Variante der pVT-Regelung gesehen werden [5]. Wie in Abbildung 6 ersichtlich führt man die Nachdruckphase entlang einer Isobaren. Sobald das gewünschte spezifische Volumen (Punkt C') erreicht ist, wird die Massezufuhr in die Kavität durch Verriegelung der Maschinendüse oder durch eine Nadelverschlussdüse im Werkzeug unterbunden und somit die isochore Abkühlphase eingeleitet.

Über Gleichung 8 kann das pVT- in ein pmT-Diagramm übergeführt werden. In Abbildung 6 sieht man, dass der isochoren Abkühlphase im pVT-Diagramm eine Phase konstanter Masse, die sogenannten Isomasse-Linie im pmT-Diagramm entspricht.

$$m = \frac{V}{v} \quad (8)$$

Hierin bedeuten:  $m$  ... Masse des Kunststoffes  
 $V$  ... Volumen der Kavität  
 $v$  ... spezifisches Volumen

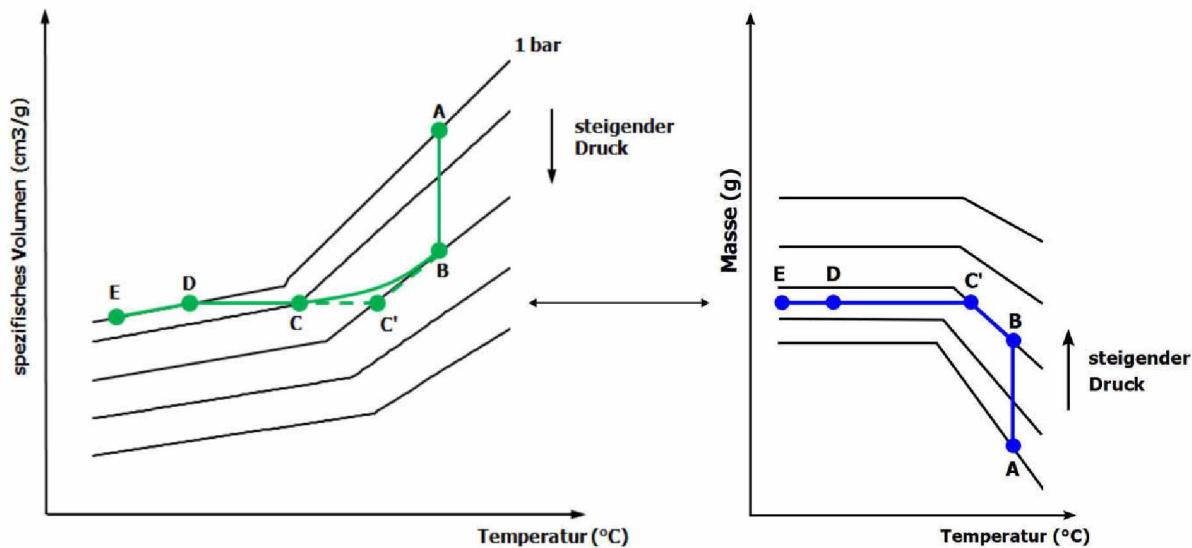


Abbildung 6: Der Prozessverlauf der pmT-Regelvariante im pvT-Diagramm (links) und im pmT-Diagramm (rechts), nach [9]

## 2.2 Physikalisches Modell eines Qualitätsreglers

Die bekannten pvT-Regelmodelle und ihre Abwandlungen versuchen über ein Konstanthalten des spezifischen Gewichts, das beim Einfrieren des Anschnitts in der Kavität vorliegt, eine über alle Zyklen konstante Formteilmasse und in weiterer Folge eine gleiche Schwindung zu erreichen. Wie in [6] ausgeführt, sind konstante Formteilabmessungen bzw. morphologische Strukturen hierbei jedoch nicht automatisch gewährleistet, da in jedem Zyklus an gleichen Orten entlang des Fließweges und zu gleichen Zeitpunkten unterschiedliche Scherdeformationen während der Einspritz- und Nachdruckphase gegeben sein können (Gleichung 9).

$$\gamma(s, t) = \dot{\gamma}(s, t) \cdot t \quad (9)$$

Hierin bedeuten:  $\gamma(s, t)$  ... Scherdeformation in Abhängigkeit von Ort (s) und Zeit (t)

$\dot{\gamma}(s, t)$  ... Schergeschwindigkeit in Abhängigkeit von Ort (s) und Zeit (t)

Gleiche Orientierungen, die die Grundlage für eine konstante Schwindung bzw. konstante Formteilabmessungen darstellen, können nur erzielt werden, wenn die Schergeschwindigkeiten von Zyklus zu Zyklus zeitlich und örtlich konstant gehalten werden. Daraus ergibt sich die Forderung, dass die Einspritzzeit  $t_E$  und der Volumenstrom  $\dot{V}$  bzw. das Einspritzgeschwindigkeitsprofil  $v_E(t)$  konstant sein müssen. Das Einspritzgeschwindigkeitsprofil ergibt sich aus dem Einspritzdruck.

Dieser kann aufgrund von Abweichungen der Massetemperatur, der Werkzeugwandtemperatur und der chargebezogenen Viskosität der Kunststoffschmelze Schwankungen unterliegen. Für eine konstante Formteilmasse muss bei abweichendem Einspritzdruck der Nachdruck angepasst werden. Die während des Nachdruckvorganges auftretenden dynamischen Vorgänge aufgrund von gegebenenfalls relativ großen Nachdruckvolumenströmen, kurzen Nachdruckzeiten und schnellen Abkühlgeschwindigkeiten können durch eine Prozessregelung rein auf Basis des pVT-Verhaltens nicht berücksichtigt werden.

Großen Einfluss auf die Bewegungsvorgänge der Nachdruckphase hat die Schmelzeviskosität. Für einen Qualitätsregler muss eine ihr proportionale Prozessführungsgröße eingeführt werden. Durch Messung der Einspritzarbeit können Viskositätsänderungen in der Einspritzphase detektiert werden. Die Druckmessung sollte hierbei möglichst werkzeugbezogen oder im Düsenkopf erfolgen. Da die Messung der Nachdruckarbeit aufgrund der geringen Schneckenwege in der Nachdruckphase mit einer hohen Ungenauigkeit verbunden ist, ist es zweckmäßig, den Nachdruck mit der Einspritzarbeit in Zusammenhang zu setzen.

Für eine konstante Formteilqualität sind neben der Forderung nach konstanten Scherdeformationen im Hinblick auf gleichartige thermodynamische Bedingungen auch gleichbleibende Zeitabläufe von Zyklus zu Zyklus zu realisieren. Das heißt, die Gesamtzykluszeit und ihre einzelnen Komponenten müssen strikt konstant gehalten werden. Die bekannten pVT- und pmT-Regelkonzepte können diesen Bedingungen nicht gerecht werden.

### 2.2.1 Qualitätsgröße Masse

Das physikalische Modell des Qualitätsreglers beschreibt die Masse des Formteils in Abhängigkeit von Nachdruckhöhe, Massetemperatur, Nachdruckzeit, Werkzeugwandtemperatur und Viskosität (Gleichung 10). Der Einfluss der Viskosität wird indirekt über die Kopplung von Einspritzarbeit und Nachdruckhöhe über eine Exponentialfunktion berücksichtigt (Gleichung 11).

$$m = f(p_N(W_E), T_M, t_N, T_w) \quad (10)$$

Hierin bedeuten:  $m$  ... Formteilmasse

$p_N$  ... Nachdruck

$W_E$  ... Einspritzarbeit

$T_M$  ... Massetemperatur

$T_w$  ... Werkzeugwandtemperatur

$$\ln(p_N) = \ln(p_{N0}) + N \cdot \ln\left(\frac{W_E}{W_{E0}}\right) \quad \text{mit} \quad 0,3 < N < 1,5 \quad (11)$$

Hierin bedeuten:  $p_N$  ... Nachdruck  
 $p_{N0}$  ... Nachdruck im optimierten Betriebspunkt  
 $W_E$  ... Einspritzarbeit  
 $W_{E0}$  ... Einspritzarbeit im optimierten Betriebspunkt  
 $N$  ... material- und werkzeugabhängiger Parameter

Die Einspritzarbeit ist definiert als das Integral des Einspritzdruckes über den Schneckenweg bezogen auf die Zylinderquerschnittsfläche (Gleichung 12).

$$W_E = A_Z \cdot \int_{s_1}^{s_2} p_E(s_i) \cdot ds \quad (12)$$

Hierin bedeuten:  $W_E$  ... Einspritzarbeit  
 $A_Z$  ... Zylinderquerschnittsfläche  
 $p_E$  ... Einspritzdruck  
 $s$  ... Schneckenweg

Mit Einspritzgeschwindigkeit und -zeit kann die Einspritzarbeit als Integral über die Einspritzzeit (Gleichung 13) ausgedrückt werden.

$$W_E = A_Z \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_E(t) \cdot v_E(t) \cdot dt \quad (13)$$

Hierin bedeuten:  $W_E$  ... Einspritzarbeit  
 $A_Z$  ... Zylinderquerschnittsfläche  
 $p_E$  ... Einspritzdruck  
 $v_E$  ... Einspritzgeschwindigkeit  
 $t$  ... (Einspritz-) Zeit

Kommt es nun beispielsweise zu einer Absenkung der Viskosität und damit zu einer Verringerung der Einspritzarbeit, muss für ein unverändertes Formteilgewicht der Nachdruck angepasst werden (Gleichung 14).

$$W_E < W_{E0} \Rightarrow p_N < p_{N0} \quad (14)$$

Hierin bedeuten:  $p_N$  ... Nachdruck  
 $p_{N0}$  ... Nachdruck im optimierten Betriebspunkt  
 $W_E$  ... Einspritzarbeit  
 $W_{E0}$  ... Einspritzarbeit im optimierten Betriebspunkt

Erfolgt die Druckmessung in der Kavität, sind  $p_E(t)$ ,  $p_{N0}$ ,  $W_{E0}/A_Z$  und  $N$  maschinenunabhängig, wodurch die auf die Zylinderquerschnittsfläche bezogene Einspritzarbeit nur vom Werkzeug und dem verarbeiteten Material abhängt.

Betrachtet man kleine Abweichungen der Prozessgrößen Nachdruck, Masse- und Werkzeugtemperatur und Nachdruckzeit von einem optimierten Betriebspunkt aus, können ihre Einflüsse auf das spezifische Gewicht als unabhängig voneinander gesehen und in Form eines Produktansatzes (Gleichung 15) zusammengefasst werden.

$$v = F_1(p_N(W_E)) \cdot F_2(T_M) \cdot F_3(t_N) \cdot F_4(T_W) \quad (15)$$

Die Funktionen  $F_1$  –  $F_4$  werden im allgemeinen Fall als Exponentialfunktionen angesetzt. Durch Logarithmieren von Gleichung 15 und anschließendem Differenzieren erhält man:

$$\frac{dv}{v} = f_1(p_N(W_E)) \cdot dW_E + f_2(T_M) \cdot dT_M + f_3(t_N) \cdot dt_N + f_4(T_W) \cdot dT_W \quad (16)$$

Mit der differenzierten Form von Gleichung 8

$$dm = -\frac{V}{v^2} \cdot dv = -m \cdot \frac{dv}{v} \quad (17)$$

folgt der Zusammenhang für die Formteilmasse:

$$dm = -m \cdot (f_1(p_N(W_E)) \cdot dW_E + f_2(T_M) \cdot dT_M + f_3(t_N) \cdot dt_N + f_4(T_W) \cdot dT_W) \quad (18)$$

Die Funktion  $f_1$  beschreibt die Abhängigkeit des Formteilgewichts von der Nachdruckhöhe. Für die Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Kompressibilität des Kunststoffes und von der Nachdruckhöhe gilt:

$$dv = -v \cdot \kappa \cdot dp_N \quad (19)$$

Da die Kompressibilität  $\kappa$  unter realen Prozessbedingungen keine reine Stoffgröße mehr ist und auch vom Werkzeug und der Formteilgeometrie abhängig ist, wird sie in Gleichung 20 durch die Konstante  $K_1$  ersetzt.

$$dv = -v \cdot K_1 \cdot dp_N \quad (20)$$

Mit Gleichung 20 und der differenzierten Form von Gleichung 11

$$dp_N = \frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot d_{WE} \quad (21)$$

folgt die Verknüpfung von Einspritz- und Nachdruckphase:

$$dv = -v \cdot K_1 \cdot \frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot d_{WE} \quad (22)$$

Die Funktion  $f_2$  definiert die Beziehung zwischen Formteilgewicht und Massestemperatur über die Volumenausdehnung  $\alpha$  des Kunststoffes:

$$\alpha = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial T_M} \quad (23)$$

Aus Gleichung 23 ergibt sich der Zusammenhang für das spezifische Volumen in Abhängigkeit von der Massestemperatur, wobei der Volumenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  durch die Konstante  $K_2$  ersetzt wird:

$$dv = v \cdot K_2 \cdot dT_M \quad (24)$$

Die Funktion  $f_3$  beinhaltet die Abhängigkeit des Formteilgewichts von der Nachdruckzeit. Ändert sich diese, kommt es auch zu einer Änderung der Kühlzeit und zu einer Änderung der Siegeltemperatur bzw. der Formteiltemperatur am Ende der Nachdruckphase  $T_C$ . Die Verknüpfung von  $T_C$  und  $t_N$  wird über die Formel zur Berechnung der Siegeltemperatur (Gleichung 3) hergestellt. Diese kann in ihrer differenzierten Form nach einigen Umformungen wie folgt angeschrieben werden:

$$dT_C = -\frac{a_{eff} \cdot \pi^2}{s^2} \cdot (T_M - T_W) \cdot dt_N \quad (25)$$

Setzt man Gleichung 25 in Gleichung 24 ein und ersetzt  $T_M$  durch  $T_C$ , so erhält man:

$$dv = -v \cdot K_3 \cdot (T_C - T_W) \cdot dt_N \quad (26)$$

In der Konstanten  $K_3$  ist der Ausdruck

$$K_3 = K_2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot a_{eff}}{s^2} \quad (27)$$

zusammengefasst.

Die Funktion  $f_4$ , welche den Zusammenhang zwischen Formteilgewicht und Werkzeugwandtemperatur beschreibt, kann ebenfalls über die Kühlformel

(Gleichung 3) ermittelt werden. Differenziert man diese partiell, ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$dt_N = \frac{T_M - T_C}{T_C - T_W} \cdot \frac{s^2}{a_{\text{eff}} \cdot \pi^2} \cdot \frac{1}{T_M - T_W} \cdot dT_W \quad (28)$$

Setzt man Gleichung 28 in Gleichung 27 ein, erhält man:

$$dv = -v \cdot K_4 \cdot \frac{T_M - T_C}{T_M - T_W} \cdot dT_W \quad (29)$$

Hierbei entspricht die Konstante  $K_4$  algebraisch der Konstanten  $K_2$ .

Gleichung 18 lautet nun in Differenzenschreibweise:

$$\frac{\Delta m}{m_0} = K_1 \cdot \Delta p_N - K_2 \cdot \Delta T_M + K_3 \cdot (T_C - T_W) \cdot \Delta t_N + K_4 \cdot \frac{T_M - T_C}{T_M - T_W} \cdot \Delta T_W \quad (30)$$

mit

$$\Delta p_N = \frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot \Delta W_E \quad (31)$$

und

$$T_C = T_W + \frac{8}{\pi^2} \cdot (T_M - T_W) \cdot e^{-K_5 \cdot t_N} \quad (32)$$

mit

$$K_5 = \frac{a_{\text{eff}} \cdot \pi^2}{s^2} \quad (33)$$

Die Gleichungen 30, 31 und 32 bilden die Grundlage des physikalischen Modells für den Qualitätsregler in Hinblick auf die Qualitätsgröße Formteilmasse. Soll diese konstant sein ( $\Delta m = 0$ ), muss die rechte Seite von Gleichung 30 null sein.

Sind keine Abweichungen der Einflussgrößen  $\Delta T_M$ ,  $\Delta t_N$  und  $\Delta T_W$  gegeben, kann es aufgrund von Chargenschwankungen und damit verbundenen Viskositätsänderungen dennoch zu abweichenden Formteilmassen kommen. In diesem Fall verliert Gleichung 30 ihre Gültigkeit, und die Konstanten  $K_1$  bis  $K_5$  müssen neu ermittelt werden. Über die Verknüpfung von Einspritzarbeit und Nachdruckhöhe in Gleichung 31 ist aber eine angemessene Kompensation der Abweichungen möglich. Durch Wechselwirkung der Gleichungen 30 und 31 können zudem auch Störungen im Werkzeug erkannt werden.

Für eine Prozessführung mit veränderlichen Nachdruckzeiten findet die Kombination von Gleichung 32 und 30 Anwendung. Hält man die Siegeltemperatur konstant, führt dies in Verbindung mit einem konstanten Nachdruck zu konstanten Formteilmassen.

Die Konstanten  $K_1$  bis  $K_5$  und der Exponent  $N$  müssen in der Lernphase des Qualitätsreglers über Parametervariationen im Rahmen von Einfaktorversuchsplänen ermittelt werden. Hierbei wird ausgehend von einem optimierten Betriebspunkt jeweils eine Prozessgröße in kleinen Stufen verändert, während die übrigen unverändert bleiben. Für den Bereich nahe des Betriebspunktes können die Zusammenhänge als linear gesehen werden.

Für  $K_1$  ergibt sich aus Gleichung 30 mit  $\Delta T_M$ ,  $\Delta t_N$ ,  $\Delta T_W = 0$  und  $\Delta p_N \neq 0$ :

$$K_1 = \frac{\Delta m}{m_0} \cdot \frac{1}{\Delta p_N} \quad (34)$$

Für  $K_2$  erhält man aus Gleichung 30 mit  $\Delta p_N$ ,  $\Delta t_N$ ,  $\Delta T_W = 0$  und  $\Delta T_M \neq 0$ :

$$K_2 = -\frac{\Delta m}{m_0} \cdot \frac{1}{\Delta T_M} \quad (35)$$

Für  $K_3$  ergibt sich nach Gleichung 30 und 31 mit  $\Delta p_N$ ,  $\Delta T_M$ ,  $\Delta T_W = 0$  und  $\Delta t_N \neq 0$ :

$$\frac{\Delta m}{m_0} = K_3 \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot (T_M - T_W) \cdot e^{-K_5 \cdot t_N} \cdot \Delta t_N \quad (36)$$

Hierbei sind mindestens zwei Wertepaare  $(\Delta m_1, \Delta t_{N1})$  und  $(\Delta m_2, \Delta t_{N2})$  zu ermitteln. Die Konstante  $K_5$  ergibt sich aus

$$\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{e^{-K_5 \cdot t_{N1}} \cdot \Delta t_{N1}}{e^{-K_5 \cdot t_{N2}} \cdot \Delta t_{N2}} \quad (37)$$

mit

$$\Delta t_{N1} = t_{N1} - t_{N0} \quad \text{und} \quad \Delta t_{N2} = t_{N2} - t_{N0} \quad (38)$$

zu

$$K_5 = \frac{\ln\left(\frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} \cdot \frac{\Delta t_{N2}}{\Delta t_{N1}}\right)}{\Delta t_{N2} - \Delta t_{N1}} \quad (39)$$

Die Konstante  $K_3$  errechnet sich schließlich aus:

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\frac{\Delta m_1 \cdot e^{-K_5 \cdot t_{N1}}}{m_0}}{\frac{8}{\pi^2} \cdot (T_{M0} - T_{W0}) \cdot \Delta t_{N1}} + \frac{\frac{\Delta m_2 \cdot e^{-K_5 \cdot t_{N2}}}{m_0}}{\frac{8}{\pi^2} \cdot (T_{M0} - T_{W0}) \cdot \Delta t_{N2}} \right] \quad (40)$$

Für  $K_4$  folgt aus Gleichung 30 mit  $\Delta p_N, \Delta T_M, \Delta t_N = 0$  und  $\Delta T_W \neq 0$ :

$$\frac{\Delta m}{m_0} = K_4 \cdot \frac{T_{M0} - T_C}{T_{M0} - T_W} \cdot \Delta T_W \quad (41)$$

bzw.

$$K_4 = \frac{\Delta m}{m_0} \cdot \frac{T_{M0} - T_W}{T_{M0} - T_C} \cdot \frac{1}{\Delta T_W} \quad (42)$$

Der Exponent  $N$  wird aus Gleichung 30 und 31 mit  $\Delta t_N, \Delta T_W = 0$  und  $\Delta T_M \neq 0$  ermittelt. Die MasseTemperatur wird variiert und der Nachdruck solange angepasst, bis die Masseabweichung  $\Delta m$  null ist. Hierbei wird die Einspritzarbeit gemessen, und der Exponent  $N$  kann nach Gleichung 45 berechnet werden. Aus Gleichung 30 und 31 folgt mit  $\Delta m = 0$ :

$$K_1 \cdot \frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot \Delta W_E = K_2 \cdot \Delta T_M \quad (43)$$

Mit Gleichung 11 vereinfacht sich diese Beziehung zu

$$K_1 \cdot N \cdot \frac{p_N}{W_E} \cdot \Delta W_E = K_2 \cdot \Delta T_M \quad (44)$$

bzw.

$$N = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{\Delta T_M}{W_{E0} - W_E} \cdot \frac{W_E}{p_N} \quad (45)$$

## 2.2.2 Qualitätsgröße Formteilabmessungen

Ist ein definiertes, konstantes Längenmaß für die Qualität des Formteils entscheidender als eine konstante Formteilmasse, kann man nach [2] ausgehend von den in Abschnitt 2.2.1 erläuterten Zusammenhängen zwischen der Masse des Formteils und den Prozessgrößen die entsprechenden Beziehungen für die Formteilabmessungen herleiten.

Der konstant zu haltenden Formteilmasse  $m_0$  wird ein konstantes Formteilvolumen

$$V_0 = l_0 \cdot b_0 \cdot h_0 \quad (46)$$

zugeordnet.

Wird die Formteilmasse konstant gehalten, werden sich die Abmessungen des Formteils zu

$$V = l \cdot b \cdot h \quad (47)$$

verändern.

Mit Gleichung 47 folgt aus Gleichung 17:

$$dm = -\frac{l \cdot b \cdot h}{v^2} \cdot dv = -m \cdot \frac{dv}{v} \quad (48)$$

Nach Umformung erhält man

$$l \cdot b \cdot h = m \cdot v \quad (49)$$

Und durch Logarithmieren folgt

$$\ln l + \ln b + \ln h = \ln m + \ln v \quad (50)$$

Nach totaler Differentiation ergibt sich aus Gleichung 50

$$\frac{1}{l} \cdot dl + \frac{1}{b} \cdot db + \frac{1}{h} \cdot dh = \frac{1}{m} \cdot dm + \frac{1}{v} \cdot dv \quad (51)$$

bzw. in Differenzenschreibweise:

$$\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta v}{v} \quad (52)$$

Die Abmessungen  $\Delta l$ ,  $\Delta b$  und  $\Delta h$  sind miteinander gekoppelt und werden durch  $\Delta m$  und  $\Delta v$  bestimmt. Folgende Zusammenhänge (Gleichungen 53, 54 und 55) können formuliert werden [2]:

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta l}{l} = K_l \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad (53)$$

$$\frac{\Delta b}{b} \approx \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta b}{b} = K_b \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad (54)$$

$$\frac{\Delta h}{h} \approx \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta h}{h} = K_h \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \quad (55)$$

Die nachfolgenden Herleitungen werden nur für die Länge  $l$  angeschrieben, die Beziehungen für die Breite  $b$  und die Höhe  $h$  ergeben sich analog. Aus den Gleichungen 52 bis 55 folgt

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ -\frac{\Delta v}{v} + (K_b + K_h) \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta v}{v}} \right\} \quad (56)$$

Ausgehend von diesem grundlegenden Zusammenhang (Gleichung 56) kann man nun über den Faktor  $\frac{\Delta v}{v}$  die Beziehungen zwischen der Formteillänge und den Prozessparametern  $\Delta p_N(W_E)$ ,  $\Delta T_M$ ,  $\Delta t_N$ , und  $\Delta T_W$  finden.

Mit Gleichung 19 folgt für die Abhängigkeit der Länge vom Nachdruck

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ \kappa \cdot \Delta p_N - (K_b + K_h) \cdot \sqrt[3]{\kappa} \cdot \sqrt[3]{\Delta p_N} \right\} \quad (57)$$

$K_b$ ,  $K_h$  und die Kompressibilität  $\kappa$  werden durch die Konstanten A und B ersetzt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ A \cdot \Delta p_N - B \cdot \sqrt[3]{\Delta p_N} \right\} \quad (58)$$

Für den Zusammenhang zwischen Formteillänge und Massetemperatur ergibt sich mit Gleichung 23:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} + \left\{ \alpha \cdot \Delta T_M - (K_b + K_h) \cdot \sqrt[3]{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\Delta T_M} \right\} \quad (59)$$

Mit den zusammenfassenden Konstanten C und D folgt

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} + \left\{ C \cdot \Delta T_M - D \cdot \sqrt[3]{\Delta T_M} \right\} \quad (60)$$

Die entsprechende Beziehung für die Nachdruckzeit findet lässt sich über Gleichung 26 herleiten. Die Konstante  $K_3$  kann dabei mit den Gleichungen 27 und 24 folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$K_3 = \frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot a_{eff}}{\bar{s}^2} \quad (61)$$

Dies führt für die Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit zu:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ \frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot a_{\text{eff}}}{s^2} \cdot \Delta t_N - (K_b + K_h) \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot a_{\text{eff}}}{s^2} \cdot \Delta t_N} \right\} \quad (62)$$

und mit Einführung der Konstanten E und F

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ E \cdot \Delta t_N - F \cdot \sqrt[3]{\Delta t_N} \right\} \quad (63)$$

Der Zusammenhang zwischen Länge und Werkzeugwandtemperatur ergibt sich über Gleichung 29. Mit der algebraischen Entsprechung von  $K_4$  und  $K_2$  resultiert:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ \alpha \cdot \frac{T_M - T_C}{T_M - T_W} \cdot \Delta T_W - (K_b + K_h) \cdot \sqrt[3]{\alpha \cdot \frac{T_M - T_C}{T_M - T_W} \cdot \Delta t_N} \right\} \quad (64)$$

Führt man die Konstanten G und H ein, folgt

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta m}{m} - \left\{ G \cdot \Delta T_W - H \cdot \sqrt[3]{\Delta t_N} \right\} \quad (65)$$

Die Konstanten A bis H sind wiederum über Parametervariationen in der Lernphase des Qualitätsreglers zu ermitteln. Da die Gleichungen 58, 60, 63 und 65 jeweils zwei Unbekannte haben, sind hierzu für jede Konstante zwei Wertepaare mit unterschiedlichen Einstellungen des betrachteten Prozessparameters herzustellen und Formteilmassen und -längen zu messen.

Die Bestimmungsgleichungen für die Konstanten A und B lauten:

$$A = \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l} - \frac{\Delta m_2}{m}}{\Delta p_{N1}^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p_{N2}^{\frac{1}{3}} - \Delta p_{N2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l} - \frac{\Delta m_1}{m}}{\Delta p_{N1} - \Delta p_{N1}^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta p_{N2}^{\frac{2}{3}}} \quad (66)$$

$$B = \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l} - \frac{\Delta m_1}{m}}{\Delta p_{N1}^{\frac{1}{3}}} + \Delta p_{N1} \cdot \left( \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l} - \frac{\Delta m_2}{m}}{\Delta p_{N1} \cdot \Delta p_{N2}^{\frac{1}{3}} - \Delta p_{N1}^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta p_{N2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l} - \frac{\Delta m_1}{m}}{\Delta p_{N1}^{\frac{4}{3}} - \Delta p_{N1}^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p_{N2}^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (67)$$

Für die C und D ergeben sich:

$$C = \frac{\frac{\Delta m_2 - \Delta l_2}{m - l}}{\Delta T_{M1}^{2/3} \cdot \Delta T_{M2}^{1/3} - \Delta T_{M2}} - \frac{\frac{\Delta m_1 - \Delta l_1}{m - l}}{\Delta T_{M1} - \Delta T_{M1}^{1/3} \cdot \Delta T_{M2}^{2/3}} \quad (68)$$

$$D = \frac{\frac{\Delta m_1 - \Delta l_1}{m - l}}{\Delta T_{M1}^{1/3}} + \Delta T_{M1} \cdot \left( \frac{\frac{\Delta m_2 - \Delta l_2}{m - l}}{\Delta T_{M1} \cdot \Delta T_{M2}^{1/3} - \Delta T_{M1}^{1/3} \cdot \Delta T_{M2}} - \frac{\frac{\Delta m_1 - \Delta l_1}{m - l}}{\Delta T_{M1}^{4/3} - \Delta T_{M1}^{2/3} \cdot \Delta T_{M2}^{2/3}} \right) \quad (69)$$

E und F folgen zu

$$E = \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l - m}}{\Delta t_{N1}^{2/3} \cdot \Delta t_{N2}^{1/3} - \Delta t_{N2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta t_{N1} - \Delta t_{N1}^{1/3} \cdot \Delta t_{N2}^{2/3}} \quad (70)$$

$$F = \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta t_{N1}^{1/3}} + \Delta t_{N1} \cdot \left( \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l - m}}{\Delta t_{N1} \cdot \Delta t_{N2}^{1/3} - \Delta t_{N1}^{1/3} \cdot \Delta t_{N2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta t_{N1}^{4/3} - \Delta t_{N1}^{2/3} \cdot \Delta t_{N2}^{2/3}} \right) \quad (71)$$

Die Beziehungen für G und H lauten:

$$G = \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l - m}}{\Delta T_{W1}^{2/3} \cdot \Delta T_{W2}^{1/3} - \Delta T_{W2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta T_{W1} - \Delta T_{W1}^{1/3} \cdot \Delta p_{N2}^{2/3}} \quad (72)$$

$$H = \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta T_{W1}^{1/3}} + \Delta T_{W1} \cdot \left( \frac{\frac{\Delta l_2 - \Delta m_2}{l - m}}{\Delta T_{W1} \cdot \Delta T_{W2}^{1/3} - \Delta T_{W1}^{1/3} \cdot \Delta T_{W2}} - \frac{\frac{\Delta l_1 - \Delta m_1}{l - m}}{\Delta T_{W1}^{4/3} - \Delta T_{W1}^{2/3} \cdot \Delta T_{W2}^{2/3}} \right) \quad (73)$$

Der Exponent N des physikalischen Modells für die Formteillänge ergibt sich aus Gleichung 58 und Gleichung 60 mit  $\Delta t_N, \Delta T_W = 0$  und  $\Delta T_M \neq 0$ . Zu seiner Ermittlung variiert man die Massetemperatur und führt den Nachdruck solange nach, bis die Längenabweichung  $\Delta l$  null ist. Dabei wird die Einspritzarbeit gemessen, und der Exponent N kann nach Gleichung 77 ermittelt werden. Aus Gleichung 58 und 60:

$$-A \cdot \frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot \Delta W_E + B \cdot \sqrt[3]{\frac{p_{N0}}{W_{E0}} \cdot N \cdot \left( \frac{W_E}{W_{E0}} \right)^{N-1} \cdot \Delta W_E} = C \cdot \Delta T_M - D \cdot \sqrt[3]{\Delta T_M} \quad (74)$$

Mit Gleichung 11 erhält man:

$$-A \cdot \frac{p_{N0}}{W_E} \cdot N \cdot \Delta W_E + B \cdot \sqrt[3]{\frac{p_{N0}}{W_E} \cdot N \cdot \Delta W_E} = C \cdot \Delta T_M - D \cdot \sqrt[3]{\Delta T_M} \quad (75)$$

Aus Gleichung 75 kann der Exponent N über numerische Methoden ausgewertet werden. Wenn die Konstanten B und D - wie in dieser Arbeit festgestellt wurde - sehr kleine Werte nahe Null annehmen, können sie vernachlässigt werden. Gleichung 75 vereinfacht sich somit zu:

$$-A \cdot \frac{p_{N0}}{W_E} \cdot N \cdot \Delta W_E = C \cdot \Delta T_M \quad (76)$$

Die Bestimmungsgleichung für N lautet sodann

$$N = -\frac{C}{A} \cdot \frac{\Delta T_M}{\Delta W_E} \cdot \frac{W_E}{p_N} \quad (77)$$

## 2.3 Das statistische Modell

Als Alternative zum physikalischen Modell des Qualitätsreglers können die Wirkungsbeziehungen zwischen den Parametern Nachdruck, Massestemperatur, Nachdruckzeit und Werkzeugwandtemperatur und den Qualitätsgrößen Formteilmasse und Formteilabmessungen auch über statistische Methoden ermittelt werden. Wie in [2] festgehalten, lassen sich damit auch ohne Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge durchaus gute Ergebnisse erzielen.

Basis des statistischen Modells ist eine Versuchsplanung in Form eines vollständig faktoriellen Versuchsplanes vom Typ  $2^k$ . Das heißt, es werden k Faktoren auf jeweils zwei Stufen getestet. Der  $2^k$ -Versuchsplan ist ein grundlegendes Werkzeug des DoE (Design of Experiments) und Basis für viele weitere Methoden der Versuchsplanung [3].

Im Fall des Qualitätsreglers wird ein vollständig faktorieller  $2^4$ -Versuchsplan verwendet, wobei 4 Faktoren (allgemein: A, B, C, D) ausgehend von der Grundeinstellung (0) jeweils eine Stufe nach oben ("+") und unten ("−") variiert werden. Es ist notwendig, die physikalischen Werte der Faktorenstufen linear zu transformieren. Beträgt beispielsweise die Grundeinstellung des Nachdrucks 290 bar,

und variiert man diesen Faktor um 10 bar nach oben und unten, also auf 300 bar und 280 bar, so sind die Werte der transformierten Stufen wie in Abbildung 7 dargestellt 0, +1 und -1.

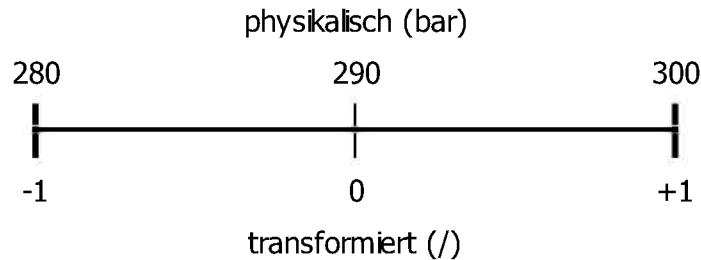


Abbildung 7: physikalische und transformierte Werte der Faktorenstufen am Beispiel Nachdruck

Ein vollständig faktorieller Versuchsplan ist so aufgebaut, dass er beide Stufen eines Faktors mit beiden Stufen aller übrigen Faktoren kombiniert. Es ergeben sich im Falle eines  $2^4$  – Veruchsplanes wie in Tabelle 1 dargestellt insgesamt 16 Faktorstufenkombinationen. Diese werden in der ersten Spalte benannt, wobei die (1) jene Kombination bezeichnet, bei der sich alle Faktoren auf der niedrigen Einstellung befinden. ZP steht für den Zentralpunkt, die Grundeinstellung, bzw. den optimierten Betriebspunkt, von dem ausgehend die Parametervariation stattfindet. Die hohen und niedrigen Faktorstufen werden mit + und – bezeichnet.

Tabelle 1: vollständig faktorieller  $2^4$ -Versuchsplan mit Zentralpunkt

Stufe	Faktor			
	A	B	C	D
<b>(1)</b>	-	-	-	-
<b>a</b>	+	-	-	-
<b>b</b>	-	+	-	-
<b>ab</b>	+	+	-	-
<b>c</b>	-	-	+	-
<b>ac</b>	+	-	+	-
<b>bc</b>	-	+	+	-
<b>abc</b>	+	+	+	-
<b>ZP</b>	0	0	0	0
<b>d</b>	-	-	-	+
<b>ad</b>	+	-	-	+
<b>bd</b>	-	+	-	+
<b>abd</b>	+	+	-	+
<b>cd</b>	-	-	+	+
<b>acd</b>	+	-	+	+
<b>bcd</b>	-	+	+	+
<b>abcd</b>	+	+	+	+

Ein wichtiges Kriterium für einen richtig konstruierten Versuchsplan ist die Orthogonalität. Das bedeutet neben der Bedingung, dass die Stufenabstände äquidistant sein müssen, nach [22]:

- Hohe und niedrige Stufen eines Faktors müssen gleich oft vertreten sein.
- Die Werte der Stufen dürfen innerhalb des Versuchsplanes nicht neu gewählt werden.
- An allen Versuchspunkten müssen gleich viele Wiederholungen durchgeführt werden.
- Fällt ein Messwert aus, darf dieser Platz nicht unbesetzt bleiben, und er muss durch eine Neubestimmung oder einen geeigneten Schätzwert ersetzt werden.

Darüberhinaus bedeutet Orthogonalität, dass es keine Korrelation zwischen den einzelnen Faktoren gibt, und sie somit voneinander unabhängig sind [3]. Weiters ist zu beachten, dass das statistische Modell von linearen Zusammenhängen in der Nähe des Zentralpunktes ausgeht. Dementsprechend kommt der Wahl der variierten Stufengrößen besondere Bedeutung zu. Bei guter Vorkenntnis des Verhaltens der Zielgröße kann man eine enge Stufenweite der Einflussparameter wählen und erhält so auch eine gute Näherung zum realen Verhalten. Der kleinste zulässige Stufenabstand ist durch die doppelte Einstellgenauigkeit des Faktors begrenzt. Stehen wenige Informationen zum Verlauf der Zielgröße zur Verfügung, ist ein großer Stufenabstand zu wählen, was in weiterer Folge jedoch auch ungenauere Ergebnisse liefert. Wie stark die lineare Näherung von den tatsächlichen Verhältnissen abweicht, kann durch hinzufügen eines Zentralpunktes zum  $2^4$ -Versuchsplan überprüft werden.

Aus den nach vollständig faktoriellen Versuchsplänen ermittelten Messergebnissen lassen sich anhand einer Regressionsanalyse die Wirkungen oder Effekte der Einflussfaktoren auf die Zielgröße berechnen. Im Falle eines  $2^4$ -Versuchsplanes sind dies vier Hauptwirkungen (A, B, C, D), sechs Zweifachwirkungen (AB, AC, AD, BC, BD, CD), vier Dreifachwirkungen (ABC, ABD, ACD, BCD) und eine Vierfachwirkung (ABCD). Es ist anzumerken, dass in [2] nicht zwischen Regressionskoeffizienten und Wirkungen unterschieden wird. Laut [1] ist der Effektschätzwert, also der Wert der Wirkung oder Wechselwirkung, jedoch das Doppelte des zugehörigen Regressionskoeffizienten. Diese Betrachtungsweise wird hier im Folgenden beibehalten.

Eine Hauptwirkung ist definiert als die mittlere Veränderung der Zielgröße bei Änderung eines Faktors vom niedrigen auf das hohe Niveau. Sie ergibt sich aus dem

Mittelwert der Differenzen der Versuchsergebnisse bei hoher und niedriger Einstellung eines Faktors und konstanten bzw. paarweise gleichen Einstellungen der übrigen Faktoren. Gleichung 78 zeigt dies am Beispiel der Hauptwirkung A.

$$A = \frac{1}{k/2} \cdot \sum_{i=1}^{k/2} [y(A+) - y(A-)]_{B,C,D=\text{const.}} \quad \text{mit } k = 16 \quad (78)$$

Für die Zweifachwirkungen berechnet man die Wirkung eines Faktors bei hoher und niedriger Stufe eines zweiten Faktors und bildet daraus die Differenz. In Gleichung 79 ist dies beispielhaft für AB angeführt. Die Versuchsergebnisse werden dabei wiederum derart zusammengefasst, dass die übrigen Faktoren C und D paarweise konstant sind.

$$AB = \frac{1}{k/2} \cdot \left( \sum_{i=1}^{k/2} [y(A+) - y(A-)]_{B+} - \sum_{i=1}^{k/2} [y(A+) - y(A-)]_{B-} \right)_{C,D=\text{const.}} \quad \text{mit } k = 16 \quad (79)$$

Die höheren Wechselwirkungen ergeben sich entsprechend.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Berechnung der Effekte stellt die in Tabelle 2 gezeigte Vorzeichentabelle dar. Zur Ermittlung der Haupt- und Wechselwirkungen sind die Messergebnisse der Faktorstufen mit den angegebenen Vorzeichen zu summieren und durch  $k/2$  zu dividieren (Gleichungen 80 bis 94).

*Tabelle 2: Vorzeichentabelle des  $2^4$  - Versuchsplanes*

	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
<b>(1)</b>	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
<b>a</b>	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
<b>b</b>	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
<b>ab</b>	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
<b>c</b>	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
<b>ac</b>	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
<b>bc</b>	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
<b>abc</b>	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
<b>d</b>	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
<b>ad</b>	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
<b>bd</b>	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
<b>abd</b>	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
<b>cd</b>	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
<b>acd</b>	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
<b>bcd</b>	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
<b>abcd</b>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Die Hauptwirkungen A, B, C und D ergeben sich zu:

$$A = \frac{-(1) + a - b + ab - c + ac - bc + abc - d + ad - bd + abd - cd + acd - bcd + abcd}{8} \quad (80)$$

$$B = \frac{-(1) - a + b + ab - c - ac + bc + abc - d - ad + bd + abd - cd - acd + bcd + abcd}{8} \quad (81)$$

$$C = \frac{-(1) - a - b - ab + c + ac + bc + abc - d - ad - bd - abd + cd + acd + bcd + abcd}{8} \quad (82)$$

$$D = \frac{-(1) - a - b - ab - c - ac - bc - abc + d + ad + bd + abd + cd + acd + bcd + abcd}{8} \quad (83)$$

Die Zweifachwirkungen AB, AC, AD, BC, BD, CD sind:

$$AB = \frac{+(1) - a - b + ab + c - ac - bc + abc + d - ad - bd + abd + cd - acd - bcd + abcd}{8} \quad (84)$$

$$AC = \frac{+(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc + d - ad + bd - abd - cd + acd - bcd + abcd}{8} \quad (85)$$

$$AD = \frac{+(1) - a + b - ab + c - ac + bc - abc - d + ad - bd + abd - cd + acd - bcd + abcd}{8} \quad (86)$$

$$BC = \frac{+(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc + d + ad - bd - abd - cd - acd + bcd + abcd}{8} \quad (87)$$

$$BD = \frac{+(1) + a - b - ab + c + ac - bc - abc - d - ad + bd + abd - cd - acd + bcd + abcd}{8} \quad (88)$$

$$CD = \frac{+(1) + a + b + ab - c - ac - bc - abc - d - ad - bd - abd + cd + acd + bcd + abcd}{8} \quad (89)$$

Für die Dreifachwirkungen ABC, ABD, ACD, BCD erhält man:

$$ABC = \frac{-(1) + a + b - ab + c - ac - bc + abc - d + ad + bd - abd + cd - acd - bcd + abcd}{8} \quad (90)$$

$$ABD = \frac{-(1) + a + b - ab - c + ac + bc - abc + d - ad - bd + abd + cd - acd - bcd + abcd}{8} \quad (91)$$

$$ACD = \frac{-(1) + a - b + ab + c - ac + bc - abc + d - ad + bd - abd - cd + acd - bcd}{8} \quad (92)$$

$$BCD = \frac{-(1) - a + b + ab + c + ac - bc - abc + d + ad - bd - abd - cd - acd + bcd + abcd}{8} \quad (93)$$

Die Vierfachwirkung ABCD ist schließlich

$$ABCD = \frac{+(1) - a - b + ab - c + ac + bc - abc - d + ad + bd - abd + cd - bcd + abcd}{8} \quad (94)$$

Um von den Haupt- und Wechselwirkungen auf die Regressionskoeffizienten zu kommen, müssen sie wie zuvor erwähnt durch 2 dividiert werden. Mit ihnen lässt sich das Regressionspolynom des 2<sup>4</sup>-Versuchsplanes anschreiben (Gleichung 95).

$$\begin{aligned} Y = & K + 1/2 \cdot (A \cdot X_1 + B \cdot X_2 + C \cdot X_3 + D \cdot X_4 + AB \cdot X_1 \cdot X_2 + AC \cdot X_1 \cdot X_3 + AD \cdot X \\ & + BC \cdot X_2 \cdot X_3 + BD \cdot X_2 \cdot X_4 + CD \cdot X_3 \cdot X_4 + ABC \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + ABD \cdot X_1 \cdot X_2 \\ & + ACD \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + BCD \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + ABCD \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4) \end{aligned} \quad (95)$$

K (Gleichung 96) ist der Mittelwert des gesamten Versuches und wird auch Regressionskonstante bezeichnet [1]. Das Total T ist die Summe aller Messergebnisse n. Im Falle eines Versuchsplanes mit Zentralpunkt müssen dessen Ergebnisse auch mitberücksichtigt werden.

$$K = \frac{T}{n} \quad (96)$$

X<sub>1</sub> bis X<sub>4</sub> stehen für transformierte Einstellstufen der Faktoren A bis D. Mit dem Regressionspolynom ist es also möglich, für eine beliebige Einstellungskonfiguration, deren Faktorstufen auf das transformierte Koordinatensystem bezogen wurden, die Antwortgröße zu berechnen.

In der Praxis werden die Dreifach- und höheren Wechselwirkungen oftmals nicht zur Berechnung des Regressionspolynoms herangezogen, da ihre Beiträge zur Antwortgröße meist sehr gering sind, und sie oftmals nicht von der Versuchsstreuung unterschieden werden können (nach [2]).

In diesem Zusammenhang erhebt sich die Frage nach der genauen Bestimmung der Signifikanz der Effekte. Hierzu berechnet man zuerst die Standardabweichung des Gesamtexperiments  $S_e$ . Diese ist die Wurzel des Mittelwertes der Einzelvarianzen  $S_i$  der Messwerte der  $k$  Faktorstufenkombinationen und – falls im Versuchsplan berücksichtigt – des Zentralpunktes:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum S_i^2}{k}} \quad (97)$$

Die Standardabweichung der Effekte  $S_{eff}$  ergibt sich sodann mit der Summe der Einzelbeobachtungen  $N$  zu

$$S_{eff} = S_e \cdot \sqrt{\frac{4}{N}} \quad (98)$$

Im Folgenden wird der Vertrauensbereich der Effekte  $VB_{eff}$  bestimmt. Dieser ergibt sich mit Gleichung 98 und dem entsprechenden Tabellenwert der Student- oder  $t$ -Verteilung (Tabelle 42, Anhang, Seite 124) auf dem gewählten Konfidenzniveau zu

$$VB_{eff} = t_{FG,\alpha} \cdot S_{eff} \quad (99)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Werte der  $t$ -Tabelle für einen oder, wie für die hier angestellten Betrachtungen richtig, für beide Äste der Student-Verteilung angegeben sein können. Der Index  $FG$  in Gleichung 99 steht für die Anzahl der Freiheitsgrade. Diese ergibt sich aus der Anzahl der Faktorstufen  $k$  multipliziert mit der Anzahl der Beobachtungen  $n$  je Stufe minus 1 oder einfacher aus der Summe der Einzelbeobachtungen  $N$  minus der Anzahl der Faktorstufen  $k$  (Gleichung 100).

$$FG = k \cdot (n - 1) = N - k \quad (100)$$

Der Ausdruck  $n - 1$  in Gleichung 100 berücksichtigt, dass zur Berechnung einer Standardabweichung der Mittelwert von den  $n$  Werten der Stichprobe abgezogen wird [3].

Des Weiteren ist es nötig, ein Konfidenzintervall um den Mittelwert  $\mu$  der Stichprobe abzuschätzen, das den wahren Wert mit einer sinnvollen Sicherheitswahrscheinlichkeit einschließt. Dieser Vertrauensbereich wird durch das Konfidenzniveau  $P$  gekennzeichnet (Gleichung 101). Übliche Werte für  $P$  sind 90, 95, 97.5, 99 und 99.9 %.

$$P = (1 - \alpha) \cdot 100 \% \quad (101)$$

$\alpha$  gibt dabei die Irrtumswahrscheinlichkeit an. Sie nimmt üblicherweise Werte von 0.1, 0.05, 0.025, 0.01 oder 0.005 an. Das bedeutet, dass der wahre Mittelwert der Grundgesamtheit mit der Wahrscheinlichkeit  $\alpha$  außerhalb des Konfidenzintervalls liegt. Dieses ist umso kleiner, je kleiner die Sicherheitswahrscheinlichkeit und die Streuung und je größer und die Anzahl der Beobachtungen sind (nach [22]).

Die Grenzen des Vertrauensbereiches berechnen sich zu

$$\text{Konfidenzintervall} = \pm t_{FG,\alpha} \cdot S_E \quad (102)$$

Wie in Abbildung 8 anhand eines Beispiels mit  $FG = 9$  dargestellt, verwendet man in der Praxis oftmals einen 95%-Vertrauensbereich.

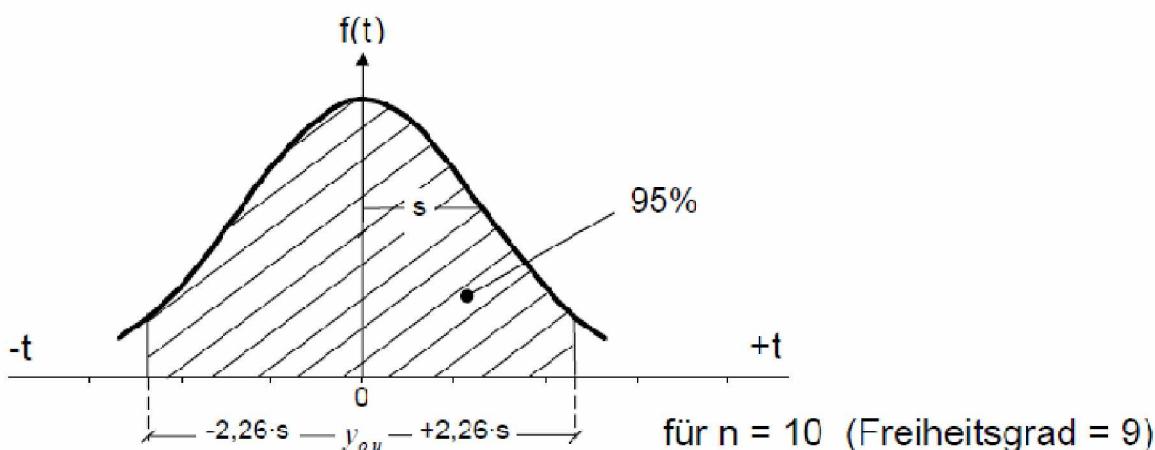


Abbildung 8: 95%-Vertrauensbereich einer Stichprobe vom Umfang  $n = 10$  [1]

Ist nun der Betrag einer Wirkung oder Wechselwirkung größer als der Vertrauensbereich der Effekte, handelt es sich um eine signifikante Wirkung, einen Effekt (Gleichung 103). Das Vorzeichen des Effektes ist statistisch abgesichert.

$$|\text{Wirkung}| \geq \text{VB}_{\text{eff}} \rightarrow \text{Wirkung} = \text{Effekt} \quad (103)$$

Ist die Wirkung betragsmäßig kleiner als  $\text{VB}_{\text{eff}}$  (Gleichung 104), handelt es sich um eine nicht signifikante Wirkung. Diese wird als „Rauschen“ bezeichnet und kann der Versuchsstreuung bzw. zufälligen Fehlern zugeschrieben werden. Das Vorzeichen einer nicht signifikanten Wirkung ist statistisch zweifelhaft und kann real positiv oder negativ sein [1].

$$|\text{Wirkung}| < \text{VB}_{\text{eff}} \rightarrow \text{Wirkung} = \text{Rauschen} \quad (104)$$

Wird ein vollständig faktorieller Versuchsplan mit Zentralpunkt ausgeführt, lässt sich eine Aussage über die Gültigkeit des linearen Ansatzes für den untersuchten Zusammenhang gewinnen (Gleichung 105). Ist der Absolutbetrag der Differenz

zwischen dem Mittelwert  $K$  der Ergebnisse aller Messserien und dem Wert im Zentralpunkt  $y_{ZP}$  kleiner als  $VB_{eff}$ , ist die Gültigkeit des linearen Modells gegeben.

$$|K - y_{ZP}| < VB_{eff} \rightarrow \text{lineares Modell gültig} \quad (105)$$

Im Falle von unreplizierten Faktorenversuchsplänen, also Versuchen, in denen die Anzahl der Beobachtungen  $n$  auf jeder Faktorstufe gleich eins ist, wie z. B. in der Simulation, ist es nicht möglich auf Basis der Messwerte Einzelvarianzen und in weiterer Folge die Standardabweichung der Effekte und deren Signifikanz zu berechnen. Für Versuchspläne mit  $n = 1$  kann man die Zufallsstreuung jedoch mit geeigneten Methoden abschätzen. Eine derartige Methode ist das „Pooling“. Hierbei wird aufgrund subjektiver Überlegungen eine Vorauswahl zwischen signifikanten und (vermutlich) zufälligen Effekten getroffen. In Frage kommen können beispielsweise betragsmäßig sehr kleine, nahe Null gelegene Wirkungen und Wechselwirkungen vieler Faktoren.

Die abgeschätzte Zufallsstreuung der Effekte ergibt sich direkt aus der Wurzel des Mittelwerts der zufälligen Effekte (nach [3]).

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{zufällige Effekte}} (\text{Effekte})^2}{k^2}} \quad (106)$$

Der Freiheitsgrad FG zur Bestimmung des Konfidenzintervalls entspricht der Anzahl der zufälligen Effekte.

$$FG = \text{Anzahl}_{\text{zufällige Effekte}} \quad (107)$$

Diese Vorgehensweise beinhaltet das Risiko, dass signifikante Effekte fälschlicherweise zu zufälligen Wirkungen gezählt werden. Je mehr Faktorstufen ein Versuch aber umfasst, desto weniger wird das Gesamtergebnis durch einzelne Effekte verfälscht. Ab Versuchsplänen vom Typ  $2^5$  mit 32 Faktorstufenkombinationen aufwärts ist dies meist unkritisch, darunter wird empfohlen, nach Möglichkeit mindestens zwei Beobachtungen pro Stufe zu realisieren.

Eine weitere Methode, die Zufallsstreuung und die Signifikanz der Effekte bei Versuchen mit  $n = 1$  zu ermitteln, bietet die Lenth's Method [23]. Grundlegend für dieses Verfahren ist, dass alle Effekte oder Effektschätzwerte  $\hat{\theta}_i$  die gleiche Standardabweichung haben. Der Index  $i$  gibt die Anzahl der Effekte an. Diese ergibt sich zu

$$I = 2^k - 1 \quad (108)$$

Ein  $2^4$ -Faktorenversuch hat insgesamt 15 Wirkungen und Wechselwirkungen als Ergebnis. Als stabilen Schätzwert für die Standardabweichung der Effekte  $\hat{\theta}_i$  führt die Methode den sogenannten Pseudo Standard Error (PSE) ein (Gleichung 109). Dieser berechnet sich aus

$$PSE = 1,5 \cdot \text{median} |\hat{\theta}_i| \quad \text{mit} \quad |\hat{\theta}_i| < 2,5 \cdot s_0 \quad (109)$$

Der PSE ist somit definiert als das 1,5-fache des Medians der Effektschätzwerte, die um Werte, die größer sind als das 2,5-fache der anfänglichen Standardabweichung  $s_0$ , bereinigt wurden. Diese wiederum berechnet sich zu

$$s_0 = 1,5 \cdot \text{median} |\hat{\theta}_i| \quad (110)$$

Der Zahlenwert 1,5 in Gleichung 109 und 110 stellt dabei einen Skalierungsfaktor dar. 2,5 ist eine Beschnittkonstante und beschneidet die Effektschätzwerte statistisch um jene Werte, welche mit aktiven oder signifikanten Effekten assoziiert sind. Durch die genannte Vorgehensweise wird der PSE nicht durch derartige Effekte verfälscht.

Teilt man die  $\hat{\theta}_i$  durch den PSE, erhält man eine der Student- oder t-Verteilung ähnliche Statistik:

$$t_{PSE,i} = \frac{\hat{\theta}_i}{PSE} \quad (111)$$

Nach der Lenth's-Method ist ein Effekt dann signifikant, wenn der Betrag  $|t_{PSE,i}|$  einen kritischen Tabellenwert, definiert durch die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  und die gegebene Anzahl  $i$  von Effekten, überschreitet. In Tabelle 43 und Tabelle 44 im Anhang sind die kritischen Werte für die Lenth's Method für einen einseitigen Vertrauensbereich angegeben. Um die Werte für beide Äste der Verteilung zu erhalten, kann man die gleiche Tabelle benutzen, wobei der  $\alpha$ -Wert der zweiseitigen Verteilung jedoch zu halbieren ist. Für nicht angegebene Werte von  $\alpha$  können die gesuchten Tabellenwerte auch linear interpoliert werden. Die Tabellen unterscheiden zwischen IER (Individual Error Rate) und EER (Experimentwise Error Rate). Resultate unter Verwendung der EER-Werte (Anhang, Tabelle 44) sind laut [23] zu streng und bergen das Risiko, dass signifikante Effekte nicht als solche erkannt werden. Somit empfiehlt sich die Verwendung der IER-Werte (Anhang, Tabelle 43). Sollte hierbei ein nicht signifikanter Effekt fälschlicherweise als signifikant detektiert werden, ist dies nicht so schwerwiegend wie ein Nicherkennen eines signifikanten Effektes.

Hat man nun über empirische oder statistische Methoden signifikante Effekte von zufälligen getrennt, können diese aus dem Regressionspolynom eliminiert werden. Sollte dabei eine Hauptwirkung als nicht signifikant klassifiziert werden, darf sie nur vernachlässigt werden, wenn auch alle ihre Zweifach- und höheren Wechselwirkungen eliminiert werden [1].

### 3 Experimentelles

#### 3.1 Betrachtetes Formteil

Die in der vorliegenden Arbeit angestellten Untersuchungen wurden an dem Formteil „Signalblende“ durchgeführt. Bei diesem Formteil handelt es sich im Grunde um ein plattenförmiges Bauteil mit 4 zylindrischen Fortsätzen und 5 Schnappelementen. Wie in Abbildung 9 dargestellt, wird die Signalblende durch einen 2-fach-Tunnelanguss angespritzt (1). Das Werkzeug bietet zudem die Möglichkeit, angussnah (2) und angussfern (3) Druck- bzw. Temperatursensoren anzubringen. In dieser Arbeit wurde ein kombinierter Druck-/Temperatursensor an Position (2) verwendet.

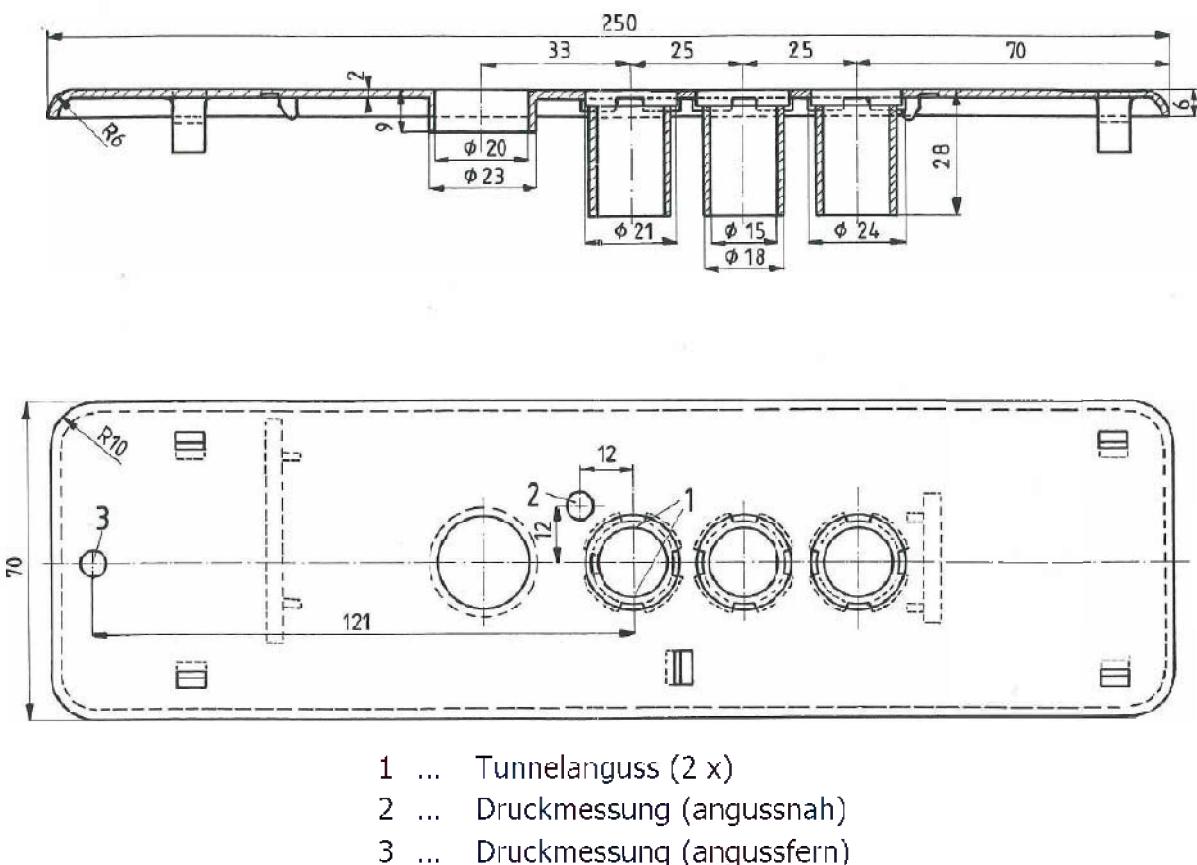


Abbildung 9: Bauteilzeichnung Signalblende

Die Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen das Simulations-Modell des Formteils in gedrehter Raumlage.

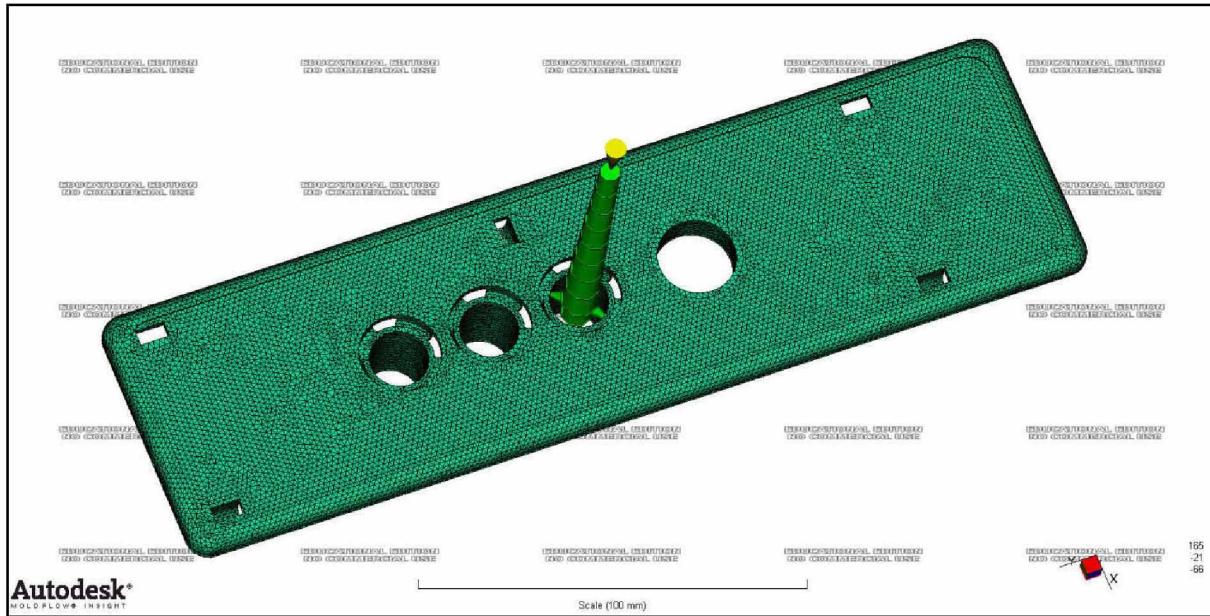


Abbildung 10: Signalblende, Oberseite

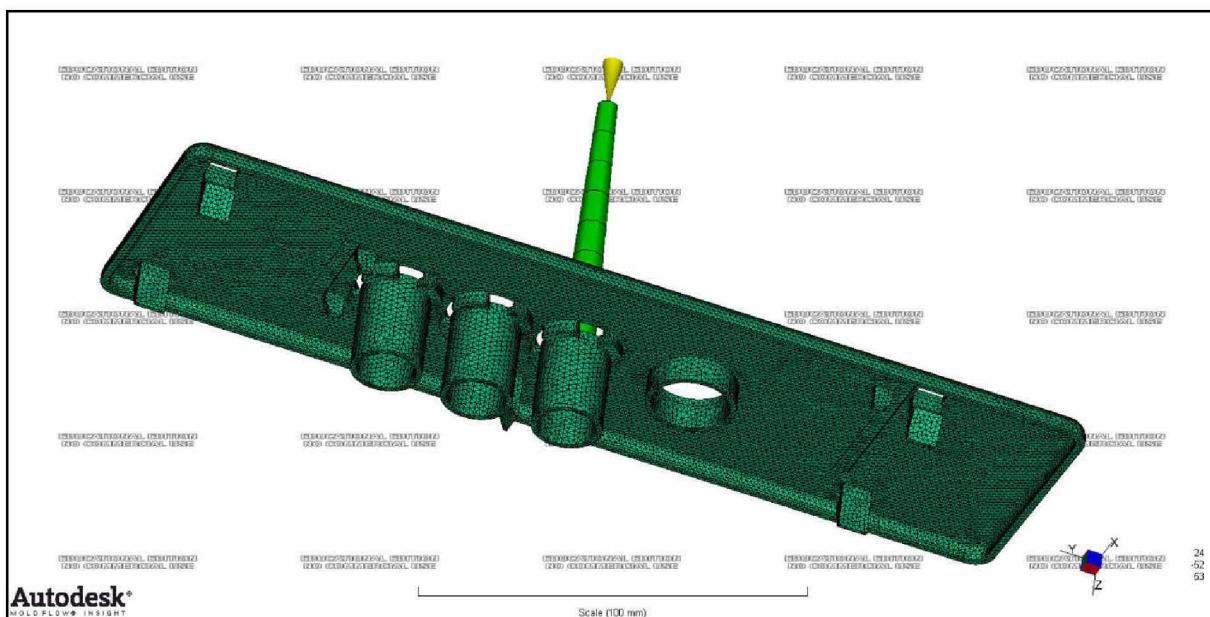


Abbildung 11: Signalblende, Unterseite

## 3.2 Material

Als Versuchsmaterial wurde ein handelsübliches Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) vom Typ Novodur P2H-AT eingesetzt. In ersten Vorversuchen wurde vorhandenes Restmaterial verwendet. Die in dieser Arbeit zur Auswertung herangezogenen Versuchsreihen wurden mit Neuware durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass sich das neu angeschaffte Granulat (II) trotz der selben Typenbezeichnung erheblich vom früheren (I) unterscheidet. Wie in Abbildung 13 und Abbildung 12 gut zu erkennen, besitzt I im Vergleich zu II eine reinweiße, deckende Einfärbung, während II gelblich

und in geringem Maße lichtdurchlässig erscheint. Zudem unterscheiden sich die beiden Materialien auch in der Granulatform. I hat eine gleichmäßige, zylindrische Form, was auf Unterwassergranulierung hindeutet, und II hat unregelmäßige, linsenförmige Granulatkörper, was auf Granulierung mit Heißabschlag schließen lässt.



*Abbildung 12: Signalblende aus Novodur P2H-AT; im Hintergrund Material I, im Vordergrund das neuere Material II*



*Abbildung 13: unterschiedliche Granulattypen des Novodur P2H-AT; früheres Material links (I) und Neuware rechts (II)*

Eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede könnte im Wechsel des Materialherstellers liegen. Ursprünglich wurde Novodur P2H-AT von der Bayer

Material Science AG, Leverkusen, D hergestellt. Im Jahr 2005 wurde die dieses Material betreffende Geschäftssparte unter dem Namen Lanxess AG, Leverkusen, D ausgegliedert. 2007 übernahm die Ineos Group Limited, Lyndhurst, GB mehrheitlich und in weiterer Folge zu 100 % die ABS-Sparte von Lanxess und führte sie als Ineos ABS (Deutschland) GmbH, Köln, D weiter [11, 14]. In diesem Zusammenhang erscheint es wahrscheinlich, dass es im Zuge des Herstellerwechsels auch zu Änderungen in der Rezeptur und im Herstellprozess dieses ABS-Typs gekommen ist. In den verfügbaren Datenblättern von Bayer und Ineos (Tabelle 45 und Tabelle 46, Anhang) sind jedoch identische Materialdaten angegeben.

Wie erwähnt wurde für die Versuche in dieser Arbeit ausschließlich der neuere Typ des Materials (II) herangezogen. Laut Datenblatt (Tabelle 46, Anhang) besitzt Novodur P2H-AT nach ISO 1133 eine Schmelz-Volumenfließrate (MVR) von 37 cm<sup>3</sup>/10 min (220 °C, 10 kg). Als Verarbeitungstemperatur werden 240 °C empfohlen. Die Werkzeugtemperatur soll laut Vorgabe bei 70 °C liegen. Das Materialdatenblatt enthält keine Information zum zulässigen Restfeuchtegehalt des Novodur P2H-AT.

### 3.3 Eingesetzte Geräte und Maschinen

#### 3.3.1 Spritzgießmaschine

Die experimentellen Versuche zum physikalischen und zum statistischen Modell des Qualitätsreglers wurden auf einer Spritzgießmaschine vom Typ Engel ES330/80H, Baujahr 1990 der Engel Austria GmbH, Schwertberg, A durchgeführt. Bei dieser Maschine handelt es sich um eine hydraulische Maschine mit Kniehebelsystem. Sie hat eine Schließkraft von 80 t und einen maximalen Einspritzdruck von 1000 bar. Der Durchmesser der eingesetzten Schnecke ist 45 mm. In Tabelle 3 sind die Einstelldaten für die Spritzgießmaschine angeführt.



Abbildung 14: Spritzgießmaschine Engel ES330/80H

Tabelle 3: Einstelldaten an der Spritzgießmaschine

Parameter	Wert	Einheit
Dosiervolumen	90,7	cm <sup>3</sup>
Umschaltpunkt	49	cm <sup>3</sup>
Einspritzvolumenstrom	127,2	cm <sup>3</sup> /s
max. Einspritzdruck	580	bar
Nachdruckzeit	2 - 6	s
Restkühlzeit	13,7 - 17,7	s
Gesamtzykluszeit	31,53	s
Nachdruck	270 - 310	bar
Zylinder-Heizzone 1	250 - 270	°C
Zylinder-Heizzone 2	255 - 265	°C
Zylinder-Heizzone 3	250 - 260	°C
Zylinder-Heizzone 4	245 - 255	°C
Werkzeugtemperatur	60 - 80	°C

### 3.3.2 Temperiergerät

Die Kühlung bzw. Temperierung des Spritzgießwerkzeuges erfolgte mit einem Temperiergerät der Type HB Therm Series 3 HB-W 140-12A des Herstellers Grossenbacher Apparatebau AG, St. Gallen, CH. Bei dem Gerät handelt es sich um ein Wassertemperiergerät mit einer maximalen Wassertemperatur von 140 °C bei einem maximalen Systemdruck von 8 bar. Die Durchflussrate dieses Temperiergerätes beträgt 7 l/min bei einem Gerätевolumen von 6,5 l.

### 3.3.3 Druck-/Temperatursensor und Messdatenaufnahme

Für die Messung der angussnahen Druck- und Werkzeugwandtemperaturwerte wurde ein kombinierter Druck- / Temperatursensor (p-T-Sensor) des Typs 6190CA0 der Kistler Instrumente AG, Winterthur, CH verwendet (Abbildung 15). Dieser Sensor hat einen Messbereich von 0 – 200 °C und 0 – 2000 bar [17]. Zur Messdatenerfassung kam ein Gerät des Modells Spider 8 (Abbildung 16) der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, D zum Einsatz. Die Druckmesswerte mussten zudem über einen Verstärker der Kistler Instrumente AG der Type 5001 SN verstärkt werden. Die Temperaturmesswerte konnten der Messdatenerfassung direkt zugeführt werden.

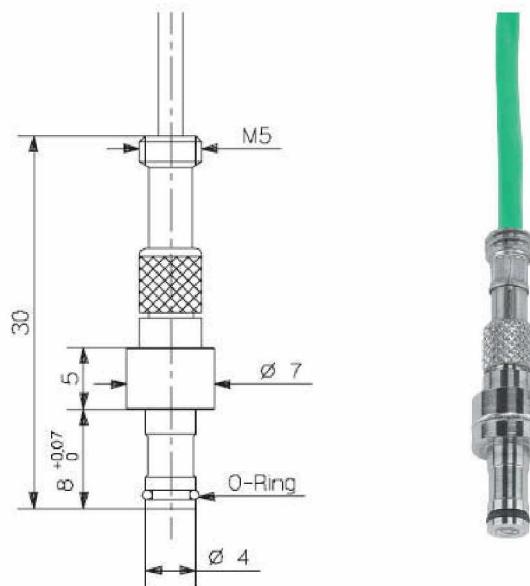


Abbildung 15: p-T-Sensor 6190CA0 von Kistler Instrumente AG, Winterthur, CH [17]

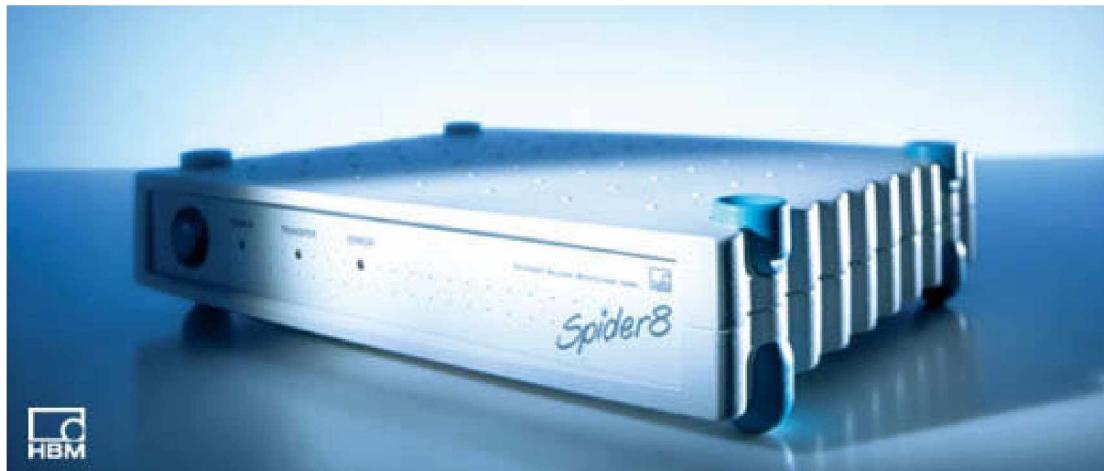


Abbildung 16: Spider 8 zur Messdatenerfassung [12]

### 3.3.4 Trockenlufttrockner

Zur Vortrocknung des in den Versuchen verwendeten Materials wurde ein Trockenlufttrockner vom Typ Motan Trockenlifterzeuger MDC 100 HT des Herstellers Motan GmbH, Isny im Allgäu, D mit einer Heizleistung von 9 kW und einer maximalen Trockenluftmenge von 100 m<sup>3</sup>/h verwendet.

### 3.3.5 Waage

Die Formteilmasse der Versuchsteile wurde mit einer wie in Abbildung 17 gezeigten Laborwaage vom Typ Kern EG 620-3NM der Kern & Sohn GmbH, Balingen, D gemessen.



Abbildung 17: Laborwaage der Reihe Kern EG [16]

Diese Waage hat einen maximalen Wägebereich bis 620 g bei einer Auflösung von 0,001 g und einer Reproduzierbarkeit von ebenfalls 0,001 g. Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um eine Waage der Genauigkeitsklasse I. Diese wird definiert durch die relative Auflösung, dem Quotienten aus der Höchstlast und der Mindestauflösung bzw. dem Eichwert  $e$  (Gleichung 112) [18].

$$\frac{\text{Höchstlast}}{\text{Mindestauflösung}} = \frac{620 \text{ g}}{0,001 \text{ g}} = 620000 (/) \quad (112)$$

Der Mindestwert für eine Einstufung in die Genauigkeitsklasse I beträgt 50000 (/) (Tabelle 4).

*Tabelle 4: Genauigkeitsklassen von Waagen [18]*

Klasse	Eichwert $e$	Mindestlast	Max/e	
			Mindestwert	Höchstwert
<b>I</b> Feinwaagen	$0,001 \text{ g} \leq e$	$100 \text{ e}$	50000	-
<b>II</b> Präzisionswaagen	$0,001 \text{ g} \leq e \leq 0,05 \text{ g}$ $0,1 \text{ g} \leq e$	$20 \text{ e}$ $50 \text{ e}$	100 5000	100000 100000
<b>III</b> Handelswaagen	$0,1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$ $5 \text{ g} \leq e$	$20 \text{ e}$ $20 \text{ e}$	100 500	10000 10000
<b>III</b> Grobwaagen	$5 \text{ g} \leq e$	$10 \text{ e}$	100	1000

Aufgrund der Größe der zu wägenden Teile kam ein händisch angefertigter, die Waage vollständig umschließender Windschutz aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit Schiebetür zum Einsatz (Abbildung 18). Um die elektrostatische Aufladung abzuleiten, wurde das Gehäuse über ein Erdungskabel mit dem Stahlrahmen des hinter dem Wägetisch befindlichen Ablagetisches verbunden. Zudem wurde das Gehäuse innen und außen umlaufend mit einem handelsüblichen, metallisierten Klebeband aus dem Heizungsinstallationsbedarf beklebt. Um die Wägeergebnisse bzw. das Einschwingen der Waage nicht durch umgebungsbedingte Erschütterungen zu verfälschen, wurde sie auf einem Laborwägetisch mit Granitarbeitsfläche und separatem Arbeitsrahmen positioniert. Beide Teile des Tisches sind über eigene Gestelle auf Elastomerelementen zum Boden hin gelagert. Die Auflagefläche des Windschutzes auf der Granitplatte wurde wiederum mit metallisiertem Klebeband beklebt.

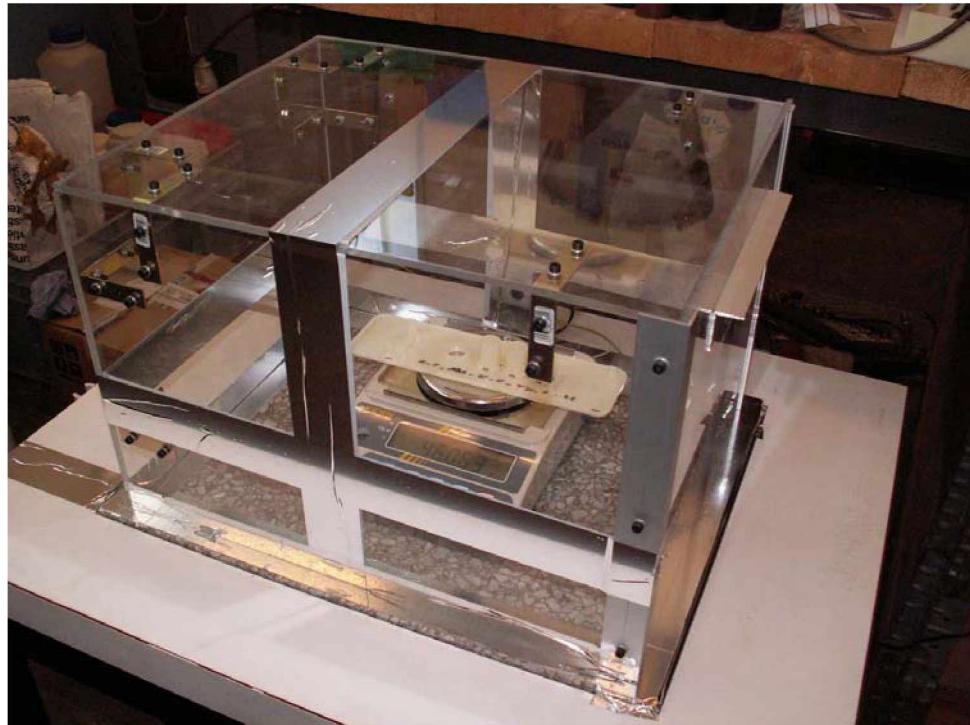


Abbildung 18: Waage mit Windschutz und Wägetisch

Wie auch in [19] festgehalten, kann der Einfluss der elektrostatischen Aufladung, bzw. des Potentialunterschiedes zwischen Wägegut, Gehäuse und Waage ein durchaus nicht unerheblicher sein. Wie in Abbildung 19 dargestellt, kommt es zu einer Verfälschung der Messergebnisse hin zu scheinbar niedrigeren Gewichtswerten, wenn Wägegut und Gehäuse vom Vorzeichen her unterschiedlich geladen sind, da sich die beiden Ladungen anziehen. Besitzen die Ladungen der beiden Komponenten das gleiche Vorzeichen, kommt es aufgrund von gegenseitiger Abstoßung zu scheinbar höheren Gewichtswerten des gewogenen Gutes.

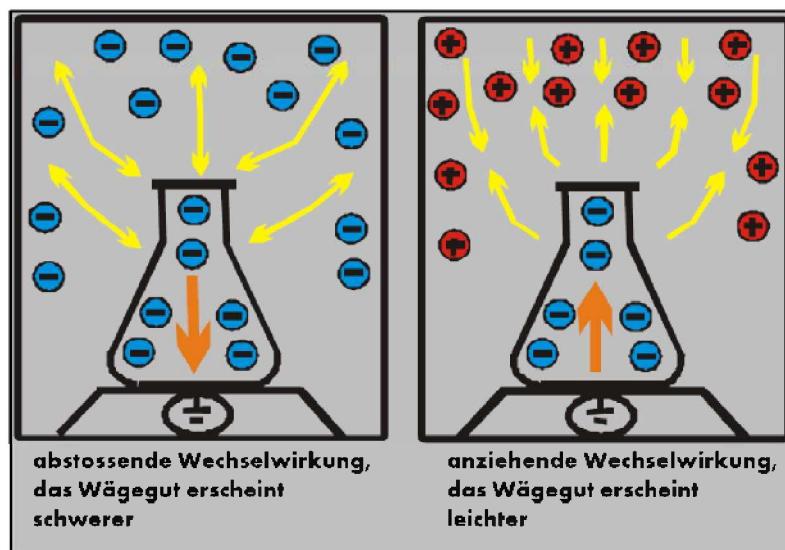


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Effektes der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen Wägegutes und Gehäuse [19]

Weiterführende Möglichkeiten, der elektrostatischen Aufladung zu begegnen, wären die Verwendung von Antistatik-Spray oder der Einsatz eines Ionisierungsgebläses. Zudem empfiehlt sich das Tragen von Kleidung aus Naturfasern oder gar ESD (Electrostatic Discharge)-Arbeitskleidung.

### 3.3.6 Messschieber

Zur Messung der Formteillänge wurde ein Messschieber des Typs 300mm Zif. A/I/T 24M von Measuring Instruments Christian Schulz, Kloster-Lehnin, D mit einer Auflösung von 0,01 mm verwendet (Abbildung 20). Das Gerät besitzt ein Prüfzertifikat nach VDI/VDE 2618 reduziert.



Abbildung 20: Messschieber 300mm Zif. A/I/T 24M

## 3.4 Simulation

Die Analysen im Simulationsteil dieser Arbeit wurden mit dem Programm Autodesk Moldflow Insight 2010 (AMI) der Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA durchgeführt. Der Berechnungscomputer war mit einem Microsoft Windows XP 64bit Betriebssystem ausgestattet und verfügte über eine Intel® Core™ i7 CPU mit vier Prozessorkernen mit einer Taktfrequenz von 2,8 GHz und einem Arbeitsspeicher von 8 GB RAM. Die durchschnittliche Rechendauer für eine Analyse betrug 45 min.

Da zum untersuchten Formteil keine CAD-Files verfügbar waren, musste es im Programm Unigraphics NX 4.0 anhand in Papierform vorhandener Teile- und Werkzeugzeichnungen modelliert werden. In den Berechnungen wurde aufgrund der höheren Genauigkeit bei unwesentlich längeren Rechenzeiten dem 3D-Modell gegenüber dem 2,5D-Modell der Vorzug gegeben. Die dreidimensionale Vernetzung des Formteils ergab die Anzahl von rund 580.000 Tetraederelementen. In Tabelle 5 sind die Einstelldaten für die Simulation zusammengefasst.

Tabelle 5: Einstellparameter AMI-Simulation

Parameter	Wert	Einheit
Einspritzzeit	1,2	s
Umschaltpunkt	99	% Volumenfüllung
Nachdruckzeit	2 - 6	s
Restkühlzeit	13,7 - 17,7	s
Einspritz-, Nachdruck- und (Rest-)Kühlzeit	20,9	s
Mold open time	7,25	s
Gesamtzykluszeit	29,35	s
Nachdruck	270 - 310	bar
Massetemperatur	250 - 270	°C
Werkzeugtemperatur	60 - 80	°C

## 3.5 Versuchsdurchführung

In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten wurde der Einfluss der Parameter Nachdruck, Massetemperatur, Nachdruckzeit und Werkzeugwandtemperatur auf die Qualitätsgrößen Formteilmasse und -länge anhand definierter Versuchspläne untersucht. Um die gewählten Faktorstufen gezielt und gut handhabbar einzustellen zu können, wurden anstatt der Massetemperatur die Zylindertemperatur und im Fall der Werkzeugwandtemperatur die Vorlauftemperatur des Temperieraggregats als Einstellparameter gewählt. In weiterer Folge werden die beiden Parameter Düsen- und Werkzeugtemperatur genannt.

### 3.5.1 Versuchskennungen

Um anhand der großen Anzahl an Experimenten und produzierten Versuchsteilen den Überblick zu bewahren, erwies es sich als zielführend, ein System einzuführen, in dem die Formteile eindeutig dem zugehörigen Versuch bzw. der entsprechenden Faktorstufe zugeordnet werden können [2].

Die hier verwendete Versuchsnomenklatur setzt sich wie in Tabelle 6 dargestellt prinzipiell aus 8 Positionen für die Einfaktorversuche und 7 Positionen im Fall der vollfaktoriellen Versuchspläne zusammen. Die einzelnen Positionen sind jeweils durch einen Unterstrich getrennt.

Tabelle 6: Versuchskennungen und mögliche Varianten

Einfaktorenversuche:							2 <sup>4</sup> -Faktorenversuche:						
Q _ S _ ABS _ E _ E _ ND _ E _ 1							Q _ S _ ABS _ E _ M _ A _ 1						
S            TD    F    2							S            B    2						
TN            G    ...							...            ...						
TW            H							P						
I							ZP						

Nachfolgend wird die Bedeutung der einzelnen Bestandteile der Versuchsnomenklatur erklärt:

1. Die erste Position bezeichnet das Kernthema des Versuches. In diesem Fall steht das Q für Qualitätsregler.
2. Die zweite Position repräsentiert das untersuchte Formteil. (S ≡ Signalblende)
3. Die dritte Position steht für das Versuchsmaterial (ABS ≡ Novodur P2H-AT).
4. Position vier unterscheidet zwischen Experiment (≡ E) und Simulation (≡ S).
5. An der fünften Stelle findet die Unterscheidung zwischen Einfaktorversuchen (≡ E) und vollfaktoriellen Versuchen (M ≡ Mehrfaktorenversuch) statt.
6. Die sechste Position beschreibt im Fall der Einfaktorversuche den variierten Parameter (ND ≡ Nachdruck, TD ≡ Düsentemperatur, TN ≡ Nachdruckzeit, TW ≡ Werkzeugwandtemperatur). Endet die Versuchskennung mit der sechsten Stelle, so wird die vollständige, fünf Einstellstufen (siehe Position 7) umfassende Versuchsreihe bezeichnet.

Im Fall der vollfaktoriellen Versuchspläne bezeichnet die sechste Stelle die Faktorstufe. Bei den 16 Stufen eines 2<sup>4</sup>-Faktorenversuchsplans nimmt sie die Werte A bis P an. Das Kürzel ZP steht für die gegebenenfalls als 17. Stufe zusätzlich gemessene Grundeinstellung, den Zentralpunkt. Dieser ist identisch mit der Grundeinstellung G der Einfaktorversuche.

7. Position sieben charakterisiert die Einstellstufe der Einfaktorversuche (G ≡ Grundeinstellung (nur bei Einfaktorversuchen), E ≡ zwei Stufen unter G, F ≡ eine Stufe unter G, H ≡ eine Stufe über G, I ≡ zwei Stufen über G)).  
Bei den vollfaktoriellen Versuchen steht die siebte Stelle als fortlaufende Zahl für die Nummer des Formteils.
8. Die achte Stelle der Versuchskennung der Einfaktorversuche kennzeichnet die Nummer des hergestellten Teiles.

Für die Auswertung der praktischen Versuche wurde bei beiden Versuchsarten eine weitere Stelle der Versuchskennung verwendet, welche eine Unterscheidung der gewonnenen Daten anhand ihrer Herkunft bzw. ihres Dateiformats (dat, txt, xls, cat) ermöglichte. Auf diese Kennung wird hier im Weiteren jedoch nicht Bezug genommen.

### 3.5.2 Messung von Masse und Länge

Die untersuchten Qualitäts- oder Zielgrößen sind die Masse des Formteils ohne Anguss und eine charakteristische Länge am Formteil. Die Wägung der im experimentellen Teil der Arbeit hergestellten Formteile erfolgte mit der in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen Waage. Im Simulationsteil konnte die Formteilmasse den Analyse-Ergebnissen unmittelbar entnommen werden.

Für die Formteillänge wurde der Abstand der innenliegenden Ecken der beiden rechteckigen Durchbrüche an den Positionen zweier Schnappelemente gewählt (Abbildung 21). Dies ermöglichte eine reproduzierbare Positionierung der Schiebelehre. Das betrachtete Längenmaß befindet sich in Bezug auf das Werkzeug in der düsenseitigen Werkzeughälfte und ist daher ein werkzeuggebundenes Maß.

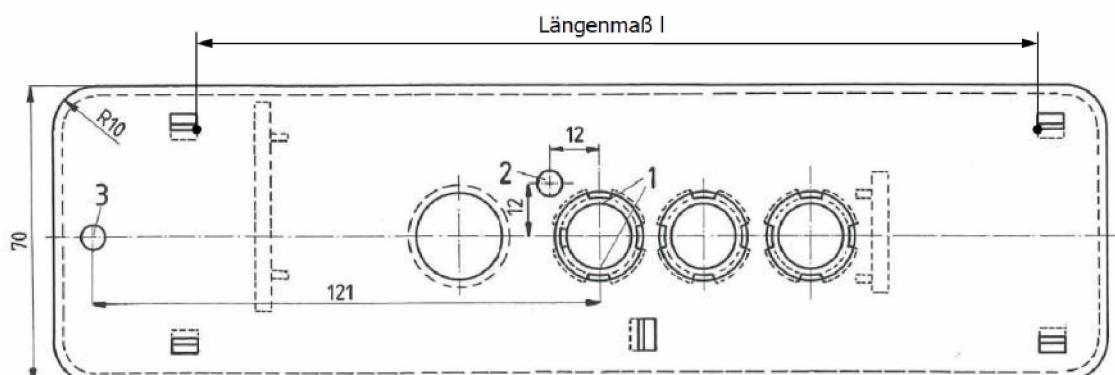


Abbildung 21: untersuchtes Längenmaß I am Formteil

Da das physikalische Modell des Qualitätsreglers schwindungs- und nicht verzugsbedingte Längenänderungen betrachtet, muss der Einfluss des Verzuges vor der Längenmessung eliminiert werden. Dies geschah mittels einer eigens angefertigten Aufnahme aus Stahl mit planer Auflagefläche und einem Flachstahlteil als Gewicht. In Abbildung 22 kann man den Verzug des Formteils relativ zu seiner Auflageebene gut erkennen. Abbildung 23 zeigt die Eliminierung des Verzuges durch die Messauflage und das Gewicht.



Abbildung 22: Verzug des Formteiles Signalblende



Abbildung 23: Verzug eliminiert durch Messauflage und Gewicht

Für die Längenmessung in AMI stellte sich ebenfalls die Frage, wie man die Formteillänge um den Verzug bereinigt ermitteln kann. Unter guter Näherung können der verzugsbehaftete Abstand zwischen den Messpunkten und die eigentlich gesuchte Länge als Kreissehne  $s$  und Bogenlänge  $b$  eines Kreissegments interpretiert werden (Abbildung 24).

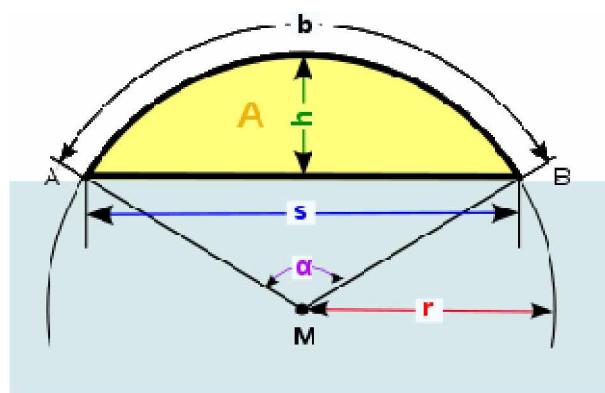


Abbildung 24: Zusammenhänge am Kreissegment [20]

Für die Auswertung wurde im Simulationsprogramm eine Darstellung des Verzuges der Signalblende in z-Richtung, d.h. senkrecht zur Ebene des Formteils gewählt. Unter Verwendung der beiden Punkte 1 und 2 und eines zusätzlichen Eckpunktes 3 des dem Punkt 1 gegenüberliegenden Durchbruches (siehe Abbildung 25) wurde auf dem unverformten Formteil ein lokales Koordinatensystem (Abbildung 26) definiert und in weiterer Folge die Abweichung zwischen verformtem und unverformtem Formteil bestimmt.

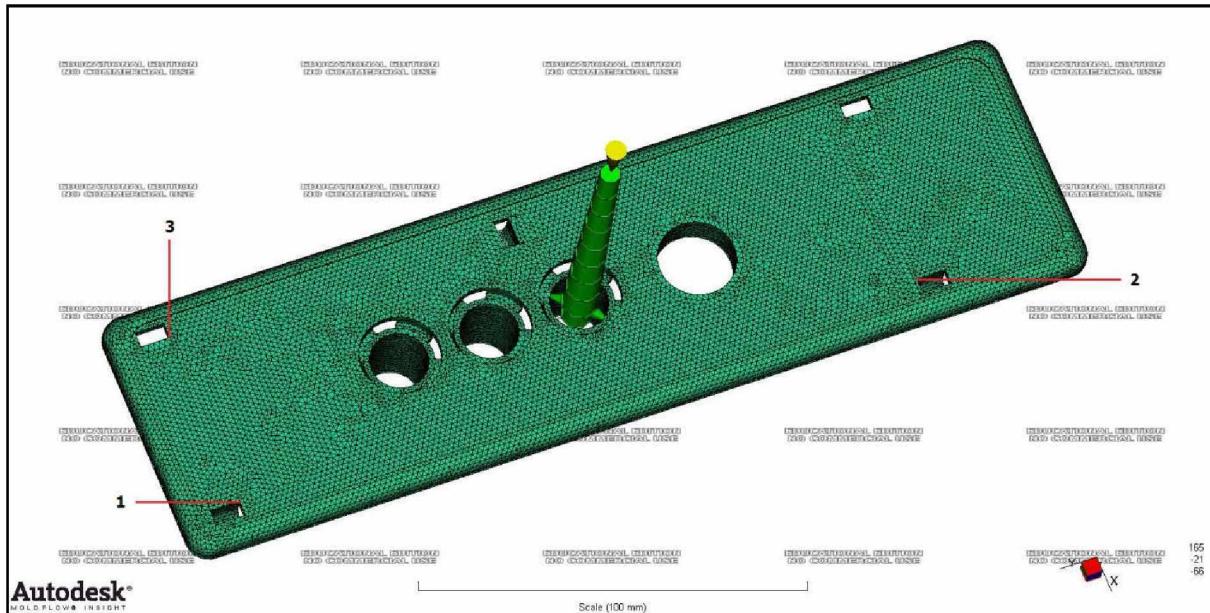


Abbildung 25: Zur Definition des lokalen Koordinatensystems herangezogene Punkte am unverformten Formteil

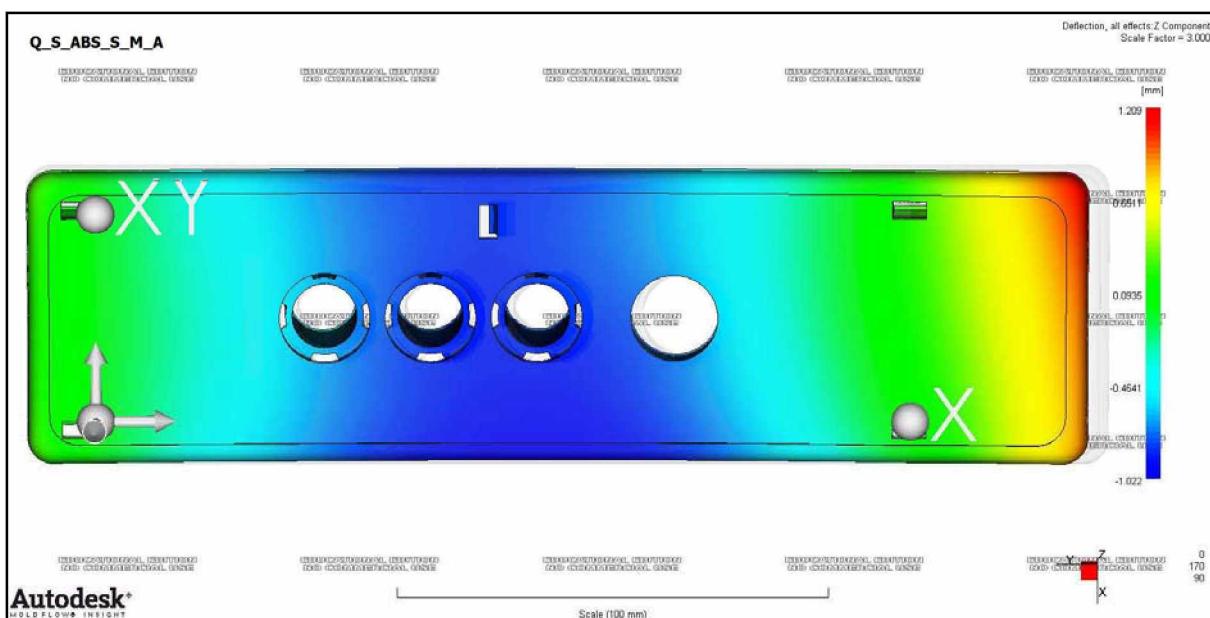


Abbildung 26: Lokales Koordinatensystem und Verzug des Formteiles; Verzugswerte um den Faktor 3 vergrößert dargestellt; Beispiel Q\_S\_ABS\_S\_M\_A

Der aufgrund des Verzuges krümmungsbehaftete Abstand von Punkt 1 und Punkt 2 kann annähernd als Kreissehne gesehen werden (Abbildung 27).

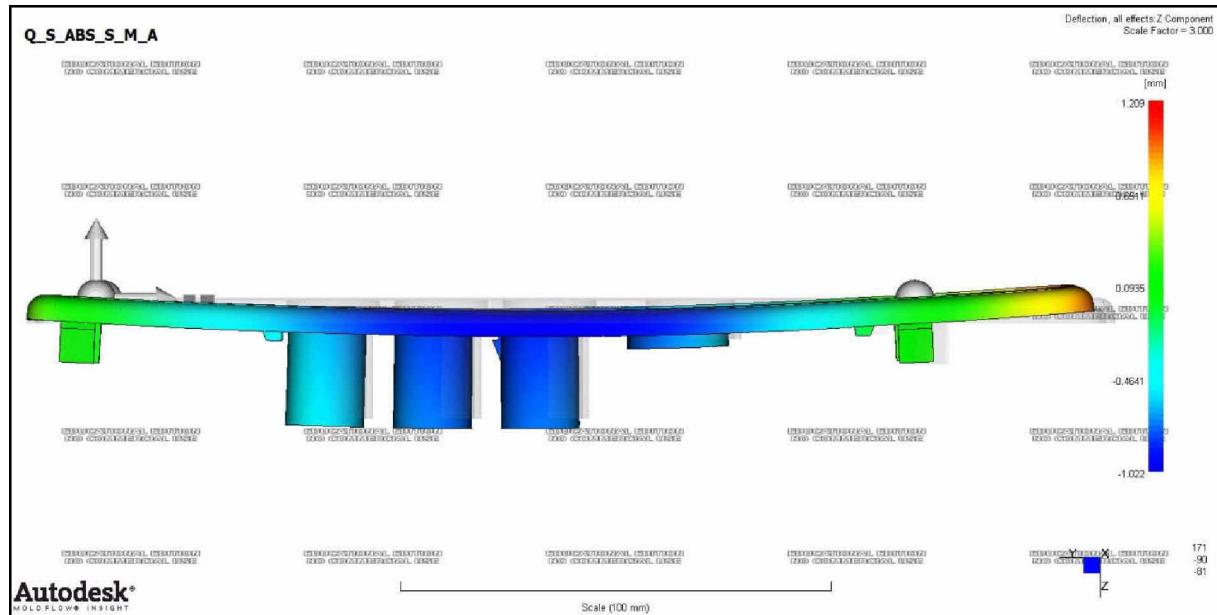


Abbildung 27: *Schwindung und verzugsbedingte Krümmung des Formteiles um die y-Achse des lokalen Koordinatensystems; Verzugswerte um den Faktor 3 vergrößert dargestellt; Beispiel Q\_S\_ABS\_S\_M\_A*

Bestimmt man nun die maximale Abweichung  $h$  der gekrümmten Formteiloberfläche von der Ebene des unverformten Formteils in z-Richtung, kann man die Bogenlänge zwischen den Punkten 1 und 2 mit den nachfolgenden Gleichungen 113, 114 und 115 berechnen.

Der Mittelpunktswinkel  $\alpha$  ergibt sich nach Gleichung 113 aus der Höhe  $h$  und der Länge der Kreissehne  $s$  zu:

$$\alpha = 4 \cdot \arctan \left( \frac{2 \cdot h}{s} \right) \quad (113)$$

Der Radius  $r$  des Kreissegments ist:

$$r = \frac{4 \cdot h^2 + s^2}{8 \cdot h} \quad (114)$$

Aus dem Mittelpunktswinkel  $\alpha$  und dem Radius  $r$  erhält man die gesuchte Bogenlänge des Kreissegments:

$$b = r \cdot \alpha \quad (115)$$

### **3.5.3 Versuchspläne**

Zur Ermittlung der Konstanten des physikalischen Modells des Qualitätsreglers wurden Einfaktorversuchspläne verwendet, in welchen innerhalb einer Versuchsreihe jeweils ein Einstellparameter ausgehend von der Grundeinstellung (0) zwei Stufen nach oben und unten (++, +, -, --) variiert wurde, während die übrigen drei konstant gehalten wurden. In Tabelle 7 sind die Versuchspläne mit den Zahlenwerten der Einstellstufen angeführt.

Für die mit G gekennzeichnete Grundeinstellung, die im Realfall dem optimierten Betriebspunkt entspricht, wurden anhand von Vorversuchen die Einstellparameter Nachdruck mit  $ND = 290$  bar, Düsentemperatur mit  $TD = 260$  °C und Werkzeugtemperatur mit  $TW = 70$  °C gewählt. Das Nachdruckniveau wurde für die Versuche in Stufen von 10 bar, und die Temperaturgrößen in Schritten von 5 °C variiert. Die Ermittlung der Siegelkurve ergab eine Lage des Siegelpunktes bei einer Nachdruckzeit von 6 - 7 s. Für die Grundeinstellung der Versuche wurde jedoch eine Nachdruckzeit von 4 s mit einer Veränderung in Schritten von 1 s festgelegt. Dies beruht auf der Überlegung, dass es bei einer Erhöhung der Nachdruckzeit über den Siegelpunkt hinaus zu nicht messbaren, für die Ermittlung der Konstanten des Qualitätsreglers nicht aussagekräftigen Ergebnissen kommen würde.

### 3. Experimentelles

*Tabelle 7: Versuchspläne der Einfaktorversuche*

Versuchsreihe Nachdruck (Q_S_ABS_E_E_ND, Q_S_ABS_S_E_ND)								
Messserie	Nachdruck		Düsenteratur		Nachdruckzeit		Werkzeugtemperatur	
	(bar)	Stufe	(°C)	Stufe	(s)	Stufe	(°C)	Stufe
Q_S_ABS_E_E_ND_E Q_S_ABS_S_E_ND_E	270	--	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_ND_F Q_S_ABS_S_E_ND_F	280	-	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_ND_G Q_S_ABS_S_E_ND_G	290	0	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_ND_H Q_S_ABS_S_E_ND_H	300	+	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_ND_I Q_S_ABS_S_E_ND_I	310	++	260	0	4	0	70	0

Versuchsreihe Düsenteratur (Q_S_ABS_E_E_TD, Q_S_ABS_S_E_TD)								
Messserie	Nachdruck		Düsenteratur		Nachdruckzeit		Werkzeugtemperatur	
	(bar)	Stufe	(°C)	Stufe	(s)	Stufe	(°C)	Stufe
Q_S_ABS_E_E_TD_E Q_S_ABS_S_E_TD_E	290	0	250	--	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TD_F Q_S_ABS_S_E_TD_F	290	0	255	-	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TD_G Q_S_ABS_S_E_TD_G	290	0	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TD_H Q_S_ABS_S_E_TD_H	290	0	265	+	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TD_I Q_S_ABS_S_E_TD_I	290	0	270	++	4	0	70	0

Versuchsreihe Nachdruckzeit (Q_S_ABS_E_E_TN, Q_S_ABS_S_E_TN)								
Messserie	Nachdruck		Düsenteratur		Nachdruckzeit		Werkzeugtemperatur	
	(bar)	Stufe	(°C)	Stufe	(s)	Stufe	(°C)	Stufe
Q_S_ABS_E_E_TN_E Q_S_ABS_S_E_TN_E	290	0	260	0	2	--	70	0
Q_S_ABS_E_E_TN_F Q_S_ABS_S_E_TN_F	290	0	260	0	3	-	70	0
Q_S_ABS_E_E_TN_G Q_S_ABS_S_E_TN_G	290	0	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TN_H Q_S_ABS_S_E_TN_H	290	0	260	0	5	+	70	0
Q_S_ABS_E_E_TN_I Q_S_ABS_S_E_TN_I	290	0	260	0	6	++	70	0

Versuchsreihe Werkzeugtemperatur (Q_S_ABS_E_E_TW, Q_S_ABS_S_E_TW)								
Messserie	Nachdruck		Düsenteratur		Nachdruckzeit		Werkzeugtemperatur	
	(bar)	Stufe	(°C)	Stufe	(s)	Stufe	(°C)	Stufe
Q_S_ABS_E_E_TW_E Q_S_ABS_S_E_TW_E	290	0	260	0	4	0	60	--
Q_S_ABS_E_E_TW_F Q_S_ABS_S_E_TW_F	290	0	260	0	4	0	65	-
Q_S_ABS_E_E_TW_G Q_S_ABS_S_E_TW_G	290	0	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_E_TW_H Q_S_ABS_S_E_TW_H	290	0	260	0	4	0	75	+
Q_S_ABS_E_E_TW_I Q_S_ABS_S_E_TW_I	290	0	260	0	4	0	80	++

Der Versuchsplan für die  $2^4$ -Faktorenversuche ist in Tabelle 8 dargestellt. Basierend auf der Grundeinstellung im Zentralpunkt (0) wurden die Einstellparameter jeweils um eine Stufe nach oben (+) und unten (-) variiert. Wie in Abschnitt 0 erklärt, werden durch die Zusammenstellung des Versuchsplanes beide Stufen eines Faktors auf beiden Stufen aller übrigen Faktoren getestet.

*Tabelle 8: vollfaktorieller  $2^4$ -Faktorenversuchsplan mit Zentralpunkt*

Messserie	Versuchsreihe Q_S_ABS_E_M, Q_S_ABS_S_M							
	Nachdruck		Düsentemperatur		Nachdruckzeit		Werkzeugtemperatur	
	(bar)	Stufe	(°C)	Stufe	(s)	Stufe	(°C)	Stufe
Q_S_ABS_E_M_A Q_S_ABS_S_M_A	300	+	265	+	5	+	75	+
Q_S_ABS_E_M_B Q_S_ABS_S_M_B	300	+	265	+	5	+	65	-
Q_S_ABS_E_M_C Q_S_ABS_S_M_C	300	+	265	+	3	-	75	+
Q_S_ABS_E_M_D Q_S_ABS_S_M_D	300	+	265	+	3	-	65	-
Q_S_ABS_E_M_E Q_S_ABS_S_M_E	300	+	255	-	5	+	75	+
Q_S_ABS_E_M_F Q_S_ABS_S_M_F	300	+	255	-	5	+	65	-
Q_S_ABS_E_M_G Q_S_ABS_S_M_G	300	+	255	-	3	-	75	+
Q_S_ABS_E_M_H Q_S_ABS_S_M_H	300	+	255	-	3	-	65	-
Q_S_ABS_E_M_ZP Q_S_ABS_S_M_ZP	290	0	260	0	4	0	70	0
Q_S_ABS_E_M_I Q_S_ABS_S_M_I	280	-	265	+	5	+	75	+
Q_S_ABS_E_M_J Q_S_ABS_S_M_J	280	-	265	+	5	+	65	-
Q_S_ABS_E_M_K Q_S_ABS_S_M_K	280	-	265	+	3	-	75	+
Q_S_ABS_E_M_L Q_S_ABS_S_M_L	280	-	265	+	3	-	65	-
Q_S_ABS_E_M_M Q_S_ABS_S_M_M	280	-	255	-	5	+	75	+
Q_S_ABS_E_M_N Q_S_ABS_S_M_N	280	-	255	-	5	+	65	-
Q_S_ABS_E_M_O Q_S_ABS_S_M_O	280	-	255	-	3	-	75	+
Q_S_ABS_E_M_P Q_S_ABS_S_M_P	280	-	255	-	3	-	65	-

### 3.5.4 Versuchsroutine

Um gleichartige Bedingungen für die Produktion jeder Versuchsreihe zu gewährleisten, wurde folgende Vorgehensweise gewählt: Bei einem Neustart der Spritzgießmaschine (SGM) oder zwischen zwei Versuchen mit unterschiedlichen Einstellungen wurde bis zum Start der Produktion eine Stunde zugewartet, um ein gleichmäßiges Aufheizen von Maschine und Werkzeug zu ermöglichen. Um in weiterer Folge ein für die Reproduzierbarkeit der Versuche unabdingbares

thermodynamisches Gleichgewicht an der SGM zu erreichen, wurden zunächst jeweils 30 Teile gespritzt und entsorgt. In Abbildung 28 ist der Verlauf der Werkzeugwandtemperatur für 30 aufeinanderfolgende Zyklen dargestellt, wobei deutlich zu erkennen ist, wie die Temperaturen erst nach mehreren Produktionszyklen ein etwa gleichbleibendes Niveau erreichen.

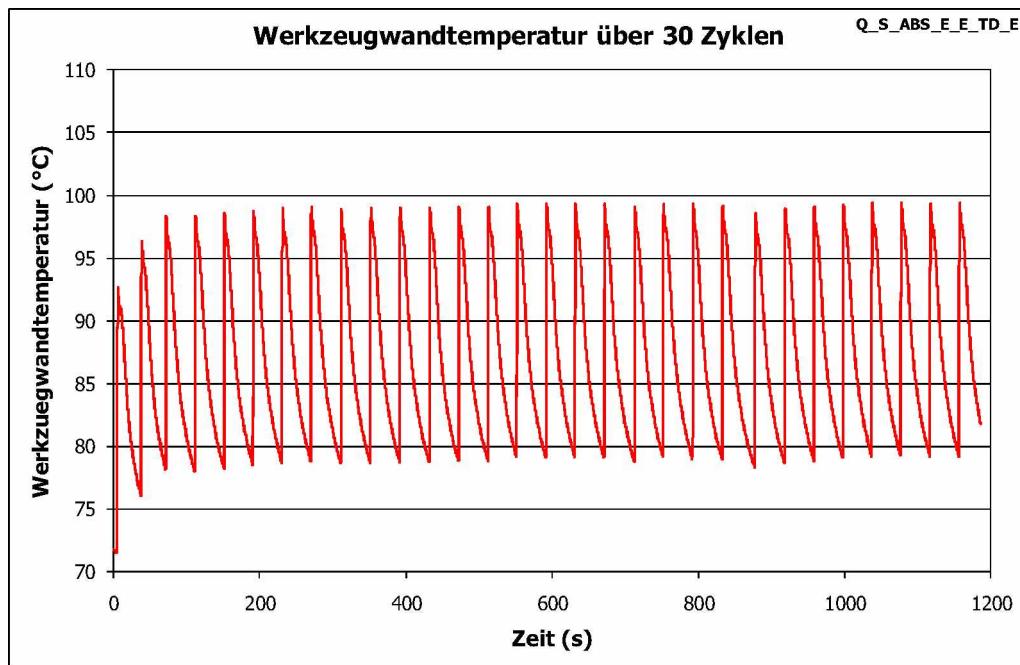


Abbildung 28: Entwicklung der Werkzeugwandtemperatur über 30 Zyklen am Beispiel Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD\_E

Nach der Herstellung der ersten 30 Anfahrteile erfolgte die Produktion der eigentlichen Versuchsteile. Es wurden wiederum Serien im Umfang von 30 Stück gespritzt (Abbildung 29), von denen die Messwerte der ersten zehn Spritzlinge verworfen wurden. Die verbleibenden 20 Teile wurden um diejenigen fünf Stück reduziert, deren Messwerte von Masse und Länge am deutlichsten von den Mittelwerten abwichen. Somit gelangten schließlich für jede Versuchsreihe 15 Teile zur Auswertung.

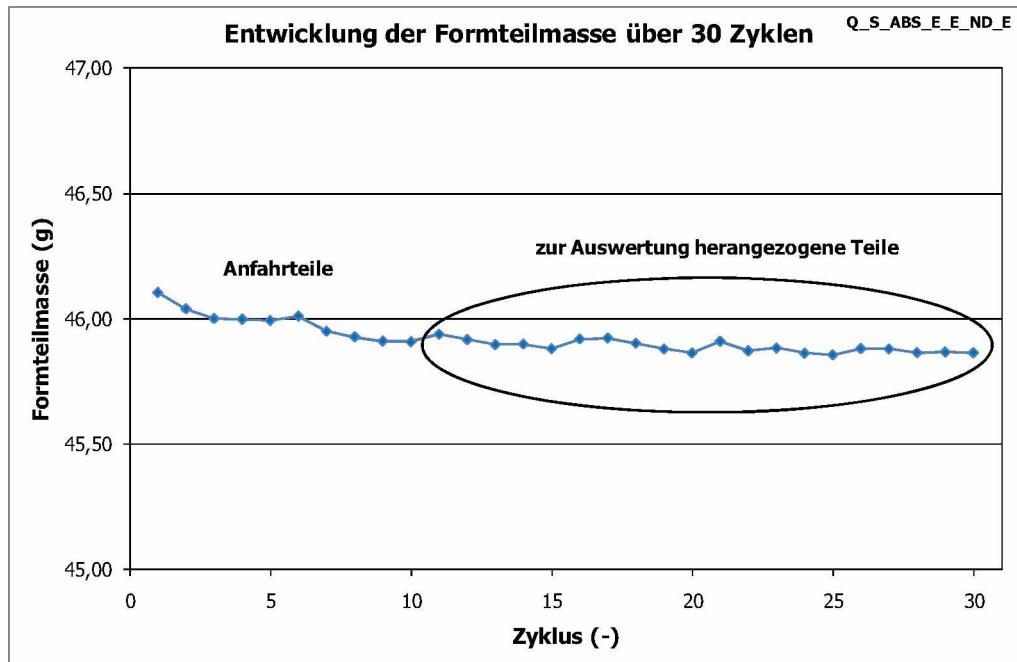


Abbildung 29: Veränderung der Formteilmasse mit zunehmender Schußzahl am Beispiel Q\_S\_ABS\_E\_E\_ND\_E

Es erwies sich als unpraktikabel, die Formteile unmittelbar nach ihrer Produktion zu wägen bzw. zu vermessen. Die vorhandene Restwärme und die anfänglich noch deutlich spürbare statische Aufladung der Teile ließen keine reproduzierbaren Wägeergebnisse zu. Gründe hierfür können in der vom abkühlenden Teil abgegebenen Wärme und auch in der auf der heißen Formteiloberfläche kondensierenden Luftfeuchtigkeit liegen. Somit wurde jede Versuchsreihe im Umfang von 30 Stück zunächst 16 h gelagert und erst dann ausgewertet. Diese Vorgehensweise hatte neben dem Abbau der elektrostatischen Ladungen und dem Angleich der Teile- an die Raumtemperatur zudem den Vorteil, dass der Einfluss der Verarbeitungs- und Nachschwindung reduziert werden konnte.

Die Maschinendaten wurden während der Herstellung der Versuchsserien über die Funktionen „Oszilloskop“ und „Prozessdatenprotokoll“ der Maschinensteuerung aufgezeichnet. Die Temperatur- und Druckwerte des angussnah im Werkzeug angebrachten p-T-Sensors wurden über ein Spider-Messdatenerfassungssystem mit angeschlossenem Rechner aufgenommen, wobei für die Drucksignale wie in Abschnitt 3.3.3 erwähnt ein zusätzlicher Messverstärker eingesetzt wurde.

Wie in Abbildung 28 am Beispiel der Messserie Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD\_E zu gut zu erkennen ist, schwankt die Werkzeugwandtemperatur in diesem Fall innerhalb eines Zyklus um etwa 20 °C. Dies ist bedingt durch den Wärmeeintrag der heißen Kunststoffschmelze in das Spritzgießwerkzeug und die gleichzeitige Abführung von Wärmeenergie durch das Temperiermedium zur Abkühlung des Formteils. Im

thermodynamischen Gleichgewicht am Werkzeug ergibt sich eine mittlere Werkzeugwandtemperatur, welche etwa 20 °C höher liegt, als die Vorlauftemperatur des Temperieraggregats. Da sich jedoch die Einstellung der innerhalb der Versuchsreihen, speziell innerhalb von Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD und Q\_S\_ABS\_E\_E\_TW, veranschlagten Temperaturstufen über diese angussnah gemessene und gemittelte Werkzeugwandtemperatur als unpraktikabel und nicht reproduzierbar herausstellte, und zudem die Orthogonalität der Versuchspläne (siehe Abschnitt 2.3) nicht gewährleistet gewesen wäre, wurde wie in Abschnitt 3.5 erwähnt, für den Parameter TW die Vorlauftemperatur des Temperiergerätes eingesetzt.

Zu den Forminnendruckwerten ist zu sagen, dass der verfügbare Kistler-Messverstärker mit einer erheblichen Temperaturdrift behaftet war. Dies hatte zur Folge, dass bei den Forminnendruckkurven innerhalb einer Versuchsserie mit zunehmender Schusszahl ein deutliches Abfallen der Druckniveaus zu beobachten war (Abbildung 30).

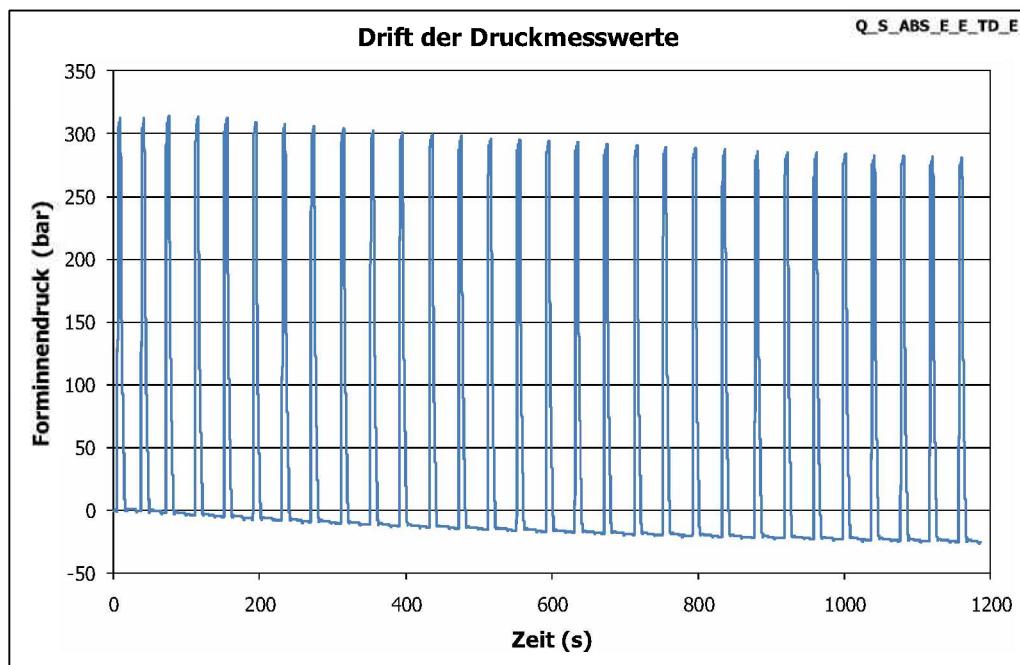


Abbildung 30: Temperaturbedingte Drift der Forminnendruckwerte über 30 Zyklen am Beispiel Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD\_E

Diesem Umstand hätte man begegnen können, indem man eine halbautomatische Fahrweise der SGM wählt, den Verstärker nach jedem Zyklus zurücksetzt und den nächsten Zyklus manuell startet. Da in den durchgeföhrten Experimenten jedoch möglichst produktionsnahe Bedingungen angestrebt wurden, wurde die SGM im vollautomatischen Modus betrieben. Aufgrund der Unzuverlässigkeit des Messsystems wurden die Forminnendruckwerte in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

### 3.5.5 Auswertemethode

Sowohl das physikalische Modell des Qualitätsreglers als auch das statistische Modell gehen von linearen Zusammenhängen aus. Dies stellt eine Annäherung an die realen Verhältnisse dar, da es hier in der überwiegenden Zahl der Fälle zu Abweichungen von ideal linearen Verläufen kommt. Für die Auswertung der Daten bieten sich demnach zwei Möglichkeiten:

1. Die erste Möglichkeit ist eine direkte Auswertung der gemessenen Rohdaten über die in Abschnitt 2.2 angeführten Zusammenhänge, was für die verschiedenen Stufen (++, +, -, --) unterschiedliche Werte der zu ermittelnden Konstanten liefert. In weiterer Folge können die unterschiedlichen Konstanten gemittelt bzw. die am besten passende Konstante ausgewählt werden.
2. Die zweite Möglichkeit besteht in einer Linearisierung der Messwerte um den Zentralpunkt. Mit der Steigung der sich durch die Messwerte ergebenden Trendlinie wird eine Gerade durch den Zentralpunkt gelegt, Die Messpunkte werden wertemäßig auf diese Gerade gelotet und in weiterer Folge zur Auswertung verwendet. Die Linearisierung ist in Abbildung 31 am Beispiel des Zusammenhangs zwischen Formteilmasse und Nachdruck schematisch dargestellt.

Beide Möglichkeiten sind mit gewissen Abweichungen behaftet, Variante 1 durch die Mittelung der Konstanten, Variante 2 durch die Linearisierung der Messwerte. In weiterer Folge wird hier der Variante 2 der Vorzug gegeben, da sie im direkten Vergleich als die objektivere der beiden Methoden erscheint, und die sich ergebenden Abweichungen, wie aus Abbildung 31 ersichtlich, hinreichend gering sind.

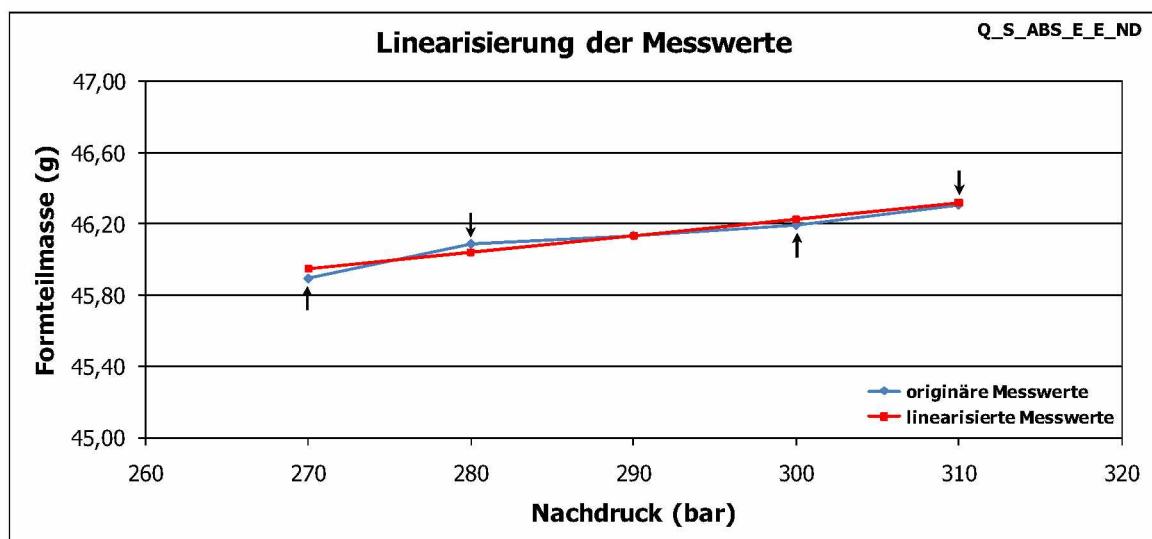


Abbildung 31: Linearisierung der Messergebnisse am Beispiel Q\_S\_ABS\_E\_E\_ND

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Physikalisches Modell - Experiment

#### 4.1.1 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

Die Untersuchungen zur Nachdruckabhängigkeit der Formteilmasse ergeben einen annernd linearen Verlauf mit positiver Steigung. Nach Linearisierung der Messwerte ergibt sich bei Erhöhung des Nachdrucks von 270 bar auf 310 bar eine Zunahme der Formteilmasse von 0,37 g. In Abbildung 32 sind der originäre und der linearisierte Verlauf der Formteilmasse abgebildet.

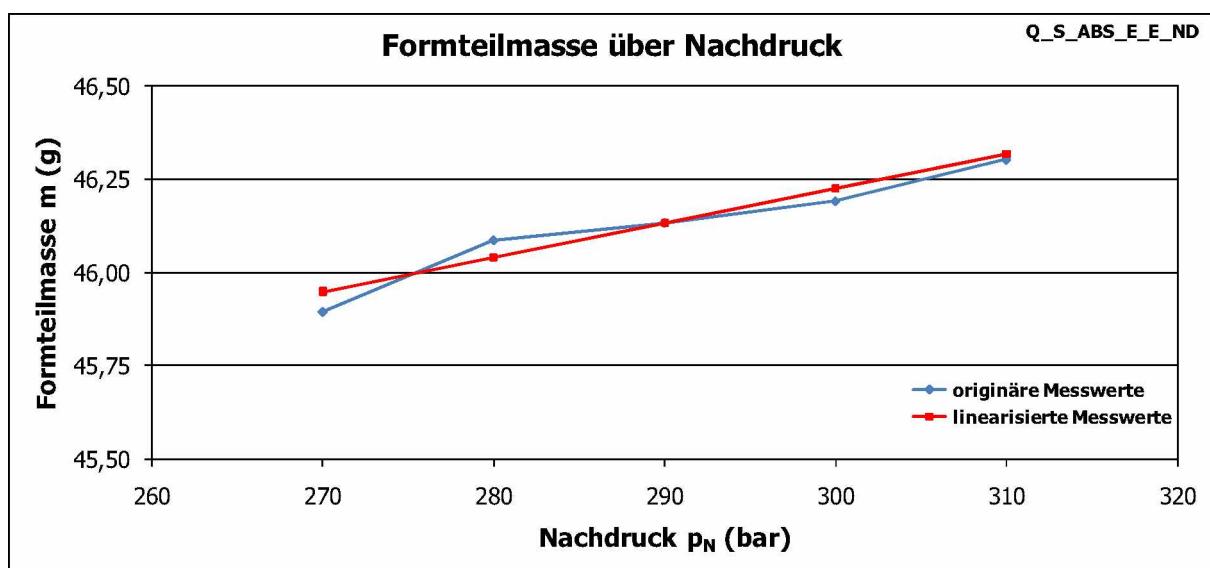


Abbildung 32: Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

Die nach Gleichung 34 ermittelte Konstante  $K_1$  hat einen Wert von  $2,0058E-04 \text{ bar}^{-1}$ . In Tabelle 9 sind die Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck zusammengefasst.

Tabelle 9: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

Messserie	Nachdruck	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_1$
	(bar)	(g)	(g/bar)	(g)	(g)	(bar $^{-1}$ )
Q_S_ABS_E_E_ND_E	270	45,893	0,0093	45,948	0,055	2,0058E-04
Q_S_ABS_E_E_ND_F	280	46,086		46,041	-0,046	
Q_S_ABS_E_E_ND_G	290	46,133		46,133	0,000	
Q_S_ABS_E_E_ND_H	300	46,192		46,226	0,034	
Q_S_ABS_E_E_ND_I	310	46,303		46,318	0,015	

Die Formteillänge zeigt ebenfalls eine Zunahme in nahezu linearer Form (Abbildung 33). Die linearisierten Messwerte wachsen im betrachteten Bereich um 0,09 mm an.

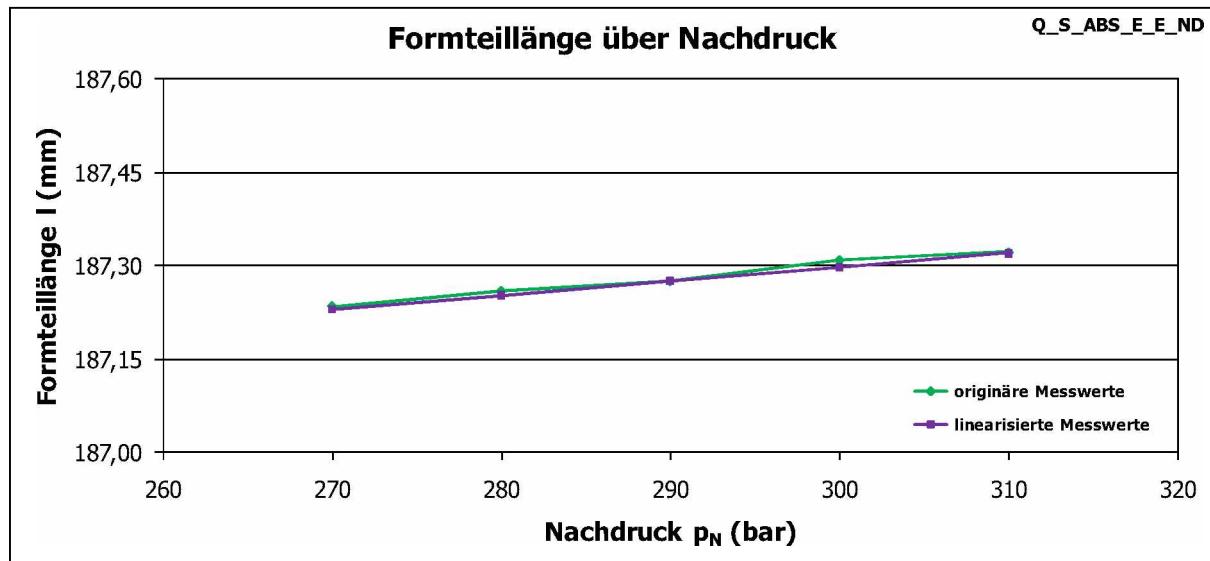


Abbildung 33: Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Die Werte der nach Gleichung 66 und 67 berechneten Konstanten betragen  $A = 1,8901E-04 \text{ bar}^{-1}$  und  $B = 3,3845E-17 \text{ bar}^{-1/3}$ . Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck.

Tabelle 10: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Messserie	Nachdruck	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante A
	(bar)	(mm)	(mm/bar)	(mm)	(mm)	(bar $^{-1}$ )
Q_S_ABS_E_E_ND_E	270	187,23	0,0023	187,23	-0,005	1,8901E-04
Q_S_ABS_E_E_ND_F	280	187,26		187,25	-0,007	
Q_S_ABS_E_E_ND_G	290	187,28		187,28	0,000	Konstante B
Q_S_ABS_E_E_ND_H	300	187,31		187,30	-0,012	(bar $^{-1/3}$ )
Q_S_ABS_E_E_ND_I	310	187,32		187,32	-0,002	3,3845E-17

#### 4.1.2 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur

Aus der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Formteilmasse und Düsentemperatur resultiert originär ein unregelmäßiger Verlauf (Abbildung 34). Anhand der entsprechenden Ergebnisse des physikalischen Modells in der Simulation (Abschnitt 4.3.2) und der anhand des statistischen Modells in Experiment und Simulation ermittelten Werte (siehe Abschnitt 4.2.3 und 4.4.3) kann jedoch ein Verlauf mit negativer Steigung für die Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur verifiziert werden. Die Messwerte bei 255 °C und 265 °C stellen somit Ausreißer dar, welche in weiterer Folge in der Berechnung der Ausgleichsgeraden zur Linearisierung der Messwerte nicht berücksichtigt wurden. Steigert man die Düsentemperatur von 250 °C auf 270 °C, nimmt die Formteilmasse um 0,114 g ab.

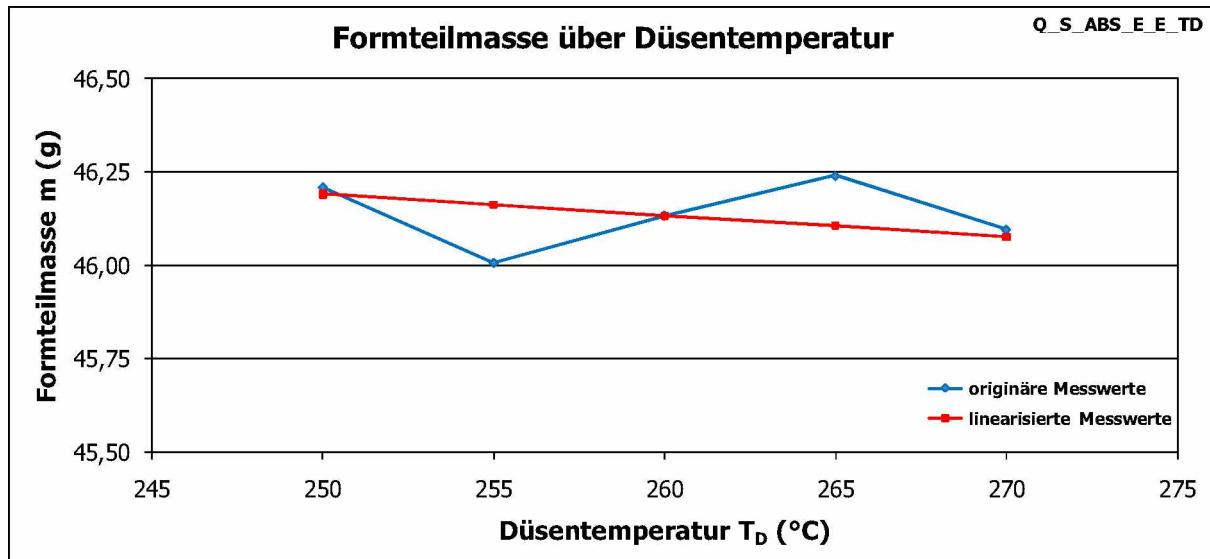


Abbildung 34: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

Für die Konstante  $K_2$  erhält man nach Gleichung 35  $K_2 = 1,2363E-04 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Tabelle 11 enthält die Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur.

Tabelle 11: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

Messserie	Düsen-temperatur	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_2$
	(°C)	(g)	(g/°C)	(g)	(g)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_E_E_TD_E	250	46,209	-0,0057	46,190	-0,019	1,2363E-04
Q_S_ABS_E_E_TD_F	255	46,006		46,162	0,156	
Q_S_ABS_E_E_TD_G	260	46,133		46,133	0,000	
Q_S_ABS_E_E_TD_H	265	46,240		46,105	-0,135	
Q_S_ABS_E_E_TD_I	270	46,095		46,076	-0,019	

Analog zur Vorgangsweise bei der Formteilmasse werden auch für die Formteillänge die Messwerte bei 255 °C und 265 °C für die Berechnung der Ausgleichsgeraden verworfen. Die Formteillänge fällt über die Spanne der Düsentemperatur um 0,05 mm ab (Abbildung 35).

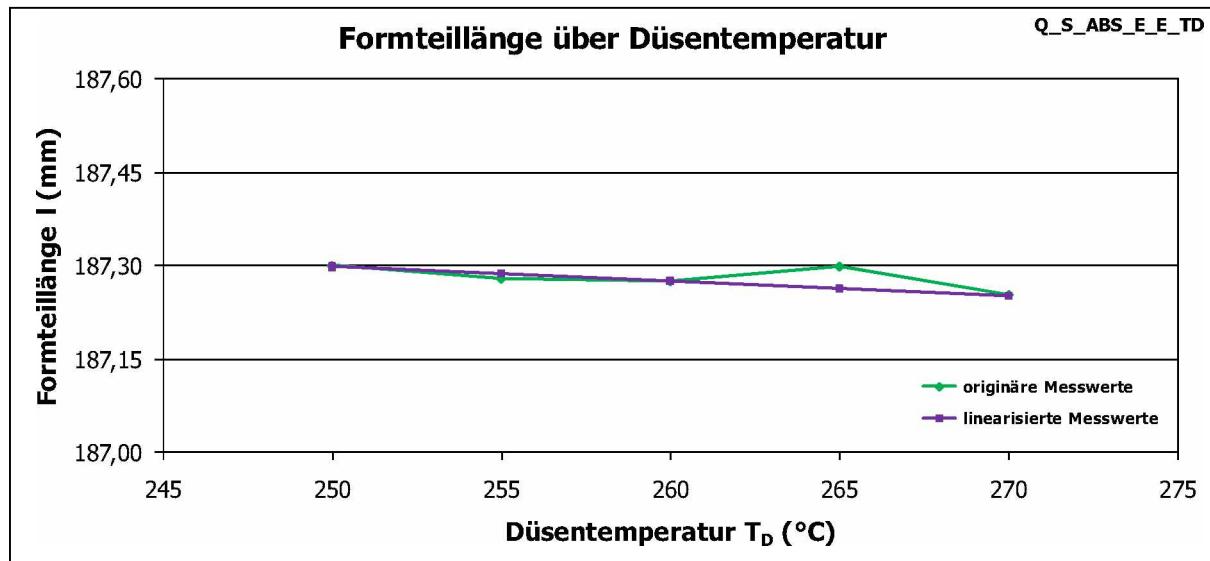


Abbildung 35: Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur

Die Konstanten C und D wurden nach Gleichung 68 und 69 berechnet und ergeben sich zu  $C = 1,1107E-04 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  und  $D = 5,5114E-04 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1/3}$ . Messwerte und Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Formteillänge und Düsentemperatur sind in Tabelle 12 festgehalten.

Tabelle 12: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur

Messserie	Düsen-temperatur	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante C
	(°C)	(mm)	(mm/°C)	(mm)	(mm)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_E_E_TD_E	250	187,30	-0,0023	187,30	-0,002	1,1107E-04
Q_S_ABS_E_E_TD_F	255	187,28		187,29	0,007	Konstante D
Q_S_ABS_E_E_TD_G	260	187,28		187,28	0,000	
Q_S_ABS_E_E_TD_H	265	187,30		187,26	-0,036	
Q_S_ABS_E_E_TD_I	270	187,25		187,25	-0,002	5,5114E-04

#### 4.1.3 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Die originären Messwerte zeigen für den Zusammenhang zwischen Formteilmasse und Nachdruckzeit jenen zu erwartenden Verlauf, der auch aus der Siegelkurve bekannt ist. Die linearisierten Werte steigen bei Verlängerung der Nachdruckzeit von 2 s auf 6 s um 1,134 g an.

Wie aus Abbildung 36 ersichtlich, kann der gekrümmte Verlauf der Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit über den gesamten Messbereich durch die Linearisierung nur grob angenähert werden. Hier zeigt sich eine Unzulänglichkeit des linearen Ansatzes für das physikalische Modell. Betrachtet man jedoch, wie als Voraussetzung für dieses Modell in Abschnitt 2.2.1 festgehalten, nur einen engen

Bereich um den Zentralpunkt, kann der lineare Ansatz dennoch gute Ergebnisse liefern.

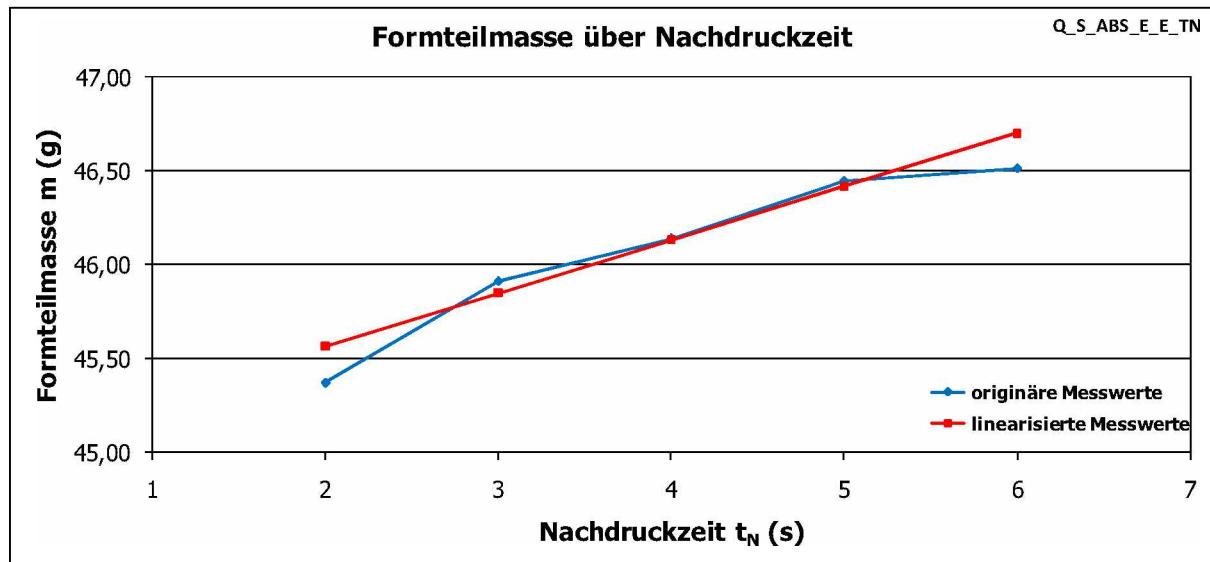


Abbildung 36: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit

Die nach Gleichung 39 berechnete Konstante  $K_5$  hat den Wert  $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$  und geht somit nicht in die Berechnung von  $K_3$  (Gleichung 40) ein. Für die Konstante  $K_3$  erhält man einen Wert von  $1,2705\text{E-}05 \text{ s}^{-1}$ . Die Zahlenwerte zur Beziehung zwischen Formteillänge und Nachdruckzeit sind in Tabelle 13 festgehalten.

Tabelle 13: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit

Messserie	Nachdruckzeit	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_3$
	(s)	(g)	(g/s)	(g)	(g)	(s $^{-1}$ )
Q_S_ABS_E_E_TN_E	2	45,370	0,2835	45,566	0,197	1,2702E-05
Q_S_ABS_E_E_TN_F	3	45,911		45,850	-0,061	Konstante $K_5$
Q_S_ABS_E_E_TN_G	4	46,140		46,133	-0,007	
Q_S_ABS_E_E_TN_H	5	46,445		46,417	-0,028	
Q_S_ABS_E_E_TN_I	6	46,512		46,700	0,188	0,0000E+00

Die Formteillänge zeigt bei Erhöhung der Nachdruckzeit um 4 s einen annähernd linearen Verlauf mit einer Zunahme von 0,17 mm (Abbildung 37).

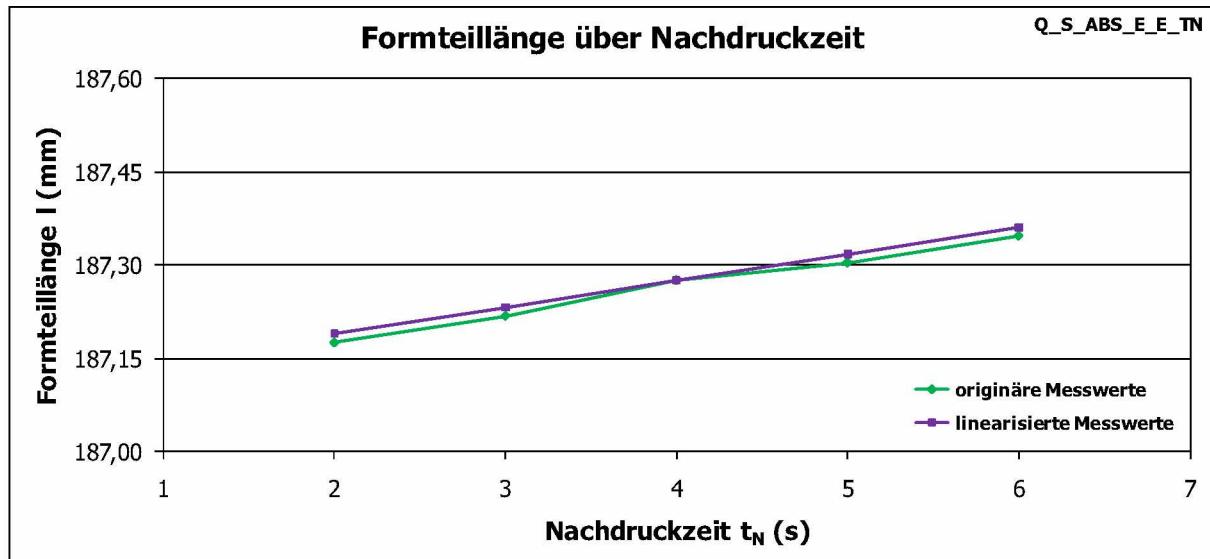


Abbildung 37: Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Die Konstanten E und F ergeben sich nach Gleichung 70 und Gleichung 71 zu  $E = 5,9170E-03 \text{ s}^{-1}$  und  $F = 2,0073E-16 \text{ s}^{-1/3}$ . Tabelle 14 fasst die Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur zusammen.

Tabelle 14: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Messserie	Nachdruckzeit	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante E
	(bar)	(mm)	(mm/bar)	(mm)	(mm)	(s <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_E_E_ND_E	2	187,18	0,0428	187,19	0,014	5,9170E-03
Q_S_ABS_E_E_ND_F	3	187,22		187,23	0,014	Konstante F
Q_S_ABS_E_E_ND_G	4	187,28		187,28	0,000	
Q_S_ABS_E_E_ND_H	5	187,30		187,32	0,014	(s <sup>-1/3</sup> )
Q_S_ABS_E_E_ND_I	6	187,35		187,36	0,014	2,0079E-16

#### 4.1.4 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

Die Experimente zum Zusammenhang zwischen Formteilmasse und Werkzeugtemperatur haben einen leicht degressiven Zusammenhang zum Ergebnis (Abbildung 38). Eine Steigerung der Werkzeugtemperatur von 60 °C auf 80 °C äußert sich in einer Verringerung der Formteilmasse um 0,445 g.

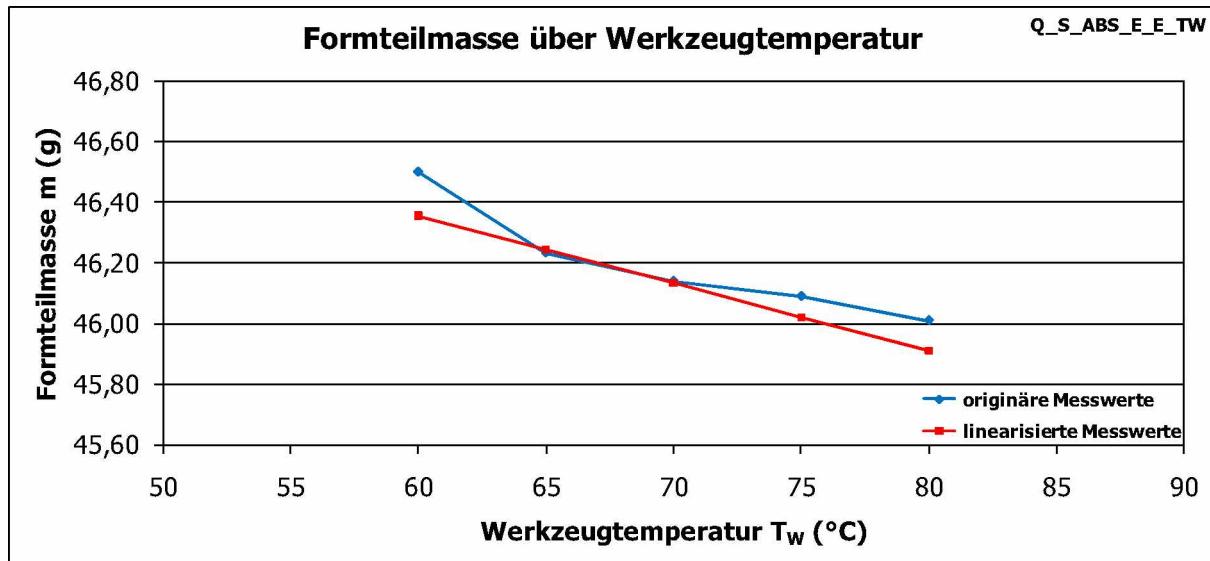


Abbildung 38: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

Mit Gleichung 42 folgt für die Konstante  $K_4$  ein Zahlenwert von 2,6641E-03. Die zur Ermittlung von  $K_4$  notwendige Siegeltemperatur  $T_c$  (Gleichung 32) beträgt 224 °C. Die Resultate der Experimente zum Zusammenhang zwischen Formteilmasse und Werkzeugtemperatur sind in Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 15: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

Messserie	Werkzeug-temperatur (°C)	Formteilmasse originär	Steigung (g/°C)	Formteilmasse linearisiert	Differenz (g)	Konstante $K_4$ (°C <sup>-1</sup> )
		(g)		(g)		
Q_S_ABS_E_E_TW_E	60	46,501	-0,0075	46,356	-0,145	2,6641E-03
Q_S_ABS_E_E_TW_F	65	46,234		46,245	0,011	$T_c$
Q_S_ABS_E_E_TW_G	70	46,140		46,133	-0,007	
Q_S_ABS_E_E_TW_H	75	46,089		46,022	-0,067	
Q_S_ABS_E_E_TW_I	80	46,010		45,911	-0,099	224

Wie aus Abbildung 39 ersichtlich ist die Relation zwischen Formteillänge und Werkzeugtemperatur annähernd linear. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur um 20 °C resultiert in einer Verkürzung des Formteils um 0,15 mm.

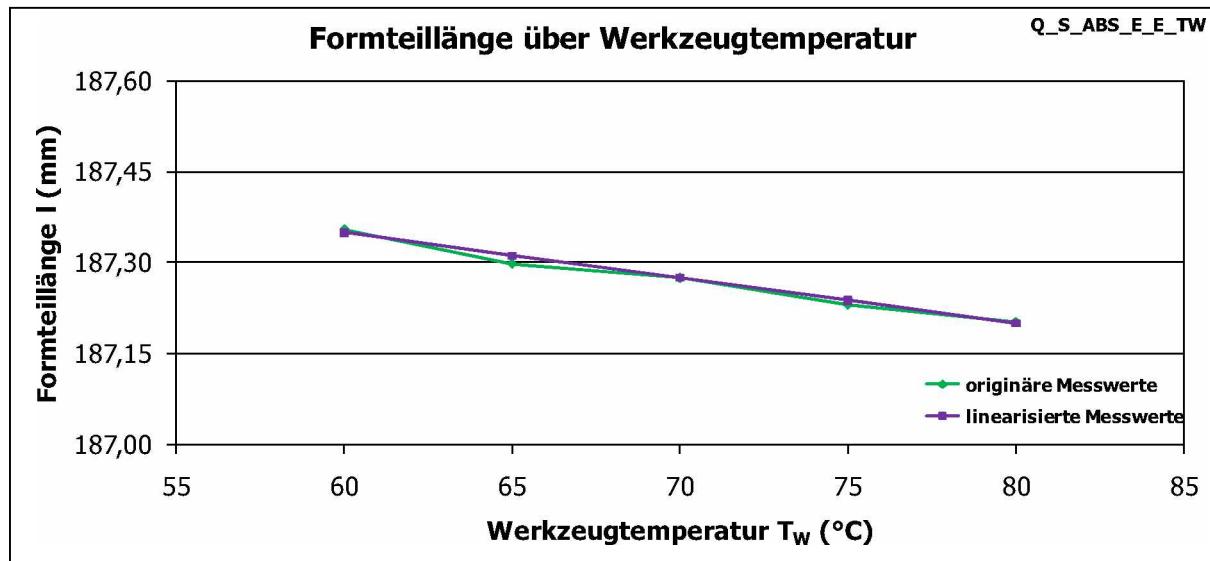


Abbildung 39: Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Die Konstanten G und H folgen aus Gleichung 72 und Gleichung 73 mit Werten von  $G = -4,4141E-04 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  und  $H = -1,1774E-16 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1/3}$ . Die entsprechenden Messergebnisse und Zahlenwerte sind in Tabelle 16 angegeben.

Tabelle 16: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Messserie	Werkzeug-temperatur	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante G
	(°C)	(mm)	(mm/°C)	(mm)	(mm)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_E_E_TW_E	60	187,35	-0,0075	187,35	-0,005	-4,4141E-04
Q_S_ABS_E_E_TW_F	65	187,30		187,31	0,014	Konstante H
Q_S_ABS_E_E_TW_G	70	187,28		187,28	0,000	
Q_S_ABS_E_E_TW_H	75	187,23		187,24	0,007	
Q_S_ABS_E_E_TW_I	80	187,20		187,20	-0,001	-1,1774E-16

#### 4.1.5 Verknüpfung von Einspritz- und Nachdruckphase – Exponent N

Wie in den Ausführungen zu Gleichung 43 erklärt, sind für die Berechnung des Exponenten N Versuche notwendig, in denen die Masse- bzw. Düsentemperatur variiert wird, und die Änderung der Formteilmasse bzw. Formteillänge über eine Anpassung des Nachdrucks ausgeglichen wird. In dieser Arbeit wurden die notwendigen Zusammenhänge zwischen Düsentemperatur, Nachdruck und Einspritzarbeit auf Grundlage der erarbeiteten Beziehungen von Formteilmasse und -länge zur Düsentemperatur sowie zwischen Nachdruck und Qualitätsgrößen rechnerisch ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Formteilmasse bzw. Formteillänge und Düsentemperatur konnte direkt dem Versuch Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD entnommen werden. Die Berechnung der zugehörigen Werte der Einspritzarbeit

(Gleichung 12) erfolgte über Integration der von der Oszilloskop-Funktion der Maschinensteuerung aufgezeichneten Druckwerte (Abbildung 40) während der Einspritzphase. Die Werte der Einspritzarbeit wurden für jede Einstellung gemittelt und linearisiert (Abbildung 41).

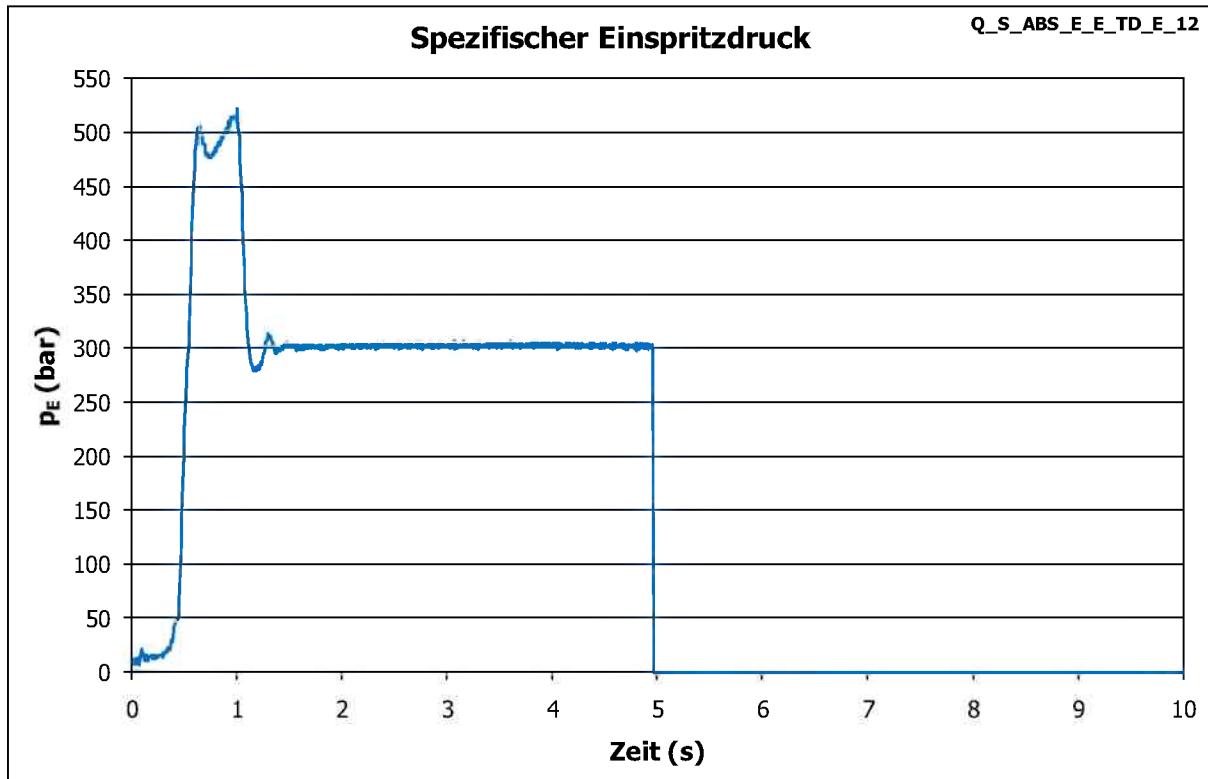


Abbildung 40: Verlauf des spezifischen Einspritzdrucks über die Zeit am Beispiel Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD\_E\_12

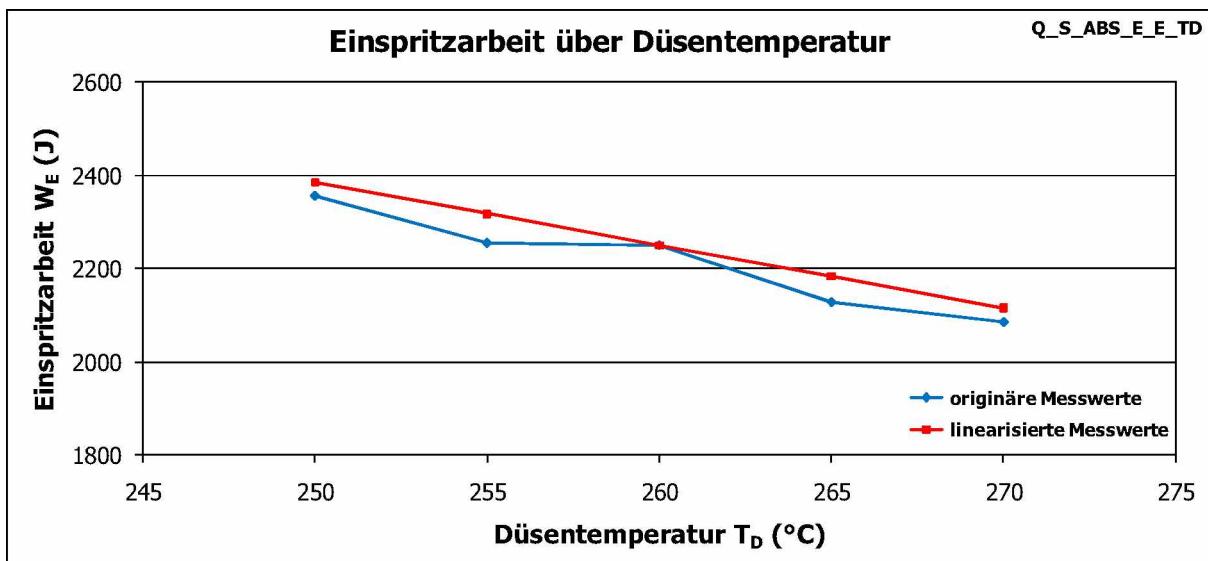


Abbildung 41: Abhängigkeit der Einspritzarbeit von der Düsentemperatur

Im nächsten Schritt erfolgte die Berechnung der zu den Formteilmassen und -längen von Q\_S\_ABS\_E\_E\_TD zuzuordnenden, geänderten Nachdruckwerte. Diese erhielt

man durch Umkehrung der in Q\_S\_ABS\_E\_E\_ND bestimmten Beziehungen zwischen Qualitätsgrößen und Nachdruck (Abbildung 42 und Abbildung 43).

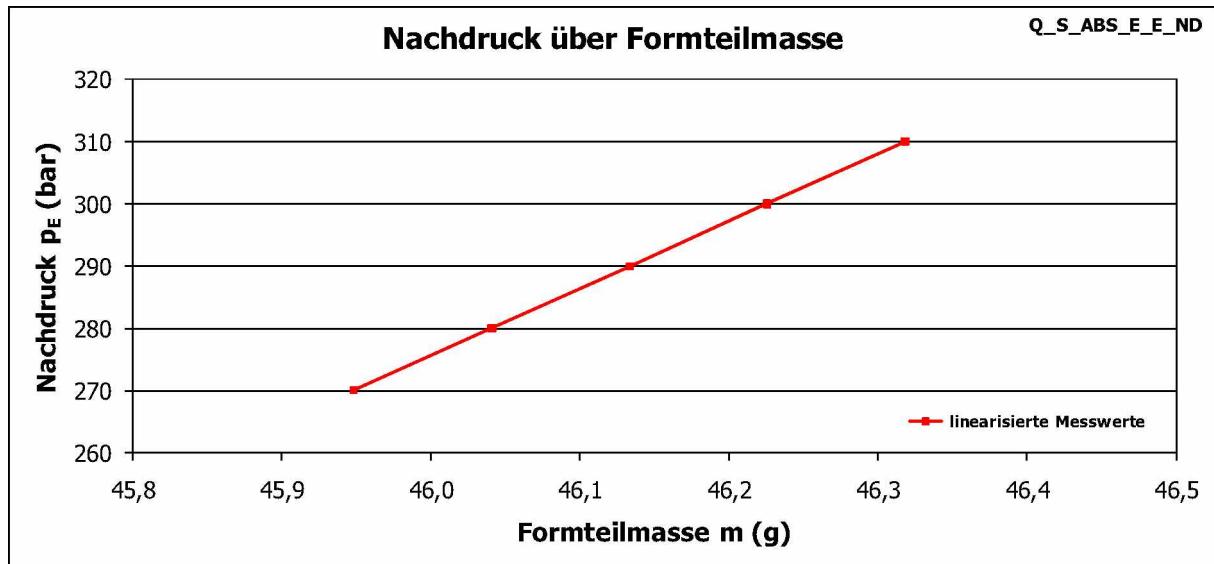


Abbildung 42: Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteilmasse

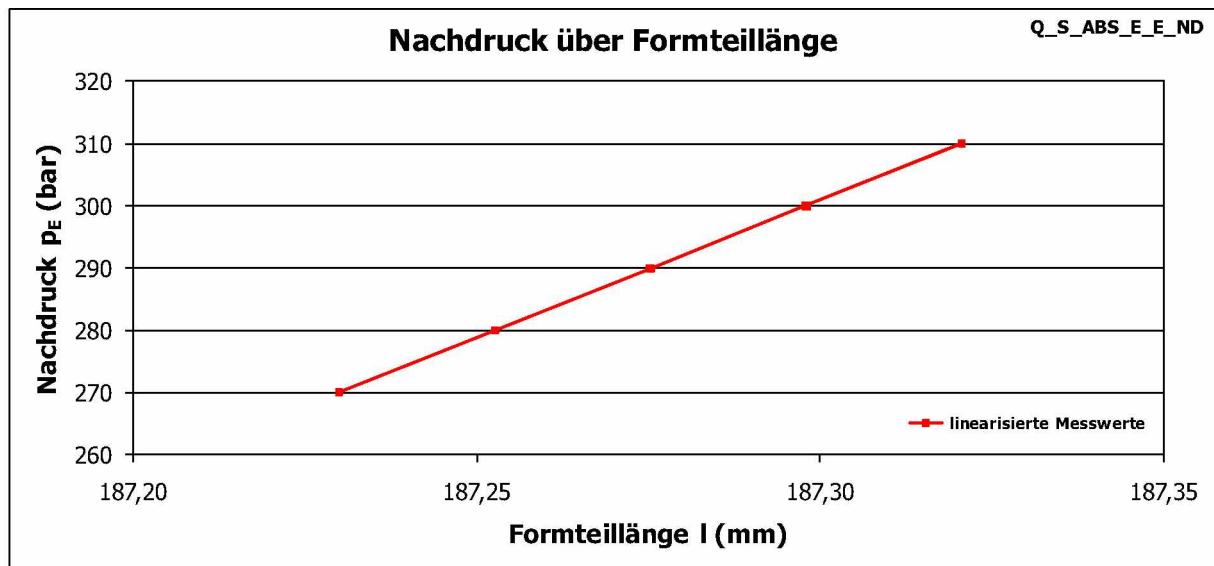


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteillänge

Mit den neuen Nachdruckwerten und den in Abschnitt 4.1.1 und Abschnitt 4.1.2 ermittelten Konstanten  $K_1$  und  $K_2$  konnte der Exponent  $N$  für die Formteilmasse nach Gleichung 45 berechnet werden. Hierbei ergaben sich trotz Linearisierung der verwendeten Werte je nach Düsentemperatur marginal unterschiedliche Ergebnisse für  $N$ . Für die Qualitätsgröße Formteilmasse beträgt der Mittelwert des Exponenten  $N = 3,5593E-01$  (/). Über Gleichung 31 wurden in weiterer Folge jene Werte  $\Delta p_E$  berechnet, um welche die Grundeinstellung im Falle von Schwankungen der Einspritzarbeit zu korrigieren ist. Tabelle 17 fasst die zur Ermittlung des Exponenten benötigten Messwerte und Ergebnisse zusammen. Die mit dem Mittelwert von  $N$

nach Gleichung 31 berechneten Nachdruckkorrekturen weichen maximal um 0,26 bar von den Werten, die anhand der Beziehung zwischen Nachdruck und Formteilmasse berechnet wurden, ab.

*Tabelle 17: Wertetabelle zur Ermittlung des Exponenten N für die Formteilmasse*

Messserie	T <sub>D</sub> (°C)	p <sub>N</sub> (bar)	m linearisiert (g)	W <sub>E</sub> linearisiert (J)	als Funktion von m			Exponent N (-)	mit N		p <sub>N</sub> Differenz (bar)
					p <sub>N</sub> theoretisch (bar)	Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)		Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)	
Q_S_ABS_E_E_TD_E	250	290	46,19	2385	296,16	-6,16	283,84	3,5537E-01	-5,93	284,07	-0,22
Q_S_ABS_E_E_TD_F	255	290	46,16	2317	293,08	-3,08	286,92		-3,02	286,98	-0,05
Q_S_ABS_E_E_TD_G	260	290	46,13	2250	290,00	0,00	290,00		0,00	290,00	0,00
Q_S_ABS_E_E_TD_H	265	290	46,10	2183	286,92	3,08	293,08		3,14	293,14	-0,06
Q_S_ABS_E_E_TD_I	270	290	46,08	2116	283,84	6,16	296,16		6,41	296,41	-0,26

Mit den in Abschnitt 4.1.1 und Abschnitt 4.1.2 ermittelten Konstanten A und C wurde der Exponent N für die Formteillänge nach Gleichung 77 berechnet. Hier ergab sich ein Mittelwert von  $N = -3,3969E-01$  (/). Vergleicht man die mit dem Mittelwert von N nach Gleichung 31 errechneten Nachdruckkorrekturen mit jenen Ergebnissen, die über den Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteillänge berechnet wurden, so weichen diese um bis zu 4,85 bar ab. In Tabelle 18 sind die Messwerte und Ergebnisse zur Ermittlung des Exponenten N für die Formteillänge dargestellt.

*Tabelle 18: Wertetabelle zur Ermittlung des Exponenten N für die Formteillänge*

Messserie	T <sub>D</sub> (°C)	p <sub>N</sub> (bar)	l linearisiert (g)	W <sub>E</sub> linearisiert (J)	als Funktion von l			Exponent N (-)	mit N		p <sub>N</sub> Differenz (bar)
					p <sub>N</sub> theoretisch (bar)	Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)		Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)	
Q_S_ABS_E_E_TD_E	250	290	187,30	2385	300,29	-10,29	279,71	-3,3969E-01	-5,45	284,55	-4,85
Q_S_ABS_E_E_TD_F	255	290	187,29	2317	295,15	-5,15	284,85		-2,83	287,17	-2,32
Q_S_ABS_E_E_TD_G	260	290	187,28	2250	290,00	0,00	290,00		0,00	290,00	0,00
Q_S_ABS_E_E_TD_H	265	290	187,26	2183	284,85	5,15	295,15		3,07	293,07	2,08
Q_S_ABS_E_E_TD_I	270	290	187,25	2116	279,71	10,29	300,29		6,40	296,40	3,90

## 4.2 Statistisches Modell – Experiment

### 4.2.1 Wirkungen und Signifikanz

Die aus den durchgeführten Experimenten resultierenden Messwerte des statistischen Modells sind in Tabelle 19 mit ihrer Standardabweichung und Varianz angeführt. Die Messserien sind in Bezug auf ihre Stufenwerte aufsteigend geordnet. Die Mittelwerte der Messwerte der Formteilmasse und der Formteillänge im Zentralpunkt sind 46,133 g und 187,275 mm. Die Mittelwerte K über alle Messserien betragen 46,133 g und 187,280 mm.

Tabelle 19: Messergebnisse der Versuche zum statistischen Modell

Messserie	Stufe	Faktoren				Formteilmasse m (g)			Formteillänge l (mm)		
		A	B	C	D	Mittelwert	Varianz	Standard-abweichung	Mittelwert	Varianz	Standard-abweichung
		ND	TD	TN	TW						
Q_S_ABS_E_M_ZP	0	0	0	0	0	46,133	0,0005	0,023	187,275	0,000041	0,0064
Q_S_ABS_E_M_P	(1)	-	-	-	-	45,932	0,0011	0,033	187,263	0,000024	0,0049
Q_S_ABS_E_M_H	a	+	-	-	-	45,896	0,0008	0,028	187,269	0,000064	0,0080
Q_S_ABS_E_M_L	b	-	+	-	-	46,058	0,0016	0,039	187,271	0,000007	0,0026
Q_S_ABS_E_M_D	ab	+	+	-	-	45,903	0,0014	0,037	187,230	0,000000	0,0000
Q_S_ABS_E_M_N	c	-	-	+	-	46,141	0,0002	0,014	187,282	0,000017	0,0041
Q_S_ABS_E_M_F	ac	+	-	+	-	46,570	0,0012	0,035	187,369	0,000050	0,0070
Q_S_ABS_E_M_J	bc	-	+	+	-	46,318	0,0001	0,011	187,340	0,000000	0,0000
Q_S_ABS_E_M_B	abc	+	+	+	-	46,351	0,0004	0,021	187,305	0,000027	0,0052
Q_S_ABS_E_M_O	d	-	-	-	+	46,092	0,0007	0,027	187,235	0,000027	0,0052
Q_S_ABS_E_M_G	ad	+	-	-	+	45,821	0,0017	0,042	187,233	0,000024	0,0049
Q_S_ABS_E_M_K	bd	-	+	-	+	45,587	0,0006	0,024	187,189	0,000007	0,0026
Q_S_ABS_E_M_C	abd	+	+	-	+	46,159	0,0015	0,039	187,278	0,000031	0,0056
Q_S_ABS_E_M_M	cd	-	-	+	+	46,028	0,0002	0,016	187,257	0,000023	0,0048
Q_S_ABS_E_M_E	acd	+	-	+	+	46,833	0,0007	0,027	187,424	0,000040	0,0063
Q_S_ABS_E_M_I	bcd	-	+	+	+	46,023	0,0005	0,023	187,227	0,000024	0,0049
Q_S_ABS_E_M_A	abcd	+	+	+	+	46,422	0,0005	0,022	187,306	0,000026	0,0051
Mittelwert K:						46,133			187,280		

Die nach Abschnitt 2.3 berechneten Wirkungen und Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Die Wirkung C der Nachdruckzeit hat auf beide Qualitätsgrößen die größte Auswirkung. Variiert man die Nachdruckzeit von der niedrigen Stufe mit 280 bar auf die hohe Stufe von 300 bar (siehe Versuchsplan in Tabelle 8), steigen Formteilmasse und -länge um 0,4048 g bzw. 0,0676 mm.

Tabelle 20: Wirkungen und Regressionskoeffizienten des statistischen Modells

Faktorenkombination	Wirkungen und Regressionskoeffizienten		Q_S_ABS_E_M	
	Formteilmasse m (g)		Formteillänge l (mm)	
	Wirkung	Regressions- koeffizient	Wirkung	Regr.-Koeff.
A = ND	0,2218	0,1109	0,0439	0,0220
B = TD	-0,0617	-0,0308	-0,0234	-0,0117
C = TN	0,4048	0,2024	0,0676	0,0338
D = TW	-0,0255	-0,0127	-0,0227	-0,0113
AB = NDTD	-0,0099	-0,0049	-0,0209	-0,0104
AC = NDTN	0,1944	0,0972	0,0308	0,0154
AD = NDTW	0,1540	0,0770	0,0394	0,0197
BC = TDTN	-0,0531	-0,0266	-0,0152	-0,0076
BD = TDTW	-0,0841	-0,0421	-0,0139	-0,0070
CD = TNTW	0,0068	0,0034	0,0018	0,0009
ABC = NDTD TN	-0,1907	-0,0954	-0,0317	-0,0158
ABD = NDTDTW	0,1193	0,0596	0,0213	0,0107
ACD = NDTNTW	0,0312	0,0156	0,0089	0,0045
BCD = TDTNTW	-0,0092	-0,0046	-0,0217	-0,0109
ABCD = NDTDTNTW	-0,1216	-0,0608	-0,0129	-0,0064

Mit der Regressionskonstante  $K = 46,133$  g und den in Tabelle 20 angeführten Werten der Regressionskoeffizienten folgt mit Gleichung 116 das vollständige Regressionspolynom für die Formteilmasse.

$$\begin{aligned}
 m = & 46,133 + 0,1109 \cdot X_1 - 0,0308 \cdot X_2 + 0,2024 \cdot X_3 - 0,0127 \cdot X_4 \\
 & - 0,0049 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0972 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0770 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,0266 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & - 0,0421 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0034 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0954 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & + 0,0596 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0156 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0046 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & - 0,0608 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \tag{116}$$

Das entsprechende Regressionspolynom für die Formteillänge lautet:

$$\begin{aligned}
 l = & 187,28 + 0,0220 \cdot X_1 - 0,0117 \cdot X_2 + 0,0338 \cdot X_3 - 0,0113 \cdot X_4 \\
 & - 0,0104 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0154 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0197 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,0076 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & - 0,0070 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0009 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0158 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & + 0,0107 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0045 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0109 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & - 0,0064 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \tag{117}$$

Um die Wirkungen und Wechselwirkungen in Effekte und zufällige Wirkungen zu unterscheiden, ist es notwendig, ihre statistische Signifikanz zu bestimmen. Aus Gleichung 97 erhält man die Standardabweichung des Gesamtexperiments. Diese beträgt für die Formteilmasse  $S_e = 0,0285$  g und für die Formteillänge

$S_e = 0,0050$  mm. Die Standardabweichung der Effekte folgt mit Gleichung 98 zu  $S_{eff} = 0,0036$  g bzw.  $S_{eff} = 0,0006$  mm. Die Berechnung des Vertrauensbereiches der Effekte  $VB_{eff}$  erfolgt nach Gleichung 99. Die Anzahl der Freiheitsgrade FG ergibt sich aus der Differenz der Gesamtzahl an Beobachtungen abzüglich der Anzahl an Faktorstufen. Schließt man den Zentralpunkt in den Versuchsplan mit ein, umfasst dieser 17 Stufen. Bei 15 Wiederholungen pro Stufe gibt es in Summe 255 Beobachtungen. Der Freiheitsgrad beträgt somit 238. Da der Tabellenwert der t-Verteilung für diesen Freiheitsgrad in Tabelle 42 (Anhang) nicht enthalten ist, wurde er in MS Excel über die Funktion `tinv` berechnet. Er beträgt  $t_{0,05,238} = 1,97$  bei einer gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$ . Der Vertrauensbereich der Effekte folgt schließlich mit  $VB_{eff} = 0,007$  g für die Formteilmasse und  $VB_{eff} = 0,001$  mm für die Formteillänge.

Vergleicht man die Vertrauensbereiche nach Gleichung 103 und Gleichung 104 mit den Ergebnissen in Tabelle 20, sieht man, dass bezüglich der Formteilmasse alle Wirkungen bis auf die Wechselwirkung CD von Nachdruckzeit und Werkzeugtemperatur mit einem Wert von 0,0068 g als statistisch signifikante Effekte zu sehen sind. Für die Formteillänge sind sämtliche Wirkungen und Wechselwirkungen signifikant. In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind diese Ergebnisse graphisch als Paretodiagramme umgesetzt. Blaue Balken stehen für positive, rote Balken für negative Wirkungen.  $VB_{eff}$  ist gelb markiert und bezeichnet die Signifikanzgrenze mit 0,007 g bzw. 0,001 mm.

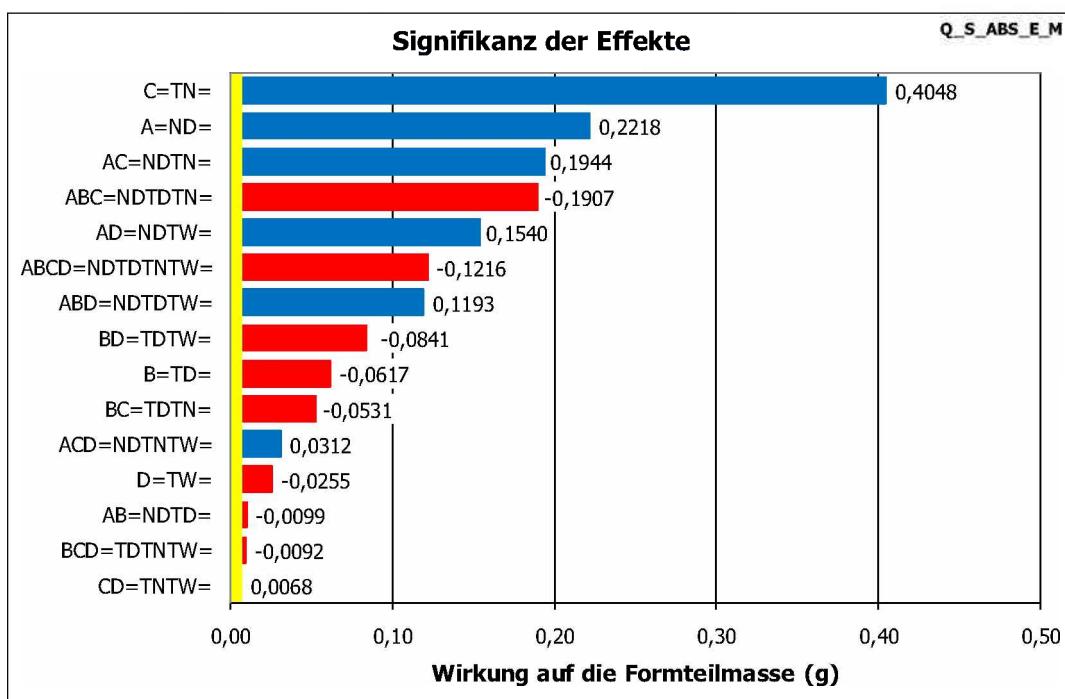


Abbildung 44: Paretodiagramm der Wirkungen für die Formteillänge

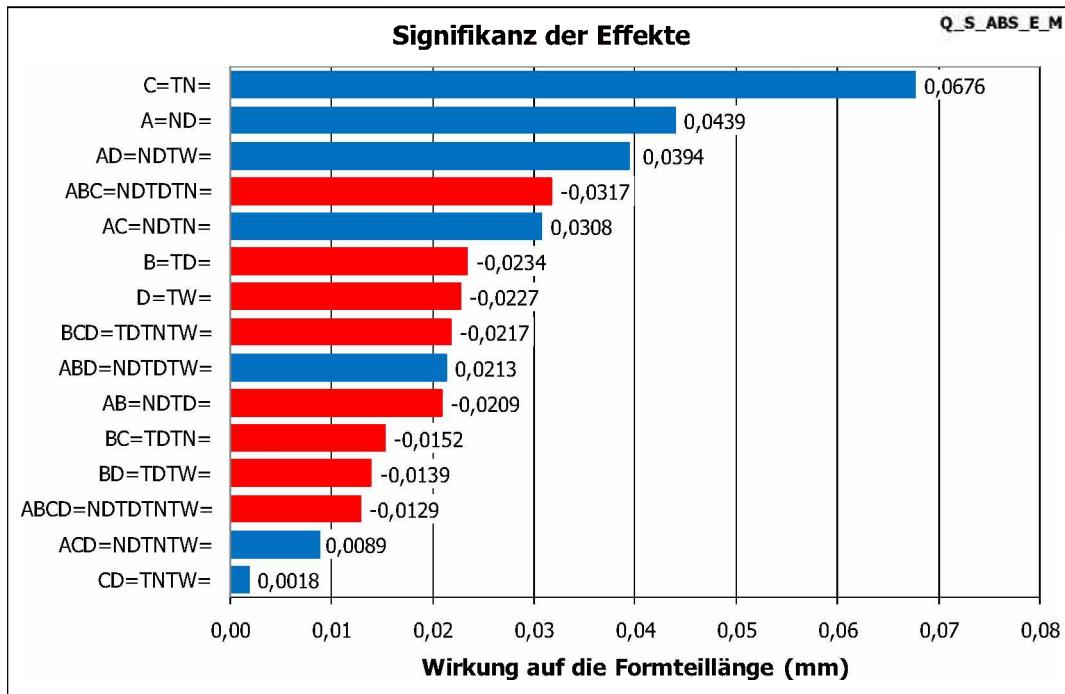


Abbildung 45: Pareto-Diagramm der Wirkungen für die Formteillänge

Betrachtet Abbildung 44 und Abbildung 45, sieht man, dass ich die großenmäßige Reihung der Wirkungen für Formteilmasse und -länge nicht vollständig entsprechen. Eine Erklärung hierfür liegt darin, dass die Messung der Formteilmassen auf drei Nachkommastellen genau, die Messung der Formteillänge aber auf zwei Nachkommastellen genau erfolgte. Dadurch ergeben sich rein rechnerisch gewisse Abweichungen. Des Weiteren ist zwar über alle in dieser Arbeit durchgeföhrten Versuche eine eindeutige Korrelation zwischen Formteilmasse und -länge zu beobachten, wobei aber die Verläufe beider Qualitätsgrößen über dem jeweiligen Einstellparameter unterschiedlich starke Abhängigkeiten bzw. Steigungen zeigen.

Die Pareto-Diagramme können wie in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt auch in einer standardisierten Form angegeben werden. Die Standardisierung besteht in einer Normierung auf die Standardabweichung der Effekte  $S_{eff}$ . Das bedeutet, dass die Werte der Wirkungen und die Signifikanzgrenze dimensionslos als Vielfache von  $S_{eff}$  ausgedrückt werden. Diese Darstellung hat keine Auswirkung auf die Rangfolge der Effekte. Ein Vorteil dieser Darstellung liegt in einer gewissen Entzerrung der Zahlenwerte. Gäbe man z. B. die Effekte  $B = -0,0234$  mm und  $D = -0,0227$  mm für die Formteillänge (Abbildung 45) auf nur drei Nachkommastellen genau an, hätten beide Effekte rundungsbedingt den gleichen Wert von -0,023 mm. Standardisiert man die Effekte, ergeben sich Werte von -37,2 für B und -36,0 für D (Abbildung 47). Für die normierten Werte der Signifikanzgrenze folgt für die Formteilmasse und für die Formteillänge jeweils der Wert 1,970.

#### 4. Ergebnisse

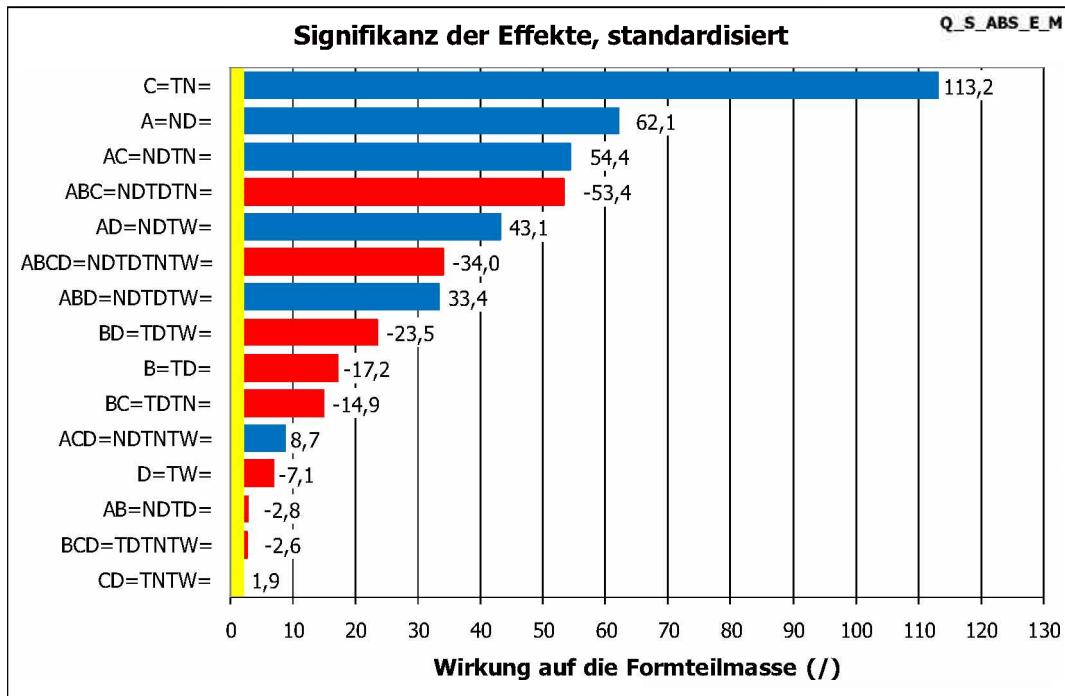


Abbildung 46: Pareto-Diagramm der Wirkungen für die Formteilmasse, standardisiert

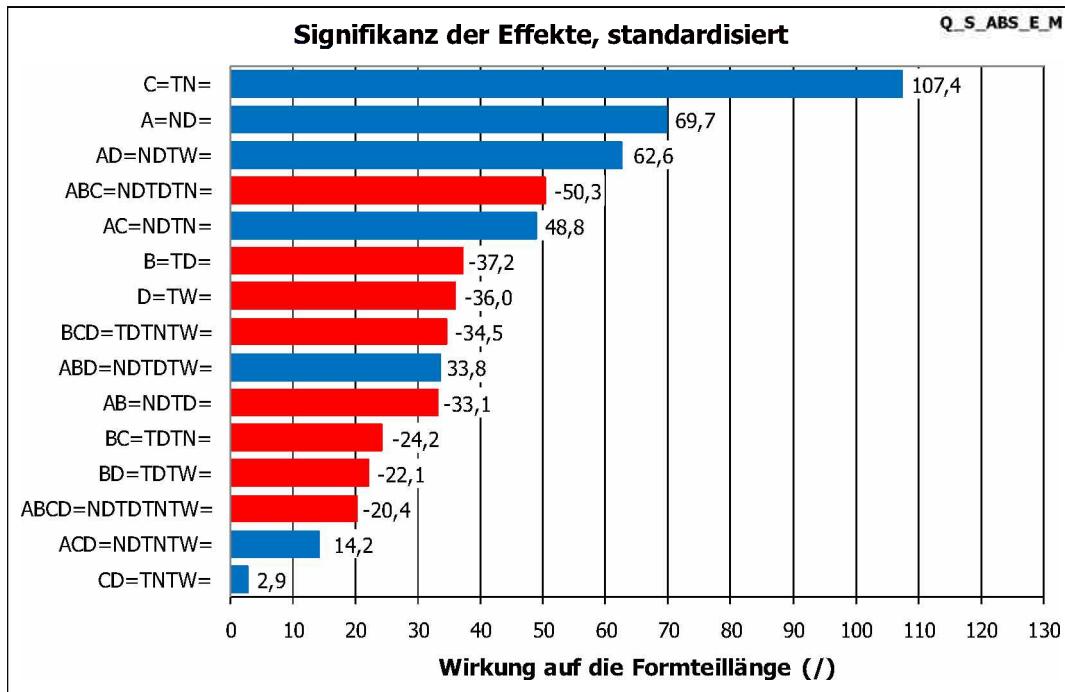


Abbildung 47: Pareto-Diagramm der Wirkungen für die Formteillänge, standardisiert

Mit dem Vertrauensbereich der Effekte ist es weiters möglich, die Gültigkeit des linearen statistischen Modells für die Untersuchungen abzuklären. Wie in Gleichung 118 festgehalten, ist das lineare Modell gültig, wenn der Absolutbetrag der Differenz zwischen dem Mittelwert  $K$  aller Versuchsergebnisse und dem Wert  $y_{ZP}$  im Zentralpunkt Q\_S\_ABS\_E\_M\_ZP kleiner ist als  $VB_{eff}$ . Für die Formteilmasse folgt mit

(Gleichung 118), dass das lineare Modell gültig ist, da  $K$  und  $y_{ZP}$  den exakt gleichen Wert haben.

$$|K - y_{ZP}| = |46,133 \text{ g} - 46,133 \text{ g}| = 0 \text{ g} < 0,007 \text{ g} \quad (118)$$

Das Ergebnis für die Formteillänge ist in Gleichung 119 festgehalten. Betrachtet man die Werte für  $K$  und  $y_{ZP}$  auf drei Nachkommastellen genau, ergibt sich für den Betrag ihrer Differenz 0,005 mm. Da der Vertrauensbereich der Effekte für die Formteillänge 0,001 mm beträgt, ist wäre der lineare Ansatz für die Formteillänge nach dieser Betrachtungsweise strenggenommen nicht gültig, kann aber aufgrund des geringen Unterschiedes als gute Näherung erachtet werden.

$$|K - y_{ZP}| = |187,280 \text{ mm} - 187,275 \text{ mm}| = 0,005 \text{ mm} > 0,001 \text{ mm} \quad (119)$$

#### 4.2.2 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

In weiterer Folge ist es von Interesse, die Qualitätsgrößen wie beim physikalischen Modell in ihrer Abhängigkeit von jeweils einem ihrer Einflussparameter darzustellen. Hierzu wurden die Einstellwerte jeweils eines Faktors aus den Einfaktorversuchen (Tabelle 7) normiert (-2 -1, 0, +1, +2) und in das Regressionspolynom eingesetzt. Die Werte der übrigen, unveränderten Einstellparameter gingen mit dem Stufenwert 0 in das Regressionspolynom ein. Gleichung 120 zeigt exemplarisch das resultierende Regressionspolynom für eine Versuchskonfiguration, in welcher der Nachdruck auf Stufe -2 (270 bar), und die übrigen drei Parameter auf Stufe 0 gestellt wurden. Dies entspricht den Einstellungen der Einfaktorversuche Q\_S\_ABS\_E\_E\_ND\_E und Q\_S\_ABS\_S\_E\_ND\_E.

$$m = 46,133 + 0,01109 \cdot X_1 = 46,133 + 0,01109 \cdot (-2) = 45,911 \text{ g} \quad (120)$$

Abbildung 48 zeigt die so berechnete Beziehung zwischen Formteilmasse und Nachdruck. Im untersuchten Nachdruckbereich von 270 – 310 bar steigt die Formteilmasse um 0,444 g an. Die Formteillänge nimmt ebenfalls mit steigendem Nachdruck im Ausmaß von 0,088 mm zu (Abbildung 49). Die Ergebnisse zu den Abhängigkeiten von Formteilmasse und -länge vom Nachdruck sind in Tabelle 21 festgehalten.

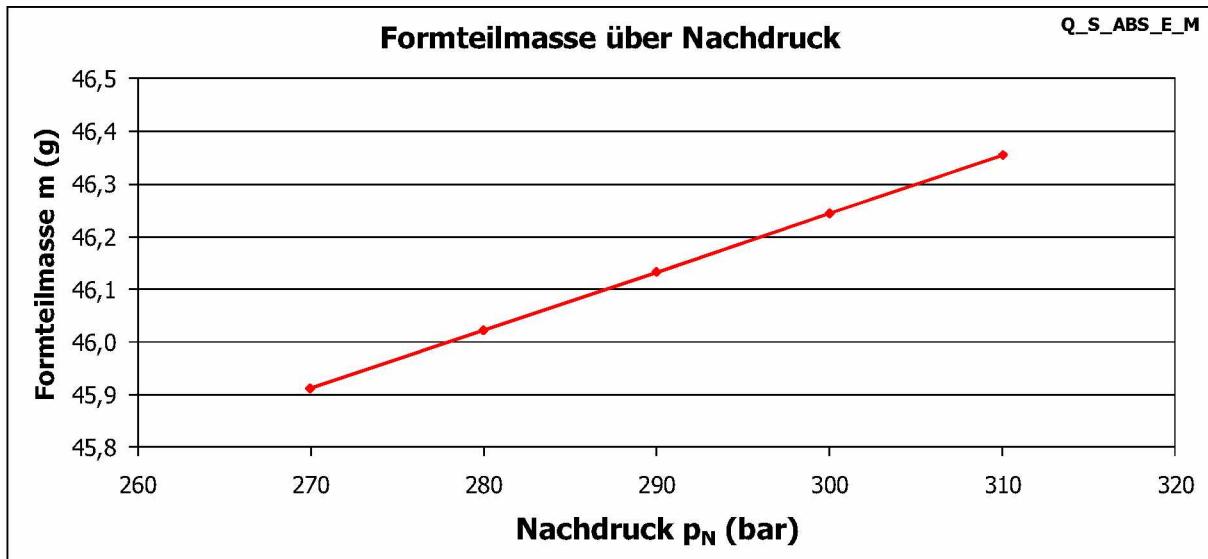


Abbildung 48: Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

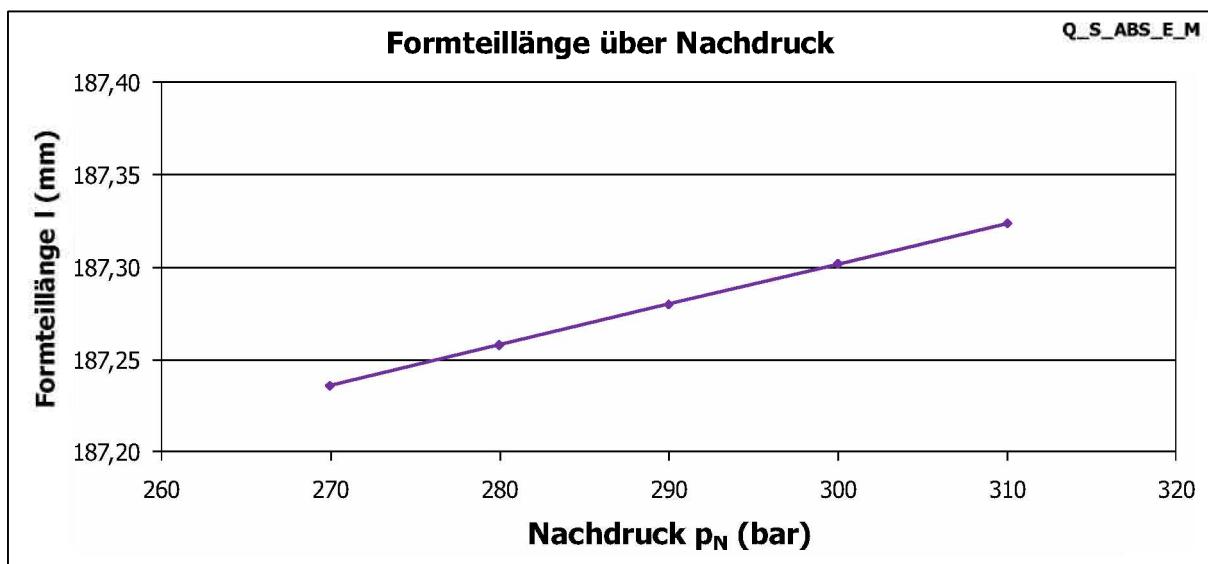


Abbildung 49: Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Tabelle 21: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

Q_S_ABS_E_M				
Nachdruck (bar)	Formteilmasse (g)	Steigung (g/bar)	Formteillänge (mm)	Steigung (mm/bar)
270	45,911	0,0111	187,236	0,0022
280	46,022		187,258	
290	46,133		187,280	
300	46,244		187,302	
310	46,355		187,324	

### 4.2.3 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur

Die Formteilmasse hat im betrachteten Bereich der Düsentemperatur einen sinkenden Verlauf (Abbildung 50). Steigt die Düsentemperatur von 250 °C auf 270 °C an, so nimmt die Masse des Formteils um 0,132 g ab. Damit einhergehend verringert sich die Formteillänge um 0,047 mm (Abbildung 51). Die Ergebnisse zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur sind zahlenmäßig in Tabelle 22 angeführt.

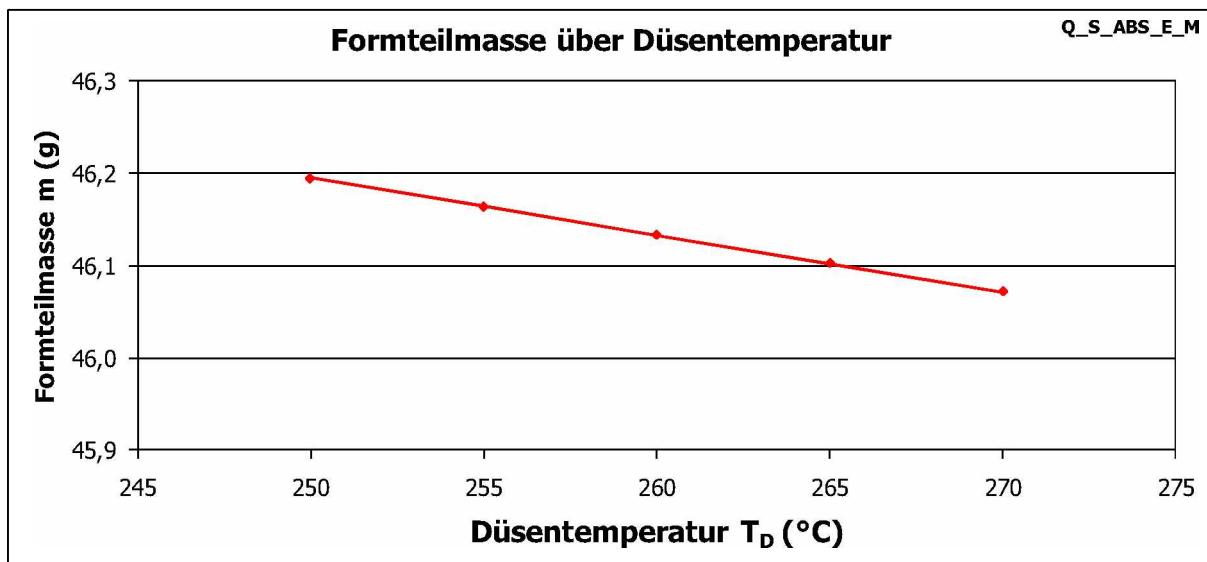


Abbildung 50: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

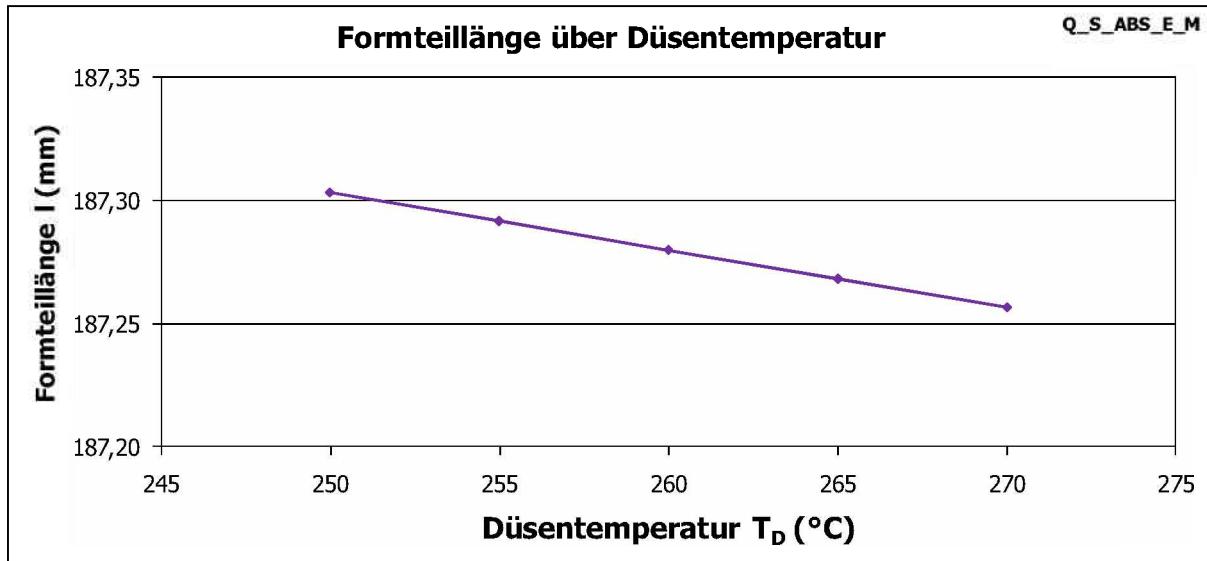


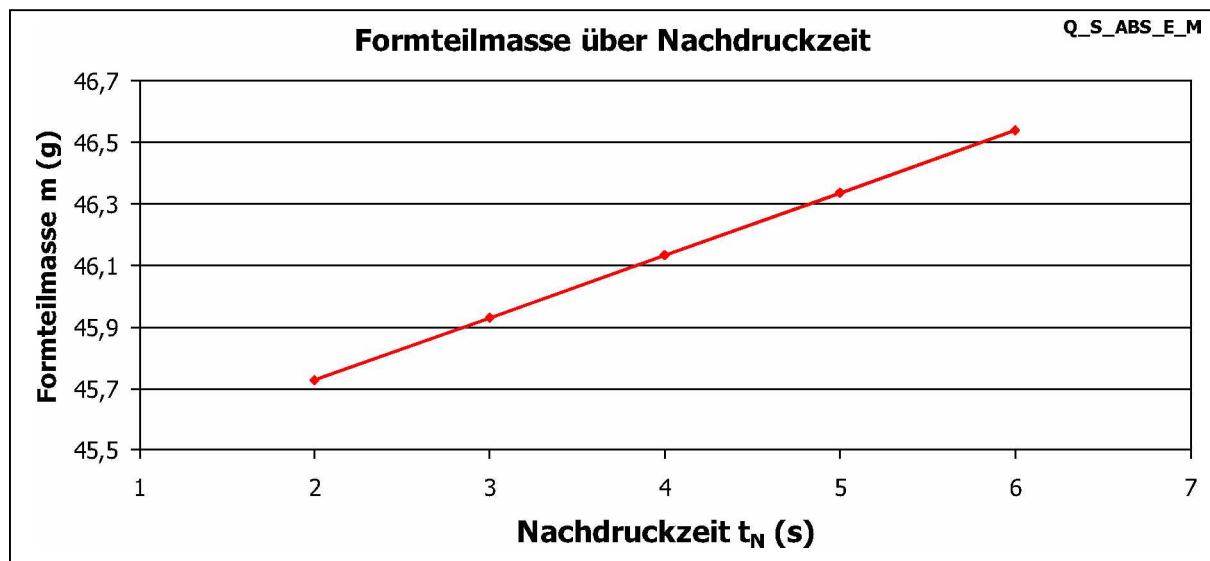
Abbildung 51: Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur

*Tabelle 22: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur*

Q_S_ABS_E_M				
Düsentemperatur	Formteilmasse	Steigung	Formteillänge	Steigung
(C)	(g)	(g/C)	(mm)	(mm/C)
250	46,195	-0,0062	187,303	-0,0023
255	46,164		187,292	
260	46,133		187,280	
265	46,102		187,268	
270	46,072		187,257	

#### 4.2.4 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Beide Größen weisen bei Erhöhung der Nachdruckzeit von 2 s auf 6 s zunehmende Werte auf. Die Formteilmasse (Abbildung 52) wächst in diesem Bereich um 0,81 g. Die Formteillänge (Abbildung 53) erhöht sich um 0,155 mm. Die Ergebnisse zu der Beziehung zwischen den Qualitätsgrößen und der Nachdruckzeit können Tabelle 23 entnommen werden.



*Abbildung 52: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit*

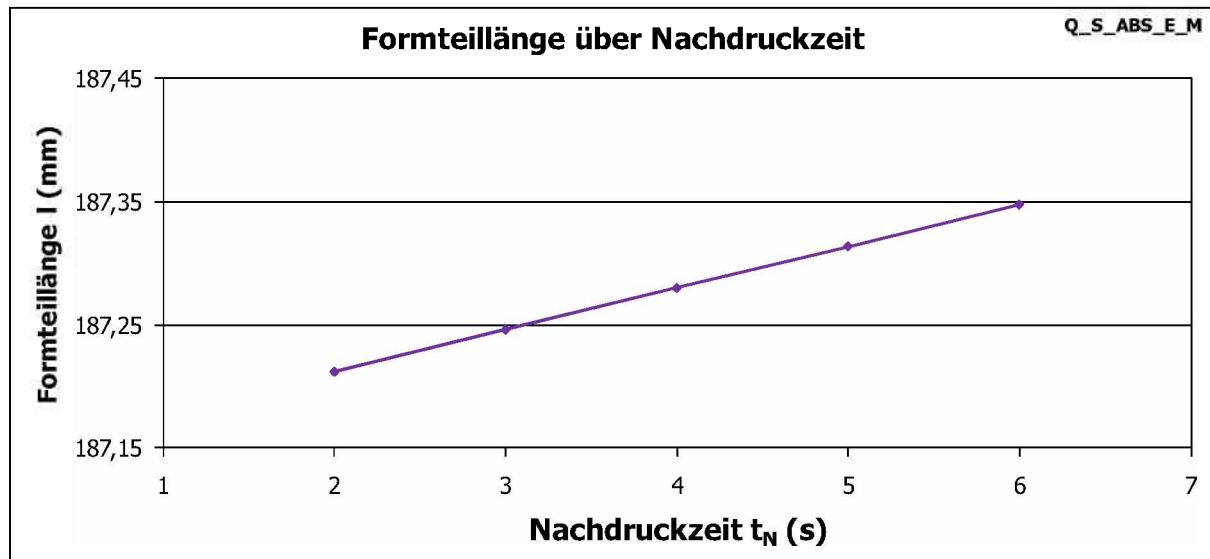


Abbildung 53: Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Tabelle 23: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Q_S_ABS_E_M				
Nachdruckzeit (s)	Formteilmasse (g)	Steigung (g/s)	Formteillänge (mm)	Steigung (mm/s)
2	45,728	0,2024	187,212	0,0338
3	45,931		187,246	
4	46,133		187,280	
5	46,336		187,314	
6	46,538		187,348	

#### 4.2.5 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

Wird die Werkzeugtemperatur von 60 °C auf 80 °C gesteigert, zeigen die Qualitätsgrößen Verläufe mit negativen Steigungen. Die Formteilmasse verringert sich im genannten Bereich um 0,051 g (Abbildung 54). Dabei nimmt die Formteillänge um 0,045 mm ab (Abbildung 55). Tabelle 24 fasst die Ergebnisse der Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur zusammen.

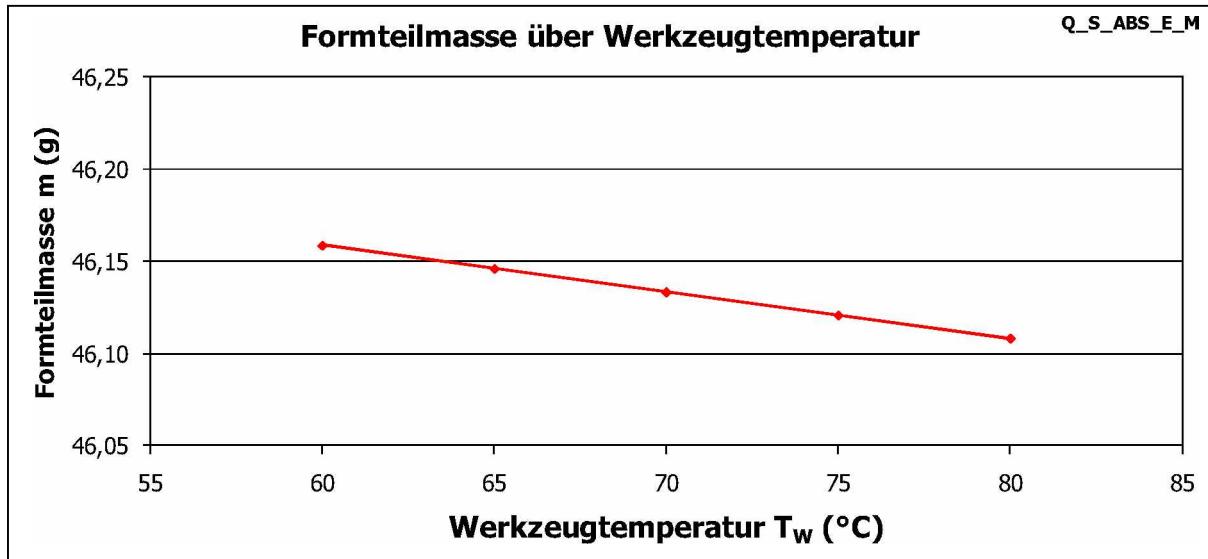


Abbildung 54: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

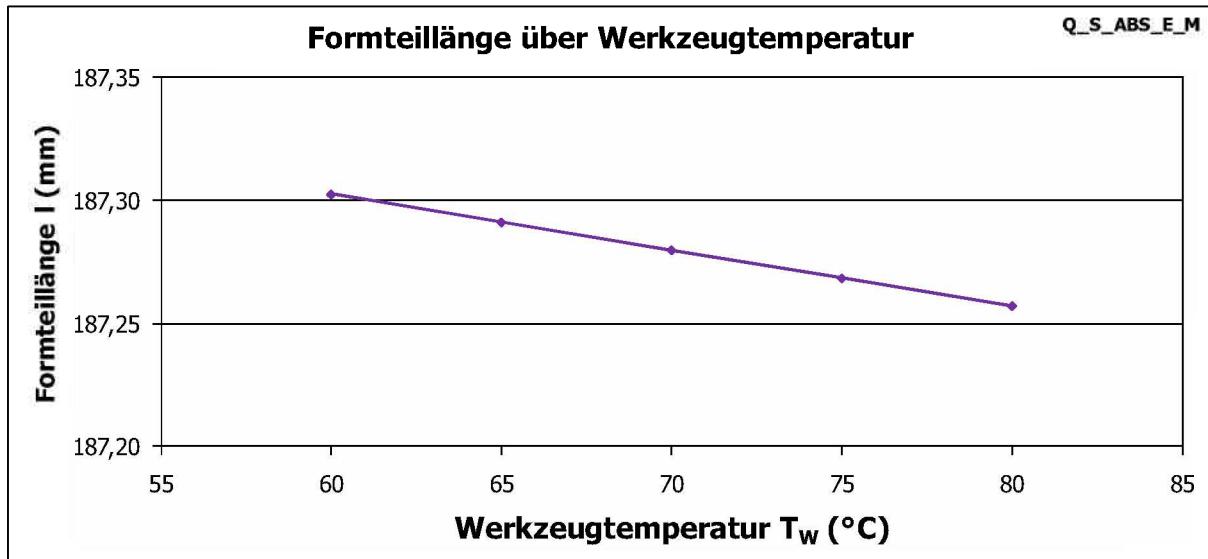


Abbildung 55: Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Tabelle 24: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

Q_S_ABS_E_M				
Werkzeugtemperatur (°C)	Formteilmasse (g)	Steigung (g/°C)	Formteillänge (mm)	Steigung (mm/°C)
60	46,159	-0,0025	187,303	-0,0023
65	46,146		187,291	
70	46,133		187,280	
75	46,121		187,269	
80	46,108		187,257	

## 4.3 Physikalisches Modell – Simulation

### 4.3.1 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

Die Simulationsergebnisse zum physikalischen Modell des Qualitätsreglers zeigen für die Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck einen nahezu linearen Zusammenhang mit positiver Steigung. Aus den linearisierten Messwerten folgt, dass sich die Formteilmasse bei einer Nachdruckerhohung von 270 bar auf 310 bar um 0,110 g steigert. Abbildung 56 zeigt den originären und den linearisierten Verlauf der Formteilmasse mit dem Nachdruck.

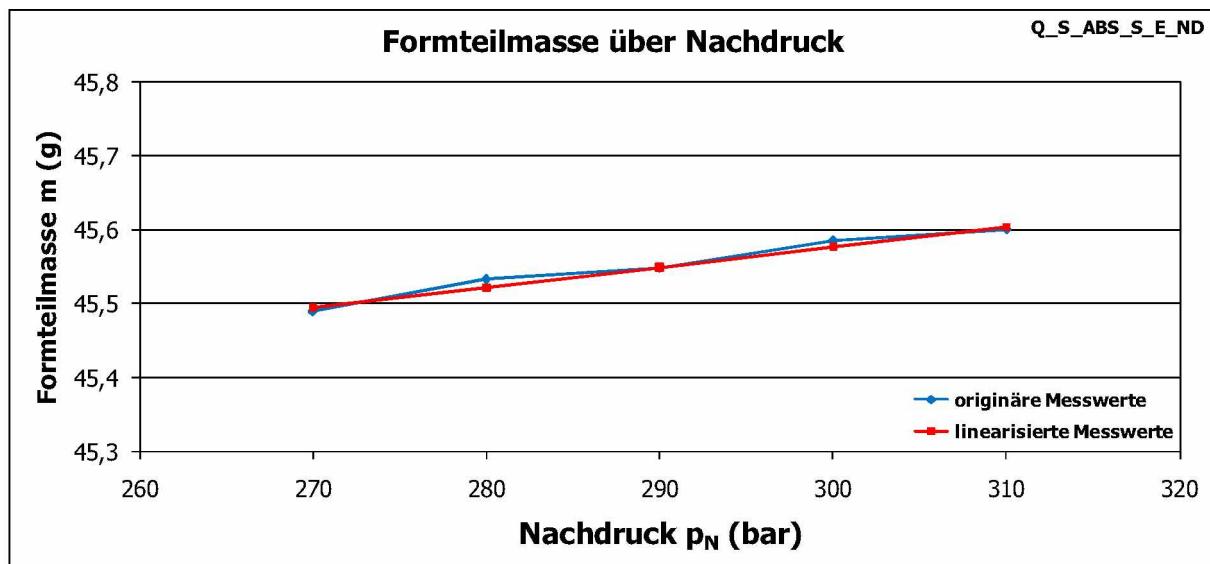


Abbildung 56: Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

Die Konstante  $K_1$  wurde nach Gleichung 34 berechnet und hat einen Wert von 6,0220E-05 bar<sup>-1</sup>. Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

Messserie	Nachdruck (bar)	Formteilmasse originär	Steigung (g/bar)	Formteilmasse linearisiert	Differenz (g)	Konstante $K_1$ (bar <sup>-1</sup> )
		(g)		(g)		
Q_S_ABS_S_E_ND_E	270	45,490	0,0027	45,494	0,005	6,0220E-05
Q_S_ABS_S_E_ND_F	280	45,534		45,522	-0,012	
Q_S_ABS_S_E_ND_G	290	45,549		45,549	0,000	
Q_S_ABS_S_E_ND_H	300	45,586		45,577	-0,009	
Q_S_ABS_S_E_ND_I	310	45,601		45,604	0,003	

Die Formteillänge verläuft gleichermaßen annähernd linear (Abbildung 57). Nach Linearisierung der Messwerte ergibt sich eine Zunahme der Formteillänge um 0,060 mm.

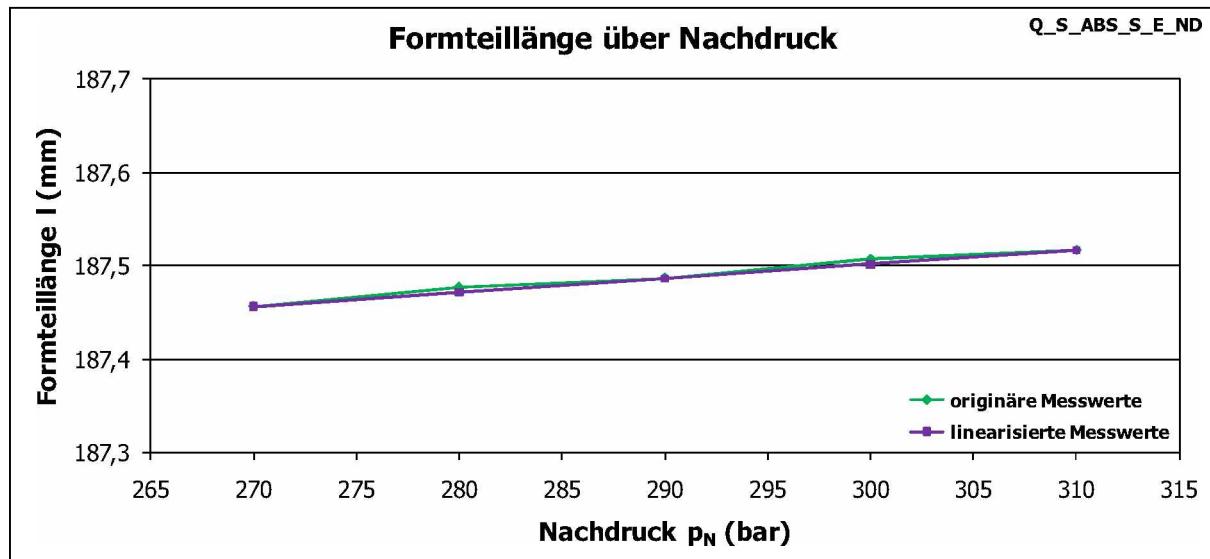


Abbildung 57: Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Die Konstanten A und B des physikalischen Modells für die Formteillänge wurden nach Gleichung 66 und Gleichung 67 berechnet. Ihre Zahlenwerte betragen  $A = 5,2232E-05 \text{ bar}^{-1}$  und  $B = 2,5750E-19 \text{ bar}^{-1/3}$ . Tabelle 26 zeigt eine Aufstellung der Ergebnisse zur Beziehung zwischen Formteillänge und Nachdruck.

Tabelle 26: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Messserie	Nachdruck	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante A
	(bar)	(mm)	(mm/bar)	(mm)	(mm)	(bar $^{-1}$ )
Q_S_ABS_S_E_ND_E	270	187,46	0,0015	187,46	0,000	5,2232E-05
Q_S_ABS_S_E_ND_F	280	187,48		187,47	-0,005	Konstante B
Q_S_ABS_S_E_ND_G	290	187,49		187,49	0,000	
Q_S_ABS_S_E_ND_H	300	187,51		187,50	-0,005	(bar $^{-1/3}$ )
Q_S_ABS_S_E_ND_I	310	187,52		187,52	0,000	2,5750E-19

### 4.3.2 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur

Entgegen dem in Abschnitt 4.1.2 experimentell ermittelten Verlauf (Abbildung 34) resultiert im Fall der Simulation wie in Abbildung 58 dargestellt ein beinahe linearer, abfallender Zusammenhang für Formteilmasse und Düsentemperatur. Diese Tatsache ist wie erwähnt die Entscheidungsgrundlage für die Eliminierung der experimentell ermittelten Messwerte bei 255 °C und 265 °C in Abschnitt 4.1.2. Die linearisierten Messwerte aus der Simulation weisen mit steigender Düsentemperatur von 250 °C auf 270 °C eine Abnahme von 0,047 g auf.

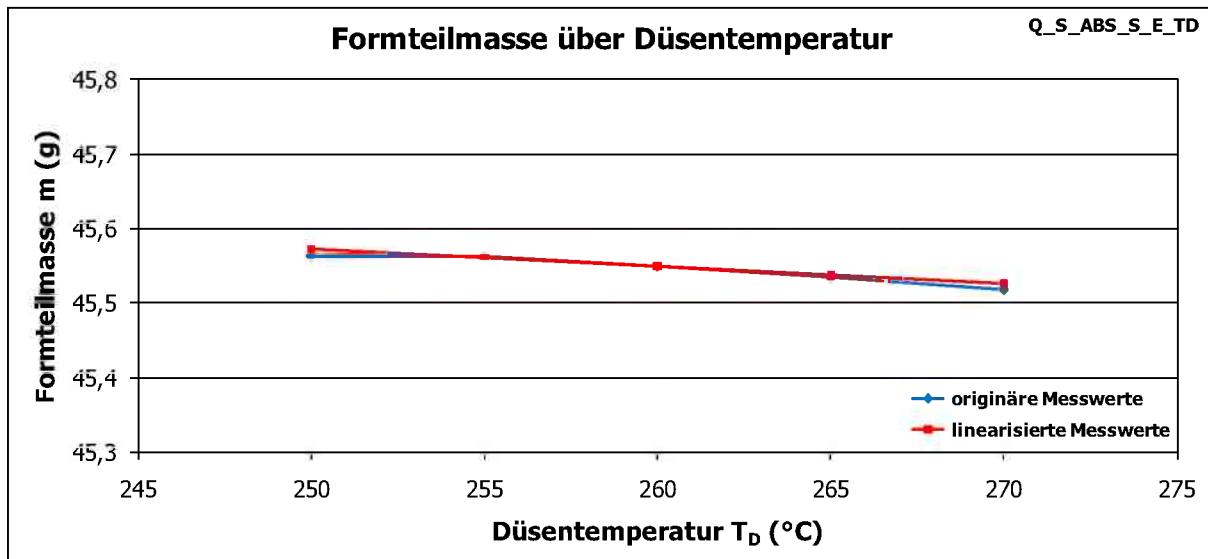


Abbildung 58: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

Die nach Gleichung 35 ermittelte Konstante  $K_2$  hat die Größe  $5,1505E-05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur sind in Tabelle 27 angegeben.

Tabelle 27: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

Messserie	Düsen-temperatur	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_2$
	(°C)	(g)	(g/°C)	(g)	(g)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_S_E_TD_E	250	45,563	-0,0023	45,573	0,010	5,1505E-05
Q_S_ABS_S_E_TD_F	255	45,563		45,561	-0,002	
Q_S_ABS_S_E_TD_G	260	45,549		45,549	0,000	
Q_S_ABS_S_E_TD_H	265	45,534		45,538	0,003	
Q_S_ABS_S_E_TD_I	270	45,519		45,526	0,007	

Im Fall der Formteillänge folgt originär ebenfalls ein in guter Näherung linearer Bezug (Abbildung 59). Nach der Linearisierung ergibt sich eine Verringerung der Formteillänge um 0,054 mm im betrachteten Bereich der Düsentemperatur.

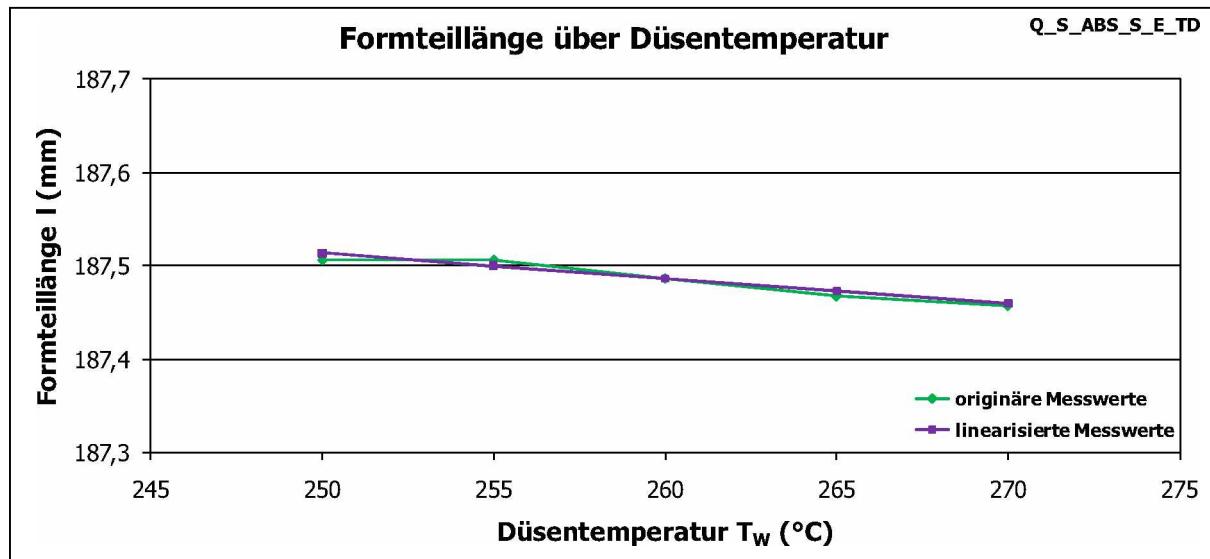


Abbildung 59: Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur

Die Werte der nach Gleichung 68 und Gleichung 69 berechneten Konstanten betragen  $C = 3,7026E-05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  und  $D = 4,8789E-20 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1/3}$ . Tabelle 28 fasst die Messwerte und Ergebnisse zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur zusammen.

Tabelle 28: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Düsentemperatur

Messserie	Düsen-temperatur	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante C
	(°C)	(mm)	(mm/°C)	(mm)	(mm)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_S_E_TD_E	250	187,51	-0,0027	187,51	0,008	3,7026E-05
Q_S_ABS_S_E_TD_F	255	187,51		187,50	-0,006	Konstante D
Q_S_ABS_S_E_TD_G	260	187,49		187,49	0,000	
Q_S_ABS_S_E_TD_H	265	187,47		187,47	0,006	
Q_S_ABS_S_E_TD_I	270	187,46		187,46	0,002	4,8789E-20

#### 4.3.3 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Für die Beziehung zwischen Formteilmasse und Nachdruckzeit erhält man einen typischen, gekrümmten Kurvenverlauf (Abbildung 60). Für die linearisierten Messwerte folgt bei einer Verlängerung der Nachdruckphase von 2 s auf 6 s ein Anwachsen der Formteilmasse um 0,765 g.

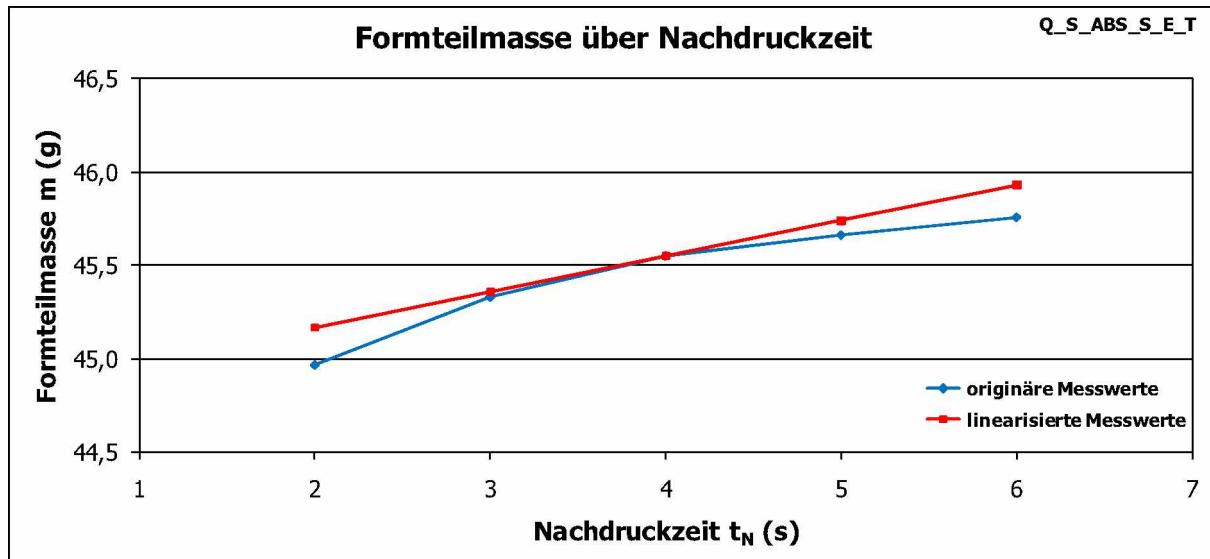


Abbildung 60: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit

Die Konstante  $K_5$  (Gleichung 39) nimmt den Wert  $0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$  an und hat in weiterer Folge keine Auswirkung auf die mit Gleichung 40 berechnete Konstante  $K_3$ , für welche man einen Zahlenwert von  $8,7079\text{E-}06 \text{ s}^{-1}$  erhält. Messwerte und Resultate für die Relation zwischen Formteilmasse und Nachdruckzeit sind in Tabelle 29 gesammelt.

Tabelle 29: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit

Messserie	Nachdruckzeit	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_3$
	(s)	(g)	(g/s)	(g)	(g)	(s $^{-1}$ )
Q_S_ABS_S_E_TN_E	2	44,966	0,1913	45,167	0,200	8,7079E-06
Q_S_ABS_S_E_TN_F	3	45,330		45,358	0,028	Konstante $K_5$
Q_S_ABS_S_E_TN_G	4	45,549		45,549	0,000	
Q_S_ABS_S_E_TN_H	5	45,662		45,741	0,079	
Q_S_ABS_S_E_TN_I	6	45,757		45,932	0,175	0,0000E+00

Wie aus Abbildung 61 ersichtlich steigt die Formteillänge mit dem Nachdruck ebenfalls nach einer leicht gekrümmten Kurve an. Nach Linearisierung der originären Messwerte resultiert für die Formteillänge eine Zunahme von 0,496 mm über die Spanne der untersuchten Nachdruckzeiten.

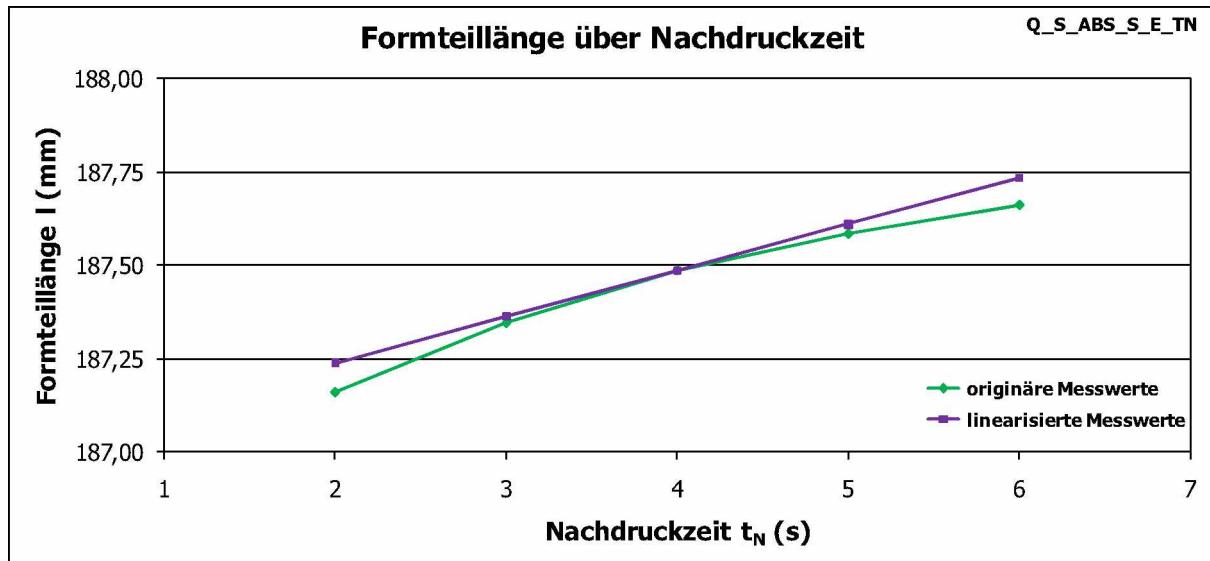


Abbildung 61: Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Die Konstanten E und F wurden anhand von Gleichung 70 und Gleichung 71 errechnet und ergeben sich zu  $E = 3,5518E-03 \text{ s}^{-1}$  und  $F = 0 \text{ s}^{-1/3}$ . In Tabelle 30 findet sich eine Aufstellung über die Messwerte und Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Formteillänge und Nachdruckzeit.

Tabelle 30: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Messserie	Nachdruckzeit	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante E
	(bar)	(mm)	(mm/bar)	(mm)	(mm)	(s <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_S_E_ND_E	2	187,16	0,1239	187,24	0,078	3,5518E-03
Q_S_ABS_S_E_ND_F	3	187,35		187,36	0,017	Konstante F
Q_S_ABS_S_E_ND_G	4	187,49		187,49	0,000	
Q_S_ABS_S_E_ND_H	5	187,58		187,61	0,026	
Q_S_ABS_S_E_ND_I	6	187,66		187,73	0,073	0,0000E+00

#### 4.3.4 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

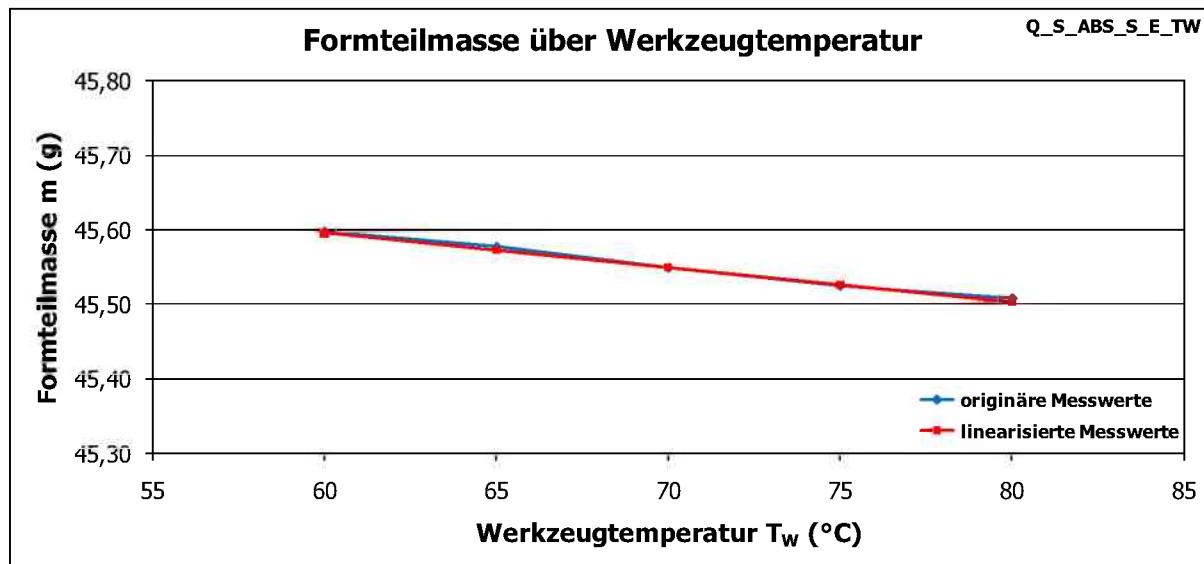


Abbildung 62: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

Nimmt die Werkzeugtemperatur von 60 C auf 80 C zu, sinkt die Formteilmasse nahezu linear ab (Abbildung 62). Ihre Verringerung beträgt nach Linearisierung der Messwerte 0,092 g.

Für die Konstante  $K_4$  erhält man mit Gleichung 42 einen Wert von  $-5,5518E-04 C^{-1}$ . Messwerte und Resultate zum Zusammenhang zwischen Formteilmasse und Werkzeugtemperatur sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

Messserie	Werkzeug-temperatur	Formteilmasse originär	Steigung	Formteilmasse linearisiert	Differenz	Konstante $K_4$
	( C)	(g)	(g/ C)	(g)	(g)	( C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_S_E_TW_E	60	45,598	-0,0046	45,595	-0,002	$-5,5518E-04$
Q_S_ABS_S_E_TW_F	65	45,577		45,572	-0,005	
Q_S_ABS_S_E_TW_G	70	45,549		45,549	0,000	
Q_S_ABS_S_E_TW_H	75	45,525		45,526	0,001	
Q_S_ABS_S_E_TW_I	80	45,508		45,503	-0,005	

Wie in Abbildung 63 zu sehen ist, weist auch die Formteilmasse eine annähernd lineare Abnahme bei einer Steigerung der Werkzeugtemperatur auf (Abbildung 63). Wird diese um 20 C erhöht, verringert sich die Formteillänge um 0,103 mm.

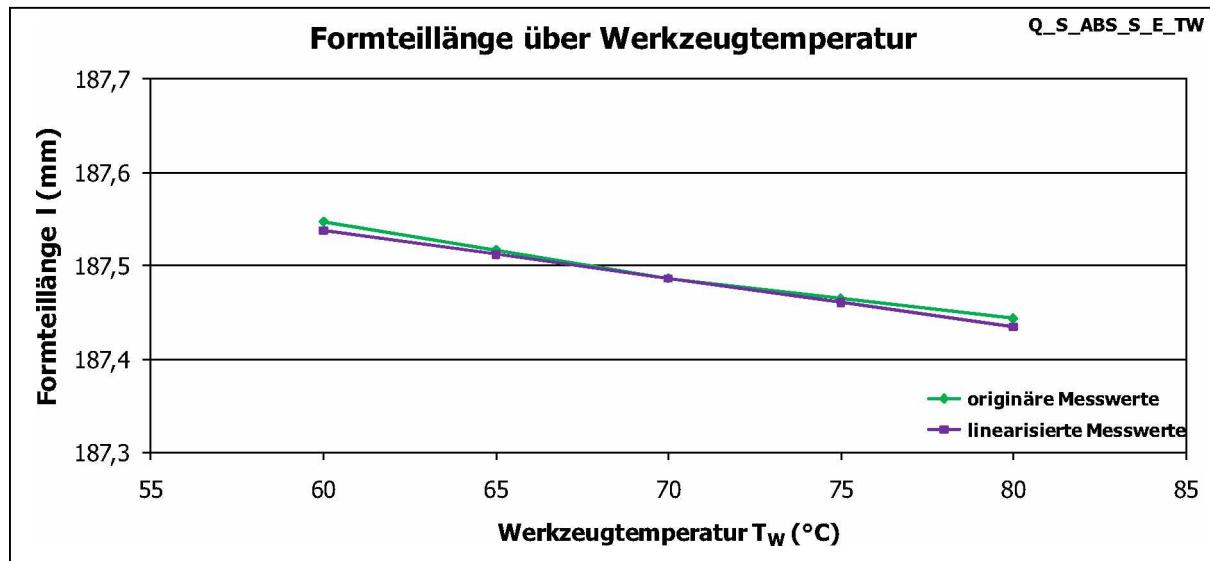


Abbildung 63: Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Die Zahlenwerte der Konstanten G und H folgen nach Gleichung 72 und Gleichung 73 zu  $G = -7,3546E-05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  bzw.  $H = 4,0658E-19 \text{ } \text{C}^{-1/3}$ . In Tabelle 32 sind Messwerte und Ergebnisse zum untersuchten Zusammenhang angeführt.

Tabelle 32: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Messserie	Werkzeug-temperatur	Formteillänge originär	Steigung	Formteillänge linearisiert	Differenz	Konstante G
	(°C)	(mm)	(mm/°C)	(mm)	(mm)	(°C <sup>-1</sup> )
Q_S_ABS_S_E_TW_E	60	187,55	-0,0052	187,54	-0,009	-7,3546E-05
Q_S_ABS_S_E_TW_F	65	187,52		187,51	-0,004	Konstante H
Q_S_ABS_S_E_TW_G	70	187,49		187,49	0,000	
Q_S_ABS_S_E_TW_H	75	187,47		187,46	-0,004	
Q_S_ABS_S_E_TW_I	80	187,44		187,43	-0,009	4,0658E-19

### 4.3.5 Verknüpfung von Einspritz- und Nachdruckphase – Exponent N

Die Berechnungen zur Ermittlung des Exponenten N erfolgten analog zu der in Abschnitt 4.1.5 beschriebenen Vorgangsweise. Der Zusammenhang zwischen den Qualitätsgrößen und der Düsentemperatur wurde aus dem Versuch Q\_S\_ABS\_S\_E\_TD gewonnen. Die Berechnung der Einspritzarbeit der einzelnen Versuchsstufen erfolgte anhand des im Analyse-Protokoll des Simulationsprogrammes aufgezeichneten Einspritzdruck-Verlaufes über der Zeit. Die Werte der Einspritzarbeit in Abhängigkeit von der Düsentemperatur (Abbildung 64) wurden wiederum linearisiert. Um die geänderten Nachdruckwerte zu berechnen wurde die in Q\_S\_ABS\_S\_E\_ND gefundene Beziehung zwischen den Qualitätsgrößen und dem Nachdruck umgekehrt (Abbildung 65 und Abbildung 66).

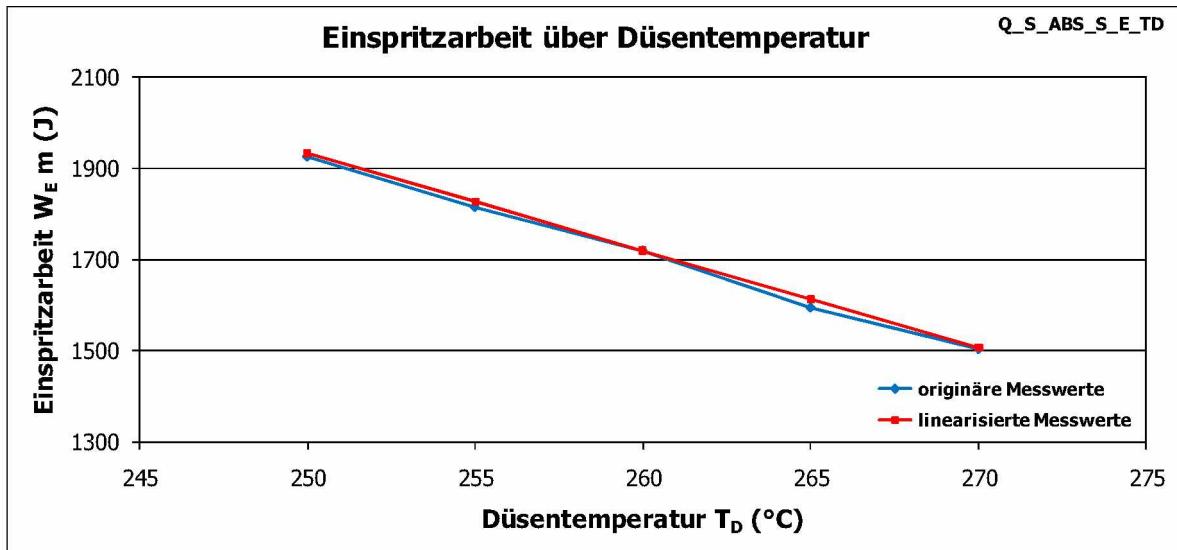


Abbildung 64: Abhängigkeit der Einspritzarbeit von der Düsentemperatur

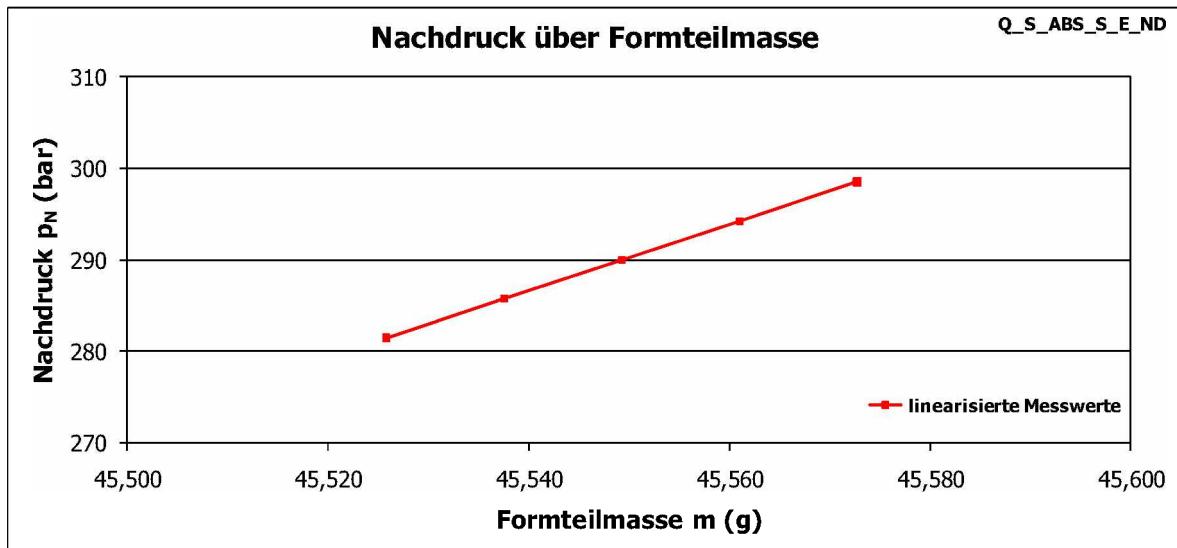


Abbildung 65: Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteilmasse

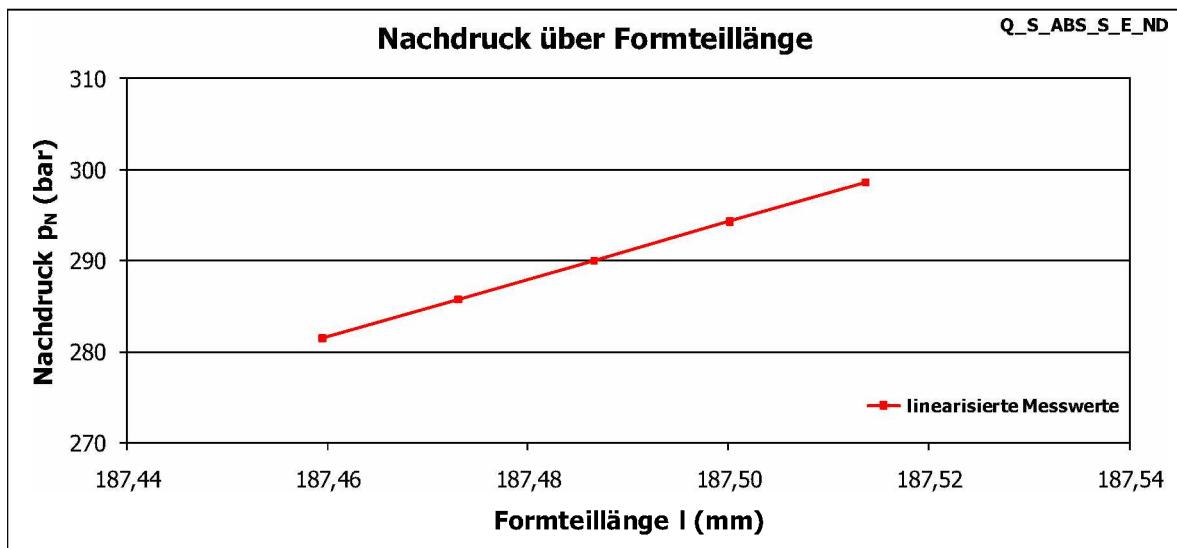


Abbildung 66: Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteillänge

Unter Verwendung der Konstanten  $K_1$  (Abschnitt 4.3.1) und  $K_2$  (Abschnitt 4.3.2) wurde  $N$  für die Formteilmasse nach Gleichung 45 berechnet. Der Mittelwert des Exponenten beträgt  $N = 2,3897E-01$ . Die Werte  $\Delta p_N$  zur Korrektur von durch Änderungen der Einspritzarbeit verursachten Schwankungen der Formteilmasse wurden nach Gleichung 31 berechnet. In Tabelle 33 sind die Messwerte und Ergebnisse zur Berechnung des Exponenten  $N$  zusammengefasst. Der Vergleich zwischen den rechnerischen Druckwerten aus dem Zusammenhang zwischen Nachdruck und Formteilmasse mit jenen, welche nach Gleichung 31 mit dem Exponenten  $N$  berechnet wurden, zeigt eine maximale Differenz von 0,93 bar.

*Tabelle 33: Wertetabelle zur Ermittlung des Exponenten  $N$  für die Formteilmasse*

Messserie	T <sub>D</sub> (°C)	p <sub>N</sub> (bar)	m linearisiert (g)	W <sub>E</sub> linearisiert (J)	als Funktion von m			Exponent N (-)	mit N		p <sub>N</sub> Differenz (bar)
					p <sub>N</sub> theoretisch (bar)	Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)		Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)	
Q_S_ABS_S_E_TD_E	250	290	45,573	1933	298,55	-8,55	281,45	2,3897E-01	-7,85	282,15	0,70
Q_S_ABS_S_E_TD_F	255	290	45,561	1826	294,28	-4,28	285,72		-4,10	285,90	0,18
Q_S_ABS_S_E_TD_G	260	290	45,549	1720	290,00	0,00	290,00		0,00	290,00	0,00
Q_S_ABS_S_E_TD_H	265	290	45,538	1613	285,72	4,28	294,28		4,50	294,50	0,23
Q_S_ABS_S_E_TD_I	270	290	45,526	1507	281,45	8,55	298,55		9,48	299,48	0,93

Analog dazu wurde mit den in Abschnitt 4.3.1 und Abschnitt 4.3.2 ermittelten Konstanten  $A$  und  $C$  für die Formteillänge der Exponent  $N$  nach Gleichung 77 berechnet. Es ergab sich ein Wert von  $N = -1,9893E-1$  (/). Hierbei ergeben sich relativ große Abweichungen zwischen den Nachdruck-Korrekturwerten, welche mit  $N$  berechnet wurden und jenen, die über die Beziehung zwischen Nachdruck und Formteillänge ermittelt wurden. Diese weichen um bis zu 11,79 bar ab.

*Tabelle 34: Wertetabelle zur Ermittlung des Exponenten  $N$  für die Formteillänge*

Messserie	T <sub>D</sub> (°C)	p <sub>N</sub> (bar)	I linearisiert (g)	W <sub>E</sub> linearisiert (J)	als Funktion von I			Exponent N (-)	mit N		p <sub>N</sub> Differenz (bar)
					p <sub>N</sub> theoretisch (bar)	Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)		Δp <sub>N</sub> (bar)	p <sub>N</sub> neu (bar)	
Q_S_ABS_E_E_TD_E	250	290	187,51	1933	308,00	-18,00	272,00	-1,9893E-01	-6,21	283,79	-11,79
Q_S_ABS_E_E_TD_F	255	290	187,50	1826	299,00	-9,00	281,00		-3,32	286,68	-5,68
Q_S_ABS_E_E_TD_G	260	290	187,49	1720	290,00	0,00	290,00		0,00	290,00	0,00
Q_S_ABS_E_E_TD_H	265	290	187,47	1613	281,00	9,00	299,00		3,85	293,85	5,14
Q_S_ABS_E_E_TD_I	270	290	187,46	1507	272,00	18,00	308,00		8,37	298,37	9,63

## 4.4 Statistisches Modell – Simulation

### 4.4.1 Wirkungen und Signifikanz

In Tabelle 35 sind die aus der Simulation gewonnenen Ergebnisse des statistischen Modells zusammengefasst. Die Messserien sind nach ihren Stufenwerten aufsteigend geordnet. Da es sich um unreplizierte Versuche handelt, gibt es keine Werte für Standardabweichung und Varianz. Formteilmasse und -länge im Zentralpunkt betragen 45,549 g und 187,49 mm. Die Mittelwerte über alle Stufen sind 45,498 g und 187,47 mm.

Tabelle 35: Messergebnisse der Versuche zum statistischen Modell

Messserie	Stufe	Faktoren				Formteilmasse m (g)	Formteillänge l (mm)
		A	B	C	D		
		ND	TD	TN	TW		
Q_S_ABS_S_M_ZP	0	0	0	0	0	45,549	187,49
Q_S_ABS_S_M_P	(1)	-	-	-	-	45,368	187,38
Q_S_ABS_S_M_H	a	+	-	-	-	45,443	187,42
Q_S_ABS_S_M_L	b	-	+	-	-	45,313	187,35
Q_S_ABS_S_M_D	ab	+	+	-	-	45,346	187,37
Q_S_ABS_S_M_N	c	-	-	+	-	45,644	187,60
Q_S_ABS_S_M_F	ac	+	-	+	-	45,710	187,63
Q_S_ABS_S_M_J	bc	-	+	+	-	45,662	187,60
Q_S_ABS_S_M_B	abc	+	+	+	-	45,727	187,63
Q_S_ABS_S_M_O	d	-	-	-	+	45,318	187,33
Q_S_ABS_S_M_G	ad	+	-	-	+	45,366	187,36
Q_S_ABS_S_M_K	bd	-	+	-	+	45,221	187,28
Q_S_ABS_S_M_C	abd	+	+	-	+	45,234	187,29
Q_S_ABS_S_M_M	cd	-	-	+	+	45,608	187,55
Q_S_ABS_S_M_E	acd	+	-	+	+	45,677	187,59
Q_S_ABS_S_M_I	bcd	-	+	+	+	45,616	187,53
Q_S_ABS_S_M_A	abcd	+	+	+	+	45,670	187,57
Mittelwert K:						45,498	187,47

Die nach den in 0 erläuterten Zusammenhängen ermittelten Wirkungen und Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 36 angeführt. In Bezug auf beide Qualitätsgrößen hat die Wirkung der Nachdruckzeit C den größten Einfluss. Wird der Wert der Nachdruckzeit von der niedrigen auf die hohe Stufe variiert (siehe Versuchsplan in Tabelle 8), ändert sich die Formteilmasse um 0,338 g und die Formteillänge um 0,241 mm.

Tabelle 36: Wirkungen und Regressionskoeffizienten des statistischen Modells

Wirkungen und Regressionskoeffizienten			Q_S_ABS_S_M	
Faktorenkombination	Formteilmasse m (g)		Formteillänge l (mm)	
	Wirkung	Regressions- koeffizient	Wirkung	Regr.-Koeff.
A = ND	0,053	0,026	0,030	0,015
B = TD	-0,043	-0,022	-0,032	-0,016
C = TN	0,338	0,169	0,241	0,121
D = TW	-0,063	-0,031	-0,055	-0,027
AB = NDTD	-0,011	-0,006	-0,005	-0,003
AC = NDTN	0,010	0,005	0,005	0,002
AD = NDTW	-0,007	-0,003	0,000	0,000
BC = TDTN	0,052	0,026	0,018	0,009
BD = TDTW	-0,014	-0,007	-0,008	-0,004
CD = TNTW	0,020	0,010	0,003	0,002
ABC = NDTD TN	0,008	0,004	0,005	0,003
ABD = NDTDTW	-0,001	-0,0005	0,000	0,000
ACD = NDTNTW	0,005	0,002	0,005	0,002
BCD = TDTNTW	0,006	0,003	0,002	0,001
ABCD = NDTDTNTW	-0,003	-0,001	0,000	0,000

In Gleichung 121 ist das vollständige Regressionspolynom (siehe Gleichung 95) für die Formteilmasse mit der Regressionskonstante  $K = 45,498$  g und den in Tabelle 36 angegebenen Werten der Regressionskoeffizienten angeschrieben.

$$\begin{aligned}
 m = & 45,498 + 0,026 \cdot X_1 - 0,022 \cdot X_2 + 0,169 \cdot X_3 - 0,031 \cdot X_4 \\
 & - 0,006 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,003 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,026 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & - 0,007 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,010 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,004 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & + 0,0005 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,002 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,003 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & - 0,001 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \tag{121}$$

Für die Formteillänge folgt das Regressionspolynom zu:

$$\begin{aligned}
 l = & 187,47 + 0,015 \cdot X_1 - 0,016 \cdot X_2 + 0,121 \cdot X_3 - 0,027 \cdot X_4 \\
 & - 0,003 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,002 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,000 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,009 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & - 0,004 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,002 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,003 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \\
 & + 0,000 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,002 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,001 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 & + 0,000 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \tag{122}$$

Nach Berechnung der Wirkungen stellt sich die Frage nach ihrer Signifikanz. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben gibt es bei unreplizierten Versuchen mit der Methode des Pooling und der Methode von Lenth zwei Möglichkeiten, die Wirkungen in Effekte und Rauschen zu unterscheiden. Für das Pooling ist es notwendig, eine Vorauswahl von

offenbar zufälligen Effekten zu treffen, auf deren Basis die Zufallsstreuung abgeschätzt werden kann. Da es im Allgemeinen eine weit verbreitete Praxis ist, Dreifach- und höhere Wechselwirkungen zu vernachlässigen [2], wurden hier die Wirkungen ABC, ABD, ACD, BCD und ABCD als zufällige Effekte deklariert.

Die geschätzte Zufallsstreuung der Effekte folgt nach Gleichung 106 zu  $S_{\text{eff}} = 0,002 \text{ g}$  für die Formteilmasse und  $S_{\text{eff}} = 0,003 \text{ mm}$  für die Formteillänge. Der Wert der t-Verteilung auf einem gewählten Konfidenzniveau von 95 % bei 5 Freiheitsgraden (Gleichung 107) beträgt  $t_{\alpha, \text{FG}} = 2,02$  (Tabelle 42, Anhang). Der Vertrauensbereich der Effekte kennzeichnet die Signifikanzgrenze und ergibt sich nach Gleichung 99 zu  $VB_{\text{eff}} = 0,004 \text{ g}$  für die Formteilmasse und  $VB_{\text{eff}} = 0,006 \text{ mm}$  für die Formteillänge.

Ein Vergleich der Wirkungen mit dem Vertrauensbereich der Effekte nach Gleichung 103 und Gleichung 104 ergab, dass für die Formteilmasse sämtliche Wirkungen und Wechselwirkungen bis auf die Dreifachwirkung ABD (NDTDTW) und die Vierfachwirkung ABCD (NDTDTNTW) signifikant sind (Abbildung 67). Die Effekte, welche die Formteilmasse am stärksten beeinflussen sind (in absteigender Reihenfolge) C (TN), D (TW), A (ND), BC (TDTN) und B (TD).

In Bezug auf die Formteillänge (Abbildung 68) stellten sich C (TN), D (TW), B (TD), A (ND), BC (TDTN) und BD (TDTW) als signifikant heraus. Die nicht signifikanten Wirkungen und Wechselwirkungen können für weitere Betrachtungen aus dem jeweiligen Regressionspolynom gestrichen werden.

In Abbildung 67 und Abbildung 68 sind die Ergebnisse der Signifikanzüberprüfung für die Formteilmasse und Formteillänge in Form von Paretodiagrammen dargestellt. Die blauen Balken kennzeichnen positive, rote Balken negative Effekte. Der Vertrauensbereich der Effekte ist als Signifikanzgrenze mit 0,004 g bzw. 0,006 mm gelb eingezzeichnet.

#### 4. Ergebnisse

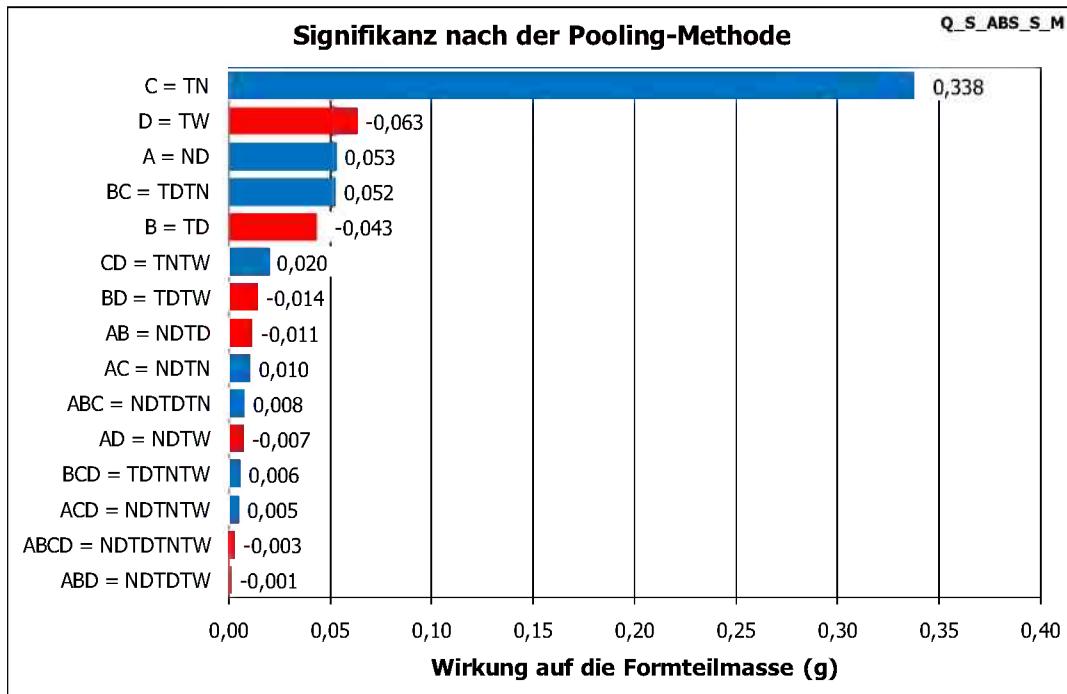


Abbildung 67: Pareto-Diagramm für die Formteilmasse

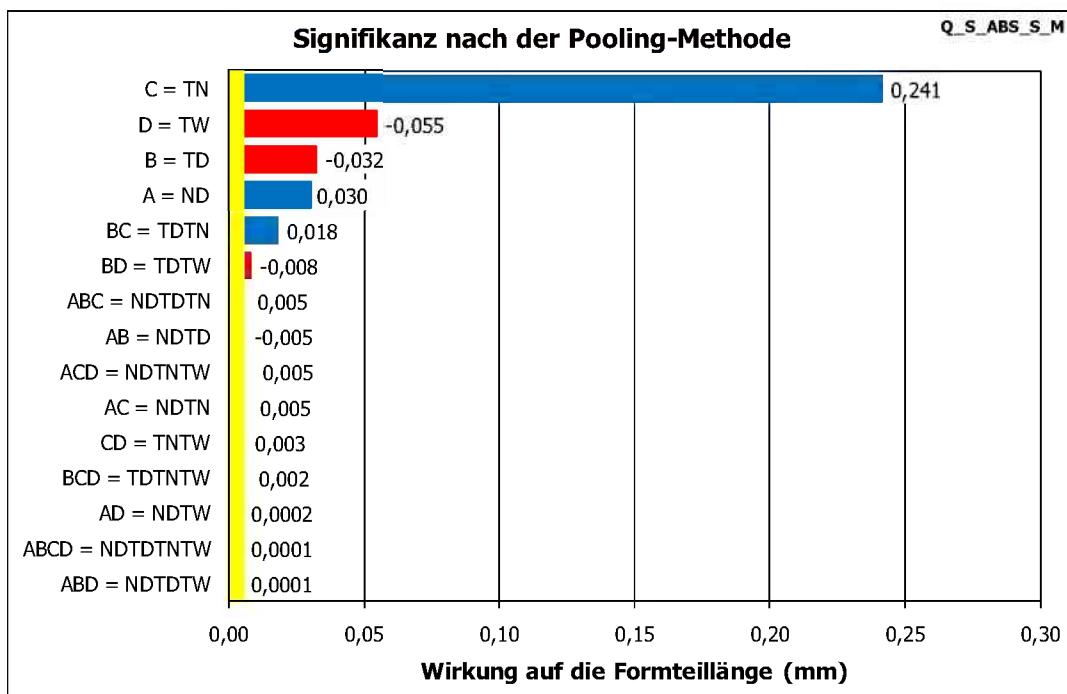


Abbildung 68: Pareto-Diagramm für die Formteillänge

Die Werte der Wirkungen können alternativ auch in standardisierter Form angegeben werden (Abbildung 69 und Abbildung 70). Die Standardisierung bedeutet eine Normierung auf die Standardabweichung der Effekte  $S_{eff}$ . Das heißt, die Werte der Wirkungen und der Vertrauensbereich der Effekte werden als Vielfache von  $S_{eff}$  dargestellt. Die Rangfolge der Effekte bleibt durch diese Darstellung unverändert. Die Signifikanzgrenze liegt in diesem Fall für beide Qualitätsgrößen bei 2,020.

#### 4. Ergebnisse

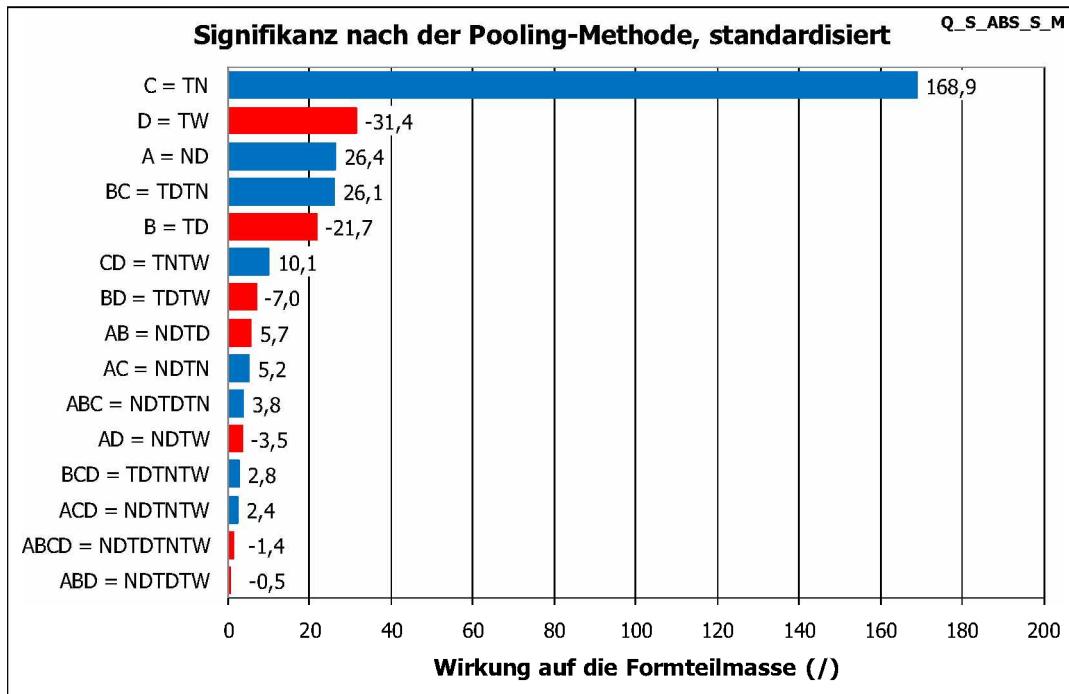


Abbildung 69: Pareto-Diagramm für die Formteilmasse, standardisiert

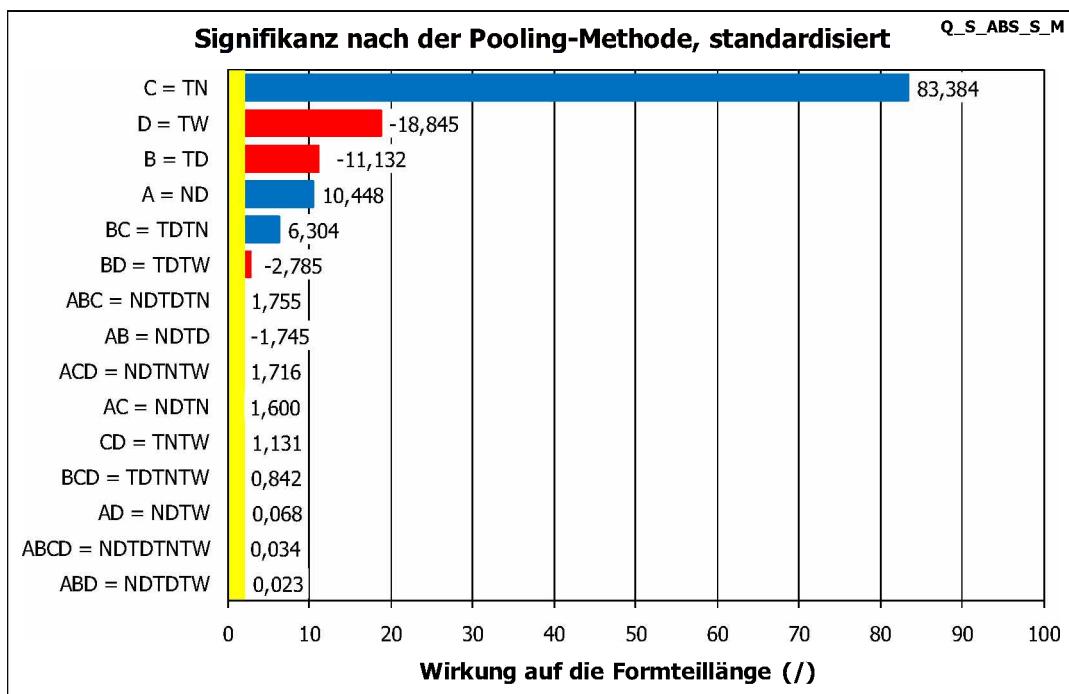


Abbildung 70: Pareto-Diagramm für die Formteillänge, standardisiert

Die Kenntnis des Vertrauensbereichs der Effekte ermöglicht weiters wie in Abschnitt 2.3 erklärt (Gleichung 105) eine Aussage über die Gültigkeit des linearen Modells für die untersuchten Zusammenhänge.

Da hier der Absolutbetrag der Differenz zwischen dem Mittelwert  $K$  aller Versuchsergebnisse und dem Wert  $y_{ZP}$  im Zentralpunkt  $Q_S\_ABS\_S\_M\_ZP$  bei beiden Qualitätsgrößen größer ist als der Vertrauensbereich der Effekte (Gleichung 123 und

Gleichung 124), wäre nach dieser Betrachtungsweise das lineare Modell im Fall der Simulationen streng genommen nicht gültig.

$$|K - y_{ZP}| = |45,549 \text{ g} - 45,498 \text{ g}| = 0,051 \text{ g} > 0,004 \text{ g} \quad (123)$$

$$|K - y_{ZP}| = |187,47 \text{ mm} - 187,49 \text{ mm}| = 0,020 \text{ mm} > 0,006 \text{ mm} \quad (124)$$

Alternativ wurde die Signifikanz der Effekte auch nach der Methode von Lenth ermittelt. Die Medianwerte der Wirkungen und Wechselwirkungen für Formteilmasse und -länge betragen 0,011 g und 0,005 mm. Nach Gleichung 110 ergibt sich für die anfängliche Standardabweichung für die Formteilmasse  $s_0 = 0,0171 \text{ g}$  bzw. 0,0076 mm für die Formteillänge. Die Werte des Pseudo Standard Error (Gleichung 109) betragen jeweils 0,0048 g und 0,0051 mm. Die Absolutbeträge der nach Gleichung 111 berechneten Ergebnisse für  $t_{PSE,i}$  sind in Tabelle 37 der Größe nach geordnet zusammengefasst:

*Tabelle 37: Absolutbeträge  $|t_{PSE,i}|$  für die Lenth's Method*

<b><math> t_{PSE,i} </math> Formteilmasse</b>	<b><math> t_{PSE,i} </math> Formteillänge</b>
C = TN	69,822
D = TW	12,995
A = ND	10,912
BC = TDTN	10,804
B = TD	8,964
CD = TNTW	4,158
BD = TDTW	2,876
AB = NDTD	2,359
AC = NDTN	2,152
ABC = NDTDTN	1,563
AD = NDTW	1,429
BCD = TDTNTW	1,140
ACD = NDTNTW	0,995
ABCD = NDTDTNTW	0,566
ABD = NDTDTW	0,189
	47,368
	10,705
	6,324
	5,935
	3,581
	1,582
	0,997
	0,991
	0,975
	0,909
	0,643
	0,478
	0,039
	0,019
	0,013

Der kritische Wert  $t_{\alpha,I}$  ergibt sich aus Tabelle 43 (Anhang, Seite 125) bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % und einer Anzahl von  $I = 15$  Wirkungen nach linearer Interpolation für einen zweiseitigen Vertrauensbereich zu 2,305. Alle Wirkungen und Wechselwirkungen, deren  $t_{PSE,i}$  diesen Wert übersteigt, sind signifikant. Für die Formteilmasse (Abbildung 71) sind nach der Methode von Lenth in absteigender Reihenfolge die Wirkungen C (TN), D (TW), A (ND), BC (TDTN), B (TD), CD (TNTW), BD (TDTW) und AB (NDTD) als signifikante Effekte zu werten.

#### 4. Ergebnisse

Positive Wirkungen sind blau, negative rot gefärbt. Die Signifikanzgrenze von 2,305 ist gelb eingezzeichnet.

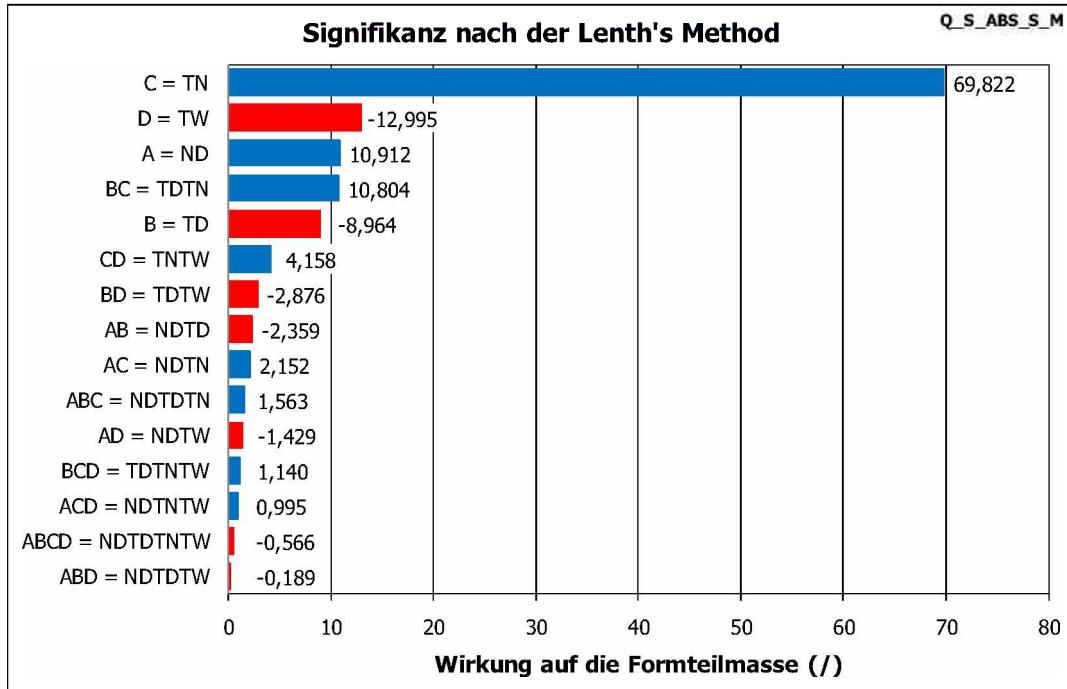


Abbildung 71: Pareto-Diagramm für die Formteilmasse nach der Methode von Lenth

Abbildung 72 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die Formteillänge. Hier sind die lediglich die vier Hauptwirkungen C (TN), D (TW), B (TD), A (ND), und die Wechselwirkung BC (TDTN) signifikant (in absteigender Reihenfolge).

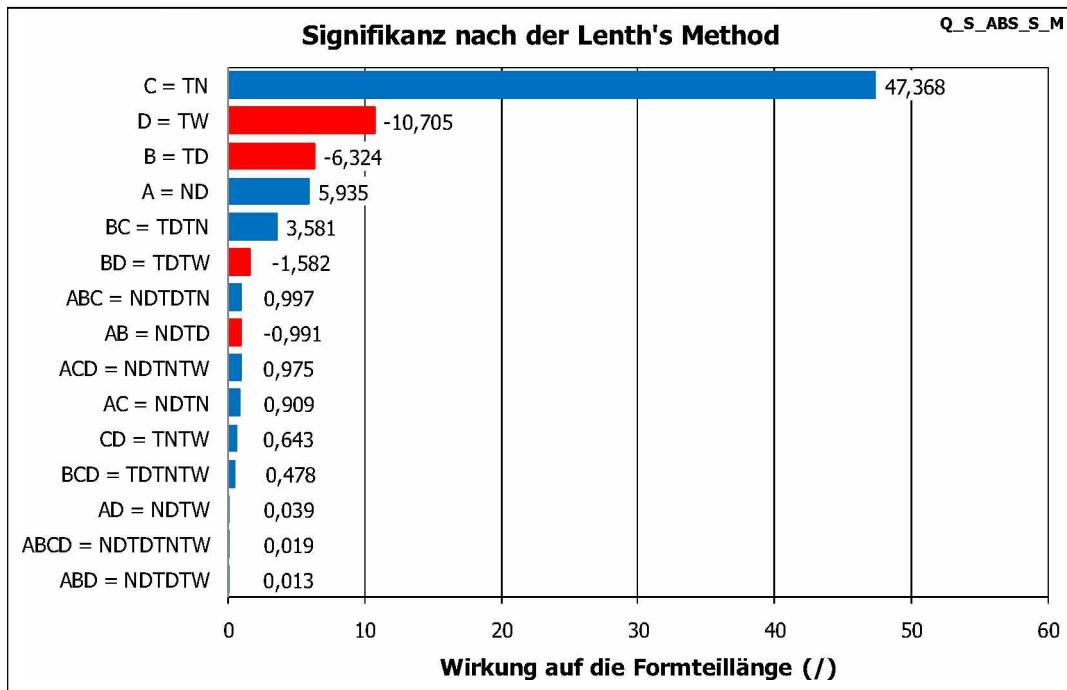


Abbildung 72: Pareto-Diagramm für die Formteillänge nach der Methode von Lenth

#### 4.4.2 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

Analog zu der in 4.2.2 beschriebenen Vorgangsweise kann man auch hier die Ergebnisse des statistischen Modells nutzen, um die Einzelabhangigkeiten der Qualitätsgrößen von den Einstellparametern darzustellen.

Die Formteilmasse steigt bei einer Änderung des Nachdrucks von 270 bar auf 310 bar um 0,105 g an (Abbildung 73). Die Formteillänge nimmt in diesem Bereich im Ausmaß von 0,06 mm zu (Abbildung 74). Die Ergebnisse zu den Abhängigkeiten von Formteilmasse und -länge vom Nachdruck sind in Tabelle 38 angegeben.

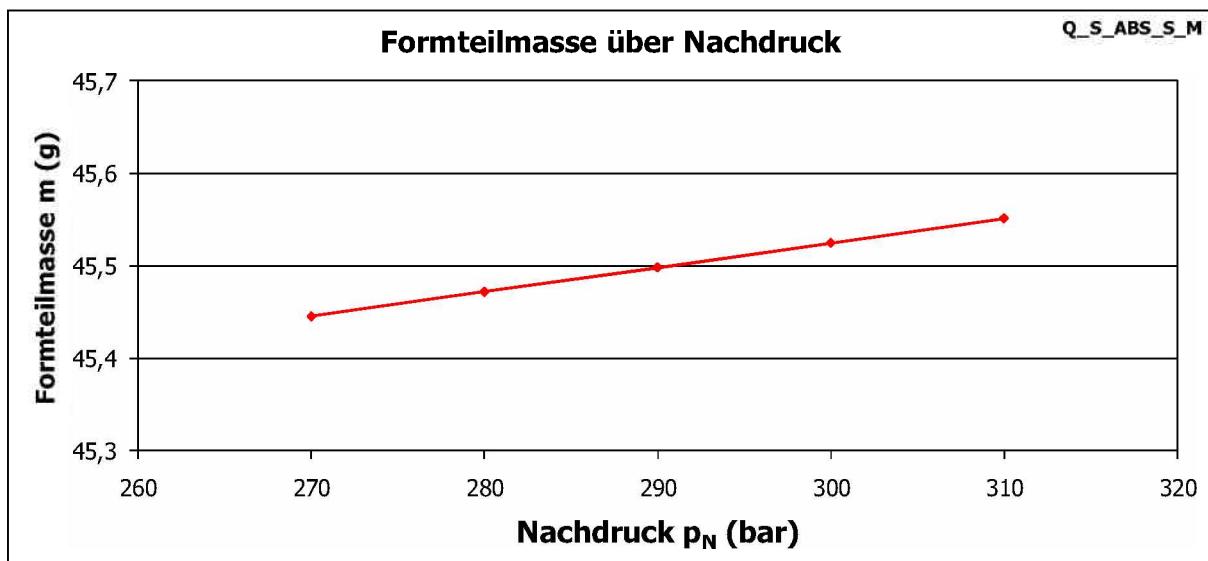


Abbildung 73: Abhängigkeit der Formteilmasse vom Nachdruck

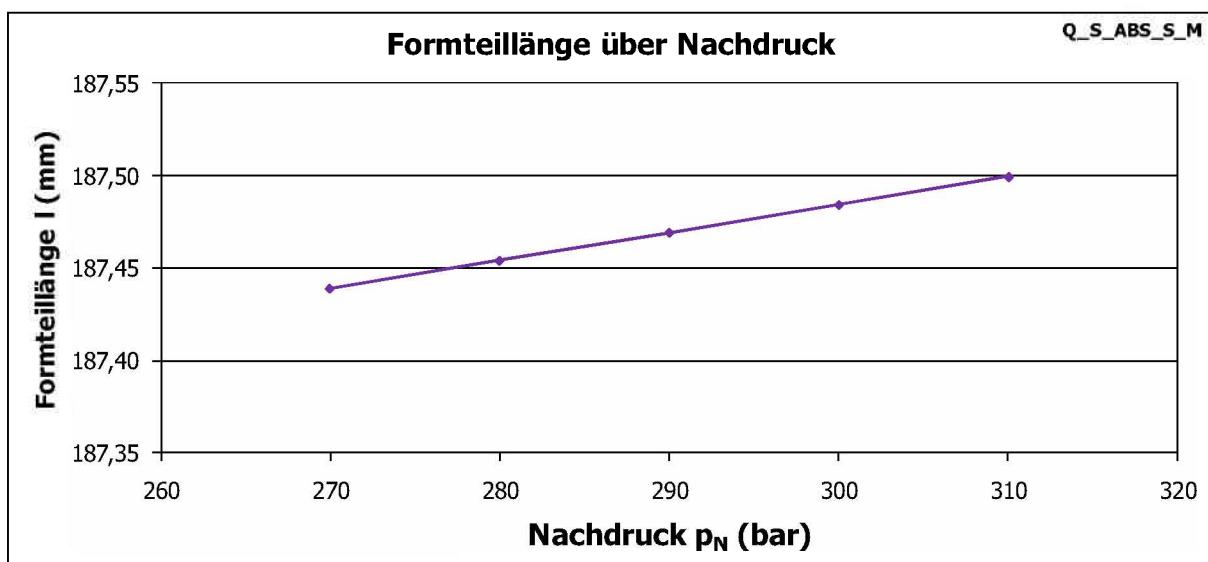


Abbildung 74: Abhängigkeit der Formteillänge vom Nachdruck

Tabelle 38: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck

Q_S_ABS_S_M				
Nachdruck (bar)	Formteilmasse (g)	Steigung (g/bar)	Formteillänge (mm)	Steigung (mm/bar)
270	45,446	0,0026	187,439	0,0015
280	45,472		187,454	
290	45,498		187,469	
300	45,525		187,484	
310	45,551		187,499	

#### 4.4.3 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur

Beide Qualitätsgrößen besitzen hinsichtlich der Abhängigkeit von der Düsentemperatur Verläufe mit negativer Steigung. Wird die Düsentemperatur von 250 °C auf 270 °C erhöht, verringert sich die Formteilmasse um 0,087 g (Abbildung 75).

Die Zahlenwerte für die Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur sind in Tabelle 39 zusammengefasst.

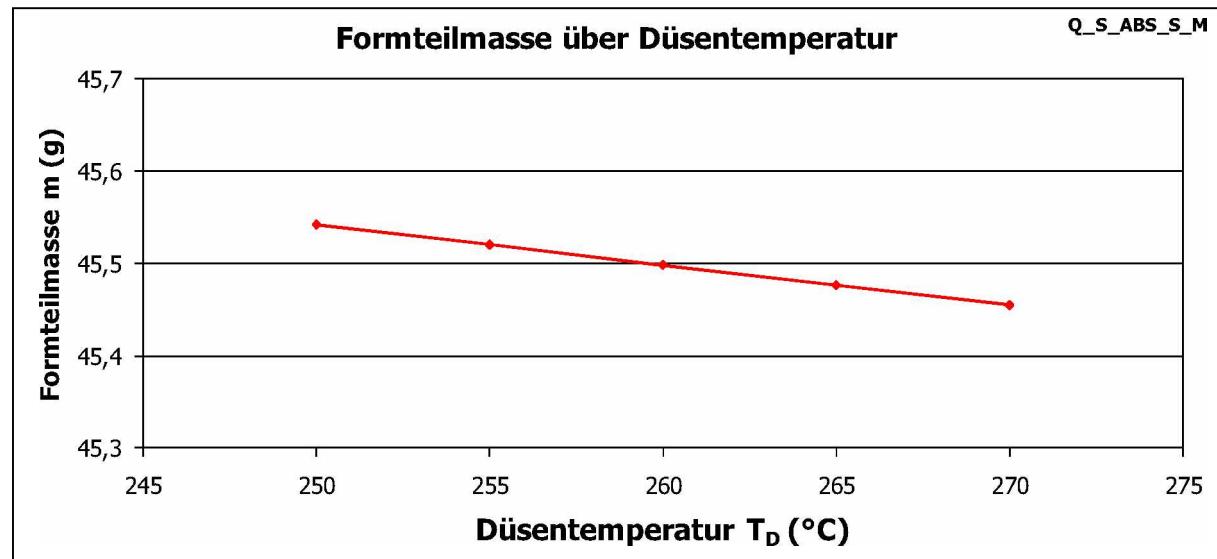


Abbildung 75: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

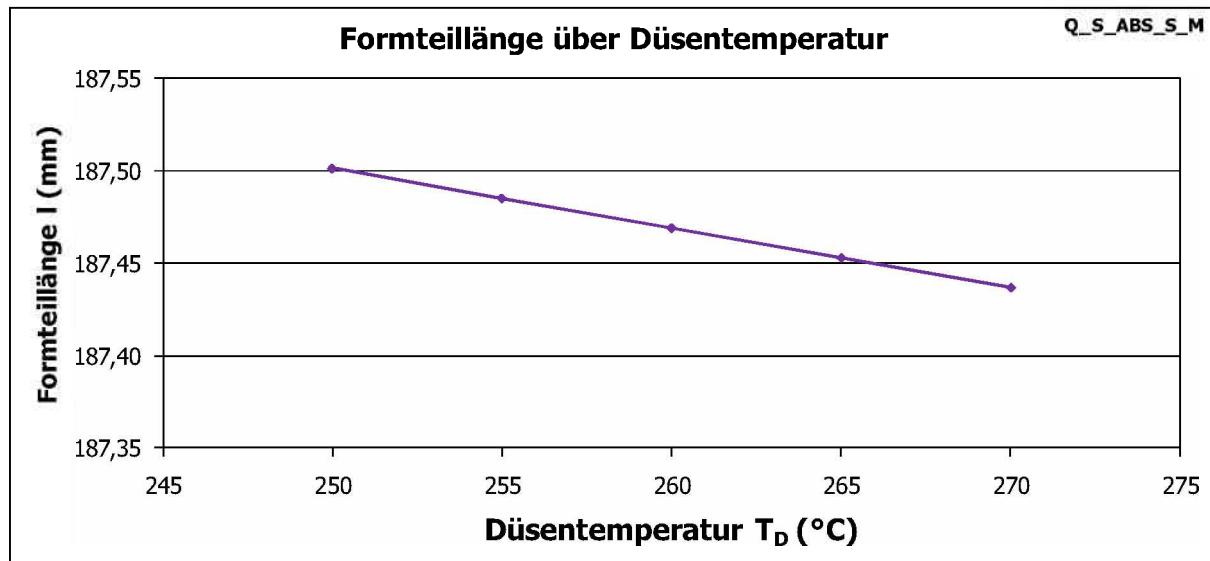


Abbildung 76: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur

Tabelle 39: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Düsentemperatur

Q_S_ABS_S_M				
Düsentemperatur (°C)	Formteilmasse (g)	Steigung (g/°C)	Formteillänge (mm)	Steigung (mm/°C)
250	45,542	-0,0043	187,501	-0,0032
255	45,520		187,485	
260	45,498		187,469	
265	45,477		187,453	
270	45,455		187,437	

#### 4.4.4 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Die Formteilmasse (Abbildung 77) und die Formteillänge (Abbildung 78) wachsen bei Erhöhung der Nachdruckzeit von 2 s auf 6 s um 0,676 g bzw. 0,483 mm an. Tabelle 40 beinhaltet die Ergebnisse zu den untersuchten Zusammenhängen zwischen Formteilmasse und -länge und der Nachdruckzeit.

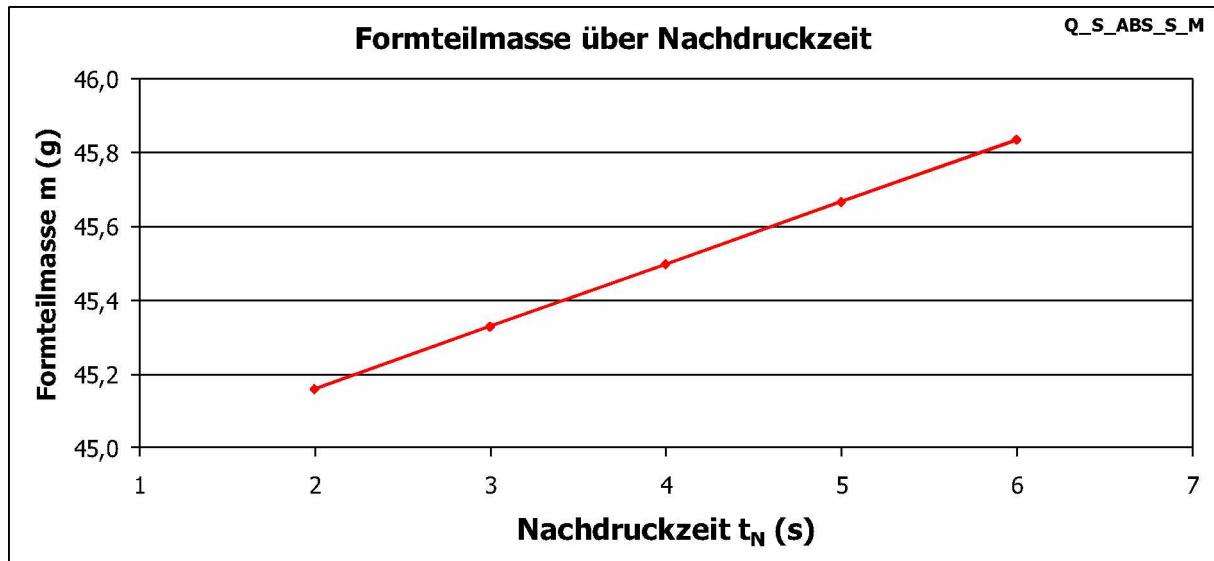


Abbildung 77: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Nachdruckzeit

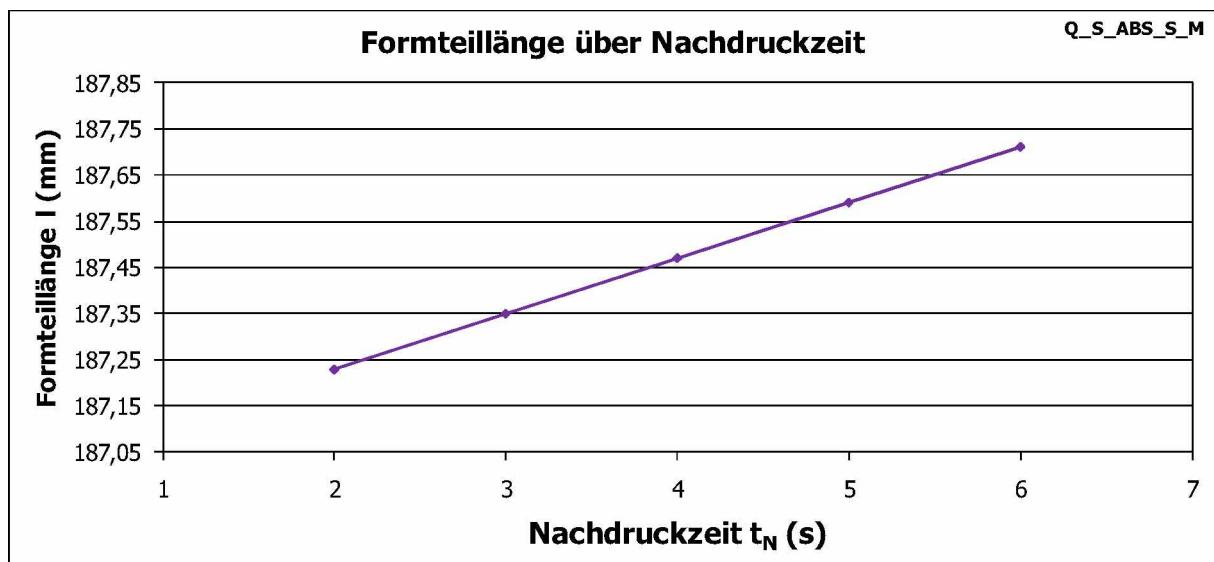


Abbildung 78: Abhängigkeit der Formteillänge von der Nachdruckzeit

Tabelle 40: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit

Q_S_ABS_S_M				
Nachdruckzeit	Formteilmasse	Steigung	Formteillänge	Steigung
(s)	(g)	(g/s)	(mm)	(mm/s)
2	45,161	0,1689	187,228	0,1207
3	45,329		187,349	
4	45,498		187,469	
5	45,667		187,590	
6	45,836		187,711	

#### 4.4.5 Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

Wie in Abbildung 79 veranschaulicht nimmt die Formteilmasse im untersuchten Werkzeugtemperaturbereich von 60 °C – 80 °C um 0,126 g ab. Die Formteillänge verringert sich um 0,109 mm (Abbildung 80). Tabelle 41 fasst die Rechenergebnisse zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur zusammen.

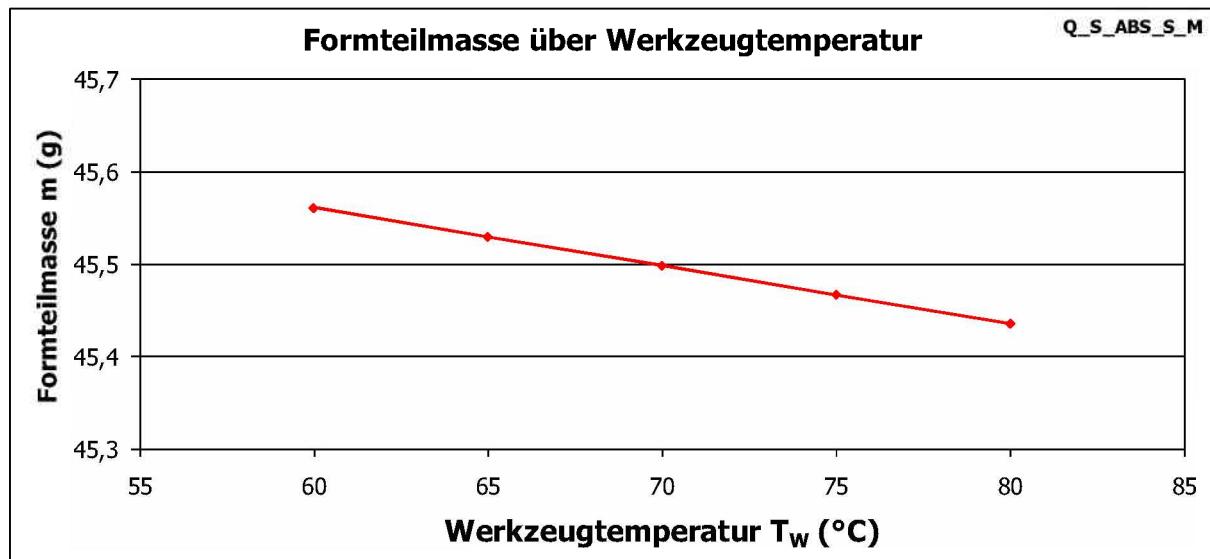


Abbildung 79: Abhängigkeit der Formteilmasse von der Werkzeugtemperatur

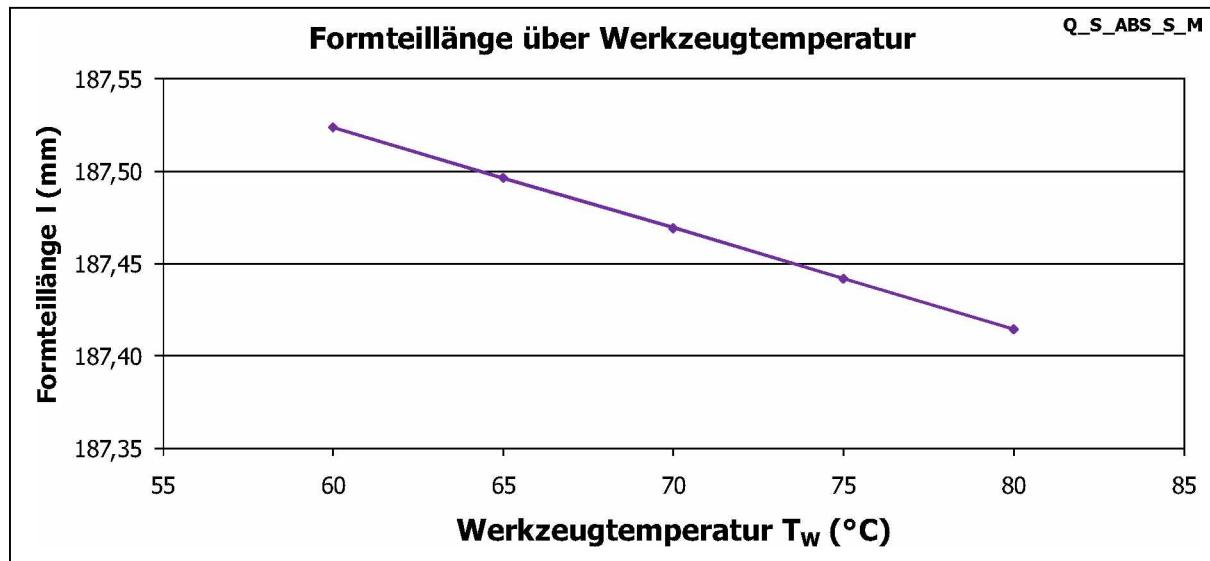


Abbildung 80: Abhängigkeit der Formteillänge von der Werkzeugtemperatur

Tabelle 41: Wertetabelle zur Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Werkzeugtemperatur

Q_S_ABS_S_M				
Werkzeugtemperatur	Formteilmasse	Steigung	Formteillänge	Steigung
(°C)	(g)	(g/°C)	(mm)	(mm/°C)
60	45,561	-0,0063	187,524	-0,0055
65	45,530		187,497	
70	45,498		187,469	
75	45,467		187,442	
80	45,435		187,415	

## 5 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

An dieser Stelle ist es von Interesse, die in Abschnitt 4 nach den verschiedenen Modellen und Methoden ermittelten Ergebnisse einander gegenüberzustellen. Der erste Schritt besteht in einem Vergleich zwischen physikalischem und statistischem Modell jeweils für Experiment und Simulation. Im zweiten Schritt wird die Übereinstimmung der experimentell und rechnerisch gewonnenen Daten getrennt für das physikalische und das statistische Modell überprüft.

### 5.1 Vergleichende Betrachtung der experimentellen Ergebnisse des physikalischen und des statistischen Modells

Betrachtet man die experimentell gewonnenen Zusammenhänge für die Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck in Abbildung 81, kann man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen physikalischem und statistischem Modell erkennen. Im Fall der Formteilmasse zeigt das statistische Modell einen geringfügig steileren Anstieg. Die maximale Differenz zwischen beiden Verläufen beträgt 0,037 g. Bezogen auf die Formteilmasse der Grundeinstellung von 46,133 g ist das eine Abweichung von 0,08 %. Für die Formteillänge ergeben sich für beide Modelle annähernd gleiche Verläufe. Die Werte des statistischen Modells haben ein geringfügig höheres Niveau. Die größte Abweichung liegt bei 0,006 mm, dies entspricht 0,003 % der Formteillänge bei der Grundeinstellung.

Die hier diskutierten Ergebnisse sind in Tabelle 47 (Anhang) zusammengefasst.

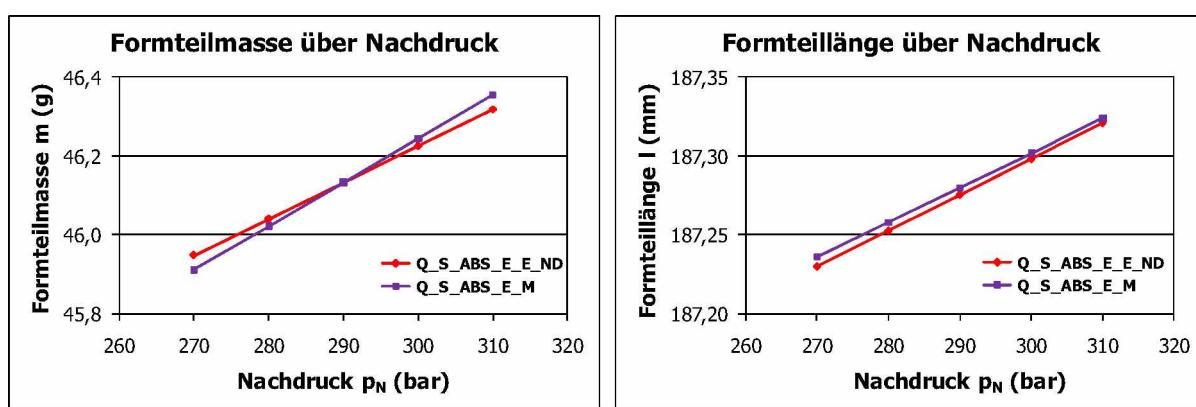


Abbildung 81: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violet) für die Nachdruckabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Experiment

Für die Zusammenhänge zwischen Formteilmasse und -länge und der Düsentemperatur liefern physikalisches und statistisches Modell beinahe gleiche

Werte (Abbildung 82). Die höchsten Differenzen betragen 0,005 g (0,010 %) und 0,005 mm (0,002 %).

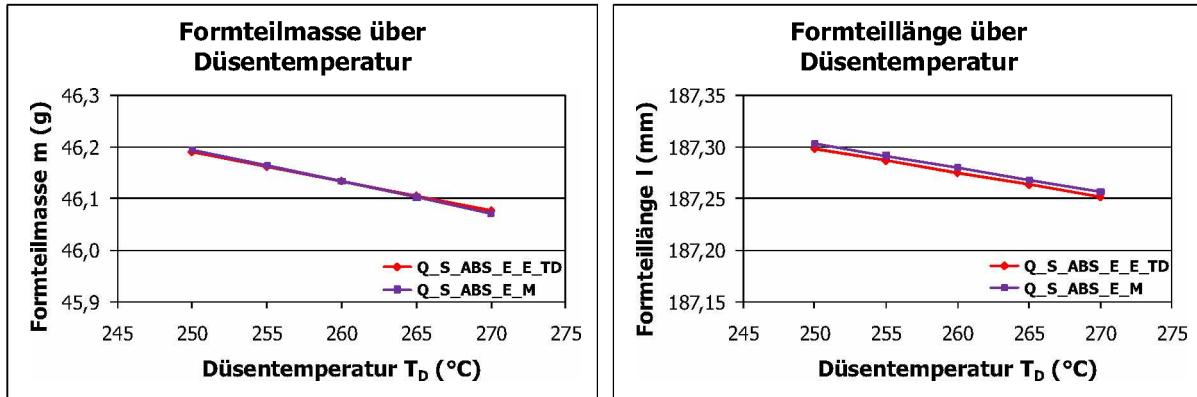


Abbildung 82: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violett) für die Düsentemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Experiment

Abbildung 83 zeigt den Vergleich der beiden Modelle für die Nachdruckzeitabhängigkeit der Qualitätsgrößen. Nach dem physikalischen Modell ergibt sich eine leicht stärkere Zunahme mit steigender Nachdruckzeit. Dennoch haben beide Modelle eine sehr gute Übereinstimmung. Die maximalen Abweichungen betragen 0,162 g für die Formteilmasse und 0,023 mm für die Länge des Formteils. Bezogen auf die Messwerte des Zentralpunktes bedeutet dies einen Fehler von 0,352 % bzw. 0,012 %.

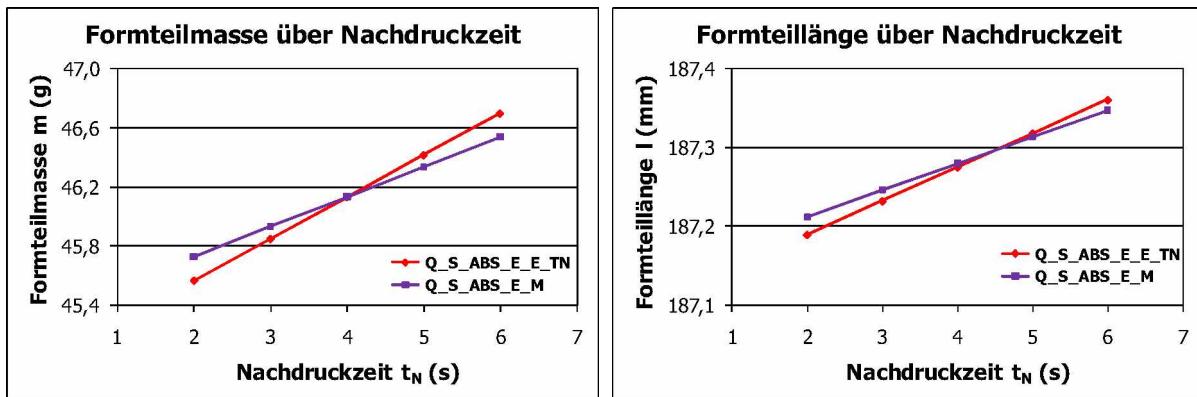


Abbildung 83: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violett) für die Nachdruckzeitabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Experiment

Variiert man die Werkzeugtemperatur, zeigt das statistische Modell sowohl für die Masse als auch für die Länge des Formteils eine deutlich geringere Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur als das physikalische Modell. Die größten Differenzen belaufen sich auf 0,197 g (0,428 %) für die Formteillänge und 0,056 mm (0,030 %) für die Formteilmasse.

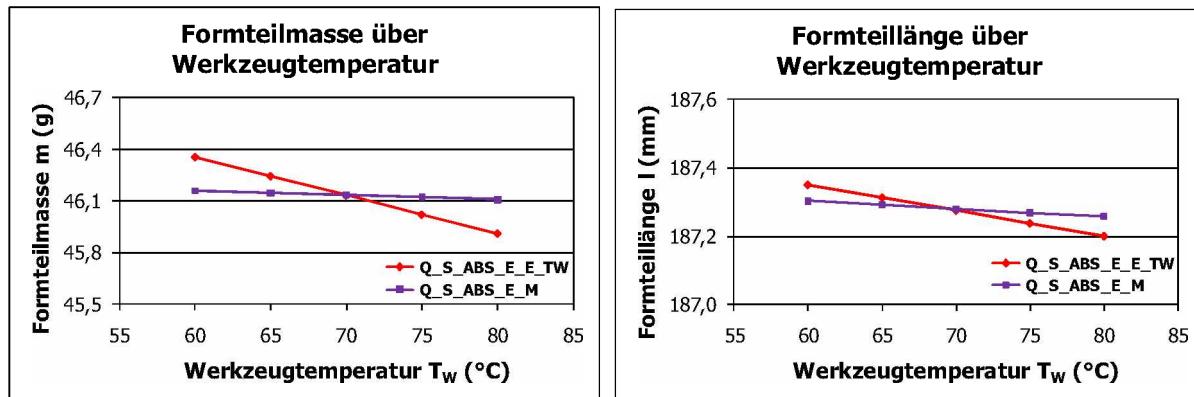


Abbildung 84: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violett) für die Werkzeugtemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Experiment

### Fazit:

Die experimentell ermittelten Zusammenhänge zwischen den Qualitätsgrößen und den vier Einflussparametern Nachdruck, Düsentemperatur, Nachdruckzeit und Werkzeugtemperatur zeigen insgesamt eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen dem physikalischen und dem statistischen Modell.

## 5.2 Vergleichende Betrachtung der Simulations-Ergebnisse des physikalischen und des statistischen Modells

Aus den in der Simulation durchgeführten Versuchen resultieren für die Nachdruckabhängigkeit der Qualitätsgrößen Geraden mit nahezu identischen Steigungen (Abbildung 85). Die Modelle unterscheiden sich jeweils nur im Gesamtniveau der Verläufe. Die Werte des physikalischen Modells für die Formteilmasse liegen maximal um 0,053 g höher als beim statistischen Modell. Dies entspricht einer prozentuellen Abweichung von 0,116 %. Für die Formteillänge beträgt die Differenz 0,017 mm bzw. 0,009 %.

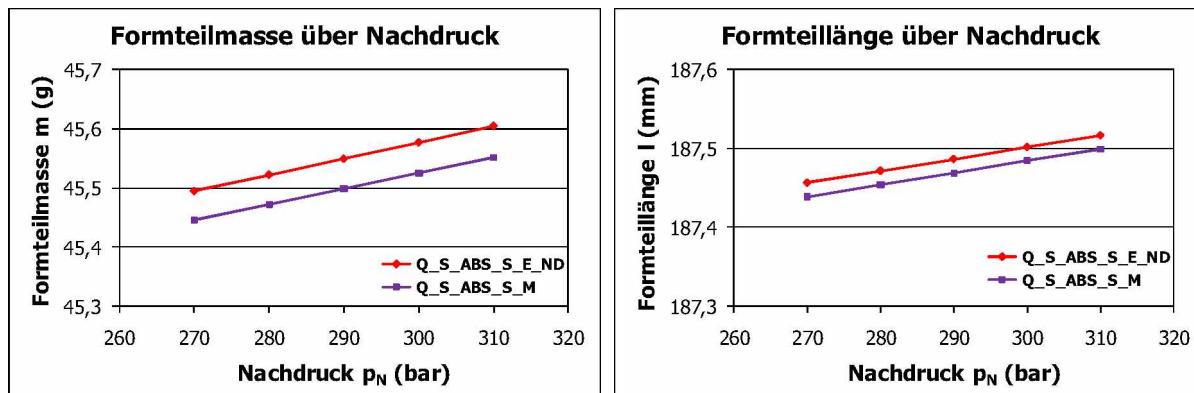


Abbildung 85: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violett) für die Nachdruckabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Simulation

Tabelle 48 (Anhang) umfasst die Ergebnisse zu sämtlichen hier angestellten Vergleichen.

Auch für die Ergebnisse zur Düsentemperaturabhängigkeit (Abbildung 86) gilt, dass das physikalische Modell die höheren Werte liefert. Zudem zeigt es eine geringfügig schwächere Reaktion auf steigende Düsentemperaturen als das statistische Modell.

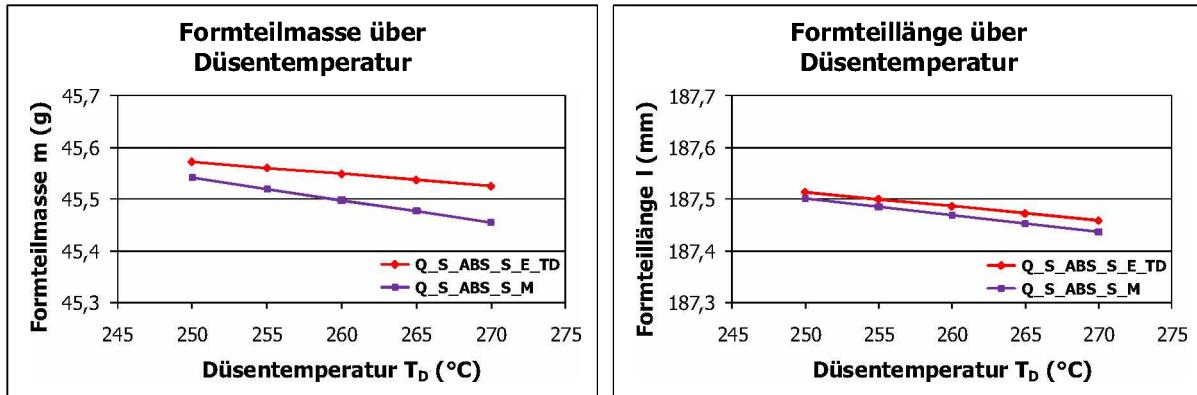


Abbildung 86: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violet) für die Düsentemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Simulation

Die größte Differenz der Formteilmasse beläuft sich auf 0,071 g bzw. 0,156 %. Die Abweichungen der Formteilmasse sind mit 0,022 mm (0,012 %) etwas geringer

Im Fall der Abhängigkeit der Qualitätsgrößen von der Nachdruckzeit resultieren wie aus Abbildung 87 ersichtlich wiederum sehr ähnliche Verläufe beider Modelle. Das physikalische Modell weist für die Formteilmasse einen etwas stärkeren Anstieg auf. Der maximale Unterschied zwischen physikalischem und statistischem Modell beträgt hier 0,096 g. Im Verhältnis zur Masse bei der Grundeinstellung des physikalischen Modells sind das 0,210 % der Gesamtmasse. Die Verläufe der Formteillänge liegen enger zusammen. Die höchste Differenz beträgt 0,024 mm bzw. 0,013 %.

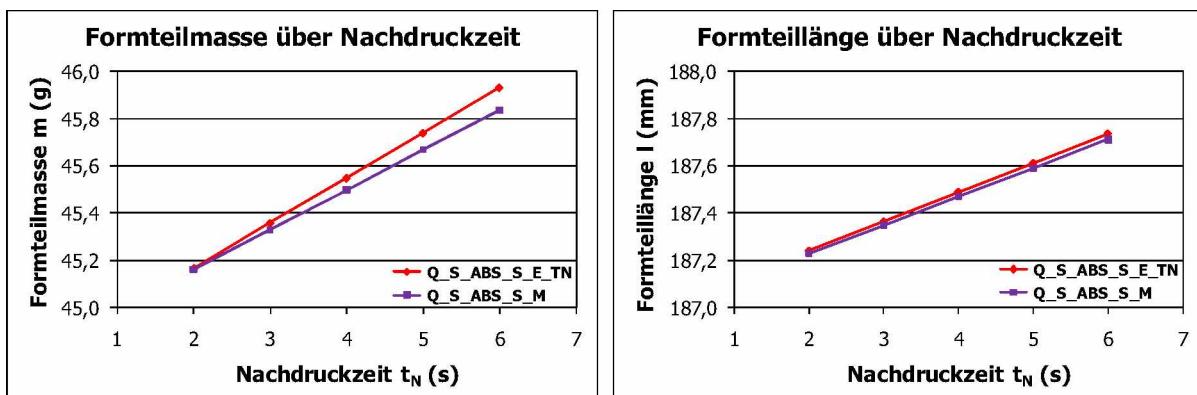


Abbildung 87: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violet) für die Nachdruckzeitabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Simulation

Vergleicht man physikalisches und statistisches Modell für die Werkzeugtemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen, so findet man im Bereich der Simulation (Abbildung 88) eine deutlich bessere Übereinstimmung als im Experiment (Abbildung 84).

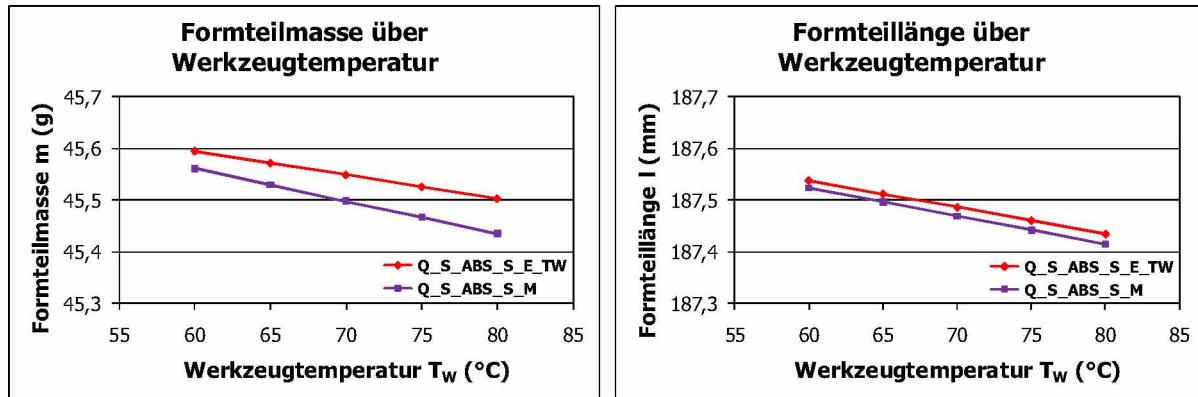


Abbildung 88: Physikalisches (rot) und statistisches Modell (violett) für die Werkzeugtemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen; Simulation

Das statistische Modell hat eine leicht stärkere Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur. Die höchsten Unterschiede zwischen den Modellen betragen 0,068 g (0,149 %) für die Masse des Formteils und 0,020 mm (0,011 %) für seine Länge.

## Fazit:

Auch im Bereich der Simulation ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem physikalischen und dem statistischen Modell. Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Experiment sind die Abweichungen hier geringfügig höher.

### 5.3 Vergleichende Betrachtung der experimentellen und numerischen Ergebnisse des physikalischen Modells

In Abbildung 89 wird das physikalische Modell hinsichtlich der Nachdruckabhängigkeit von Formteilmasse und -länge für beide Ermittlungswege verglichen. Dabei zeigt sich, dass sich die Verläufe grundsätzlich sehr ähnlich sind, sich aber in ihrem Gesamtniveau unterscheiden. Für die Formteilmasse liefert das Experiment höhere Werte mit einer etwas steileren Steigung des Gesamtverlaufs. Die größte Abweichung berechnet sich auf 0,714 g. Das sind 1,548 % der Masse des Formteils in der Grundeinstellung. Betrachtet man den Vergleich für die Formteillänge, so liegen die Werte aus der Simulation bei einer geringfügig schwächeren Steigung höher. Die höchste Differenz beläuft sich in diesem Fall auf

0,226 mm bzw. 0,121 %. Die Ergebnisse zu dieser Betrachtung sind zusammenfassend in Tabelle 49 (Anhang) festgehalten.

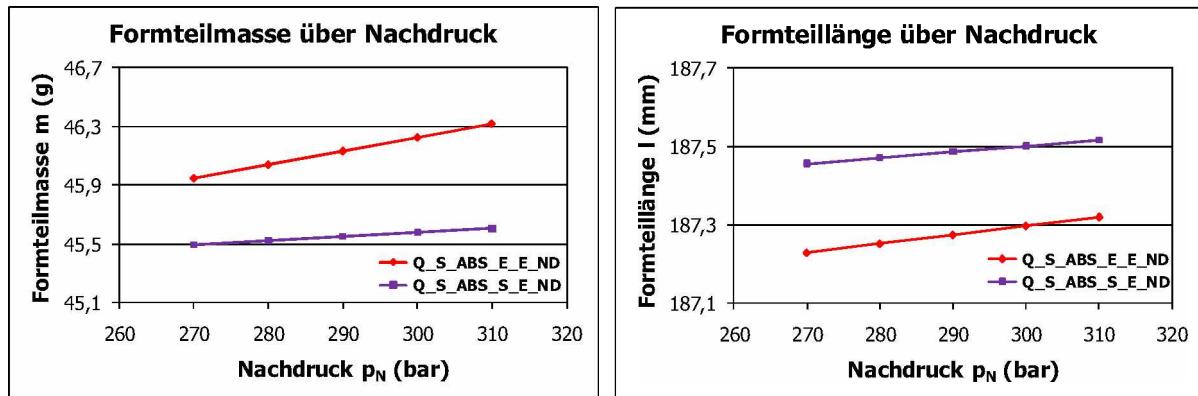


Abbildung 89: Physikalisches Modell für die Nachdruckabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

Abbildung 90 verdeutlicht die Unterschiede für die Abhängigkeit von Masse und Länge des Formteils von der Düsentemperatur. Es ist zu erkennen, dass sich

Experiment und Simulation bis auf die Höhe ihrer Werte sehr gut entsprechen. Für die Formteillänge liefert die Simulation niedrigere Ergebnisse bei einer minimal geringeren Steigung. Die höchste Differenz zwischen den Geraden ist 0,618 g bzw. 1,339 %. Die entsprechenden Abweichungen für die Formteillänge sind 0,215 mm und 0,115 %, wobei der Verlauf der Simulationsergebnisse höher liegt.

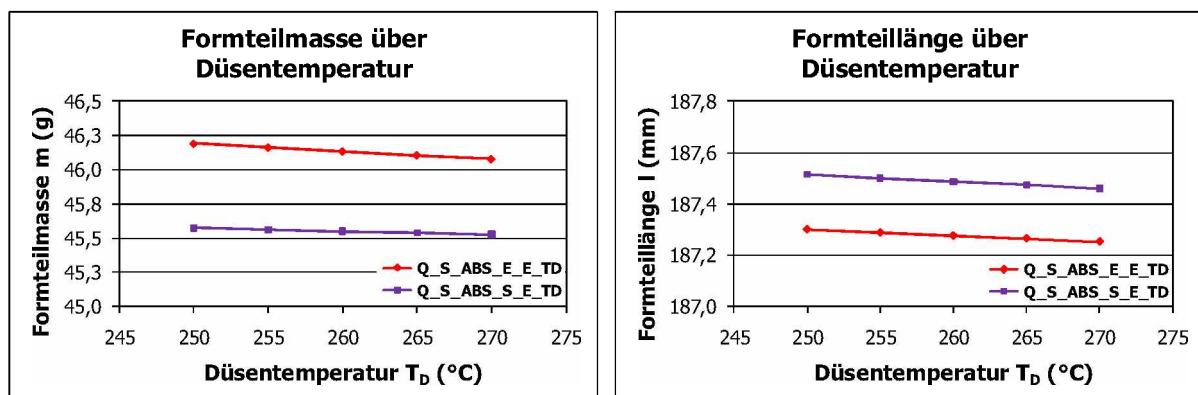


Abbildung 90: Physikalisches Modell für die Düsentemperaturabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

Auch für die Nachdruckabhängigkeit der Qualitätsgrößen liefert das Experiment für die Formteilmasse höhere und für die Formteillänge niedrigere Werte (Abbildung 91). Der experimentell ermittelte Verlauf der Masse des Formteils besitzt eine in geringem Maße stärkere Abhängigkeit von der Nachdruckzeit. Der maximale Unterschied liegt bei 0,769 g, was 1,666 % der Grundformteilmasse entspricht. Für die Länge des

Formteils hat das Simulations-Ergebnis einen steileren Anstieg. Die Verläufe differieren hier um höchstens 0,373 mm bzw. 0,199 %.

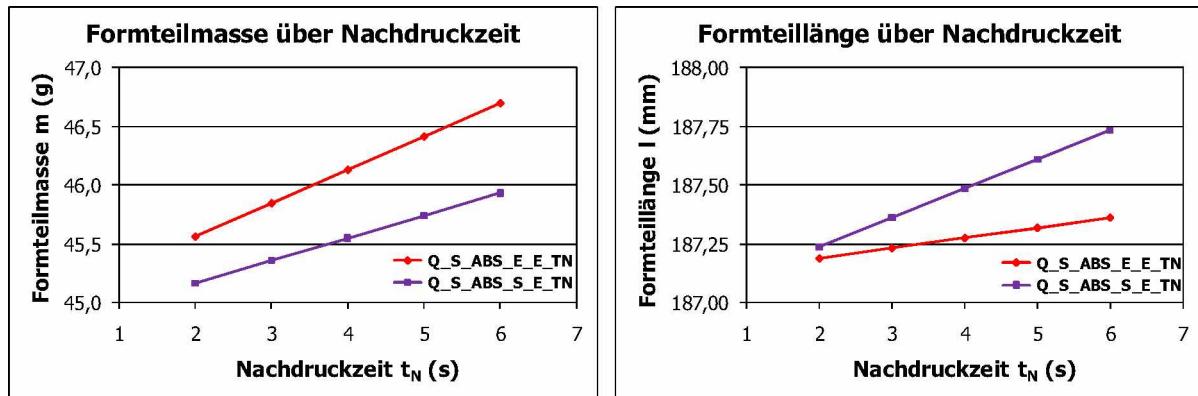


Abbildung 91: Physikalisches Modell für die Nachdruckzeitabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

In Abbildung 92 sind die Ergebnisse für die in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur untersuchten Zusammenhänge dargestellt. Die rechnerischen Werte zeigen bei beiden Qualitätsgrößen eine etwas geringere Reaktion auf Temperaturänderungen als die Werte aus dem Experiment. Die größten Differenzen belaufen sich auf 0,761 g (1,649 %) für die Formteilmasse und 0,234 mm (0,125 %) für die Formteillänge.

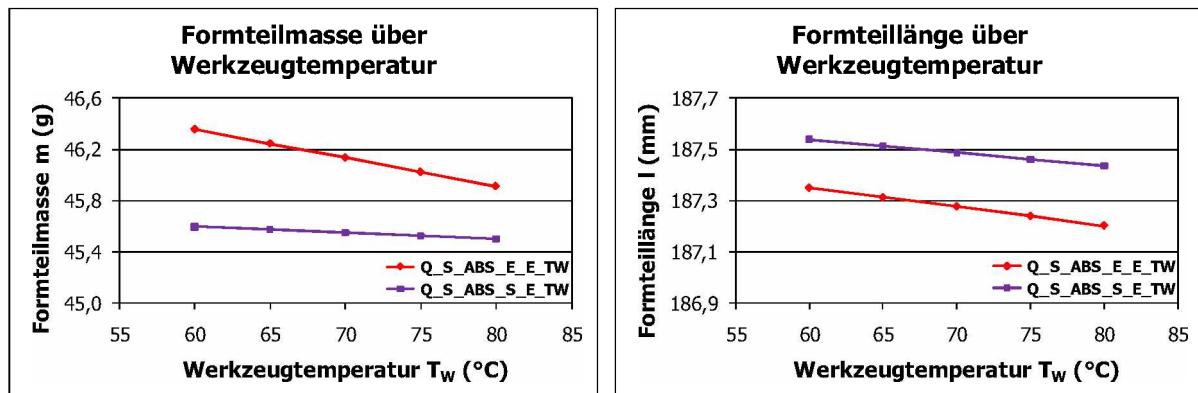


Abbildung 92: Physikalisches Modell für die Werkzeugtemperaturabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

## Fazit:

Die Zusammenhänge aus Experiment und Simulation weisen bis auf die unterschiedlichen Niveaus ihrer Verläufe überaus gute Übereinstimmungen auf. Um die rechnerischen Ergebnisse praktisch nutzbar zu machen, ist es lediglich nötig, Kenntnis über die realen Werte von Formteilmasse und -länge in der Grundeinstellung bzw. im Zentralpunkt zu haben. Die aus der Simulation gewonnenen Geraden können in weiterer Folge durch Verschieben des rechnerischen

Zentralpunktes zum experimentell ermittelten Zentralpunkt kalibriert werden. Hierbei werden die gesuchten Zusammenhänge zwischen den Qualitätsgrößen und den Einflussparametern in sehr guter Näherung abgebildet.

In Abbildung 93 das Prinzip der Kalibrierung am Beispiel der Abhängigkeit der Formteilmasse von der Düsentemperatur für das physikalische Modell dargestellt.

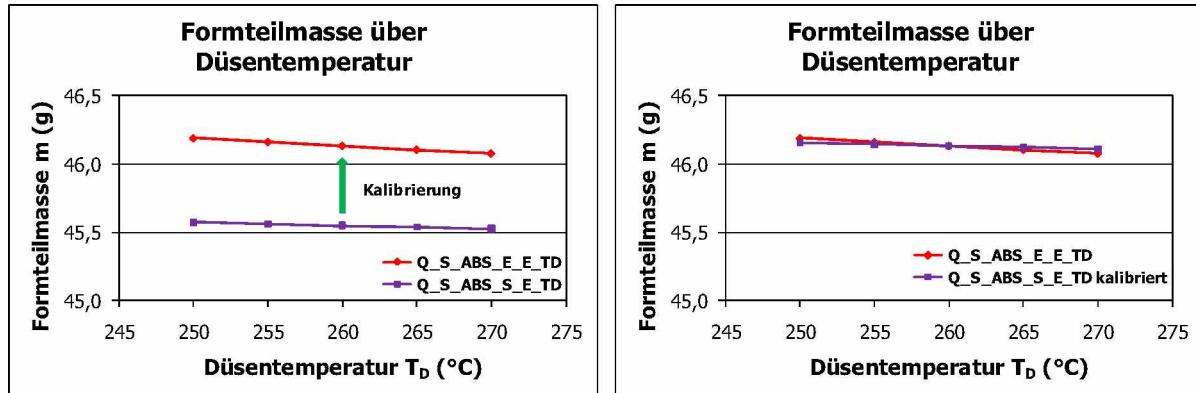


Abbildung 93: Prinzip der Kalibrierung der aus der Simulation gewonnenen Verläufe

Abbildung 94 zeigt zusammenfassend die kalibrierten Verläufe aus der Simulation im Vergleich zu jenen des Experiments. Es ist zu erkennen, dass das reale Verhalten durch Simulation und Kalibrierung sehr gut angenähert werden kann. Die maximalen Abweichungen treten mit 0,185 g bzw. 0,400 % für die Formteilmasse und 0,162 mm bzw. 0,087 % für die Formteillänge bei den Verläufen zur Nachdruckabhängigkeit auf. Sämtliche Ergebnisse zum Vergleich der experimentell und rechnerisch ermittelten Verläufe des physikalischen Modells sind in Tabelle 50 (Anhang) angeführt.

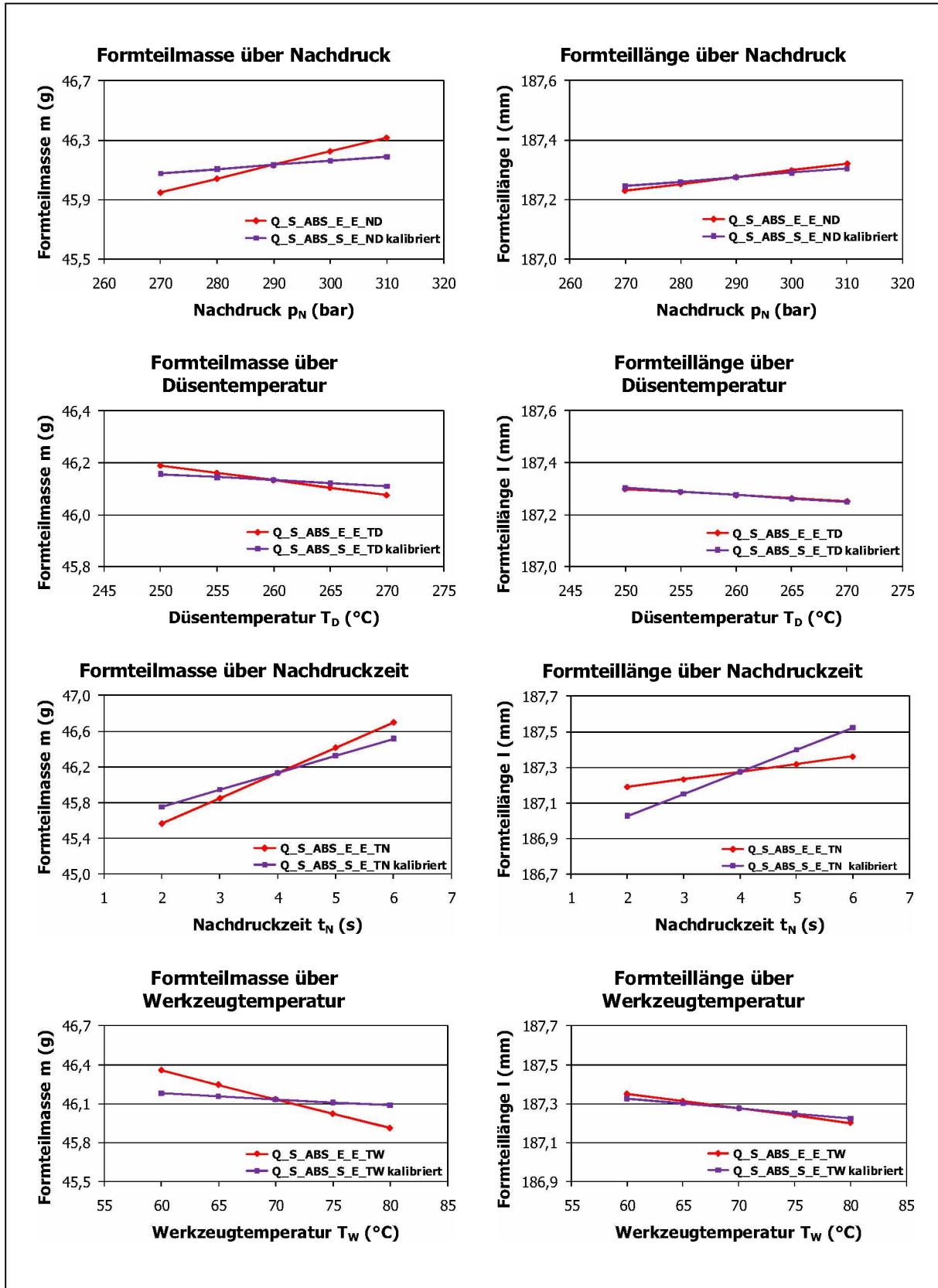


Abbildung 94: Vergleichende Aufstellung der experimentellen (rot) und rechnerisch ermittelten, kalibrierten Verläufe (violett) für das physikalische Modell

## 5.4 Vergleichende Betrachtung der experimentellen und numerischen Ergebnisse des statistischen Modells

Unterzieht man die über das statistische Modell gewonnenen Verläufe aus Experiment und Simulation einem Vergleich, zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie für das physikalische Modell. Dies leuchtet in Anbetracht den in Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2 für Experiment und Simulation erörterten guten Übereinstimmungen zwischen physikalischem und statistischem Modell ein. Vergleicht man das statistische Modell für Experiment und Simulation, so liegen auch hier die experimentell gefundenen Verläufe für die Formteilmasse wie schon für das physikalische Modell in Abschnitt 5.3 generell höher. Für die Formteillänge weist wiederum die Simulation in allen Fällen höhere Werte aus.

Tabelle 51 (Anhang) enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse für diese Gegenüberstellung.

Abbildung 95 zeigt das statistische Modell für die Abhängigkeit der Qualitätsgrößen vom Nachdruck. Die Werte der Formteilmasse weichen um maximal 0,804 g (1,743 %) voneinander ab. Für die Formteillänge ergeben sich 0,203 mm bzw. 0,108 %.

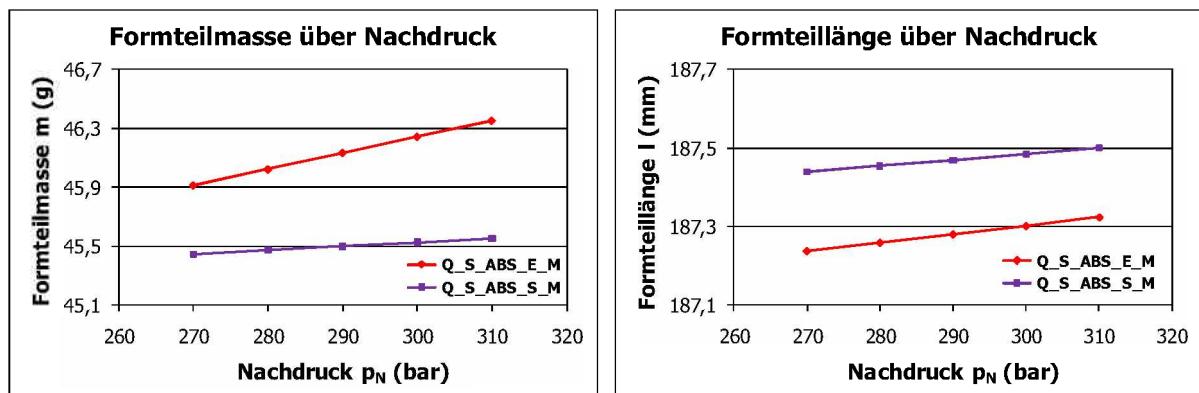


Abbildung 95: Statistisches Modell für die Nachdruckabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

Im Fall der Abhängigkeit von der Düsentemperatur (Abbildung 96) findet man die größten Differenzen bei 0,653 g für die Formteilmasse, (1,416 % der Masse in der Grundeinstellung), und 0,198 mm (0,106 %) für die Formteillänge.

Abbildung 97 zeigt die Verläufe aus Experiment und Simulation für die Abhängigkeit von der Nachdruckzeit. In Bezug auf die Formteilmasse liegt die maximale Differenz der Ergebnisse bei 0,702 g (1,522 %). Die Zusammenhänge für die Formteillänge unterscheiden sich im Äußersten um 0,363 mm (0,194 %).

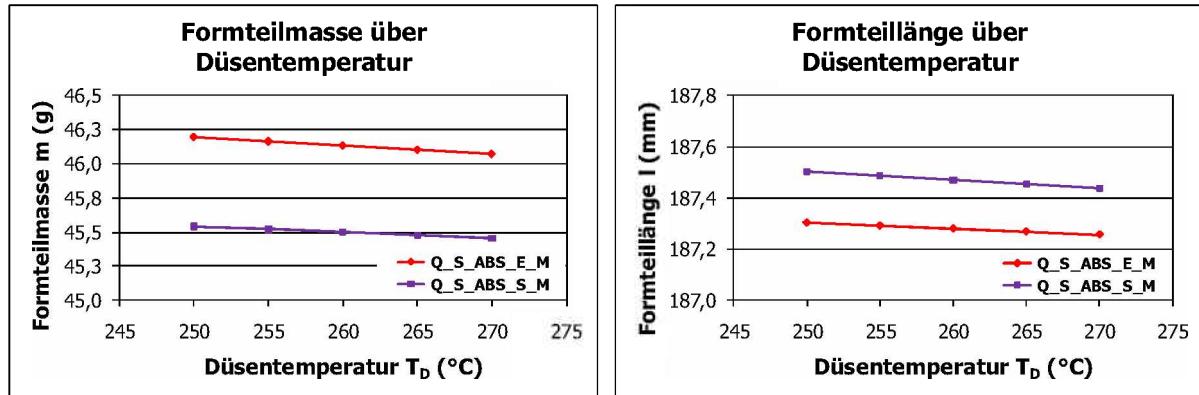


Abbildung 96: Statistisches Modell für die Düsentemperaturabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

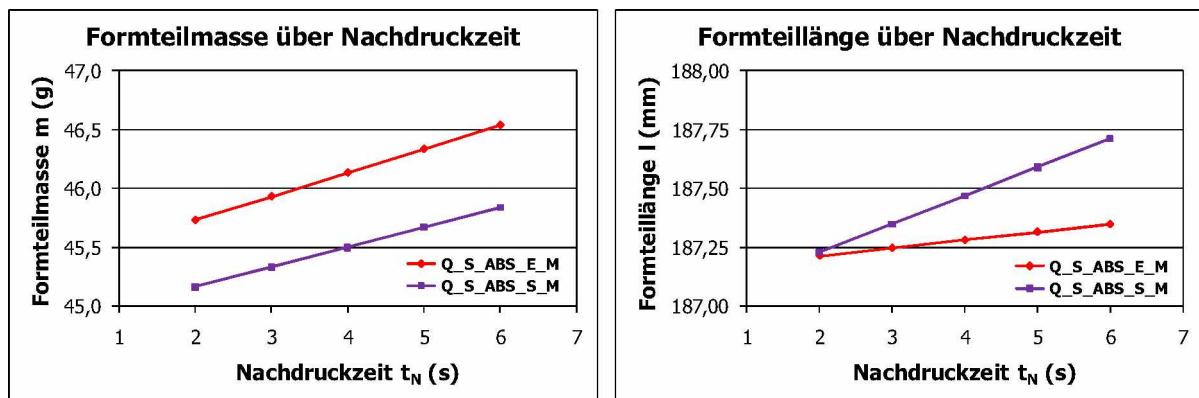


Abbildung 97: Statistisches Modell für die Nachdruckzeitabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

Betrachtet man die Werkzeugtemperaturabhängigkeit der Qualitätsgrößen in Abbildung 98, findet man maximale Abweichungen von 0,672 g (1,457 %) für die Masse und 0,221 mm (0,118 %) für die Länge des Formteils.

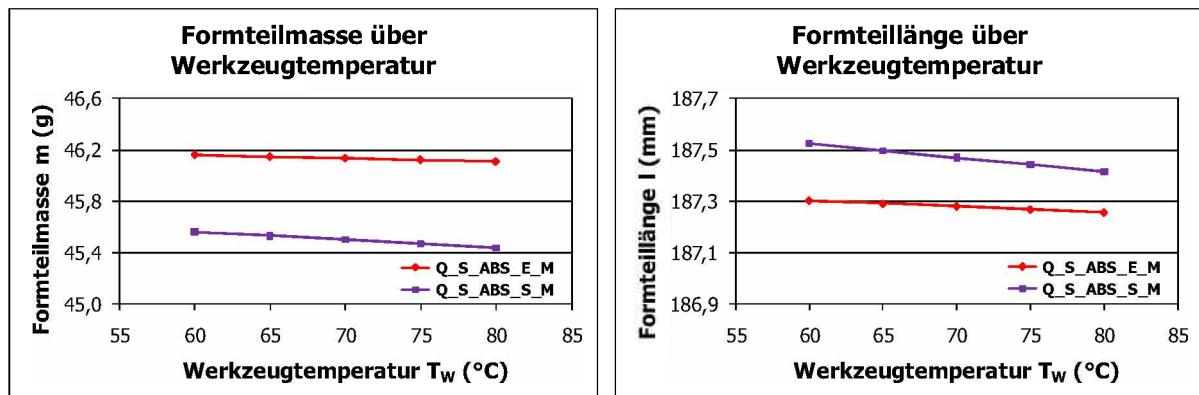


Abbildung 98: Statistisches Modell für die Werkzeugtemperaturabhängigkeit in Experiment (rot) und Simulation (violett)

## **Fazit:**

Die zuvor in Abschnitt 5.3 getroffenen Aussagen treffen grundsätzlich auch für den Vergleich des statistischen Modells in Experiment und Simulation zu. Auch hier ist es möglich, die numerisch gewonnenen Daten anhand des experimentell ermittelten Zentralpunktes zu kalibrieren.

In Abbildung 99 sind die experimentell ermittelten und die im Rahmen der Simulation erhaltenen und kalibrierten Zusammenhänge zwischen den Qualitätsgrößen und den Einflussparametern gegenüber gestellt. Die Verläufe ähneln sich noch deutlicher als im Fall des physikalischen Modells in Abschnitt 5.3. Die größte Abweichung der Formteilmasse tritt im Bereich der Nachdruckabhängigkeit auf. Sie beträgt 0,169 g (0,366 %). Für die Formteillänge liegt die höchste Differenz mit 0,174 mm (0,093 %) bei der Abhängigkeit von der Nachdruckzeit. Die Ergebnisse zu diesem Vergleich sind in Tabelle 52 (Anhang) festgehalten.

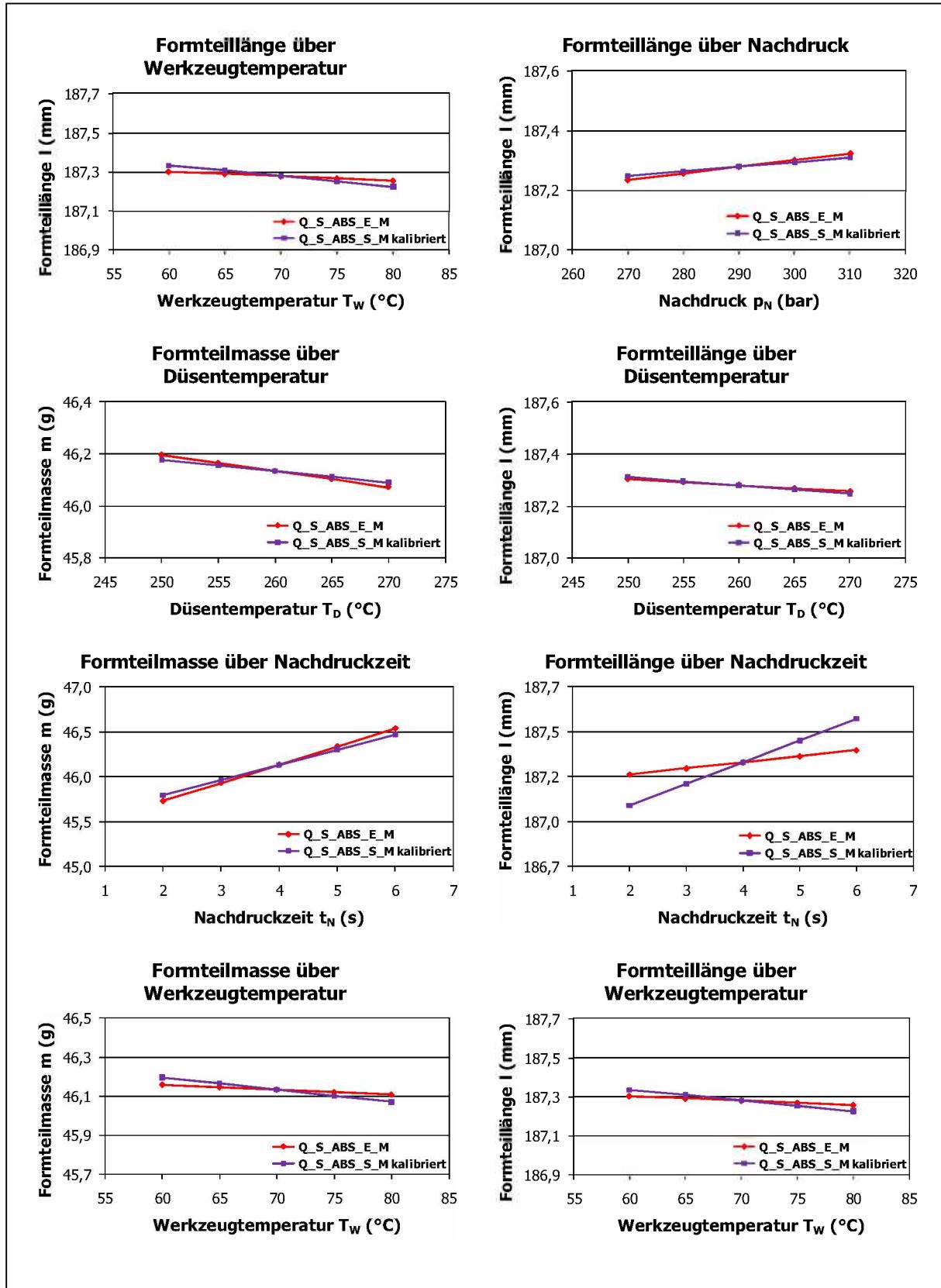


Abbildung 99: Vergleichende Aufstellung der experimentellen (rot) und rechnerisch ermittelten, kalibrierten Verläufe (violett) für das statistische Modell

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zunächst, das Konzept eines bestehenden physikalischen Modells eines Qualitätsreglers für das Spritzgießverfahren, welches auf die Konstanthaltung der Qualitätsgröße Formteilmasse abzielt, zu evaluieren und auf die Qualitätsgröße Formteillänge zu erweitern. Als Einflussparameter wurden in beiden Fällen der Nachdruck, die Düsentemperatur, die Nachdruckzeit und die Werkzeugtemperatur betrachtet. Die Beziehungen zwischen Qualitäts- und Einflussgrößen wurden anhand definierter Einfaktorversuchsplänen in praktischen Versuchen experimentell erarbeitet. Dem physikalischen Modell wurden in weiterer Folge die ebenfalls experimentell ermittelten Ergebnisse eines nach einem  $2^4$ -Faktorenversuchsplan mit Zentralpunkt untersuchten statistischen Modells gegenübergestellt. Im nächsten Schritt wurden die durchgeführten Versuche im Simulationsprogramm Autodesk Moldflow Insight (AMI) unter Verwendung der realen Einstellparameter nachgebildet und als eigentlicher Kernpunkt dieser Arbeit mit den Ergebnissen aus dem Experiment verglichen. Dies geschah, um beurteilen zu können, wie gut sich die sonst in aufwändigen praktischen Versuchsserien experimentell zu ermittelnden Beziehungen mit vergleichsweise geringem Aufwand numerisch vorhersagen lassen.

Die Untersuchungen wurden an einem Blendenbauteil aus dem Bereich der Weißwarenindustrie durchgeführt. Als Versuchsmaterial kam ein handelsübliches ABS der Type Novodur P2H-AT zum Einsatz. Die Grundeinstellungen, von welchen aus die Parametervariationen erfolgten, wurden in Vorversuchen festgelegt und beließen sich auf 290 bar Nachdruck, 260 °C Düsentemperatur, 4 s Nachdruckzeit und 70 °C Werkzeugtemperatur. Ausgehend von dieser Grundeinstellung bzw. diesem Zentralpunkt erfolgte die Variation der Parameter in zwei Stufen nach unten und oben. Die Stufenwerte betrugen 10 bar für den Nachdruck, 1 s für die Nachdruckzeit und 5 °C für die Düsen- und die Werkzeugtemperatur. Die experimentellen Versuche wurden auf einer hydraulischen Kniehebel-Spritzgießmaschine der Type Engel ES330/80H durchgeführt. Die Messung der Formteilmasse der produzierten Teile erfolgte von Hand per Laborwaage. Für die Untersuchungen der Formteillänge wurde ein repräsentatives Längenmaß am Formteil ausgewählt, das eine reproduzierbare Positionierung des Messschiebers ermöglichte.

Die Ergebnisse zeigen gute bis sehr gute Übereinstimmungen zwischen dem physikalischen und dem statistischen Modell. Die größten Abweichungen zwischen beiden Modellen betragen im Experiment 0,197 g für die Formteilmasse und

0,056 mm für die Formteillänge. Dies entspricht maximalen Fehlern von 0,428 % bzw. 0,03 % bezogen auf die Werte des Formteils bei der Grundeinstellung. Für die Simulation ergeben sich etwa um die Hälfte kleinere maximale Differenzen von 0,096 g (0,21 %) und 0,024 mm (0,013 %). Daraus ist grundsätzlich zu erkennen, dass in einem engen Variationsbereich um die Grundeinstellung, in welchem die realen Verhältnisse in guter Näherung durch lineare Zusammenhänge angenähert werden können, beide Modelle sowohl für die Masse als auch für die Länge des Formteils gut anwendbar sind.

Vergleicht man die Ergebnisse des physikalischen Modells aus Experiment und Simulation, ergeben sich sehr ähnliche Verläufe für die Abhängigkeiten der Qualitätsgrößen von den Einflussparametern, die sich jedoch in ihrem Gesamtniveau unterscheiden. Die höchsten Differenzen ergeben sich hier zu 0,769 g (1,666 %) für die Masse und 0,373 mm (0,199 %) für die Länge des Formteils. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse des statistischen Modells zeigen ein ähnliches Verhalten. Hier betragen die maximalen Unterschiede 0,804 g (1,743 %) und 0,363 mm (0,194 %).

Die Abweichungen zwischen Experiment und Simulation können zum Einen dadurch bedingt sein, dass für das untersuchte Formteil keine CAD-Daten existierten und das für die Simulation benötigte 3D-Modell aus vorhandenen Bauteil- und Werkzeugzeichnungen rekonstruiert werden musste, was möglicherweise mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet ist. Zum anderen kann ein Simulationsprogramm immer nur eine Annäherung an die realen Verhältnisse darstellen, da im Zuge der Analyse diverse Vereinfachungen getroffen werden. So verwendet AMI beispielsweise eine konstante Werkzeugtemperatur über den Zyklus und berücksichtigt nicht, dass es während des Spritzgießzyklus zu unterschiedlichen Temperaturen im Werkzeug kommt. Des Weiteren stellt sich die Frage nach der Qualität der im Programm herangezogenen Materialdaten. Wie in Abschnitt 3.2 erwähnt, hat sich die Erscheinungsform des Novodur P2H-AT in den letzten Jahren geändert, wobei die in den jeweiligen Datenblättern angegebenen Materialdaten ident und somit zweifelhaft sind. Darüber hinaus ist es im Zuge der Simulation natürlich nicht möglich, ein gewisses Streckenverhalten der Spritzgießmaschine und ihre Wechselwirkung mit der Umgebung in die Berechnungen mit einzubeziehen.

Es wurde jedoch eine geeignete Methode gefunden, die aus der Simulation gewonnenen Daten für praktische Anwendungen direkt und mit geringem Aufwand nutzbar zu machen. So ist es lediglich nötig, zusätzlich zu den Daten aus der Simulation eine einzige Versuchsserie im Zentralpunkt des Versuchsplanes

experimentell an der Spritzgießmaschine durchzuführen und diese Ergebnisse entsprechend abzusichern. Die vom Niveau her abweichenden Verläufe aus der Simulation können dann um den Betrag der Differenz zwischen den Zentralpunkten aus Simulation und Einzelversuch in die realen Werte von Formteilmasse und -länge bei der Grundeinstellung parallelverschoben, also gewissermaßen kalibriert werden. Führt man dies für die in dieser Arbeit ermittelten Verläufe durch, ergeben sich im Bereich des physikalischen Modells maximale Fehler von 0,185 g (0,400 %) und 0,162 mm (0,087 %). Für das statistische Modell folgen die größten Abweichungen mit 0,169 g (0,366 %) und 0,174 mm (0,093 %).

Die Ergebnisse zeigen, dass die experimentellen bzw. realen Verläufe mit guter Genauigkeit durch Simulation und Kalibrierung abgebildet werden können. Aus dieser Tatsache erwächst großes Potential für Zeit- und Kostenreduktionen im hier betrachteten Bereich der Qualitätsregelung. Darüber hinaus sind die gewonnenen Erkenntnisse generell für das Feld der Produkt- und Werkzeugauslegung interessant. So ist es beispielsweise wie in [7] und [8] behandelt möglich, das Prozessfenster eines sich in Entwicklung befindlichen Formteiles vorab virtuell zu ermitteln und die diesbezüglichen Ergebnisse wiederum in die Entwicklungsarbeit einfließen zu lassen. Obgleich die hier erarbeiteten Resultate überaus vielversprechend sind, ist es nötig, ihre breite Anwendbarkeit durch weitere Untersuchungen an anderen Formteilen, Materialien und Maschinen zu untermauern und in weiterer Folge den Regelkreis zwischen Qualitäts- und Einflussgrößen unter Einsatz geeigneter Mess- und Regeltechnik an der Spritzgießmaschine faktisch zu implementieren.

## 7 Literaturangabe

- [1] *Adam, M.*: Vorlesungsskriptum Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments), Fachhochschule Düsseldorf, URL: [http://mv.fh-duesseldorf.de/d\\_pers/Adam\\_Mario/a\\_lehre/am\\_pflicht/doe\\_v\\_s\\_1\\_vorlesung.pdf](http://mv.fh-duesseldorf.de/d_pers/Adam_Mario/a_lehre/am_pflicht/doe_v_s_1_vorlesung.pdf) [Stand 06.08.2009].
- [2] *Jeitler, W.*: Experimentelle Untersuchungen zum Spritzgießprozess - Grundlagen für die Erstellung eines Qualitätsreglers, Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1995.
- [3] *Kleppmann, W.*: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren, Hanser, München, Wien, 1998.
- [4] *Lampf, A.*: Qualitätssicherung beim Spritzgießen, 11. Leobner Kunststoffkolloquium, Leoben, 1991.
- [5] *Langecker, G. R.*: Prozeßführung beim Spritzgießen, Kunststoffe, Vol. 82/7, 1992.
- [6] *Langecker, G. R.*: Vorlesungsskriptum Kunststoffverarbeitung I, Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2005.
- [7] *Lucyshyn T., Kipperer M.*: Potenzial der virtuellen Ermittlung eines Prozessfensters im Spritzguss, Technologieakademie Qualitätsregelung und -überwachung im Spritzgießprozess, Montanuniversität Leoben, 05. 05. 2010.
- [8] *Lucyshyn T., Kukla C., Kipperer M., Holzer C.*: Virtual determination of a process window for injection moulding, 10th Austrian Polymer Meeting an 2nd Joint Austrian-Slovenian Polymer Meeting 2010, Leoben 2010.
- [9] *Michaeli, W. und Lauterbach, M.*: Qualität im Griff mit pmT-Optimierung für Nachdruckphase, Plastverarbeiter, Vol. 10, 1989.
- [10] *Michaeli, W., Lettowsky, C. und Schreiber, A.*: Prozessregelung am Ort des Geschehens, Swiss Plastics, Vol. 12, 2007.
- [11] *N.N., Automation Creations Inc., Blacksburg, VA, USA*: MatWeb Material Property Data Ineos ABS Novodur P2H-AT; URL: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=80c88503f898402399d938dfdd534a20>; [Stand 02. 08. 2010].

- [12] *N.N., Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, D:* Produktbild Spider 8; URL: <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/messelektroniken/universelle-systeme-fuer-die-messdatenerfassung/einzelgeraete-fuer-die-messdatenerfassung/single/categorie/daq-standalone/product/spider8/backPID/standalone-daq-devices/> [Stand 09. 08. 2010].
- [13] *N.N., Ineos ABS (Deutschland) GmbH, Köln, D:* Datenblatt Novodur P2H-AT; [http://www.ineos-abs.com/fileadmin/downloads/Produkte/Datenblaetter/Europa/de/N.P2H-AT\\_de.pdf](http://www.ineos-abs.com/fileadmin/downloads/Produkte/Datenblaetter/Europa/de/N.P2H-AT_de.pdf) [Stand 03. 09. 2010].
- [14] *N.N., Ineos AG, Lausanne, CH:* Ineos Factfile 2010; URL: [http://www.ineos.com/pdf/INE\\_FF\\_2009\\_01\\_web.pdf](http://www.ineos.com/pdf/INE_FF_2009_01_web.pdf) [Stand 02. 08. 2010].
- [15] *N.N.:* ISO Datasheet Novodur P2H-AT; [http://www.lyceedupaysdesoule.fr/microtec/techno/Bayer\\_Novodur\\_P2H-AT.pdf](http://www.lyceedupaysdesoule.fr/microtec/techno/Bayer_Novodur_P2H-AT.pdf) [Stand 25. 10. 2009].
- [16] *N.N., Kern & Sohn GmbH, Balingen, D:* Produktbild EG Präzisionswaage; URL: <http://www.kern-sohn.com/de/shop/katalog-25.html> [Stand 09. 08. 2010].
- [17] *N.N., Kistler Instrumente AG, Winterthur, CH:* Produktbild p-T-Sensor 6190CA0,4; URL: [http://www.kistler.com/ch\\_de-ch/13\\_Productfinder/App.6190CA0,4/p-T-Sensor-mit-Front-4-mm-Kabellaenge-0-4-m.html](http://www.kistler.com/ch_de-ch/13_Productfinder/App.6190CA0,4/p-T-Sensor-mit-Front-4-mm-Kabellaenge-0-4-m.html) [Stand 09. 08. 2010].
- [18] *N.N., Physikalische-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, D:* Genauigkeitsklassen; URL: [http://www.ptb.de/de/org/1/\\_index.htm](http://www.ptb.de/de/org/1/_index.htm), [Stand 22. 07. 2010].
- [19] *N.N., Sartorius AG, Göttingen, D:* Handbuch wägetechnische Applikationen; URL: [http://www.sartorius.com/fileadmin/sartorius\\_pdf/alle/BRO-PruefmittelWaageImQMSystem-d.pdf](http://www.sartorius.com/fileadmin/sartorius_pdf/alle/BRO-PruefmittelWaageImQMSystem-d.pdf), [Stand 30.10.2009].
- [20] *N.N., Wikimedia Foundation Inc., San Francisco, CA, USA:* Kreissegment, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kreissegment> [Stand 22. 02. 2010].
- [21] *Rabitsch, R.:* Nachdruckloses Spritzgießen mit mechanischer Versiegelung des Spritzwerkzeugs, Diplomarbeit am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 1986.
- [22] *Scheffler, E.:* Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.
- [23] *Wu, C. F. und Hamada, M. S.:* Experiments - Planning, Analysis and Optimization, Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey and Canada, 2009.

## 8 Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
(1) - abcd	Stufen des $2^4$ -Versuchsplanes	
2,5D	zweikommafünfdimensional	
3D	dreidimensional	
A	Österreich	
AG	Aktiengesellschaft	
A – H	Konstanten des physikalischen Modells für die Formteillänge	(...)
A – P	Stufenbezeichnungen der $2^4$ -Faktorenversuche	
A, B, C, D	Faktoren / Hauptwirkungen des $2^4$ -Versuchsplanes	
AB, AC, AD, BC, BD, CD	Zweifachwirkungen des $2^4$ -Versuchsplanes	
ABC, ABD, ACD, BCD	Dreifachwirkungen des $2^4$ -Versuchsplanes	
ABCD	Vierfachwirkung des $2^4$ -Versuchsplanes	
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	
$a_{\text{eff}}$	effektive Temperaturleitfähigkeit	$\text{m}^2/\text{s}$
AMI	Autodesk Moldflow Insight	
$A_z$	Zylinderquerschnittsfläche	$\text{mm}^2$
b	Bogenlänge des Kreissegments	
$C_1 – C_8$	pvT-Koeffizienten des Tait-Ansatze	(...)
CA	Kalifornien	
CAD	Computer Aided Design	
CH	Schweiz	
CPU	Central Processing Unit	
D	Deutschland	
dat, txt, xls, cat	Dateierweiterungen	
DoE	Design of Experiments	
e	Eichwert	
E	Experiment; Einfaktorversuch	
E, F, G, H, I	Stufenbezeichnungen der Einfaktorversuche	
EER	Experimentwise Error Rate	
ESD	Electrostatic Discharge	
$F_1 – F_4$	Funktionen des Produktansatzes für die Formteilmasse	(/)

$f_1 - f_4$	Funktionen des Summenansatzes für die Formteilmasse	(/)
FG	Freiheitsgrad	
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	
$h$	Höhe des Kreissegments	
$i$	Index der Temperaturstufe	
$i$	Anzahl der Effekte	
IER	Individual Error Rate	
Inc.	Incorporation	
IPC	In-Process Control	
ISO	International Organization for Standardization	
$k$	Anzahl der Faktorstufenkombinationen	
$K$	Mittelwert aller Versuchsergebnisse, Regressionskonstante	
$K_1 - K_5$	Konstanten des physikalischen Modells für die Formteilmasse	
$K_l, K_b, K_h$	Längen-, Breiten-, Höhenkonstante	(/)
$l, b, h$	Formteillänge, -breite, -höhe	mm
$l_0, b_0, h_0$	Formteillänge, -breite, -höhe im optimierten Betriebspunkt	mm
$m$	Masse des Kunststoffes	g
$m$	Formteilmasse	g
M	Mehrfaktorenversuch	
MD	Maschinendaten	
MVR	Melt Volume Rate, Schmelz-Volumenfließrate	
N	material- und werkzeugabhängiger Parameter	(/)
$n$	Anzahl der Messergebnisse	
N	Summe der Einzelbeobachtungen	
ND	Nachdruck	
P	Konfidenzniveau	
PG	Prozessgrößen	
$p_i$	Druck	bar
PMMA	Polymethylmethacrylat	
pmT	Zusammenhang zwischen Druck, Masse und Temperatur in einer Kunststoffschmelze	
$p_N$	Nachdruck	bar
PQ	Produktqualität	
PSE	Pseudo Standard Error	
p-T-Sensor	Druck-Temperatur-Sensor	
pVT	Zusammenhang zwischen Druck, spezifischem Volumen und Temperatur in einer Kunststoffschmelze	

Q	Qualitätsregler	
r	Radius des Kreissegments	mm
RAM	Random Access Memory	
s	Schneckenweg	mm
$\bar{s}$	Mittlere Wanddicke	mm
S	Signalblende	
S	Simulation	
s	Kreissehne	mm
$s_0$	anfänglichen Standardabweichung	
$S_e$	Standardabweichung des Gesamtexperiments	
$S_{eff}$	Standardabweichung der Effekte	
SGM	Spritzgießmaschine	
$S_i$	Varianz	
SPC	Statistical Process Control	
T	Total, Summe aller Messergebnisse	
$T_c$	Siegeltemperatur	°C
TD	Düsentemperatur	°C
$T_E$	Entformungstemperatur	°C
$t_E$	Einspritzzeit	s
$t_{FG, \alpha}$	Wert der t-Verteilung	
$T_i$	Massetemperatur des Teilintervalls	°C
$t_k$	Kühlzeit	s
$T_M$	Schmelztemperatur	°C
$T_M$	Massetemperatur	°C
$T_{M0}$	Massetemperatur im optimierten Betriebspunkt	°C
$T_{Mi}$	Abweichende Massetemperatur	°C
$t_N$	Nachdruckzeit	s
TN	Nachdruckzeit	s
$t_{N0}$	Nachdruckzeit im optimierten Betriebspunkt	s
$t_{N1}$	neuer Sollwert der Nachdruckzeit	s
$t_{PSE,i}$	Kritischer Verteilungswert für die Lenth's Method	
TW	Werkzeugtemperatur	°C
$\bar{T}_w$	mittlere Werkzeugwandtemperatur	°C
$T_{wo}$	Werkzeugwandtemperatur im optimierten Betriebspunkt	°C
$T_{wi}$	Abweichende Werkzeugwandtemperatur	°C
USA	Vereinigte Staaten von Amerika	

V	Volumen der Kavität	cm <sup>3</sup>
v	spezifisches Volumen	cm <sup>3</sup> /g
V	Formteilvolumen	mm <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Volumenstrom	cm <sup>3</sup> /s
$v(T_i, p_i)$	spezifisches Volumen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur	cm <sup>3</sup> /g
$V_0$	Formteilvolumen im optimierten Betriebspunkt	cm <sup>3</sup>
$v_B$	spezifisches Volumen im Umschaltpunkt	cm <sup>3</sup> /g
$V_{B_{\text{eff}}}$	Vertrauensbereich der Effekte	
$v_C$	spezifisches Volumen im Siegelpunkt	cm <sup>3</sup> /g
VDE	Verein Deutscher Elektrotechniker	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	
$v_E(t)$	Einspritzgeschwindigkeitsprofil	mm/s
$W_E$	Einspritzarbeit	J
$W_{E0}$	Einspritzarbeit im optimierten Betriebspunkt	J
$X_1, X_2, X_3, X_4$	transformierte Einstellstufen der Faktoren A - D	
Y	Wert des Regressionspolynoms	
$Y_{ZP}$	Wert im Zentralpunkt	
Zif.	Ziffer	
ZP	Zentralpunkt	
$\Delta t_{N0}$	Nachdruckzeit-Teilintervall	s
$\alpha$	Volumenausdehnungskoeffizient	K <sup>-1</sup>
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit	
$\alpha$	Mittelpunktwinkel des Kreissegments	°
$\gamma(s, t)$	Scherdeformation in Abhängigkeit von Ort (s) und Zeit (t)	(/)
$\dot{\gamma}(s, t)$	Schergeschwindigkeit in Abhängigkeit von Ort (s) und Zeit (t)	s <sup>-1</sup>
$\kappa$	Isotherme Kompressibilität	bar <sup>-1</sup>
$\mu$	Mittelwert der Stichprobe	
$\hat{\theta}_i$	Effekte oder Effektschätzwerte	

## 9 Anhang

### 9.1 Wertetabelle für die t-Verteilung

Tabelle 42: *t*-Verteilung [3]

Freiheitsgrad f	t für Vertrauensniveau		
	95%	99%	99,9%
1	12,71	63,66	636,62
2	4,303	9,925	31,60
3	3,182	5,841	12,92
4	2,776	4,604	8,610
5	2,571	4,032	6,869
6	2,447	3,707	5,959
7	2,365	3,499	5,408
8	2,306	3,355	5,041
9	2,262	3,250	4,781
10	2,228	3,169	4,587
12	2,179	3,055	4,318
15	2,131	2,947	4,073
20	2,086	2,845	3,850
30	2,042	2,750	3,646
40	2,021	2,704	3,551
50	2,009	2,678	3,496
70	1,994	2,648	3,435
100	1,984	2,626	3,390
1000	1,962	2,581	3,300
$\infty$	1,960	2,576	3,291

## 9.2 Wertetabellen zur Lenth's Method

Tabelle 43: kritische IER-Werte der Lenth's Method [23]

I	IER Critical Values ( $IER_{\alpha}$ )																					
	$\alpha$																					
0.4	0.3	0.2	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	
7	0.74	0.93	1.20	1.71	1.79	1.89	2.00	2.13	2.30	2.53	3.09	3.76	5.07	5.30	5.58	5.91	6.32	6.84	7.52	8.50	10.08	13.39
8	0.78	0.94	1.20	1.67	1.75	1.83	1.93	2.05	2.20	2.39	2.85	3.53	4.70	4.89	5.11	5.37	5.69	6.07	6.56	7.28	8.35	10.60
11	0.78	0.97	1.24	1.71	1.78	1.87	1.96	2.08	2.21	2.38	2.72	3.22	4.08	4.22	4.39	4.58	4.82	5.12	5.30	6.04	6.86	8.52
15	0.79	0.99	1.25	1.70	1.77	1.84	1.93	2.03	2.16	2.31	2.52	2.95	3.63	3.74	3.86	4.00	4.16	4.37	4.63	4.99	5.53	6.54
17	0.80	1.00	1.26	1.70	1.76	1.84	1.92	2.02	2.14	2.28	2.47	2.87	3.48	3.58	3.69	3.82	3.97	4.16	4.39	4.69	5.16	6.03
19	0.80	1.00	1.26	1.70	1.76	1.83	1.91	2.01	2.12	2.26	2.44	2.81	3.38	3.47	3.57	3.68	3.82	3.98	4.19	4.45	4.86	5.62
23	0.81	1.01	1.27	1.69	1.75	1.82	1.90	1.99	2.10	2.23	2.40	2.71	3.23	3.30	3.39	3.49	3.60	3.74	3.91	4.14	4.47	5.09
26	0.81	1.01	1.27	1.68	1.75	1.81	1.89	1.98	2.08	2.21	2.37	2.66	3.15	3.22	3.30	3.39	3.49	3.62	3.77	3.97	4.27	4.82
27	0.81	1.01	1.27	1.68	1.74	1.81	1.89	1.98	2.08	2.20	2.36	2.64	3.12	3.19	3.26	3.35	3.45	3.58	3.73	3.93	4.22	4.75
31	0.82	1.02	1.27	1.68	1.74	1.80	1.88	1.96	2.06	2.19	2.34	2.59	3.04	3.11	3.18	3.26	3.36	3.47	3.61	3.79	4.05	4.52
35	0.82	1.02	1.27	1.68	1.74	1.80	1.87	1.96	2.05	2.17	2.32	2.56	2.99	3.05	3.12	3.19	3.28	3.39	3.52	3.69	3.93	4.36
53	0.83	1.03	1.28	1.67	1.73	1.79	1.86	1.93	2.02	2.13	2.27	2.47	2.85	2.90	2.96	3.02	3.09	3.18	3.29	3.42	3.61	3.95
63	0.83	1.03	1.28	1.66	1.72	1.78	1.85	1.92	2.01	2.12	2.26	2.44	2.80	2.85	2.90	2.96	3.03	3.11	3.21	3.33	3.51	3.82
80	0.83	1.03	1.28	1.66	1.72	1.78	1.84	1.92	2.00	2.11	2.24	2.42	2.75	2.80	2.85	2.90	2.97	3.04	3.14	3.26	3.42	3.71
127	0.84	1.03	1.28	1.66	1.71	1.77	1.83	1.90	1.99	2.09	2.21	2.38	2.68	2.72	2.77	2.82	2.88	2.95	3.03	3.14	3.28	3.53

$\alpha$  = upper tail probability,  $I$  = number of compared effects.

Tabelle 44: kritische EER-Werte der Lenth's Method [23]

I	EER Critical Values ( $EER_{\alpha}$ )																					
	$\alpha$																					
0.4	0.3	0.2	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	
7	1.80	2.06	2.42	3.69	3.85	4.04	4.26	4.52	4.87	5.33	6.05	7.17	9.72	10.14	10.66	11.32	12.08	13.02	14.31	16.01	18.78	24.32
8	1.84	2.06	2.39	3.65	3.83	4.03	4.26	4.53	4.87	5.30	5.90	6.80	8.63	8.95	9.32	9.76	10.29	10.95	11.82	12.99	14.30	18.88
11	2.02	2.25	2.74	3.56	3.69	3.83	3.99	4.19	4.44	4.76	5.22	5.95	7.41	7.65	7.95	8.28	8.71	9.23	9.88	10.77	12.23	14.97
15	2.14	2.36	2.84	3.51	3.51	3.73	3.87	4.04	4.24	4.50	4.86	5.40	6.45	6.62	6.82	7.05	7.33	7.66	8.08	8.65	9.51	11.23
17	2.20	2.41	2.87	3.49	3.58	3.69	3.82	3.98	4.16	4.40	4.72	5.21	6.12	6.28	6.45	6.64	6.87	7.15	7.53	8.02	8.75	10.25
19	2.24	2.45	2.90	3.48	3.57	3.68	3.80	3.94	4.12	4.34	4.63	5.07	5.88	6.02	6.16	6.34	6.55	6.82	7.14	7.57	8.20	9.43
23	2.31	2.55	2.93	3.46	3.54	3.64	3.74	3.87	4.02	4.20	4.46	4.82	5.51	5.61	5.73	5.87	6.03	6.22	6.48	6.83	7.32	8.22
26	2.35	2.62	2.96	3.47	3.55	3.64	3.73	3.85	3.98	4.16	4.38	4.70	5.30	5.40	5.50	5.63	5.78	5.94	6.18	6.46	6.89	7.62
27	2.37	2.64	2.96	3.45	3.53	3.62	3.72	3.83	3.96	4.13	4.35	4.68	5.27	5.36	5.46	5.58	5.73	5.90	6.13	6.44	6.87	7.65
31	2.42	2.70	2.98	3.45	3.52	3.60	3.69	3.80	3.92	4.08	4.28	4.57	5.10	5.18	5.27	5.38	5.50	5.66	5.84	6.09	6.42	7.08
35	2.46	2.73	3.00	3.45	3.51	3.59	3.68	3.77	3.89	4.03	4.22	4.50	4.97	5.05	5.13	5.23	5.34	5.48	5.64	5.88	6.19	6.80
53	2.66	2.84	3.08	3.46	3.52	3.58	3.65	3.73	3.82	3.94	4.08	4.29	4.64	4.70	4.76	4.83	4.91	5.00	5.12	5.27	5.50	5.88
63	2.72	2.89	3.12	3.47	3.52	3.58	3.64	3.72	3.80	3.91	4.04	4.23	4.56	4.61	4.67	4.73	4.80	4.89	5.00	5.14	5.33	5.67
80	2.79	2.96	3.16	3.49	3.54	3.59	3.65	3.72	3.79	3.89	4.01	4.18	4.46	4.51	4.56	4.61	4.67	4.75	4.84	4.96	5.13	5.43
127	2.93	3.07	3.26	3.55	3.59	3.63	3.68	3.74	3.81	3.89	3.99	4.13	4.37	4.41	4.45	4.49	4.54	4.61	4.68	4.77	4.90	5.13

$\alpha$  = upper tail probability,  $I$  = number of compared effects.

## 9.3 Materialdatenblätter

*Tabelle 45: Materialdatenblatt Novodur P2H-AT, Bayer [15]*



### ISO Datasheet Novodur P2H-AT



#### Injection molding grades / General purpose grades

standard impact strength, easy flowing, high gloss, contains antistatic additive

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
<b>Rheological properties</b>				
C Melt volume-flow rate	220 °C, 10 kg	cm <sup>3</sup> (10 min)	ISO 1133	37
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2	%	ISO 284-4	0.4 - 0.6
C Molding shrinkage, normal	60x60x2	%	ISO 284-4	0.4 - 0.6
<b>Mechanical properties (23 °C/50 % r.h.)</b>				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2500
C Yield stress	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	44
C Yield strain	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.1
C Strain at break	50 mm/min	%	based on ISO 527-1,-2	>15
C Tensile creep modulus	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
C Tensile creep modulus	1000 h	MPa	ISO 899-1	1500
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	100
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eU	80
C Charpy notched impact strength	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eA	16
C Charpy notched impact strength	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179-1eA	7
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180-1A	16
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180-1A	7
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2400
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	70
Ball indentation hardness		N/mm <sup>2</sup>	ISO 2039-1	110
<b>Thermal properties</b>				
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	92
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	98
C Vicat softening temperature	50 N, 50 °C/h	°C	ISO 306	95
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10-4/K	ISO 11359-1,-2	0.9
C Burning behavior UL 94 (1.6 mm)	1.8 mm	Class	UL 94	HB
Burning rate (US-FMVSS)	2.0 mm	mm/min	ISO 3785	80
Glow wire test (GWR)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	700
<b>Electrical properties (23 °C/50 % r.h.)</b>				
C Relative permittivity	100 Hz	-	IEC 60250	3.0
C Relative permittivity	1 MHz	-	IEC 60250	2.9
C Dissipation factor	100 Hz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	55
C Dissipation factor	1 MHz	10 <sup>-4</sup>	IEC 60250	90
C Volume resistivity		Ohm·m	IEC 60093	1E13
C Surface resistivity		Ohm	IEC 60093	1E15
C Electric strength	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	34
C Comparative tracking index CTI	Solution A	Rating	IEC 60112	600
<b>Other properties (23 °C)</b>				
C Density		kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	1050
<b>Processing conditions for test specimens</b>				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 284	240
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 284	70
C Injection molding-Injection velocity		mm/s	ISO 284	240

#### Disclaimer

##### Disclaimer for Sales products

This information and our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - are given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. Our advice does not release you from the obligation to verify the information currently provided - especially that contained in our safety data and technical information sheets - and to test our products as to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you on the basis of our technical advice are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. Our products are sold in accordance with the current version of our General Conditions of Sale and Delivery.

##### Test values styrenics

Unless specified to the contrary, the values given have been established on standardised test specimens at room temperature. The figures should be regarded as guide values only and not as binding minimum values. Kindly note that, under certain conditions, the properties can be affected to a considerable extent by the design of the mould/die, the processing conditions and the colouring. This is valid especially for CTI.

##### Processing note

Under the recommended processing conditions small quantities of decomposition product may be given off during processing. To preclude any risk to the health and well-being of the machine operatives, tolerance limits for the work environment must be ensured by the provision of efficient exhaust ventilation and fresh air at the workplace in accordance with the Safety Data Sheet. In order to prevent the partial decomposition of the polymer and the generation of volatile decomposition products, the prescribed processing temperatures should not be substantially exceeded. Since excessively high temperatures are generally the result of operator error or defects in the heating system, special care and controls are essential in these areas.

Tabelle 46: Materialdatenblatt Novodur P2H-AT, Ineos [13]



Datenblatt

## Novodur P2H-AT

standard Schlagzähigkeit, leichtfliessend, hochglänzend, mit Antistatikum ausgerüstet

ISO Formmassenbezeichnung: ISO 2580-1 -ABS 0, MGZ, 095-30-16-25

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Wert
<b>Rheologische Eigenschaften</b>				
Verarbeitungsschwindung, senkrecht	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.6
Schmelze-Volumenfließrate (MVR)	220 °C; 10 kg	cm³/(10 min)	ISO 1133	37
Verarbeitungsschwindung, parallel	60x60x2	%	ISO 294-4	0.4 - 0.6
<b>Mechanische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>				
Streckspannung	50 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	44
Bruchdehnung	50 mm/min	%	i.A. ISO 527-1,-2	>15
Zug-Modul	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2500
Biegefestigkeit	2 mm/min	MPa	ISO 178	70
Biege-Modul	2 mm/min	MPa	ISO 178	2400
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m²	ISO 180-1A	16
Izod-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m²	ISO 180-1A	7
Streckdehnung	50 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.1
Zug-Kriech-Modul	1 h	MPa	ISO 899-1	2200
Zug-Kriech-Modul	1000 h	MPa	ISO 899-1	1500
Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C	kJ/m²	ISO 179-1eU	100
Charpy-Schlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m²	ISO 179-1eU	80
Charpy-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	kJ/m²	ISO 179-1eA	16
Charpy-Kerbschlagzähigkeit	-30 °C	kJ/m²	ISO 179-1eA	7
Kugeldruckhärte		N/mm²	ISO 2039-1	110
<b>Thermische Eigenschaften</b>				
Formbeständigkeitstemperatur	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	93
Formbeständigkeitstemperatur	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	97
Vicat-Erweichungstemperatur	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	98
Brennverhalten UL 94 (1.6 mm) [UL gelistet]	1.6 mm	Klasse	UL 94	HB
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient, parallel	23 bis 55 °C	10⁻⁴/K	ISO 11359-1,-2	0.9
Brenngeschwindigkeit (US-FMVSS)	2.0 mm	mm/min	ISO 3795	60
Glühdrahtprüfung (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	700
<b>Elektrische Eigenschaften (23 °C/50 % r. F.)</b>				
Relative Dielektrizitätszahl	100 Hz	-	IEC 60250	3.0
Relative Dielektrizitätszahl	1 MHz	-	IEC 60250	2.9
Dielektrischer Verlustfaktor	100 Hz	10⁻⁴	IEC 60250	55
Dielektrischer Verlustfaktor	1 MHz	10⁻⁴	IEC 60250	90
Spezifischer Durchgangswiderstand		Ohm·m	IEC 60093	1E13
Spezifischer Oberflächenwiderstand		Ohm	IEC 60093	1E15
Elektrische Festigkeit	1 mm	kV/mm	IEC 60243-1	34
Vergleichszahl zur Kriechwegbildung CTI	Prüflösung A	Stufe	IEC 60112	600

## Novodur P2H-AT

Eigenschaft	Prüfbedingung	Einheit	Norm	Wert
<b>Sonstige Eigenschaften (23 °C)</b>				
Dichte		g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183	1.050
<b>Herstellbedingungen für Probekörper</b>				
Spritzgießen-Massetemperatur		°C	ISO 294	240
Spritzgießen-Werkzeugtemperatur		°C	ISO 294	70
Spritzgießen-Einspritzgeschwindigkeit		mm/s	ISO 294	240

© Diese Eigenschaftsmerkmale sind Bestandteil der Kunststoffdatenbank CAMPUS und basieren auf dem international festgelegten Katalog von Grunddaten für Kunststoffe ISO 10350.

**Haftungsausschluss**

## Haftungsklausel für Verkaufsprodukte

Die vorstehenden Informationen und unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgen nach bestem Wissen, gelten jedoch nur als unverbindliche Hinweise, auch in Bezug auf etwaige Schutzrechte Dritter. Die Beratung betrifft Sie nicht von einer eigenen Prüfung unserer aktuellen Beratungshinweise - insbesondere unserer Sicherheitsdatenblätter und technischen Informationen - und unserer Produkte im Hinblick auf Ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke, Anwendung, Verwendung und Verarbeitung unserer Produkte und der aufgrund unserer anwendungstechnischen Beratung von Ihnen hergestellten Produkten erfolgen außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschließlich in Ihrem Verantwortungsbereich. Der Verkauf unserer Produkte und unsere Beratung erfolgen nach Maßgabe unserer jeweils aktuellen Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

## Prüfwerte INEOS ABS

Die angegebenen Werte wurden, wenn nicht ausdrücklich anders angegeben, an genormten Prüfkörpern bei Raumtemperatur ermittelt. Die Angaben sind als Richtwerte anzusehen, nicht aber als verbindliche Mindestwerte. Bitte beachten Sie, dass die Eigenschaften durch die Werkzeuggestaltung, die Verarbeitungsbedingungen und durch die Einfärbung unter Umständen erheblich beeinflusst werden können. Dies gilt insbesondere für CT1.

## Verarbeitungshinweise

Bei der Verarbeitung können unter den empfohlenen Verarbeitungsbedingungen geringe Mengen Spaltprodukte abgegeben werden. Gemäß Sicherheitsdatenblatt ist die Einhaltung der angegebenen Arbeitsplatzgrenzwerte durch ausreichende Absaugung und Belüftung am Arbeitsplatz sicherzustellen, um Gesundheit und Wohlbefinden der Maschinenbediener nicht zu beeinträchtigen. Die vorgeschriebenen Verarbeitungstemperaturen dürfen nicht wesentlich überschritten werden, um eine stärkere partielle Zersetzung des Polymeren und Abspaltung von flüchtigen Zersetzungprodukten zu vermeiden. Da überhöhte Temperaturen meist auf Bedienfehler oder Störungen in den Heizsystemen zurückzuführen sind, ist diesbezüglich besondere Sorgfalt und Kontrolle notwendig.

INEOS ABS (Deutschland) GmbH, D-50769 Köln

© INEOS ABS (Deutschland)

## 9.4 Wertetabellen zum Vergleich der Modelle (Abschnitt 5)

*Tabelle 47: Experimentelle Ergebnisse des physikalischen und statistischen Modells im Vergleich (Abschnitt 5.1)*

Messserien	Physikalisches Modell		Statistisches Modell		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_E_E_ND_E	45,948	187,23	45,911	187,24	0,037	0,006	0,080%	0,003%
Q_S_ABS_E_E_ND_F	46,041	187,25	46,022	187,26	0,018	0,005	0,040%	0,003%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,005	0,000%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_ND_H	46,226	187,30	46,244	187,30	0,018	0,004	0,040%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_ND_I	46,318	187,32	46,355	187,32	0,037	0,003	0,080%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_E	46,190	187,30	46,195	187,30	0,005	0,005	0,010%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_F	46,162	187,29	46,164	187,29	0,002	0,005	0,005%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,005	0,000%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_H	46,105	187,26	46,102	187,27	0,002	0,005	0,005%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_I	46,076	187,25	46,072	187,26	0,005	0,004	0,010%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TN_E	45,566	187,19	45,728	187,21	0,162	0,023	0,352%	0,012%
Q_S_ABS_E_E_TN_F	45,850	187,23	45,931	187,25	0,081	0,014	0,176%	0,007%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,0001	0,005	0,000%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TN_H	46,417	187,32	46,336	187,31	0,081	0,004	0,176%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TN_I	46,700	187,36	46,538	187,35	0,162	0,013	0,352%	0,007%
Q_S_ABS_E_E_TW_E	46,356	187,35	46,159	187,30	0,197	0,047	0,428%	0,025%
Q_S_ABS_E_E_TW_F	46,245	187,31	46,146	187,29	0,099	0,021	0,214%	0,011%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,005	0,000%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TW_H	46,022	187,24	46,121	187,27	0,099	0,030	0,214%	0,016%
Q_S_ABS_E_E_TW_I	45,911	187,20	46,108	187,26	0,197	0,056	0,427%	0,030%
				Maximaler Fehler	0,197	0,056	0,428%	0,030%
				Minimaler Fehler	0,000	0,003	0,000%	0,002%
				Mittlerer Fehler	0,060	0,013	0,130%	0,007%

*Tabelle 48: Simulations-Ergebnisse des physikalischen und statistischen Modells im Vergleich (Abschnitt 5.2)*

Messserien	Physikalisches Modell		Statistisches Modell		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_S_E_ND_E	45,494	187,46	45,446	187,44	0,049	0,017	0,107%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_ND_F	45,522	187,47	45,472	187,45	0,050	0,017	0,110%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_ND_G	45,549	187,49	45,498	187,47	0,051	0,017	0,112%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_ND_H	45,577	187,50	45,525	187,48	0,052	0,017	0,114%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_ND_I	45,604	187,52	45,551	187,50	0,053	0,017	0,116%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_TD_E	45,573	187,51	45,542	187,50	0,031	0,012	0,068%	0,007%
Q_S_ABS_S_E_TD_F	45,561	187,50	45,520	187,49	0,041	0,015	0,090%	0,008%
Q_S_ABS_S_E_ND_G	45,549	187,49	45,498	187,47	0,051	0,017	0,112%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_TD_H	45,538	187,47	45,477	187,45	0,061	0,020	0,134%	0,011%
Q_S_ABS_S_E_TD_I	45,526	187,46	45,455	187,44	0,071	0,022	0,156%	0,012%
Q_S_ABS_S_E_TN_E	45,167	187,24	45,161	187,23	0,006	0,011	0,014%	0,006%
Q_S_ABS_S_E_TN_F	45,358	187,36	45,329	187,35	0,029	0,014	0,063%	0,008%
Q_S_ABS_S_E_ND_G	45,549	187,49	45,498	187,47	0,0510	0,017	0,112%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_TN_H	45,741	187,61	45,667	187,59	0,073	0,021	0,161%	0,011%
Q_S_ABS_S_E_TN_I	45,932	187,73	45,836	187,71	0,096	0,024	0,210%	0,013%
Q_S_ABS_S_E_TW_E	45,595	187,54	45,561	187,52	0,034	0,015	0,075%	0,008%
Q_S_ABS_S_E_TW_F	45,572	187,51	45,530	187,50	0,043	0,016	0,093%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_ND_G	45,549	187,49	45,498	187,47	0,051	0,017	0,112%	0,009%
Q_S_ABS_S_E_TW_H	45,526	187,46	45,467	187,44	0,059	0,019	0,130%	0,010%
Q_S_ABS_S_E_TW_I	45,503	187,43	45,435	187,41	0,068	0,020	0,149%	0,011%
				Maximaler Fehler	0,096	0,024	0,210%	0,013%
				Minimaler Fehler	0,006	0,011	0,014%	0,006%
				Mittlerer Fehler	0,051	0,017	0,112%	0,009%

*Tabelle 49: Vergleich der experimentellen und numerisch ermittelten Werte für das physikalische Modell (Abschnitt 5.3)*

Messserien	Physikalisches Modell Experiment		Physikalisches Modell Simulation		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_E_E_ND_E	45,948	187,23	45,494	187,46	0,454	0,226	0,984%	0,121%
Q_S_ABS_E_E_ND_F	46,041	187,25	45,522	187,47	0,519	0,219	1,125%	0,117%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,549	187,49	0,584	0,211	1,266%	0,113%
Q_S_ABS_E_E_ND_H	46,226	187,30	45,577	187,50	0,649	0,204	1,407%	0,109%
Q_S_ABS_E_E_ND_I	46,318	187,32	45,604	187,52	0,714	0,196	1,548%	0,105%
Q_S_ABS_E_E_TD_E	46,190	187,30	45,573	187,51	0,618	0,215	1,339%	0,115%
Q_S_ABS_E_E_TD_F	46,162	187,29	45,561	187,50	0,601	0,213	1,302%	0,114%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,549	187,49	0,584	0,211	1,266%	0,113%
Q_S_ABS_E_E_TD_H	46,105	187,26	45,538	187,47	0,567	0,209	1,230%	0,112%
Q_S_ABS_E_E_TD_I	46,076	187,25	45,526	187,46	0,550	0,207	1,193%	0,111%
Q_S_ABS_E_E_TN_E	45,566	187,19	45,167	187,24	0,400	0,049	0,866%	0,026%
Q_S_ABS_E_E_TN_F	45,850	187,23	45,358	187,36	0,492	0,130	1,066%	0,070%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,549	187,49	0,5840	0,211	1,266%	0,113%
Q_S_ABS_E_E_TN_H	46,417	187,32	45,741	187,61	0,676	0,292	1,466%	0,156%
Q_S_ABS_E_E_TN_I	46,700	187,36	45,932	187,73	0,769	0,373	1,666%	0,199%
Q_S_ABS_E_E_TW_E	46,356	187,35	45,595	187,54	0,761	0,188	1,649%	0,101%
Q_S_ABS_E_E_TW_F	46,245	187,31	45,572	187,51	0,672	0,200	1,457%	0,107%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,549	187,49	0,584	0,211	1,266%	0,113%
Q_S_ABS_E_E_TW_H	46,022	187,24	45,526	187,46	0,496	0,223	1,075%	0,119%
Q_S_ABS_E_E_TW_I	45,911	187,20	45,503	187,43	0,407	0,234	0,883%	0,125%
				Maximaler Fehler	0,769	0,373	1,666%	0,199%
				Minimaler Fehler	0,400	0,049	0,866%	0,026%
				Mittlerer Fehler	0,584	0,211	1,266%	0,113%

*Tabelle 50: Vergleich der experimentellen und kalibrierten, numerisch ermittelten, Werte für das physikalische Modell (Abschnitt 5.3)*

Messserien	Physikalisches Modell Experiment		Physikalisches Modell Simulation, kalibriert		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_E_E_ND_E	45,948	187,23	46,078	187,25	0,130	0,015	0,282%	0,008%
Q_S_ABS_E_E_ND_F	46,041	187,25	46,106	187,26	0,065	0,008	0,141%	0,004%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_ND_H	46,226	187,30	46,161	187,29	0,065	0,008	0,141%	0,004%
Q_S_ABS_E_E_ND_I	46,318	187,32	46,188	187,31	0,130	0,015	0,282%	0,008%
Q_S_ABS_E_E_TD_E	46,190	187,30	46,157	187,30	0,034	0,004	0,073%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_F	46,162	187,29	46,145	187,29	0,017	0,002	0,036%	0,001%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TD_H	46,105	187,26	46,122	187,26	0,017	0,002	0,036%	0,001%
Q_S_ABS_E_E_TD_I	46,076	187,25	46,110	187,25	0,034	0,004	0,073%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TN_E	45,566	187,19	45,751	187,03	0,185	0,162	0,400%	0,087%
Q_S_ABS_E_E_TN_F	45,850	187,23	45,942	187,15	0,092	0,081	0,200%	0,043%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,0000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TN_H	46,417	187,32	46,325	187,40	0,092	0,081	0,200%	0,043%
Q_S_ABS_E_E_TN_I	46,700	187,36	46,516	187,52	0,185	0,162	0,400%	0,087%
Q_S_ABS_E_E_TW_E	46,356	187,35	46,179	187,33	0,177	0,023	0,383%	0,012%
Q_S_ABS_E_E_TW_F	46,245	187,31	46,156	187,30	0,088	0,011	0,191%	0,006%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TW_H	46,022	187,24	46,110	187,25	0,088	0,011	0,191%	0,006%
Q_S_ABS_E_E_TW_I	45,911	187,20	46,087	187,22	0,177	0,023	0,383%	0,012%
				Maximaler Fehler	0,185	0,162	0,400%	0,087%
				Minimaler Fehler	0,000	0,000	0,000%	0,000%
				Mittlerer Fehler	0,079	0,031	0,171%	0,016%

*Tabelle 51: Vergleich der experimentellen und numerisch ermittelten Werte für das statistische Modell (Abschnitt 5.4)*

Messserien (entsprechend)	Statistisches Modell Experiment		Statistisches Modell Simulation		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_E_E_ND_E	45,911	187,24	45,446	187,44	0,466	0,203	1,010%	0,108%
Q_S_ABS_E_E_ND_F	46,022	187,26	45,472	187,45	0,550	0,196	1,193%	0,105%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,498	187,47	0,635	0,189	1,376%	0,101%
Q_S_ABS_E_E_ND_H	46,244	187,30	45,525	187,48	0,719	0,182	1,560%	0,097%
Q_S_ABS_E_E_ND_I	46,355	187,32	45,551	187,50	0,804	0,176	1,743%	0,094%
Q_S_ABS_E_E_TD_E	46,195	187,30	45,542	187,50	0,653	0,198	1,416%	0,106%
Q_S_ABS_E_E_TD_F	46,164	187,29	45,520	187,49	0,644	0,194	1,396%	0,103%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,498	187,47	0,635	0,189	1,376%	0,101%
Q_S_ABS_E_E_TD_H	46,102	187,27	45,477	187,45	0,626	0,185	1,357%	0,099%
Q_S_ABS_E_E_TD_I	46,072	187,26	45,455	187,44	0,617	0,180	1,337%	0,096%
Q_S_ABS_E_E_TN_E	45,728	187,21	45,161	187,23	0,568	0,016	1,231%	0,008%
Q_S_ABS_E_E_TN_F	45,931	187,25	45,329	187,35	0,601	0,102	1,304%	0,055%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,498	187,47	0,635	0,189	1,376%	0,101%
Q_S_ABS_E_E_TN_H	46,336	187,31	45,667	187,59	0,668	0,276	1,449%	0,147%
Q_S_ABS_E_E_TN_I	46,538	187,35	45,836	187,71	0,702	0,363	1,522%	0,194%
Q_S_ABS_E_E_TW_E	46,159	187,30	45,561	187,52	0,598	0,221	1,295%	0,118%
Q_S_ABS_E_E_TW_F	46,146	187,29	45,530	187,50	0,616	0,205	1,336%	0,110%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	45,498	187,47	0,635	0,189	1,376%	0,101%
Q_S_ABS_E_E_TW_H	46,121	187,27	45,467	187,44	0,654	0,173	1,417%	0,093%
Q_S_ABS_E_E_TW_I	46,108	187,26	45,435	187,41	0,672	0,157	1,457%	0,084%
				Maximaler Fehler	0,804	0,363	1,743%	0,194%
				Minimaler Fehler	0,466	0,016	1,010%	0,008%
				Mittlerer Fehler	0,635	0,189	1,376%	0,101%

*Tabelle 52: Vergleich der experimentellen und kalibrierten, numerisch ermittelten, Werte für das statistische Modell (Abschnitt 5.4)*

Messserien (entsprechend)	Statistisches Modell Experiment		Statistisches Modell Simulation, kalibriert		Abweichungen			
	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (g)	Länge (mm)	Masse (%)	Länge (%)
Q_S_ABS_E_E_ND_E	45,911	187,24	46,080	187,25	0,169	0,014	0,366%	0,007%
Q_S_ABS_E_E_ND_F	46,022	187,26	46,107	187,26	0,085	0,007	0,183%	0,004%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_ND_H	46,244	187,30	46,160	187,30	0,085	0,007	0,183%	0,004%
Q_S_ABS_E_E_ND_I	46,355	187,32	46,186	187,31	0,169	0,014	0,366%	0,007%
Q_S_ABS_E_E_TD_E	46,195	187,30	46,177	187,31	0,018	0,009	0,040%	0,005%
Q_S_ABS_E_E_TD_F	46,164	187,29	46,155	187,30	0,009	0,004	0,020%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TD_H	46,102	187,27	46,112	187,26	0,009	0,004	0,020%	0,002%
Q_S_ABS_E_E_TD_I	46,072	187,26	46,090	187,25	0,018	0,009	0,040%	0,005%
Q_S_ABS_E_E_TN_E	45,728	187,21	45,796	187,04	0,067	0,174	0,145%	0,093%
Q_S_ABS_E_E_TN_F	45,931	187,25	45,964	187,16	0,034	0,087	0,073%	0,046%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,0000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TN_H	46,336	187,31	46,302	187,40	0,034	0,087	0,073%	0,046%
Q_S_ABS_E_E_TN_I	46,538	187,35	46,471	187,52	0,067	0,174	0,145%	0,093%
Q_S_ABS_E_E_TW_E	46,159	187,30	46,196	187,33	0,037	0,032	0,081%	0,017%
Q_S_ABS_E_E_TW_F	46,146	187,29	46,165	187,31	0,019	0,016	0,041%	0,009%
Q_S_ABS_E_E_ND_G	46,133	187,28	46,133	187,28	0,000	0,000	0,000%	0,000%
Q_S_ABS_E_E_TW_H	46,121	187,27	46,102	187,25	0,019	0,016	0,041%	0,009%
Q_S_ABS_E_E_TW_I	46,108	187,26	46,070	187,23	0,037	0,032	0,081%	0,017%
				Maximaler Fehler	0,169	0,174	0,366%	0,093%
				Minimaler Fehler	0,000	0,000	0,000%	0,000%
				Mittlerer Fehler	0,044	0,034	0,095%	0,018%