



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Masterarbeit**

**Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau**

**Untersuchung einer alternativen kraftschlüssige Verbindung von Gurtschlosskappen mittels der Six Sigma Methode und der statistischen Versuchsplanung**

**Ole Piening, Mat. 1826130**

**18. August 2010**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik + Flugzeugbau  
Berliner Tor 9  
20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Autoliv B. V. & Co. KG  
Otto-Hahn Straße 4  
25337 Elmshorn

Verfasser: Ole Piening  
Abgabedatum: 18.08.2010

1. Prüfer: Prof. Dipl.-Ing. Hans-Dieter Stucke
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Wolf Ulrich Wachter

Industrielle Betreuung: Dipl.-Ing. Wolf Ulrich Wachter

---

## Geheimhaltungsvereinbarung

Diese Masterarbeit, die nach der Prüfungs- und Studienordnung der Hochschule für Angewandte Wissenschaften erstellt wurde, ist gemäß den beigefügten Hinweisen zur Geheimhaltung für einen Zeitraum von drei Jahren ab dem Datum der Abgabe der Masterarbeit vertraulich zu behandeln.

Während dieses Zeitraums werden der Bericht und alle anderen Arbeitsergebnisse der Masterarbeit nur den Prüfern zugänglich gemacht.

Student

Datum

Unterschrift 1. und 2. Prüfer

Datum

Unterschrift Firmenbetreuer

Datum

Korrespondenzadresse des Firmenbetreuers:

Herr

Dipl.-Ing. Wolf Ulrich Wachter

Autoliv B. V. & Co. KG

Otto-Hahn-Straße 4

25337 Elmshorn

Tel: 04121 -797 5559

E-Mail: [wolfulrich.wachter@autoliv.com](mailto:wolfulrich.wachter@autoliv.com)

---

## Eigenleistungserklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst habe. Aus Literatur entnommene Passagen sind mit einer entsprechenden Quellenangabe gekennzeichnet. Es wurden nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

---

Ort, Datum

---

Ole Piening

---

## **Vorwort**

Die vorliegende Masterarbeit ist bei der Autoliv B.V. & Co KG am Entwicklungsstandort Elmshorn entstanden. Bereits in der vorangegangenen Tätigkeit als Werkstudent hatte ich die Möglichkeit das Unternehmen kennen zu lernen und mich in die Entwicklung von Sicherheitsgurtsystemen einzuarbeiten. Im Rahmen der sechsmo-natigen Masterarbeit galt es insbesondere im Bereich Projektmanagement, Ver-suchsplanung sowie statistische Versuchsauswertung das an der Hochschule vermit-telte Wissen zu vertiefen und anzuwenden.

Danken möchte ich der Autoliv B.V. & Co KG, und hier insbesondere meinem Pro-jektteam, sowie den stets hilfsbereiten Mitarbeitern des Versuchslabors und des Musterbaus, die es mir ermöglicht haben das Projekt zügig durchzuführen. Diese freundliche Unterstützung ermöglichte es mir meine Masterarbeit im vorgegebenen Zeitraum zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen.

Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dipl. Ing. Hans-Dieter Stucke von der HAW Hamburg für die sehr gute hochschulseitige Betreuung.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Geheimhaltungsvereinbarung</b> .....	3
<b>Eigenleistungserklärung</b> .....	4
<b>Vorwort</b> .....	5
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	6
<b>1. Aufgabenstellung / Projektbeschreibung</b> .....	9
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	13
2.1 Fahrzeugsicherheit.....	13
2.1.1 Fahrzeugsicherheit allgemein .....	13
2.1.2 Unterscheidung Aktive / Passive Sicherheit .....	14
2.1.3 Sicherheitsgurt.....	15
2.1.4 Gurtschloss.....	17
2.1.5 Verbindung von Gurtschlosskappen.....	19
2.1.6 Alternative Verbindung von Gurtschlosskappen.....	23
2.2 Six Sigma Methodik.....	27
2.2.1 Projektplan.....	29
2.2.2 Blockdiagramm .....	31
2.2.3 Parameter-Diagramm.....	32
2.2.4 Robustheitsmatrix .....	33
2.3 Statistische Versuchsplanung .....	34
2.4 Bewertungssoftware Minitab .....	41
2.5 Prüfverfahren Kappenabzugskraft.....	49
<b>3. Versuchsplanung und Vorversuche</b> .....	52
3.1 Versuchsplanung .....	53
3.1.1 Blockdiagramm .....	54
3.1.2 Parameter-Diagramm.....	56
3.1.3 Robustheitsmatrix .....	59
3.1.4 Versuchsplan .....	61
3.2 Vorversuch - Ermittlung statistischer Einflussgrößen.....	62
3.2.1 Versuchsvorbereitung .....	63
3.2.2 Einpressen der Stifte in die Gurtschlosskappen .....	64
3.2.3 Auswertung der Einpresskräfte .....	65
3.2.4 Ermittlung der Kappenabzugskraft .....	67
3.2.5 Vergleich mit bisher verwendeten Fügeverfahren .....	73

---

3.3 Vorversuch – Einfluss des Lochdurchmessers .....	77
3.3.1 Versuchsvorbereitung .....	78
3.3.2 Versuchsdurchführung .....	80
3.3.3 Auswertung der Auszugskraft .....	83
3.3.4 Ermittlung Auszugskraft Schrauben (Serienstand) .....	86
3.3.5. Unterscheidung Zug aus Vollmaterial und Dom .....	89
3.3.6 Einfluss des Kappenmaterials (oder alternativ als 3.4) .....	90
3.4 Vorversuch - Einfluss der Klemmlänge .....	93
3.4.1 Versuchsvorbereitung .....	93
3.4.2 Auswertung der Einpresskraft .....	95
3.4.3 Auswertung der Auszugskraft .....	103
3.4.4 Unterscheidung Zug aus Vollmaterial und Dom .....	107
3.4.5 Einfluss des Kappenmaterials .....	108
3.5 Einfluss der Oberflächenbeschichtung .....	112
3.6 Neudesign des Testblocks .....	116
3.6.1 Festigkeitsberechnung .....	117
3.6.2 Ermittlung statistischer Einflussgrößen.....	119
<b>4. Versuche basierend auf Versuchsplan .....</b>	<b>121</b>
4.1 Aufstellen des Versuchsplans .....	121
4.2 Versuchsvorbereitung .....	125
4.3 Versuchsdurchführung .....	126
4.4 Auswertung Versuchsplan 1 .....	130
4.4.1 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS).....	131
4.4.2 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS).....	133
4.4.3 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP).....	135
4.4.4 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS).....	137
4.4.5 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS).....	139
4.4.6 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP).....	141
4.4.7 Bewertung und Weiterführung der Ergebnisse .....	143
4.5 Auswertung Versuchsplan 2.....	144
4.5.1 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS).....	144
4.5.2 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS).....	146
4.5.3 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP).....	148
4.5.4 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS).....	150
4.5.5 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS).....	152
4.5.6 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP).....	154
4.5.7 Bewertung der Ergebnisse .....	156
4.6 Bestätigungsversuche .....	158
4.6.1 Einfluss der Umgebungstemperatur und -feuchtigkeit .....	158
4.6.2 Optimale Lochdurchmesser in Testblöcken.....	166
4.6.3 Optimale Lochdurchmesser in Serienkappen .....	169
4.6.4 Variation der Kappenfarbe .....	173
4.6.5 Raststifte mit Durchmesser 2,3mm in K12E Serienkappen .....	174
4.6.6 Raststifte mit Durchmesser 2,8mm in K12A TPC Serienkappen .....	175

<b>5. Zusammenfassung</b> .....	176
<b>6. Ausblick</b> .....	177
<b>7. Verzeichnisse</b> .....	179
7.1 Literaturverzeichnis .....	179
7.2 Abbildungsverzeichnis.....	181
7.3 Tabellenverzeichnis.....	186
7.4 Abkürzungsverzeichnis .....	186
7.5 Einheitenverzeichnis .....	187
<b>8. Anhang</b> .....	188



## **Ausschreibung einer Abschlussarbeit**

### **Thema: Alternative kraftschlüssige Verbindung von Gurtschlosskappen**

Das Gurtschloss ist eine wesentliche Komponente des passiven Rückhaltesystems im Fahrzeug. Es nimmt die Steckzunge auf und sorgt mit seinem Verriegelungsmechanismus für den Lastpfad vom Insassen zur Karosserie. Als Bestandteil des Fahrzeuginnenraums (Interieur) werden besonders an die zweiteiligen Gurtschlosskappen erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Optik und Haptik wie auch der Robustheit der Kappenverbindung gegenüber äußere Belastungen gestellt.

Im Rahmen der Entwicklung einer neuer Gurtschlossgeneration werden Kappenschalen nun verschraubt, wofür ein separater Prozessschritt erforderlich ist. Hierfür müssen Betriebsmittel mit der entsprechenden Überwachung (z.B. Drehmoment) angeschafft werden. Der Schraubenkopf ist prozessbedingt im verschraubten Zustand für den Kunden sichtbar. Bei verschiedenen Kundenvorstellungen wurde dies bereits bemängelt. Daher ist die Entwicklung einer alternativen Kappenverbindung unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an die Robustheit mit einer deutlich verbesserten Optik ein strategisches Ziel der Firma Autoliv, um auch weiterhin erfolgreich am Markt zu agieren.

Im Zusammenhang mit dieser Thematik werden im Rahmen der Diplomarbeit folgende Schwerpunkten gesetzt:

- 1. Ermittlung der Einflussgrößen mit Hilfe der Six Sigma Methode (Blockdiagramm, P-Diagramm und Robustheitsmatrix)**
- 2. Erstellung eines Versuchsplans zur Verifizierung der signifikanten Effekte basierend auf einer DoE**
- 3. Durchführung der Versuche inklusive Koordination der entsprechenden Muster mit anschließender Auswertung**

Die Betreuung erfolgt im Rahmen der Abschlussarbeit seitens der Firma Autoliv B.V. & Co. KG im Bereich Entwicklung Gurtschlösser und Höhenversteller durch einen lizenzierten Six Sigma Black Belt.

---

## 1. Aufgabenstellung / Projektbeschreibung

Die vorliegende Masterarbeit hat die Untersuchung zu alternativen Verbindungen für Gurtschlosskappen zum Thema. Die Thematik wird im Rahmen eines Six Sigma Projekts betrachtet, dem ein definierter Ablauf zu Grunde liegt.

Ziel ist es nicht mehrere Varianten gegenüberzustellen und zu bewerten, sondern eine Verbindungsart zu definieren, die eingehend untersucht wird. Diese wird so weit erprobt, dass eine Kombination der signifikanten Einflussparameter gefunden wird, welche die Kappenabzugskräfte maximal werden lässt.

Hauptaufgabe ist die Vorbereitung und Durchführung der Versuche mit ihrer anschließenden Auswertung. Um den Versuchsaufwand zu reduzieren sind vor Versuchsbeginn aber zahlreiche vorbereitende Schritte durchzuführen.

Im ersten Schritt wird der Rahmen des Projekts definiert und Block- und P-Diagramm sowie die Robustheitsmatrix erstellt. In Vorversuchen werden für die Versuchsplanung erforderliche Parameter wie die Standardabweichung bei Kappenabzugsversuchen ermittelt. Anschließend wird ein Versuchsplan mit der Software Minitab aufgestellt und ausgewertet.

Als Basis für dieses Six Sigma Projekts dient das von Autoliv hergestellte K12E-Gurtschloss. Bei diesem Gurtschloss werden die beiden Gehäusehälften miteinander verschraubt. Gesucht wird eine Alternative zur Verschraubung der Gurtschlosskappen, welche die Nachteile der Schraubverbindung eliminiert.

Um eine kostengünstige Lösung zu realisieren und die Versuche mit Serienteilen durchführen zu können soll die Kappengeometrie nicht verändert werden. Ein viel versprechender Ansatz ist der Ersatz der derzeit verwendeten Schrauben durch eingepresste Raststifte. Ob diese Methode eine gute Alternative darstellt wird im Rahmen dieses Projekts untersucht.

---

Der Hauptparameter an dem der Erfolg des Projekts gemessen wird ist die Kappenabzugskraft. Diese unterliegt herstellereigenen Anforderungen, welche von der Schraubverbindung derzeit um 50 Prozent überschritten werden.

Die Stiftverbindung soll nicht nur die Mindestanforderungen erfüllen, sondern die Abzugskraft soll auf vergleichbarem Niveau mit der Schraubverbindung liegen. Ein weiteres Ziel ist es die Nachteile der Anzugsdrehmomentüberwachung und der Möglichkeit der zerstörungsfreien Trennung der Gehäusehälften zu eliminieren.

Wie bei den Schrauben sind die Köpfe der Raststifte sichtbar. Durch ihre glatte Oberfläche fügen sie sich aber besser in die Kappe ein. Somit sind die optischen Defizite im Gegensatz zu verschweißten Kappen durch die zu betrachtende Lösung nicht ganz behoben aber reduziert.

Ein weiterer Nachteil gegenüber der verschweißten Gurtschlosskappen ist, das Beibehalten der zusätzlichen Verbindungselementen, da diese nicht entfallen sondern nur ersetzt werden.

Der Zeitraum für das Erstellen der Masterarbeit ist auf sechs Monate begrenzt, daher ist es wichtig das Projekt zeitlich klar zu strukturieren. Im folgenden Gantt-Diagramm (Bild 1.1) wird der geplante zeitliche Ablauf der Masterarbeit gezeigt.

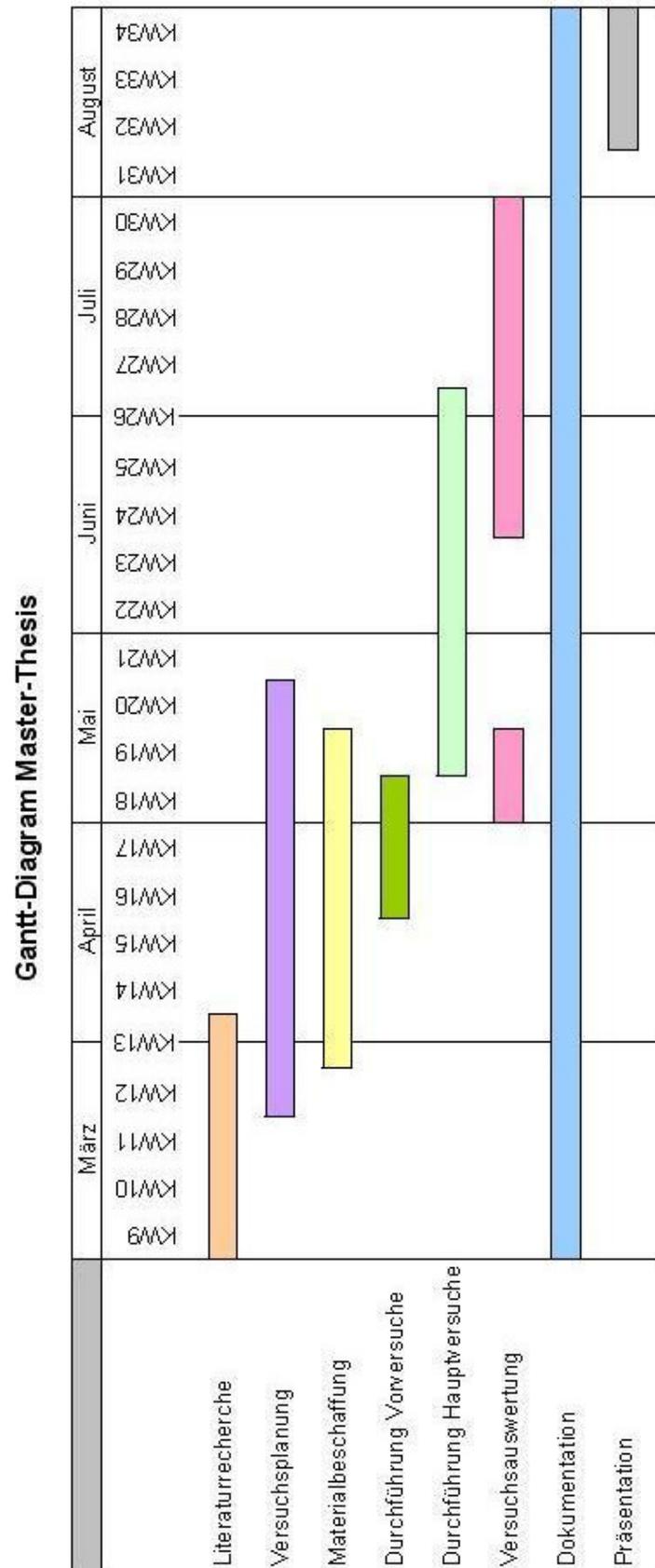


Bild 1.1 Gantt-Diagramm

---

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Fahrzeugsicherheit

#### 2.1.1 Fahrzeugsicherheit allgemein

Zu Beginn der Motorisierung des Individualverkehrs wurde nur wenig für die Sicherheit des Fahrers und seiner Passagiere getan. Bei Geschwindigkeiten von unter 20 km/h und nur sehr wenigen Fahrzeugen auf den Straßen reichte eine mechanische Bremse um das Fahrzeug zum Stillstand zu bekommen. Mit zunehmender Anzahl von Fahrzeugen und auch immer höheren Fahrgeschwindigkeiten wurden die Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit erhöht. In den ersten Jahrzehnten des Automobils beschränkte sich dies allerdings auf Verbesserungen der Bremsanlagen und Fahrwerke.

In den 1950er Jahren begann die Automobilindustrie gezielt die Insassensicherheit in der Fahrzeugentwicklung zu berücksichtigen. So wurden 1959 die ersten Drei-Punkt-Gurte in Fahrzeugen verbaut. Auch die Entwicklung der steifen Fahrgastzelle mit vor- und nachgelagerten Knautschzonen wurde in dieser Zeit zur Serienreife gebracht. Diese beiden Entwicklungen sind wohl die wichtigsten sicherheitsrelevanten Erfindungen jener Zeit.

Das immer größer werdende Sicherheitsbedürfnis der Menschen und die weiterhin stark steigende Anzahl von Kraftfahrzeugen sind bis heute Antreiber die Sicherheit der Fahrzeuge stetig zu verbessern. Neben der Verbesserung der bekannten Systeme wie Knautschzone und Sicherheitsgurt gibt es zahlreiche weitere Entwicklungen wie das Antiblockiersystem (ABS), Sicherheitslenksäulen und Airbags, um nur einige zu nennen. Alle drei Systeme sind aus heutigen Fahrzeugen nicht mehr weg zu denken.

Derzeit liegt der Schwerpunkt darin Fahrerassistenzsysteme zu entwickeln die drohende Kollisionen rechtzeitig erkennen um sie zu vermeiden oder zumindest die Folgen abzumildern. Ein Beispiel hierfür ist das Abstandsradar, das vorausfahrende Fahrzeuge erkennt und mittels aktiven Bremseneingriffs den Sicherheitsabstand hält oder selbstständig eine Notbremsung einleitet.

---

### 2.1.2 Unterscheidung Aktive / Passive Sicherheit

Die Sicherheitssysteme im Fahrzeug werden unterschieden in aktive und passive Sicherheitssysteme. Bis vor wenigen Jahren konnte man diese Systeme klar trennen, aktuell gibt es aber immer mehr Verflechtungen.

Aktive Sicherheitssysteme sollen helfen eine Gefahrensituation zu entschärfen und Kollisionen zu vermeiden. Grundlegende Komponenten wie eine sichere Fahrwerksabstimmung und eine ausreichend dimensionierte Bremsanlage gehören ebenso dazu wie das Antiblockiersystem (ABS), das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) und das oben genannte Abstandsradar.

Als passiv werden die Sicherheitssysteme bezeichnet, die erst im Falle einer Kollision ihre Funktion erfüllen. Hierzu zählen die Knautschzone, Sicherheitslenksäule, gepolsterte Armaturenbrettoberflächen, Sicherheitsgurte, pyrotechnische Gurtstraffer, Airbags, Sitze und Kopfstützen.

Immer häufiger werden bisher passive Systeme mit aktiven Komponenten aufgerüstet und können so nicht mehr in nur eine Kategorie eingeteilt werden. Beispiele hierfür sind die aktive Kopfstütze, die beim Heckaufprall nach vorne springt um den Weg zwischen Kopf und Kopfstütze zu verringern, oder der reversible Gurtstraffer, der bei drohender Kollision den Gurt vorstrafft um den Fahrer in eine optimale Position zu bringen und die Gurtlose zu reduzieren.

### 2.1.3 Sicherheitsgurt

Die Idee den Fahrer mit Hilfe eines Sicherheitsgurtes an das Fahrzeug anzubinden ist schon fast genauso alt wie das Automobil selbst. Bereits im Jahre 1903 wurden Patente für einen Vier- und einen Fünf-Punkt-Gurt angemeldet. Die Sicherheitsgurte konnten sich zu diesem Zeitpunkt aber nicht durchsetzen. Daher gelten die 50er Jahre als Geburtsstunde des Sicherheitsgurtes.

Die ersten Entwicklungen dieser Zeit sind Zwei-Punkt-Gurte. Eine Variante, mit Anbindungspunkten an der oberen B-Säule und dem Kardantunnel ist als Schultergurt ausgelegt. Dies verhindert ein ungebremstes Aufschlagen des Kopfes aufs Lenkrad, birgt aber die Gefahr unter dem Gurt hindurch zu rutschen. (Tucker Torpedo, 1948)

Die zweite Variante ist der Beckengurt mit Anbindung an der unteren B-Säule und dem Kardantunnel. Hier wird das Abtauchen unter den Gurt vermieden, beim Frontalaufprall werden Kopf und Oberkörper aber nicht gehalten und prallen ungebremst auf Lenkrad oder Armaturenbrett. Der Beckengurt wurde ab 1957 bei Mercedes und bei Porsche als Option angeboten.

Der schwedische Automobilhersteller Volvo bringt 1959 einen Drei-Punkt-Gurt auf dem Markt, der die Vorteile der beiden oben genannten Varianten vereint. Da der Sicherheitsgurt zu diesem Zeitpunkt noch nicht über einen Retraktor verfügt, sondern starr ausgelegt ist, wird häufig die mangelnde Bewegungsfreiheit im angegurten Zustand als Argument gegen den Sicherheitsgurt angebracht.

Ende der 1960er Jahre kommt der selbsttätig aufrollende Sicherheitsgurt mit Einhandbedienung auf den Markt. Erst zu diesem Zeitpunkt steigt die Akzeptanz der Fahrzeugbesitzer ihr Fahrzeug mit Sicherheitsgurten auszustatten.

Ab dem 1. Januar 1974 sind die Hersteller verpflichtet ihre Neuwagen mit Sicherheitsgurten auf den vorderen Sitzen auszustatten. Ab dem 1. Mai 1979 gilt die Ausstattungspflicht auch für die Rücksitze.

Der Drei-Punkt-Gurt wird bis heute von jedem Fahrzeughersteller in Serienfahrzeugen verwendet. Nur in Kleinseriensportwagen und im Rennsport kommen Sicherheitsgurte mit mehr als drei Anbindungspunkten zum Einsatz. Bild 2.1 zeigt die Komponenten eines Drei-Punkt-Gurtes wie sie in heutigen Fahrzeugen verbaut sind.

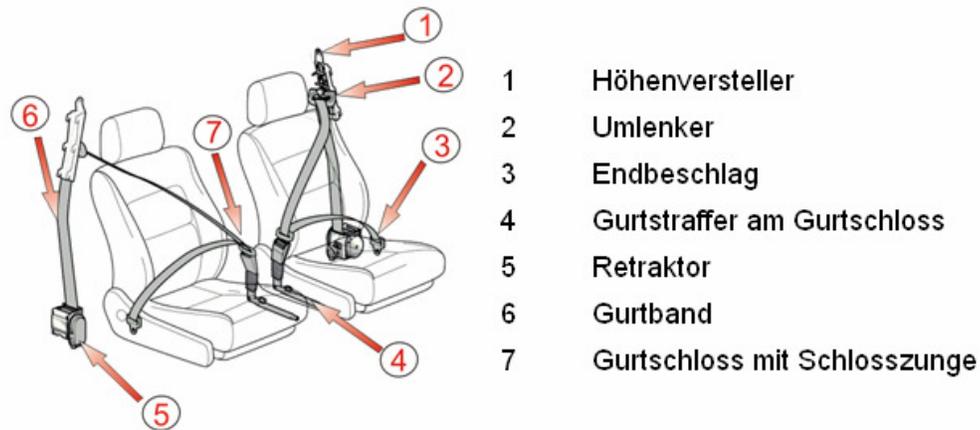


Bild 2.1 Komponenten des Drei-Punkt-Gurtes [7]

Die Komponenten des Sicherheitsgurtes werden im Laufe der Jahre stetig weiter entwickelt:

- Damit der Sicherheitsgurt auch bei sehr großen und sehr kleinen Insassen optimal über die Schulter geführt wird verfügen viele Fahrzeuge seit längerem über eine Höhenverstellung des Gurtumlenkungspunkts an der oberen B-Säule.
- Pyrotechnische Gurtstraffer ziehen das Gurtschloss im Falle einer Kollision in wenigen Millisekunden nach unten um die Gurtlose zu verringern Dieser Vorgang ist irreversibel, dass heißt die Gurtstraffer müssen im Falle einer Reparatur des Fahrzeugs erneuert werden.
- Gurtkraftbegrenzer begrenzen, wie der Name schon sagt, im Falle einer Kollision die Gurtkraft damit die auf den Torso wirkenden Kräfte nicht so hoch werden, das hierdurch Verletzungen entstehen.
- Der aktive Gurtstraffer ist ein reversibles System und strafft den Gurt schon vor der Kollision in der so genannten Pre-Crash-Phase. Der aktive Gurtstraffer kann daher nur zum Einsatz kommen wenn das Fahrzeug über eine entsprechende Gefahrenerkennungssensorik verfügt.

### 2.1.4 Gurtschloss

Das Gurtschloss ist ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitsgurtes. Es ist mit der Karosserie verschraubt und bildet damit einen der drei Anbindungspunkte des Sicherheitsgurts. Die Hauptfunktion ist das Trennen des Gurtsystems um das An- und Abschnallen zu ermöglichen. Hierbei muss es zahlreiche Eigenschaften aufweisen die für die fehlerfreie Funktion maßgeblich sind:

Für den Insassen muss eindeutig zu erkennen sein, ob das Gurtschloss verriegelt ist. Eine akustische Rückmeldung durch ein deutlich hörbares Einrastgeräusch ist auch heute noch Stand der Technik. Zusätzlich wird in vielen Fahrzeugen über eine Belegungserkennung des Sitzes und der Stellung eines in das Gurtschloss integrierten Schalters überprüft, ob sich die Insassen angegurtet haben. Fehlverhalten wird über eine Kontrollleuchte oder ein akustisches Warnsignal angezeigt.

Es muss ausgeschlossen werden, dass der Insasse das Gurtschloss zufällig oder unwissentlich entriegelt und sich somit in Gefahr begibt. Ursache hierfür könnte zum Beispiel Jackentascheninhalt sein, der auf das Gurtschloss drückt. Daher ist eine Mindestpresskraft erforderlich, die auf die Drucktaste des Gurtschlusses aufgebracht werden muss um das Schloss zu entriegeln.

Das Gesamtsystem Gurtschloss ist nur so stark wie sein schwächstes Glied. Daher muss die Verbindung von Gurtschloss und Schlosszunge die gleichen Zugkräfte aufnehmen können, wie ein durchgängiger Sicherheitsgurt.

Während einer Kollision wird der Gurt auf Zug belastet. In dieser Situation darf es nicht möglich sein, dass Gurtschloss zu entriegeln. Andernfalls könnte der Insasse durch die auf ihn einwirkenden Kräfte oder ein umher fliegender Gegenstand die Verbindung ungewollt lösen. Der Verriegelungsmechanismus ist daher so ausgelegt, dass die Schlosszunge beim Betätigen der Drucktaste leicht in das Schloss hineingezogen wird um die Verriegelung zu trennen. Ist der Gurt auf Zug belastet ist das Hineinziehen der Zunge ins Schloss nicht möglich.

Nach einer Kollision muss sich das Gurtschloss durch Betätigen der Drucktaste öffnen lassen, damit sich der Insasse selbstständig aus dem Fahrzeug befreien kann. Das

heißt auch, dass die Drucktaste nach erfolgter pyrotechnischer Straffung und daraus resultierender Absenkung des Gurtschlusses noch erreichbar sein muss.

Um eine fehlerfreie Funktion zu gewährleisten sollten die Gehäusehälften so miteinander verbunden werden, dass eine Öffnung des Gehäuses nicht zerstörungsfrei möglich ist um Manipulationen oder unsachgemäße Reparaturversuche am Gurtschloss zu verhindern.

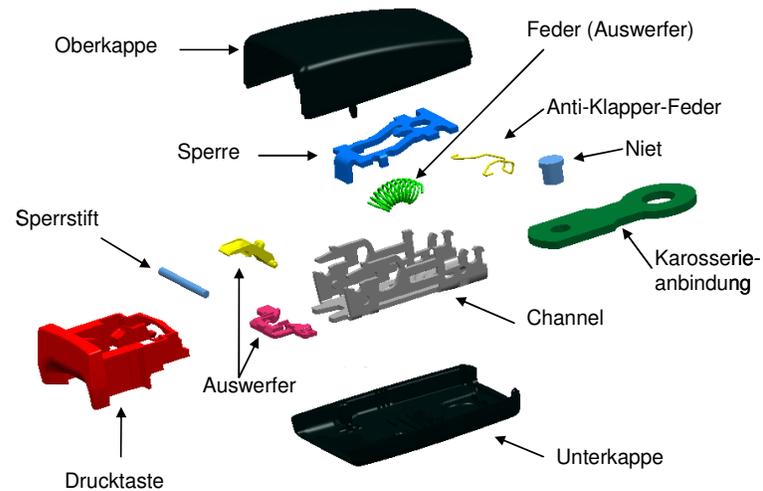


Bild 2.2 Komponenten des Gurtschlusses [7]

---

### **2.1.5 Verbindung von Gurtschlosskappen**

Aktuell gibt es bei Autoliv zwei Verfahren zur Verbindung von Gurtschlosskappen sowie einteilige Schlosskappen. Die einteiligen Kappen haben nur noch eine geringe Verbreitung und werden überwiegend im asiatischen Raum eingesetzt.

Der größte Teil der Gurtschlosskappen wird derzeit mittels Ultraschallschweißen verbunden. Eine neuere Entwicklung sind Gurtschlosskappen, die vorne ineinander gehakt und hinten verschraubt werden. Alle drei Verfahren haben Vor- und Nachteile die im Folgenden aufgeführt sind:

#### **Vor- und Nachteile einteiliger Gurtschlosskappen**

Einteilige Kappen haben den Vorteil, dass sie ohne Verbindungselemente oder einen Verbindungsprozess auskommen. Allerdings erfordert das Herstellwerkzeug der Kappen mehrere Schieber, da die Rastnasen, die später die Mechanik aufnehmen hinterschnittig sind. Hieraus resultieren höhere Stückkosten pro Kappe.

Das Einfädeln der Schlossmechanik von oben in die Kappe erfordert hohe Präzision und geringe Geschwindigkeiten. Weiterhin ist die Nutzung dieser Kappen nur möglich, wenn nur wenige Zusatzfunktionen in das Gurtschloss integriert sind.

Wird ein gekröpfter Halter benötigt, muss dieser so ausgelegt sein, dass er sich durch die Schlosskappe hindurch führen lässt. Der Stecker für den Gurtschlossschalter muss ebenfalls so dimensioniert werden, dass er durch das Gehäuse durchgeführt werden kann.

An den Vordersitzen sind nahezu alle verbauten Gurtschlösser an pyrotechnische Gurtstraffern angebunden. Um die Zugmechanik abzudecken werden Faltenbälge verwendet, die bei zweiteiligen Kappen in die Kappen eingelegt werden. Dies ist bei einteiligen Kappen nur eingeschränkt möglich.

Da die einteiligen Kappen in vielen Anwendungsbereichen nur eingeschränkt nutzbar sind, werden sie im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt.

---

### **Vor- und Nachteile ultraschallgeschweißter Gurtschlosskappen**

Seit langer Zeit wird der überwiegende Teil der Gurtschlosskappen ultraschallverschweißt. Dieses Verfahren hat viele Vorteile, so dass es lange Jahre als das effizienteste Verfahren galt. Allerdings steigen in den letzten Jahren die Anforderungen an die Separationskraft der Kappen immer weiter an. Die aktuellen Anforderungen von Kappenabzugskräften oberhalb 250N können mit verschweißten Kappen im aktuellen Design nicht erfüllt werden.

Die Anforderungen werden immer weiter erhöht, da eine Fehlbelastung zum Ablösen der Kappen führen kann. Ein Beispiel hierfür ist eine schwere Kiste auf der Rückbank die auf das Gurtschloss drückt. Auch wenn die Funktion der Schlossmechanik auch ohne Kappen gewährleistet ist kann der Sperrstift, der durch die Kappen in Position gehalten wird, verloren gehen und somit zum Versagen des Gurtschlusses führen.

Der Fügeprozess ist im Vergleich zum Schrauben schneller, allerdings ist man bei der Materialauswahl eingeschränkt. ABS Kunststoffe lassen sich sehr gut ultraschallverschweißen, die ebenfalls verwendeten PP Materialien eignen sich nicht.

Ein weiterer großer Vorteil ist der Verzicht auf zusätzliche Verbindungselemente. Dies spart zum einen Kosten für das Bauteil und die Lagerung und zum anderen an der Fertigungslinie, da keine Zuführung für die Verbindungselemente vorgesehen werden muss. Da die Schweißvorrichtung allerdings teurer ist als eine Schraubvorrichtung führt dies dazu, dass die Kosten für beide Prozesse als gleichwertig anzusehen sind.

Viele Parameter haben Einfluss auf die Güte der Verschweißung. Zur Optimierung der Prozessparameter gab es bereits zahlreiche Untersuchungen, allerdings ohne signifikante Verbesserungen. Um den Schweißprozess zu kontrollieren ist auf Grund der Fülle der Einflussparameter ein großes Fachwissen erforderlich.

Für die Kundenakzeptanz ist die Optik des Gurtschlusses sehr wichtig. Im Gegensatz zum verschraubten Gurtschloss gibt es keine sichtbaren Verbindungselemente. Allerdings kann beim Verschweißen durch Vibrationen und den Kontakt zwischen Gurtschlosskappe und ihrer Fixierung die Oberfläche beschädigt werden.

Um unsachgemäße Reparaturen oder Manipulationen am Gurtschloss auszuschließen ist es wichtig, dass die Kappen sich nicht zerstörungsfrei trennen lassen. Dies ist bei geschweißten Gurtschlosskappen gegeben.

### **Vor- und Nachteile verschraubter Gurtschlosskappen**

Um den gestiegenen Anforderungen an die Kappenabzugskraft gerecht zu werden, galt es vor einigen Jahren eine alternativen Lösung zur Verbindung der Gurtschlosskappen zu finden.

Im asiatischen Raum werden von Autoliv überwiegend Gurtschlosskappen aus PP-Material verwendet. Da sich diese wie oben beschrieben nicht ultraschallverschweißen lassen, werden sie schon seit längerem verschraubt. Dieser Ansatz wurde für die in Europa verwendeten ABS-Kappen übernommen.

Die Schraubverbindung erreicht Kappenabzugskräfte von 350 – 400N, sodass die aktuellen Kundenanforderungen deutlich überschritten werden.

Aus diesem Ansatz ergibt sich ein großer Vorteil der Schraubverbindung. Man benötigt nicht mehr zwei verschiedene Fügeprozesse für verschiedene Materialien, sondern man kann das Verfahren standardisieren.

Das Auflegen der Kappen aufeinander erfolgt bei den verschweißten Kappen in z-Richtung. Bei den verschraubten Schlosskappen werden die Kappen zunächst vorn ineinander gehakt und anschließend hinten mittels einer Drehbewegung zusammengeführt. Diese Kinematik ist bei der Automatisierung aufwendiger umzusetzen.

Derzeit werden die Schrauben nacheinander in die Kappen eingeschraubt. Hieraus ergeben sich höhere Zykluszeiten als beim Schweißen. Durch einen geänderten Schrauber, der beide Schrauben gleichzeitig eindreht, kann dieser Nachteil eliminiert werden. Allerdings steigen durch den zweiten Schraubkopf die Kosten für die Schraubvorrichtung.

---

Da die Schrauben zusätzliche Bauteile sind erzeugen sie auch Kosten. Neben den Material-, und Lagerungskosten ist eine automatische Schraubenzuführung erforderlich.

Die Prozesssicherheit liegt beim Verschrauben deutlich höher als beim Schweißprozess. Es werden lediglich das Anzugsdrehmoment und der Drehwinkel der Schraube überwacht. Hieraus resultieren weniger Ausschuss und eine höhere Kundenzufriedenheit.

Werden die Kappen nicht ordnungsgemäß verschraubt, so ist dies oftmals schon durch eine optische Prüfung detektierbar. Eine Prüfung ob die Verschweißung von hoher Güte ist, oder ob die Kappen nur leicht zusammenkleben ist nicht zerstörungsfrei möglich.

Vom Kunden werden die sichtbaren Schraubenköpfe bemängelt. Insbesondere bei Kappen, die nicht schwarz sind treten die schwarz beschichteten Schrauben optisch hervor. Dies führt soweit, dass einzelne Fahrzeughersteller die verschraubten Gurt-schlosskappen nicht verbauen wollen.

Die erforderlichen Schraubdome schränken den Bauraum im hinteren Bereich der Kappen ein. Bei gleichen Außenabmaßen steht weniger Bauraum im inneren der Kappen zur Verfügung. Die Anbindung des Faltenbalgs für die Schlossstraffermechanik ist durch die Dome schwieriger, da bedingt durch die Dome keine Kante vorhanden ist, über die der Faltenbalg gestülpt werden kann.

### 2.1.6 Alternative Verbindung von Gurtschlosskappen

Um zwei Gehäusehälften miteinander zu verbinden gibt es neben den bisher verwendeten Methoden Ultraschallverschweißen und Verschrauben noch weitere Alternativen.

In der Automobilindustrie setzt sich das Kleben als Verbindungstechnik immer weiter durch. Vorteil ist die unsichtbare Verbindungsstelle sowie der Verzicht auf zusätzliche Verbindungselemente. Bisherige Versuche haben ergeben, dass die erreichbaren Kappenabzugskräfte auf Grund der nur geringen Klebeflächen aber deutlich geringer sind als bei verschraubten Gurtschlosskappen.

Da die bisherigen Voruntersuchungen bezüglich des Klebens nicht sehr viel versprechend ausgefallen sind, wird diese Verbindungstechnik in diesem Projekt nicht betrachtet.

Eine interessante Alternative ist das Ersetzen der Schrauben durch andere Verbindungselemente wie zum Beispiel Nieten, Rast- oder Federstifte. Ziel muss es hierbei sein vergleichbare mechanische Eigenschaften bei gleichen oder geringeren Kosten zu realisieren.

Zweiteilige Rastsysteme, die eine Aufnahme im Sackloch erfordern, in die der Verbindungsstift eingerastet wird sind im Prozess zu aufwendig und somit zu teuer. Das Prinzip ist vergleichbar mit einem Druckknopf und daher ist die Verbindung ohne zusätzliche Fixierung ohne großen Kraftaufwand wieder lösbar. Daher kommen diese Verbindungselemente ebenfalls nicht in Frage.

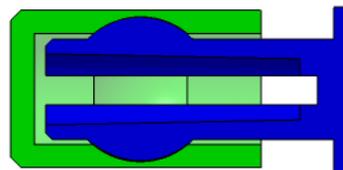


Bild 2.3 Zweiteiliger Verbinder

Niete kommen überwiegend bei Durchgangsbohrungen zum Einsatz. Um Niete in Sacklöchern sicher zu fixieren, sollte die Bohrung hinterschnittig ausgelegt sein, damit der Niet nicht herausgezogen werden kann.

Da die Löcher in die Gurtschlosskappen während des Spritzverfahrens entstehen, können sie mit dem verwendeten Werkzeug nicht hinterschnittig ausgelegt sein. Für die in Bild 2.4 markierte Verformung, die für die sichere Verbindung ausschlaggebend ist, ist in einem Sackloch kein Raum vorhanden.



Bild 2.4 Nietverbindung

Spreizstiften aus Kunststoff weisen zu geringe Klemmkräfte auf, sodass im Versuch nur geringe Kappenabzugskräfte erreicht wurden. Daher stellen auch diese kostengünstigen Verbindungselemente keine Alternative zur Verschraubung dar.

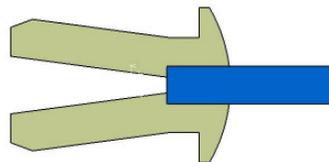


Bild 2.5 Kunststoff-Spreizstift

Viel versprechend erscheint die Verwendung von metallenen Raststiften mit einem Verzahnungsprofil ähnlich einem Gewinde. Der Hersteller verspricht vergleichbare mechanische Eigenschaften wie die einer Schraubverbindung bei deutlich reduzierter Montagezeit.

In diesem Projekt wird daher untersucht, ob ein eingepresster Raststift eine sinnvolle Alternative zur derzeitig verwendeten Serienschraube darstellt. Verwendet werden Raststifte mit der Bezeichnung ATP-TriPress der Firma Arnold Umformtechnik. Diese stehen im Maß 2,8x10mm zur Verfügung.



Bild 2.6 ATP-TriPress Raststift

Der Hersteller bietet diese Raststifte in zahlreichen Längen und Durchmessern sowie verschiedenen Flankenprofilen an. Auch eine individuell angepasste Lösung ist problemlos möglich. Da bisher noch keine Erfahrungswerte in der Verwendung der Raststifte vorhanden sind, wird im Rahmen der Vorversuche zunächst auf Raststifte zurückgegriffen, die bereits für andere Anwendungen serienmäßig gefertigt werden. Eine spätere Individualisierung der Stifte auf die Anforderungen im Gurtschloss ist auf Basis der Versuchsergebnisse denkbar.

Je nach Anwendungsgebiet wird der Raststift mit axial (achspareller Rändel) oder radial (Sperrillen) verlaufendem Flankenprofil verwendet. Auch Kombinationen beider Profile werden angeboten. Der achsparelle Rändel kommt zum Einsatz wenn eine hohe Verdrehsicherheit erforderlich ist. Die Sperrillen bei hoher Zugbelastung.

Bei der Verwendung im Gurtschloss ist die Verdrehsicherheit vernachlässigbar, einzig die ertragbare Zugbelastung ist entscheidend. Daher entscheiden wir uns für einen Raststift mit ausschließlich Sperrillenprofil.



Bild 2.7 ATP-TriPress Flankenprofile [18]

Nachteil der verfügbaren Raststifte ist ihr Durchmesser von 2,8mm. Dies erfordert einen Lochdurchmesser, der nur geringfügig kleiner ist. Da die Löcher in den Serienkappen einen Durchmesser von 2,1mm aufweisen müssen sie für die Versuche aufgeweitet werden, was zur Reduzierung der Wandstärke des Schraubdoms führt.

Die Serienkappen der verschraubten Gurtschlösser sollen wenn möglich unverändert übernommen werden. Daher ist es sinnvoll auch Raststifte zu untersuchen, die einen geringeren Durchmesser aufweisen und somit in die vorhandenen 2,1mm Durchmesser Löcher eingepresst werden können. Diese müssen aber als individuelle Prototypenbauteile angefertigt werden.

Um eine teure Prototypenfertigung zu vermeiden werden zunächst Vorversuche mit den verfügbaren Raststiften durchgeführt. Erst nachdem diese erfolgreich durchgeführt wurden, wird die Fertigung beauftragt. Somit stehen für die Hauptversuche Raststifte in zwei verschiedenen Durchmessern zur Verfügung.

Der Hersteller der Raststifte verspricht eine Vereinfachung der Montage und Reduzierung der Montagezeit um bis zu 75 Prozent. Dies würde zu einer Erhöhung der Taktzeit und somit zur Reduzierung der Fertigungskosten führen. Ob sich dies in der Praxis bestätigt, muss aber erst in Montageversuchen untersucht werden.

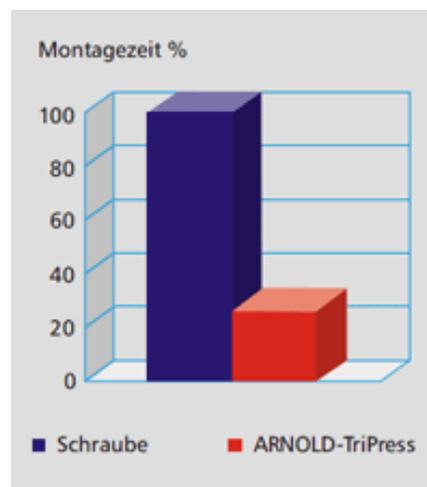


Bild 2.8 Montagezeit ATP-TriPress Raststift [18]

## 2.2 Six Sigma Methodik

Six Sigma ( $6\sigma$ ) ist ein statistisches Verfahren zur Verbesserung von Prozessen und Produkten. Kernziel ist es frühzeitig in der Entwicklung mögliche Fehlerquellen zu erkennen und diese zu eliminieren. Je früher ein Fehler erkannt wird, desto geringer sind die daraus resultierenden Folgekosten. (s. Bild 2.9)



Bild 2.9 Diagramm „Änderungskosten über Entwicklungszeit“

Im Gegensatz zu vielen anderen Prozessverbesserungsmethoden liegt Six Sigma ein mathematischer Ansatz zu Grunde. Es wird davon ausgegangen, dass sich jeder Prozess als mathematische Funktion, die von  $n$  Einflussgrößen abhängig ist, beschreiben lässt.

Um Six Sigma langfristig erfolgreich einzusetzen ist es erforderlich nicht nur einzelne Projekte mit dieser Methodik durchzuführen, sondern Six Sigma zur Unternehmensphilosophie zu erklären. Hierbei ist es wichtig dass Six Sigma in allen Entscheidungshierarchien des Unternehmens unterstützt wird.

Die Six Sigma Methodik wurde ursprünglich in den USA entwickelt und erstmals bei Motorola angewandt. Der Durchbruch in der Industrie gelang in den 1990er Jahren nachdem das Potenzial der Six Sigma Methode bei General Electric erfolgreich genutzt

wurde. Inzwischen wird Six Sigma von zahlreichen Großunternehmen angewendet. Viele verlangen von ihren Zulieferern Nachweise, dass auch ihrer Projektentwicklung die Six Sigma Methode zu Grunde liegt.

Im Folgenden wird die Untergliederung der Six Sigma Methode aufgezeigt und erklärt wie sie sich auf den Entwicklungsprozess anwenden lässt. Im weiteren Verlauf werden ihre Werkzeuge dann an der Thematik dieser Masterarbeit erläutert.

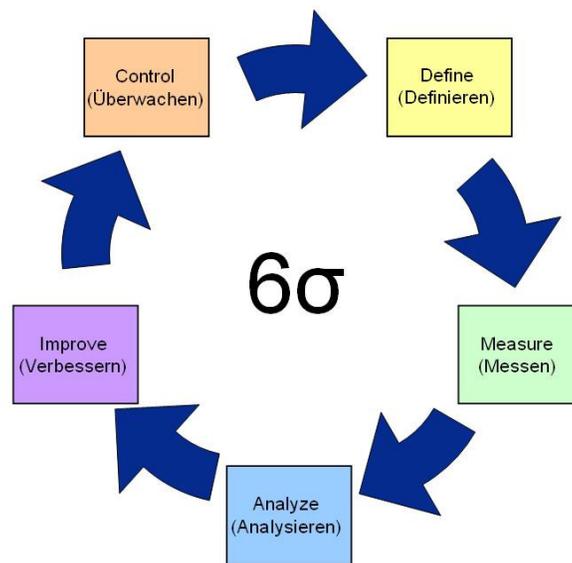


Bild 2.10 Phasen des Six Sigma Prozesses

Six Sigma unterteilt sich in 5 Projektphasen, welche nacheinander bearbeitet werden. Die einzelnen Phasen definieren sich folgend:

**Define:** Die Problemstellung wird eindeutig identifiziert. Hierbei ist es wichtig die Zielsetzung und den Umfang des Projekts klar zu definieren. Wichtig ist eine sorgfältige Dokumentation um Irritationen im späteren Projektverlauf zu vermeiden.

**Measure:** Alle aktuellen relevanten Prozessgrößen werden ermittelt.

---

Analyse: Die in der zweiten Phase ermittelten Prozessgrößen werden ausgewertet. Ziel ist es die Problemursachen zu identifizieren.

Improve: Verbesserungsmaßnahmen werden ausgewählt und in den Prozess eingebracht.

Control: Der verbesserte Prozess wird überwacht und bewertet. Ist das Projektziel erreicht erfolgt der Projektabschluss. Andernfalls schließt sich der Kreis und das Projekt wird in der „Define“-Phase überarbeitet.

Auch in dieser Phase ist die Dokumentation der Ergebnisse wichtig, um für folgende Projekte zu lernen (lessons learnt)

### 2.2.1 Projektplan

Der Projektplan gibt Übersicht über das Projekt. Den Projektplan auszufüllen ist der erste Schritt beim Beginn eines neuen Six Sigma Projekts und definiert das Projekt näher. Der Projektplan dient dem Projektteam als Leitfaden. Nur die Inhalte, welche hier hinterlegt sind, müssen vom Projektteam berücksichtigt werden. Dies hilft insbesondere dann, wenn es im Verlauf des Projekts Fragen über die Vorgehensweise aufgeworfen werden, das Projektziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Der **Kopf des Projektplans** beinhaltet den Namen und die Nummer des Projekts sowie den Starttermin. Weiterhin ist hier eingetragen wer die Projektverantwortlichen und das Projektteam sind.

Im Bereich **Business Case** wird kurz und knapp dargestellt, warum das Projekt jetzt durchgeführt werden sollte und welche Verbesserungen oder Innovationen erzielt werden sollen.

In der Kategorie **SMART** (*steht für: spezifisch – messbar – aktiv beeinflussbar – relevant – terminiert*) sollen die Ziele konkret formuliert werden. Die gesteckten Ziele sollten erreichbar sein.

---

Der Abschnitt **Project Scope** definiert den Geltungsbereich des Projekts. Der Geltungsbereich wird in der Regel in einer separaten **Ist / Ist nicht Tabelle** definiert. Hierin wird eingetragen was Bestandteil des Projekts ist und was nicht. Insbesondere die Abgrenzung was nicht Bestandteil des Projekts ist, kann vermeiden, dass sich das Projekt in seinem Verlauf aufbläht und somit nicht zügig zum Abschluss geführt werden kann.

In den **Key Metrics** wird mindestens ein messbarer Indikator für die Projektleistung definiert. Dies kann zum Beispiel eine Reduzierung von Produktionsfehlern um 10% sein oder eine vorher definierte Mindestkraft die eingehalten werden soll.

In **Operational Definition** wird hinterlegt, wie die Daten aus der Key Metric erfasst werden. Ein Beispiel ist die Klärung welches Prüfverfahren für die Messung verwendet wird.

Weiterer Bestandteil des Projektplans sind die Angaben über die potentiellen Einsparungen, differenziert in einmalige und jährlich wiederkehrende Einsparungen, und wichtige Meilensteine des Projekts.

### 2.2.2 Blockdiagramm

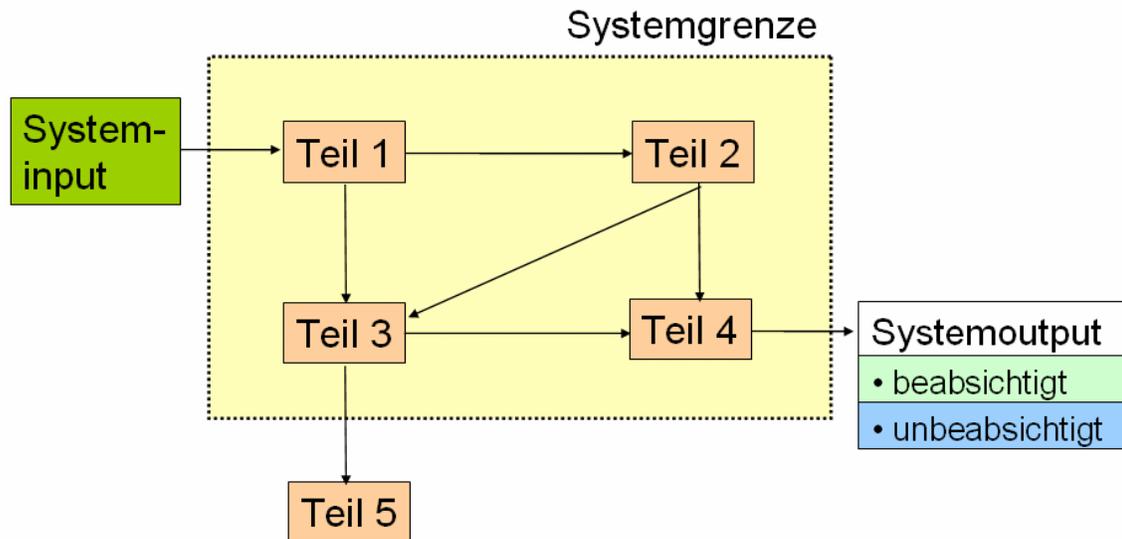


Bild 2.11 Beispiel Blockdiagramm [5]

Das Blockdiagramm dient zur grafischen Darstellung technischer Zusammenhänge und zur Abgrenzung des Systems zu Nachbarsystemen. Hierdurch können kritische Schnittstellen verschiedener Systeme erkannt werden.

Alle Komponenten die sich gegenseitig beeinflussen werden mit Pfeilen miteinander verbunden unabhängig davon, ob sie innerhalb oder außerhalb der Systemgrenze liegen. Zur besseren Unterscheidung werden verschiedenfarbige Pfeile für z. B. mechanische Verbindung und Energieübertragung verwendet.

Das Definieren der Systemgrenze ist ein wichtiger Punkt. Hier ist es oft im Ermessen des Projektteams, ob einzelne Komponenten noch zum System gehören oder nicht betrachtet werden sollen. Eine eindeutige Lösung gibt es hier nicht.

Alles was über die Systemgrenze in das System hinein oder heraus gelangt wird als Systeminput bzw. -output mit Pfeilen angetragen.

### 2.2.3 Parameter-Diagramm

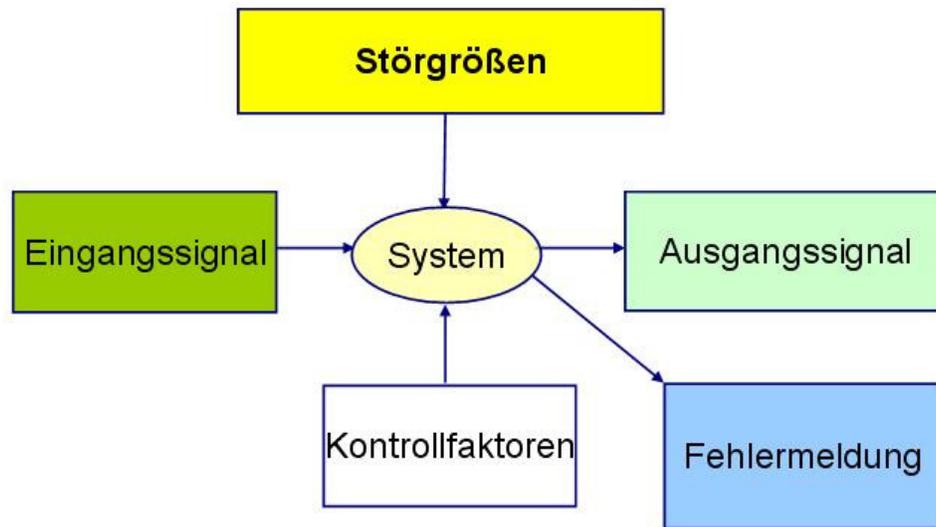


Bild 2.12 Beispiel Parameter-Diagramm [5]

Die **Eingangssignale** werden aus dem Blockdiagramm übernommen. Diese sind vom Anwender direkt beeinflussbar. Dies kann zum Beispiel die aufbrachte Kraft oder die angelegte Spannung sein.

Die **Kontrollfaktoren** sind die Design-Variablen die der Entwickler in der Entwicklungsphase ändern kann. (z.B. Materialstärke)

Die **Störgrößen** sind Einflussfaktoren, auf die der Entwickler während der Entwicklung keinen Einfluss hat. Es muss aber unterscheiden werden in innere Störgrößen wie Fehler durch zu große Fertigungstoleranzen oder Materialalterung, die durch höhere Anforderungen an die Fertigung oder andere Materialwahl beeinflussbar sind und äußere Störgrößen wie den Kundengebrauch oder Umwelteinflüsse.

Das **Ausgangssignal** ist die gewünschte Ausgabe des Systems. Dies kann zum Beispiel eine Mindestabzugskraft oder ein Drehmoment sein.

**Fehlermeldungen** sind alle die Ausgaben des Systems die vom Entwickler nicht gewollt sind. Dies kann von Reibungsverlusten oder Abwärme bis hin zum Defekt des Bauteils vieles sein.

### 2.2.4 Robustheitsmatrix

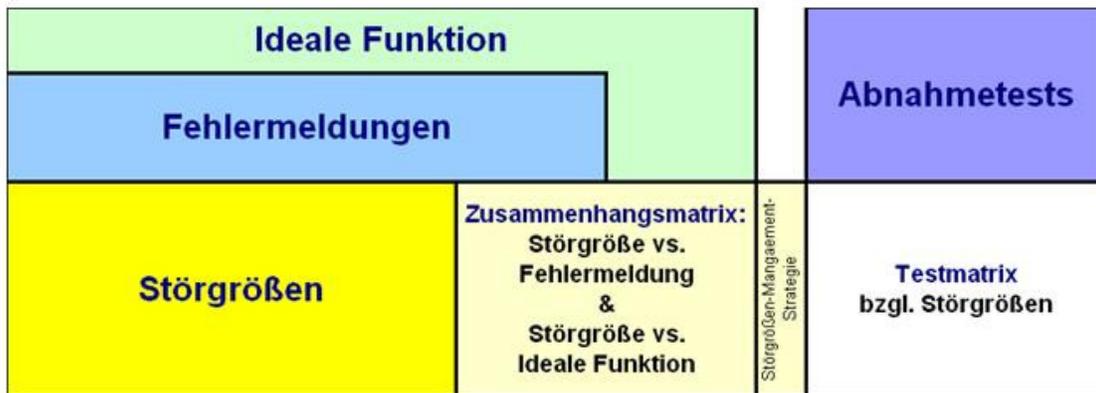


Bild 2.13 Beispiel Robustheitsmatrix [5]

Die Robustheitsmatrix ist die Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Störfaktoren und den Fehlermeldungen sowie der idealen Funktionen.

Zunächst werden die Störgrößen, die Fehlermeldungen und die idealen Funktionen in die entsprechenden Felder eingetragen. Anschließend werden in der Zusammenhangsmatrix die Kästchen angekreuzt bei denen die entsprechende Störgröße einen Einfluss auf die Fehlermeldung bzw. die ideale Funktion hat.

Im Bereich Abnahmetests sind die Testverfahren einzutragen mit denen die Störgrößen simuliert werden können. Jede Störgröße muss mit mindestens einem Test abgedeckt sein. Ideal wäre es wenn jeder Test alle Störgrößen simulieren könnte.

Wird ein Test durchgeführt, wird geprüft welche Störgrößen berücksichtigt werden und wie sie die Funktion beeinflussen. Durch dieses Testverfahren können Fehler schon früh in der Entwicklung erkannt und noch abgestellt werden.

## 2.3 Statistische Versuchsplanung

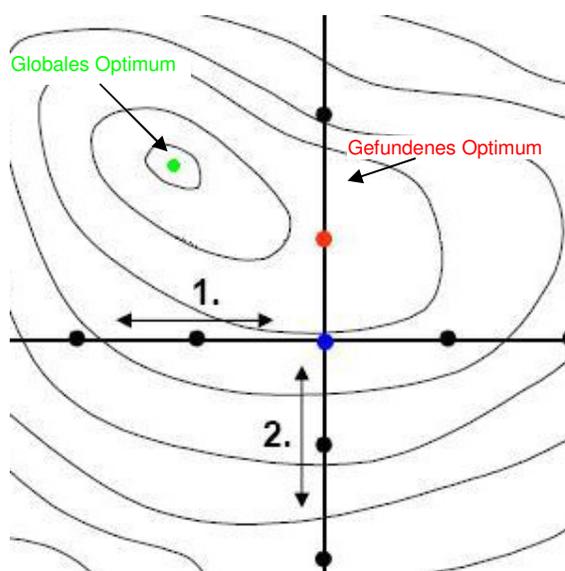
Begriffsdefinition Statistische Versuchsplanung / Design of Experiments (DoE) aus [9]:

*„Arbeitseffiziente Methodik zur systematischen Erarbeitung von Versuchsplänen, deren Abarbeitung und quantitativen Auswertung mit dem Ziel der Modellbildung und/oder der gewünschten Beeinflussung der Zielgrößen (maximal, minimal, innerhalb einer bestimmten Bandbreite, robust gegen Störeinflüsse,...) bezüglich der Funktionsweise eines Produktes oder Prozesses.“*

Die Funktion eines Bauteils hängt in der Regel von mehreren Faktoren ab. Diese können die Funktion direkt oder über Wechselwirkung mit anderen Faktoren beeinflussen.

In der klassischen Versuchsmethodik wird nur ein Parameter zurzeit variiert. Hieraus ergibt sich der Einfluss dieses Parameters auf die Funktion. Nicht berücksichtigt wird hier allerdings die mögliche Wechselwirkung zwischen diesem Faktor und den übrigen Faktoren.

An einem einfachen zweidimensionalen Beispiel wird diese Problematik aufgezeigt:



### Beispiel:

Zunächst wird nur der x-Wert variiert, bis sein Maximum (blauer Punkt) gefunden ist. Anschließend wird von diesem Punkt ausgehend der y-Wert verändert bis er sein Maximum erreicht (roter Punkt). Dieser Punkt wird bei dieser Form der Versuchsauswertung als Optimum erkannt. Das globale Maximum liegt allerdings an anderer Stelle (grüner Punkt), da es eine Wechselwirkung zwischen den beiden Variablen gibt.

Bild 2.14 Varianz nur eines Faktors [10]

Um auch die Wechselwirkung zwischen den Einflussgrößen zu erkennen, und um das globale Optimum zu finden, müssen die verschiedenen Faktoren überlagert werden. Hierzu wird ein Versuchsplan aufgestellt, der alle Kombinationsmöglichkeiten enthält.

Die Faktoren werden nach ihrer Art unterscheiden. Eine Aufstellung der möglichen Arten mit jeweiligem Beispiel ist in Bild 2.15 dargestellt.

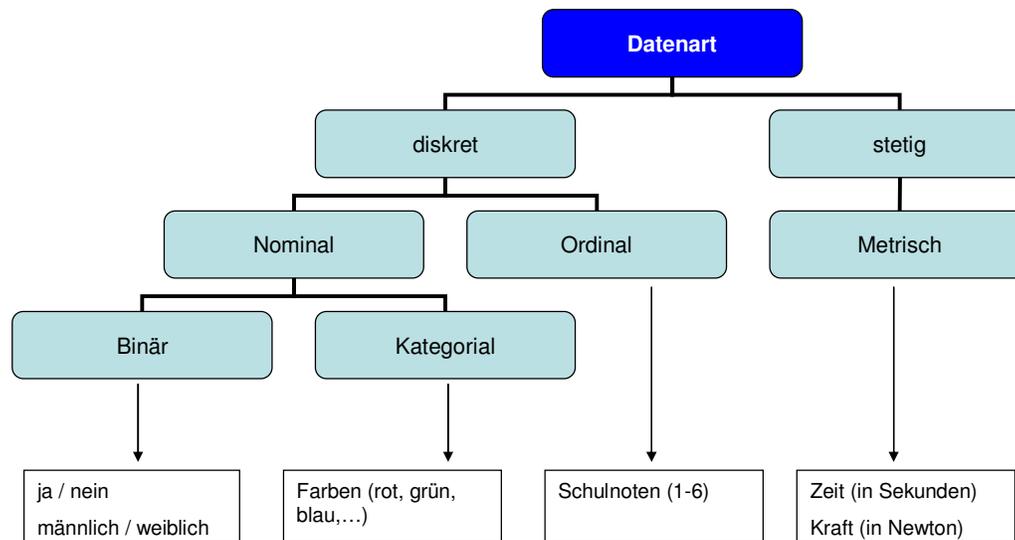


Bild 2.15 Aufteilung der möglichen Datenarten

Nur stetigen Daten können durch eine Funktion ausgedrückt werden und somit im Versuchsplan durch zusätzliche Zentral- und Sternpunkte dargestellt werden. Diskrete Daten können nur als Eckpunkte dargestellt werden, da keine Aussage zum Verlauf zwischen beiden Punkten getroffen werden kann. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten sollte die Anzahl an diskreten Faktoren möglichst gering sein.

Das Aufstellen von Versuchsplänen, um mit möglichst geringem Aufwand möglichst viel über die Einflüsse und die Wechselwirkungen der Einflussparameter zu erfahren, wird als **statistische Versuchsplanung** oder **Design of Experiment (DoE)** bezeichnet.

Sollen alle Einflussgrößen miteinander überlagert werden spricht man von einem **vollfaktoriellen Versuchsplan**. Vorteil dieser Methode ist, dass man alle Einflüsse und alle Wechselwirkungen erkennen kann. Diese Vorgehensweise ist aber nur bei wenigen

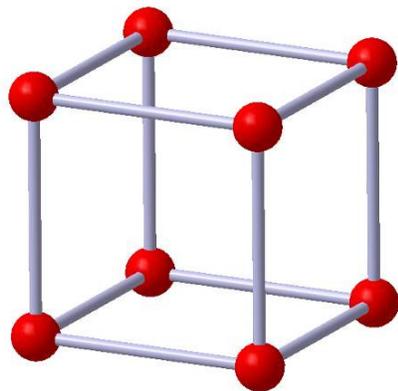
Parametern und wenigen Stufen der Parameter sinnvoll, da sich die Anzahl der benötigten Versuche aus folgender Funktion ergibt:

$$\text{Anzahl Versuche} = \text{Stufen}^{\text{Anzahl Parameter}} \quad (2.1)$$

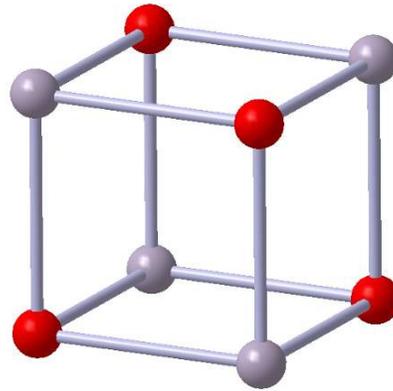
Die Anzahl der Versuche lässt sich reduzieren wenn man nicht jede mögliche Wechselwirkung betrachtet, sondern die Versuchspunkte so wählt, dass man aus diesen statistisch auf die übrigen Wechselwirkungen zurück schließen kann. Hier spricht man dann von einem **teilkfaktoriellen Versuchsplan**. Dies ist insbesondere dann wichtig wenn die Versuche teuer oder zeitintensiv sind. Die Anzahl der benötigten Versuche ergibt sich dann aus:

$$\text{Anzahl Versuche} = \text{Stufen}^{\text{Anzahl Parameter} - 1} \quad (2.2)$$

In Bild 2.13 sind zwei Versuchspläne abhängig von drei Parametern mit jeweils zwei Stufen grafisch dargestellt. Es werden jeweils nur die rot markierten Versuchspunkte untersucht. Hieraus ergibt sich beim teilfaktoriellen Versuchsplan eine Reduzierung der Versuchsanzahl von acht auf vier Versuche.



*Vollfaktorieller Versuchsplan*



*Teilkfaktorieller Versuchsplan*

Bild 2.16 Versuchspläne

Die Anzahl der Stufen kann durch den Entwicklungsingenieur gesteuert werden, die Anzahl der Einflussparameter ist aber nicht direkt beeinflussbar, sodass die Zahl hier sehr schnell ansteigen kann. Wie wichtig daher die Reduzierung der Versuchspläne von vollfaktoriell auf teilfaktoriell ist kann man an der folgenden Tabelle ablesen:

Anzahl Parameter	Anzahl Stufen	Vollfaktoriell	Teilfaktoriell
3	2	8	4
5	2	32	16
5	3	243	81
7	3	2187	729

Tabelle 2.1 Anzahl Versuche bei Versuchsplänen

Bei der Erzeugung des Versuchsplans ist es das Ziel mit einer möglichst kleinen Anzahl von Versuchen die maximal mögliche Anzahl an Informationen zu erhalten. Wird der bisher beschriebene Versuchsplan ohne Mittelpunkt genutzt, werden die Eckpunkte (rot) betrachtet und somit für jeden Parameter nur zwei Werte untersucht. Aus diesen Punkten kann eine Abhängigkeitsgleichung abgeleitet werden, sie ist dann aber zwangsläufig linear.

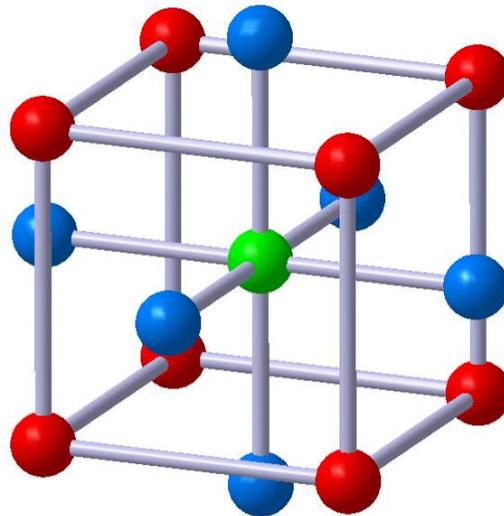


Bild 2.17 Vollfaktorieller Versuchsplan mit Mittel- und Axialpunkten

Da nicht jeder Einfluss einen linearen Verlauf aufweist, sondern unter Umständen auch quadratisch oder in noch höherer Ordnung eingeht, gibt es die Möglichkeit einen Mittelpunkt (grün) und Axialpunkte (blau) einzuführen. Die Axialpunkte liegen auf einem gedanklichen Kreis. In der Standardeinstellung ist der Radius in der Statistiksoftware Minitab so gewählt, dass der Kreis die Eckpunkte schneidet. Die Lage der Axialpunkte kann aber, sofern es der Versuchsplan erfordert, auch jeden beliebigen Wert annehmen.

$$a = s \cdot \sqrt{2} \quad (\text{Standardeinstellung}) \quad (2.3)$$

Es ist darauf zu achten, dass alle Punkte im Versuch einstellbar sind. Stellen die Eckpunkte bereits die Grenzwerte des messbaren Wertebereichs dar, so darf der Abstand  $a$  der Axialpunkte vom Mittelpunkt nicht größer sein als der Abstand  $s$  der Eckpunkte.

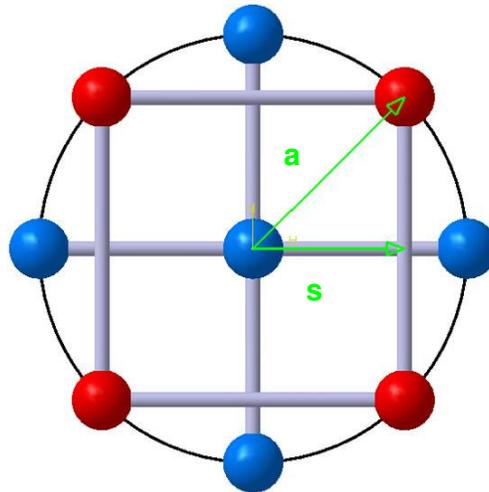


Bild 2.18 Ermittlung der Axialpunktlage

Durch die zusätzliche Prüfung dieser Punkte erhalten wir fünf Werte, die den Einfluss des betrachteten Parameters darstellen. Hieraus lässt sich mit hinreichender Genauigkeit eine Gleichung erzeugen, die den Einflussverlauf wiedergibt.

Mit Hilfe dieser angenäherten Gleichung lassen sich auch weitere Stufen eines Faktors rechnerisch bestimmen, sodass trotz drei oder mehr Stufen für einen Faktor auf den  $2^k$ -Versuchsplan zurückgegriffen werden kann.

Möglich ist dies nur wenn sichergestellt ist, dass sich die einzelnen Stufen des Parameters numerisch darstellen lassen. Als Beispiel hierfür kann zum Beispiel der Durchmesser einer Bohrung angenommen werden. Nach Ermittlung des Kurvenverlaufs kann für jeden weiteren Durchmesser der Ausgangswert berechnet werden.

Diese Vorgehensweise ist nicht möglich, wenn die Stufen mathematisch unabhängig voneinander sind. Dies ist der Fall wenn zum Beispiel vier Materialien miteinander ver-

glichen werden sollen. Hier müssen alle Stufen mittels eines  $4^k$ -Versuchsplans berücksichtigt werden.

Grundvoraussetzung für eine statistische Versuchsauswertung ist eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Sofern keine Erfahrungswerte vorliegen sind diese anhand von Vorversuchen zu erzeugen. Aus diesen Vorversuchen werden der Mittelwert der Versuchsergebnisse und die Spannweite zwischen höchstem und niedrigstem Wert ermittelt. Setzt man die Messwerte in Relation zum Mittelwert erhält man die Standardabweichung sowie die Varianz. Diese beiden Größen die proportional voneinander abhängen geben Auskunft über die Anzahl der durchzuführenden Versuche.

Zunächst wird der **arithmetische Mittelwert** bestimmt indem alle Messwerte aufsummiert werden und das Ergebnis durch die Anzahl der Versuche geteilt wird:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

Anschließend wird der Messwertebereich betrachtet. Die **Standardabweichung** oder auch **Streuung**  $\sigma$  ergibt sich aus den einzelnen Messwerten und dem resultierenden Mittelwert:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.5)$$

Die **Varianz** ist das Quadrat der Standardabweichung

$$v = \sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.6)$$

Versuchsergebnisse, die in Versuchen mit gleichen Eingangsparametern gemessen werden, lassen sich als **Normalverteilung** abbilden. Die Funktion mit welcher der Verlauf der Normalverteilung beschrieben wird lautet:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad (2.7)$$

Die Standardabweichung ist so definiert, dass 68 Prozent aller Messwerte innerhalb einer Spanne  $\pm 1\sigma$  um den Mittelwert verteilt liegen. 95 Prozent der Ergebnisse liegen im Intervall  $\pm 2\sigma$  und 99,7 Prozent im Intervall  $\pm 3\sigma$ .

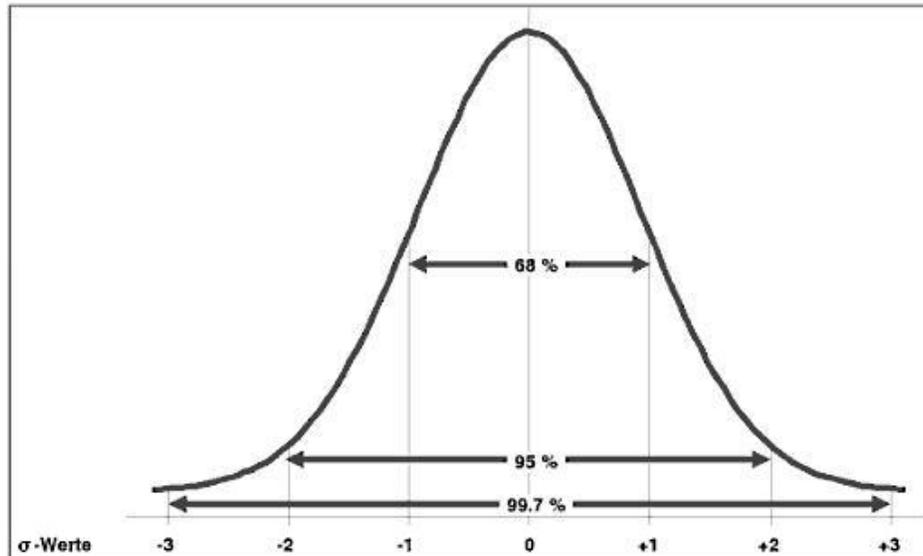


Bild 2.19 Normalverteilung von Messwerten [1]

## 2.4 Bewertungssoftware Minitab

Bei der Auswertung von Versuchsplänen kommt die Bewertungssoftware Minitab zum Einsatz. Sie wurde entwickelt um die statistische Daten zu erfassen und die Versuchsauswertung von Six Sigma Projekten zu vereinfachen.

Untersuchungen bezüglich der Normalverteilung, dem Mittelwert und der Standardabweichung werden mit hinterlegten Algorithmen bewertet werden. Ein wichtiger Parameter ist der **P-Wert**. Der P-Wert gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Ergebnis zufällig entstanden ist und daher näherer Analyse bedarf.

Allgemein entspricht der P-Wert der unter der Normalverteilung eingeschlossenen Kurve.

$$P = \int_Z^{\infty} f(x) = \int_Z^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \right)^2} \quad (2.8)$$

Der Grenzwert Z ergibt sich aus der Abweichung des Mittelwerts von der Normalverteilung geteilt durch die Standardabweichung:

$$Z = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\sigma} \quad (2.9)$$

Zur Beurteilung der Versuchsergebnisse werden zwei Hypothesen aufgestellt. Die **Nullhypothese  $H_0$**  gibt einen gegebenen Zustand an. Wird bei einem Versuch ein Parameter verändert, so sagt die Nullhypothese aus, dass die Änderung keinen Einfluss aufs Ergebnis hat. Die **Alternativhypothese  $H_A$**  ist in diesem Fall die These, dass die Änderung des Parameters das Ergebnis beeinflusst.

Welche Hypothese richtig ist kann am Versuchsergebnis abgelesen werden. Hierbei bleibt aber immer das Risiko einen Bewertungsfehler zu begehen, weil zum Beispiel ein Fehler in der Versuchsdurchführung das Ergebnis verfälscht. Dieses Risiko wird mit dem zuvor definierten  **$\alpha$ -Wert**, der so genannten Irrtumswahrscheinlichkeit, mathema-

tisch abgebildet. Ein  $\alpha$ -Wert von 0,05 entspricht einem erlaubten Fehler von 5 Prozent. Der ermittelte P-Wert wird nun mit dem  $\alpha$ -Wert verglichen.

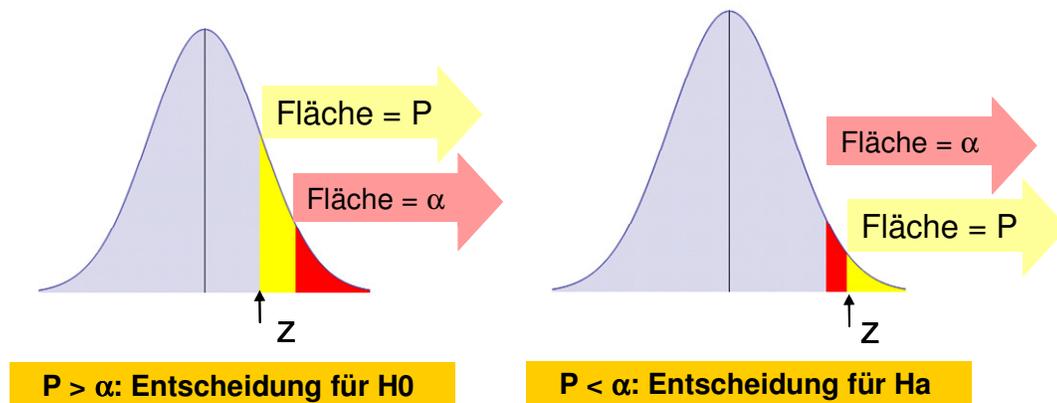


Bild 2.20 Entscheidung über Hypothesen

Liegt der Z-Wert in der Normalverteilung links vom  $\alpha$ -Wert, ist die von P eingeschlossene Fläche größer als die von  $\alpha$  eingeschlossene Fläche, so fällt die Entscheidung zu Gunsten der Nullhypothese. Ist die von P eingeschlossene Fläche kleiner als die von  $\alpha$  eingeschlossene Fläche wird die Alternativhypothese gewählt.

Mögliche Fehler lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Beim  $\alpha$ -Fehler wird eine richtige Nullhypothese als falsch abgelehnt. Beim  $\beta$ -Fehler wird eine falsche Nullhypothese als richtig angenommen.

Unbekannte Wirklichkeit → ↓ Schlussfolgerung des Tests	$H_0$ ist richtig	$H_0$ ist falsch
	$H_0$ wird angenommen	Richtige Entscheidung
$H_0$ wird abgelehnt	Fehler 1. Art ( $\alpha$ -Fehler)	Richtige Entscheidung

Tabelle 2.2 Schlussfolgerung aus Hypothesen

Wird eine zufällige Variation des Messergebnisses fälschlicherweise als Effekt aus der zuvor erfolgten Änderung bewertet ist dies ein  **$\alpha$ -Fehler**. Dies kann dazu führen, dass die Nullhypothese abgelehnt wird obwohl die Alternativhypothese keine echte Verbes-

serung bringt. Im schlimmsten Fall könnte die nun gewählte Alternativhypothese sogar zur Verschlechterung der Ergebnisse führen.

Beim  **$\beta$ -Fehler** ist das Gegenteil der Fall. Ein positiver Effekt der Alternativhypothese wird nicht erkannt und somit die Nullhypothese weiterhin als richtig angesehen. Dies führt zwar nicht zur Verschlechterung, da der alte Status beibehalten wird, eine mögliche Verbesserung wird aber auch nicht erzielt.

Der **2-Stichproben-t-Test** gibt Auskunft, ob zwei Versuchsreihen aus derselben Grundgesamtheit stammen, beziehungsweise denselben Stichprobenmittelwert haben. Dies soll an zwei Beispielen verdeutlicht werden:

Wird eine Versuchsreihe nicht am Stück sondern in mehreren Blöcken durchgeführt, können sich Rahmenbedingungen geändert haben. Um festzustellen, ob alle Messreihen dennoch zur gleichen Grundgesamtheit gehören und somit direkt miteinander vergleichbar sind wird der 2-t-Test durchgeführt.

Es werden zwei Konfigurationen miteinander verglichen. Es wird behauptet, dass Konfiguration A besser ist als B. Ergibt der 2-t-Test, dass beide Konfigurationen aus der selben Grundgesamtheit stammen kann die Behauptung nicht bestätigt werden, sondern es muss davon ausgegangen werden, dass beide Konfigurationen gleich gut sind.

Der **Boxplot** ist eine grafische Darstellung von statistisch ermittelten Daten. Der Boxplot besteht aus einem Rechteck und zwei angeschlossenen Linien. Das Rechteck wird Box und die Linien werden Whisker genannt.

Die Box entspricht dem Wertebereich in dem 50 Prozent aller Messwerte liegen. Der Median wird als Linie in der Box dargestellt. Die Lage des Medians innerhalb der Box gibt Auskunft, ob die Messwertverteilung symmetrisch oder schief ist.

Die Whisker definieren den Wertebereich vom höchsten bis zum niedrigsten Messwert. So werden auch alle Messwerte außerhalb des 50 Prozent Bereichs im Diagramm berücksichtigt.

Da ein Boxplot nur eindimensional ist, lassen sich Boxplots aus verschiedenen Versuchsreihen sehr einfach miteinander vergleichen, da sie alle auf der gleichen Skala abgebildet werden können.

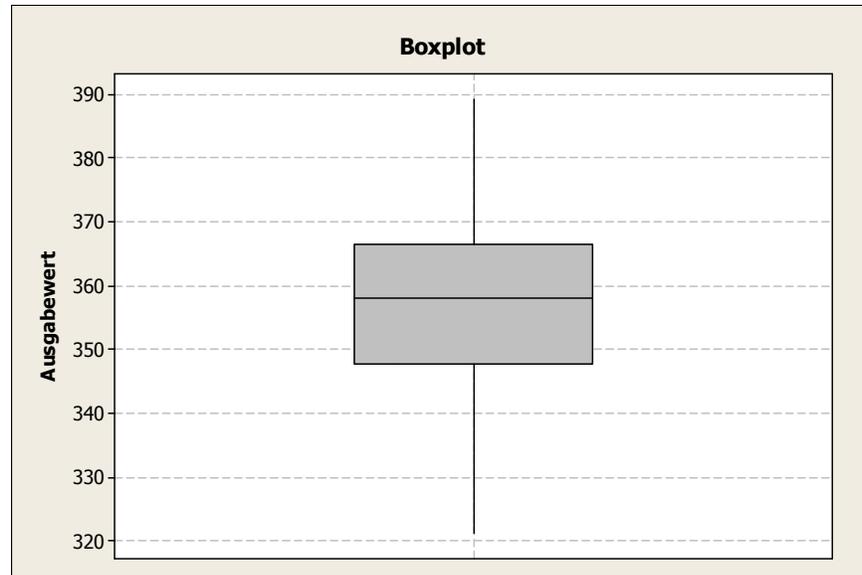


Bild 2.21 Boxplot

Um zu prüfen, ob zwei Versuchsreihen miteinander vergleichbar sind, gibt es den **F-Test**. Hierbei wird das Verhältnis der Varianzen der beiden Prüfreiheiten gebildet. Dieses Verhältnis ist der F-Wert.

$$F = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{mit } v_1 > v_2 \quad (2.10)$$

Man bildet wieder zwei Hypothesen. Die Nullhypothese sagt aus, dass die Varianzen gleich sind. Die Alternativhypothese hingegen sagt, dass die Varianzen unterschiedlich sind.

Im nächsten Schritt wird der F-Wert bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent ermittelt. Dieser wird als  $F_\alpha$  bezeichnet. Ein Signifikanzniveau von 5 Prozent bedeutet, dass eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 Prozent zugelassen wird.

Liegt der F-Wert unterhalb des  $F_\alpha$ -Werts, wird die Nullhypothese nicht abgelehnt und es kann davon ausgegangen werden, dass die Versuchsreihen vergleichbar sind.

Um einen Versuchsplan mit Minitab auszuwerten gibt es verschiedene Darstellungsformen. Die wichtigsten werden anhand eines zweistufigen Versuchsplans mit drei Faktoren im Folgenden kurz beschrieben.

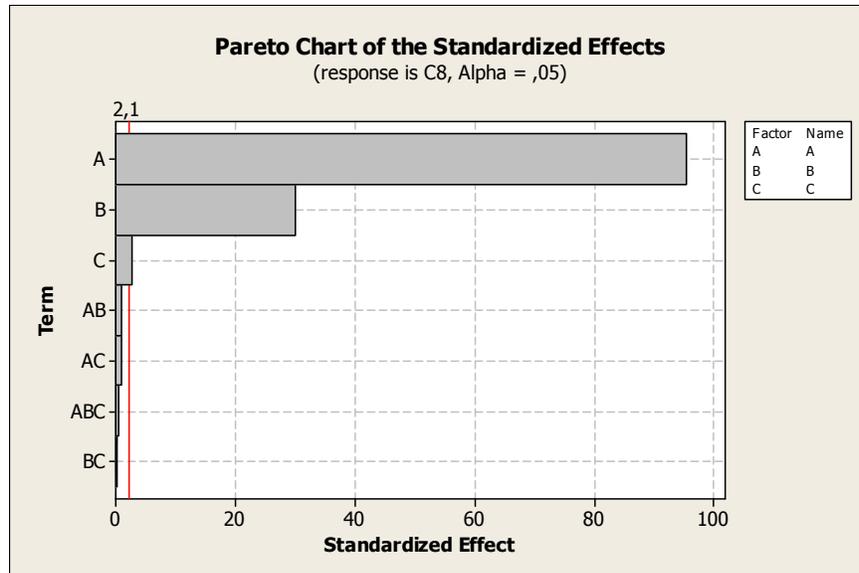


Bild 2.22 Pareto-Diagramm

Die statistische Signifikanz der Effekte und ihre relative Stärke lassen sich anhand des Pareto-Diagramms ablesen. Die rote Linie stellt die Signifikanzgrenze für die Effekte dar. Sie wird mit Hilfe des  $\alpha$ -Levels gebildet. Alle Effekte und Wechselwirkungen links von der roten Linie haben bei einem  $\alpha$ -Wert von 0,05 mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent keinen Effekt auf die ertragbare Kappenabzugskraft. Im oben dargestellten Pareto-Diagramm (Bild 2.18) haben die einzelnen Faktoren jeweils Einfluss auf die maximale Kappenabzugskraft, die Wechselwirkungen hingegen nicht.

Mittels der linearen Regressionsanalyse erzeugt Minitab eine Gerade, die sich möglichst genau an die Messpunkte anlegt. Dies geschieht indem die Abstandsquadrate der Messpunkte zu einer zuvor abgeschätzten Geraden minimiert werden. Die resultierende Gerade wird als Regressionsgerade bezeichnet.

Die Bestimmung der Regressionsgeraden erfolgt mittels der folgenden Gleichungen:

$$\hat{y}_i = a + b \cdot x_i \quad (2.11)$$

(mit  $i = 1, \dots, n$  und  $\hat{y}_i$ : abgeschätzter Wert für  $y_i$ )

Zur Bestimmung der Koeffizienten a und b gelten folgende Bedingungen:

$$\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) = 0 \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (2.13)$$

Aus den Bedingungen 2.12 und 2.13 folgt für die Koeffizienten:

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (2.14)$$

$$b = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.15)$$

Somit ist die Regressionsgerade eindeutig bestimmt und der wahre Wert für  $y_i$  kann berechnet werden.

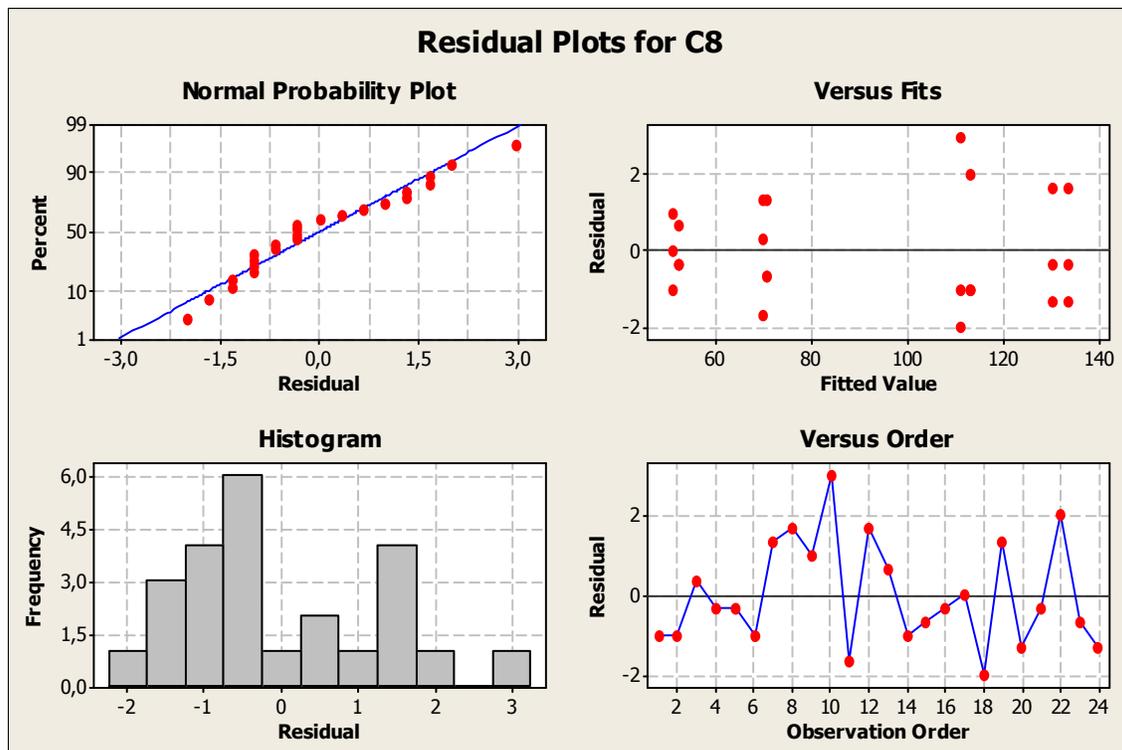


Bild 2.23 Darstellung der Residuen

Im Residual Plot werden die Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Abweichung zur Regressionsgeraden dargestellt. Je geringer diese Abweichungen, desto näher liegen die Versuchsergebnisse an der erwarteten Normalverteilung.

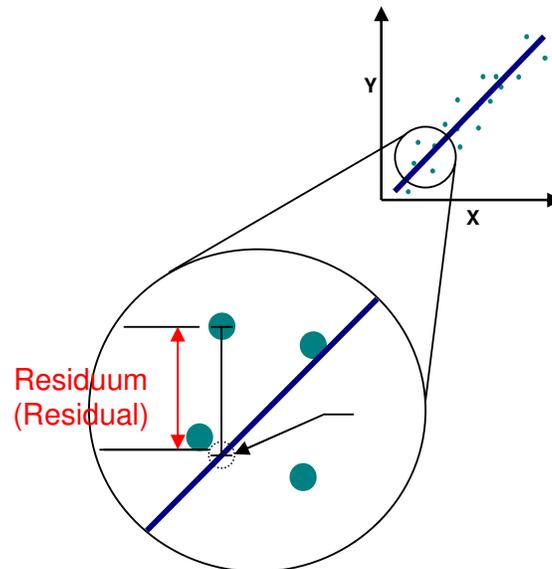


Bild 2.24 Beispiel Residuum

Die Regression muss nicht zwangsläufig linear sein. Minitab unterstützt auch quadratische und kubische Regressionskurven. Ist der Verlauf nicht bekannt sollte mit einer Regressionsfunktion der höchstmöglichen Ordnung begonnen werden.

In der Auswertung werden die kubischen, quadratischen und linearen Terme und deren Einfluss auf die Regressionskurve aufgeführt. Ob die Terme einen Einfluss haben lässt sich am jeweiligen P-Wert ablesen. Liegt der P-Wert oberhalb von 0,05 kann mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von fünf Prozent davon ausgegangen werden, dass der Term keinen signifikanten Einfluss auf die Regressionskurve hat und somit vernachlässigt werden kann.

Sofern der kubische Anteil vernachlässigbar ist, wird eine erneute Regressionsanalyse erforderlich. Diese wird dann entweder quadratisch, sofern dieser Anteil einen Einfluss hat, oder nur linear durchgeführt.

Die Güte der Regressionsfunktion lässt sich am **Bestimmtheitsmaß  $R^2$**  ablesen. Das Bestimmtheitsmaß gibt den Anteil der erklärten Variation zur Gesamtvariation an und ist wie folgt definiert:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.16)$$

Je höher der erreichte Wert, desto besser bildet die Regressionsfunktion die Versuchsergebnisse ab. Unterhalb von 75 Prozent ist die Abweichung von Regressions- und realer Funktion so groß, dass die Regressionsfunktion nicht als Ausdruck für die Messwerte genutzt werden kann.

Zwei Faktoren, die auf einen Effekt hin untersucht werden lassen sich in einem dreidimensionalen Diagramm darstellen. Diese Darstellung wird als **Response Surface** bezeichnet.

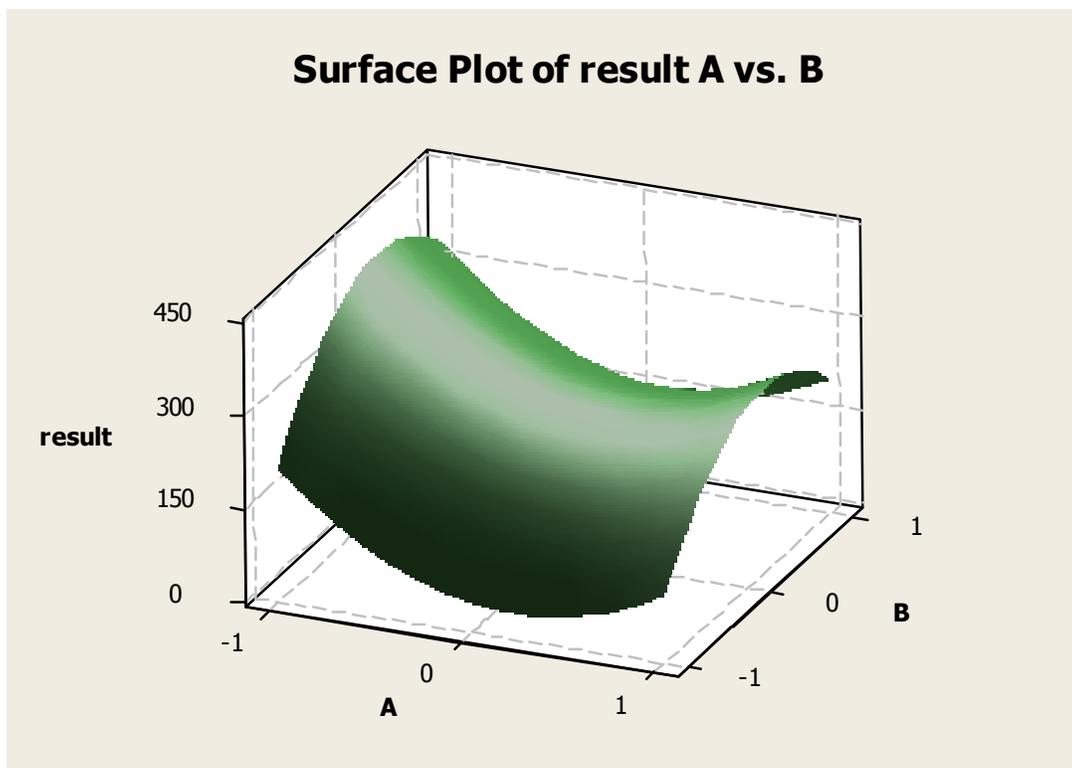


Bild 2.25 Response Surface

Aus der grafischen Darstellung lässt sich die Lage der optimalen Konfiguration der Faktoren A und B ablesen.

## 2.5 Prüfverfahren Kappenabzugskraft

Die Bewertung der Verbindungselemente der Gurtkappen erfolgt im Versuch. Hier wird geprüft ob die Verbindung der geforderten Zugbelastung standhält.

Für die Ermittlung der Kappenabzugskraft wurde im Labor eine Prüfvorrichtung aufgebaut, die es ermöglicht an Vorder- und Hinterseite der Schlosskappe zu ziehen und die resultierenden maximalen Kappenabzugskräfte aufzuzeichnen. Diese Prüfvorrichtung ermöglicht vergleichbare Ergebnisse wenn einzelne Parameter der Verbindungselemente variiert werden.

Das Gurtschloss wird vorne in eine feste Halterung in Form einer Schlosszunge eingearastet. Hinten wird der Halter fixiert, und die Bewegung des Gurtschlusses in z-Richtung verhindert. Somit ist das Gurtschloss fest eingespannt. Für die Messung der hinteren Kappenabzugskraft wird die Abzugskralle hinten unter die Gurtschlosskappe gehakt. Die Kralle ist über eine Kraftmessdose und eine Spindel mit einem Elektromotor verbunden.

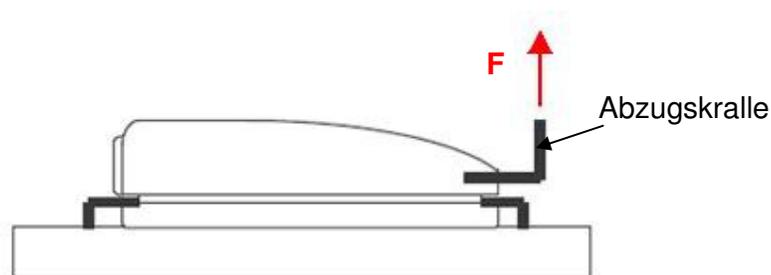


Bild 2.26 Versuch Abzugskraft hinten [11]

Beim Starten der Messung wird die Kraftmessdose auf Null gesetzt und der Elektromotor so angesteuert, dass die Abzugskralle mit 100mm/min in positive z-Richtung gezogen wird.

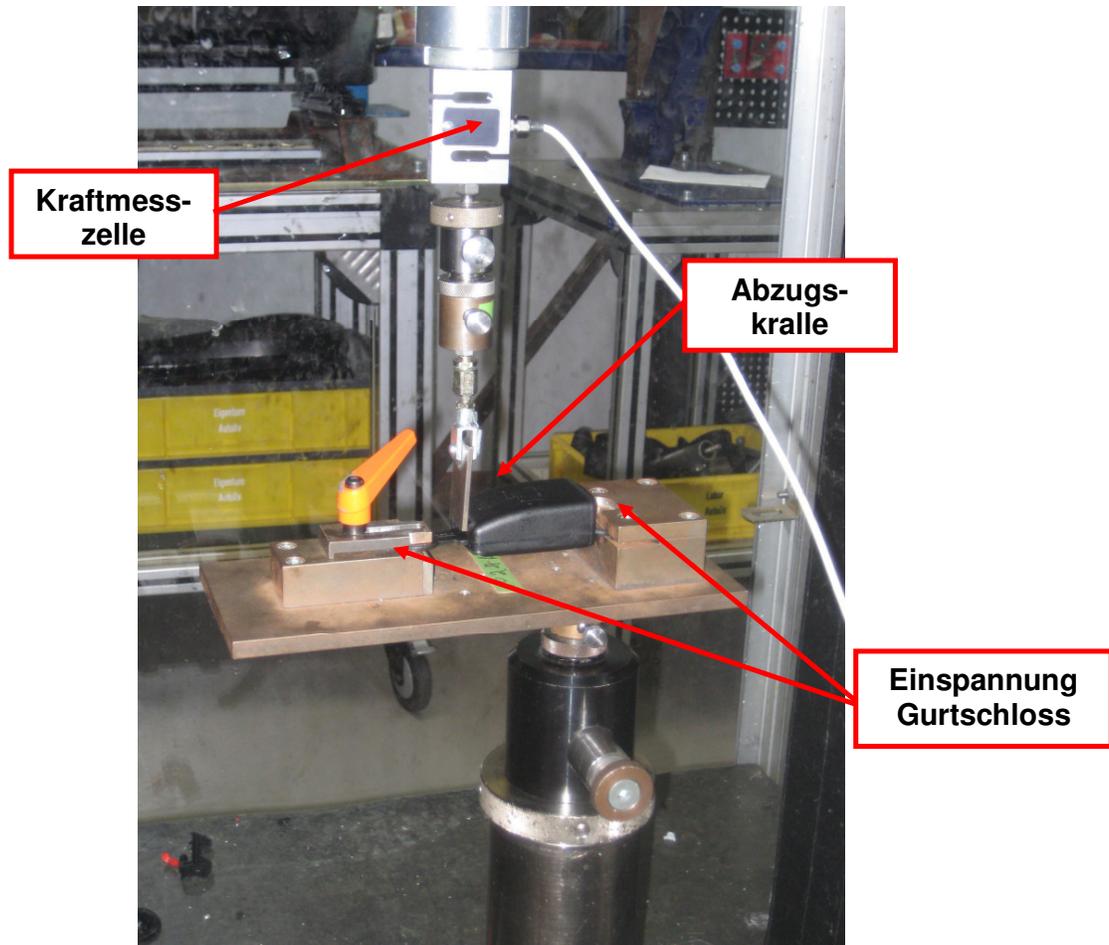
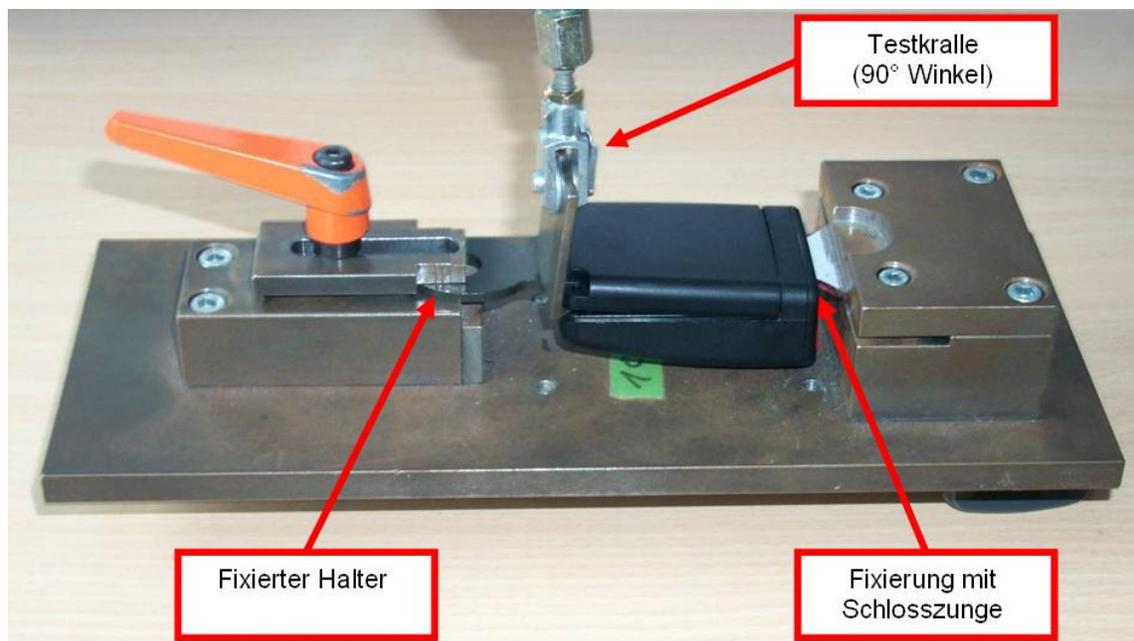


Bild 2.27 Prüfstand Kappenabzugskraft



Bil

d 2.28 Gurtschloss eingelegt in Abzugsvorrichtung

---

Um zu gewährleisten, dass die Messungen unabhängig vom Prüfer vergleichbar und nachvollziehbar sind, wurde eine interne Testspezifikation TES E115245 entwickelt nach der alle Versuche durchzuführen sind. Hierin enthalten sind Angaben zu:

- Abzugsgeschwindigkeit
- Abzugswinkel
- Form der Abzugskralle
- Angriffspunkte der Abzugskralle

Die gesamte Testspezifikation findet sich im Anhang, sodass in diesem Kapitel nicht näher auf die einzelnen Parameter eingegangen wird.

---

## 3. Versuchsplanung und Vorversuche

Das Kapitel Projektdurchführung gliedert sich in drei Abschnitte. Diese laufen aber nicht chronologisch hintereinander, sondern teilweise parallel ab, da sie sich gegenseitig beeinflussen.

Zunächst werden die Werkzeuge der Six Sigma Methode angewandt und das Projekt genau definiert. Bevor aber mit dem Aufstellen eines Versuchsplans begonnen werden kann müssen Vorversuche durchgeführt werden, die Auskunft über den Umfang des Versuchsplans geben.

Mit Hilfe der Vorversuche soll abgeschätzt werden wie viele Versuche für ein statistisch abgesichertes Ergebnis erforderlich sind. In erster Linie geht es um die Anzahl der Wiederholungen je Konfiguration. Zum anderen aber auch um die Reduzierung auf einen teilfaktoriellen Versuchsplan und somit das Weglassen einzelner Konfigurationen.

Ein weiteres Ziel der Vorversuche ist die Eingrenzung des Versuchsraums. Die Anzahl der Faktoren kann nur reduziert werden, wenn nachgewiesen wird, dass sie gar keinen oder keinen signifikanten Einfluss haben. Die Anzahl der Stufen kann ebenfalls durch Vorversuche eingeschränkt werden.

Bei der Auswahl der Vorversuche ist ein einfacher und kostengünstiger Versuchsaufbau erstrebenswert, da nur eine Basis für die folgenden Versuche geschaffen wird und keine konkreten Ergebnisse erzielt werden. Bei Parameter mit vielen Stufen kann durch Vorversuche die Anzahl der Stufen reduziert werden. Dies führt zu einer Reduzierung der benötigten Versuchsanzahl.

Nach Aufstellen des Versuchsplans werden die Hauptversuche durchgeführt. Unerwartete Versuchsergebnisse führen aber auch zu diesem Zeitpunkt noch zur Modifizierung des Versuchsplans.

---

### 3.1 Versuchsplanung

Um den Versuchsaufwand zu reduzieren soll, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ein Versuchsplan aufgestellt werden. Die in Kapitel 2 beschriebenen Six Sigma und Versuchsplanungs-Werkzeuge werden auf das konkrete Projekt angewendet.

Zunächst wird vom Projektteam der Umfang des Projekts definiert. Hierzu dient der **Projektplan** mit zugehöriger **Ist / Ist nicht Tabelle**. Die Dokumente befinden sich im Anhang dieser Masterarbeit. Erst nachdem diese eindeutig festgelegt sind wird das Projekt offiziell gestartet und mit der Durchführung begonnen.

Aus dem Projektplan geht hervor, dass es zwei unabhängige Prozesse gibt. Zum einen der Prozess der Kappenverbindung, und zum anderen der Kappenabzugstest.

Der Kappenverbindungsprozess hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verbindung und muss daher mit betrachtet werden. Versuche zur Optimierung des Einpressvorgangs werden im Rahmen dieser Arbeit aber nicht durchgeführt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem Design der Kappenverbindung und der Einhaltung der geforderten Mindestabzugskraft. Daher liegt der Fokus auf der Optimierung der Kappenabzugskraft.

Beim Vorbereiten der Prüflinge werden die Raststifte in die Kappen bzw. Testblöcke eingepresst. Die Einpresskräfte werden aufgezeichnet um in der weiterführenden Betrachtung des Montageprozesses auf erneute Versuche verzichtet und auf die Messwerte zurückgegriffen werden kann.

Da sich der Verbindungsprozess und die Kappenabzugsprüfung von der Struktur deutlich unterscheiden ist es erforderlich zwei Blockdiagramme zu erstellen. Da es im Parameter-Diagramm und in der Robustheitsmatrix möglich ist mehrere Eingangs- und Ausgangssignale zu verarbeiten werden beide Prozesse an dieser Stelle in ein Dokument zusammengeführt.

### 3.1.1 Blockdiagramm

Im Blockdiagramm des Montageprozesses sind nur die beiden Kappen und die Verbindungsstifte innerhalb der Systemgrenze. Die Oberkappe wird in einen Halter gelegt, die Schlossmechanik eingelegt und die Unterkappe darauf gesteckt. Anschließend werden die Verbindungsstifte mit Hilfe eines pneumatischen Presswerkzeugs in die Kappen eingepresst. Hierbei wird der Einpressweg überwacht um sicherzustellen, dass die Kappen ordnungsgemäß verbunden sind.

Eingangsparameter sind die Einpresskraft und der Einpressweg. Die Ausgangssignale unterteilen sich in zwei Bereiche. Zum einen gibt es die gewünschte oder auch Basisfunktion. Diese zeigt an welches Ergebnis erzielt werden soll. In diesem Fall, dass die Kappen so verbunden werden, dass es weder einen Spalt zwischen den Kappen noch zwischen Kappenoberfläche und Stiftkopf gibt. Der zweite Bereich sind die Fehlermeldungen, die auftreten können, wenn Störfaktoren die Verbindung behindern. Hierzu zählen Bruch oder Beschädigung der Kappen, Spaltbildung und optische Fehler.

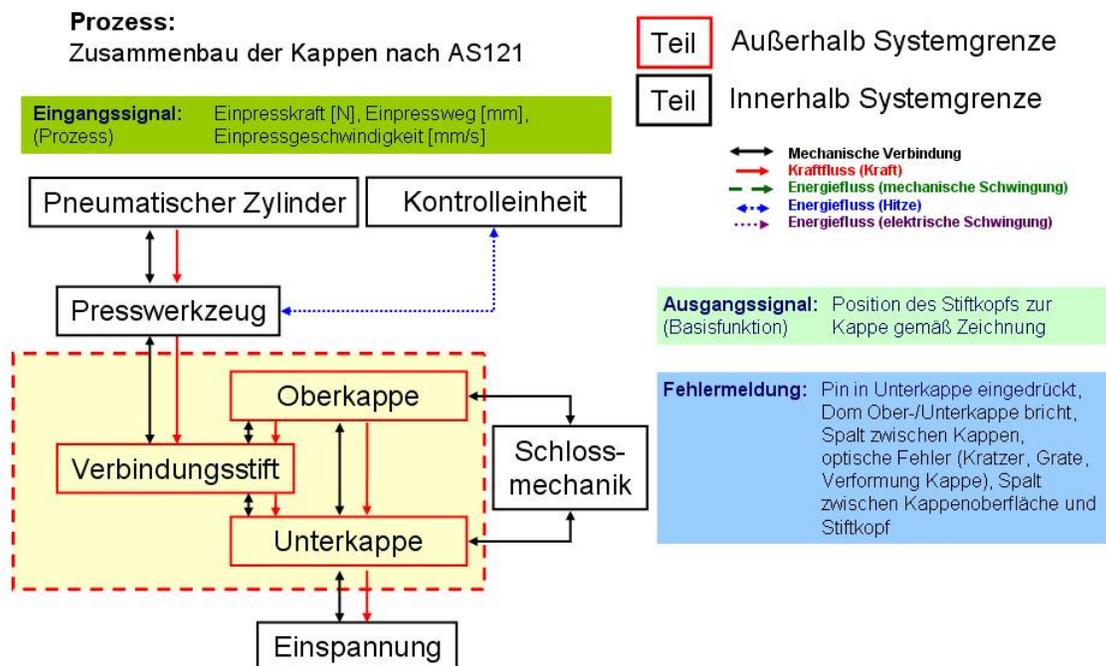


Bild 3.1 Blockdiagramm Prozess

Beim Blockdiagramm für den Kappenabzugsversuch umfasst die Systemgrenze neben den beide Kappen sowie den Verbindungsstiften auch die Gurtschlossmechanik, da das

Gurtschloss im Versuch an der Mechanik fest eingespannt wird und somit für die Kraftübertragung erforderlich ist. Weiterhin gibt es mechanische Verbindungen zur Einspannung und zur Abzugskralle der Zugvorrichtung die außerhalb des Systems liegen.

Das Eingangssignal, des Versuchsdiagramms entspricht dem Ausgangssignal des Prozesses. Das heißt es wird vorausgesetzt, dass die zu prüfenden Kappen ohne Prozessfehler verbunden wurden. Neben diesen Prozessparametern gibt es noch Designparameter die während der Konstruktion festgelegt werden. Diese beziehen sich überwiegend auf die Geometrie von Kappen und Stiften. Durchmesser von Loch und Stift, Einpresslänge, Form der Rastnasen und Materialauswahl sind hier als wesentliche Größen zu nennen.

Die gewünschte Funktion ist das Erreichen der geforderten hinteren Kappenabzugskraft. Fehlermeldungen treten hier auf wenn im Verlauf des Versuchs Stift oder Kappen beschädigt werden bevor die Mindestabzugskraft erreicht ist.

## Stiftverbindung K12E-Gurtschloss Blockdiagramm – Ermittlung der Kappenabzugskraft (Versuch)

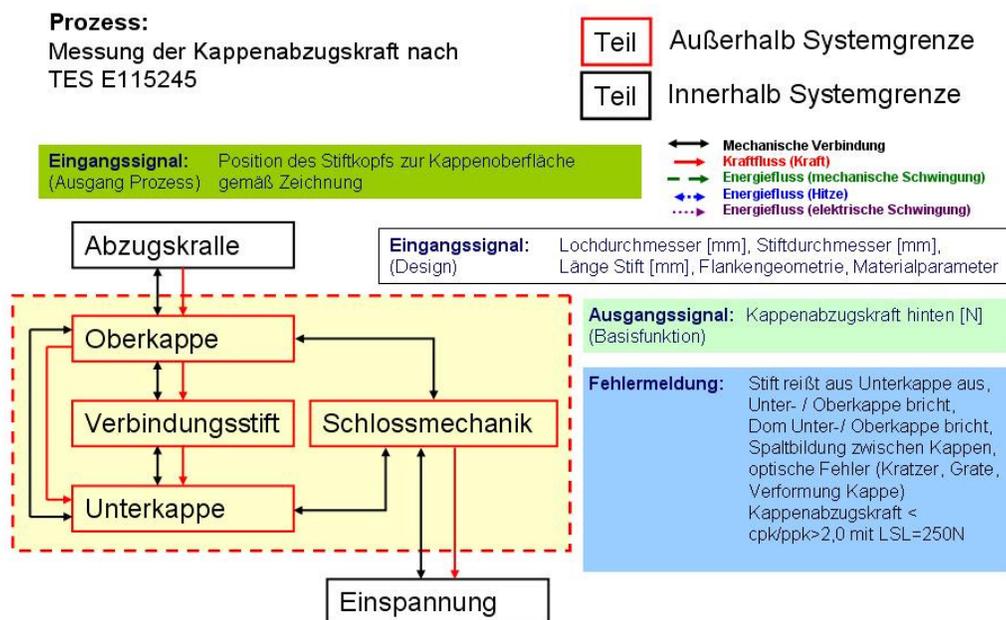


Bild 3.2 Blockdiagramm Kappenabzugsversuch

---

### 3.1.2 Parameter-Diagramm

Basierend auf den beiden Blockdiagrammen wird das Parameter-Diagramm erstellt. Neben den bereits in den Blockdiagrammen aufgeführten Eingangs- und Ausgangssignalen sowie den möglichen Fehlermeldungen kommen potentielle Störfaktoren hinzu, die das System beeinflussen können.

Das Parameter-Diagramm ist ein lebendiges Dokument und wird im Verlauf des Projekts regelmäßig aktualisiert. So können im Versuchsprozess Störgrößen oder Fehlermeldungen auftauchen, die zu Beginn des Projekts noch unberücksichtigt geblieben sind. Diese werden dann eingepflegt und auch in die folgenden Dokumente wie zum Beispiel die Robustheitsmatrix übernommen.

Unabhängig davon wie groß ihr Effekt ist, werden im ersten Schritt alle möglichen Störfaktoren, die das System beeinflussen können, eingetragen. Im weiteren Verlauf des Projekts werden die Störfaktoren bewertet und entschieden, ob sie signifikanten Einfluss haben und im Test validiert werden müssen.

Für die Ermittlung der Kappenabzugskraft gibt es zahlreiche Störfaktoren hinsichtlich der Geometrie des Verbindungsstifts und der Schlosskappen. Da alle geometrischen Bedingungen Toleranzen aufweisen, müssen diese als Störfaktoren berücksichtigt werden.

Der Verbindungsstift kann in Länge und Durchmesser und Form der Rastnasen variieren. Weitere Faktoren wären eine Exzentrizität des Kopfes zum Schaft, eine Beschädigung der Oberflächenbeschichtung oder Materialfehler.

Die Bohrung in der Schlosskappe kann in Durchmesser und Tiefe variieren. Ist die Bohrung nicht exakt zentrisch im Schraubdom oder die Wandstärke des Doms nicht gleichmäßig kann dies zum Versagen des Doms führen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Bohrung rechtwinklig im Dom eingebracht ist. Grate vom Bohren oder andere Fremdkörper können die Bohrung verunreinigen und verhindern, dass der Stift korrekt eingepresst wird. Auch Materialienhomogenität oder Stellen mit zu geringer Wandstärke können zum Bruch der Kappe führen.

---

Werden bei der Montage der Stifte die Einpresskraft oder der Einpressweg nicht eingehalten oder die Stifte schief in die Bohrung eingepresst kann dies zur Schwächung der Verbindung führen.

Neben den bauteilbedingten Störgrößen gibt es auch in anderen Bereichen Störfaktoren. Prozessstörgrößen, der Versuchsaufbau, der Gebrauch durch den Prüfer sowie Umwelteinflüsse müssen beachtet werden.

Als Prozessstörgrößen werden die Einflüsse bezeichnet, die bei der Verbindung der Kappen zu Fehlern führen können. Eine zu hohe oder zu niedrige Einpresskraft oder ein nicht eingehaltener Einpressweg können dazu führen, dass der Stift nicht vollständig in seine Position gedrückt wird beziehungsweise der Kopf in die Kappenoberfläche eindrückt.

Die Messwertaufnehmer des Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Kappenabzugskraft weisen Toleranzen auf. Da die Abzugskralle manuell unter die Oberkappe geschoben wird kann es auch hier zu Varianzen in der Anlage zwischen Kralle und Kappe kommen. Ein Herunterfallen des Prüflings kann zu nicht sichtbaren Beschädigungen führen, die das Ergebnis verfälschen. Ein möglicher Einfluss von Temperatur, Staub und Feuchtigkeit muss ebenfalls berücksichtigt werden.

Wichtig ist zu beachten, dass auch Wechselwirkungen aus der Kombination mehrerer Störfaktoren auftreten können. Im Ergebnis ist es wichtig, dass auch belegt wird, dass eine solche Überlagerung geprüft wurde und nicht zum Versagen der Kappenverbindung führt.

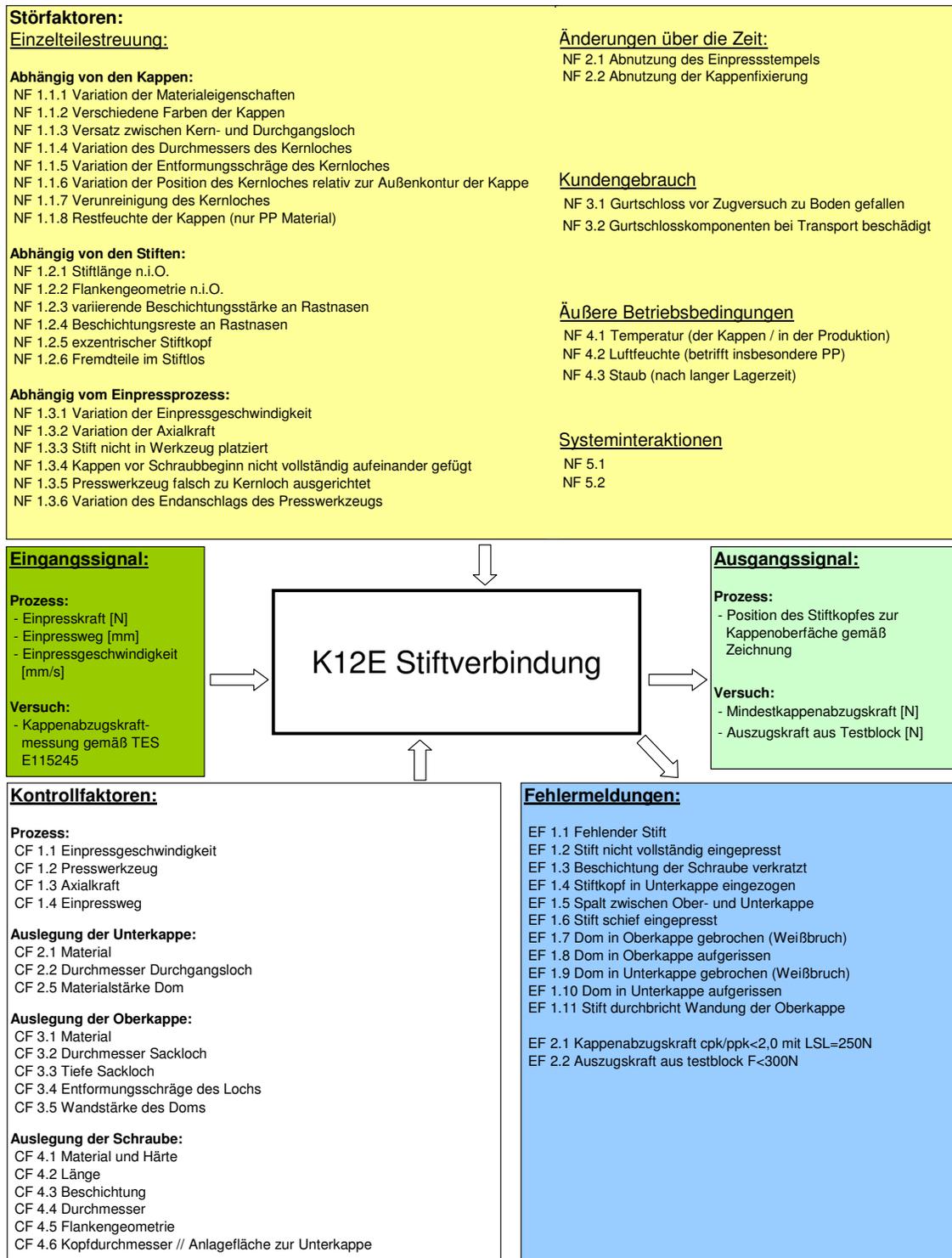


Bild 3.3 P-Diagramm Alternative Schlosskappenverbindung

### 3.1.3 Robustheitsmatrix

Der nächste Schritt ist das Aufstellen der Robustheitsmatrix. Basis hierfür ist das P-Diagramm aus dem die Störfaktoren, das Ausgangssignal und die Fehlermeldungen übernommen werden. Alle Punkte die in der Robustheitsmatrix auftauchen müssen auch im P-Diagramm verzeichnet sein und umgekehrt.

Sind die angesprochenen Punkte im P-Diagramm noch allgemein dargestellt, werden in der Robustheitsmatrix die Verknüpfungen untereinander aufgezeigt. Eingetragen wird welche Störgröße welche Fehler verursachen kann und welche ideale Funktion sie beeinflusst.

Ergänzend werden in der Robustheitsmatrix erstmals Testverfahren definiert, mit denen der Einfluss der Störgrößen auf das Ausgangssignal und die Fehlermeldungen ermittelt werden. Die Testverfahren werden so ausgewählt, dass in jedem Test möglichst viele Störgrößen abgedeckt werden.

Da es an dieser Stelle zu umfangreich ist jede Verbindung zwischen Störgröße und Fehlermeldung zu erläutern werde ich dies exemplarisch an einem Beispiel tun. Dieses ist dann vom Vorgehen entsprechend auf alle anderen Punkte übertragbar.

Aus der Störgröße „Toleranz des Kopfdurchmessers des Verbindungsstifts“ ergeben sich mehrere mögliche Fehlermeldungen, die Einfluss auf die Erfüllung der idealen Funktion haben. Ist der Kopf zu klein, könnte der Stift beim Einpressen verformt werden. Weiterhin könnte die Oberkappe im Bereich der Anlagefläche gestaucht werden oder schlimmstenfalls sogar brechen, da die Auflagefläche über die Kraft eingeleitet wird zu gering ist.

Um zu prüfen, ob diese Störgröße zu den beschriebenen Fehlermeldungen führt oder der Einfluss vernachlässigbar gering ist, werden Montageversuche und Kappenabzugsversuche mit Stiften durchgeführt, die am oberen beziehungsweise unteren Rand der erlaubten Toleranz liegen.



---

### 3.1.4 Versuchsplan

Nach dem Aufstellen des P-Diagramms und der Robustheitsmatrix sowie der Auswertung der Vorversuche kann der Versuchsplan aufgestellt werden. Im ersten Schritt dient der Versuchsplan zur Bedarfsermittlung um Teile für die Hauptversuche zu bestellen.

In diesem Fall ist es erforderlich Raststifte als Prototypenteile sowie eine Spritzgussform für einen Testblock herzustellen. Da dies mehrere Wochen in Anspruch nimmt, ist es wichtig, dass der Versuchsplan frühzeitig fertig gestellt ist.

Da die Vorversuche abgeschlossen sein müssen bevor der Versuchsplan aufgestellt werden kann, und der Versuchsplan die Basis für die Hauptversuche ist, ist es von der Chronologie sinnvoll, die Vorgehensweise beim Aufstellen des Versuchsplans sowie die anschließende Auswertung nicht an dieser Stelle sondern erst im Kapitel 4 ausführlich zu beschreiben.

### 3.2 Vorversuch - Ermittlung statistischer Einflussgrößen

Die Anzahl der Versuche, welche wir im Laufe der Versuchsreihe benötigen um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erzielen hängt maßgeblich von der Standardabweichung bzw. Streuung ab. Diese wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Erfahrung der bisherigen Versuchsreihen hat ergeben, dass die Streuung bei verschweißten Gurtschlosskappen deutlich höher ist, als bei verschraubten Kappen.

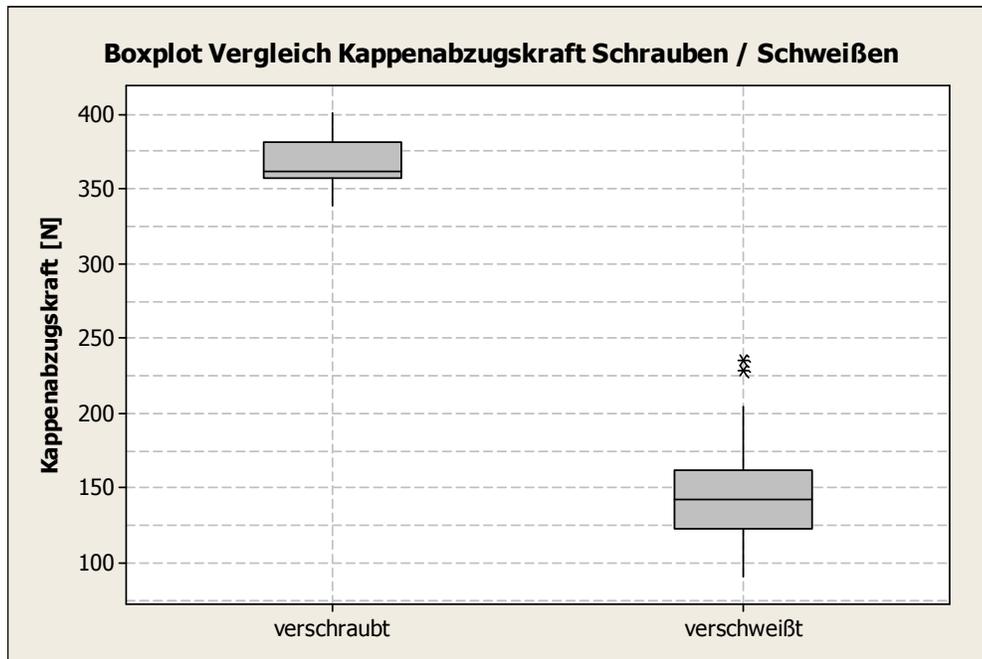


Bild 3.5 Diagramm Standardabweichung Schweißen / Schrauben

Bei den verschweißten Gurtschlössern ist die Schweißverbindung die Schwachstelle, welche im Kappenabzugsversuch versagt. Beim verschraubten Gurtschloss versagt nicht die Verschraubung sondern die Kappe bricht an der Kraftangriffsstelle.

Für die Stiftverbindung liegt noch kein Erfahrungswert vor, sodass die Streuung im Vorversuch ermittelt werden muss. Erwartet wird, dass bei der Stiftverbindung ebenfalls die Kappe versagt und nicht die Verbindung. Hieraus ergibt sich die Hypothese, dass die Standardabweichungen von geschraubter und gestifteter Verbindung annähernd gleiche Werte annehmen.

### 3.2.1 Versuchsvorbereitung

Als Basis für diesen Versuch werden serienmäßige K12E-Gurtschlösser verwendet. Der Lochdurchmesser für die selbstschneidenden Schrauben in der Oberkappe beträgt nur 2,1mm. Die Verbindungsstifte erfordern nach Herstellervorgaben ein Lochdurchmesser von 2,75mm. Daher müssen die Löcher in den Kappen noch aufgeweitet werden.

Beim Aufweiten ist es entscheidend sicherzustellen, dass die Löcher auch nach der Bearbeitung noch exakt rechtwinklig zur Oberfläche sind. Schon eine leicht schiefe Bohrung führt zu ungleichen Wandstärken in den Domen, sodass diese an der dünnsten Stelle geschwächt sind. Somit kommt es zur Verfälschung der Versuchsergebnisse.

Um ein realistisches Lochbild zu erhalten werden die Löcher zunächst auf 2,7mm aufgebohrt und anschließend mit einer Reibahle auf 2,75mm aufgerieben. Dies stellt sicher, dass die Oberfläche in den Löchern annähernd die gleiche Rauigkeit hat wie direkt beim Formspritzen erzeugte Löcher. Ausschließliches Bohren ohne anschließendes Reiben würde eine zu raue Oberfläche erzeugen, die ebenfalls das Versuchsergebnis beeinflussen kann.

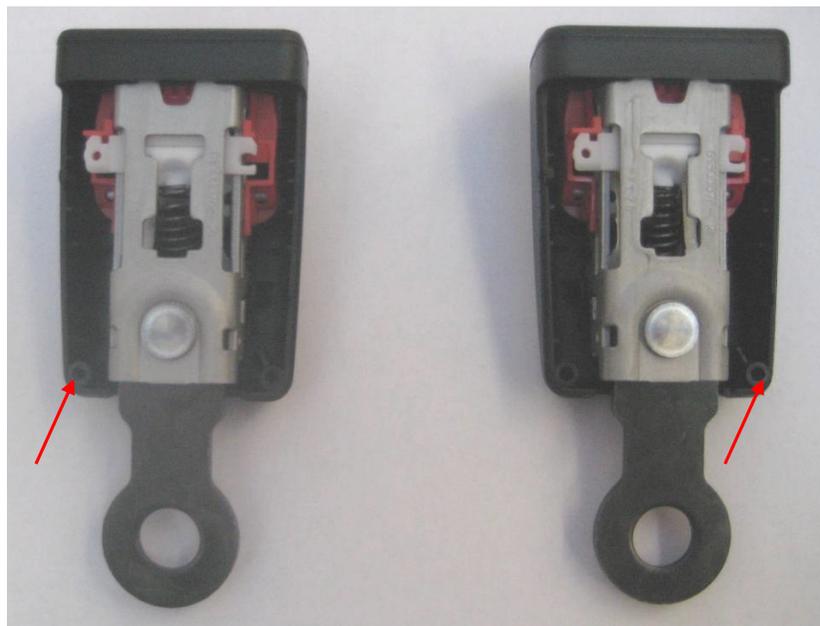


Bild 3.6 Kappen vor und nach Bearbeitung der Löcher

---

### 3.2.2 Einpressen der Stifte in die Gurtschlosskappen

Beim Einpressen der Stifte wird die erforderliche Kraft aufgezeichnet. Nach dem die Stifte vollständig eingepresst sind steigt die Kraft stark an, da die Stiftköpfe auf der Kappenoberfläche aufliegen. Um zu vermeiden, dass nicht diese Kräfte ausgegeben werden, sondern die tatsächlich für den Einpressvorgang benötigten Kräfte gibt es zwei Möglichkeiten.

Hat man die Möglichkeit den Kraftverlauf als Kurve aufzuzeichnen kann aus dieser Kurve abgelesen werden, wann die Kraft sprunghaft ansteigt. Der Wert für die Kraft kurz vor diesem Anstieg ist die gesuchte maximale Einpresskraft.

Da es mir im Versuchsaufbau nicht möglich war die Kurven aufzuzeichnen habe ich im Versuch eine alternative Möglichkeit gewählt die Einpresskraft zu messen. Die Presse mit der die Stifte in die Kappen eingepresst wurden wird so in der Höhe justiert, dass zwischen Stiftkopf und Kappe bei voller Hebelauslenkung noch ein minimaler Luftspalt von ca. 0,5mm bleibt. Somit entspricht die maximal aufgenommene Kraft der gesuchten Einpresskraft.

Nachdem alle Kappenpaare auf diese Weise verpresst worden sind, wird die Höheneinstellung der Presse verändert und die Stifte mit einer Kraft von 1000 Newton auf Block gedrückt.

### 3.2.3 Auswertung der Einpresskräfte

Die beiden Stifte werden nacheinander in die Kappen eingepresst. Hierbei fällt auf, dass der zuerst eingepresste Stift in neunzig Prozent aller Versuche geringere Einpresskräfte erfordert als der zweite Stift.

Im Mittel betragen die Einpresskräfte des ersten Stifts 323 Newton und des zweiten Stifts 353 Newton. Allerdings ist die Spannweite von niedrigstem zu höchstem Wert mit 143 beziehungsweise 115 Newton sehr groß.

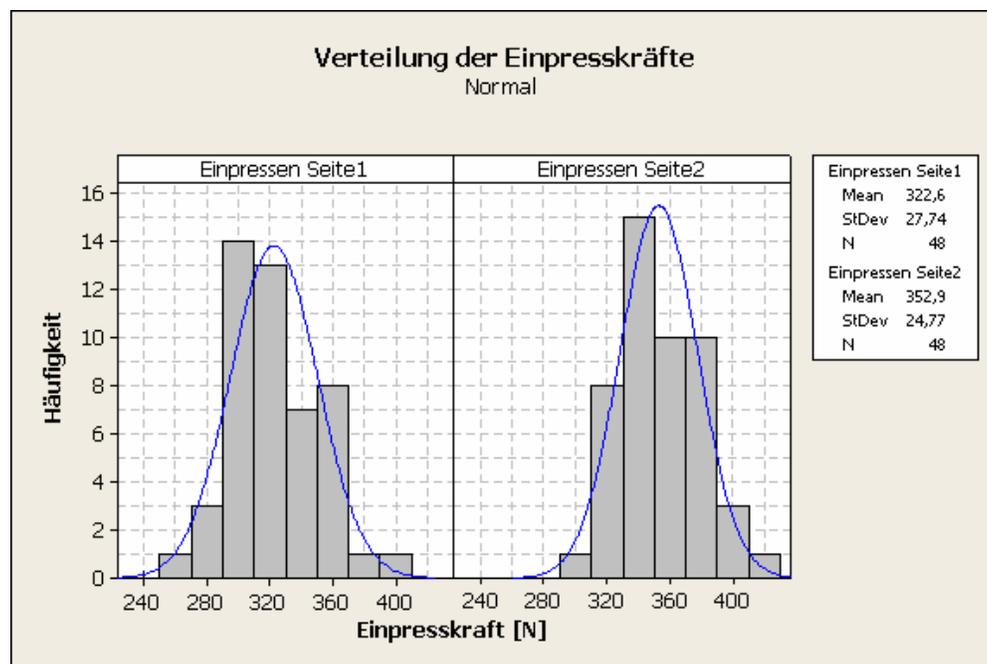


Bild 3.7 Diagramm Einpresskräfte in Schloßkappen

Um auszuschließen, dass es sich um einen systematischen Fehler handelt und die Bohrungen auf der linken Seite immer größer sind als auf der rechten Seite wurde bei der ersten Hälfte der Kappenpaare zuerst der linke und bei der anderen Hälfte zuerst der rechte Stift eingepresst.

Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass sich beim Einpressen des ersten Stifts die Löcher in Ober- und Unterkappen noch zentrieren können. Der zweite Stift hat diesen Freiheitsgrad nicht. Sind die Löcher nicht hundertprozentig deckungsgleich sind die Kräfte beim zweiten Stift folglich höher.

Das bei zehn Prozent der Kappenpaare trotzdem die Einpresskraft des ersten Stifts höher lag als beim zweiten Stift, lässt sich auf Ungenauigkeit bei der Nacharbeit der Löcher zurückführen. Da die Löcher in Serienkappen mit dem geforderten Durchmesser gespritzt werden, sollte dieser Fehler in der Serie nicht mehr auftreten. Ob dies so ist muss im Versuch mit Serienkappen abschließend validiert werden.

Neben Fehlern beim Aufweiten der Löcher kommt ein weiterer Einfluss beim Einpressen hinzu. Die Reibkraft zwischen Stift und Kappe ist abhängig von der Einpressgeschwindigkeit. Da die Stifte mit einer manuell betätigten Hebelpresse eingepresst worden sind, variiert die Einpressgeschwindigkeit. Je schneller die Stifte eingepresst werden, desto niedriger sind die benötigten Einpresskräfte.



Bild 3.8 Verpresstes Gurtschloss vor Zugversuch

### 3.2.4 Ermittlung der Kappenabzugskraft

Zur Ermittlung der Standardabweichung werden an den verpressten Schlosskappenpaaren auf Basis des Prüfverfahrens E115245 (s. Kapitel 2.4) die hinteren Kappenabzugskräfte gemessen.

Verschweißte Gurtschlosskappen werden mit der Oberkappe nach oben in die Abzugsvorrichtung eingelegt, sodass die Abzugskralle an der Oberkappe angreift. Diese Vorgehensweise ist bei den verschraubten Gurtschlössern in Versuchen als nicht sinnvoll erachtet worden. Daher werden verschraubte Gurtschlösser mit der Unterkappe nach oben in die Prüfvorrichtung eingelegt, sodass die Abzugskralle an der Unterkappe zieht.

Da ich in meinen Versuchsreihen Gurtschlosskappen verwende, die für die Verschraubung vorgesehen sind, sollte hier voraussichtlich auch an der Unterkappe gezogen werden. Um den Unterschied zwischen Zug an Ober- und an Unterkappe zu ermitteln werden beide Versuchsaufbauten getestet.

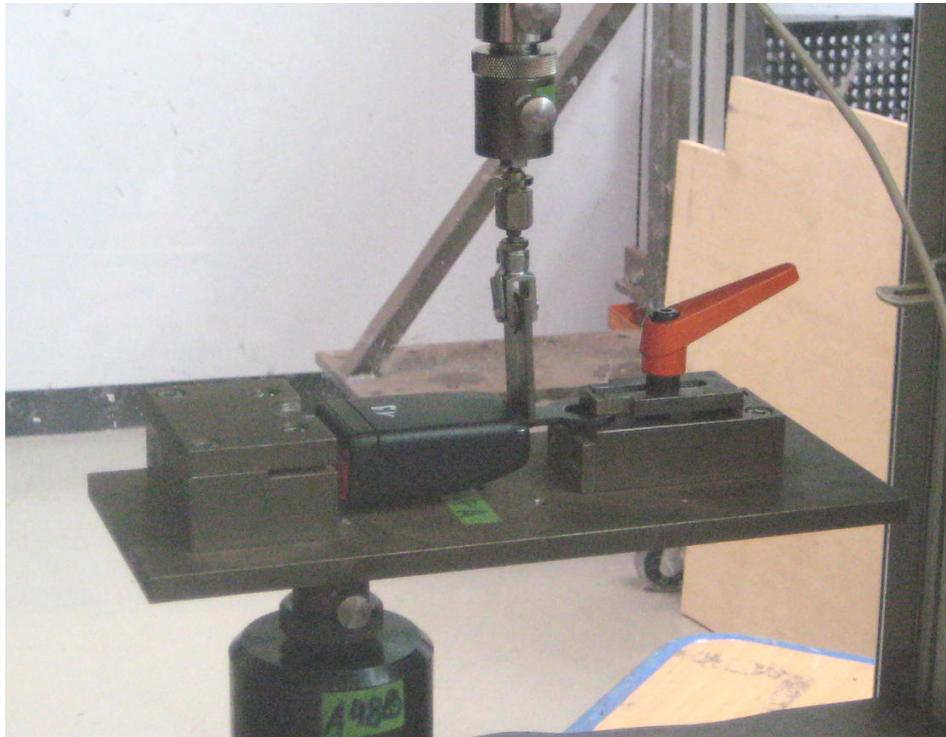


Bild 3.9 Gurtschloss in Abzugsvorrichtung eingelegt (Zug an Unterkappe)

Zunächst werden fünfzig verstiftete Gurtschlosskappen an der Oberkappe gezogen und anschließend nochmals fünfzig an der Unterkappe. In beiden Fällen versagt nicht die Stiftverbindung sondern das Kappenmaterial bricht an der Angriffsstelle der Abzugskralle.

### Ergebnisse Zug an Oberkappe

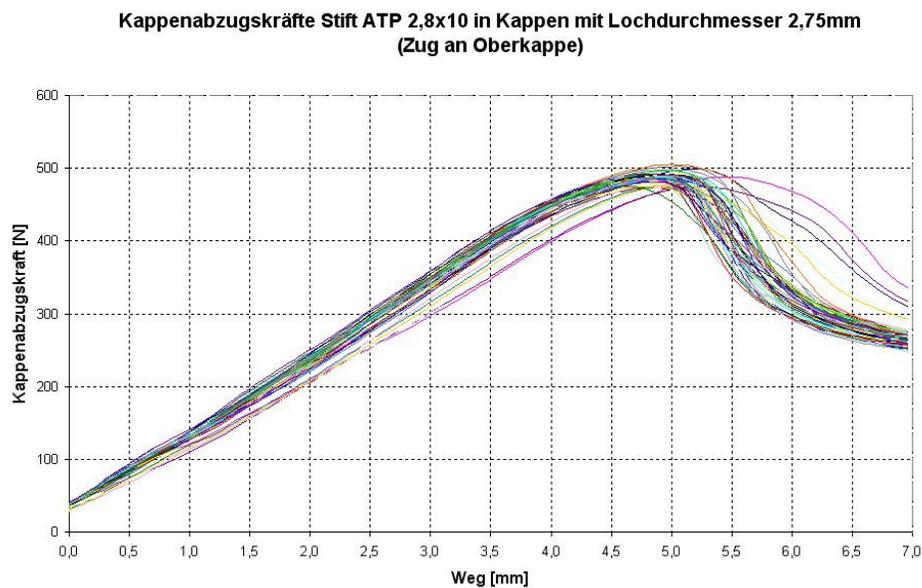


Bild 3.10 Verlauf der Kappenabzugskräfte (Zug an Oberkappe)

Der Kraftverlauf verläuft bis zu einer Auslenkung von ca. 5mm in z-Richtung nahezu linear bis die maximale Kappenabzugskraft erreicht ist. In diesem Punkt reißt die Oberkappe an der Kraftangriffsstelle auf und die Kraft fällt ab.

Die Kappenabzugskräfte liegen in einem Bereich von 473N bis 503N. Die Spannweite von 32N zwischen größtem und kleinstem Messwert ist sehr gering.

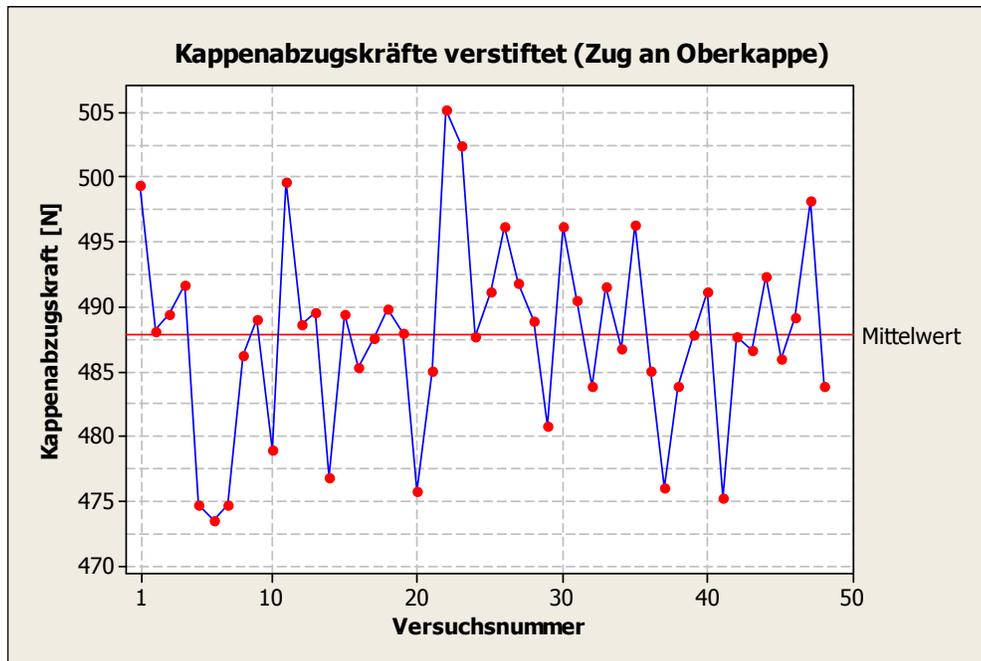


Bild 3.11 Diagramm maximale Kappenabzugskräfte (Zug an Oberkappe)

Mit den Formeln 2.4 bis 2.6 (s. Kapitel 2.3) lassen sich der Mittelwert, die Standardabweichung sowie die Streuung der Versuchsreihe bestimmen. Um dies nicht für jede Versuchsreihe manuell ermitteln zu müssen wird für die Auswertung der Versuchsergebnisse die Software Minitab verwendet.

Der Mittelwert der Messreihe liegt bei 488N und somit bereits ohne Optimierung der Einflussparameter weit über dem geforderten Mindestwert von 250N. Weiterhin ergeben sich aus den Versuchsergebnissen eine Standardabweichung von 7,36N sowie eine Varianz von 54,10N<sup>2</sup>. Diese Werte bilden die statistische Grundlage für das Aufstellen des Versuchsplans.

Eine Untersuchung der Verteilung der Messwerte ergibt, dass diese nicht normalverteilt sind. Dies wird auch bei der Betrachtung der grafischen Darstellung der Verteilung der Kappenabzugskräfte erkennbar. Die große Anzahl von Ergebnissen im Intervall um 475N und die geringe Anzahl von Ergebnissen im Intervall um 495N widersprechen einer Normalverteilung.

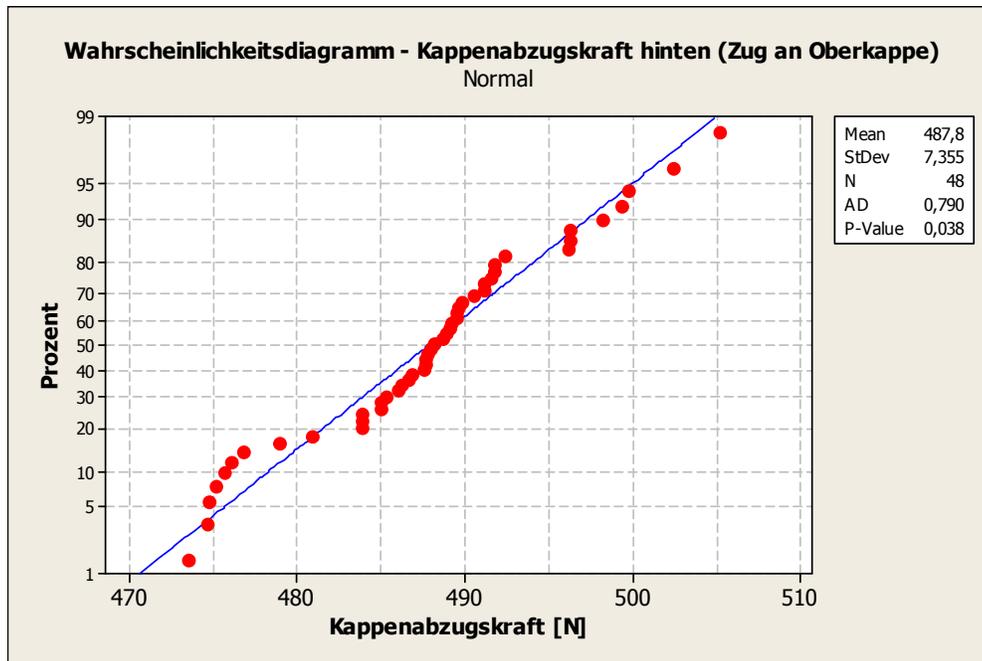


Bild 3.12 Diagramm Prüfung Normalverteilung - verstiftet - (Zug an Oberkappe)

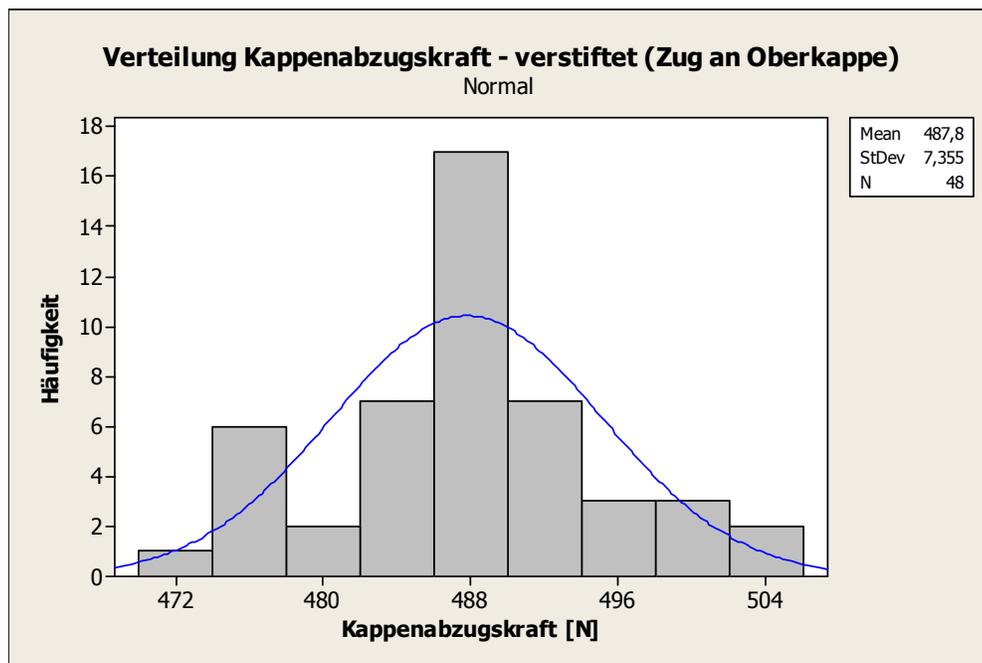


Bild 3.13 Diagramm Verteilung der Kappenabzugskräfte

## Ergebnisse Zug an Unterkappe

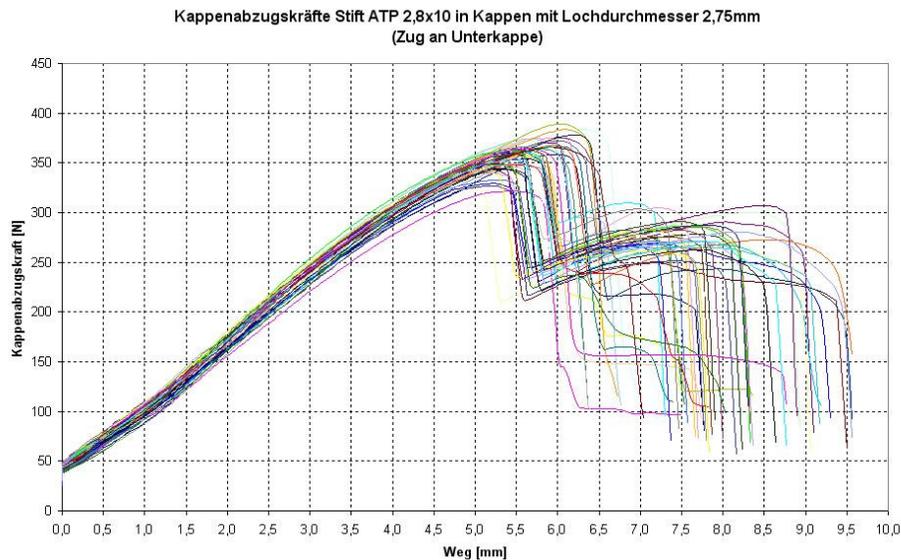


Bild 3.14 Verlauf der Kappenabzugskräfte (Zug an Unterkappe)

Die Messergebnisse beim Zug an der Unterkappe fallen niedriger aus als beim Zug an der Oberkappe. Die Kraft steigt langsamer an und erreicht nach ca. 6mm Zug in z-Richtung ihren Maximalwert bei dem die Kappe einreißt. Anschließend steigt die Kraft erneut an, bis die Abzugskralle aus der Unterkappe herausrutscht und die Kraft schlagartig abfällt.

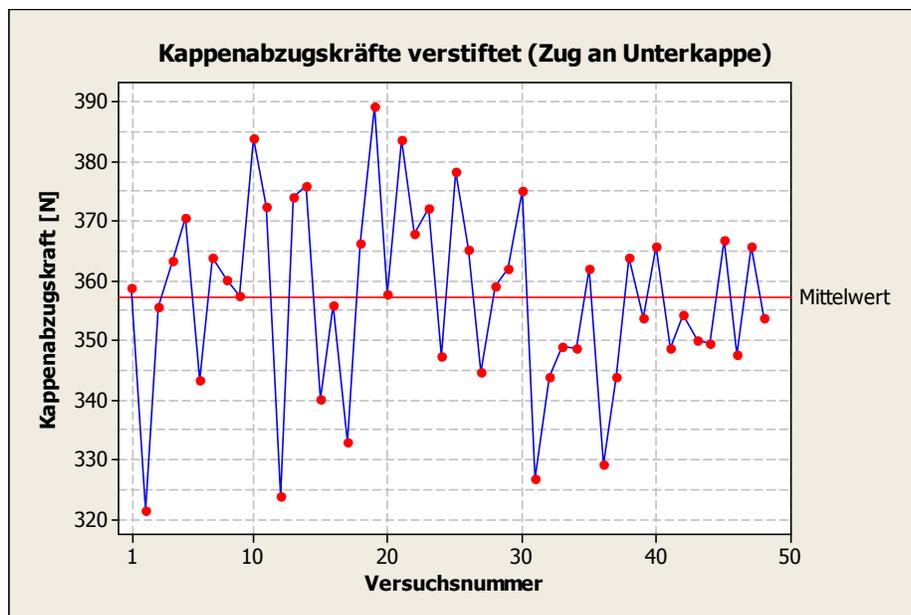


Bild 3.15 Diagramm maximale Kappenabzugskräfte (Zug an Unterkappe)

Die maximal erreichte Abzugskraft beträgt 389N. Die geringste Kraft erreicht 321N. Hieraus ergibt sich eine Spannweite von 68N.

Der Mittelwert beträgt 357N und liegt somit 131N niedriger als beim Zug an der Oberkappe. Die geforderte Mindestabzugskraft von 250N wird aber dennoch deutlich überschritten. Die Standardabweichung beträgt 15,56N sowie die Varianz 241,97N<sup>2</sup>. Die Überprüfung ergibt, dass die Messwerte normalverteilt sind.

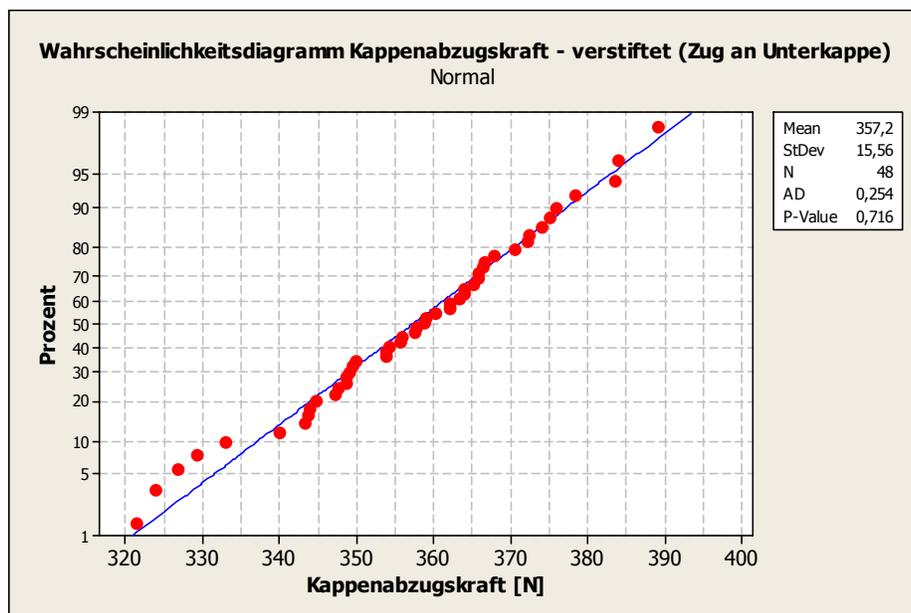


Bild 3.16 Diagramm Prüfung auf Normalverteilung (Zug an Unterkappe)

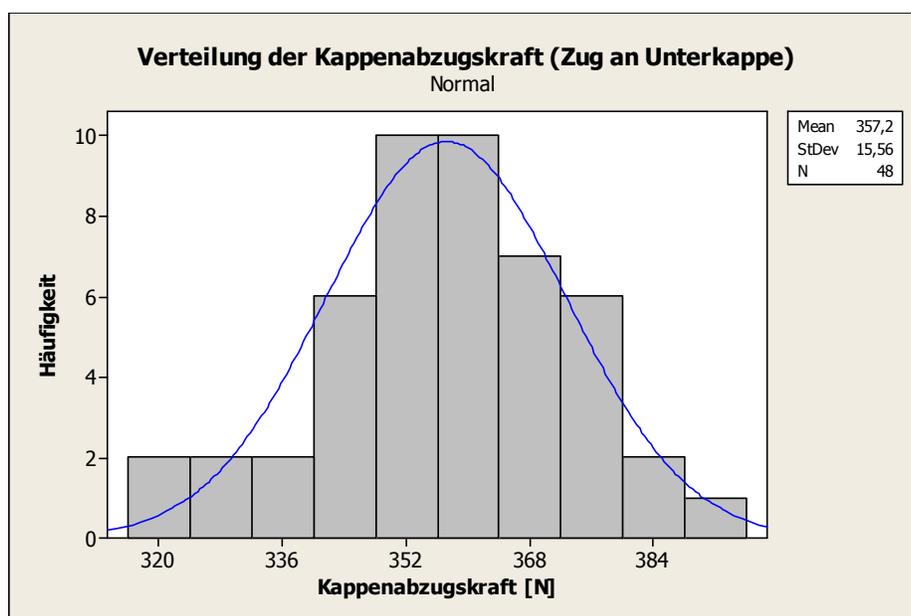


Bild 3.17 Diagramm Verteilung der Kappenabzugskräfte (Zug an Unterkappe)

### 3.2.5 Vergleich mit bisher verwendeten Fügeverfahren

Um zu prüfen, ob die Ergebnisse von verstifteten Kappen mit denen von verschraubten Kappen vergleichbar sind, werden jeweils fünf verstiftete und fünf verschraubte Gurt-schlösser an Ober- und Unterkappe nach dem gleichen Prüfverfahren wie bei der Ermittlung der statistischen Einflussgrößen gezogen.

Zunächst wird mit Minitab ein vollfaktorieller Versuchsplan erstellt. Als Einflussparameter werden die Verbindungsart und die Angriffsrichtung der Abzugskralle definiert. Beide Parameter haben jeweils zwei Stufen. Bei der Verbindungsart wird zwischen Schraube und Stift unterschieden, bei der Angriffsrichtung zwischen Zug an der Ober- und an der Unterkappe.

Für jede der möglichen Stellungen werden fünf Wiederholungen definiert, sodass ein Versuchsumfang von zwanzig Versuchen resultiert. Aus den ermittelten Werten wird eine mittlere Standardabweichung bestimmt, die bei der Auswertung des Versuchsplans zu Grunde gelegt wird.

Auf Basis der Standardabweichung, der Anzahl der Wiederholungen, sowie der tolerierten Fehlerwahrscheinlichkeit von fünf Prozent kann die Aussagekraft der Ergebnisse berechnet werden.

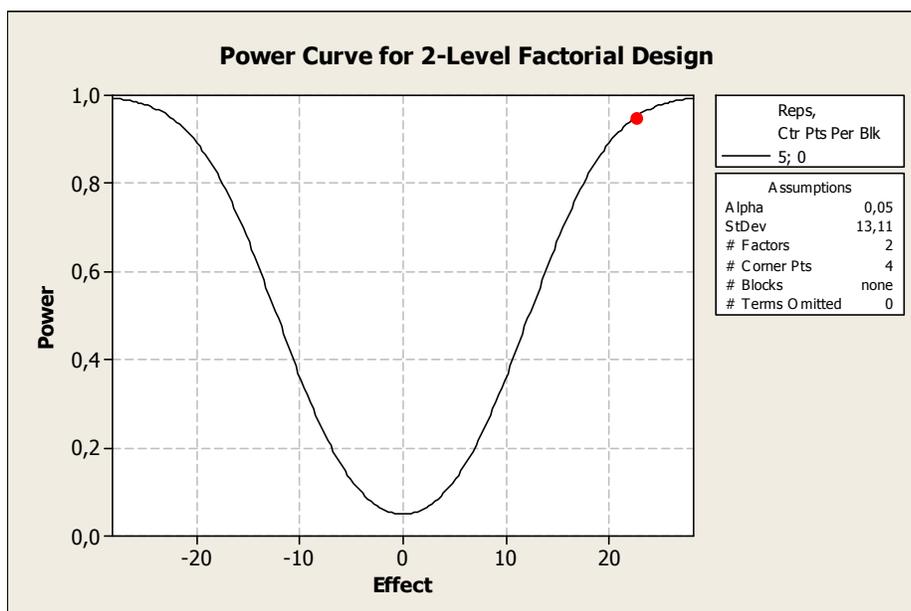


Bild 3.18 Diagramm Aussagekraft der Ergebnisse

Aus den von uns definierten Parametern ergibt sich mit einer Aussagekraft von 95 Prozent eine Ergebnisgenauigkeit von 23N.

Mit der in Minitab integrierten Funktion zur Auswertung der Messergebnisse kann dargestellt werden, wie weit die einzelnen Messwerte von ihrem jeweiligen Mittelwert abweichen. Dies zeigt die Güte der Versuche. Im aktuellen Versuch liegt die maximale Abweichung bei 17,5N und somit noch deutlich unterhalb der vorher ermittelten Ergebnisgenauigkeit von 23N.

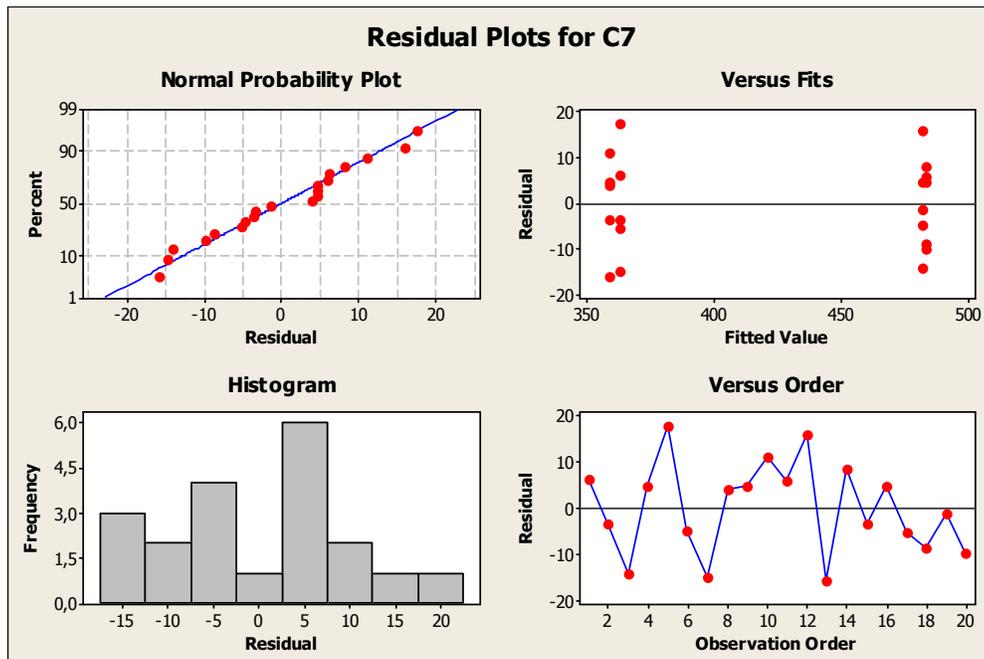


Bild 3.19 Abweichung der Messwerte von den Mittelwerten

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die Abweichungen normalverteilt sind. Da den Werkzeugen zur Auswertung eine Normalverteilung zugrunde liegt, sollte dies gewährleistet sein. Der P-Wert beträgt 0,573 und liegt somit deutlich oberhalb der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha=0,05$ , sodass die Ergebnisse als normalverteilt angesehen werden können.

Betrachtet man nun welchen Einfluss die beiden Variablen Design und Kraftangriffspunkt haben, so kann man sehr deutlich erkennen, dass das Design nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Unterschiede zwischen Zug an der Unter- und Zug an der Oberkappe sind allerdings hoch.

Somit kann als Fazit aus den Versuchen mit den serienmäßigen K12E Kappen gezogen werden, dass die Unterschiede zwischen Stift- und Schraubverbindung nicht signifikant sind, da nicht die Verbindung, sondern die Kappe versagt.

Betrachtet man hingegen verschweißte Gurtschlosskappen so stellt man fest, dass das ertragbare Lastniveau um die Hälfte niedriger liegt. Dies begründet sich darin, dass hier nicht die Kappen sondern die Schweißverbindung zuerst versagt. Auch die Streuung der Messergebnisse liegt wesentlich höher als bei verstifteten beziehungsweise verschraubten Kappen.

Im Folgenden sind Messergebnisse von verschweißten Standardkappen dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus einer Versuchsreihe, die im Rahmen einer Diplomarbeit zur Optimierung der Schweißverbindung von Gurtschlosskappen durchgeführt wurde.

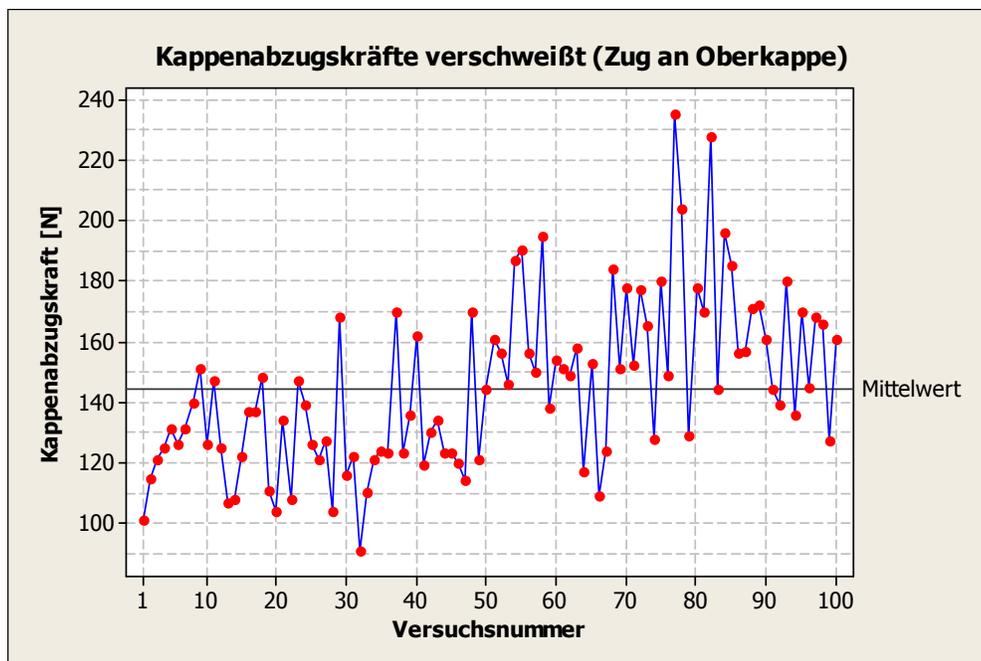


Bild 3.20 Diagramm Kappenabzugskräfte – verschweißte

Die maximal erreichte Kappenabzugskraft beträgt 235N. Die geringste ermittelte Kappenabzugskraft erreicht gerade mal 91N. Hieraus resultiert eine Spannweite von 144N. Die gemessenen Kappenabzugskräfte liegen in dieser Konfiguration somit alle unterhalb der an das Projekt gestellten Mindestabzugskraft von 250N.

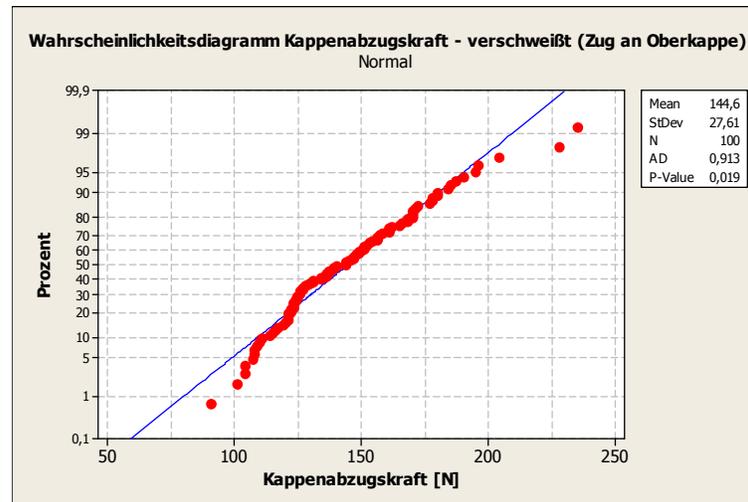


Bild 3.21 Diagramm Prüfung Normalverteilung – verschweißt

Die Prüfung auf eine Normalverteilung der Ergebnisse fällt mit einem P-Wert von 0,019 negativ aus. Die Standardabweichung erreicht einen Wert von 27,61N:

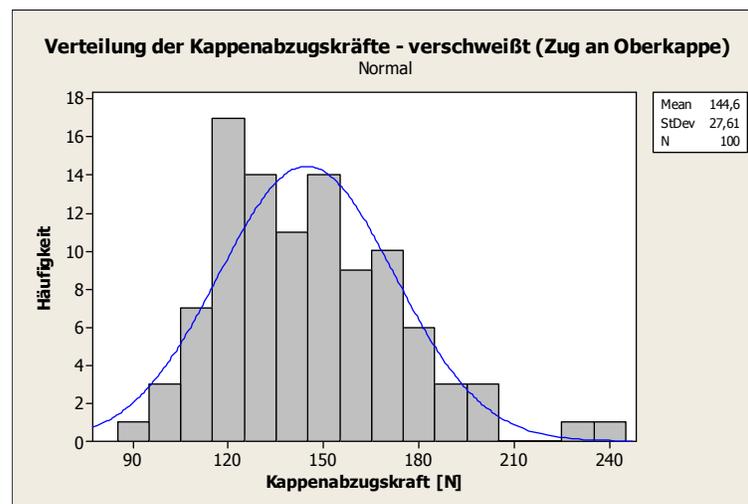


Bild 3.22 Verteilung der Kappenabzugskräfte – verschweißt

Da die Ergebnisse von verschweißten Kappen zu stark von verschraubten beziehungsweise verstifteten Kappen abweichen, werden im weiteren Verlauf des Projekts keine verschweißten Gurtschlosskappen mehr berücksichtigt.

Als Referenz für den Raststift wird die Schraubverbindung angenommen. Dies hat zur Folge, dass bei den Vorversuchen neben den Raststiften auch die Serienschrauben mit getestet werden.

---

### 3.3 Vorversuch – Einfluss des Lochdurchmessers

In diesem Versuch wird untersucht welchen Einfluss der Bohrungsdurchmesser in der Unterkappe auf die Einpress- und Abzugskräfte haben.

Vom Anbieter der Raststifte wird für den zur Verfügung stehenden Stift mit einem Nenn-durchmesser von 2,8mm ein Bohrungsdurchmesser von 2,75mm angegeben. Es wird aber darauf hingewiesen, dass dies ein berechneter Wert ist und je nach Material geringfügig abweichen kann.

Für diesen Versuch werden keine Gurtkappen verwendet, sondern Blöcke aus dem Material die in der Gurtschlossfertigung zum Einsatz kommen. Hierbei handelt es sich um zwei ABS Materialien mit den Bezeichnungen LG Chem XR409H und Polylac 777B, sowie ein PP Material mit der Bezeichnung SAMSUNG BJ550.

Auf Basis einer Bohrschablone werden in die Testblöcke Bohrungen mit den Durchmessern 2,6mm, 2,65mm, 2,7mm, 2,75mm, 2,8mm und 2,85mm eingebracht. In diese werden die Raststifte im Folgenden eingepresst. Dies geschieht mit der im ersten Vorversuch verwendeten Handhebelpresse. Anschließend werden die Stifte und mit einer Zugvorrichtung (Zwick, Typ 1484) aus den Blöcken herausgezogen.

Der Bohrungsdurchmesser bleibt auch im späteren Versuchsplan ein veränderlicher Parameter, da es zu Wechselwirkungen mit anderen Parametern kommen kann. Allerdings wird hier das Ergebnis des Vorversuchs als Basis für zu prüfenden Durchmesser verwendet.

### 3.3.1 Versuchsvorbereitung

Zur Ermittlung von Abzugskräften an Gurtschlosskappen gibt es genormte Abzugskralen. Um aber die Raststifte mit der Abzugsvorrichtung ziehen zu können ist ein Adapter zum Angriff am Stiftkopf erforderlich. Da kein entsprechender Adapter vorhanden war, muss dieser zunächst angefertigt werden. Hierzu wird ein CAD-Modell mit CATIA V5 erstellt und eine technische Zeichnung abgeleitet. Auf Basis dieser Daten fertigt der firmeninterne Musterbau den Adapter an.

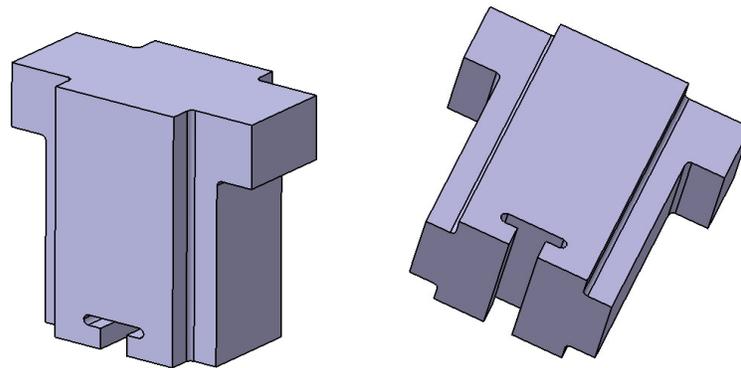


Bild 3.23 CAD Modell Adapter für Zugversuch

Dieser Adapter wird anschließend in die Abzugsvorrichtung eingelegt. Somit besteht nun die Möglichkeit die Stifte zu ziehen.



Bild 3.24 Abzugskralle mit eingelegtem Adapter

Die weiteren Vorbereitungen beziehen sich auf die Kunststoffblöcke, aus denen die Stifte und Schrauben herausgezogen werden sollen. Auch hier wird ein CAD Modell des gewünschten Kunststoffblocks erstellt. Basierend hierauf wird eine Spritzgussform hergestellt, in der die Versuchsblöcke in den drei Materialien abgespritzt werden.

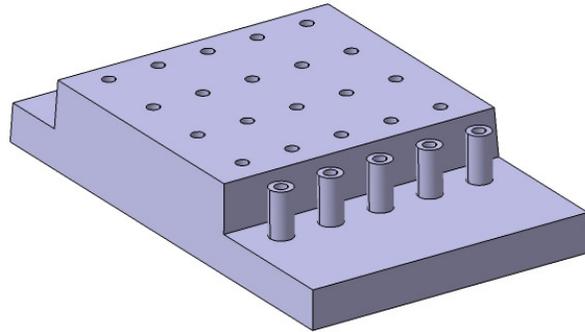


Bild 3.25 CAD Modell Kunststoffblock

In einem Teil der Kunststoffblöcke sind Dome mit einem Durchmesser von 5mm angespritzt. Dies soll die Dome der Gurtschlosskappen simulieren. Durch den Vergleich der Abzugskräfte aus dem Dom und aus dem Vollmaterial soll geprüft werden, wie groß der Einfluss der Verwendung von Vollmaterial in diesem Versuch ist.

Für den Zugversuch wird die Oberfläche plan geschliffen und die Bohrungen werden eingebracht. Die Bohrungen werden geringfügig kleiner als der gewünschte Lochdurchmesser ausgeführt und die Löcher anschließend auf das Endmaß aufgerieben, um eine glatte Oberfläche innerhalb der Löcher zu gewährleisten.

Es ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen den Bohrungen so groß gewählt wird, dass die Abzugskralle nicht mit einem benachbarten Stift kollidieren kann. Aus der Größe der Abzugskralle ergibt sich ein Mindestlochabstand von 15mm in eine und 11mm in die andere Richtung.

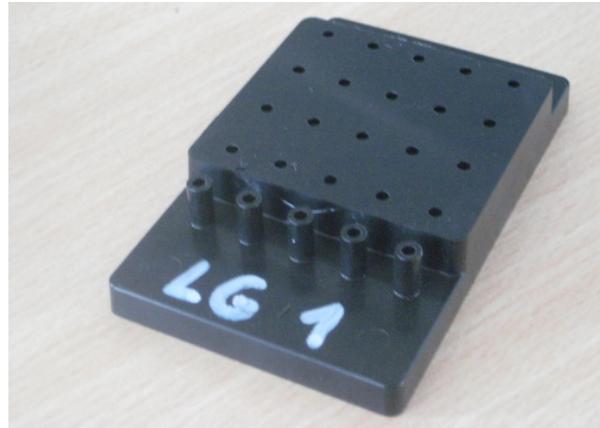


Bild 3.26 Gebohrter Kunststoffblock

### 3.3.2 Versuchsdurchführung

Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen muss die Klemmlänge bei allen Versuchen identisch sein. Daher ist es erforderlich alle Stifte gleich tief in die Platte einzupressen. Die Zugkralle benötigt einen Mindestabstand von 2,5 mm zwischen Stiftkopf und Plattenoberfläche um in Eingriff zu kommen. Um diesen Abstand zu gewährleisten wird beim Einpressen der Stifte ein U-förmiger Distanzhalter um die Bohrung auf die Plattenoberfläche gelegt.

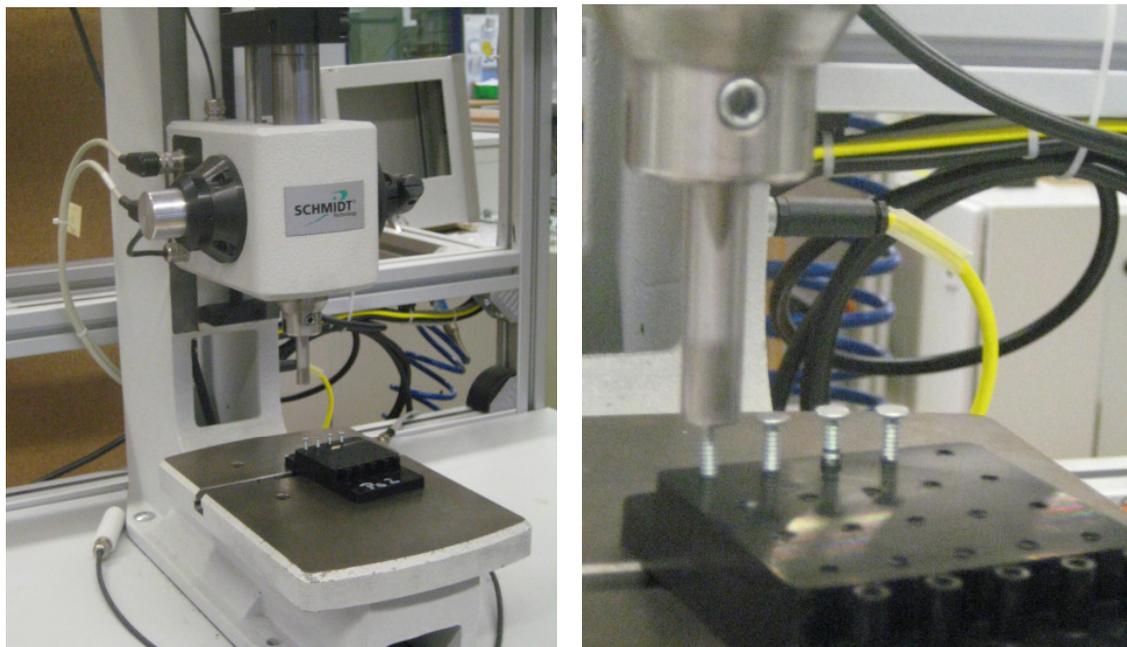


Bild 3.27 Einpressen des Stifts in Kunststoffplatte

Während des Einpressens der Stifte wird die erforderliche Einpresskraft aufgezeichnet. Diese ist für den Projekterfolg zwar nicht relevant, für die später mögliche Fertigung aber wichtig.

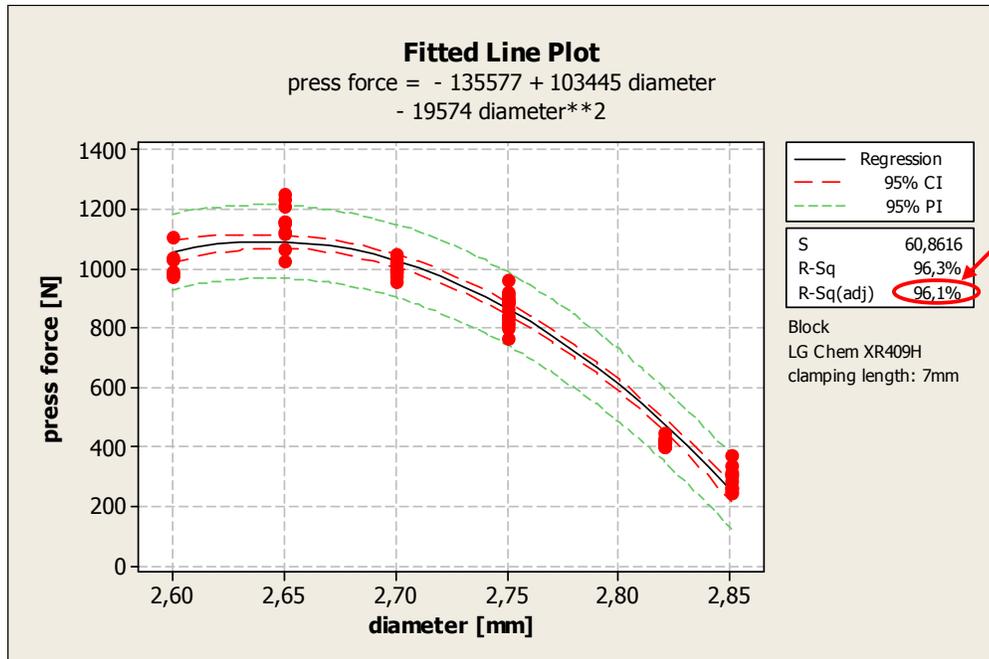


Bild 3.28 Diagramm Einpresskraft / Lochdurchmesser

Die fertig bestückte Kunststoffplatte wird in der Zugvorrichtung fest eingespannt. Die Einspannung erfolgt in Aluminiumprofilen, die das Verschieben der Blöcke in eine Richtung zulassen. Dieser Aufbau ermöglicht es immer fünf Raststifte einer Reihe zu ziehen, bevor die Spannplatte neu ausgerichtet werden muss.

Um möglichst viele Raststifte pro Kunststoffblock testen zu können, wurde der Lochabstand so gering gewählt, dass die Abzugskralle einen Stift gerade noch ziehen kann ohne durch die anderen Stifte behindert zu werden. Bei ungenauer Ausrichtung der Kralle war es aber dennoch möglich zwei Stifte gleichzeitig heraus zu ziehen. Da dies das Messergebnis erheblich verfälscht muss es durch sorgfältige Ausrichtung der Kralle zum Raststiftkopf vermieden werden.

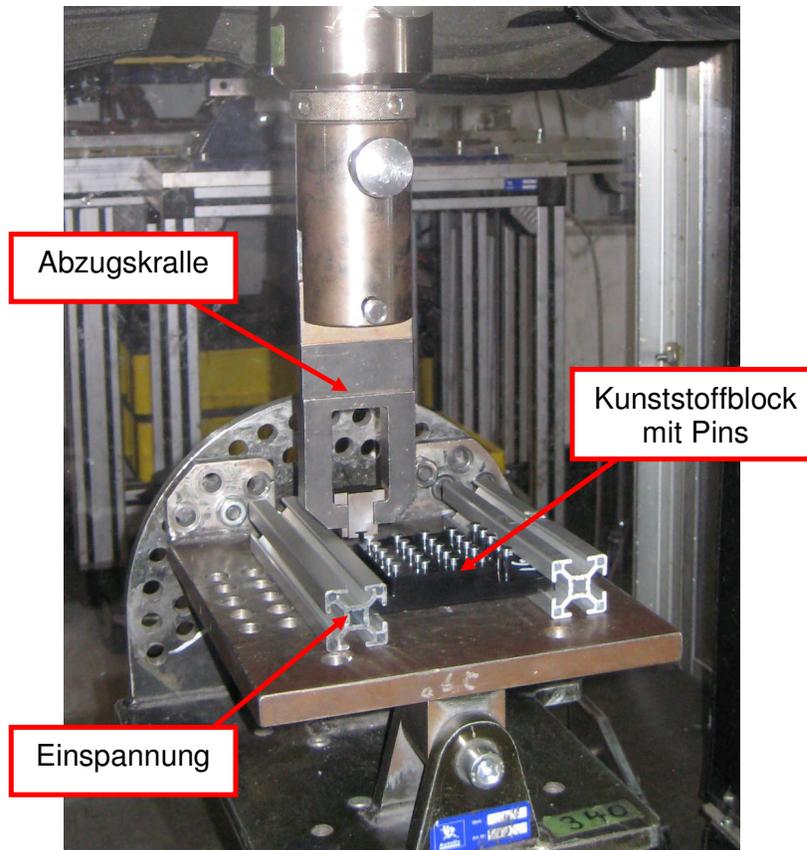


Bild 3.29 Zugvorrichtung fertig bestückt

Die Abzugskralle wird über den Stiftkopf gelegt und die Zugvorrichtung gestartet. Diese zieht den Stift mit einer definierten Geschwindigkeit von 100mm/min in z-Richtung aus der Platte heraus. Hierbei wird die Kraftkurve aufgezeichnet. Um verwertbare Ergebnisse zu erzielen ist es wichtig, dass sich der herauszuziehende Stift genau senkrecht unter der Abzugskralle befindet.

### 3.3.3 Auswertung der Auszugskraft

Die resultierenden Maximalwerte der Abzugskraft werden in einem Kraft / Durchmesser Diagramm aufgetragen. Legt man eine Regressionskurve durch die Messwerte, so erhält man eine Kurve aus der man ablesen kann bei welchem Lochdurchmesser die höchsten Abzugskräfte erreicht werden.

Zunächst wird untersucht, wie hoch die Ordnung der Regressionsfunktion sein muss um die Versuchsergebnisse optimal wiederzugeben. Minitab ermöglicht maximal Regressionsfunktionen dritter Ordnung.

Für alle drei Materialien ergibt sich jeweils ein quadratischer Verlauf der Regressionsfunktion.

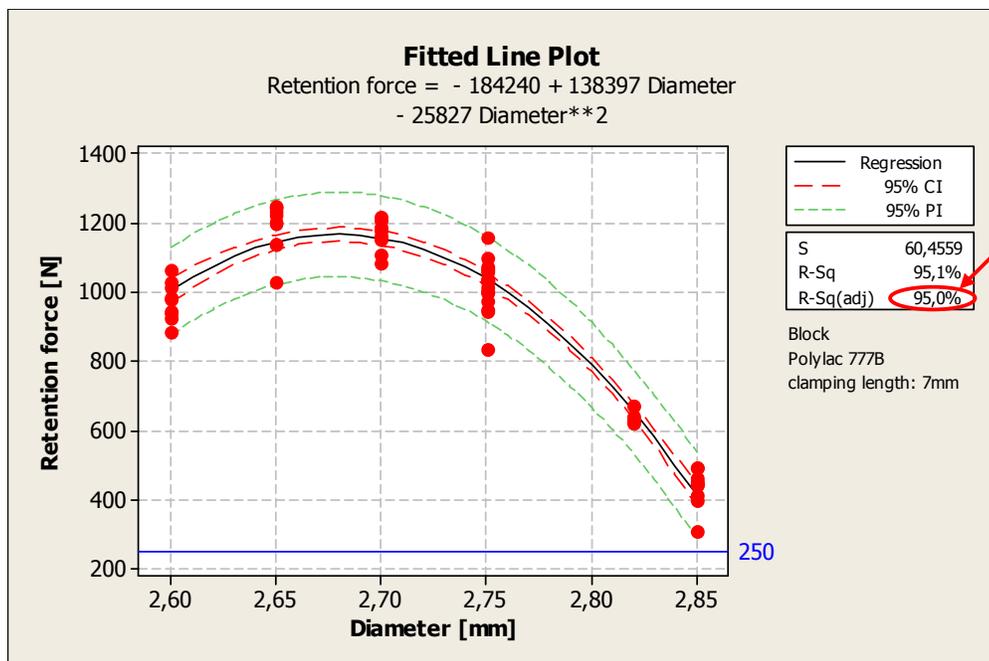


Bild 3.30 Diagramm Einfluss Lochdurchmesser Polylac 777B (ABS)

Aus dem Diagramm ergibt sich, dass die Abzugskraft bei einem Durchmesser von 2,67mm mit einem mittleren Wert von 1150N für das Polylac 777B Material maximal wird. Der Wert von 2,67mm weicht deutlich von dem vom Hersteller mit 2,75mm empfohlenen Lochdurchmesser für ABS Kunststoff ab. Dies zeigt, wie wichtig es ist theoretisch ermittelte Werte in der Praxis zu prüfen.

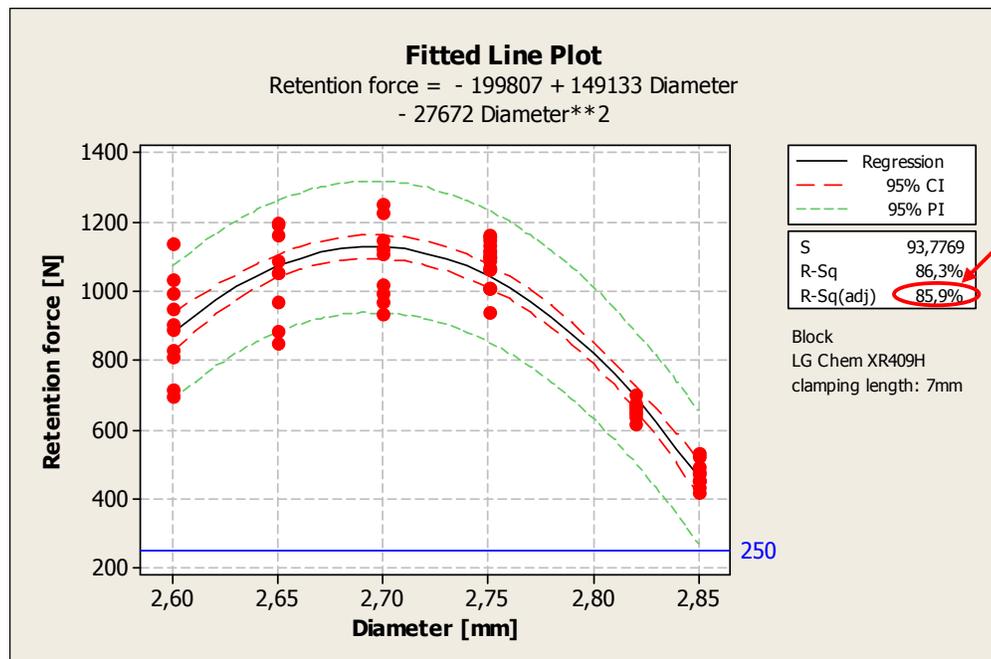


Bild 3.31 Diagramm Einfluss Lochdurchmesser LG Chem XR409H (ABS)

Bei den Blöcken aus LG Chem XR409H erreicht die Auszugskraft bei einem Durchmesser von 2,7mm mit einem mittleren Wert von 1100N ihr Maximum. Der Wert von 2,7mm weicht nicht so stark von dem vom Hersteller mit 2,75mm empfohlenen Lochdurchmesser ab.

Da der Abfall der ertragbaren Last ab einem Lochdurchmesser von 2,8mm deutlich sichtbar wird dieser Bereich in der DoE nicht weiter geprüft.

Bei Lochdurchmessern von 2,6mm und kleiner ist der Abfall der ertragbaren Auszugskräfte zwar nicht so stark zu verzeichnen, allerdings steigen die Einpresskräfte so stark an, dass nur der Bereich von 2,65mm bis 2,75mm als Betrachtungsraum für die DoE berücksichtigt werden muss.

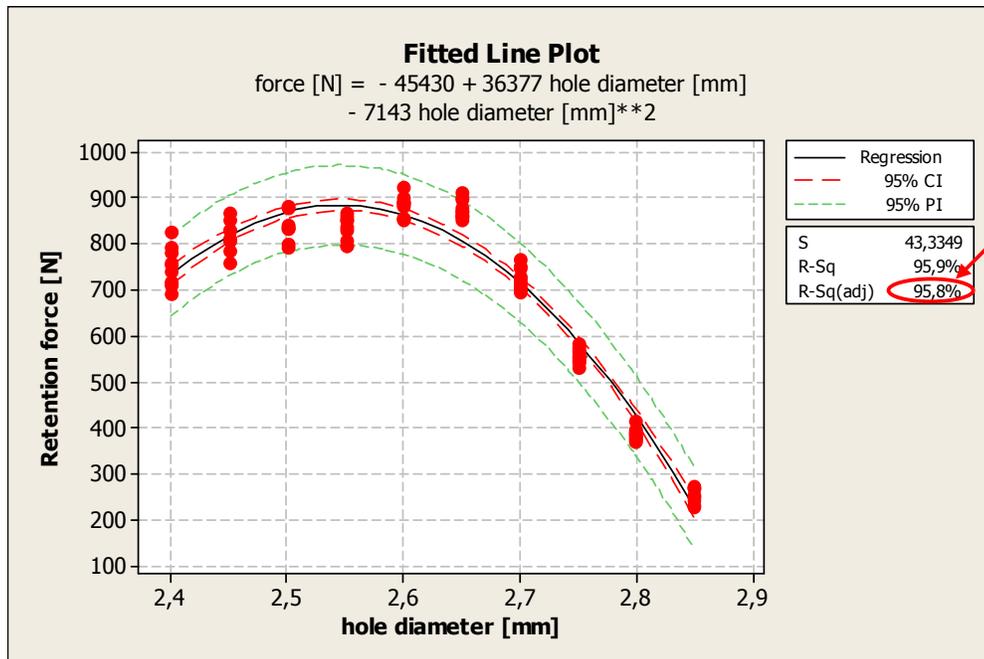


Bild 3.32 Diagramm Einfluss Lochdurchmesser Samsung BJ550 (PP)

Die Auszugskräfte aus den PP-Testblöcken liegen auf einem niedrigeren Niveau als die Auszugskräfte aus den ABS Materialien. Das Maximum wird bereits bei 885N im Mittel erreicht.

Zunächst wurde parallel zu den ABS Materialien der Wertebereich von 2,6mm bis 2,8mm untersucht. Da die Maximalkraft bei einem Lochdurchmesser von 2,6mm erreicht wird muss der Versuchsraum auf kleinere Durchmesser erweitert werden. Somit kann ausgeschlossen werden, dass sich das Maximum der Auszugskraft außerhalb des untersuchten Wertebereichs liegt.

Auch nach der Erweiterung des Wertebereichs erreicht die Auszugskraft ihr Maximum bei 2,6mm Lochdurchmesser. Sodass der zunächst betrachtete Wertebereich für weitere Versuche ausreichend ist.

Analog zu den beiden ABS Materialien ist bei größerem Lochdurchmesser ein deutlicher Abfall der Auszugskraft erkennbar.

### 3.3.4 Ermittlung Auszugskraft Schrauben (Serienstand)

Um einen Vergleich der Verbindungselemente Stift und Schraube zu erhalten werden auch die beim verschraubten Gurtschloss zum Einsatz kommenden Serienschrauben aus den Prüfblöcken gezogen. Der Bohrungsdurchmesser für die selbstschneidenden Schrauben beträgt wie in den Serienkappen 2,1mm und wird nicht variiert. Auch das Anzugsdrehmoment der Schrauben wird vom Serienwerkzeug übernommen.

Da für die Schrauben ebenfalls kein Auszugswerkzeug vorhanden ist, wird das CAD-Modell des Stiftauszugadapters an der Aufnahmestelle modifiziert und ein weiterer Adapter im Musterbau angefertigt.

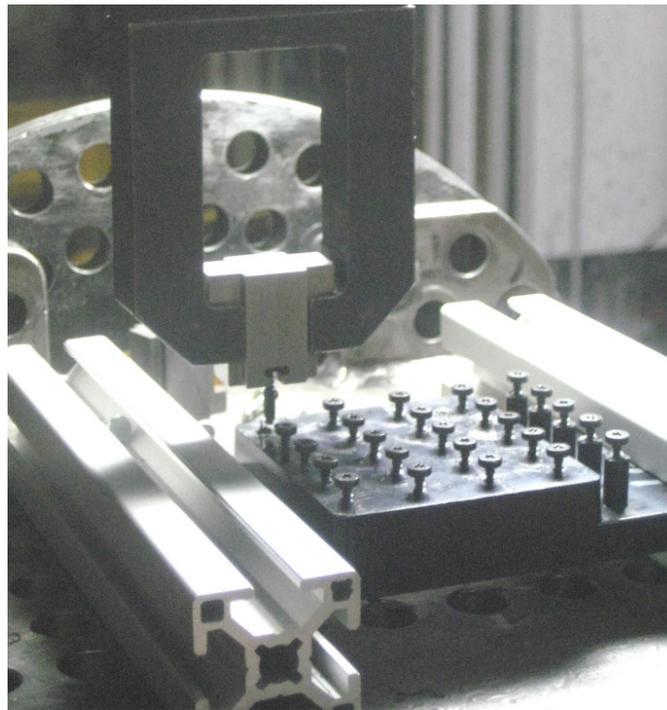


Bild 3.33 Eingespannter Testblock mit eingedrehten Schrauben

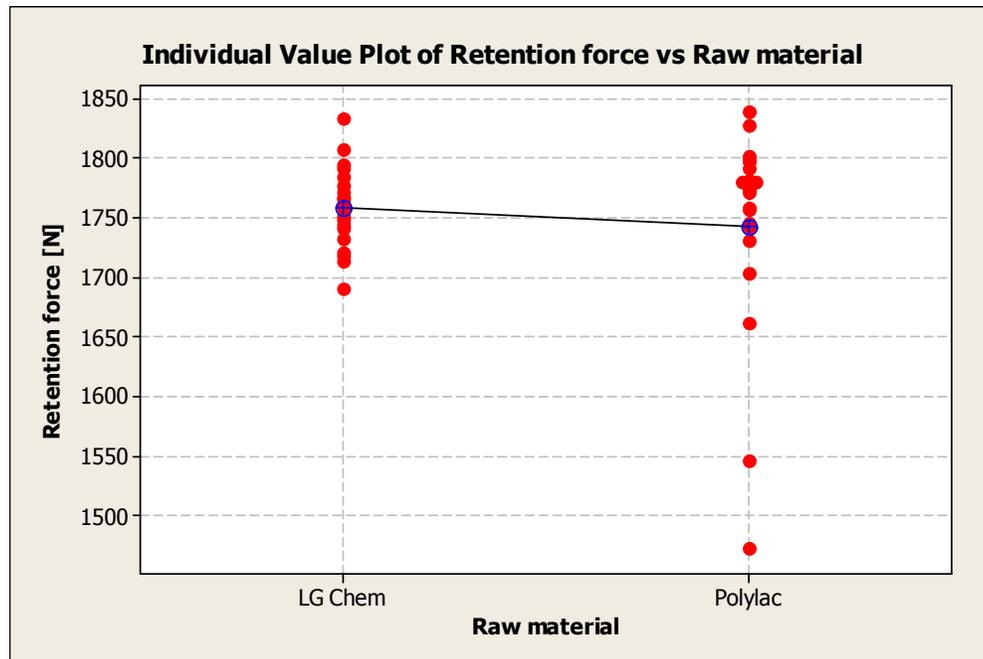


Bild 3.34 Vergleich Schraubenauszugskraft in Bezug auf Material

Betrachtet man die Verteilung der ertragbaren Lasten, so stellt man keine großen Unterschiede im Vergleich der beiden Materialien fest. Lediglich die Streuung der Werte ist beim Polylac größer.

Der t-Test ergibt einen P-Wert von 0,477 und somit kann davon ausgegangen werden, dass beide Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit stammen und somit bei den Schrauben kein signifikanter Materialeinfluss besteht.

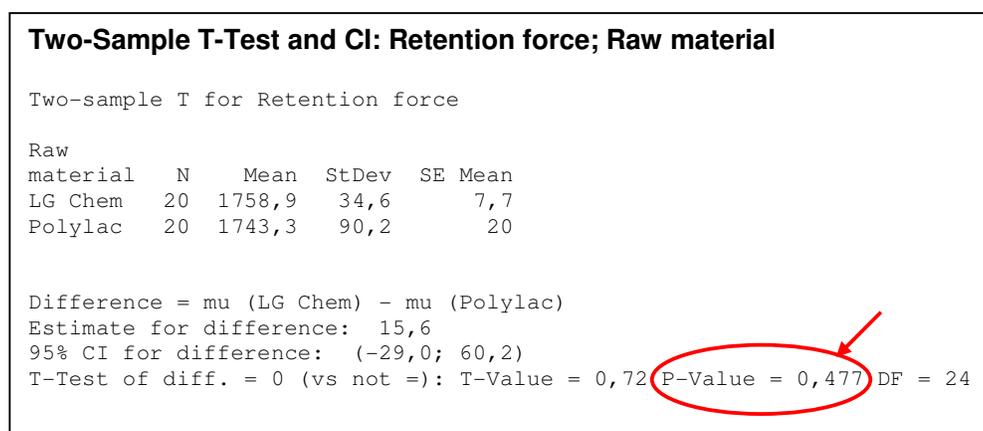


Bild 3.35 2-t-Test Einfluss Blockmaterial auf Auszugskraft

### Vergleich der Auszugskräfte von Schrauben und Raststiften

Im Vergleich der Kraftverlaufskurven der Auszugskräfte von Schraube und Raststift erkennt man Unterschiede. Zwar steigt die Kraft in beiden Kurven annähernd linear bis zur Maximalkraft an, die Steigung ist aber verschieden.

Der Kraftverlauf der Schraubverbindung erreicht früher seine Maximalkraft hält das erreichte Kraftniveau kurzzeitig, um dann anschließend steil abzufallen. Der Anstieg der Kraftverlaufskurve der Stiftverbindung ist flacher und erreicht später sein Maximum. Nach Erreichen der Maximalkraft fällt die Kraftkurve aber sofort steil ab.



Bild 3.36 Vergleich Kraftverlauf Auszugskraft Schraube und Raststift

Das leicht unterschiedliche Verhalten bis zum Erreichen der Maximalkraft kann aus dem verwendeten Versuchsaufbau nicht geklärt werden, ist aber auch nicht der entscheidende Punkt dieses Versuchs. Interessanter sind der Vergleich der ertragbaren Maximallasten sowie das Verhalten beim Versagen.

Beim Vergleich der maximalen Lasten erträgt die Schraubverbindung circa 12 Prozent höhere Werte. Dieser Unterschied ist auf die stärker konturierten Flanken der Schrauben zurückzuführen. Der Abfall beider Kurven ist vergleichbar, sodass in beiden Fällen von der gleichen Versagensart ausgegangen werden kann.

### 3.3.5. Unterscheidung Zug aus Vollmaterial und Dom

Beim Auszug der Stifte aus dem Vollmaterial werden mit Ausnahme des Durchmessers 2,85mm Auszugskräfte oberhalb von 600N erreicht. Die Dome haben eine Belastungsgrenze, bei der sie vom Block abreißen. Die maximal ertragbare Last ist je nach Material unterschiedlich. Bei den Blöcken aus dem härteren LG Chem Material reißt der Dom bereits bei einer Kraft von ca. 580N ab. Das etwas weichere Polylac 777B Material erträgt Zuglasten von ca. 630N.

In den meisten der untersuchten Fälle versagt der Dom und nicht die Verbindung zwischen Stift und Dom. Somit gibt es nur wenige vergleichbare Daten und die Ergebnisse aus dem Vollmaterial können nur bedingt auf die Dome übertragen werden.

Bei großen Durchmessern oder kleinen Klemmlängen bei denen vereinzelt der Stift aus dem Dom herausgezogen wurde bevor dessen Belastungsgrenze erreicht wurde, lagen die Kräfte aus dem Vollmaterial immer oberhalb der ertragbaren Auszugskräfte aus dem Dom.

Bei einem Lochdurchmesser von 2,8mm erreichen die Auszugskräfte aus dem Polylac 777B Vollmaterial Werte von 620 bis 670N. Aus den Domen desselben Blocks werden Auszugskräfte zwischen 570 und 620N ermittelt. Dies entspricht im Mittel einer ertragbaren Last der Dome von 93,5 Prozent des Vollmaterials.

Die Auszugskräfte aus dem LG Chem XR409H Block verhalten sich bei gleichem Lochdurchmesser ähnlich. Auch hier liegen die Auszugskräfte aus dem Vollmaterial mit 620 bis 700N oberhalb der Kräfte im Dom. Hier wurden beim Herausziehen der Stifte Werte zwischen 550 und 575N gemessen. Somit werden im Mittel 86,7 Prozent der Last erreicht.

Ob das Verhältnis zwischen den ertragbaren Lasten von Vollmaterial zu Dom generell bei ca. 90 Prozent liegt und somit direkt vom Vollmaterial auf den Dom zurück geschlossen werden kann, wird der Vergleich bei variierenden Klemmlängen im folgenden Kapitel klären.

### 3.3.6 Einfluss des Kappenmaterials

Im ersten Schritt werden nur die beiden ABS Materialien miteinander verglichen. Anschließend wird das ABS Material LG Chem XR409H mit dem PP Material Samsung BJ550 verglichen.

#### Vergleich LG Chem XR409H mit Polylac 777B

Um den Einfluss des Kappenmaterials zu ermittelt gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zunächst wird im Boxplot nach optischen Merkmalen gesucht.

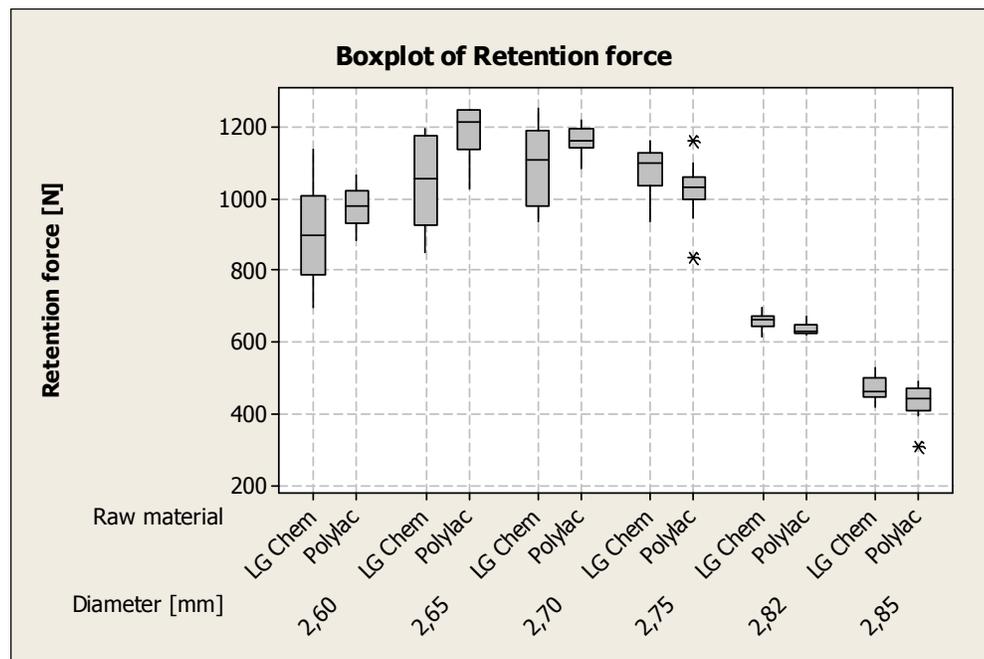


Bild 3.37 Boxplot Lochdurchmesser LG Chem vs. Polylac

Es fällt direkt auf, dass bei den Durchmessern 2,6mm bis 2,7mm die Auszugskraft aus dem Polylac Block höher liegt als aus dem LG Chem Block. Ab 2,75mm kehrt sich das Verhältnis allerdings um.

Im t-Test kann nun für jeden einzelnen Durchmesser ermittelt werden, ob der Unterschied der Materialien messbaren Einfluss hat. Ist der P-Wert oberhalb von 0,05 hat das Material mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent keinen Einfluss auf die Aus-

zugskraft. Liegt der P-Wert unterhalb von 0,05 hat das Material einen Einfluss auf die Auszugskraft.

Lochdurchmesser	P-Wert	Freiheitsgrade	Einfluss
2,6mm	0,133	12	Nein
2,65mm	0,013	12	Ja
2,7mm	0,093	9	Nein
2,75mm	0,008	33	Ja
2,8mm	0,038	17	Ja
2,85mm	0,095	15	Nein

Tabelle 3.1 Materialeinfluss

Aus den t-Tests kann keine eindeutige Aussage über den Einfluss des Kappenmaterials getroffen werden. Da in den Versuchen mit einer höheren Anzahl von Freiheitsgraden ein Einfluss des Materials erkennbar ist und im Zweifelsfalle ein Faktor mehr berücksichtigt werden muss um keine Effekte zu unterschlagen wird für die weiteren Versuche von einem Einfluss des Materials auf die ertragbare Last ausgegangen.

### Vergleich LG Chem XR409H mit Samsung BJ550

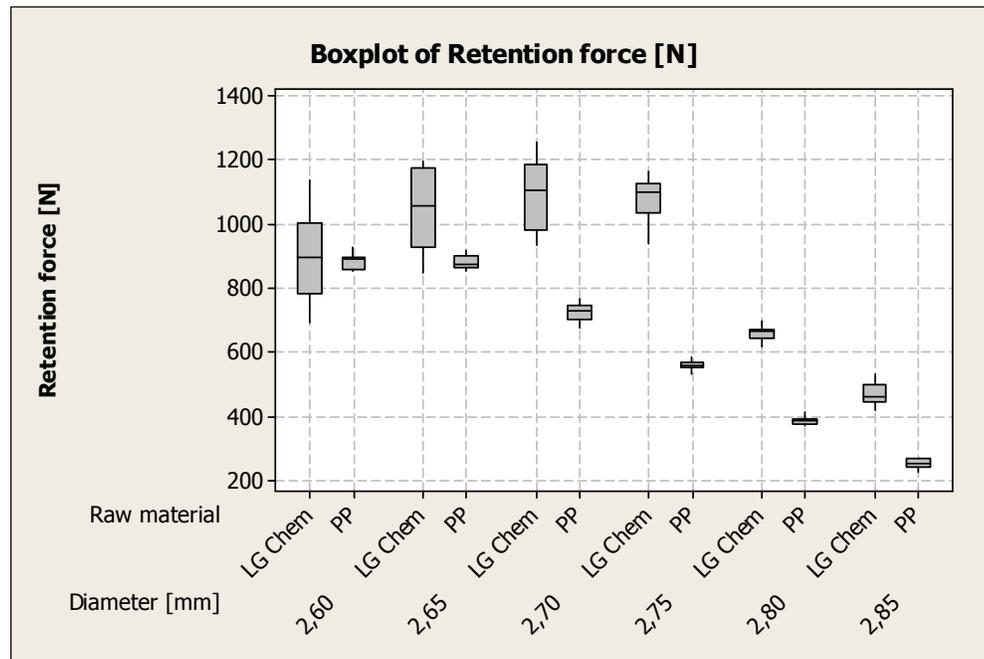


Bild 3.38 Boxplot Lochdurchmesser ABS vs. PP

Mit Ausnahme des Wertes bei 2,6mm Lochdurchmesser liegen die erreichten Abzugskräfte des ABS Materials deutlich oberhalb des PP Materials. Um dieses Ergebnis statistisch abzusichern wird auch hier für die jeweiligen Durchmesser ein 2-t-Test durchgeführt.

Lochdurchmesser	P-Wert	Freiheitsgrade	Einfluss
2,6mm	0,692	8	Nein
2,65mm	0,004	8	Ja
2,7mm	0,000	8	Ja
2,75mm	0,000	17	Ja
2,8mm	0,000	14	Ja
2,85mm	0,000	12	Ja

Tabelle 3.2 Ergebnisse 2-t-Test

Nach der Auswertung des 2-t-Tests kann ausgeschlossen werden, dass beide Versuchsreihen derselben Grundgesamtheit angehören. Daher müssen weiterhin alle Materialien berücksichtigt werden.

---

### **3.4 Vorversuch - Einfluss der Klemmlänge**

#### **3.4.1 Versuchsvorbereitung**

Um den Einfluss der Klemmlänge zu ermitteln werden die in Kapitel 3.3 bereits vorgestellten Testblöcke sowie die ATP-TriPress Stifte mit dem Maß 2,8x10mm verwendet. Versuchsaufbau und Durchführung sind mit der Ermittlung des Bohrungsdurchmesser-einflusses identisch.

Der Unterschied zum bisherigen Versuch besteht darin, dass der Bohrungsdurchmesser konstant gehalten und die Einpresstiefe variiert wird. Es werden sowohl das Vollmaterial als auch die Dome sowie alle Materialien der Testblöcke berücksichtigt.

Ohne Änderung der Kappengeometrie können Raststifte mit einer maximalen Länge von 11mm verwendet werden. Der Dom in der Unterkappe hat eine Höhe von 3mm, sodass sich eine maximale Klemmlänge von 8mm in der Oberkappe ergibt.

In Hinsicht auf die mögliche Verwendung von doppelseitigen Raststiften wird die voraussichtlich maximal mögliche Klemmlänge zwischen 5 und 6 Millimetern betragen. Daher werden im Versuch Klemmlängen von 5mm bis 8mm in Schritten von jeweils 1mm betrachtet.

Ein weiterer Aspekt, der mit diesem Versuch betrachtet werden soll ist der Einfluss des Störfaktors „Raststiftlänge außerhalb der Toleranz“. Am Ende des Projekts sollte der Einfluss aller betrachteten Störfaktoren bekannt sein um sie für die Serie zu beherrschen.

Da der Versuchsaufbau mit dem Versuch in Kapitel 3.3 identisch ist, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Die Beschreibung befindet sich auf Seite 78ff.

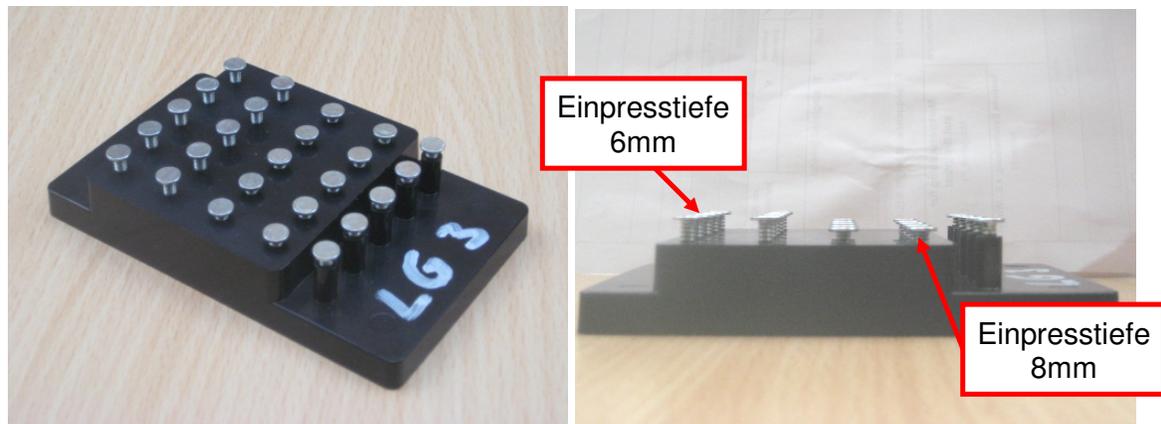


Bild 3.39 Testblock mit eingepressten Raststiften

### 3.4.2 Auswertung der Einpresskraft

Zunächst werden die Einpresskräfte in das Vollmaterial betrachtet. Erwartet wird, dass die Einpresskraft in Abhängigkeit von der Klemmlänge ansteigt. Ob dieser Anstieg einen linearen oder einen exponentiellen Verlauf hat ist aber unbekannt.

Zu Beginn der Auswertung wird von einem quadratischen Anstieg der Einpresskraft ausgegangen. Sollte sich hierbei herausstellen, dass der lineare Anteil überwiegt, kann der quadratische Anteil vernachlässigt werden.

Führt man eine Regressionsanalyse (s. Bild 3.37) für die Einpresskraft in das Material LG Chem XR409H durch, so ist der P-Wert für den quadratischen Anteil größer als 0,05. Das bedeutet, dass dieser Anteil mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von fünf Prozent vernachlässigbar klein ist. Somit kann das Verhältnis zwischen Einpresskraft und Einpresstiefe als annähernd linear angenommen werden.

Um die Güte der Regressionskurve zu beurteilen wird der  $R^2$ -Wert betrachtet. Dieser liegt in diesem Fall bei 85,9 Prozent. Je höher dieser Wert, desto besser bildet die Regressionskurve das reale Ergebnis ab. Gefordert wird ein Wert oberhalb von 75 Prozent, andernfalls ist die Annäherung zu ungenau.

**Results for: LG Chem press depth**

**Polynomial Regression Analysis: press force [N] versus press depth [mm]**

The regression equation is  
 press force [N] = - 123,2 + 197,4 press depth [mm] - 7,828 press depth [mm]\*\*2

S = 44,5478    R-Sq = 86,3%    R-Sq(adj) = 85,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	699862	349931	176,33	0,000
Error	56	111133	1985		
Total	58	810994			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	696562	346,96	0,000
Quadratic	1	3300	1,66	0,202

Bild 3.40 Regressionsanalyse Einpresstiefe LG Chem XR409H

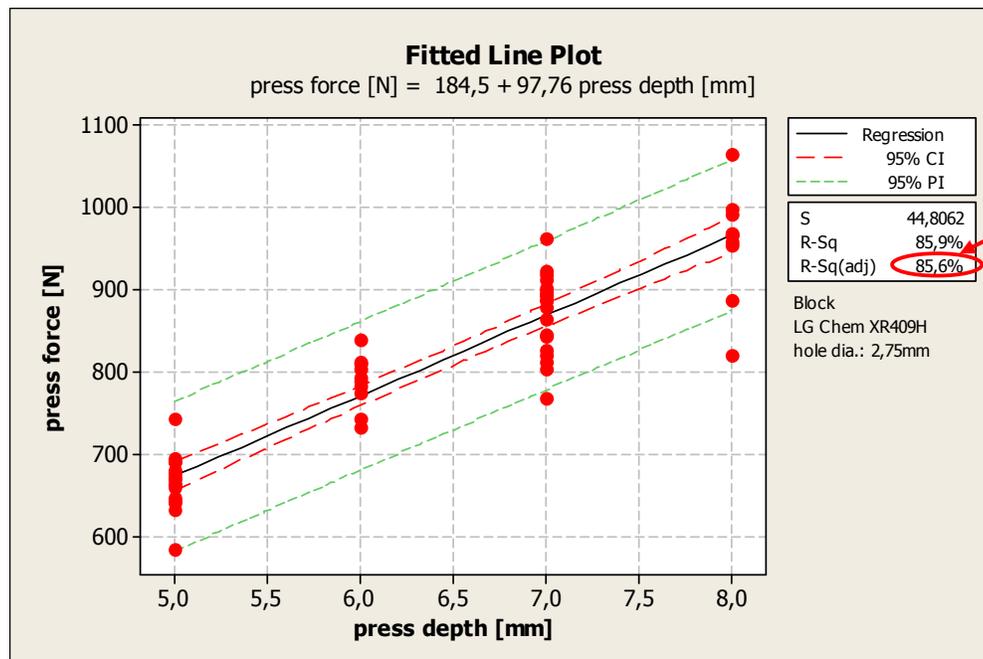


Bild 3.41 Fitted Line Plot Einpresstiefe LG Chem XR409H

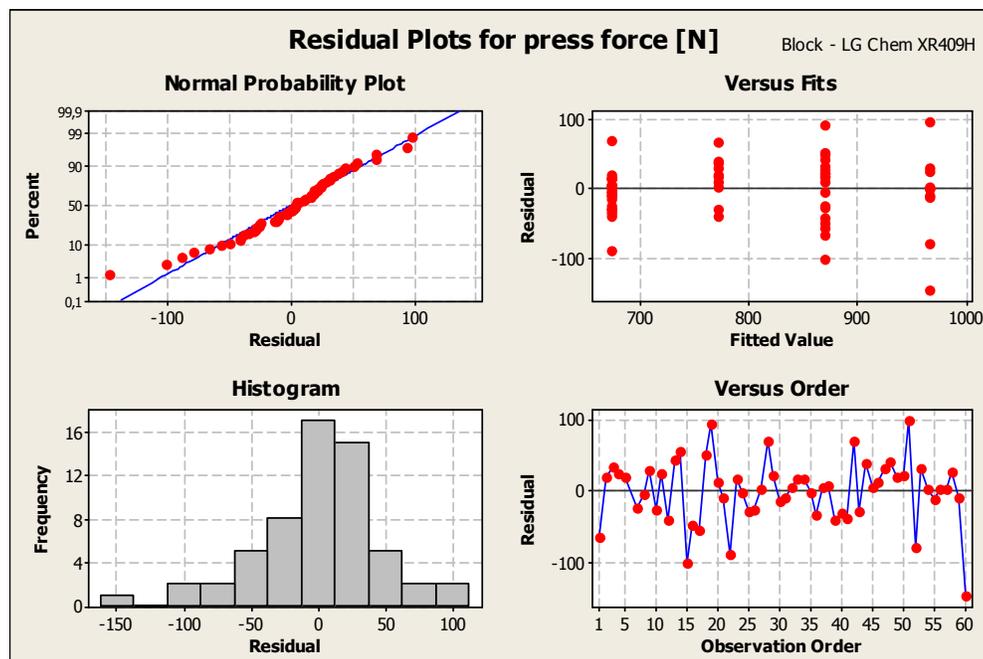


Bild 3.42 Residual Plots Einpresstiefe LG Chem XR409H

Im nächsten Schritt wird die gleiche Untersuchung für das Material Polylac 777B durchgeführt. Auch hier hat der quadratische Anteil einen vernachlässigbar geringen Anteil,

sodass erneut eine lineare Regressionsfunktion verwendet werden kann. Die Güte der Regression liegt mit 75,9 Prozent gerade noch über dem geforderten mindestwert von 75 Prozent.

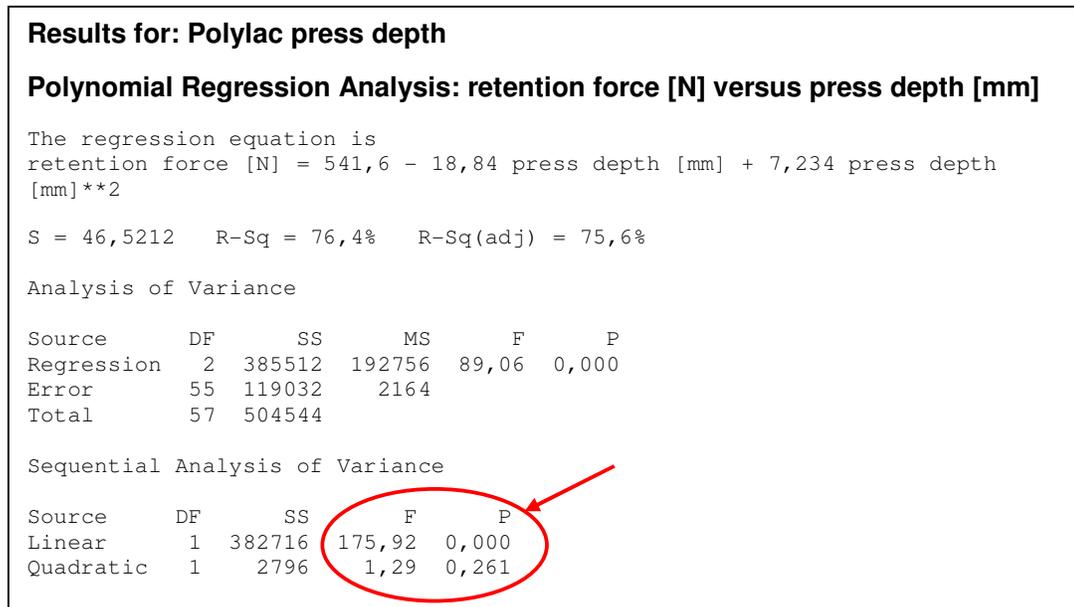


Bild 3.43 Regressionsanalyse Einpresstiefe Polylac 777B

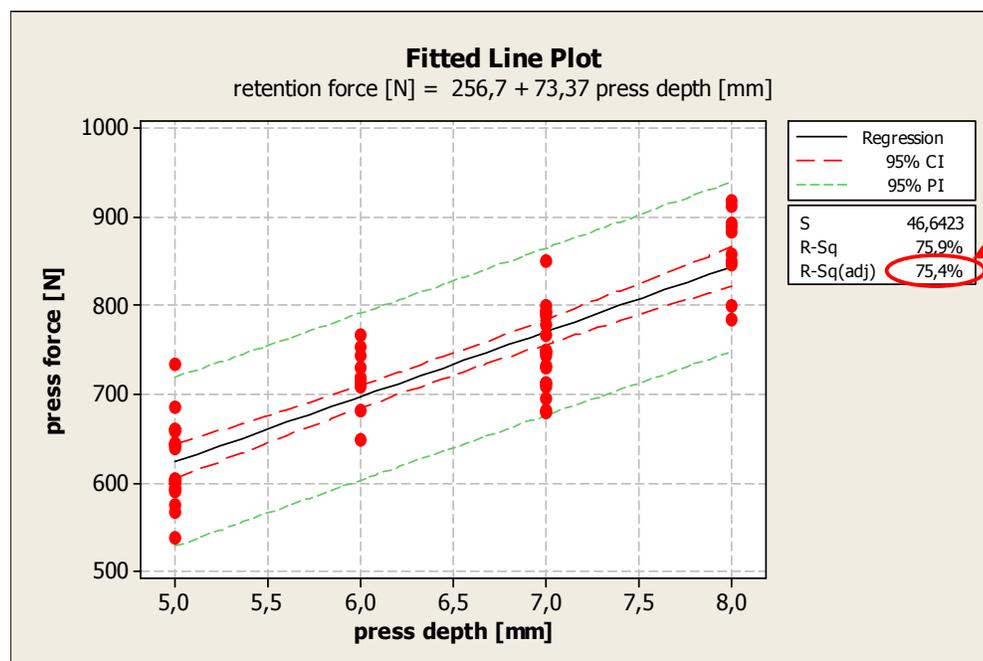


Bild 3.44 Fitted Line Plot Einpresstiefe Polylac 777B

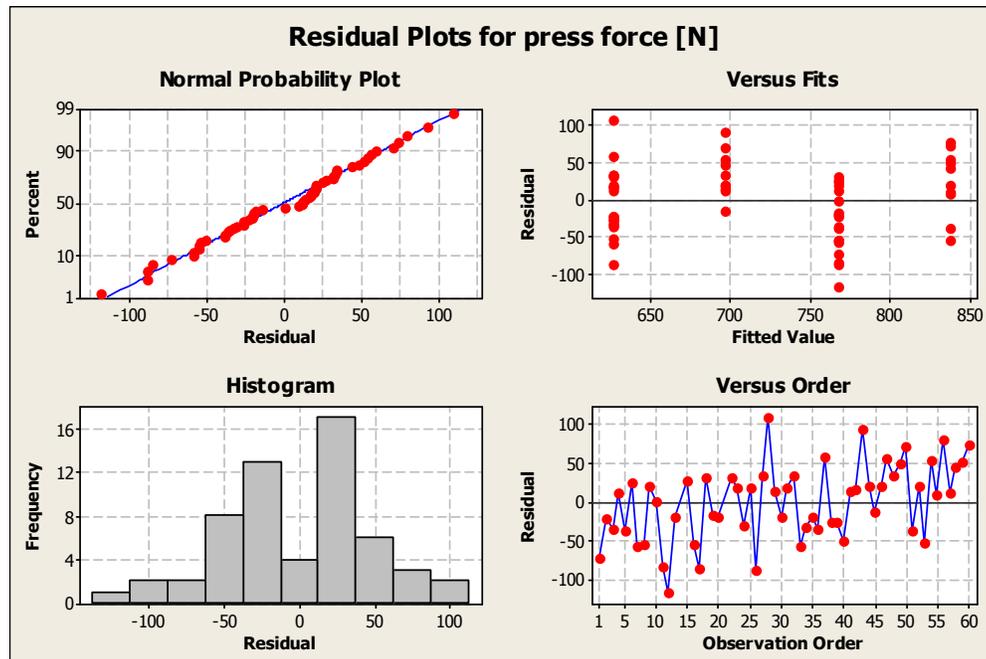


Bild 3.45 Residual Plots Einpresstiefe Polylac 777B

Beim Vergleich des Materialeinflusses auf die Einpresskraft stellt man fest, dass die Einpresskräfte in die LG Chem XR409H Blöcke unabhängig von der Einpresstiefe immer oberhalb der Einpresskräfte in Polylac 777B Blöcke liegen.

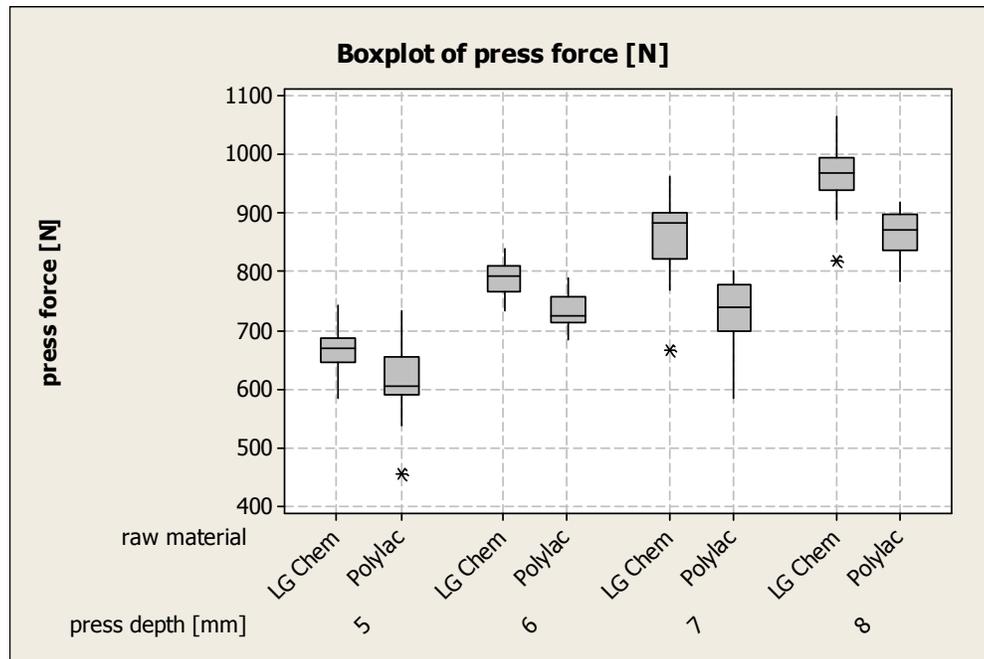


Bild 3.46 Boxplot der Einpresskräfte in Abhängigkeit von Material und Einpresstiefe

Die Einpresskräfte in die Dome liegen um ca. 50 Prozent niedriger als in das Vollmaterial. Bei den Domen im LG Chem XR409H Material ist wie im Vollmaterial ein linearer Anstieg der Einpresskraft im Verhältnis zur Klemmlänge zu erkennen. Der quadratische Anteil kann vernachlässigt werden.

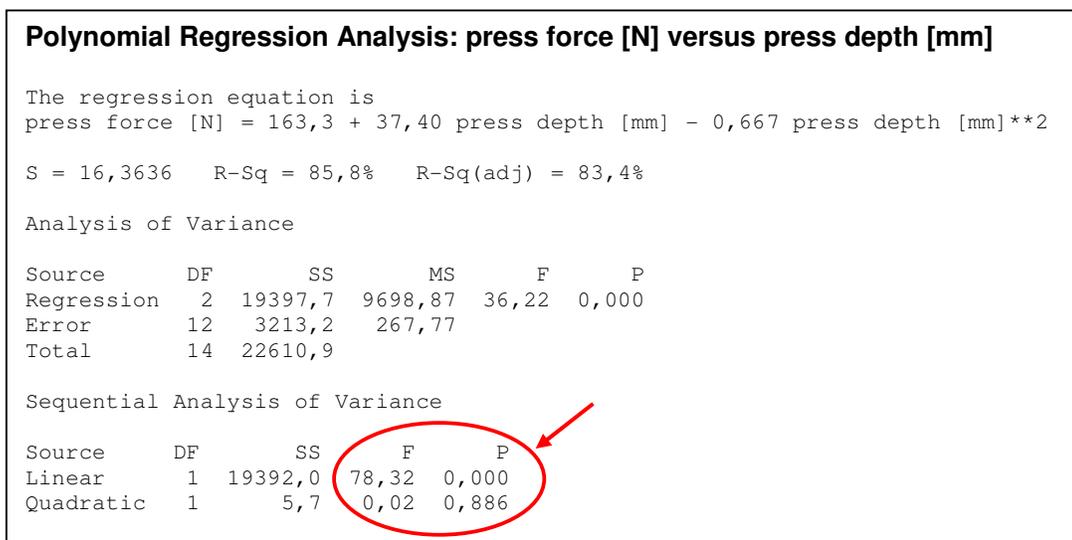


Bild 3.47 Regressionsanalyse Einpresstiefe LG Chem XR409H (Dom)

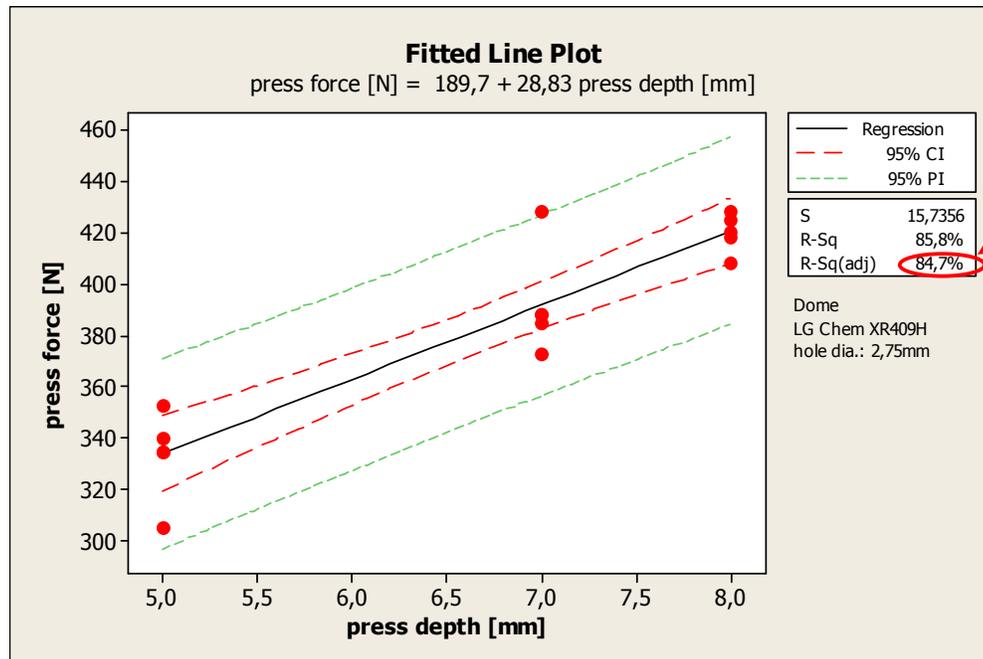


Bild 3.48 Fitted Line Plot Einpresstiefe LG Chem XR409H (Dom)

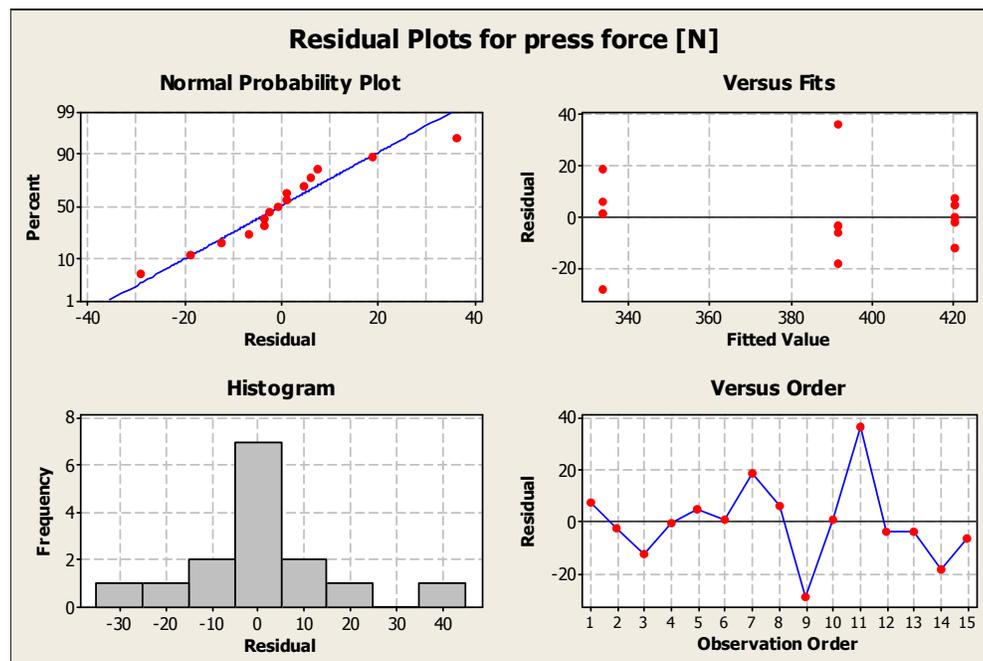


Bild 3.49 Residual Plots Einpresstiefe LG Chem XR409H (Dom)

Anders sieht es beim Einpressen in die Polylac 777B Blöcke aus. Da die Einpresskräfte bei 5mm und bei 7mm sich nur geringfügig unterscheiden, bei einer Klemmlänge von 8mm aber deutlich höher liegen, ist die ermittelte Regressionsfunktion quadratisch. Der P-Wert für den quadratischen Anteil ist kleiner als 0,05.

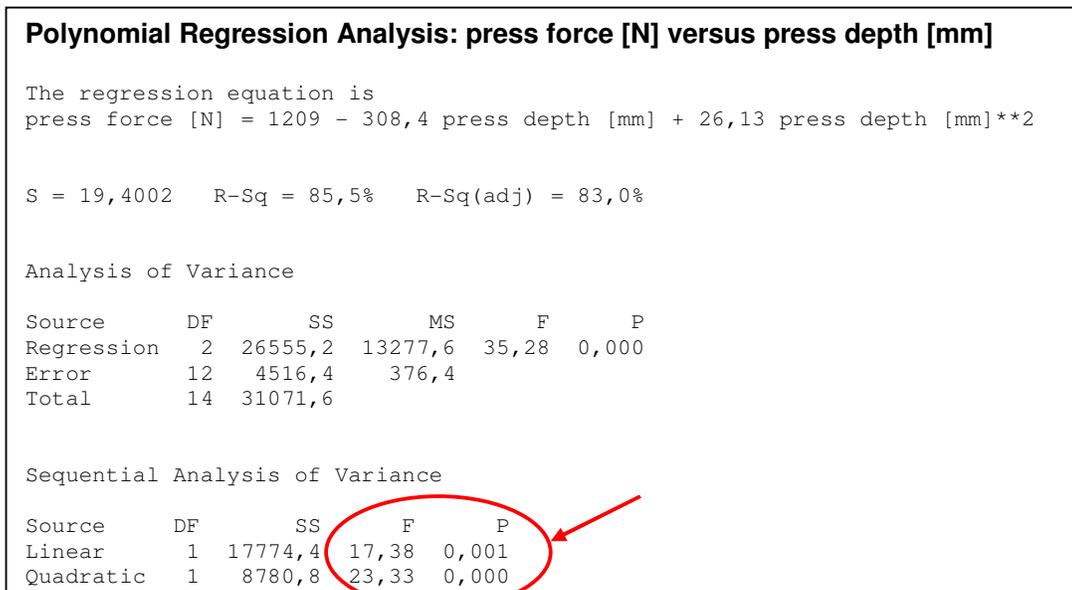


Bild 3.50 Regressionsanalyse Einpresstiefe Polylac 777B (Dom)

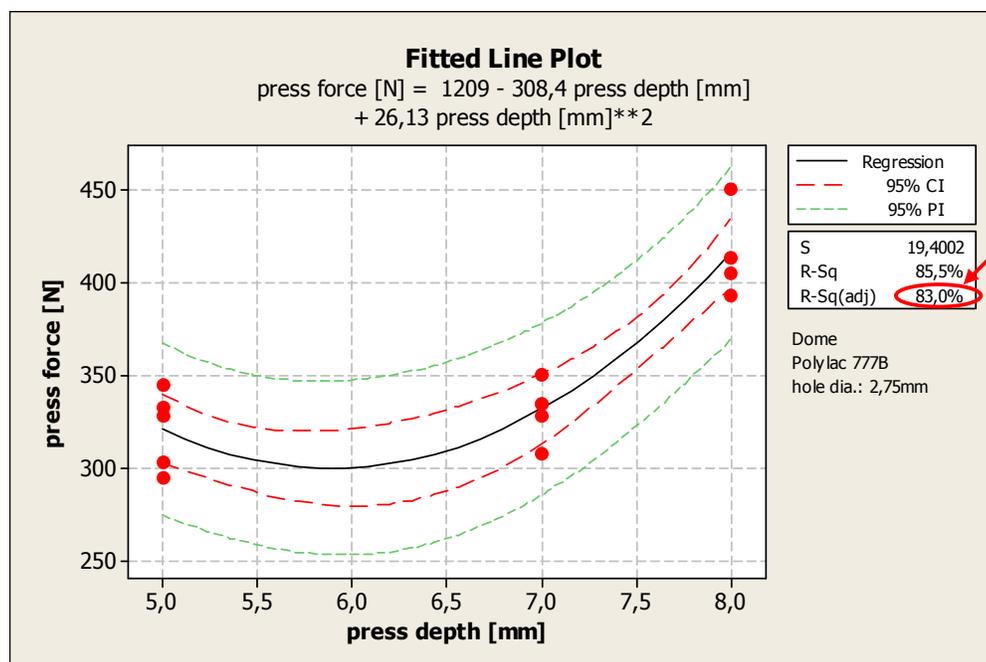


Bild 3.51 Fitted Line Plot Einpresstiefe Polylac 777B (Dom)

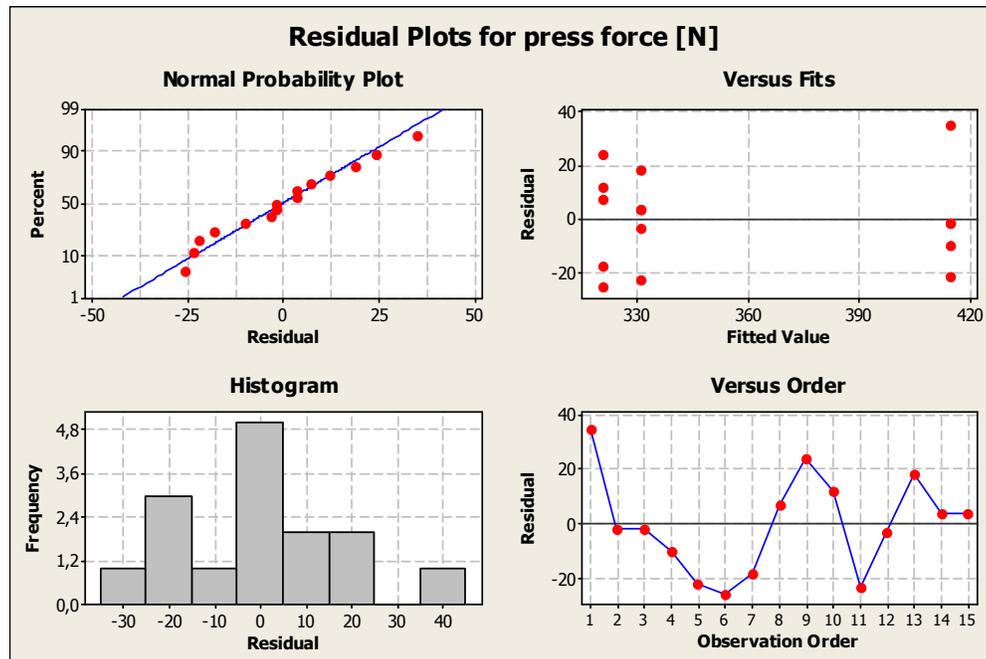


Bild 3.52 Residual Plots Einpresstiefe Polylac 777B (Dom)

Da jeweils nur fünf Wiederholungen pro Konfiguration durchgeführt wurden ist die Datenmenge für die Einpresstiefe in die Dome nur gering. Wird von einer Power von 95 Prozent ausgegangen ergibt sich aus den ermittelten Standardabweichungen eine Auflösungsgenauigkeit von 28,1N für LG Chem und 33,3N für Polylac.

### 3.4.3 Auswertung der Auszugskraft

Die Klemmlänge hat einen linearen Einfluss auf die Einpresskraft. Ob der Einfluss auf die Auszugskraft ebenfalls linear ist wird im Folgenden untersucht. Die Vorgehensweise der Auswertung ist analog zur Untersuchung der Einpresskräfte.

Polynomial Regression Analysis: Retention force versus Press depth (LG Chem)					
The regression equation is					
Retention force = 196,8 + 74,79 Press depth + 7,607 Press depth**2					
S = 43,8061    R-Sq = 95,4%    R-Sq(adj) = 95,2%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2112444	1056222	550,41	0,000
Error	53	101706	1919		
Total	55	2214150			
Sequential Analysis of Variance					
Source	DF	SS	F	P	
Linear	1	2109459	1088,06	0,000	
Quadratic	1	2986	1,56	0,218	

Bild 3.53 Regressionsanalyse Auszugskraft LG Chem XR409H

Die Regressionsanalyse der Auszugskräfte aus dem LG Chem XR409H Block, ergibt dass der quadratische Anteil vernachlässigbar ist und der Verlauf als linear angenähert werden kann. Die Güte der Regressionsgeraden beträgt 95,3 Prozent und liegt damit auf einem sehr guten Niveau.

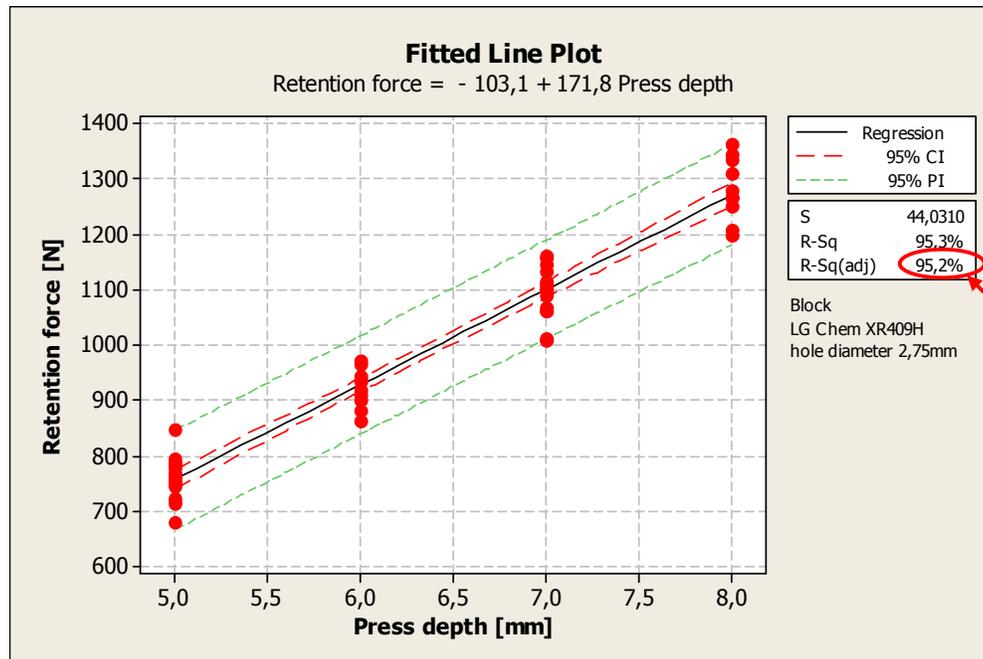


Bild 3.54 Fitted Line Plot Auszugskraft LG Chem XR409H

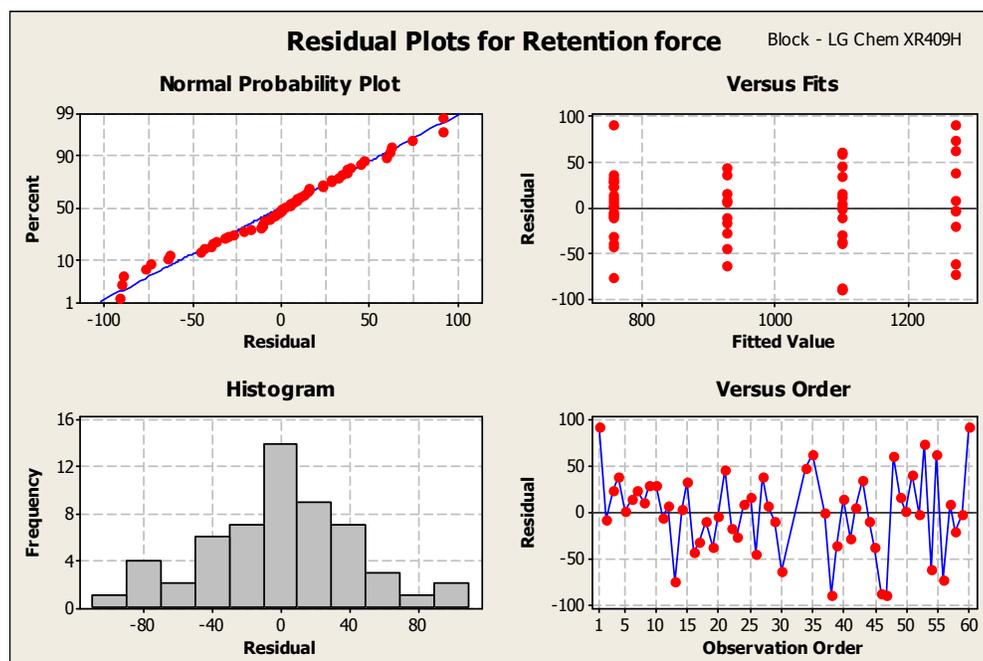


Bild 3.55 Residual Plot Auszugskraft LG Chem XR409H

Auch bei der Betrachtung der Auszugskräfte aus dem Polylac Blöcken ergibt sich ein linearer Verlauf der Regressionsgeraden. Diese Linearität unabhängig vom Material vereinfacht die Berücksichtigung der Klemmlänge als Einflussfaktor auf die Kappenab-

zugskraft in der folgenden DoE. Die Güte der linearen Regressionsfunktion beträgt 94,5 Prozent.

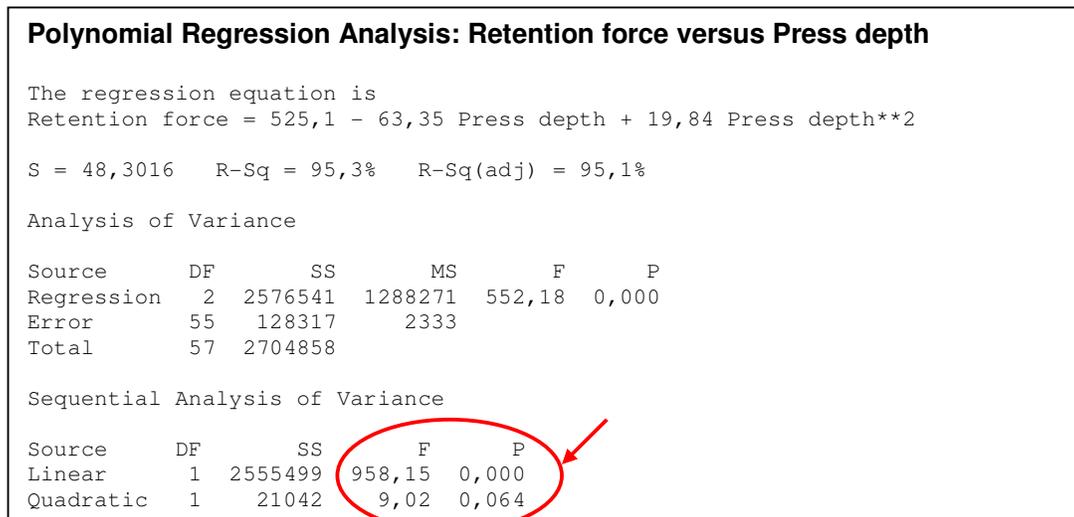


Bild 3.56 Regressionsanalyse Auszugskraft Polylac 777B

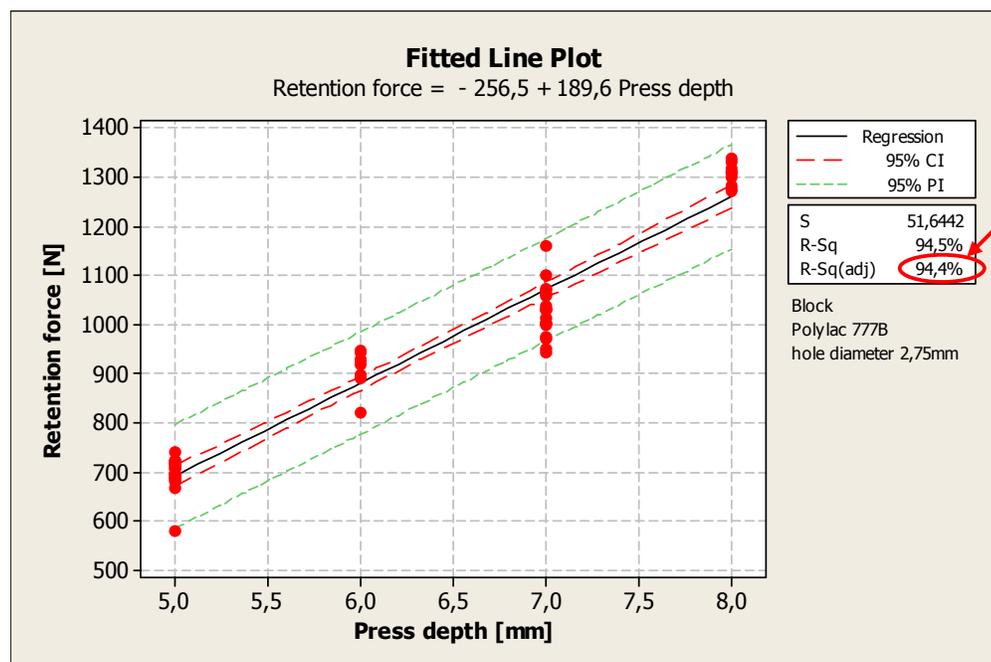


Bild 3.57 Fitted Line Plot Auszugskraft Polylac 777B

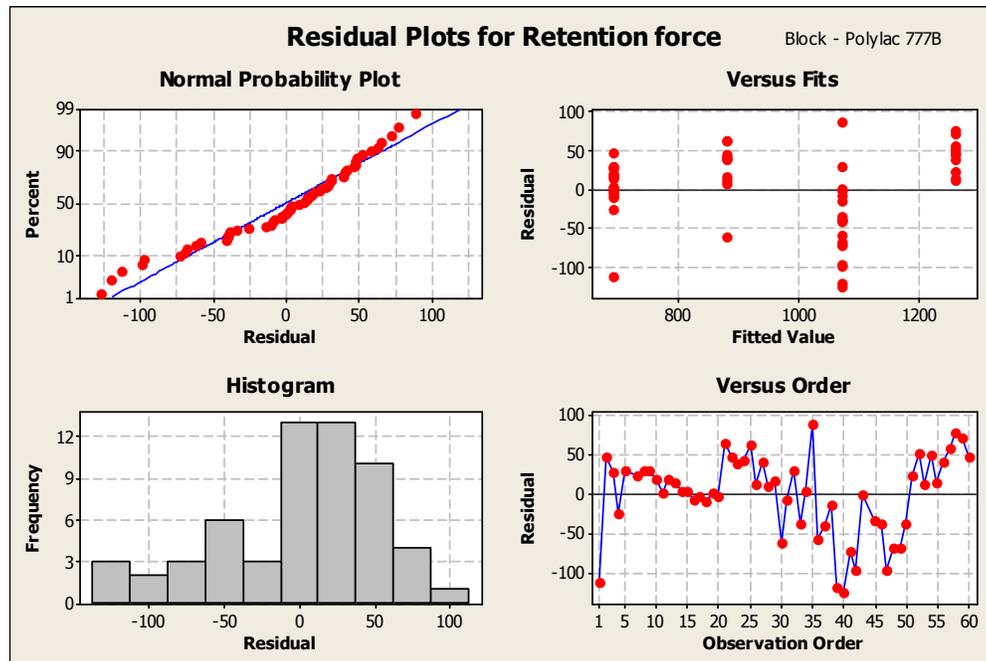


Bild 3.58 Residual Plot Auszugskraft Polylac 777B

#### **3.4.4 Unterscheidung Zug aus Vollmaterial und Dom**

Der Einfluss der Klemmlänge ist sowohl beim Einpressen, als auch beim Auszugsversuch als linear anzunähern. Dies bedeutet für die Praxis eine gute Beherrschbarkeit der Störgröße „Raststiftlänge außerhalb der Toleranz“. Da der Einfluss auf beide Prozesse einen gleichen Einfluss hat, kann schon aus der erforderlichen Einpresskraft auf einen potentiellen Fehler der Klemmlänge und somit der ertragbaren Last geschlossen werden.

Der Vergleich zwischen Dom und Vollmaterial ergibt wie bereits im vorherigen Versuch kein eindeutiges Ergebnis, da bei Klemmlängen oberhalb 5mm die Dome abreißen und nicht der Stift aus dem Dom gezogen wird. Lediglich bei der Klemmlänge von 5mm kann die Verbindung getrennt werden bevor der Testblock versagt.

Betrachtet man die Ergebnisse mit einer Klemmlänge von 5mm, bei der die Stifte ebenfalls aus den Domen herausgezogen wurden, so wird hier nur ein Lastniveau von 71 (LG Chem) beziehungsweise 77,2 Prozent (Polylac) des Vollmaterials erreicht.

Vergleicht man diese Werte mit den ermittelten Lastniveaus der Durchmesservariation von 93,5 (LG Chem) und 86,7 Prozent (Polylac) (s. Kapitel 3.3.6), so kann aus den bisherigen Versuchen keine generelle Aussage über ein Verhältnis der Auszugskräfte zwischen Vollmaterial und Dom gemacht werden.

Der Vergleich zwischen Dom, Vollmaterial und Kappe hat keine befriedigenden Ergebnisse ergeben. Im weiteren Verlauf wird das Testblockdesign daher modifiziert, um Ergebnisse zu erhalten, die besser auf die Kappen übertragbar sind.

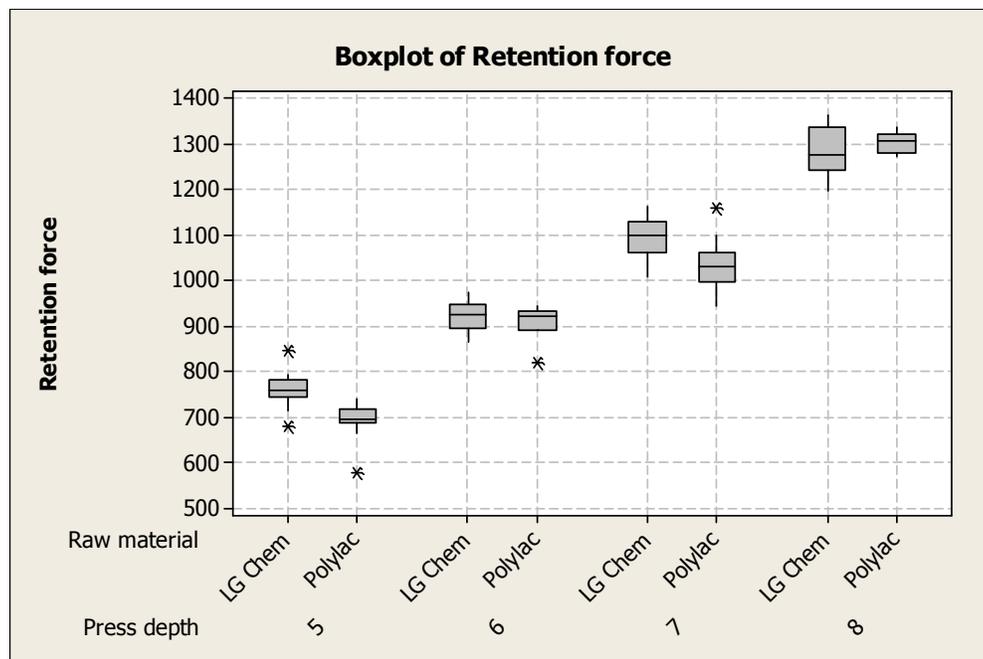
### 3.4.5 Einfluss des Kappenmaterials

Der lineare Einfluss der Klemmlänge lässt eine gute Vergleichbarkeit des Weiteren variierten Faktors Kappenmaterial zu. Ein Unterschied zwischen ABS und PP-Materialien ist direkt an den Versuchsergebnissen ablesbar. Ob es aber auch einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden ABS-Materialien gibt muss untersucht werden.

#### Vergleich LG Chem XR409H vs. Polyjac 777B

Das ertragbare Lastniveau ist bei den Blöcken aus LG Chem bei Klemmlängen von 5mm bis 7mm geringfügig höher als bei entsprechenden Blöcken aus Polyjac. Bei einer Klemmlänge von 8mm liegen die ertragbaren Lasten der Polyjac Blöcke leicht oberhalb der LG Chem Blöcke.

Die Differenz der Auszugskräfte zeigt, dass das Kappenmaterial einen Einfluss auf die Auszugskraft hat. Ob dieser signifikant ist muss im nächsten Schritt untersucht werden.



3.59 Boxplot Einfluss Kappenmaterial auf Auszugskraft (ABS)

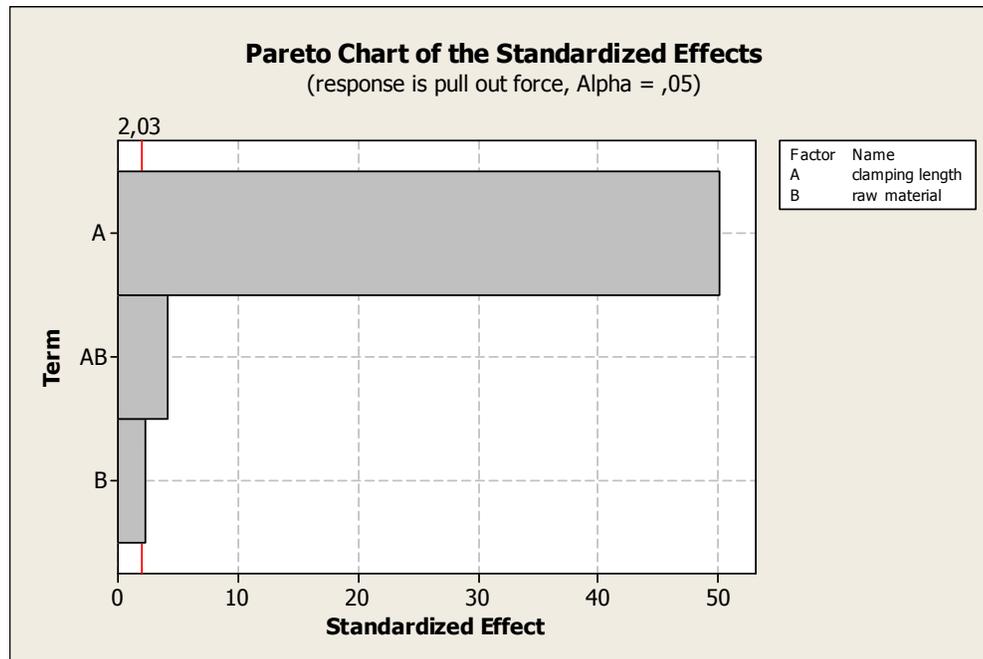


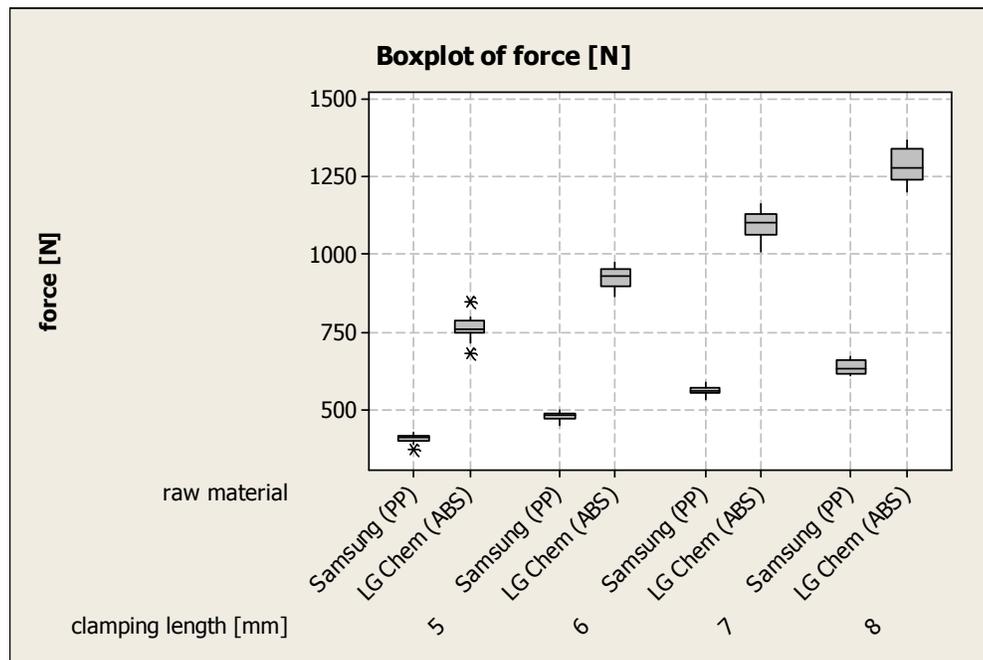
Bild 3.60 Pareto Chart Einfluss Klemmlänge und Kappenmaterial (ABS)

Der Pareto-Chart zeigt, dass die Klemmlänge den größten Einfluss auf die Auszugskraft hat. Sowohl der Balken des Kappenmaterials als auch der Balken der die Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren darstellt überschreiten die rote Grenzmarkierung. Daraus folgt, dass beide ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das Versuchsergebnis haben und somit in den zukünftigen Versuchen nicht vernachlässigt werden dürfen.

Beim Einpressen der Stifte in die Blöcke gibt es erkennbare Unterschiede zwischen den Einpresskräften in die beiden Materialien (s. Kapitel 3.4.2). Dieser Unterschied lässt sich aber nicht direkt auf die Auszugskräfte übertragen, da diese sich nur geringfügig unterscheiden.

### Vergleich LG Chem XR409H (ABS) vs. Samsung BJ550 (PP)

Die Auszugskraft aus dem PP Material liegt bei circa 50 Prozent der Auszugskraft aus dem ABS Material. Dieser Einfluss kann auch ohne weitere Prüfung als signifikant angesehen werden.



3.61 Boxplot Einfluss Kappenmaterial auf Auszugskraft (ABS vs. PP)

Bei der Betrachtung der Einflussfaktoren stellt man fest, dass sowohl beide Faktoren einzeln als auch die Wechselwirkung zwischen den beiden Faktoren signifikant sind.

Im Vergleich der ABS Materialien hat die Klemmlänge den größten Einfluss. In diesem Fall ist der Unterschied des Blockmaterialien größer als der Einfluss der Klemmlänge.

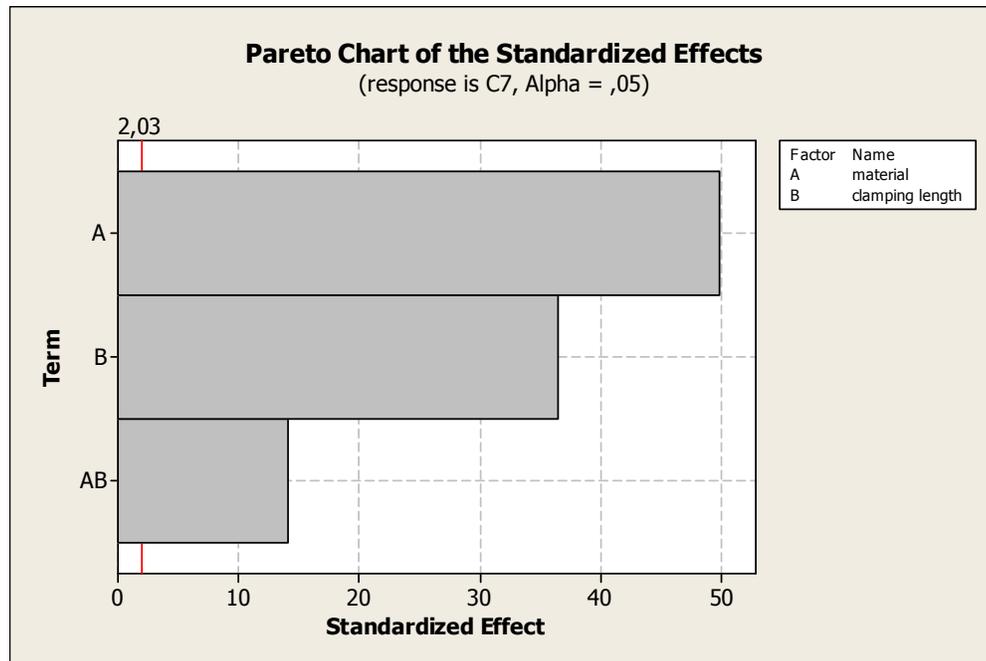


Bild 3.62 Pareto Chart Einfluss Klemmlänge und Kappenmaterial (ABS vs. PP)

### 3.5 Einfluss der Oberflächenbeschichtung

Die Raststifte, die in den Versuchen zum Einsatz kommen sind verzinkt. Für den späteren Serieneinsatz sollen aber aus optischen Gründen schwarz beschichtete Raststifte zum Einsatz kommen.



Bild 3.63 Raststift verzinkt und schwarz beschichtet

Um zu prüfen, ob die unterschiedlichen Beschichtungen einen Einfluss auf die Auszugskräfte haben, wurde an dreißig Raststiften die Verzinkung entfernt und eine schwarze Beschichtung aufgetragen. Als Beschichtung kommt das Produkt „DELTA PROTEKT KL 100 + DELTA SEAL schwarz“ der Firma Dörken MKS Systeme zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Zinklamellensystem mit organischer Topcoat. Diese Beschichtung ist vergleichbar mit der Beschichtung der Serienschrauben.

In den bereits bekannten Testblöcken aus ABS und PP Material werden verzinkte und schwarz beschichtete Raststifte eingepresst. Der Lochdurchmesser und die Klemmlänge werden mit 2,7mm Durchmesser und 8mm Länge konstant gehalten.

Auf Grund der begrenzten Anzahl von schwarz beschichteten Teilen wird zur Prüfung neben dem PP-Material Samsung BJ550 nur ein ABS-Material, das LG Chem XR409H berücksichtigt.



Bild 3.64 Testblock mit beschichteten Raststiften

Die Auszugskräfte werden mittels eines 2-t-Tests auf signifikante Unterschiede zwischen den Beschichtungen untersucht. Als Nullhypothese wird angenommen, dass die Beschichtung keinen Einfluss auf die Auszugskraft hat. Die Alternativhypothese besagt, dass es einen Einfluss der Oberflächenbeschichtung gibt.

Der Aufbau und die Durchführung der Versuche erfolgen analog zu den in Kapitel 3.2 bis 3.4 beschriebenen Versuchen und werden daher hier nicht nochmals erläutert.

### **Versuchsbewertung**

Zunächst werden die Versuchsergebnisse aus dem ABS-Testblock betrachtet. Getestet wurden jeweils zehn schwarz beschichtete und zehn verzinkte Raststifte in einem Testblock. Der Bohrungsdurchmesser und die Klemmlänge werden konstant gehalten.

Im Vergleich der beiden Beschichtungen ergibt sich eine höhere ertragbare Last der Raststifte mit schwarzer Beschichtung. Auch die Streuung der Ergebnisse ist hier geringer.

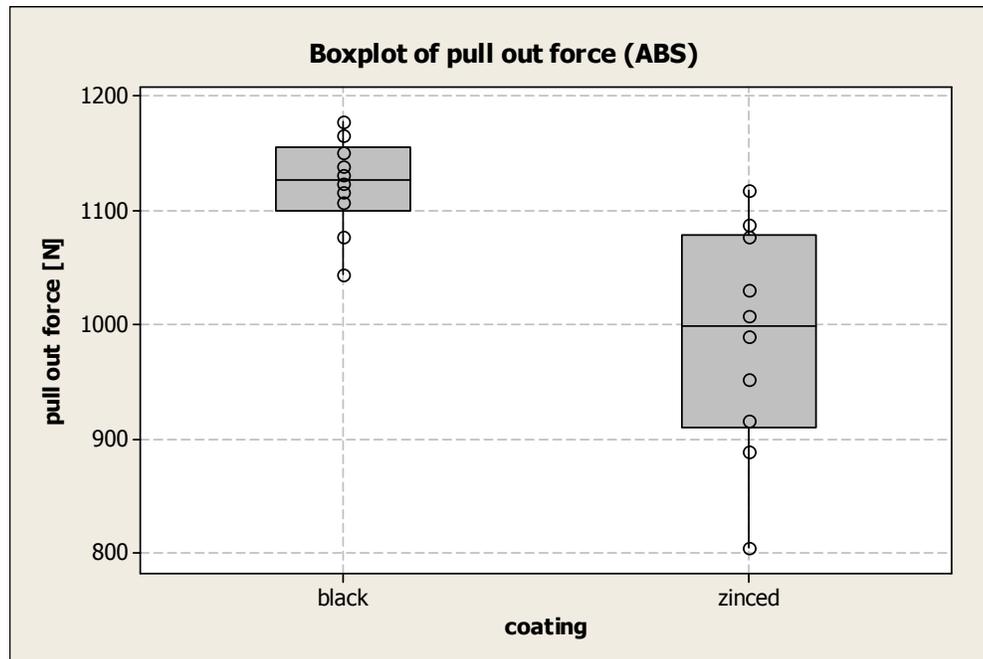


Bild 3.65 Boxplot Vergleich Einfluss Beschichtung (ABS)

Der t-Test ergibt einen P-Wert kleiner 0,05. Somit muss die Nullhypothese abgelehnt werden und es besteht ein signifikanter Unterschied der beiden Beschichtungen, sodass der Einfluss für weitere Versuche nicht vernachlässigt werden darf.

Für die DoE stehen nur verzinkte Raststifte zur Verfügung, da eine Beschichtung der 2,3mm Stifte aus Zeitgründen nicht mehr umsetzbar ist. Im Anschluss an die Hauptversuche müssen daher Bestätigungsversuche mit schwarz beschichteten Stiften folgen.

**Two-Sample T-Test and CI: force [N]; coating (ABS)**

```

Two-sample T for force [N]
      coating    N    Mean    StDev    SE
black      10    1122,6    40,5     13
zinced     10     986,7    98,1     31

Difference = mu (black) - mu (zinced)
Estimate for difference: 135,9
95% CI for difference: (62,0; 209,8)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4,05 P-Value = 0,002 DF = 11
  
```

Bild 3.66 2-t-Test Einfluss Beschichtung (ABS)

Werden die Raststifte aus dem PP-Testblock gezogen, ergeben sich gegensätzliche Ergebnisse. Hier liegt das Niveau der ertragbaren Lasten der verzinkten Stifte höher als bei den schwarz beschichteten Teilen.

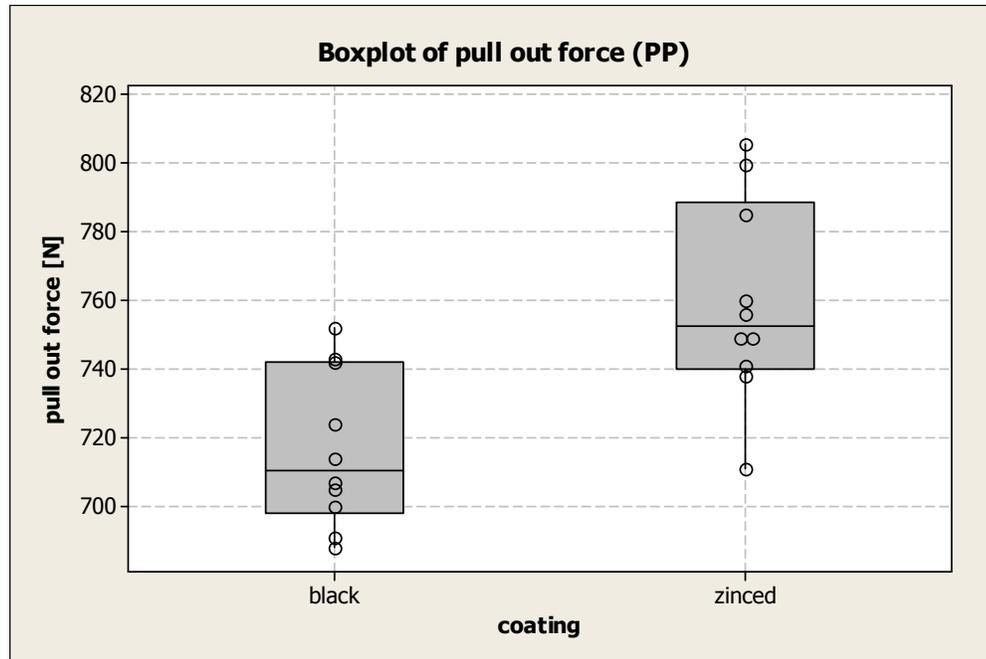


Bild 3.67 Boxplot Vergleich Einfluss Beschichtung (PP)

Auch hier ergibt der t-Test einen signifikanten Unterschied der Versuchsergebnisse ( $P = 0,002 < 0,05$ ). Entsprechend werden auch hier Bestätigungsversuche mit schwarz beschichteten Raststiften im Anschluss an die DoE erforderlich.

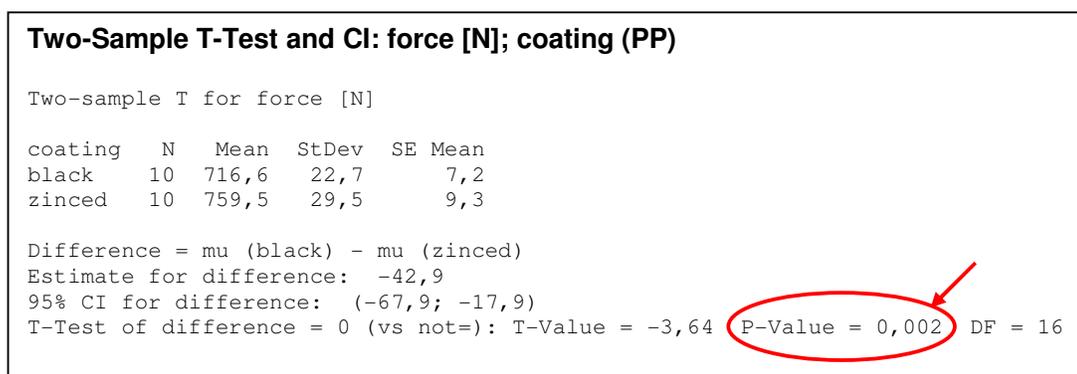


Bild 3.68 t-Test Einfluss Beschichtung (PP)

### 3.6 Neudesign des Testblocks

Die bisherigen Vorversuche haben wichtige Erkenntnisse für den Versuchsplan gebracht. Ein Kritikpunkt ist allerdings die schlechte Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Testblock auf die Schlosskappe.

Die ermittelten Kräfte aus dem Vollmaterial übersteigen die ertragbaren Kräfte in Kappen. Beim Einpressen, kann sich das Material nicht so leicht nach außen ausdehnen um den Raststift auszuweichen. Daher sind sowohl die Einpresskräfte als auch die Klemmkräfte höher.

Beim Ziehen aus den Domen der bisherigen Testblöcke, ist in den meisten Fällen der Dom vom Testblock abgerissen, sodass keine Aussage über die ertragbare Last der Stiftverbindung getroffen werden kann.

Daher werden für den Versuchsplan neue Testblöcke entwickelt. Diese bilden die Kappengeometrie besser ab als die bisher verwendeten Testblöcke. Ziel ist es, dass die Versuchsergebnisse besser auf die Kappen übertragen werden können.

Das Design der zweiten Testblockgeneration lehnt sich daher stark an das Kappendesign an. Neben dem Schraubdom wird auch ein Teil der Außenwand mit abgebildet. Die Wandstärke und die Radien entsprechen der Serienkappe.

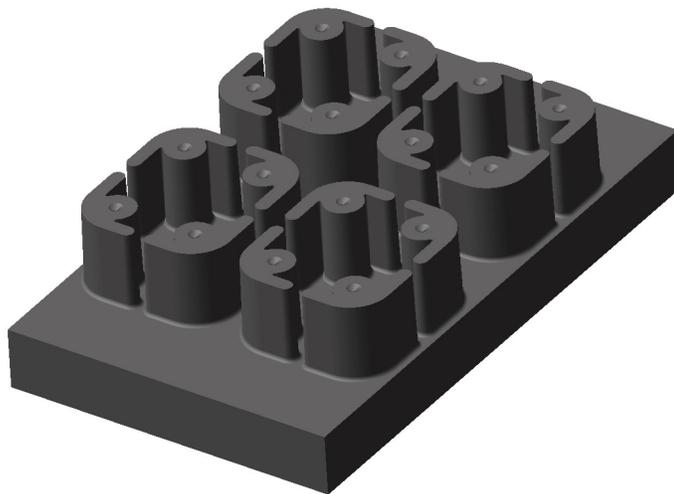


Bild 3.69 CAD-Modell Testblock (2. Version)

### 3.6.1 Festigkeitsberechnung

Es soll vermieden werden, dass auch bei den neuen Testblöcken die Dome von der Grundplatte abreißen. Daher wird die neue Geometrie mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) vorab berechnet und geprüft wie hoch die Spannungen im Übergang vom Dom in die Grundplatte sind.

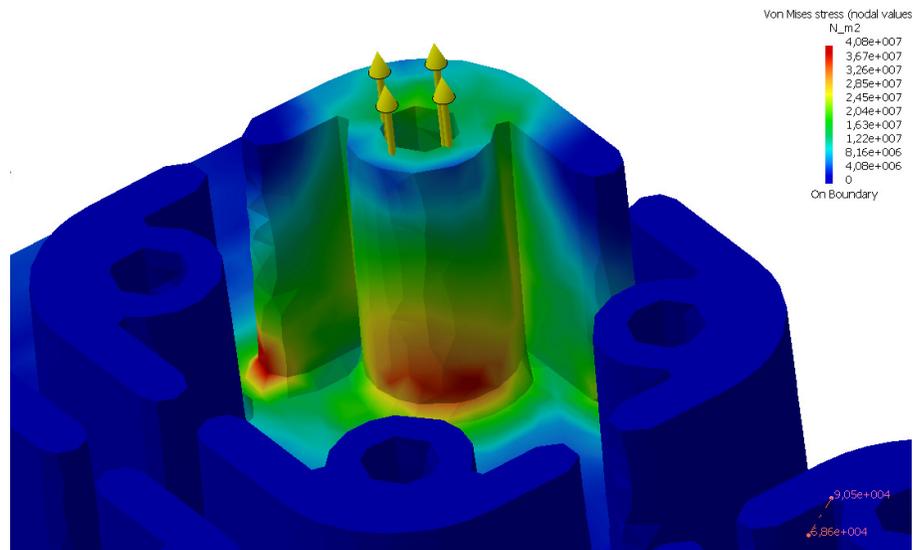


Bild 3.70 Von Mises Spannung bei Zug aus Dom (innen)

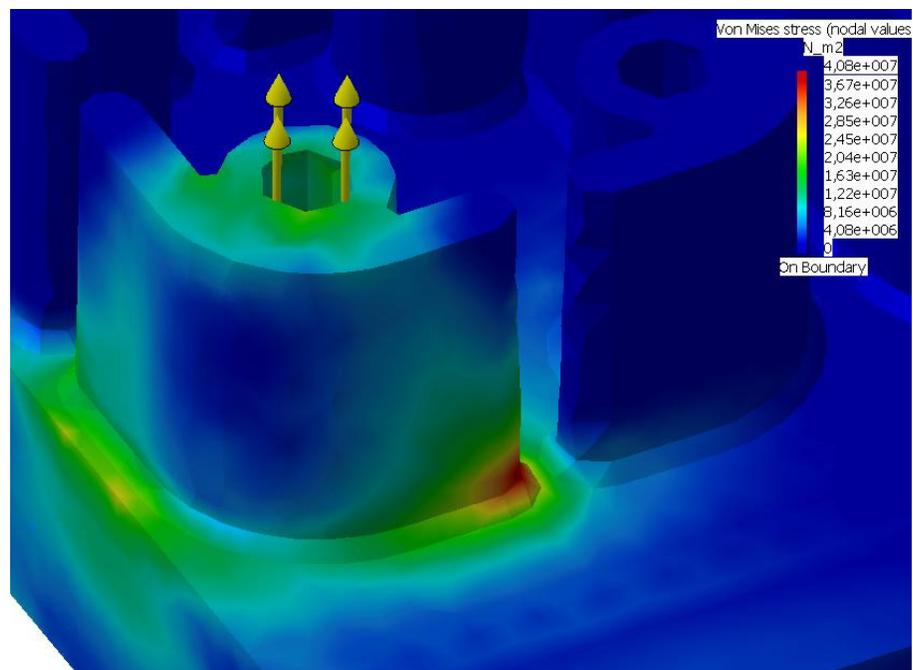


Bild 3.71 Von Mises Spannung bei Zug aus Dom (außen)

---

Die eingebrachte Last beträgt 1200N in positive z-Richtung und wirkt, analog zur Klemmkraft zwischen Stift und Dom, als Flächenlast auf die Innenfläche des Doms.

Die Vorversuche haben ergeben, dass Lasten oberhalb von 1kN nur bei minimalem Lochdurchmesser und maximaler Klemmlänge im ABS Vollmaterial erreicht werden. Das Kraftniveau im PP Testblock liegt darunter. Somit kann dieser Wert für den Testblock als maximal ertragbar angenommen werden.

Die maximalen Spannungen von 40,8MPa unterschreitet die Zugfestigkeit der drei Materialien, sodass ein Versagen des Testblocks ausgeschlossen werden kann.

### 3.6.2 Ermittlung statistischer Einflussgrößen

Um die Anzahl der Wiederholungen pro Versuchskonfiguration für den Versuchsplan zu bestimmen, muss die Standardabweichung der Auszugsversuche bekannt sein.

Um eine statistisch hinreichend genaue Aussage zu erhalten sollten circa fünfzig Versuche in identischer Konfiguration durchgeführt werden. Daher werden jeweils drei Blöcke aus den drei Materialien mit einem Lochdurchmesser von 2,2mm und 2,7mm angefertigt. Da jeder Testblock 16 Prüfungen zulässt ergibt sich eine Anzahl von 48 Wiederholungen je Konfiguration.

Die Raststifte werden auf eine Klemmlänge von 7mm eingepresst. Anschließend werden sie mit einer Zugvorrichtung aus den Testblöcken herausgezogen. Die Auszugskräfte werden auf ihre Normalverteilung hin untersucht und die Standardabweichungen der drei Materialien und der zwei verschiedenen Lochdurchmesser ermittelt.

Bei der Betrachtung der bisherigen Versuchsergebnisse wird erwartet, dass die Standardabweichungen der sechs Konfigurationen untereinander keine großen Unterschiede aufweisen. Die Daten werden als normalverteilt angenommen, wenn der P-Wert oberhalb von 0,05 liegt.

Kappenmaterial	Stift- durchmesser	Standard- abweichung	P-Wert Normalverteilung
LG Chem XR409H	2,3mm	20,00N	0,111
LG Chem XR409H	2,8mm	33,25N	0,381
Polylac 777B	2,3mm	13,97N	0,548
Polylac 777B	2,8mm	33,72N	0,073
Samsung BJ550	2,3mm	19,04N	0,976
Samsung BJ550	2,8mm	23,70N	0,458

Tabelle 3.3 Standardabweichungen neuer Testblock

---

Da die Anzahl der Wiederholungen unabhängig von Stiftdurchmesser und Material im Versuchsplan konstant gehalten werden soll, wird die höchste einzelne Standardabweichung, als Basis zur Festlegung der erforderlichen Wiederholungen im Versuchsplan herangezogen. Somit wird gewährleistet, dass die Ergebnisse die gewünschte oder eine noch höhere Auflösung haben.

Die resultierende Standardabweichung von 33,72N liegt höher als bei den Versuchen mit Serienkappen ( $s=15,55N$ ) aber deutlich niedriger als bei den bisherigen Testblöcken ( $s=55N$ ).

---

## 4. Versuche basierend auf Versuchsplan

### 4.1 Aufstellen des Versuchsplans

Es gibt eine große Anzahl an Parametern, die Einfluss auf die Kappenverbindung haben. Aus Zeit- und Kostengründen können aber nicht alle berücksichtigt werden.

Es kommen zwei Raststifte mit unterschiedlichen Durchmessern zum Einsatz. Das Sperrillenprofil wird aber nicht variiert, da hierfür weitere kostenintensive Prototypenteile angefertigt werden müssten. Es gibt für die Raststifte zwei variable Parameter, die in den Hauptversuchen betrachtet werden.

Da wir mit 2,3mm und 2,8mm nur zwei Stiftdurchmesser betrachten müssen wir diesen Faktor als diskret annehmen. Eine Aussage über das Verhalten von anderen Raststiftdurchmessern kann nicht getroffen werden. Der zweite variable Parameter ist die Länge des Raststifts beziehungsweise die daraus resultierende Klemmlänge von Stift und Kappe. Die Klemmlänge kann im Versuch einen Wertebereich von 4mm bis 8mm annehmen und ist daher ein stetiger Faktor.

Die Kappengeometrie soll nicht verändert werden, daher bieten die Kappen ebenfalls nur zwei Variationsmöglichkeiten. Als diskreter Parameter ist der Einfluss des Kappenmaterials zu untersuchen. Der Durchmesser der Bohrung in der Oberkappe ist ein stetiger Faktor und kann jeden Wert zwischen 2,1mm und 3mm annehmen. Die untere Grenze resultiert aus den bereits beim Abspritzen der Kappen erzeugten Löchern. Die Obergrenze stellt die Mindestwandstärke des Doms dar.

Mögliche Einflussgrößen wie die Temperatur, die Feuchtigkeit oder die Kappenfarbe werden in unabhängigen Versuchen betrachtet. Sie werden nicht in den Versuchsplan aufgenommen, da sie in der Praxis nicht beeinflusst werden können.

Es kann nicht definiert werden, dass die Kappen bei einer optimalen Temperatur benutzt werden, sondern sie müssen im gesamten Temperaturbereich von -40°C bis +80°C die geforderten Kappenabzugskräfte erreichen. Gleiches gilt für den Einfluss der Luftfeuchtigkeit. Auch hier muss im Bereich von 0% bis 100% Feuchtigkeit die geforderte Kappenabzugskraft erreicht werden.

---

In den Versuchsplan aufgenommen werden nur die Faktoren Klemmlänge und Bohrungsdurchmesser in der Oberkappe. Hieraus resultiert ein  $2^2$ -Versuchsplan.

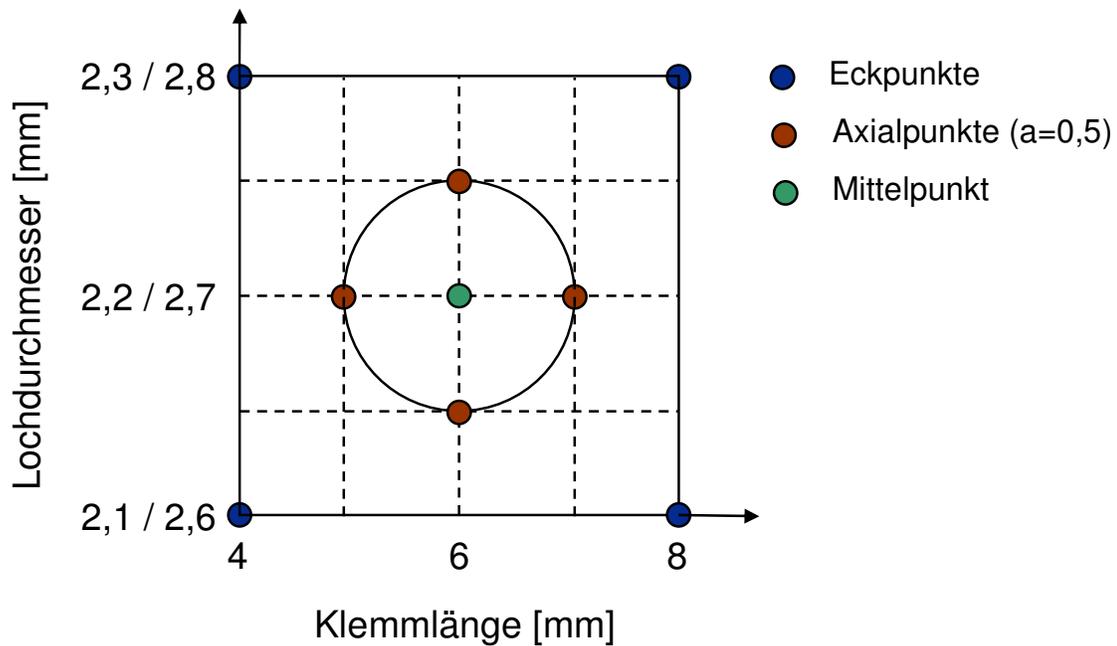
Die beiden verschiedenen Stiftdurchmesser erfordern unterschiedliche Wertebereiche für den Lochdurchmesser in der Oberkappe, daher können sie nicht in einem Versuchsplan zusammengefasst werden sondern müssen in zwei separaten  $2^2$ -Versuchsplänen betrachtet werden.

Der diskrete Faktor Kappenmaterial kann ebenfalls nicht direkt in den  $2^k$ -Versuchsplan eingepflegt werden. Entweder es müssten auch für die verschiedenen Materialien ebenfalls einzelne Versuchspläne angelegt werden, oder sie werden als Blöcke in einem Versuchsplan berücksichtigt. Da aus der erste Variante in Kombination mit den Stiftdurchmessern sechs einzelne Versuchspläne resultieren wird diese Lösung nicht gewählt.

Zum Einsatz kommen zwei  $2^2$ -Versuchspläne mit jeweils drei Blöcken. Für beide Faktoren werden neben den Eckpunkten sowohl Mittel- als auch Axialpunkte betrachtet.

Da die Grenzwerte für den Lochdurchmesser und die Klemmlänge als Eckpunkte definiert sind, werden die Sternpunkte in das resultierende Viereck gelegt. Um auch für die Axialpunkte Werte zu erhalten, die im Versuch darstellbar sind, wird für  $a$  der Wert 0,5 angenommen.

Auf Grund der geringen Anzahl von nur zwei Faktoren muss ein vollfaktorieller Versuchsplan gewählt werden. Aus dem Versuchsplan ergeben sich neun verschiedene Konfigurationen je Block die geprüft werden. Hieraus resultieren 54 Versuchseinstellungen.

Bild 4.1 2<sup>2</sup>-Versuchsplan

Die Anzahl der Wiederholungen wird mit dem in Minitab hinterlegten „Power and Sample Size“-Test für 2<sup>k</sup>-Versuchspläne ermittelt. Die in Kapitel 3.6.2 ermittelte Standardabweichung, aus den Vorversuchen beträgt 33,72 Newton, die Power soll 95 Prozent betragen. Es wird die Auflösegenauigkeit für fünf, acht und zehn Wiederholungen je Prüfpunkt dargestellt.

Power and Sample Size				
Response Surface Design				
Alpha = 0,05 Assumed standard deviation = 33,72				
Factors: 2 CCD Design: 2; 8				
Blocks: none				
Including a term for center points in model.				
Center Points	Reps	Total Runs	Power	Effect
1	5	41	0,95	39,6518
1	8	65	0,95	30,9248
1	10	81	0,95	27,5511

Bild 4.2 „Power and Sample Size“ Test Versuchsplan

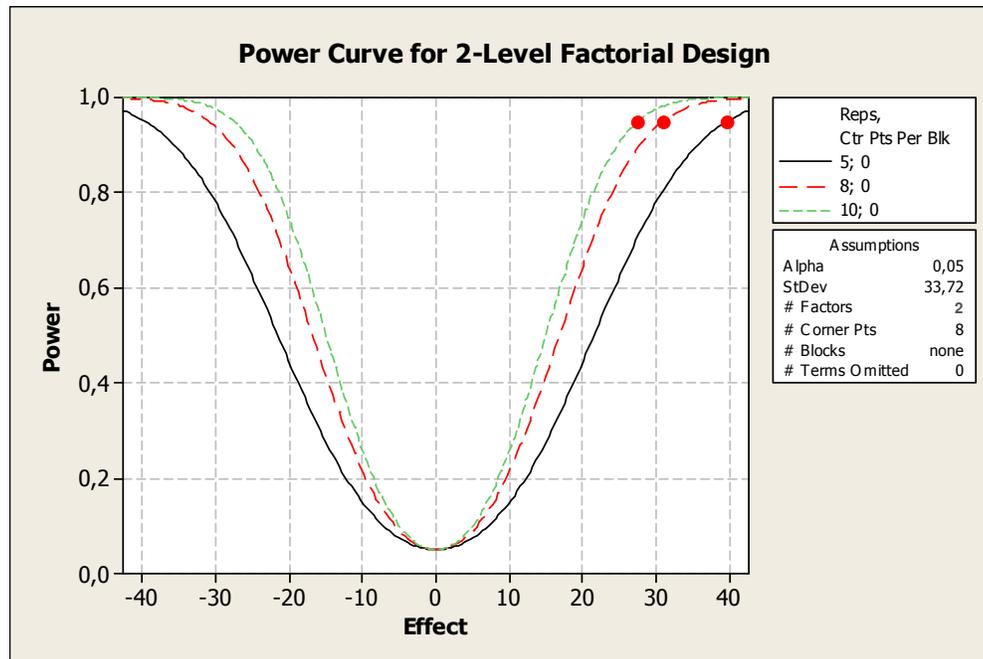


Bild 4.3 „Power Curve“ des Versuchsplans

Eine Auflösung von 30 Newton entspricht circa fünf Prozent der erwarteten Lasten und ist somit ausreichend um signifikante Einflüsse zu erkennen. Eine Rate von acht Wiederholungen erreicht eine Auflösung von 31 Newton. Zusätzlich zu den hier berücksichtigten acht Prüfpunkten kommt noch der Zentralpunkt hinzu, der die Auflösung noch verbessert. Daher unterschreitet die Auflösung, mit acht Wiederholungen je Prüfpunkt, die geforderten 30 Newton und ist somit hinreichend genau.

Aus der Anzahl von 54 Prüfpunkten und einer Wiederholungsrate von acht ergeben sich 432 durchzuführende Versuche im Rahmen der beiden Versuchspläne.

## 4.2 Versuchsvorbereitung

Die wichtigste Vorbereitung der Versuche besteht darin die Testblöcke mit Bohrungen in den geforderten Durchmessern zu versehen. Da in den Vorversuchen bereits Abweichungen von 0,02mm beim Lochdurchmesser den Kurvenverlauf der Regressionsfunktion entscheidend beeinflussten, wird eine Toleranz von 0,01mm vorgegeben.

Die Anzahl von 16 Bohrungen pro Testblock und 8 Wiederholungen je Konfiguration lassen es zu immer zwei Konfigurationen pro Testblock abzubilden. Es werden insgesamt neun Testblöcke aus jedem der drei Materialien benötigt.



Bild 4.4 gebohrter Testblock

Die Einpresskräfte haben auf die Optimierung der Kappenabzugskraft keinen Einfluss werden aber für folgende Untersuchungen dokumentiert. Daher zählt das Einpressen der Raststifte in die Testblöcke ebenfalls zu den Versuchsvorbereitungen. Das Einpressen der Raststifte erfolgt wie in den Vorversuchen manuell mittels einer Handhebelpresse.



Bild 4.5 Testblock mit eingepressten Raststiften

---

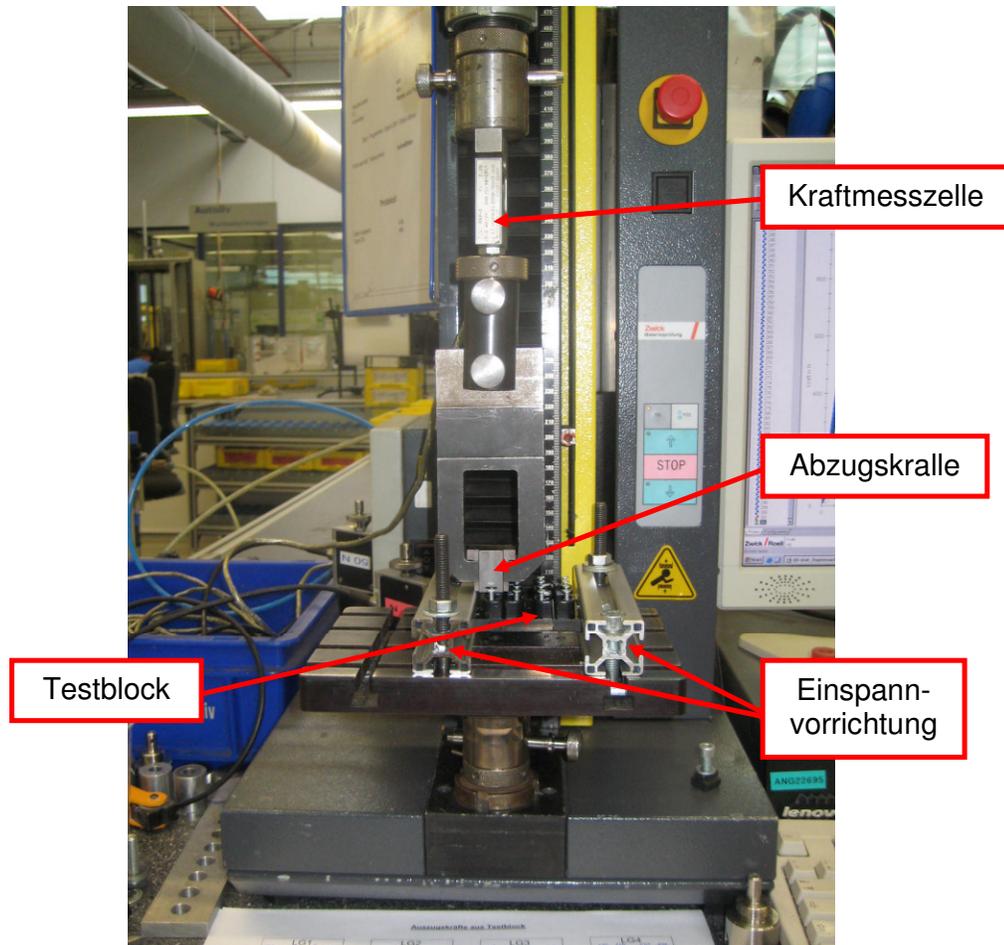
### 4.3 Versuchsdurchführung

Nach Abschluss der Vorversuche und dem Aufstellen des Versuchsplans kann mit den Hauptversuchen begonnen werden. Wenn möglich sollten alle Versuche an einem Tag nacheinander durchgeführt werden, damit gewährleistet ist, dass die gleichen Umgebungsbedingungen herrschen.

Daher ist es wichtig, dass alle vorbereitenden Arbeiten abgeschlossen sind, das gesamte Prüfequipment für die komplette Versuchsdauer zur Verfügung steht und alle Beteiligten ausreichend Zeit eingeplant haben, bevor mit der Durchführung der Versuche begonnen wird.

Können dennoch nicht alle Versuche an einem Stück durchgeführt werden, müssen die Versuchsblöcke entsprechend gekennzeichnet werden. Erst wenn über den 2-t-Test geprüft wurde, ob alle Blöcke der gleichen Grundgesamtheit angehören, dürfen sie anschließend zusammengefasst werden.

Aus den Vorversuchen hat sich ergeben, dass die Auszugskräfte 2000N nicht überschreiten. Daher können die Versuche im Rahmen des Versuchsplans auf einer kleineren Prüfvorrichtung mit einer Kraftmesszelle bis 2 Kilonewton durchgeführt werden.



4.6 Abzugsvorrichtung

Eingespannt werden die Testblöcke mittels zweier Aluminiumprofile, die auf die Grundplatte der Prüfmaschine verschraubt sind. Die Profile ermöglichen ein Verschieben der Blöcke, sodass jeweils eine Reihe von vier Raststiften gezogen werden kann.

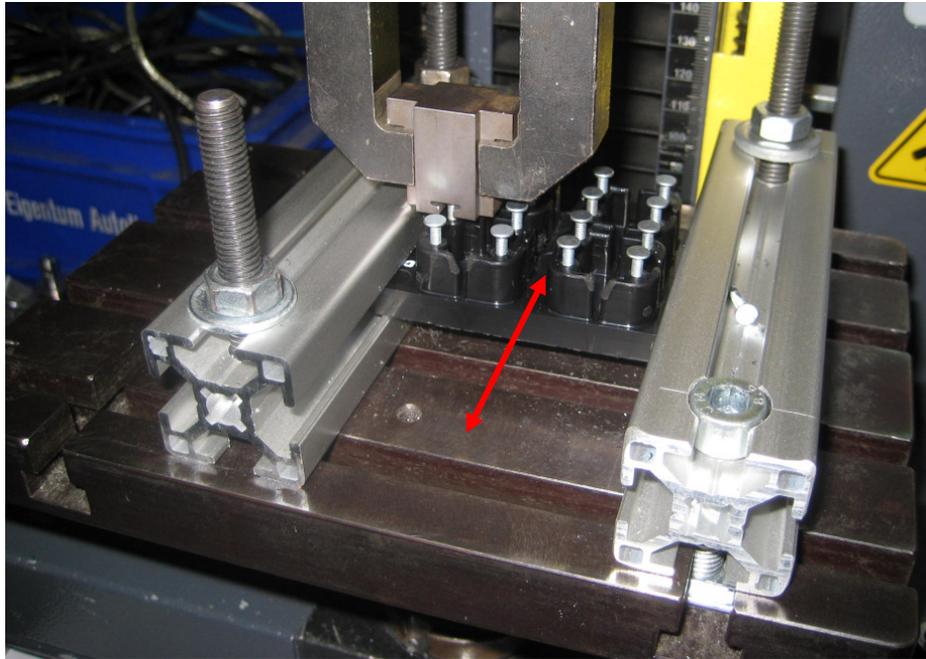


Bild 4.7 Einspannung der Testblöcke

Ein Wechsel der Blöcke ist ohne Lösen der Einspannung möglich. Auf Grund der Symmetrie der Blöcke können mit einer Einstellung zunächst bei allen Testblöcken jeweils die äußeren Reihen gezogen werden.

Anschließend wird die Einspannung verschoben, sodass die inneren beiden Reihen gezogen werden können. Hieraus resultierend muss die Einspannung im gesamten Versuchsverlauf nur einmal neu positioniert werden.

Während der Vorversuche zur Ermittlung der Standardabweichung hat sich gezeigt, dass sich die Testblöcke beim Ziehen der inneren Reihen stark durchbiegen. Um auszuschließen, dass diese Durchbiegung einen Einfluss auf die Auszugskräfte hat, wird sie durch einen zusätzlichen Niederhalter unterdrückt.

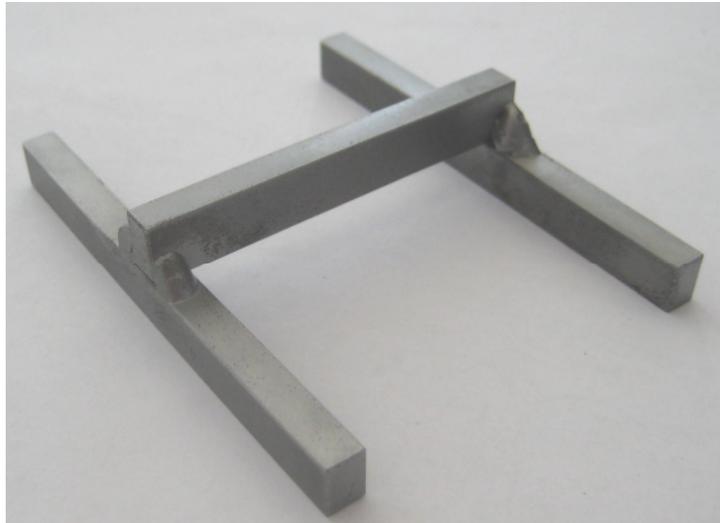


Bild 4.8 Niederhalter für Testblock

Der Niederhalter wird zusammen mit dem Testblock in die Einspannung geschoben. So verhindert er sicher das Durchbiegen des Blocks und alle Raststifte werden senkrecht aus den Blöcken gezogen.



Bild 4.9 Testblock mit Niederhalter in Zugvorrichtung

---

## 4.4 Auswertung Versuchsplan 1

Für alle sechs Kombinationen von Raststiftdurchmesser und Testblockmaterial gibt es jeweils eine optimale Konfiguration, die ermittelt wird. Zunächst werden alle sechs Konfigurationen separat betrachtet. Anschließend werden sie auf Gleichheit beziehungsweise signifikante Unterschiede hin untersucht.

Die Auswertung erfolgt mit dem Programm Minitab, mit dem im Vorfeld bereits die Versuchspläne erstellt wurden. Nach Durchführung der Versuche werden die ermittelten Auszugskräfte in den Versuchsplan eingetragen.

Zunächst werden die Ergebnisse auf Normalverteilung und Auffälligkeiten der Residuen untersucht. Bei der Betrachtung der Auswertung ist erkennbar, ob die beiden Faktoren linear oder quadratisch eingehen und ob es Wechselwirkungen gibt. Weiterhin wird die Güte der Regression ausgegeben. Um ein aussagefähiges Ergebnis zu haben, sollte die Güte oberhalb von 75 Prozent liegen.

#### 4.4.1 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,111 > 0,05$ ) und weisen keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

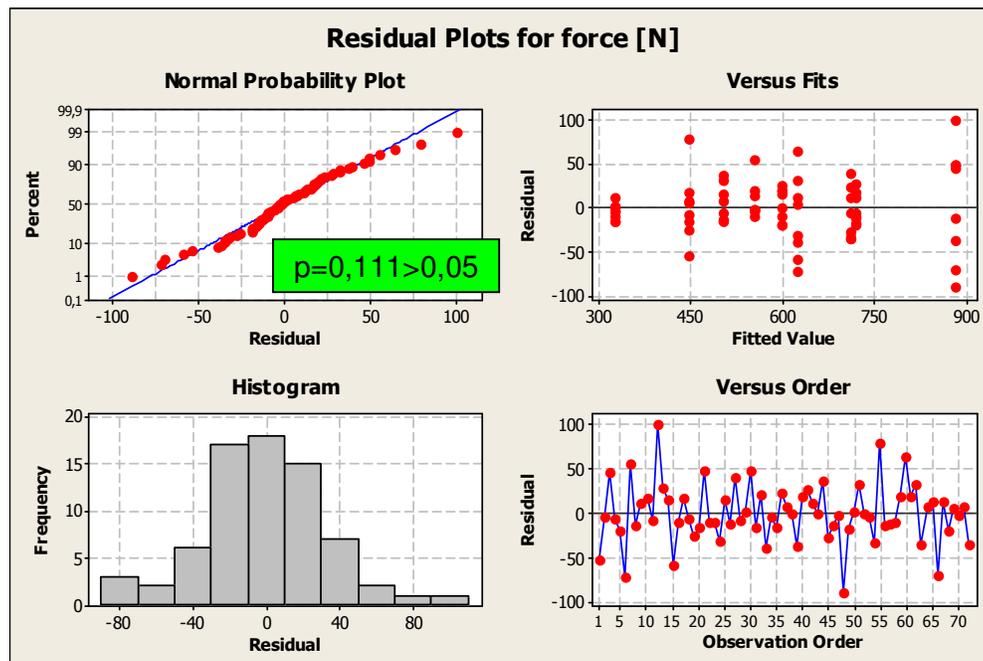


Bild 4.10 Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,8mm

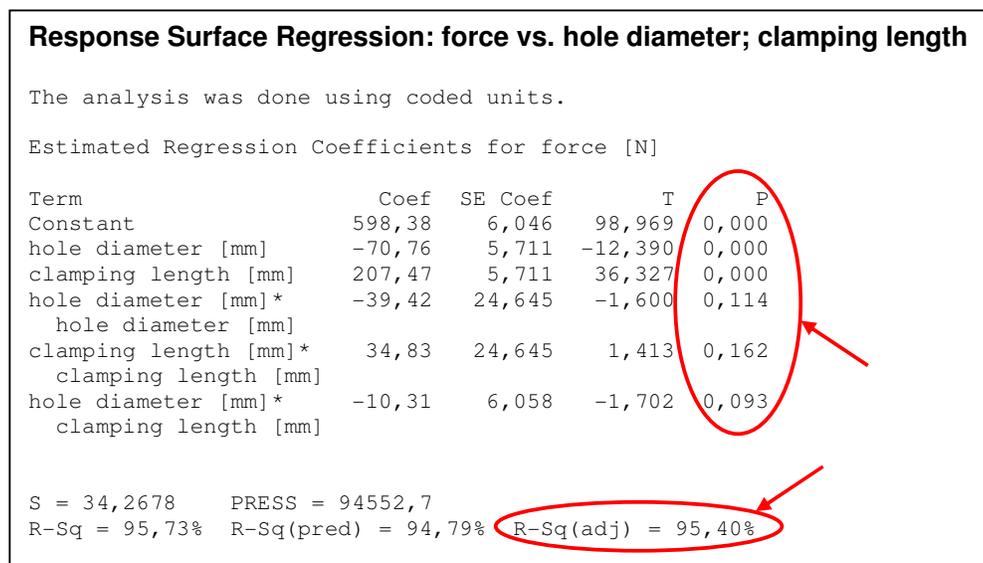


Bild 4.11 Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,8mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse erkennt man, dass der quadratische Anteil beider Faktoren nicht signifikant ist. Auch eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist nicht gegeben.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt bei 34,27N und ist damit annähernd auf dem Niveau der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit beträgt 95,4 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Hier erkennt man, dass das Maximum des Versuchsraums bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,6mm Lochdurchmesser liegt. Die maximale Auszugskraft beträgt im Mittel 887N.

Da das Maximum an der Grenze des Versuchsraums liegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass das gefundene Maximum nur ein lokales und nicht das globale Maximum ist.

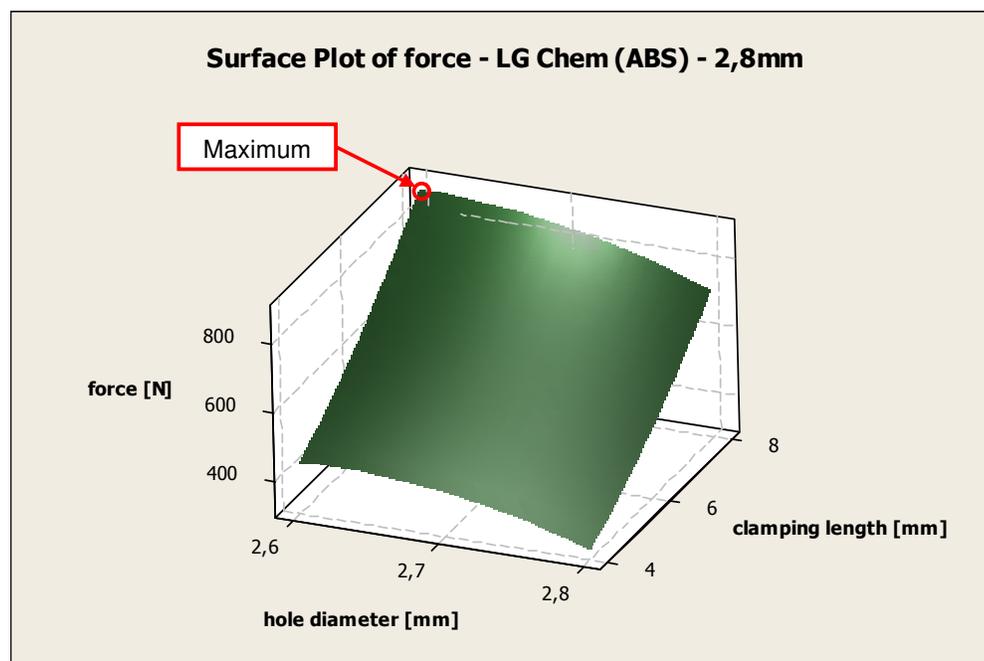


Bild 4.12 Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,8mm

#### 4.4.2 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,457 > 0,05$ ) und pendeln um null. Es sind keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung zu erkennen.

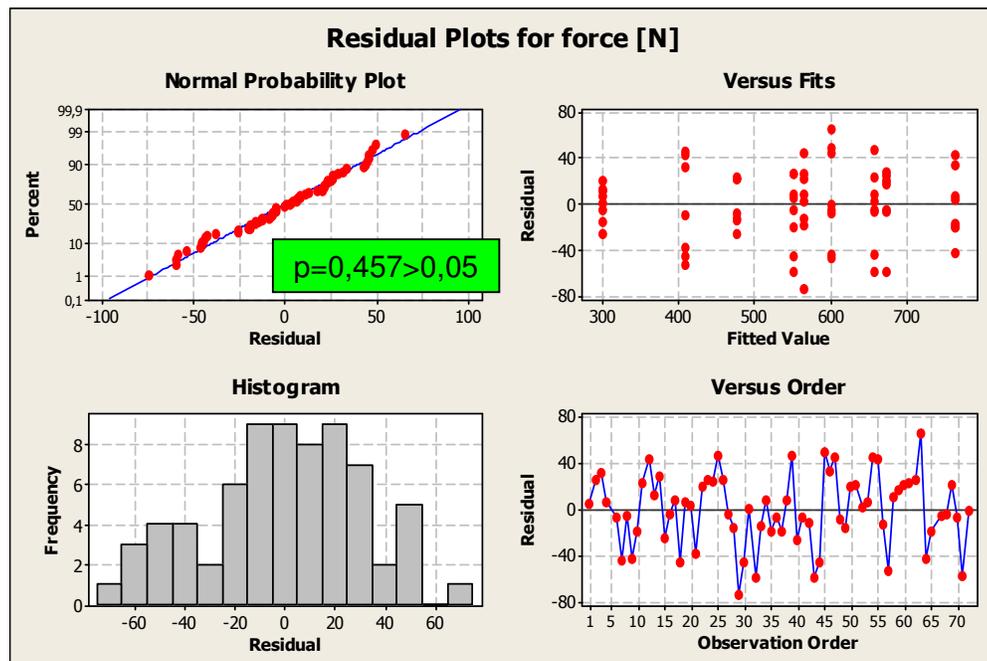


Bild 4.13 Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,8mm

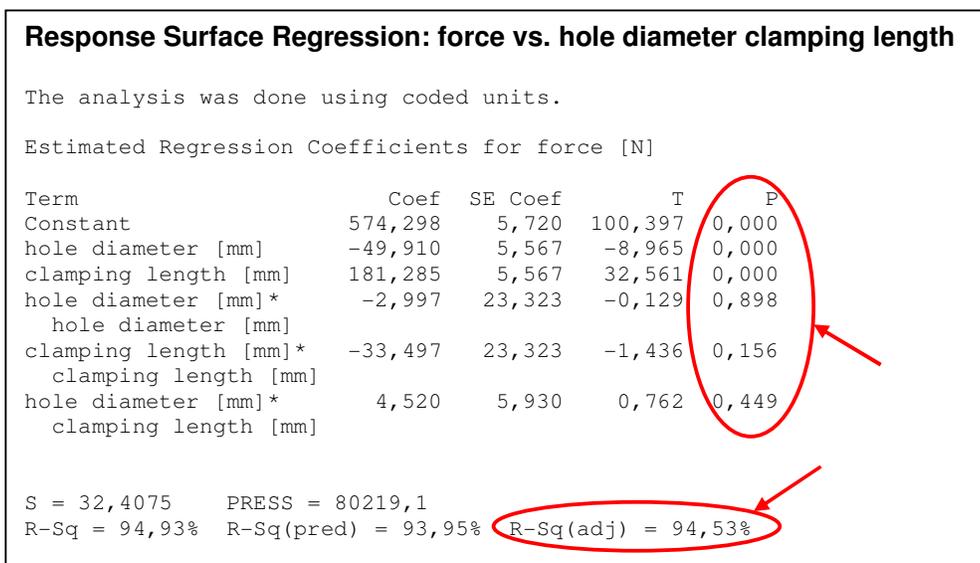


Bild 4.14 Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,8mm

Der quadratische Anteil beider Faktoren ist nicht signifikant. Auch eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist nicht gegeben.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe mit 32,41N annähernd auf dem Niveau der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit liegt mit 94,53 Prozent deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Analog zum vorher betrachteten LG Chem liegt auch hier das Maximum des Versuchsraums bei einer Abzugskraft von im Mittel 750N der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,6mm Lochdurchmesser.

Daher kann hier ebenso nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem gefundenen Maximum nur um ein lokales Maximum handelt.

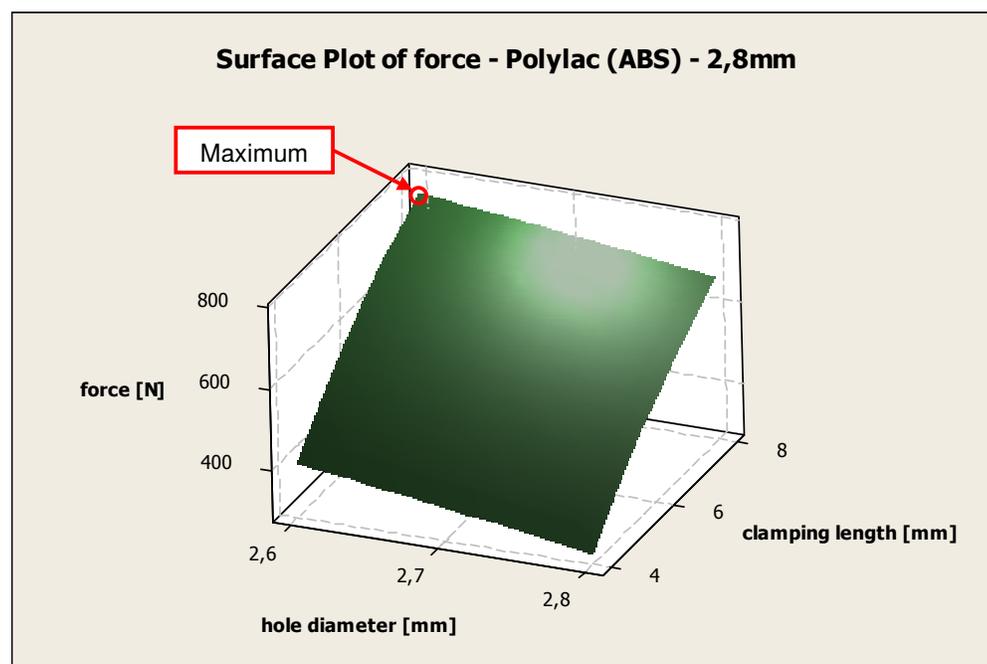


Bild 4.15 Response Surface – Polylac (ABS) – 2,8mm

#### 4.4.3 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,286 > 0,05$ ) und weisen keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

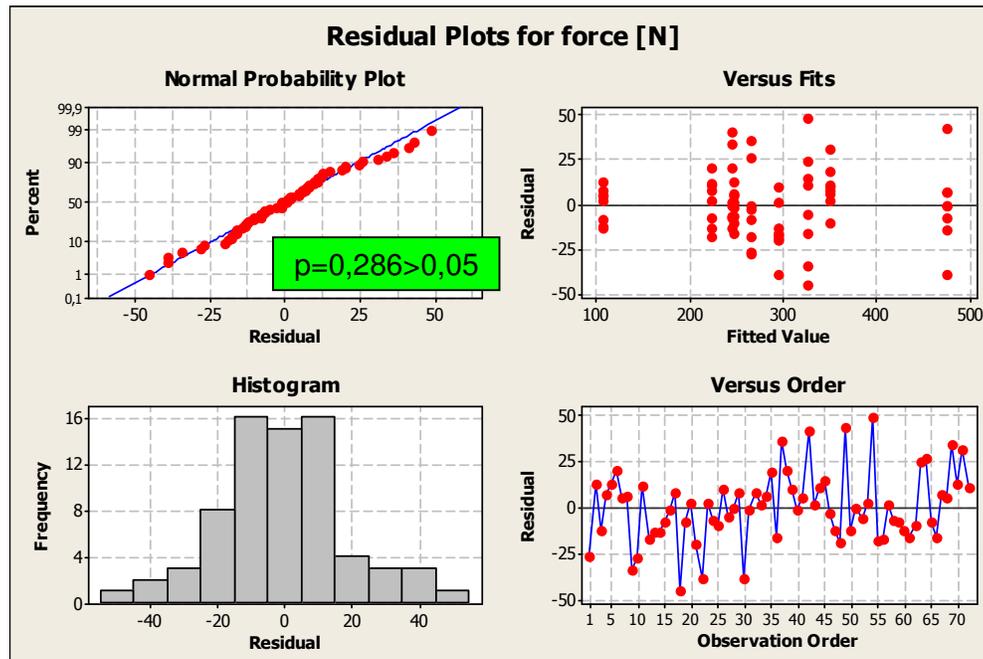


Bild 4.16 Residual Plot – Samsung (PP) – 2,8mm

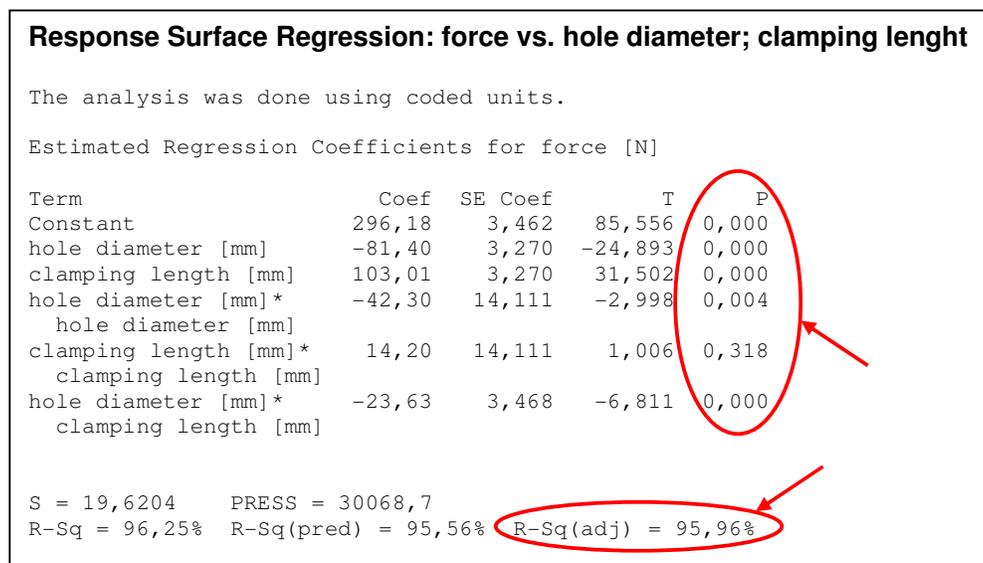


Bild 4.17 Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,8mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse sieht man, dass der quadratische Anteil der Klemmlänge nicht signifikant ist. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Auswertungen der ABS Materialien hat sowohl der quadratische Anteil des Lochdurchmessers als auch die Wechselwirkung zwischen den beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt mit 19,62N deutlich unterhalb der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Ergebnisse haben somit eine höhere Aussagekraft. Die Vorhersagbarkeit beträgt 95,96 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Die Fläche ist deutlich stärker gekrümmt als bei den beiden vorher betrachteten Materialien, was auf den Einfluss des quadratischen Anteils des Lochdurchmessers zurückzuführen ist. Dennoch liegt auch hier das Maximum des Versuchsraums mit einer Abzugskraft von circa 475N bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,6mm Lochdurchmesser liegt.

Auch hier gilt, dass das gefundene Maximum nicht das globale Maximum sein muss, sondern es sich auch nur um das lokale Maximum des Versuchsraums handeln kann.

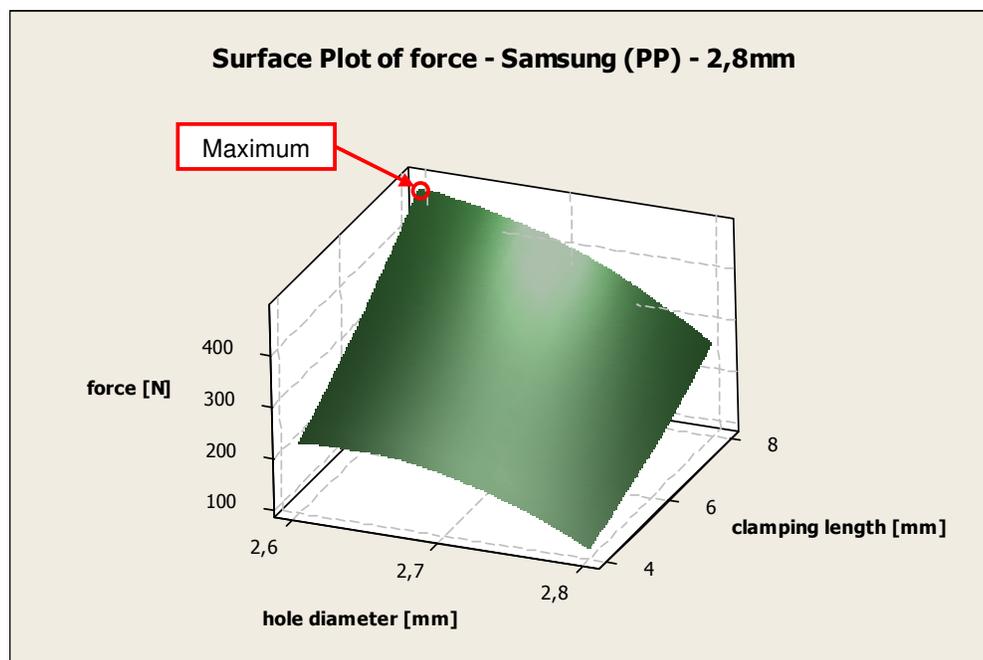


Bild 4.18 Response Surface – Samsung (PP) – 2,8mm

#### 4.4.4 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,757 > 0,05$ ). Die Verteilung weist keine Unregelmäßigkeiten auf.

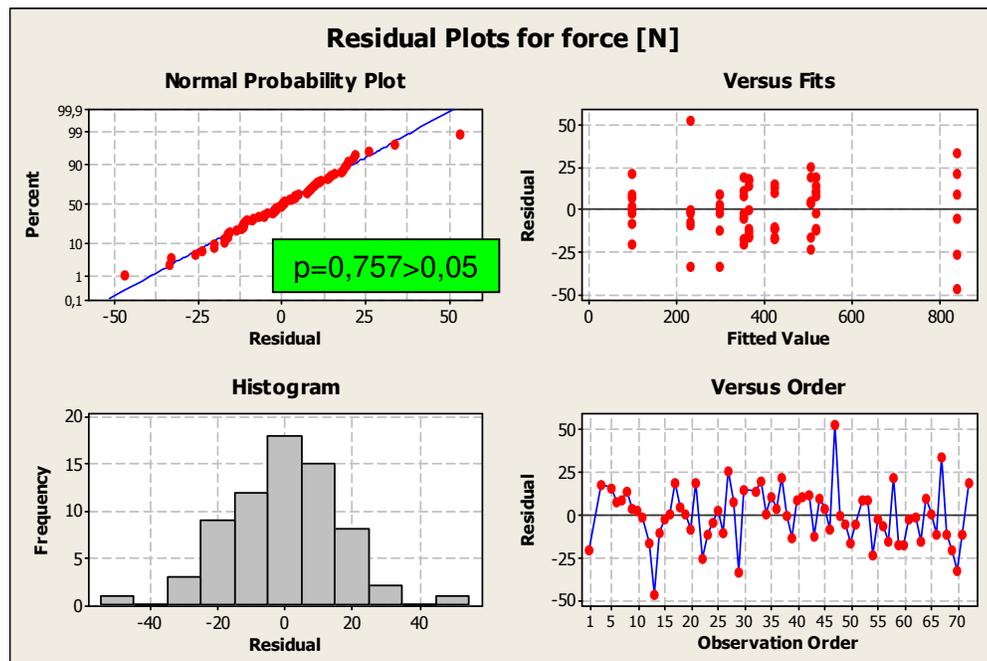


Bild 4.19 Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,3mm

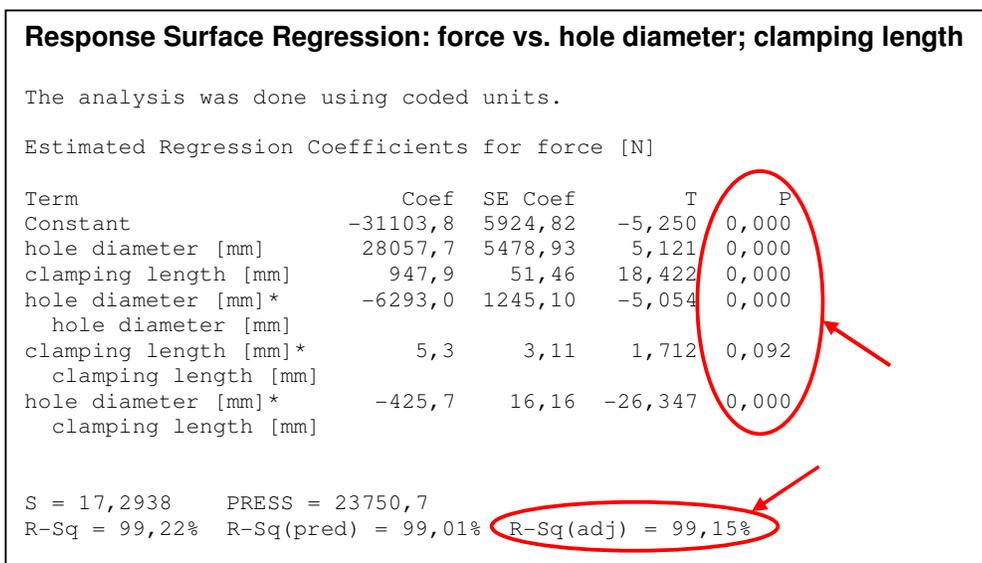


Bild 4.20 Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,3mm

Bei der Auswertung der Regressionsanalyse erkennt man, dass der quadratische Anteil der Klemmlänge nicht signifikant ist. Der Lochdurchmesser hat sowohl einen linearen als auch einen quadratischen Anteil. Zusätzlich ist auch noch eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren vorhanden.

Mit 17,29N ist die Standardabweichung dieser Versuchsreihe um die Hälfte niedriger als die im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit beträgt 99,15 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Bei der Betrachtung der Response Surface sieht man, dass das Maximum des Versuchsraums mit circa 815N bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,1mm Lochdurchmesser liegt.

Da das Maximum auch hier an der Grenze des Versuchsraums liegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass das gefundene Maximum nur ein lokales und nicht das globale Maximum ist.

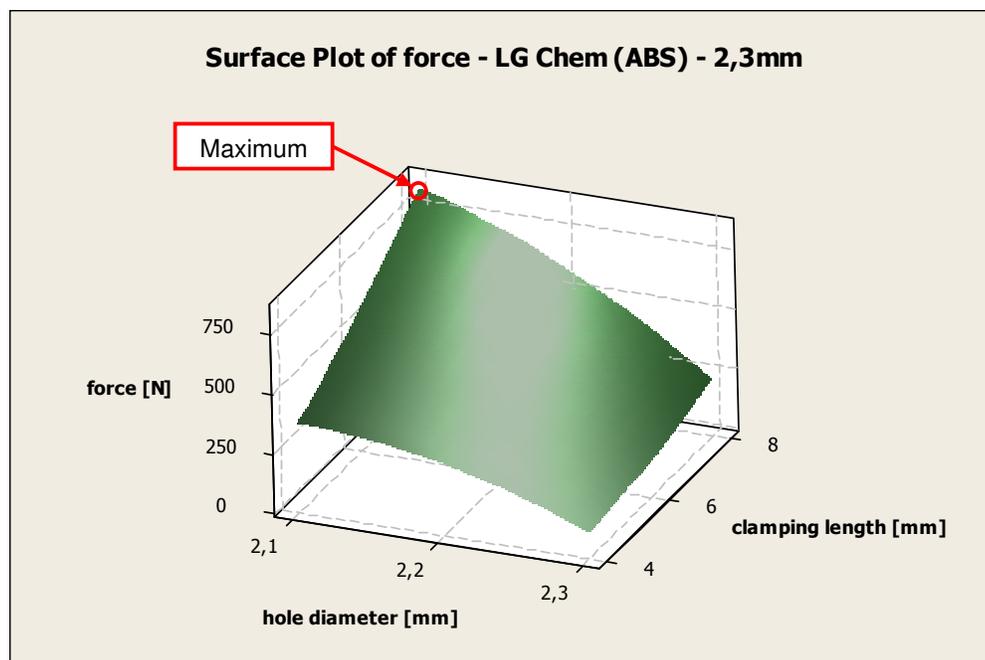


Bild 4.21 Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,3mm

#### 4.4.5 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,406 > 0,05$ ) und weisen keine Serien oder Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

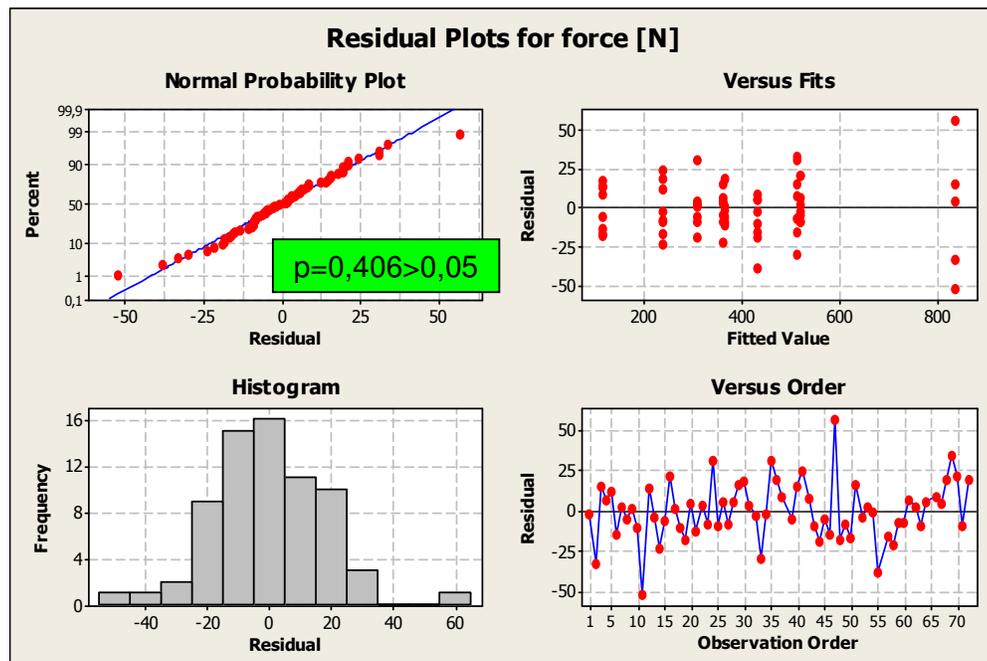


Bild 4.22 Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,3mm

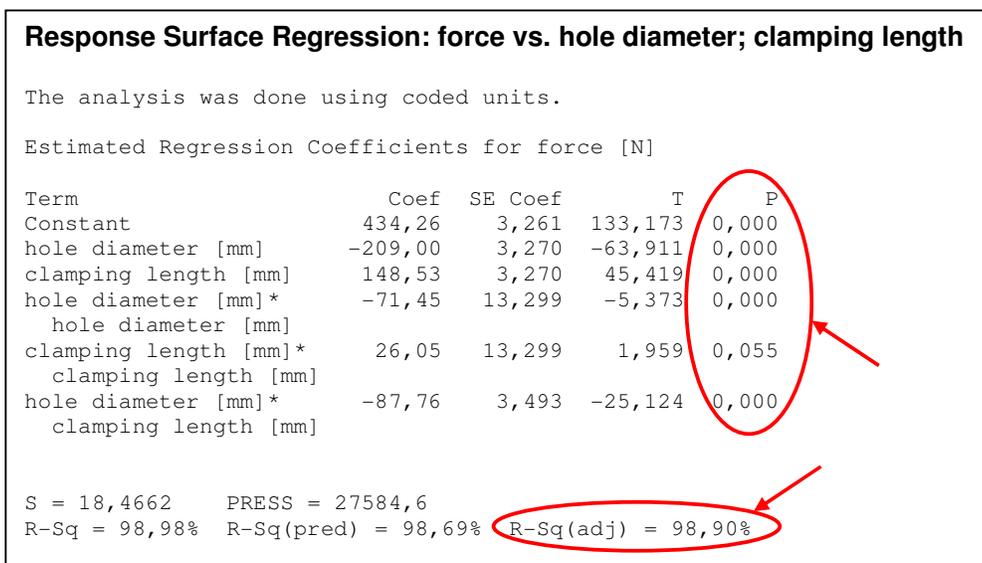


Bild 4.23 Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,3mm

Aus der Regressionsanalyse ist zu entnehmen, dass die Klemmlänge keinen quadratischen Einfluss hat. Der Lochdurchmesser hat neben dem linearen Anteil allerdings noch einen quadratischen Anteil. Auch die Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist signifikant.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt bei 18,47N und ist damit deutlich niedriger als die Standardabweichung von 33,72N aus den Vorversuchen. Somit steigt die Qualität des Ergebnisses. Die Vorhersagbarkeit beträgt 98,9 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Hier erkennt man, dass die maximale Auszugskraft im Versuchsraum im Mittel 810N beträgt und bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,1mm Lochdurchmesser erreicht wird.

Da das Maximum an der Grenze des Versuchsraums liegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass das gefundene Maximum nur ein lokales und nicht das globale Maximum ist.

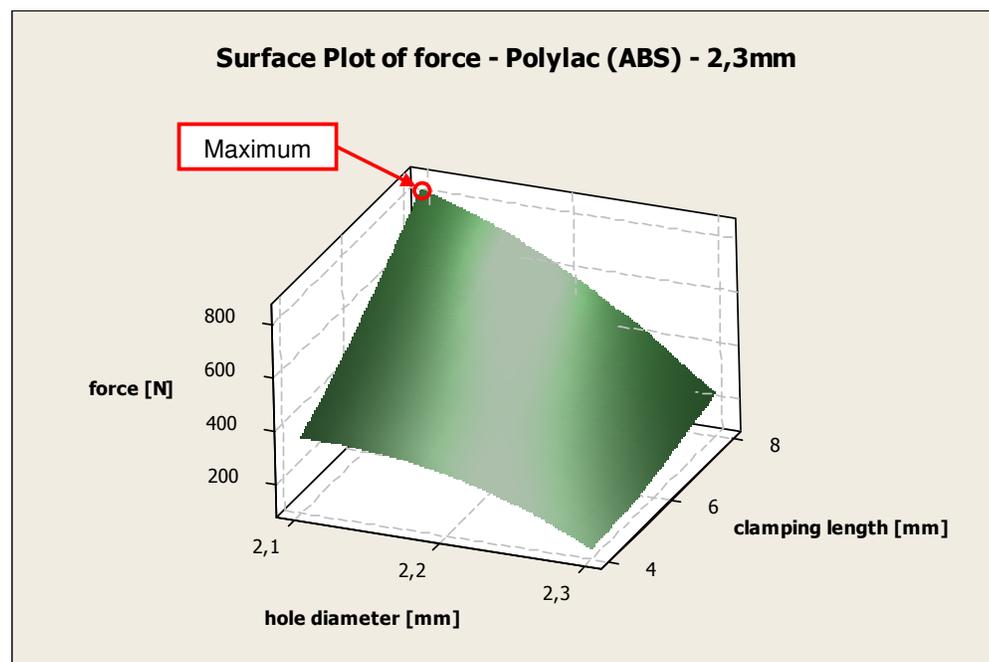


Bild 4.24 Response Surface – Polylac (ABS) – 2,3mm

#### 4.4.6 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP)

Die Untersuchung der Residuen ergibt, dass die Daten normalverteilt sind ( $P = 0,506 > 0,05$ ). Die streuen um Null und weisen keine Serien oder andere Auffälligkeiten auf.

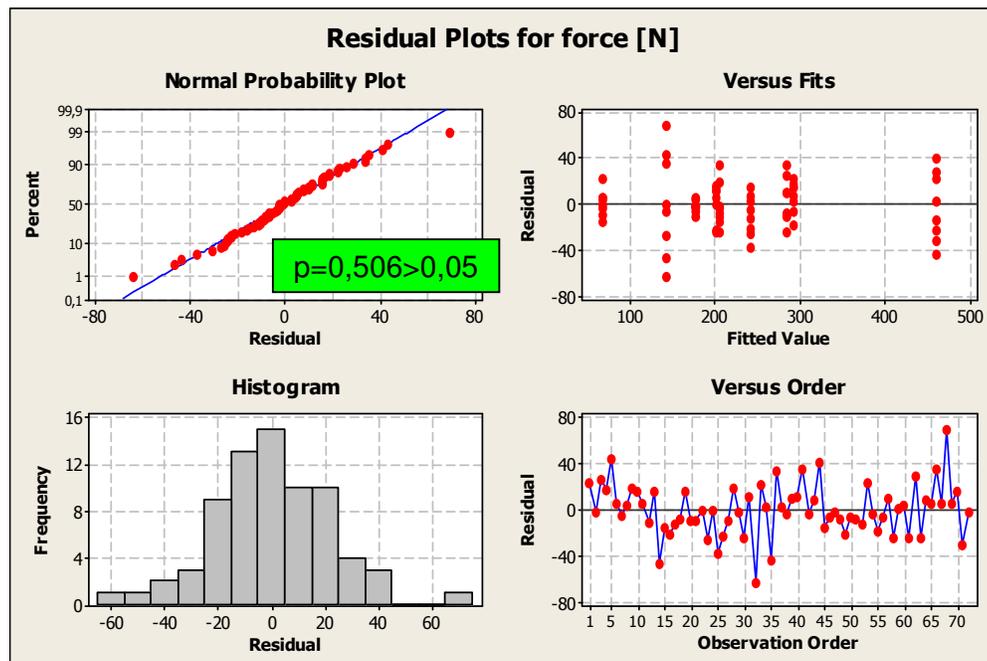


Bild 4.25 Residual Plot – Samsung (PP) – 2,3mm

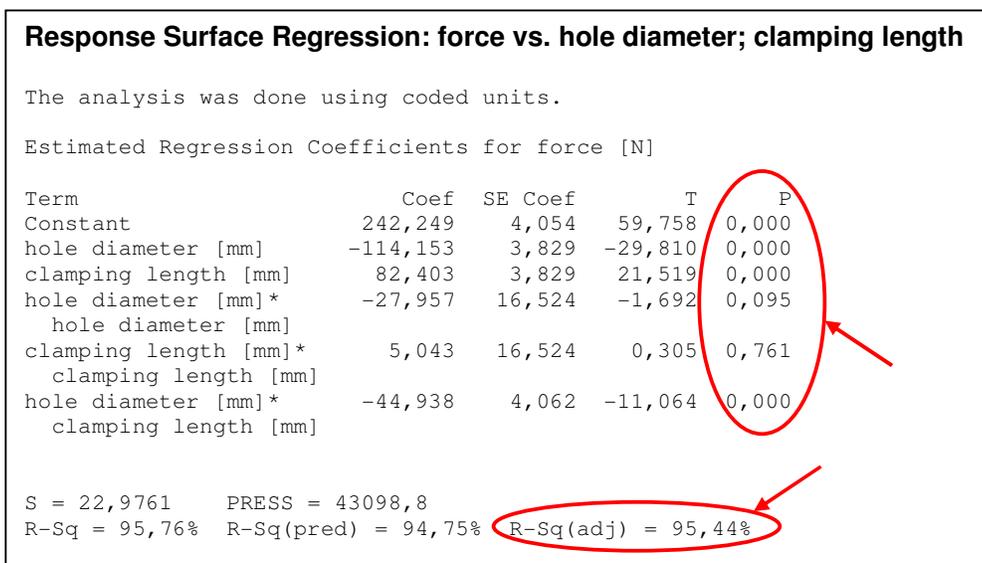


Bild 4.26 Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,3mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse erkennt man, dass der quadratische Anteil beider Faktoren nicht signifikant ist. Eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist allerdings gegeben.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt mit 22,98N deutlich unterhalb der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Somit ist die Güte der Ergebnisse besser als berechnet. Die Vorhersagbarkeit beträgt 95,44 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Die maximale Abzugskraft von im Mittel 460N wird bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,1mm Lochdurchmesser erreicht. Der Verlauf wird in der Response Surface dargestellt.

Es darf nicht davon ausgegangen werden, dass es sich bei dem gefundenen Maximum automatisch auch um das globale Maximum handelt, da es sich am Rand des Versuchsbereichs befindet und somit auch außerhalb des untersuchten Bereichs liegen kann.

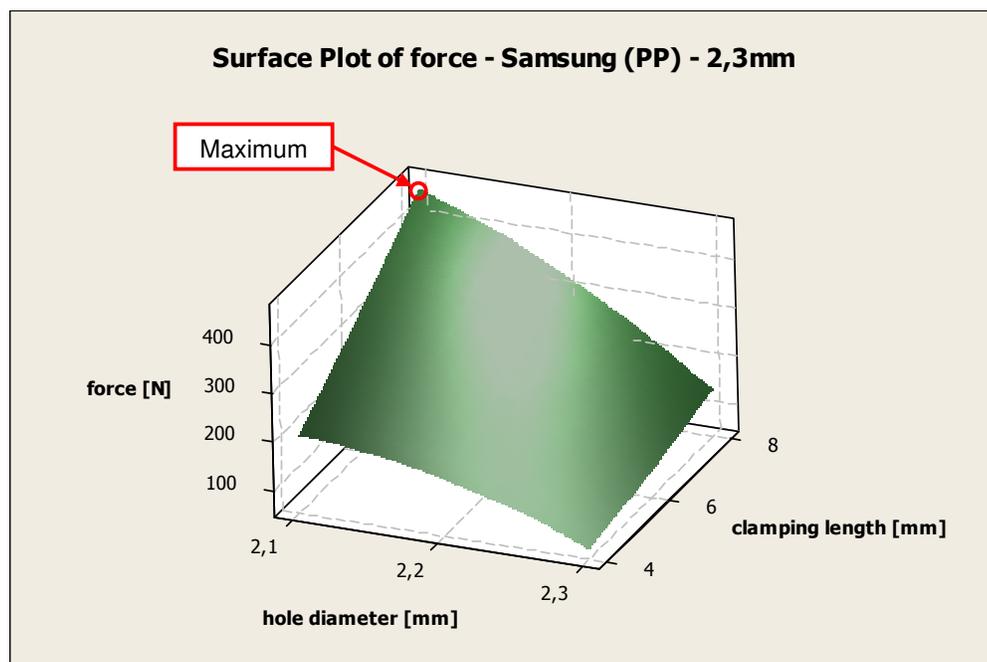


Bild 4.27 Response Surface – Samsung (PP) – 2,3mm

#### 4.4.7 Bewertung und Weiterführung der Ergebnisse

Die maximale Auszugskraft liegt bei allen sechs untersuchten Konfigurationen bei der Kombination aus größter Klemmlänge und kleinstem Lochdurchmesser.

Die Klemmlänge ist durch die Raststiftlänge und die Kappengeometrie begrenzt. Somit kann sie nicht ohne Änderungen an der Kappe in Kombination mit längeren Raststiften weiter erhöht werden.

Die Änderung des Lochdurchmessers erfordert zwar auch eine Änderung des Kappenwerkzeugs, allerdings ist diese nur gering und die Geometrie der Kappe bleibt unangetastet.

Als Folge wird der Versuchsraum im nächsten Schritt nach unten erweitert. Die neuen Grenzen liegen für den 2,3mm Raststift bei 1,9mm und für den 2,8mm Raststift bei 2,4mm Lochdurchmesser.

Um auch hier mit einer geringen Anzahl Versuche eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse zu erhalten wird ein neuer Versuchsplan für die Wertebereiche von 1,9mm bis 2,1mm und 2,4mm bis 2,6mm Lochdurchmesser erstellt. Die Prüfpunkte für die Einpresstiefe bleiben mit 4mm bis 8mm gleich.

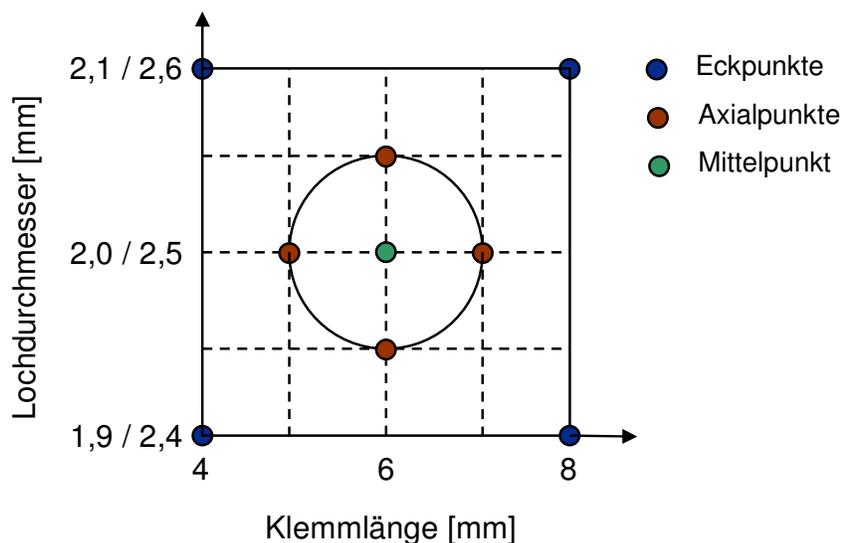


Bild 4.28 Versuchsplan 2

## 4.5 Auswertung Versuchsplan 2

### 4.5.1 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,054 > 0,05$ ) und weisen keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

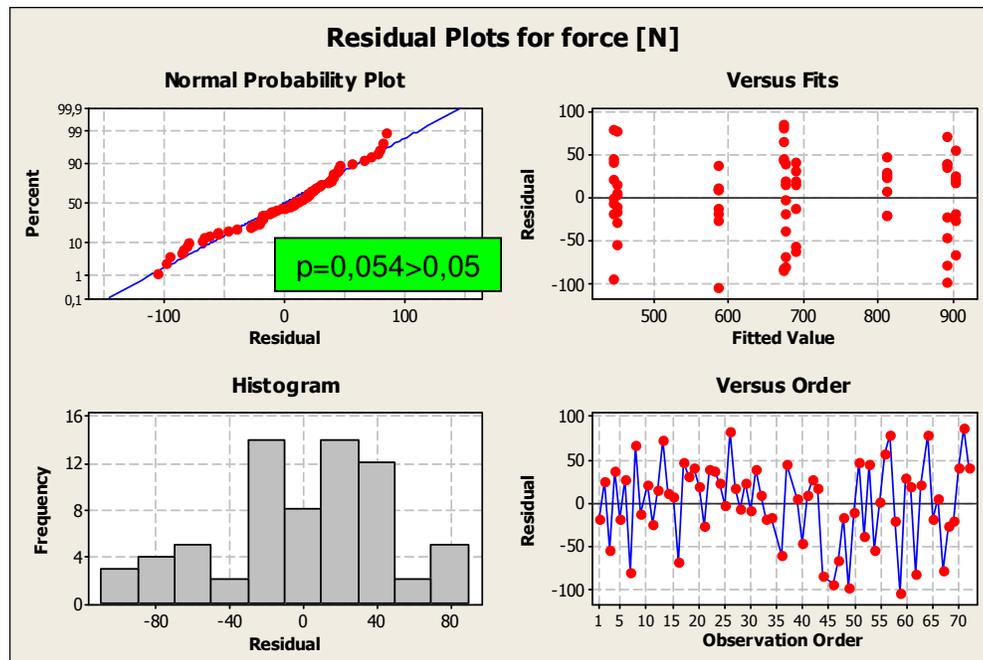


Bild 4.29 Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,8mm

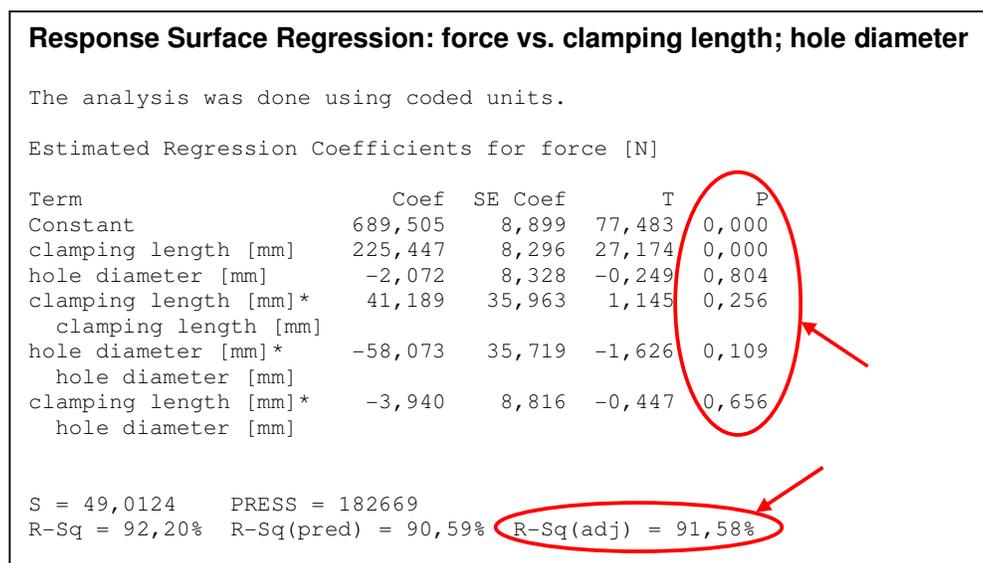


Bild 4.30 Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,8mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse erkennt man, dass nur der lineare Anteil der Klemmlänge einen signifikanten Einfluss hat. Dies bedeutet nicht, dass der Lochdurchmesser keinen Einfluss hat, dieser ist aber im Verhältnis zur Klemmlänge sehr gering.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe beträgt 49,01N und ist damit deutlich größer als die im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit beträgt 91,58 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Hier erkennt man, dass das Maximum des Versuchsraums nicht wie bei der vorherigen DoE an der Grenze des Versuchsbereichs liegt. Die maximale Auszugskraft beträgt im Mittel 956N und wird bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,49mm Lochdurchmesser erreicht.

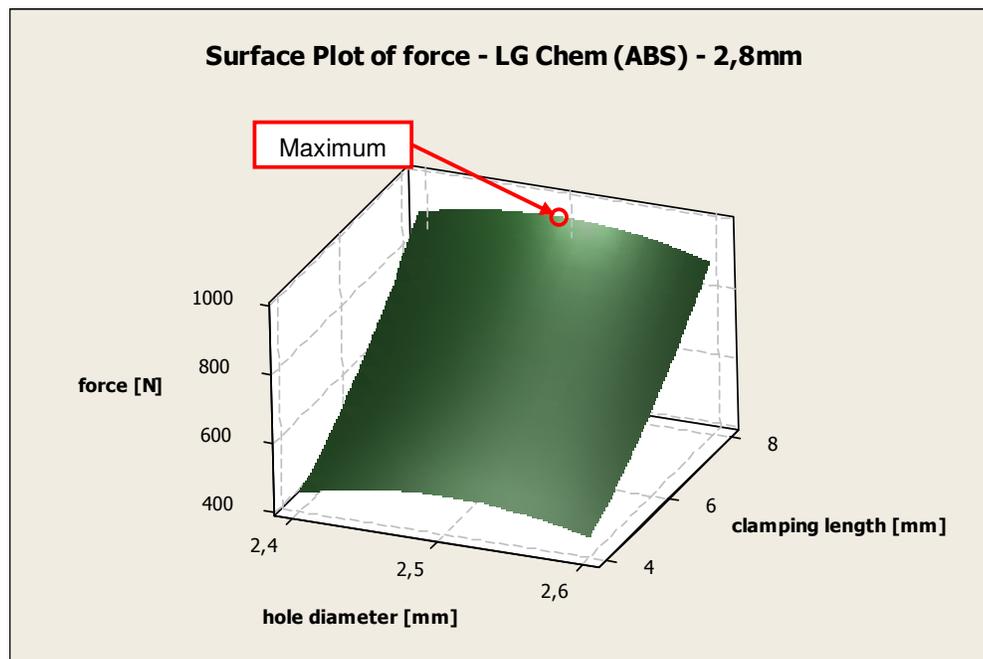


Bild 4.31 Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,8mm

### 4.5.2 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,184 > 0,05$ ) und pendeln um null. Es sind keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung zu erkennen.

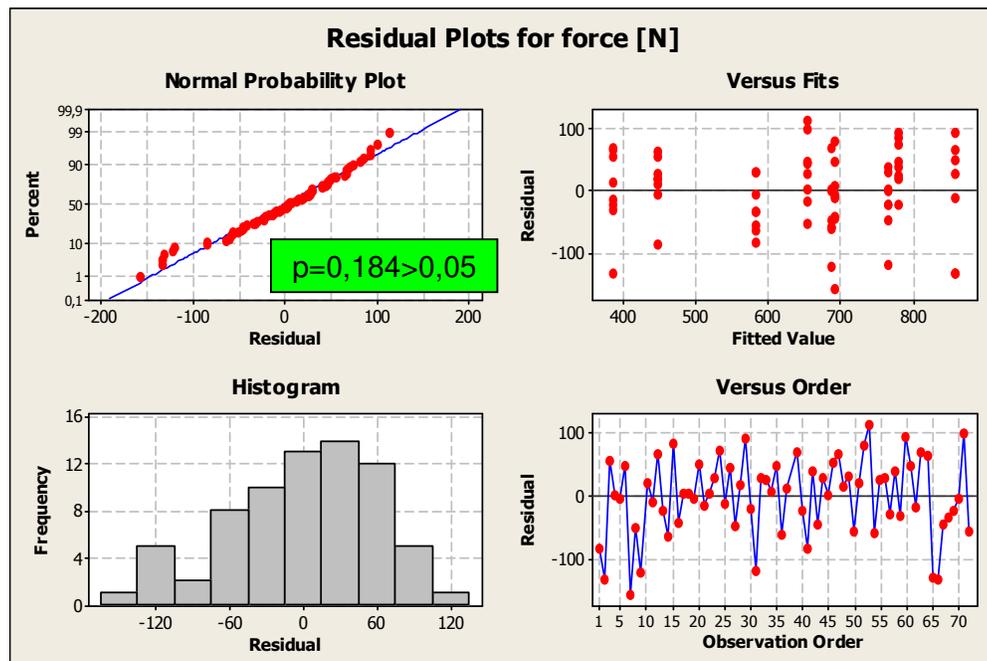


Bild 4.32 Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,8mm

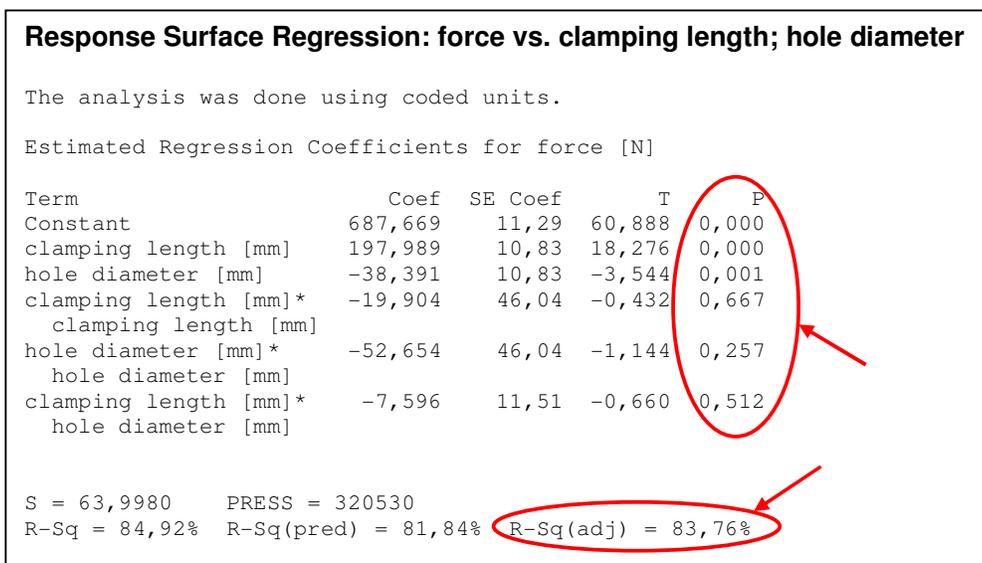


Bild 4.33 Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,8mm

Der quadratische Anteil beider Faktoren ist nicht signifikant. Auch eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist nicht gegeben.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe mit 64,00N ist wesentlich höher als die im Vorversuch ermittelte Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit liegt mit 83,76 Prozent noch oberhalb der geforderten 75 Prozent. Ist aber niedriger als im ersten Versuchsplan.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Analog zum vorher betrachteten LG Chem liegt auch hier das Maximum nicht an der Grenze des Versuchsraums. Die maximale Abzugskraft von im Mittel 876N wird bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,46mm Lochdurchmesser erzielt.

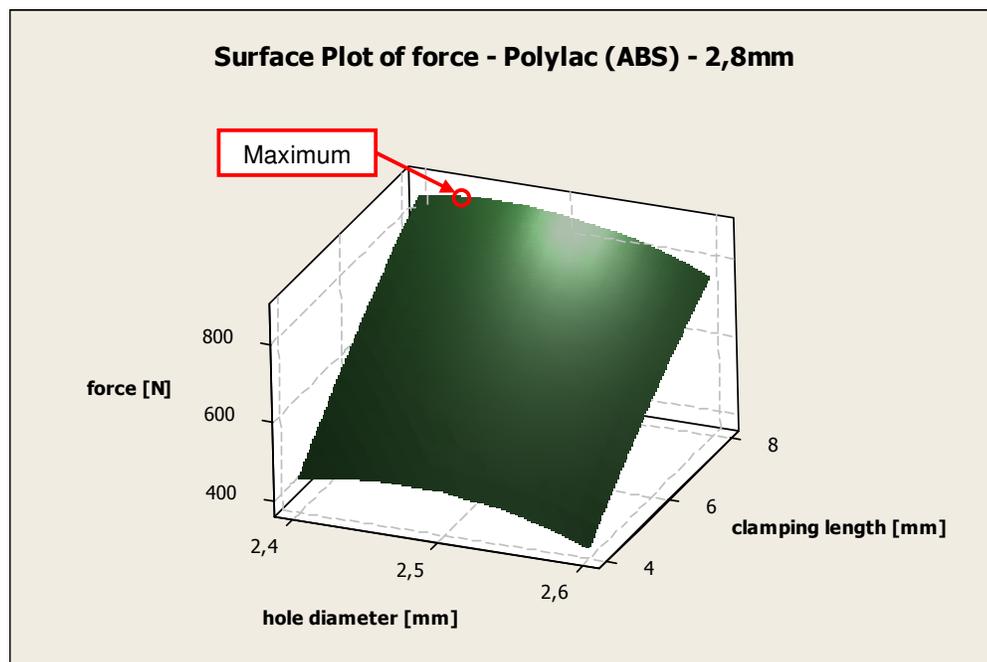


Bild 4.34 Response Surface – Polylac (ABS) – 2,8mm

### 4.5.3 ATP Tri-Press 2,8x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,123 > 0,05$ ) und weisen keine Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

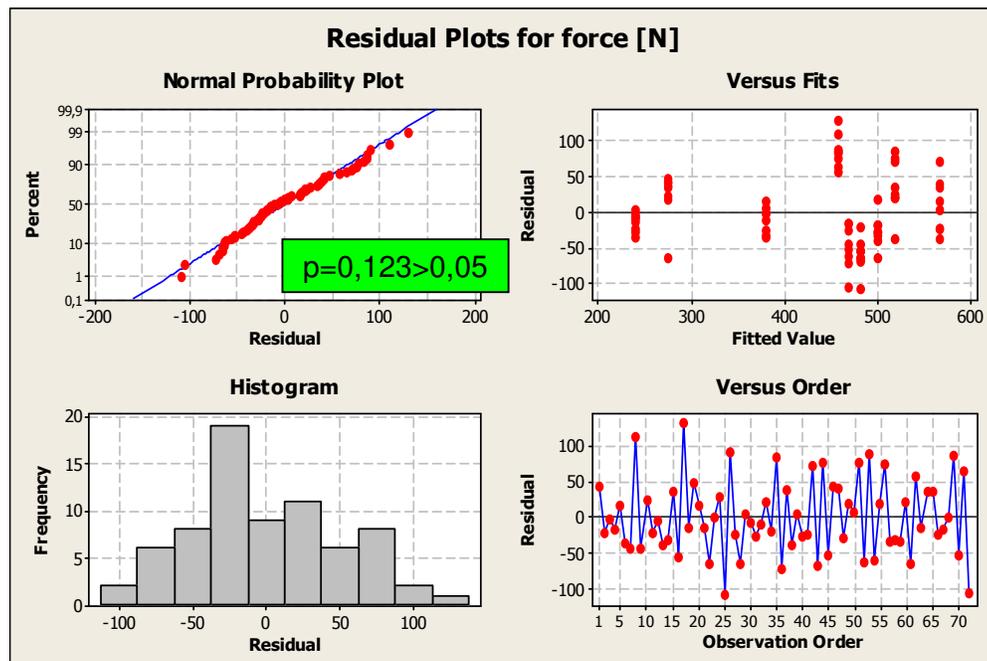


Bild 4.35 Residual Plot – Samsung (PP) – 2,8mm

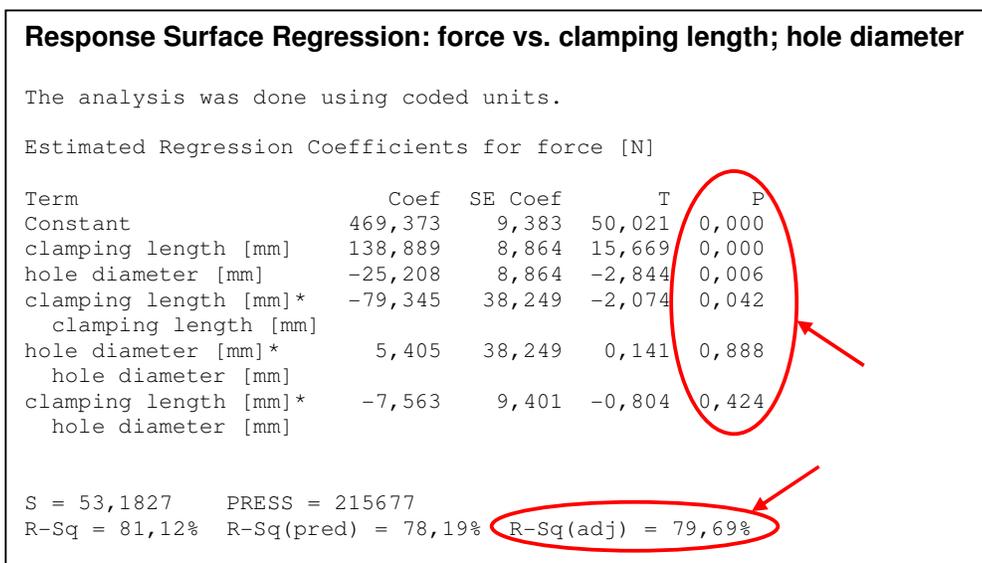


Bild 4.36 Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,8mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse sieht man, dass der quadratische Anteil des Lochdurchmessers und die Wechselwirkung zwischen den beiden Faktoren nicht signifikant sind. Der quadratische Anteil der Klemmlänge hingegen hat einen signifikanten Einfluss.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt mit 53,19N deutlich oberhalb der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Ergebnisse haben somit eine höhere Aussagekraft. Die Vorhersagbarkeit beträgt 79,69 Prozent und liegt damit gerade noch über den geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Entgegen aller bisherigen Versuche weist der Einfluss der Klemmlänge einen quadratischen Verlauf auf. Der Lochdurchmesser hingegen hat nur einen geringen Einfluss auf die Auszugskraft. Die maximale Abzugskraft von im Mittel 568N wird bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 2,4mm Lochdurchmesser erzielt.

Das gefundene Maximum muss nicht das globale Maximum sein, sondern es kann sich auch nur um das lokale Maximum des Versuchsraums handeln kann.

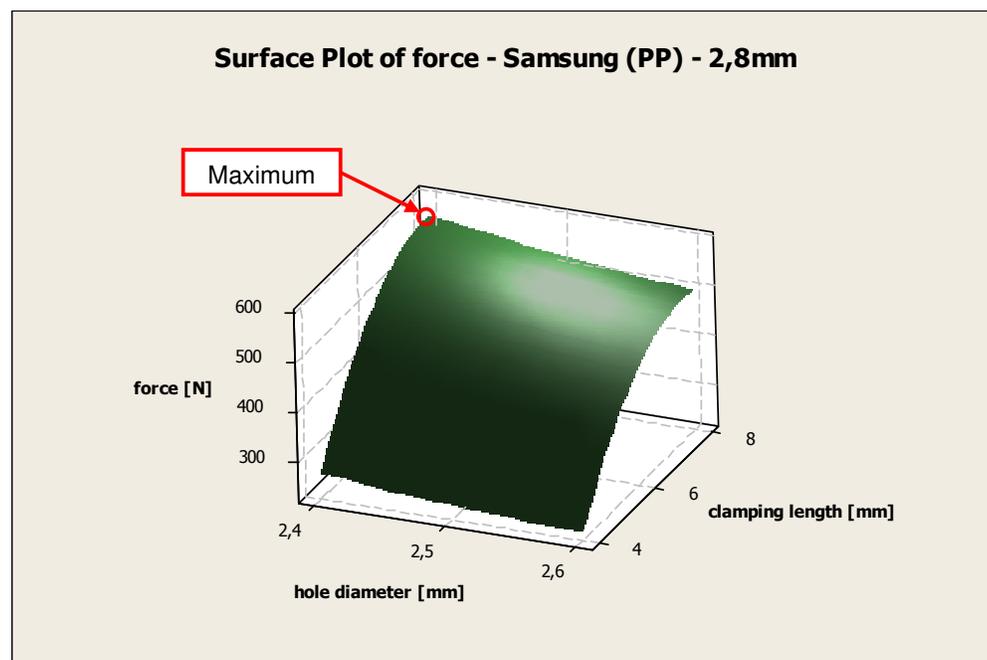


Bild 4.37 Response Surface – Samsung (PP) – 2,8mm

#### 4.5.4 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus LG Chem XR409H (ABS)

Die Residuen sind normalverteilt ( $P = 0,510 > 0,05$ ). Die Verteilung weist keine Unregelmäßigkeiten auf.

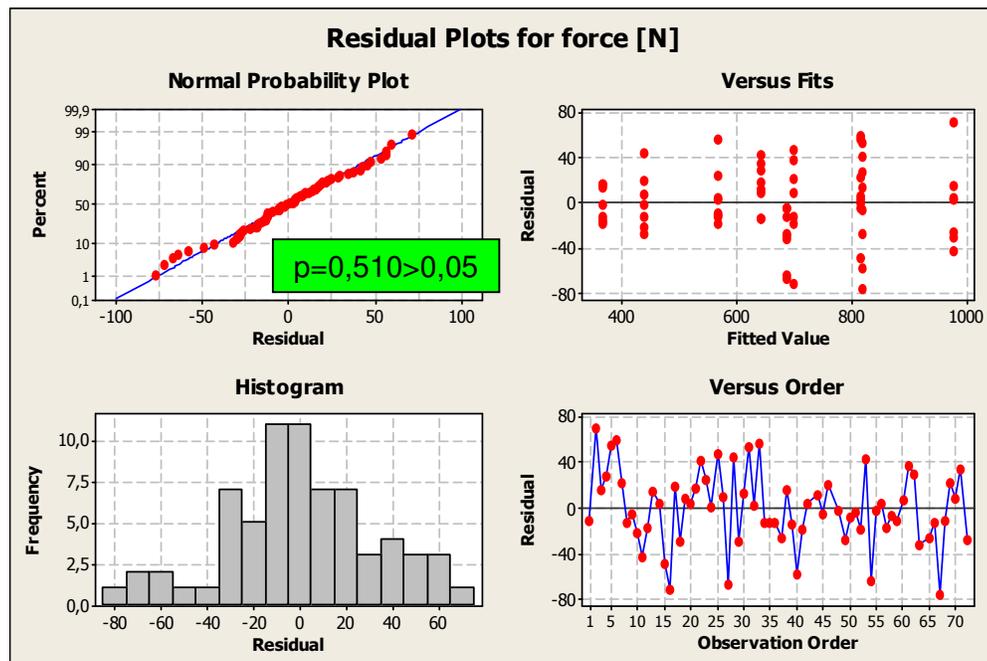


Bild 4.38 Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,3mm

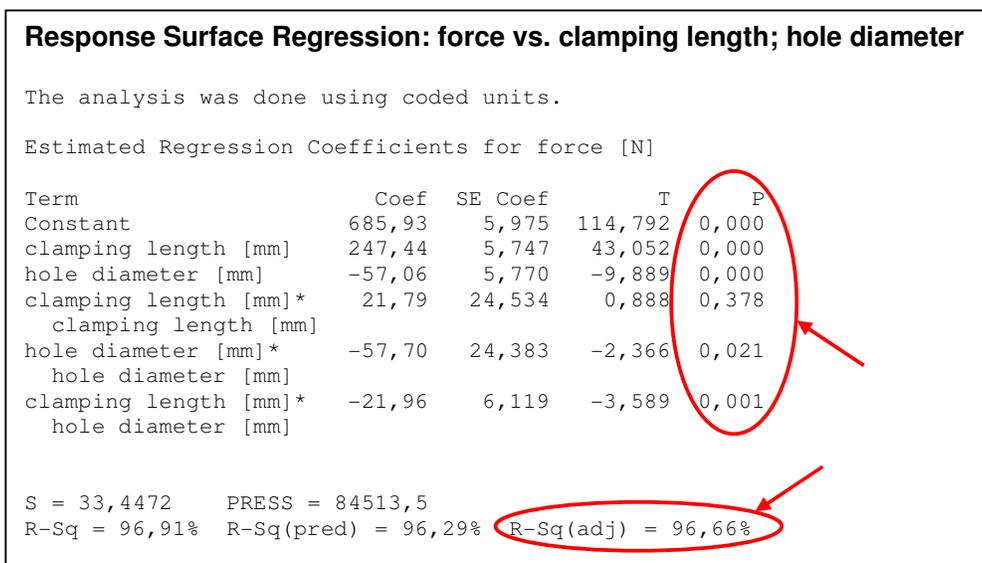


Bild 4.39 Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,3mm

Bei der Auswertung der Regressionsanalyse erkennt man, dass der quadratische Anteil der Klemmlänge nicht signifikant ist. Der Lochdurchmesser hat sowohl einen linearen als auch einen quadratischen Anteil. Zusätzlich ist auch noch eine Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren vorhanden.

Mit 33,45N ist die Standardabweichung dieser Versuchsreihe vergleichbar mit der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit beträgt 96,66 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Bei der Betrachtung der Response Surface sieht man, dass das Maximum des Versuchsraums mit circa 982N bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 1,93mm Lochdurchmesser liegt. Da das Maximum nicht am Rand des Versuchsraums liegt, handelt es sich hierbei um das globale Optimum.

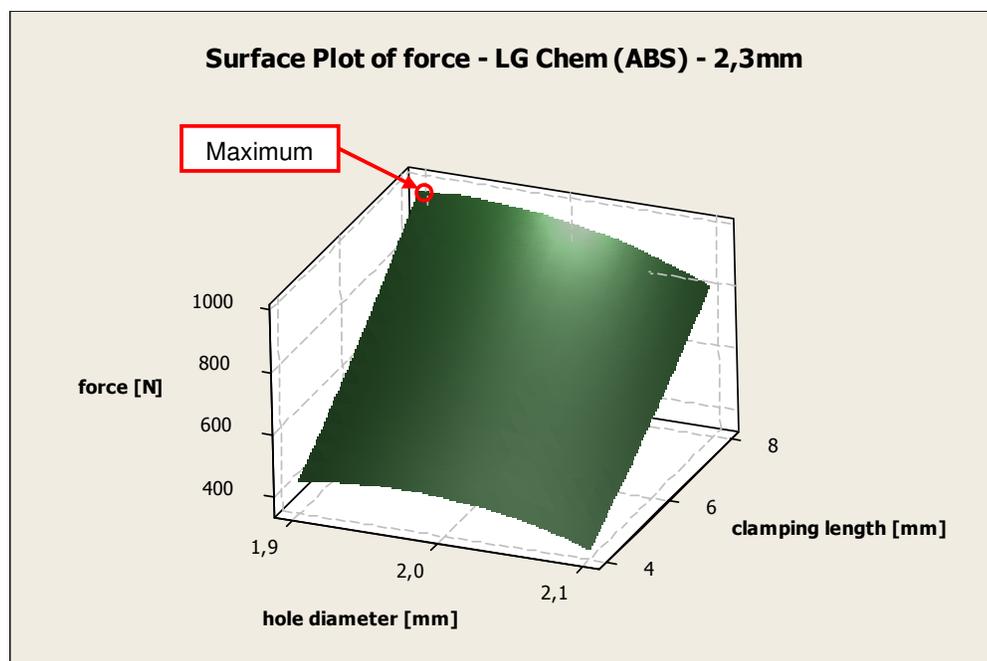


Bild 4.40 Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,3mm

#### 4.5.5 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Polylac 777B (ABS)

Die Residuen sind nicht normalverteilt ( $P < 0,05$ ). Sie weisen keine Serien oder Unregelmäßigkeiten in der Verteilung auf.

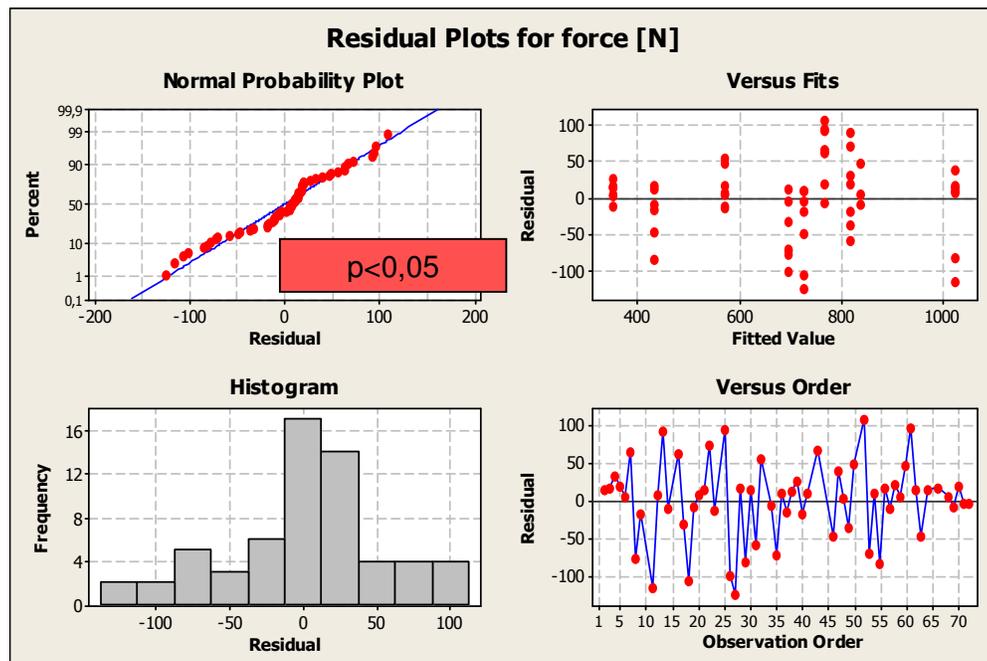


Bild 4.41 Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,3mm

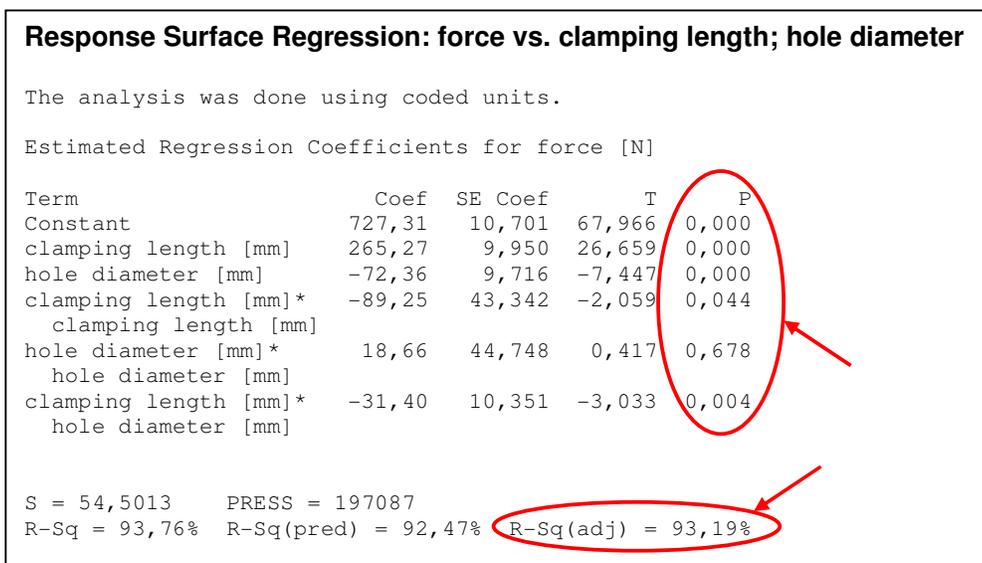


Bild 4.42 Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,3mm

Aus der Regressionsanalyse ist zu entnehmen, dass der Lochdurchmesser keinen quadratischen Einfluss hat. Die Klemmlänge hat neben dem linearen Anteil allerdings noch einen quadratischen Anteil. Auch die Wechselwirkung zwischen beiden Faktoren ist signifikant.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt bei 54,50N und ist damit deutlich höher als die Standardabweichung von 33,72N aus den Vorversuchen. Somit sinkt die Qualität des Ergebnisses. Die Vorhersagbarkeit beträgt 93,19 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsergebnisse als Response Surface dargestellt. Hier erkennt man, dass die maximale Auszugskraft im Versuchsraum im Mittel 1026N beträgt und bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 1,9mm Lochdurchmesser erreicht wird.

Da das Maximum an der Grenze des Versuchsraums liegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass das gefundene Maximum nur ein lokales und nicht das globale Maximum ist.

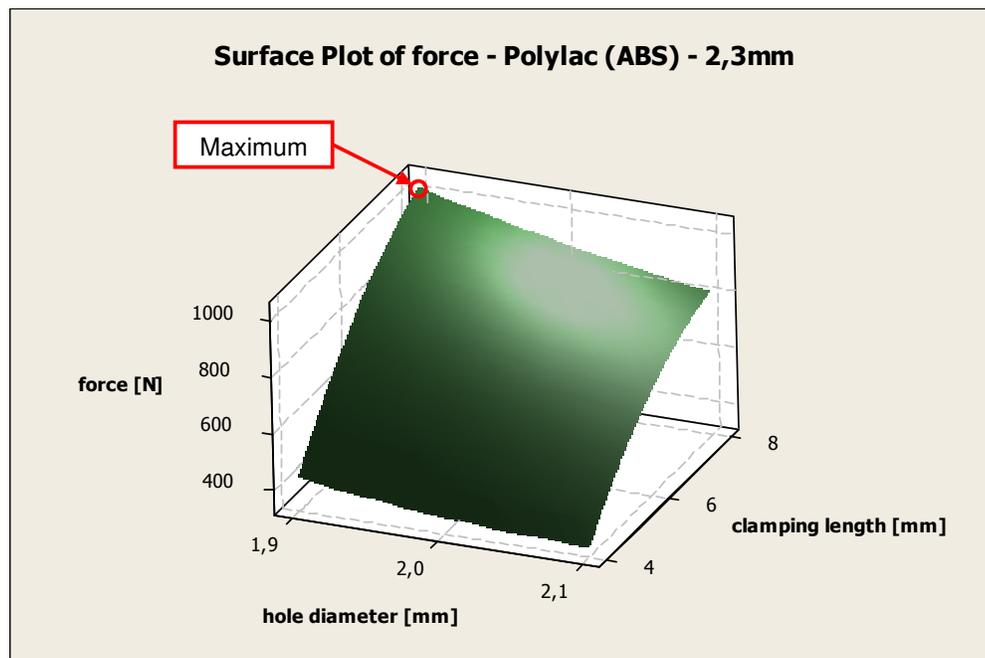


Bild 4.43 Response Surface – Polylac (ABS) – 2,3mm

#### 4.5.6 ATP Tri-Press 2,3x10mm in Testblock aus Samsung BJ550 (PP)

Die Untersuchung der Residuen ergibt, dass die Daten normalverteilt sind ( $P = 0,728 > 0,05$ ). Sie streuen um Null und weisen keine Serien oder andere Auffälligkeiten auf.

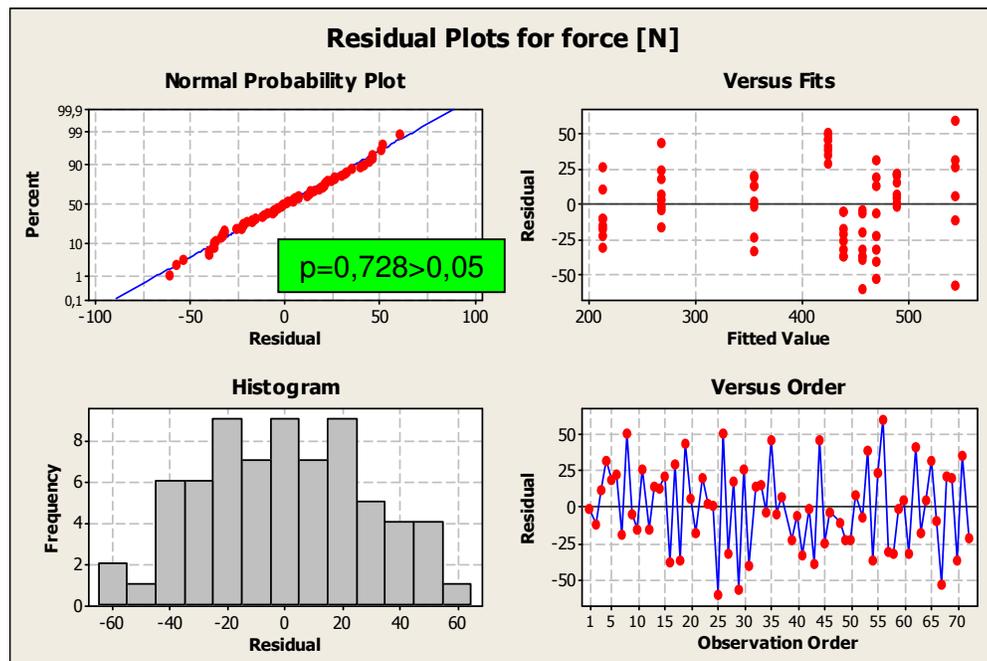


Bild 4.44 Residual Plot – Samsung (PP) – 2,3mm

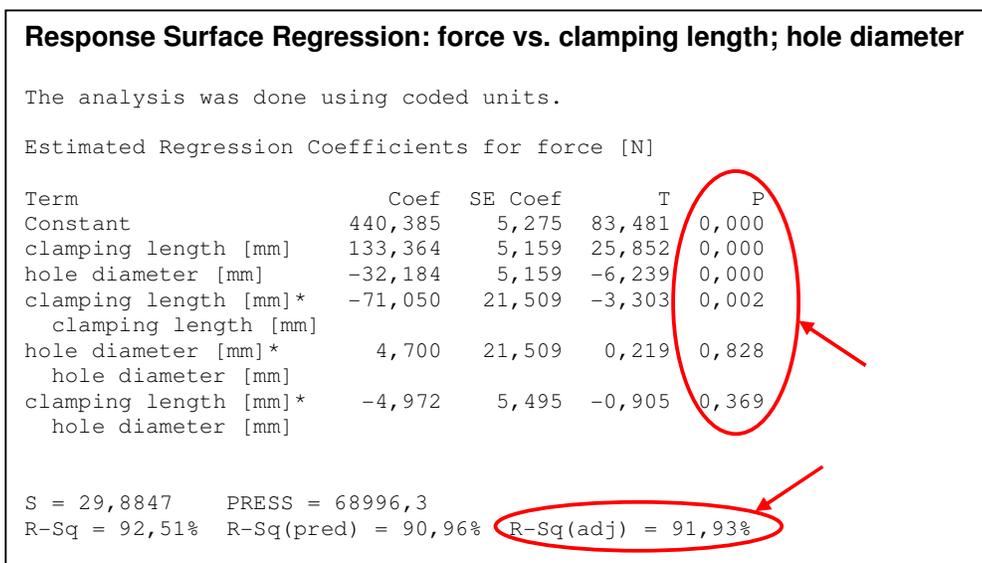


Bild 4.45 Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,3mm

Bei der Betrachtung der Regressionsanalyse erkennt man, dass der quadratische Anteil des Lochdurchmessers nicht signifikant ist. Die Klemmlänge hat aber sowohl einen linearen als auch einen quadratischen Anteil. Eine Interaktion beider Faktoren ist ebenfalls nicht signifikant.

Die Standardabweichung der Versuchsreihe liegt mit 29,88N auf vergleichbarem Niveau mit der im Vorversuch ermittelten Standardabweichung von 33,72N. Die Vorhersagbarkeit beträgt 91,93 Prozent und liegt damit deutlich oberhalb der geforderten 75 Prozent.

Die maximale Abzugskraft von im Mittel 545N wird bei der Kombination aus 8mm Klemmlänge und 1,9mm Lochdurchmesser erreicht. Der Verlauf wird in der Response Surface dargestellt.

Es darf nicht davon ausgegangen werden, dass es sich bei dem gefundenen Maximum automatisch auch um das globale Maximum handelt, da es sich am Rand des Versuchsbereichs befindet und somit auch außerhalb des untersuchten Bereichs liegen kann.

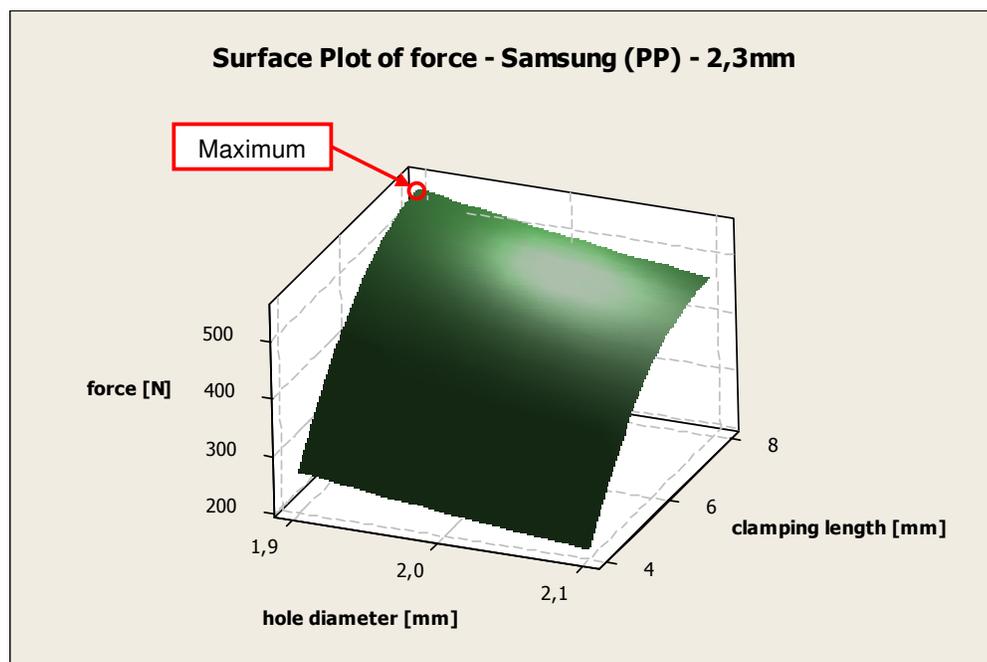


Bild 4.46 Response Surface – Samsung (PP) – 2,3mm

### 4.5.7 Bewertung der Ergebnisse

Das ertragbare Lastniveau liegt im Vergleich zur ersten DoE höher. Für drei der Raststift / Lochdurchmesser Konfigurationen konnte das globale Maximum in Abhängigkeit von der Klemmlänge ermittelt werden.

Bei den übrigen drei Konfigurationen liegt das gefundene Maximum weiterhin an der Lochdurchmesser-Untergrenze des Versuchsraums. Um auch hier das globale Maximum zu finden müsste der Versuchsraum nochmals um kleinere Lochdurchmesser erweitert werden.

Stiftdurchmesser \ Kappenmaterial	2,3mm	2,8mm
LG Chem XR409H (ABS)	1,93mm	2,49mm
Polylac 777B (ABS)	<1,9mm	2,46mm
Samsung BJ550 (PP)	<1,9mm	<2,4mm

Tabelle 4.1 Ergebnisse Lochdurchmesser DoE 2

Stiftdurchmesser \ Kappenmaterial	2,3mm	2,8mm
LG Chem XR409H (ABS)	982N	956N
Polylac 777B (ABS)	1026N	876N
Samsung BJ550 (PP)	545N	568N

Tabelle 4.2 Ergebnisse Auszugskraft DoE 2

Das Lastniveau der beiden ABS Materialien liegt auf vergleichbarem Niveau. Das PP Material erreicht nur circa 60 Prozent der Auszugskraft.

Die höheren ertragbaren Lasten erzielen im ABS Material die Testblöcke für die 2,3mm-Raststifte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Wandstärke des Kappendoms durch den geringeren Lochdurchmesser höher ist. Da dieser Effekt bei dem PP-Material nicht erkennbar ist, liegt voraussichtlich daran, dass der optimale Lochdurchmesser noch nicht gefunden wurde und das Lastniveau sich somit noch verändern kann.

---

Unabhängig vom Material tritt bei Durchmessern unterhalb 2,1mm für die 2.3mm-Raststifte beziehungsweise 2,6mm für die 2,8mm-Raststifte bereits Weißbruch beim Einpressen der Stifte auf. Daher erscheint eine weitere Reduzierung des Lochdurchmessers nicht sinnvoll.

Durch das inhomogene Materialverhalten und die Schädigung während des Einpressens streuen die ertragbaren Lasten bei kleiner werdenden Lochdurchmessern stärker. Daher fällt die Vorhersagbarkeit der ertragbaren Last und somit auch die Prozesssicherheit ab. Das Ziel einer Nullfehlerfertigung kann aber nur erreicht werden, wenn die Prozesssicherheit auf höchstem Niveau liegt.

In Hinsicht auf Alterung und Dauerbelastung sollte eine Vorschädigung des Kappenmaterial beim Einpressen der Raststifte vermieden werden. Daher kann es sinnvoll sein, für die Serienfertigung nicht den Durchmesser mit der höchsten Auszugskraft zu wählen, sondern einen Durchmesser der etwas darüber liegt, den Dom in der Oberkappe aber nicht schädigt. Dies muss in der Alterungssimulation untersucht werden, die aus zeitlichen Gründen allerdings nicht mehr Umfang dieser Arbeit sind.

---

## 4.6 Bestätigungsversuche

Die Bestätigungsversuche finden zum einen in den bisher verwendeten Testblöcken der 2. Generation und zum anderen in Serienkappen statt. Sie dienen zur Ermittlung der Umwelteinflüsse auf die Raststiftverbindung und zur Übertragung der Ergebnisse aus den Testblöcken auf die Serienkappen.

### 4.6.1 Einfluss der Umgebungstemperatur und -feuchtigkeit

Der Einfluss der Temperatur muss für alle drei Materialien untersucht werden. Beim PP Material kommt zusätzlich noch der Einfluss der Luftfeuchtigkeit hinzu. Die ABS Materialien haben sich in vorherigen Testreihen als unempfindlich gegenüber Feuchtigkeitsschwankungen gezeigt, sodass hier auf weitere Versuche verzichtet werden kann.

Für die ABS Materialien ist es daher ausreichend, jeweils einen Testblock bei  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  und  $+90^{\circ}\text{C}$  für 2 Stunden einzulagern. Die Luftfeuchtigkeit wird in der Klimakammer jeweils bei 50 Prozent relativer Feuchte konstant gehalten. Nach der Entnahme aus dem Klimaschrank werden die Raststifte entsprechend der bisherigen Versuche umgehend aus den Testblöcken gezogen und die Auszugskräfte aufgezeichnet.

Um die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit auf das PP Material zu ermitteln, wird ein Versuchsplan aufgestellt. Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchsplänen wird auf Axialpunkte verzichtet, sodass wir vier Eck- und einen Mittelpunkt zu untersuchen haben.

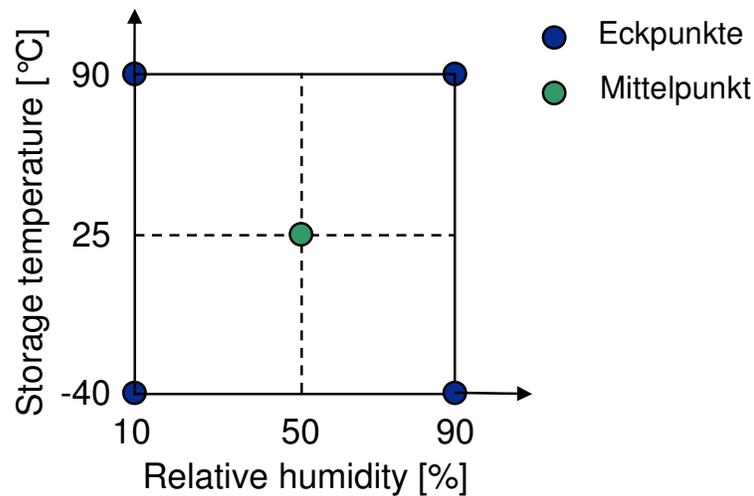


Bild 4.47 Versuchsplan Temperatur / Feuchtigkeit

Die Testblöcke werden jeweils für zwei Stunden in der Klimakammer in den fünf zu untersuchenden Konfigurationen eingelagert. Anschließend werden die Auszugskräfte analog zu den ABS Testblöcken ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten sind alle Testblöcke mit acht Löchern des Durchmessers 2,1mm für die 2,3mm Raststifte und acht Löchern von 2,6mm für die 2,8mm Raststifte versehen. Die Klemmlänge beträgt bei allen Raststiften 7mm.

Problematisch bei beiden Versuchsreihen ist die Temperaturänderung des Testblocks während des Zugversuchs. Sind die Blöcke bei den ersten Raststiften noch bei der geforderten Temperatur, nähern sich die Blöcke im weiteren Verlauf immer mehr der Raumtemperatur an.

Dieser Effekt ist auch an den Auszugskräften ablesbar. Bei den gekühlten Testblöcken sind jeweils die ersten ermittelten Kräfte die größten und nehmen im Verlauf der Messung stetig ab. Bei den erwärmten Blöcken ist der Effekt entsprechend umgekehrt.

## ABS-Kappenmaterial

Die Auszugskräfte werden zunächst in einem Boxplot gegenüber gestellt. Bereits hier ist zu erkennen, dass die Temperatur einen Einfluss auf die ertragbaren Lasten hat. Der Temperatureinfluss ist in seiner Richtung unabhängig von Raststiftdurchmesser und Kappenmaterial.

Durch das Herunterkühlen der Testblöcke auf  $-40^{\circ}\text{C}$  wird das Material härter aber auch spröder. Dies ist auch am Verlauf der Kraftkurve zu erkennen. Der Anstieg der Kurve ist steiler und die maximal ertragbare Kraft höher als bei Raumtemperatur.

Das Erhitzen der Testblöcke auf  $+90^{\circ}\text{C}$  weicht das ABS-Material auf und es wird elastischer. Somit reduzieren sich die Klemmkraft zwischen Dom und Raststift, was eine Reduzierung der Auszugskraft zur Folge hat.

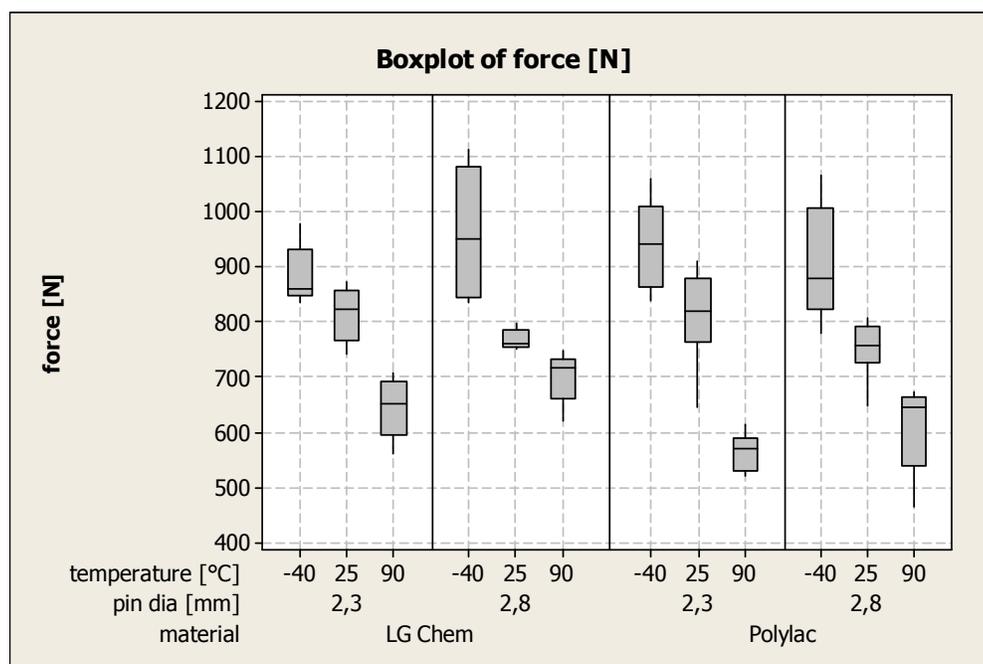


Bild 4.48 Boxplot Einfluss der Temperatur

Um die bereits visuell erkennbaren Unterschiede mathematisch abzusichern werden jeweils zwei Zustände mittels des 2-t-Tests miteinander verglichen. Für jede Kombination aus Kappenmaterial und Raststiftdurchmesser werden zwei Vergleiche benötigt.

Exemplarisch wird dies an dieser Stelle für das Material LG Chem XR409H und den Raststiftdurchmesser 2,8mm aufgeführt. Die übrigen Kombinationen wurden ebenfalls getestet, da die Ergebnisse aber vergleichbar sind, werden sie nicht alle einzeln abgebildet.

Auf Grund der sichtbaren Unterschiede wird als Nullhypothese davon ausgegangen, dass die Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die Auszugskraft hat. Die Alternativhypothese lautet folglich, die Temperatur hat keinen Einfluss auf die Auszugskraft.

In den beiden dargestellten und in allen weiteren 2-t-Tests ist der P-Wert kleiner als 0,05. Somit kann mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von fünf Prozent davon ausgegangen werden, dass die Nullhypothese richtig ist und die Temperatur einen signifikanten Einfluss hat.

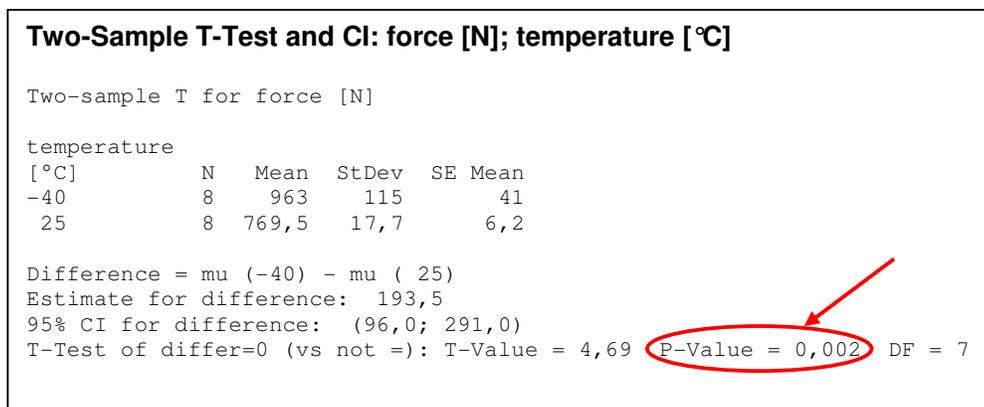


Bild 4.49 2-t-Test Vergleich -40°C vs. +25°C – LG Chem – 2,8mm Stift

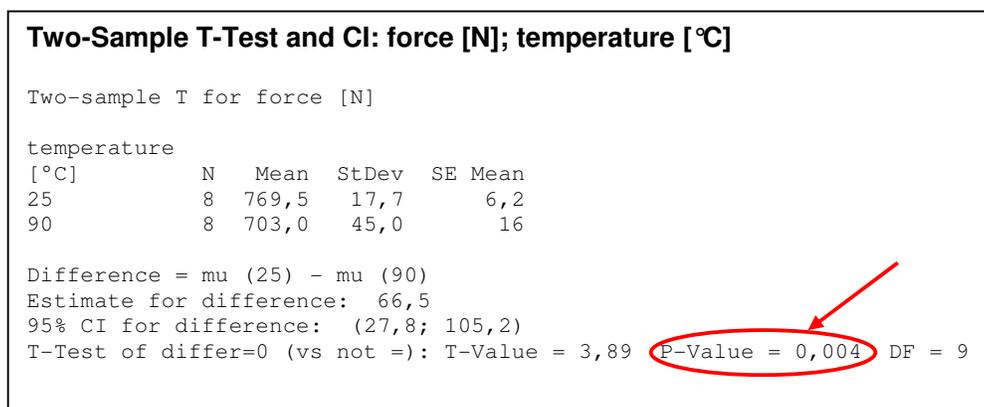


Bild 4.50 2-t-Test Vergleich +90°C vs. +25°C – LG Chem – 2,8mm Stift

## PP-Kappenmaterial

Bei einer Temperatur von  $-40^{\circ}\text{C}$  kann die Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer nicht mehr geregelt werden. Betrachtet man das in der Klimatechnik verwendete h-x-Diagramm so erkennt man, dass die Linien relativer Feuchte im negativen Temperaturbereich immer enger beieinander liegen.

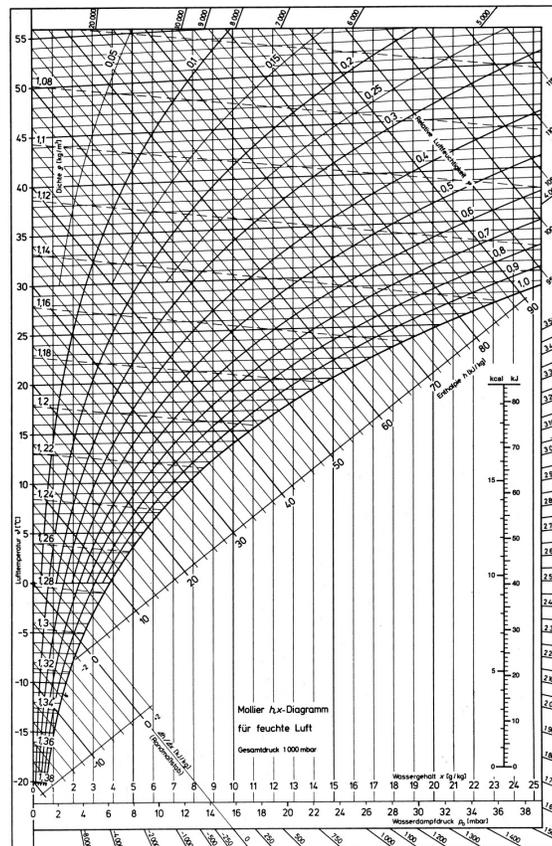


Bild 4.51 h-x-Diagramm

Bereiche unterhalb  $-20^{\circ}\text{C}$  werden im h-x-Diagramm gar nicht mehr dargestellt, da eine Regelung in diesem Bereich nicht mehr möglich ist. Somit kann für die Temperatur von  $-40^{\circ}\text{C}$  keine Aussage über den Einfluss der Luftfeuchtigkeit gemacht werden.

Um den Versuchsplan dennoch ausfüllen zu können wird ein Testblock auf  $-40^{\circ}\text{C}$  gekühlt. Die Versuchsergebnisse werden dann für beide Konfigurationen bei  $-40^{\circ}\text{C}$  verwendet.

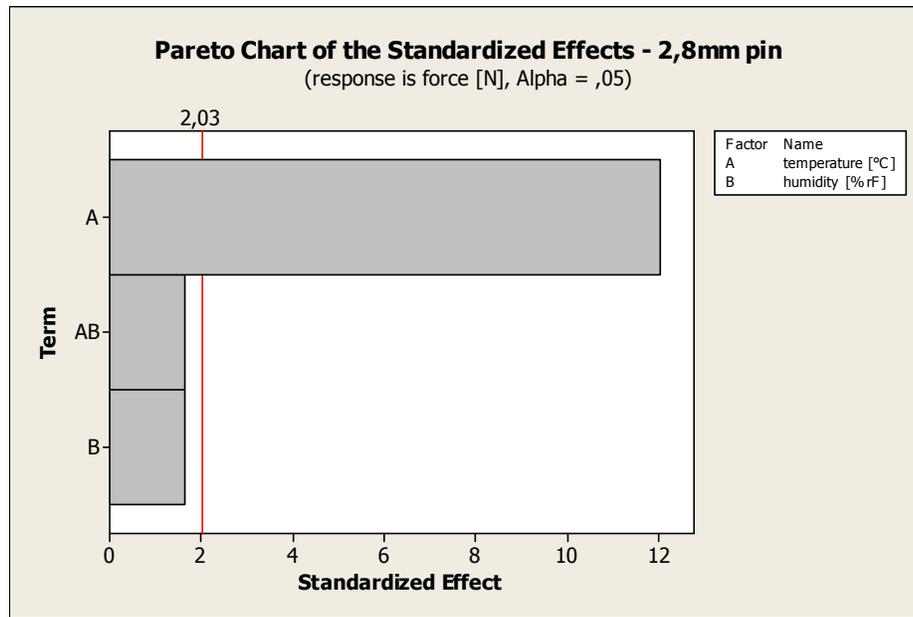


Bild 4.52 Pareto Chart Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit – 2,8mm Stift

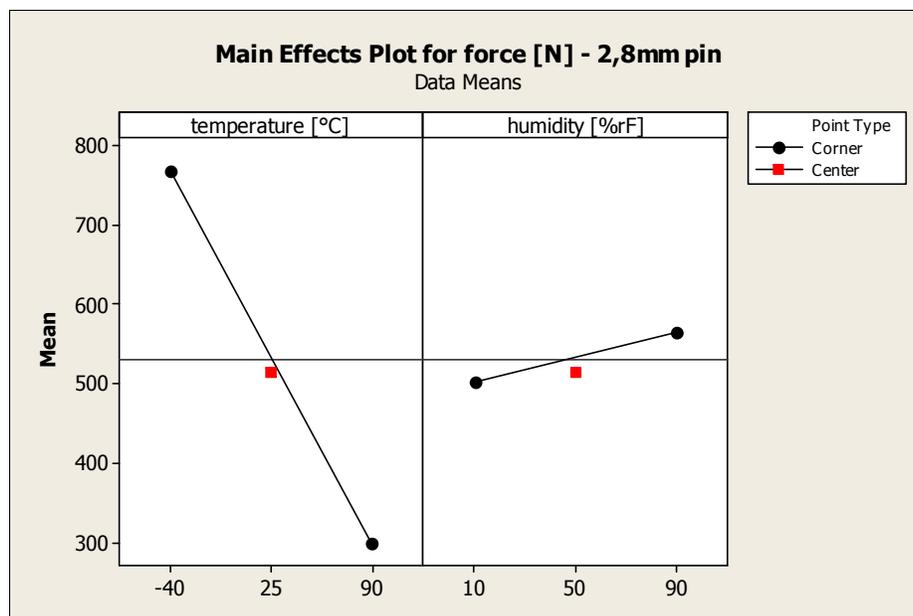


Bild 4.53 Einfluss der beiden Faktoren – 2,8mm Stift

Bei der Auswertung des Versuchsplans für den 2,8mm Raststift ergibt sich ein signifikanter Einfluss der Temperatur. Die Feuchtigkeit und die Wechselwirkung beider Faktoren haben zwar einen Einfluss auf die Auszugskraft, sind aber nur gering.

Wie auch schon bei den ABS Materialien, fällt die Auszugskraft mit steigender Temperatur der Testblöcke. Mit steigender Feuchtigkeit der Testblöcke erhöht sich die Aus-

zugskraft. Dies liegt darin begründet, dass das Material die Feuchtigkeit aufnimmt und aufquillt. Durch das Ausdehnen des Materials steigt die Klemmkraft zwischen Dom und Raststift, was folglich auch eine Erhöhung der Auszugskraft zur Folge hat.

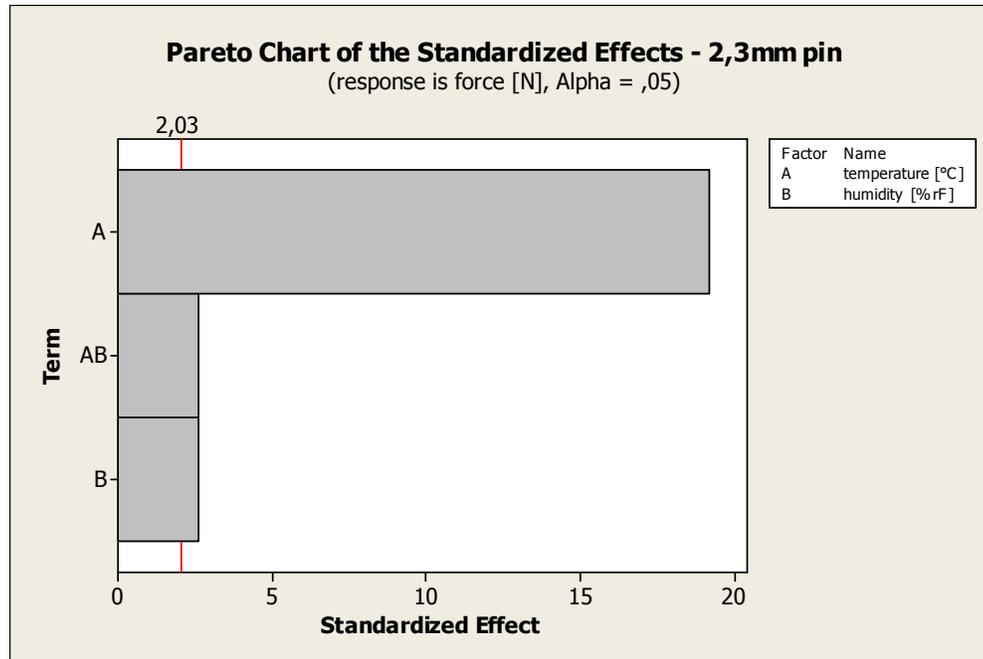


Bild 4.54 Pareto Chart Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit – 2,3mm Stift

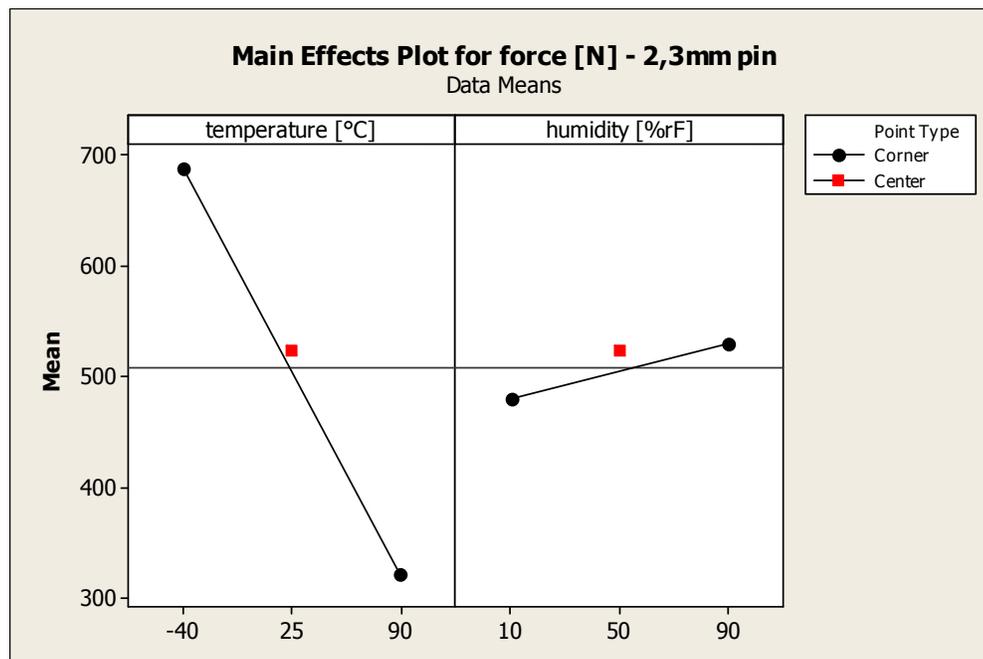


Bild 4. 55 Einfluss der beiden Faktoren – 2,3mm Stift

---

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse für die 2,3mm-Raststifte ergibt sich auch hier der größte Einfluss für die Temperatur. Im Gegensatz zum vorherigen Versuchsplan haben aber hier die Luftfeuchtigkeit und die Interaktion der beiden Faktoren einen signifikanten Einfluss.

Die Differenzen des Signifikanzlevels sind nur gering, bei den 2,8mm Raststiften sind die Feuchtigkeit und die Wechselwirkung knapp unterhalb und bei den 2,3mm Raststiften knapp oberhalb der Signifikanzgrenze. Da die Versuche durch die bereits erwähnte Abkühlung beziehungsweise Erwärmung während des Zugversuchs verfälscht werden, kann die Versuchsdurchführung bereits der Grund für diese Abweichung sein.

Der in beiden Fällen nur geringe Einfluss der Luftfeuchtigkeit sollte noch näher untersucht werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Material nach der Einlagerungszeit von zwei Stunden noch nicht vollständig gesättigt war.

### 4.6.2 Optimale Lochdurchmesser in Testblöcken

Im Rahmen der beiden Versuchspläne ist der optimale Lochdurchmesser für drei der sechs Kappenmaterial / Raststiftdurchmesser Kombinationen gefunden worden. (s. Kapitel 4.5.7)

Da diese Punkte nicht mit den Versuchspunkten der DoE übereinstimmen, müssen die von Minitab ermittelten optimalen Einstellungen im Versuch verifiziert werden. Hierzu wird jeweils ein Testblock mit dem optimalen Durchmesser angefertigt. Anschließend werden die Raststifte eingepresst und analog zu den bisherigen Versuchen aus den Testblöcken ausgezogen.

Für die optimale Konfiguration wird der Prognosebereich (prediction interval) berechnet. Es bestimmt den Bereich in dem 95 Prozent der Auszugskräfte für diese Konfiguration liegen müssen, um eine Vorhersagbarkeit zu gewährleisten. Die Berechnung erfolgt mit der Software Minitab.

Neben dem Prognosebereich wird noch der Vertrauensbereich (confidence interval) ermittelt und dargestellt. Dies ist der Bereich in dem der Erwartungswert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit liegt.

Kappenmaterial	Durchmesser Raststift	Durchmesser Loch	Prognosebereich
LG Chem XR409H (ABS)	2,3mm	1,93mm	834-1078N
LG Chem XR409H (ABS)	2,8mm	2,49mm	908-1056N
Polylac 777B (ABS)	2,8mm	2,46mm	724-1027N

Tabelle 4.3 Durchmesser der Testblöcke

In der Darstellung der Ergebnisse ist der Prognosebereich durch grüne und der Vertrauensbereich durch rote gestrichelte Linien dargestellt. Ziel ist es, dass alle ermittelten Werte innerhalb des Prognosebereichs liegen. Es werden je Konfiguration vierzehn Versuche durchgeführt.

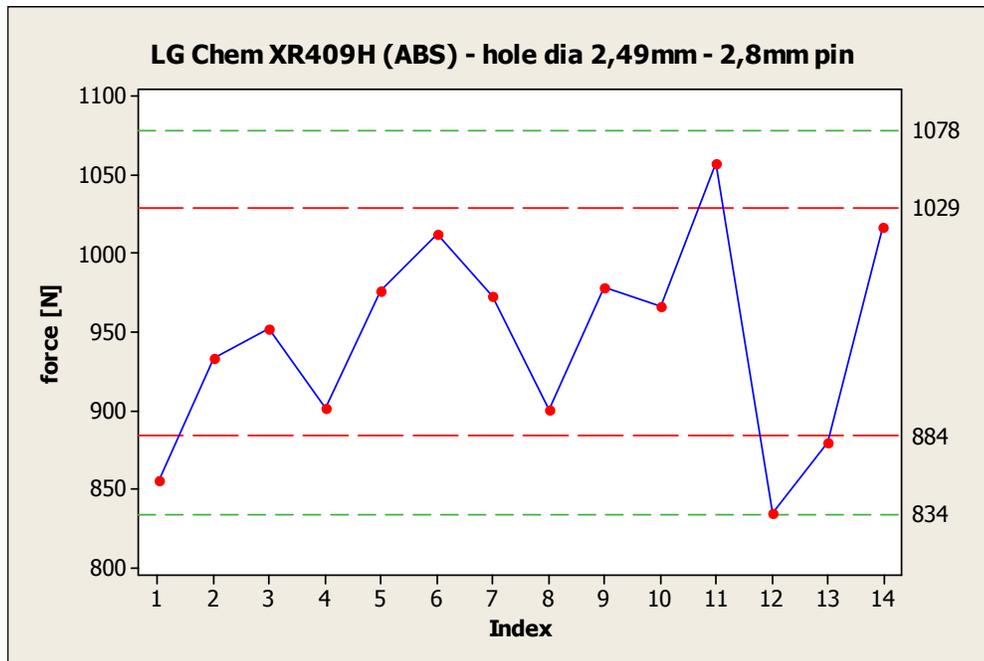


Bild 4.56 Ergebnisse LG Chem (ABS) – Lochdurchmesser 2,49mm

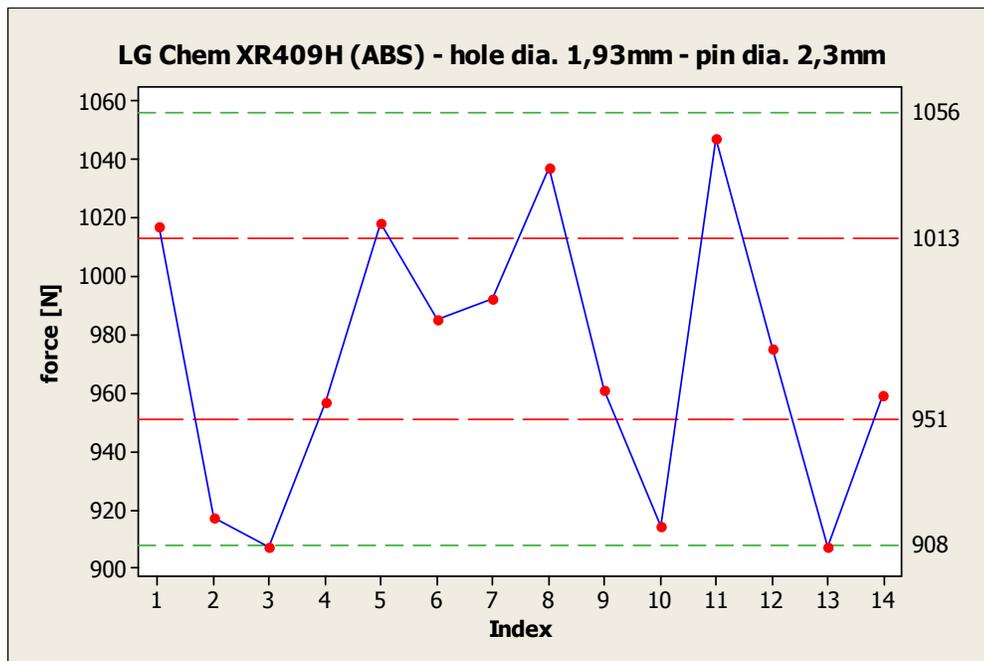


Bild 4.57 Ergebnisse LG Chem (ABS) – Lochdurchmesser 1,93mm

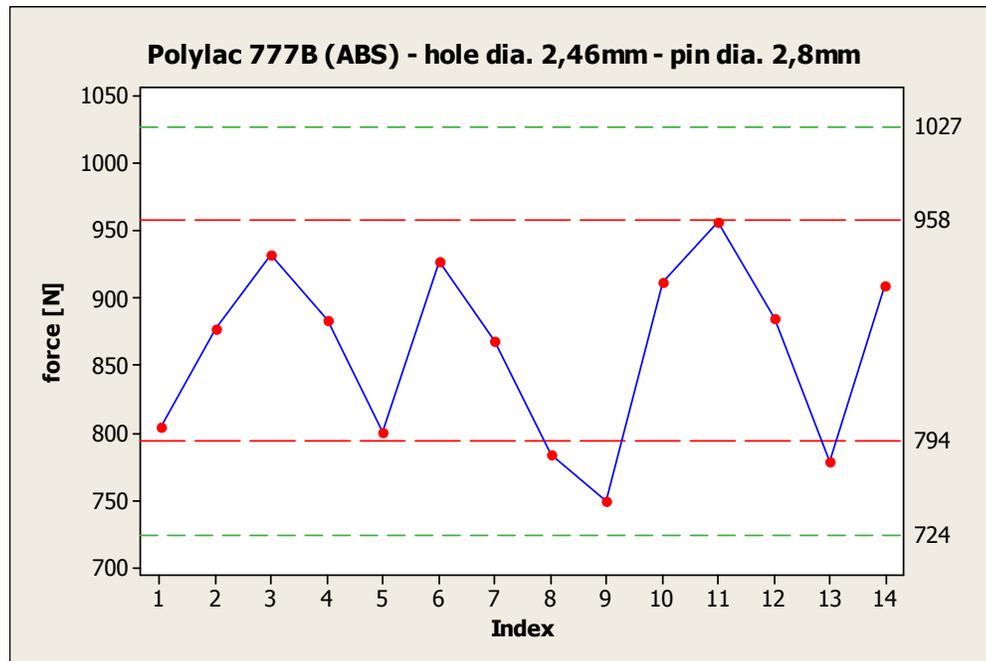


Bild 4.58 Ergebnisse Polylac (ABS) – Lochdurchmesser 2,46mm

Aus der Betrachtung der Messergebnisse und der Diagramme ist ersichtlich, dass alle Versuchsergebnisse im geforderten Prognosebereich liegen. Somit ist das rechnerische Modell von Mintab im Versuch erfolgreich bestätigt worden.

Die berechnete optimale Konfiguration der beiden Einflussparameter entspricht der im Versuch maximal erreichbaren Auszugskraft.

### 4.6.3 Optimale Lochdurchmesser in Serienkappen

Die in der DoE ermittelten optimalen Einstellungen für Lochdurchmesser und Klemmlänge müssen noch in Gurtschlosskappen validiert werden. Hierzu müssen Gurtschlosskappen mit Löchern optimalen Durchmessers für die verschiedenen Konfigurationen versehen werden.

Die benötigten K12E Gurtschlosskappen sind nur in LG Chem XR409H verfügbar. Das Abspritzen der Kappen in den beiden anderen untersuchten Materialien ist zwar möglich, aber zeitaufwendig und teuer. Daher kann im Rahmen dieses Projekts nur für Kappen aus LG Chem untersucht werden, ob die Auszugskräfte aus der Oberkappe den Auszugskräften aus dem Testblock entsprechen.

Für die 2,8mm Raststifte werden die in den Kappen vorhandenen Bohrungen auf den optimalen Durchmesser von 2,49mm aufgeweitet. Anschließend werden die Raststifte auf eine Klemmlänge von 8mm in die Oberkappe eingepresst.



Bild 4.59 Oberkappe mit eingepressten Raststiften

Die Löcher in den Serienkappen haben bereits einen Durchmesser von 2,1mm. Da die optimalen Durchmesser aber kleiner sind, kann dieses Vorgehen für die 2,3mm Raststifte nicht angewandt werden. Hierzu müssen zunächst Kappen ohne Löcher angefertigt werden, die dann individuell gebohrt werden können.

Die Auszugskraft der Raststifte aus den Oberkappen wird mit den gleichen Parametern getestet, wie beim Zug aus dem Testblock.

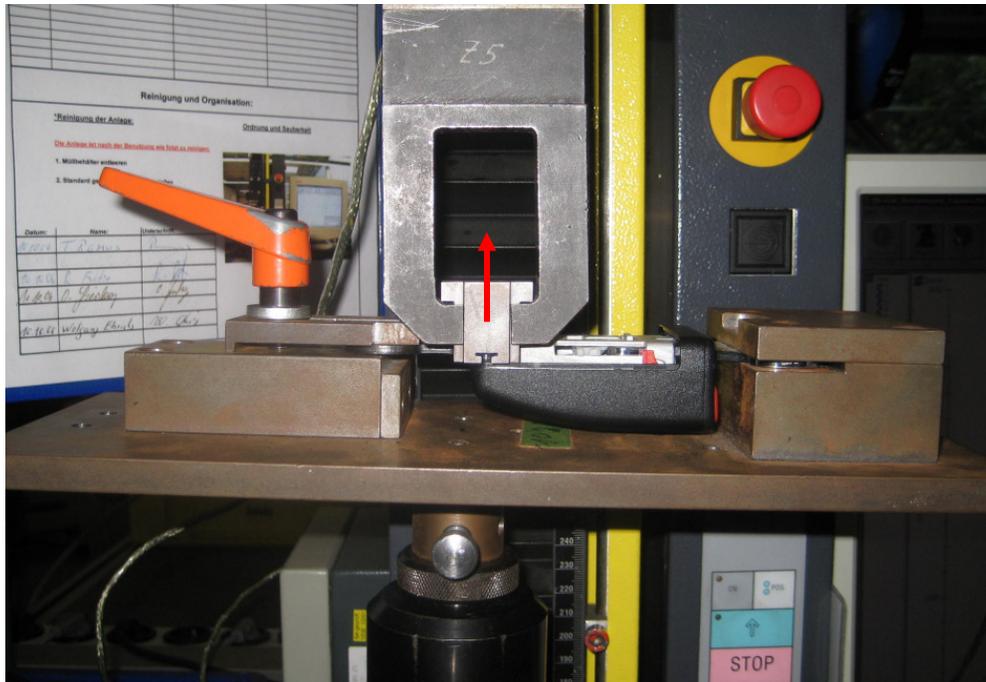


Bild 4.60 Auszugsvorrichtung mit eingespannter Oberkappe

Es existiert keine Vorrichtung, in der nur die Oberkappe eingespannt werden kann. Daher wird eine Schlossmechanik in die Oberkappe eingelegt und diese wie in den vorangegangenen Versuchen mit kompletten Gurtschlössern fixiert.

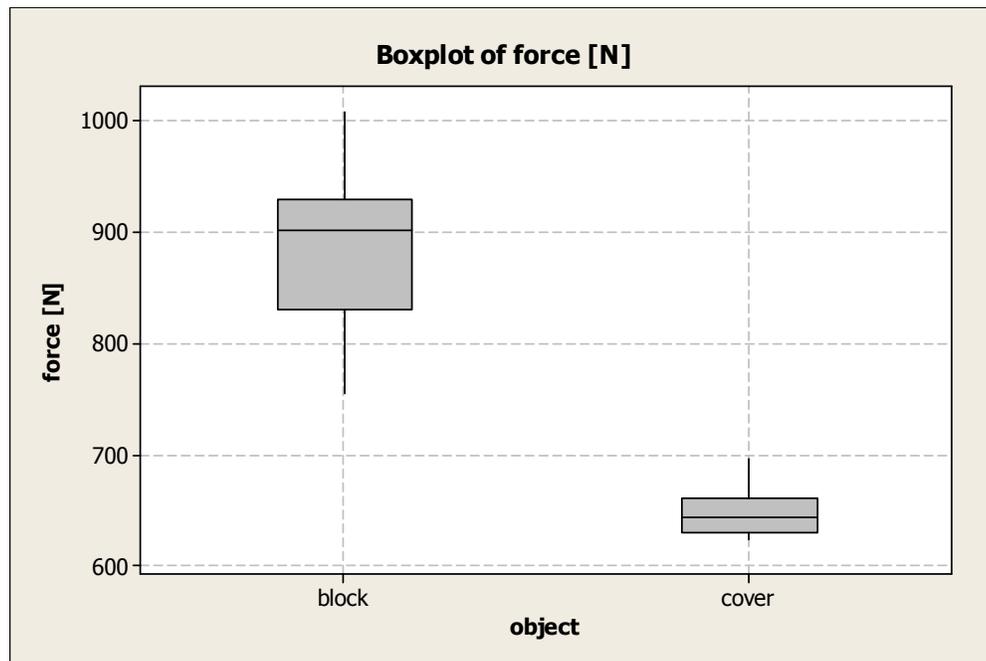


Bild 4.61 Boxplot Vergleich Block vs. Oberkappe

---

Da die Verbindung von Schlossmechanik und Oberkappe im Bereich des Schraubdoms nicht formschlüssig ist, verformt sich die Oberkappe beim Versuch den Raststift aus der Kappe herauszuziehen. Die Folge ist, dass die Raststifte nicht mehr senkrecht aus den Domen herausgezogen werden und die Verbindung schon bei geringerer Last versagt.

Das ein nicht senkrechter Zug der Raststifte aus den Domen einen negativen Einfluss auf die ertragbaren Lasten hat, wurde bereits an den Testblöcken festgestellt. Vor Anfertigung des Niederhalters für die Testblöcke (s. Kapitel 4.3) verformten sich die Testblöcke beim Zug an den Raststiften ebenfalls, was auch hier zu einer Reduzierung des ertragbaren Lastniveaus führte.

Somit können die ermittelten Auszugskräfte aus den Kappen nicht direkt mit den in den Testblöcken ermittelten Lasten verglichen werden. Zunächst muss eine Einspannung gefertigt werden, welche die Verformung der Oberkappe unterdrückt. Ob die Differenz zwischen Testblock und Oberkappe nur durch die Verformung bedingt ist oder noch weitere Faktoren einen Einfluss haben, kann erst dann abschließend geklärt werden.

Unabhängig von den noch ausstehenden Versuchsergebnissen liegt das Lastniveau beim Versagen der Verbindung von Oberkappe und Raststift oberhalb von 620N. Da ein Bruch der Kappe bereits bei Lasten unterhalb 400N eintritt, und das geforderte Lastniveau bei 250N liegt, kann die Aussage getroffen werden, dass der Raststift als Verbindungselement genutzt werden kann.

Eine weitere interessante Beobachtung ist, dass die Verbindung von Raststift und rechtem Dom ein um circa 100N höheres Lastniveau hat, als die Verbindung von Raststift und linkem Dom.

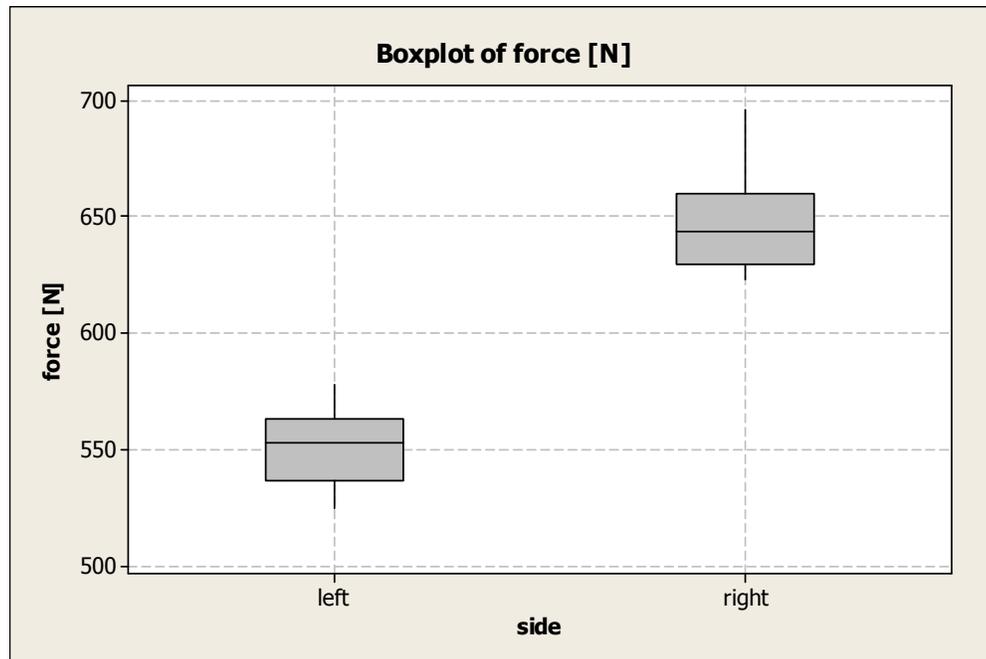


Bild 4.62 Boxplot Auszugskräfte Oberkappe

Bei der Betrachtung der Kappengeometrie erkennt man am rechten Dom eine Versteifungsrippe, auf der linken Seite ist diese nicht vorhanden. Diese stabilisiert den Dom zusätzlich und reduziert die Verformung der Oberkappe in diesem Bereich.

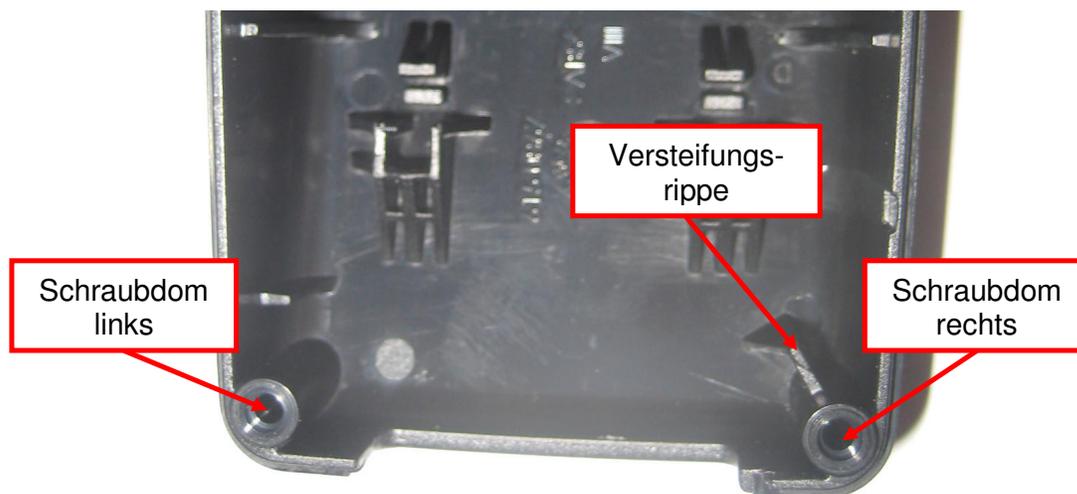


Bild 4.63 Details Schraubdom Oberkappe

---

#### **4.6.4 Variation der Kappenfarbe**

Aus Versuchen zur Verschraubung der Gurtschlosskappen ist bekannt, dass die Farbe der Kappen einen Einfluss auf die Haltbarkeit der Verbindung hat. Durch die verschiedenen Farbzusätze variieren die Gleiteigenschaften des Materials geringfügig.

Da die bisherigen Versuche ausschließlich in schwarzen Kappen durchgeführt wurden, gilt es in andersfarbigen Kappen zu bestätigen, dass der Raststift auch hier eine gleichwertige Alternative darstellt.

Unabhängig von der Kappenfarbe ist bei Versuchen mit Gurtschlosskappen die Versagensart immer der Bruch der Kappe und nicht das Versagen der Raststiftverbindung. Versuche in verschiedenfarbigen Kappen führen jeweils zum Versagen der Kappe. Daher kann aus diesen Versuchen keine Aussage über Unterschiede der verschiedenfarbigen Materialien gemacht werden.

Um die Unterschiede aufzulösen müssen Testblöcke in den alternativen Kappenfarben abgespritzt werden. Diese wurden zwar noch beauftragt, die Versuche sind aus zeitlichen Gründen aber nicht mehr Umfang dieser Arbeit.

---

#### **4.6.5 Raststifte mit Durchmesser 2,3mm in K12E Serienkappen**

Unabhängig von der optimalen Konfiguration wird untersucht, ob die 2,3mm Raststifte ohne jede Änderung der Kappen als Alternative zur Schraube eingesetzt werden können.

Vorteil dieser Lösung ist, dass es nicht einen fixen Zeitpunkt gibt an dem das Kappenwerkzeug geändert wird und danach nur noch Raststifte eingesetzt werden können. Vielmehr läuft das Kappenwerkzeug unverändert weiter und in der Produktion wird eine Linie nach der nächsten umgestellt. So gibt es einen fließenden Übergang, ohne das es zu Engpässen in der Produktion kommen kann. Ein weiterer Vorteil ist der Entfall der Kosten, die durch die Änderung des Kappenwerkzeugs entstehen würden.

Die Ergebnisse aus der Auswertung des Versuchsplans lassen erwarten, dass der Einsatz der 2,3mm Raststifte in Serienkappen die gestellten Anforderungen erfüllt. Dies wird mittels des Kappenabzugsversuchs nach TES 115245 (s. Kapitel 2.5) mit verstifteten Kappen bestätigt.

Da die Stiftverbindung in dieser Konfiguration circa die vierfache Last der Kappe erträgt, bevor sie versagt, tritt in diesem Versuch an allen Kappen der Fehler „Bruch der Kappe“ auf.

Folglich ist ein Einsatz der 2,3mm Raststifte ohne Änderung der Kappengeometrie in Hinsicht auf die ertragbare Kappenabzugskraft problemlos möglich.

---

#### **4.6.6 Raststifte mit Durchmesser 2,8mm in K12A TPC Serienkappen**

Wie im vorangegangenen Kapitel wird auch hier unabhängig von der optimalen Konfiguration untersucht, ob die 2,8mm Raststifte ohne jede Änderung der Kappen als Alternative zur Schraube eingesetzt werden können.

Die Ergebnisse aus der Auswertung des Versuchsplans lassen auch hier erwarten, dass der Einsatz der 2,8mm Raststifte in Serienkappen die gestellten Anforderungen erfüllt.

Da die Dicke der TPC-Unterkappe 7mm beträgt, ergibt sich allerdings eine Klemmlänge von nur 3mm in der Oberkappe. Auf Grund dieser geringen Klemmlänge versagt in dieser Versuchsreihe die Verbindung zwischen Raststift und Kappe. Bei den K12E Kappen mit einer Klemmlänge von 7mm brechen immer die Unterkappen.

Die Verbindung versagt bei einer Zugkraft von 300 bis 330N. Somit überschreitet die Verbindung trotz der geringen Klemmlänge immer noch die im Lastenheft geforderten 250N.

In den vorangegangenen Versuchen wurde ermittelt, dass die Klemmlänge einen linearen Einfluss auf die ertragbare Last hat. Daher können Raststifte, welche die in der Oberkappe maximal mögliche Klemmlänge von 9mm ausnutzen, die bisher verwendeten Schrauben ersetzen.

Folglich ist ein Einsatz der 2,8mm Raststifte ohne Änderung der Kappengeometrie in Hinsicht auf die ertragbare Kappenabzugskraft problemlos möglich.

---

## 5. Zusammenfassung

In diesem Projekt wird untersucht, ob Raststifte als Ersatz für die derzeit verwendeten Schrauben sind. Als Bewertungsfaktor wird die ertragbare Last der Kappenverbindung herangezogen. Diese wird durch Auszugsversuche der Verbindungselemente aus dem Kappenmaterial und Kappenabzugsversuchen nach vorgegebener Prüfnorm ermittelt.

Um alle Einflussfaktoren auf die Kappenverbindung zu finden, und mit einer möglichst geringen Anzahl von Versuchen die optimale Einstellung zu ermitteln, wird das Projekt mit der Six Sigma Methode bearbeitet. Hierzu gehören eine eingehende Analyse der Anforderungen und Risiken, sowie eine statistische Versuchsplanung.

Auf Basis von Vorversuchen zur Eingrenzung des Versuchsraums und zur Ermittlung signifikanter statistischer Größen wie der Standardabweichung werden Versuchspläne für die Kombinationen aus Raststiftdurchmesser und Kappenmaterial aufgestellt.

Die Auswertung der Versuchspläne hat eine optimale Einstellung des Lochdurchmessers in Abhängigkeit von Raststiftdurchmesser und Kappenmaterial ergeben. Kombiniert mit einer möglichst großen Klemmlänge ergibt sich ein mit Schrauben vergleichbares ertragbares Lastniveau.

Somit können die Raststifte hinsichtlich der ertragbaren Lasten als Alternative zu den bisherigen Serienschrauben zum Einsatz kommen.

Für den Serieneinsatz sollte die maximal mögliche Klemmlänge von 9mm ausgenutzt werden, da diese linear ansteigt und das ertragbare Lastniveau somit weiter anhebt.

In Bestätigungsversuchen wird der Einfluss weiterer Störgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit oder Beschichtung der Raststifte untersucht, um zu gewährleisten, dass diese keinen signifikanten Einfluss auf die Kappenverbindung haben.

## 6. Ausblick

Auf Grund der viel versprechenden Versuchsergebnisse ist ein Einsatz der Raststifte in der Serienproduktion kurzfristig denkbar. Allerdings müssen hierfür noch Versuche zum Fügeprozess durchgeführt werden, die im Rahmen dieses Projekts nicht betrachtet wurden. Auch Dauerversuche und Validierungsversuche mit gealterten Kappen und Stiften müssen noch erfolgreich absolviert werden.

### Fertigungsprozess

Wie in Kapitel 3.1 gezeigt, wurde im Verlauf dieses Projekts nur auf die Maximierung der Kappenabzugskraft hin optimiert. Die Raststifte wurden manuell eingepresst und die Prozessparameter Einpresskraft und Einpressgeschwindigkeit wurden vernachlässigt.

Um einen Ansatz zu haben wurden bei allen Versuchen die Einpresskräfte der Raststifte in Schlosskappen und Testblöcke dokumentiert. Diese können als Vorversuche zur Eingrenzung des zu erwartenden Versuchsraums, sowie zur Ermittlung der statistischen Einflussparameter, wie zum Beispiel der Standardabweichung, genutzt werden.

Das manuelle Einpressen erfolgte mit geringer Geschwindigkeit. Im Serienprozess ist die Verbindungsgeschwindigkeit sehr viel höher. Welche Einpressgeschwindigkeiten mit den aktuellen Kappenmaterialien realisiert werden können und wie groß der Einfluss der Einpressgeschwindigkeit ist, muss in weiteren Versuchen ermittelt werden. Hieraus lässt sich die Taktzeitverkürzung und somit das Einsparpotential dieses Prozessschritts ablesen.

### Dauerversuche

Für die endgültige Zulassung der Raststifte als Ersatz für die derzeit verwendeten Schrauben sind Versuche erforderlich, welche die jahrelangen Belastungen simuliert, denen das Gurtschloss im Fahrzeug ausgesetzt sein kann. Auch nach der Alterung in der Klimakammer muss die Verbindung die gesetzlichen oder herstellerspezifischen Kappenabzugskräfte erreichen.

Die Kappen werden beim Einpressen der Raststifte leicht unter Vorspannung gesetzt. Dies dient unter anderem dazu Klappergeräusche der Schlossmechanik zu vermeiden. Auch hier gilt, dass nach der Alterung wie bei den Schrauben weder Spaltbildung noch Klappergeräusche auftreten dürfen.

## **Geometrie**

Die einseitige Stiftverbindung kann ohne Änderungen der Kappengeometrie umgesetzt werden. Dennoch ist sie nur ein Zwischenschritt von der Schraubverbindung zur doppelseitigen Stiftverbindung. Im folgenden Projekt sollte untersucht werden, ob die Ergebnisse des einseitigen Verbindungsstifts auf einen doppelseitigen Stift übertragen werden können.

Die Verwendung von doppelseitigen Raststiften erfordert eine angepasste Gurtschlosskappengeometrie und somit auch neue Werkzeuge. Sie hat den großen Vorteil, dass auch die optischen Nachteile der einseitigen Stiftverbindung bzw. der Schraubverbindung eliminiert werden, da die Durchgangsbohrungen in der Oberschale analog zur Unterschale durch Sacklöcher ersetzt werden.

Der Hauptaspekt, der hier betrachtet werden muss, ist die Reduzierung der Klemmlänge pro Kappe bei Einhaltung der gleichen Kappenaußenmaße. Bei der einseitigen Verbindung hat der für die Versuche genutzte Raststift eine Klemmlänge von 7mm in der Oberkappe. Bei der doppelseitigen Verstiftung ist voraussichtlich eine maximale Klemmlänge von 5mm pro Kappe umsetzbar. Daher wurden in diesem Projekt bereits Auszugsversuche mit nur 5mm Klemmlängen durchgeführt.

Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob die doppelseitig verstiftete Gurtkappe auch als Alternative zur ultraschallverschweißten Gurtkappe eingesetzt werden kann. Mittelfristig könnten so nicht nur die verschraubten sondern auch die verschweißten Gurtschlosskappen durch die neue Lösung ersetzt werden. Eine einheitliche Lösung für alle hergestellten Gurtschlösser reduziert den Aufwand und die Kosten.

---

## 7. Verzeichnisse

### 7.1 Literaturverzeichnis

- [1] **Toutenburg, Helge; Knöfel, Philipp:** Six Sigma: Methoden und Statistik für die Praxis, 2. Auflage, München 2009
- [2] **Fahrmeir, Ludwig:** Statistik: Der Weg zur Datenanalyse, 6. Auflage, 2009
- [3] **von Regius, Bernd:** Qualität in der Produktentwicklung – Vom Kundenwunsch bis zum fehlerfreien Produkt, 1. Auflage, München 2006
- [4] **Schuth, Michael:** Leitlinie für das Anfertigen von Projekt-, Studien- und Diplomarbeiten im technischen Bereich mit Präsentationstechnik, 2. Auflage, 2006
- [5] **Ruck, Astrid:** Interne Schulungsunterlagen - Six Sigma und Design of Experiment
- [6] **Fa. Arnold Umformtechnik GmbH & Co. KG:** ATP Arnold TriPress Prospekt 06/03
- [7] **Autoliv:** Interne Datenbank
- [8] **Hochschule für angewandte Wissenschaften:** Richtlinie: Erstellung von Abschlussarbeiten und Entwurfsarbeiten, (WWW-Seite, Stand 11.05.2009, Internet: [http://www.fzt.haw-hamburg.de/PDF/Abschlussarbeiten\\_F+F.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/PDF/Abschlussarbeiten_F+F.pdf), Zugriff: 05.03.2010, 8.15MEZ)
- [9] **Adam, Mario Prof. Dr.-Ing.:** Statistische Versuchsplanung und Auswertung (DoE Design of Experiments), (WWW-Seite, Stand 06.01.2010, Internet: [http://mv.fh-duesseldorf.de/d\\_pers/Adam\\_Mario/a\\_lehre/am\\_pflcht/doe\\_v\\_s\\_1\\_vorlesung.pdf](http://mv.fh-duesseldorf.de/d_pers/Adam_Mario/a_lehre/am_pflcht/doe_v_s_1_vorlesung.pdf), Zugriff: 09.03.2010, 15.35MEZ)
- [10] **Beat Giger TQU AG:** Design of Experiment - Einführung in die statistische Versuchsplanung, (WWW-Seite, Stand 04.2009, Internet: <http://tqu-group.com/downloads/doedownload.pdf> , Zugriff: 09.03.2010, 15.53MEZ)
- [11] **Autoliv:** Technical Engineering Specification E115245
- [12] **Ament, Ch.:** Eine Einführung in die statistische Versuchsplanung, (WWW-Seite, Internet: <http://www.imtek.de/content/pdf/public/2002/sfb570-2002.pdf>, Zugriff: 09.03.2010, 16.14MEZ)
- [13] **Adolf Würth GmbH & Co. KG:** Untersuchung und Optimierung zur Standzeit- und Qualitätsverbesserung an Spiralbohrern mit Minitab, (WWW-Seite, Internet: [http://www.additive-net.de/ftp/win32/software/minitab/Minitab\\_Anwendungsbericht\\_v6.pdf](http://www.additive-net.de/ftp/win32/software/minitab/Minitab_Anwendungsbericht_v6.pdf), Zugriff: 12.03.2010, 15.29MEZ)

- 
- [14] **Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred:** Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, 6. Auflage, 2009
- [15] **Rauner, Tim:** Diplomarbeit: „Ermittlung von designrelevanten Einflussfaktoren auf die Separationskräfte von ultraschallgeschweißten Schlosskappen aus ABS“ erstellt 2009 bei der Autoliv B.V. Co KG Elmshorn
- [16] **Berghold, Prof. Andrea:** Deskriptive Statistik, (WWW-Seite, Internet: [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/medizinische\\_fakultaet/inst/fsmed/medizin/ebm-berghold.pdf](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/medizinische_fakultaet/inst/fsmed/medizin/ebm-berghold.pdf), Zugriff:15.03.2010, 08.49MEZ)
- [17] **Additive GmbH:** Einführung in Minitab 15, 2007
- [18] **Fa. Arnold Umformtechnik GmbH & Co. KG:** ATP-Einpressbolzen, (WWW-Seite, Internet: <http://www.arnold-umformtechnik.de/produkte/produkte-epbfmuks.php>, Zugriff: 15.03.2010, 09.33MEZ)
- [19] **Fachschaft Kognitionswissenschaft:** Grundbegriffe der Statistik, (WWW-Seite, Internet: <http://www.fskw.net/docs/grundbegriffe.pdf>, Zugriff 15.03.2010, 13.20MEZ)
- [20] **Sachs, Lothar:** Angewandte Statistik, 10. Auflage, Berlin, Heidelberg 2002
- [21] **EMPRA Frings & Bermeitinger:** Poweranalyse, (WWW-Seite, Internet [http://www.uni-saarland.de/fak5/excops/download/PowerAnalyse\\_Handout\\_Netz.pdf](http://www.uni-saarland.de/fak5/excops/download/PowerAnalyse_Handout_Netz.pdf), Zugriff 15.03.2010, 14.30MEZ)
- [22] **Mathews, Paul G.:** Design of Experiment with Minitab, 1. Auflage, Milwaukee (USA), 2005

---

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

<b>Bild 1.1</b>	Gantt-Diagramm	Seite 12
<b>Bild 2.1</b>	Komponenten des Drei-Punkt-Gurts	Seite 16
<b>Bild 2.2</b>	Komponenten des Gurtschlosses	Seite 18
<b>Bild 2.3</b>	Zweiteiliger Verbinder	Seite 23
<b>Bild 2.4</b>	Nietverbindung	Seite 24
<b>Bild 2.5</b>	Kunststoff-Spreizstift	Seite 24
<b>Bild 2.6</b>	ATP-TriPress Raststift	Seite 25
<b>Bild 2.7</b>	ATP-TriPress Flankenprofile	Seite 25
<b>Bild 2.8</b>	Montagezeit ATP-TriPress Raststift	Seite 26
<b>Bild 2.9</b>	Diagramm „Änderungskosten über Entwicklungszeit	Seite 27
<b>Bild 2.10</b>	Phasen des Six Sigma Prozesses	Seite 28
<b>Bild 2.11</b>	Beispiel Blockdiagramm	Seite 31
<b>Bild 2.12</b>	Beispiel Parameter-Diagramm	Seite 32
<b>Bild 2.13</b>	Beispiel Robustheitsmatrix	Seite 33
<b>Bild 2.14</b>	Varianz nur eines Faktors	Seite 34
<b>Bild 2.15</b>	Aufteilung der möglichen Datenarten	Seite 35
<b>Bild 2.16</b>	Versuchspläne	Seite 36
<b>Bild 2.17</b>	Vollfaktorieller Versuchsplan mit Mittel- und Axialpunkten	Seite 37
<b>Bild 2.18</b>	Ermittlung der Axialpunktlage	Seite 38
<b>Bild 2.19</b>	Normalverteilung von Messwerten	Seite 40
<b>Bild 2.20</b>	Entscheidung über Hypothesen	Seite 42
<b>Bild 2.21</b>	Boxplot	Seite 44
<b>Bild 2.22</b>	Pareto-Diagramm	Seite 45
<b>Bild 2.23</b>	Darstellung der Residuen	Seite 46
<b>Bild 2.24</b>	Beispiel Residuum	Seite 47
<b>Bild 2.25</b>	Response Surface	Seite 48
<b>Bild 2.26</b>	Versuch Abzugskraft hinten	Seite 49
<b>Bild 2.27</b>	Prüfstand Kappenabzugskraft	Seite 50
<b>Bild 2.28</b>	Gurtschloss eingelegt in Abzugsvorrichtung	Seite 50

---

<b>Bild 3.1</b>	Blockdiagramm Prozess	Seite 54
<b>Bild 3.2</b>	Blockdiagramm Kappenabzugskraft	Seite 55
<b>Bild 3.3</b>	P-Diagramm Alternative Schlosskappenverbindung	Seite 58
<b>Bild 3.4</b>	Robustheitsmatrix	Seite 60
<b>Bild 3.5</b>	Diagramm Standardabweichung Schweißen / Schrauben	Seite 62
<b>Bild 3.6</b>	Kappen vor und nach Bearbeitung der Löcher	Seite 63
<b>Bild 3.7</b>	Diagramm Einpresskräfte in Schlosskappen	Seite 65
<b>Bild 3.8</b>	Verpresstes Gurtschloss vor Zugversuch	Seite 66
<b>Bild 3.9</b>	Gurtschloss in Abzugsvorrichtung eingelegt (Zug an UK)	Seite 67
<b>Bild 3.10</b>	Verlauf der Kappenabzugskräfte (Zug an OK)	Seite 68
<b>Bild 3.11</b>	Diagramm maximale Kappenabzugskräfte (Zug an OK)	Seite 69
<b>Bild 3.12</b>	Diag. Prüfung Normalverteilung – verstiftet - (Zug an OK)	Seite 70
<b>Bild 3.13</b>	Diagramm Verteilung der Kappenabzugskräfte (Zug an OK)	Seite 70
<b>Bild 3.14</b>	Verlauf der Kappenabzugskräfte (Zug an UK)	Seite 71
<b>Bild 3.15</b>	Diagramm maximale Kappenabzugskräfte (Zug an UK)	Seite 71
<b>Bild 3.16</b>	Diag. Prüfung Normalverteilung – verstiftet - (Zug an UK)	Seite 72
<b>Bild 3.17</b>	Diagramm Verteilung der Kappenabzugskräfte (Zug an UK)	Seite 72
<b>Bild 3.18</b>	Diagramm Aussagekraft der Ergebnisse	Seite 73
<b>Bild 3.19</b>	Abweichung der Messwerte von der Regressionsgeraden	Seite 74
<b>Bild 3.20</b>	Diagramm Kappenabzugskräfte – verschweißt	Seite 75
<b>Bild 3.21</b>	Diagramm Prüfung Normalverteilung – verschweißt	Seite 76
<b>Bild 3.22</b>	Verteilung der Kappenabzugskräfte – verschweißt	Seite 76
<b>Bild 3.23</b>	Adapter für Zugversuch	Seite 78
<b>Bild 3.24</b>	Abzugskralle mit eingelegtem Adapter	Seite 78
<b>Bild 3.25</b>	CAD Modell Testblock	Seite 79
<b>Bild 3.26</b>	Gebodrter Testblock	Seite 80
<b>Bild 3.27</b>	Einpressen des Stifts in Kunststoffplatte	Seite 80
<b>Bild 3.28</b>	Diagramm Einpresskraft / Lochdurchmesser	Seite 81
<b>Bild 3.29</b>	Zugvorrichtung fertig bestückt	Seite 82
<b>Bild 3.30</b>	Diag. Einfluss Lochdurchmesser Polylac 777B (ABS)	Seite 83
<b>Bild 3.31</b>	Diag. Einfluss Lochdurchmesser LG Chem XR409H (ABS)	Seite 84
<b>Bild 3.32</b>	Diag. Einfluss Lochdurchmesser Samsung BJ550 (PP)	Seite 85
<b>Bild 3.33</b>	Eingespannter Testblock mit eingedrehten Schrauben	Seite 86
<b>Bild 3.34</b>	Vergleich Schraubenauszugskraft in Bezug aufs Material	Seite 87

---

<b>Bild 3.35</b>	2-t-Test Einfluss Blockmaterial auf Auszugskraft	Seite 87
<b>Bild 3.36</b>	Vergleich Kraftverlauf Auszugskraft Schraube / Raststift	Seite 88
<b>Bild 3.37</b>	Boxplot Lochdurchmesser LG Chem vs. Polylac	Seite 90
<b>Bild 3.38</b>	Boxplot Lochdurchmesser ABS vs. PP	Seite 92
<b>Bild 3.39</b>	Testblock mit eingepressten Raststiften	Seite 94
<b>Bild 3.40</b>	Regressionsanalyse Einpresstiefe LG Chem XR409H	Seite 95
<b>Bild 3.41</b>	Fitted Line Plot Einpresstiefe LG Chem XR409H	Seite 96
<b>Bild 3.42</b>	Residual Plots Einpresstiefe LG Chem XR409H	Seite 96
<b>Bild 3.43</b>	Regressionsanalyse Einpresstiefe Polylac 777B	Seite 97
<b>Bild 3.44</b>	Fitted Line Plot Einpresstiefe Polylac 777B	Seite 97
<b>Bild 3.45</b>	Residual Plots Einpresstiefe Polylac 777B	Seite 98
<b>Bild 3.46</b>	Boxplot Einpresskraft Material / Einpresstiefe	Seite 99
<b>Bild 3.47</b>	Regressionsanalyse Einpresstiefe LG Chem (Dom)	Seite 99
<b>Bild 3.48</b>	Fitted Line Plot Einpresstiefe LG Chem (Dom)	Seite 100
<b>Bild 3.49</b>	Residual Plots Einpresstiefe LG Chem (Dom)	Seite 100
<b>Bild 3.50</b>	Regressionsanalyse Einpresstiefe Polylac 777B (Dom)	Seite 101
<b>Bild 3.51</b>	Fitted Line Plot Einpresstiefe Polylac 777B (Dom)	Seite 101
<b>Bild 3.52</b>	Residual Plots Einpresstiefe Polylac 777B	Seite 102
<b>Bild 3.53</b>	Regressionsanalyse Auszugskraft LG Chem XR409H	Seite 103
<b>Bild 3.54</b>	Fitted Line Plot Auszugskraft LG Chem XR409H	Seite 104
<b>Bild 3.55</b>	Residual Plots Auszugskraft LG Chem XR409H	Seite 104
<b>Bild 3.56</b>	Regressionsanalyse Auszugskraft Polylac 777B	Seite 105
<b>Bild 3.57</b>	Fitted Line Plot Auszugskraft Polylac 777B	Seite 105
<b>Bild 3.58</b>	Residual Plots Auszugskraft Polylac 777B	Seite 106
<b>Bild 3.59</b>	Boxplot Einfluss Kappenmaterial auf Auszugskraft (ABS)	Seite 108
<b>Bild 3.60</b>	Pareto Chart Einfluss Klemmlänge und Kappenmat. (ABS)	Seite 109
<b>Bild 3.61</b>	Boxplot Einfluss Kappenmat. auf Auszugskraft (ABS vs. PP)	Seite 110
<b>Bild 3.62</b>	Pareto Chart Klemmlänge und Kappenmat. (ABS vs. PP)	Seite 111
<b>Bild 3.63</b>	Raststift verzinkt und schwarz beschichtet	Seite 112
<b>Bild 3.64</b>	Testblock mit beschichteten Raststiften	Seite 113
<b>Bild 3.65</b>	Boxplot Einfluss Beschichtung (ABS)	Seite 114
<b>Bild 3.66</b>	2-t-Test Einfluss Beschichtung (ABS)	Seite 114
<b>Bild 3.67</b>	Boxplot Einfluss Beschichtung (PP)	Seite 115
<b>Bild 3.68</b>	2-t-Test Einfluss Beschichtung (PP)	Seite 115

---

<b>Bild 3.69</b>	CAD Modell Testblock (2.Version)	Seite 116
<b>Bild 3.70</b>	Von Mises Spannung bei Zug aus Dom (innen)	Seite 117
<b>Bild 3.71</b>	Von Mises Spannung bei Zug aus Dom (außen)	Seite 117
<b>Bild 4.1</b>	2 <sup>2</sup> -Versuchsplan	Seite 123
<b>Bild 4.2</b>	„Power ans Sample Size“ Test Versuchsplan	Seite 123
<b>Bild 4.3</b>	„Power Curve“ des Versuchsplans	Seite 124
<b>Bild 4.4</b>	gebohrter Testblock	Seite 125
<b>Bild 4.5</b>	Testblock mit eingepressten Raststiften	Seite 125
<b>Bild 4.6</b>	Abzugsvorrichtung	Seite 127
<b>Bild 4.7</b>	Einspannung der Testblöcke	Seite 128
<b>Bild 4.8</b>	Niederhalter für Testblock	Seite 129
<b>Bild 4.9</b>	Testblock mit Niederhalter in Zugvorrichtung	Seite 129
<b>Bild 4.10</b>	Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 131
<b>Bild 4.11</b>	Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 131
<b>Bild 4.12</b>	Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 132
<b>Bild 4.13</b>	Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 133
<b>Bild 4.14</b>	Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 133
<b>Bild 4.15</b>	Response Surface – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 134
<b>Bild 4.16</b>	Residual Plot – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 135
<b>Bild 4.17</b>	Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 135
<b>Bild 4.18</b>	Response Surface – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 136
<b>Bild 4.19</b>	Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 137
<b>Bild 4.20</b>	Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 137
<b>Bild 4.21</b>	Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 138
<b>Bild 4.22</b>	Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 139
<b>Bild 4.23</b>	Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 139
<b>Bild 4.24</b>	Response Surface – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 140
<b>Bild 4.25</b>	Residual Plot – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 141
<b>Bild 4.26</b>	Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 141
<b>Bild 4.27</b>	Response Surface – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 142
<b>Bild 4.28</b>	Versuchsplan 2	Seite 143
<b>Bild 4.29</b>	Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 144
<b>Bild 4.30</b>	Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 144

---

<b>Bild 4.31</b>	Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,8mm	Seite 145
<b>Bild 4.32</b>	Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 146
<b>Bild 4.33</b>	Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 146
<b>Bild 4.34</b>	Response Surface – Polylac (ABS) – 2,8mm	Seite 147
<b>Bild 4.35</b>	Residual Plot – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 148
<b>Bild 4.36</b>	Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 148
<b>Bild 4.37</b>	Response Surface – Samsung (PP) – 2,8mm	Seite 149
<b>Bild 4.38</b>	Residual Plot – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 150
<b>Bild 4.39</b>	Regressionsanalyse – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 150
<b>Bild 4.40</b>	Response Surface – LG Chem (ABS) – 2,3mm	Seite 151
<b>Bild 4.41</b>	Residual Plot – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 152
<b>Bild 4.42</b>	Regressionsanalyse – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 152
<b>Bild 4.43</b>	Response Surface – Polylac (ABS) – 2,3mm	Seite 153
<b>Bild 4.44</b>	Residual Plot – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 154
<b>Bild 4.45</b>	Regressionsanalyse – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 154
<b>Bild 4.46</b>	Response Surface – Samsung (PP) – 2,3mm	Seite 155
<b>Bild 4.47</b>	Versuchsplan Temperatur / Feuchtigkeit	Seite 159
<b>Bild 4.48</b>	Boxplot Einfluss der Temperatur	Seite 160
<b>Bild 4.49</b>	2-t-Test Vergleich -40°C vs. +20°C	Seite 161
<b>Bild 4.50</b>	2-t-Test Vergleich +90°C vs. +20°C	Seite 161
<b>Bild 4.51</b>	h-x-Diagramm	Seite 162
<b>Bild 4.52</b>	Pareto Chart Einfluss vom Temp. und Feuchte – 2,8mm Stift	Seite 163
<b>Bild 4.53</b>	Einfluss der beiden Faktoren – 2,8mm Stift	Seite 163
<b>Bild 4.54</b>	Pareto Chart Einfluss vom Temp. und Feuchte – 2,3mm Stift	Seite 164
<b>Bild 4.55</b>	Einfluss der beiden Faktoren – 2,3mm Stift	Seite 164
<b>Bild 4.56</b>	Ergebnisse LG Chem (ABS) – Lochdurchmesser 2,49mm	Seite 167
<b>Bild 4.57</b>	Ergebnisse LG Chem (ABS) – Lochdurchmesser 1,93mm	Seite 167
<b>Bild 4.58</b>	Ergebnisse Polylac (ABS) – Lochdurchmesser 2,46mm	Seite 168
<b>Bild 4.59</b>	Oberkappe mit eingepressten Raststiften	Seite 169
<b>Bild 4.60</b>	Auszugsvorrichtung mit eingespannter Oberkappe	Seite 170
<b>Bild 4.61</b>	Boxplot Vergleich Block vs. Oberkappe	Seite 170
<b>Bild 4.62</b>	Boxplot Auszugskräfte Oberkappe	Seite 172
<b>Bild 4.63</b>	Details Schraubdom Oberkappe	Seite 172

### 7.3 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1</b>	Anzahl Versuche bei Versuchsplänen	Seite 27
<b>Tabelle 2.2</b>	Schlussfolgerung aus Hypothesen	Seite 30
<b>Tabelle 3.1</b>	Ergebnisse 2-t-Test	Seite 83
<b>Tabelle 3.2</b>	Standardabweichungen neuer Testblock	Seite 118
<b>Tabelle 3.3</b>	Standardabweichungen neuer Testblock	Seite 119
<b>Tabelle 4.1</b>	Ergebnisse Lochdurchmesser DoE 2	Seite 156
<b>Tabelle 4.2</b>	Ergebnisse Auszugskraft DoE 2	Seite 156
<b>Tabelle 4.3</b>	Durchmesser der Testblöcke	Seite 166

### 7.4 Abkürzungsverzeichnis

<b>6<math>\sigma</math></b>	Six Sigma
<b><math>\alpha</math></b>	Fehlerwahrscheinlichkeit
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CCD</b>	Central Composite Design
<b>C<sub>pk</sub></b>	Prozessfähigkeit
<b>DoE</b>	Design of Experiment
<b>K12A</b>	interne Bezeichnung ultraschallverschweißte Gurtschlosskappen
<b>K12E</b>	interne Bezeichnung verschraubte Gurtschlosskappen
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>p<sub>pk</sub></b>	vorläufige Prozessfähigkeit
<b>R<sup>2</sup></b>	Bestimmtheitsmaß
<b><math>\sigma</math></b>	Standardabweichung
<b>TES</b>	Technical Engineering Specification
<b>v</b>	Varianz

---

## 7.5 Einheitenverzeichnis

<b>Größe</b>	<b>verwendete Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>in Grund- einheit</b>
Länge	mm	Millimeter	$1\text{mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Gewicht	kg	Kilogramm	
Kraft	N	Newton	
Winkel	°	Grad	
Geschwindigkeit	mm/min	Millimeter pro Minute	$1\text{mm/min} = 1,667 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
Spannung	MPa	Megapascal	$1\text{MPa} = 1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
Temperatur	°C	Grad Celsius	

---

## 8. Anhang

### - Six Sixma:

- Projektplan
- IST-IST NICHT Tabelle

### - Materialdatenblätter:

- LG Chem XR409H (ABS)
- Polylac PA-777B (ABS)
- Samsung Total BJ550 (PP)

### - Technische Zeichnungen Raststifte:

- ATP-TriPress 2,3x10mm
- ATP-TriPress 2,8x10mm

### - Testspezifikation:

- E115245 - Kappenabzugskraft