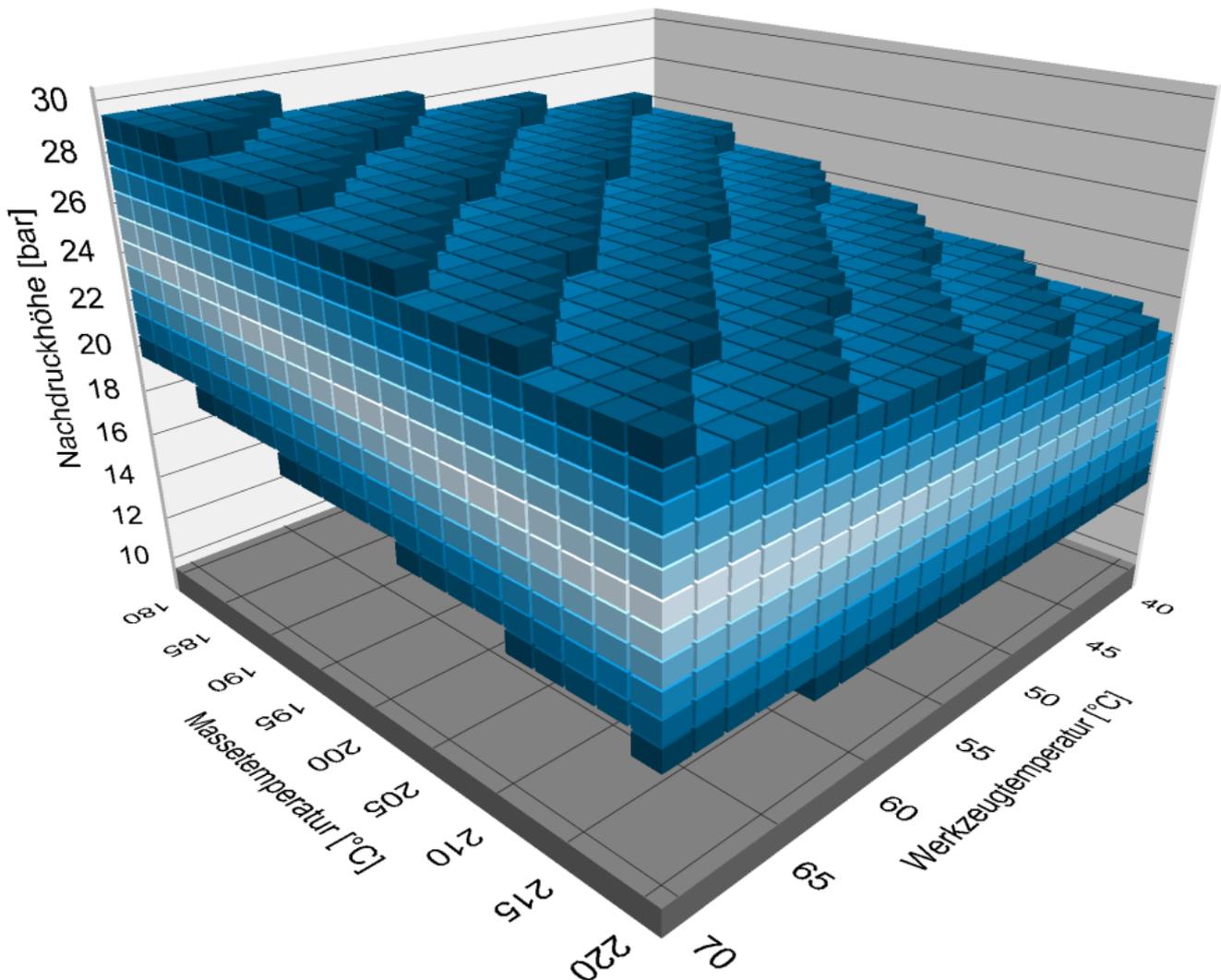




Benutzerhandbuch



Inhaltsverzeichnis

Kap. I Einleitung	2
Kap. II Installation	4
1 Installation des Programms	4
2 Freischaltung der Lizenz	5
3 Deinstallation des Programms	6
Kap. III Allgemeine Programmbedienung	8
Kap. IV Ziele der Optimierung	10
Kap. V Ablauf einer Prozessoptimierung	12
1 Assistent zur Unterstützung beim Optimierungsablauf	12
2 Anlegen eines neuen Experiments	12
3 Wahl des Versuchsplans	12
4 Faktorielle Versuchspläne	13
5 Fraktionierte Versuchspläne	16
6 SKZ-Methode des integrierten Experiments	18
7 Allgemeine Tipps zur Festlegung des Versuchsplans	21
8 Festlegung der Einflussgrößen	22
9 Festlegung der Einstellstufen	23
10 Festlegung der Qualitätsmerkmale	23
11 Durchführung der Versuche an der Maschine	25
12 Messung der Qualitätsmerkmale	25
13 Kennwertberechnung mit Ausreißertest	26
14 Berechnung der Prozessmodelle	28
15 Signifikanztests	29
16 Variationsbereich der Merkmale	30
17 Effekte der Parameter	30
18 Grafische Darstellung der Prozessmodelle	32
19 Grafische Darstellung der Qualitätsfunktion	33
20 Prozessoptimierung	34
21 Robuste Einstellung	34
22 Zentrierungsparameter	35
23 Prozesszentrierung	36
24 Prozessfenster	36

25 Durchführung des Bestätigungsexperiments	37
Kap. VI Interpretationsbeispiele	42
Kap. VII Weiterführende Literatur	58
Index	59

Kapitel



1 Einleitung

Sehr geehrter MESOS-Kunde,

vielen Dank für Ihr Vertrauen in das Dienstleistungs- und Softwareangebot des SKZ. Damit Ihre Wünsche und Anregungen auch weiterhin in das Produkt einfließen, würden wir uns freuen, wenn Sie bei Fragen und Problemen unter folgender Adresse Kontakt mit uns aufnehmen würden:



SKZ - KFE gGmbH
Kunststoff-Forschung und -Entwicklung
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg

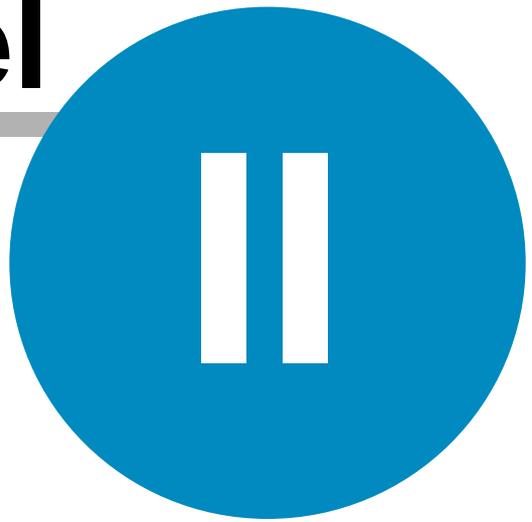
Dipl.-Ing. Manfred Popp
Tel.: 0931 / 4104-200
Fax: 0931 / 4104-377
E-mail: mesos@skz.de

Als Ergänzung zu den umfangreichen Hilfetexten innerhalb des Programms soll Ihnen dieses Handbuch beim Einstieg in die Prozessoptimierung helfen und die sinnvollen theoretischen Grundlagen vermitteln. Es stellt somit das Bindeglied zwischen den praktischen Versuchen an der Spritzgießmaschine und der Auswertung mit der Software dar. An den entsprechenden Stellen wird dazu auf die Menüpunkte bzw. zugehörigen Hilfetexte des Programms verwiesen, in denen Sie alle Details der eigentlichen Programmbedienung nachlesen können.

Um Ihnen den Zugriff zu erleichtern, ist dieses Handbuch in elektronischer Form in das Hilfesystem von MESOS eingebunden (Menü "Hilfe" - "Handbuch"). Bei der ersten Durcharbeitung des Handbuchs sollten Sie unbedingt in der chronologisch richtigen Reihenfolge vorgehen, da die Kapitel aufeinander aufbauen. Sie können dazu die Knöpfe "<<" und ">>" benutzen, die Sie zum jeweils vorhergehenden bzw. folgenden Kapitel führen. Eine Übersicht über alle vorhandenen Kapitel erhalten Sie im [Inhaltsverzeichnis](#) am Beginn des Handbuchs, das jederzeit über den Knopf "Inhalt" aufgerufen werden kann.

Da das Windows-Hilfesystem leider keine qualitativ zufriedenstellenden Ausdrücke der im Text enthaltenen Grafiken erlaubt, wird das Handbuch bei der Installation zusätzlich im PDF-Format (Datei "Handbuch.pdf") in das MESOS-Hauptverzeichnis kopiert.

Kapitel



2 Installation

2.1 Installation des Programms

MESOS - DOE V4 ist ein 32-Bit-Programm und benötigt Microsoft(c) Windows 7 oder höher (getestet bis Windows 10, Updatestand Juni 2023, 32 und 64 Bit). Die weiteren Mindestvoraussetzungen für einen sinnvollen Betrieb lauten:

- Single- oder Dualcore-Prozessor ab 1,5 MHz
- Arbeitsspeicher: Mindestanforderung des Betriebssystems (MESOS selbst benötigt bis zu 200 MB für sich)
- OpenGL-fähige Grafikkarte mit Echtfarbendarstellung, Auflösung 1024 x 768 Punkte; empfohlen werden Full-HD (1920 x 1080) oder besser
- Für die Installation ca. 25 MB freier Speicher auf der Festplatte, weitere 30 MB für den Betrieb
- Grafikfähiger Drucker

Die ausführbare Setup-Datei legt im Windows-Startmenü einen Unterordner "MESOS V4" mit folgenden Einträgen an:

- DongleTool: Kleines Hilfsprogramm, um neue Lizenzen (z.B. für eine Verlängerung des Testzeitraums) auf den Kopierschutzdongle der MESOS Pro-Version aufzuspielen
- Handbuch (PDF-Version): Dieses Handbuch als ausdruckbare PDF-Datei
- Handbuch: Handbuch im Microsoft chm-Format für den Gebrauch innerhalb des Hilfesystems
- Hilfe: Hilfetexte zu den einzelnen Menüpunkten des Programms, ebenfalls im chm-Format
- MESOS - DOE deinstallieren: Entfernt das Programm wieder von Ihrem Rechner
- MESOS - DOE: Startet das eigentliche Programm
- (Optional) Experiment-Konvertierung V3 nach V4: Dieses Tool erlaubt Bestandskunden der Vorgängerversion V3 die Konvertierung von Experimenten in das neue Dateiformat

Damit das Programm auch von einem Standardbenutzer ohne Admin-Rechte gemäß der aktuellen Windows-UAC-Richtlinien (User Access Control) verwendet werden kann, werden die Dateien bei der Installation in bestimmte Ordner geschrieben:

- Unterverzeichnis "\MESOS V4" im Standardordner für Programme (Windows 10: "C:\Program Files" bzw. "C:\Program Files (x86)"): Die hier abgelegten Programm-Dateien werden nur gelesen bzw. ausgeführt.
- Unterverzeichnis "\MESOS V4" im AppData-Verzeichnis für alle Benutzer (Windows 10: "C:\ProgramData"): Programminterne Dateien, die gelesen und geschrieben werden müssen (Konfigurationsdateien etc.). Dazu bekommt die Benutzergruppe "everyone" volle Zugriffsrechte auf dieses Verzeichnis. Durch die Verwendung eines für alle Anwender gemeinsamen Verzeichnisses ist sicher gestellt, dass jeder auf dem Rechner mit den gleichen Grundeinstellungen des Programms arbeitet und Updates zentral durchgeführt werden können.
- Unterverzeichnis "\MESOS V4\Beispiele" im Documents-Verzeichnis für alle Benutzer (Windows 10: "C:\Users\Public\Documents"): Mitgelieferte Beispielerperimente zum Ausprobieren der Demoversion. Auch dieses Verzeichnis bekommt die vollen Zugriffsrechte, damit Änderungen an den Dateien von jedem Anwender auf dem Rechner gespeichert werden können.

Damit die Zugriffsrechte vergeben werden können, benötigt das Installationsprogramm selbst Admin-Befugnisse für den Zeitraum der Installation. Falls diese fehlen, fragt Windows selbst nach dem Passwort eines Admin-Kontos.

2.2 Freischaltung der Lizenz

Beginnend mit Version V4.40 bietet MESOS zwei unterschiedliche Lizenzen an:

- ❑ MESOS Pro: Kostenpflichtige Vollversion mit dem gesamten Leistungsumfang des Programms. Die Verwaltung der Lizenz erfolgt hier über einen USB-Dongle, der am Rechner angesteckt werden muss. Dabei kann das Programm mehrfach installiert werden, aber nur der PC mit dem Dongle kann das Programm aktuell ausführen. Der Dongle wird Ihnen beim Kauf der Pro-Version zusammen mit den Installationsdateien auf einem Datenstick und dem ausgedruckten Handbuch zugeschickt.
- ❑ MESOS Starter: Kostenlose Version mit den wichtigsten Basisfunktionen für Einsteiger und Gelegenheitsnutzer. Entsprechend fehlen einige tiefergehende Auswertungen, ebenso wird bei manchen Menüpunkten ein Fenster mit einem Warte-Countdown und etwas Werbung für SKZ-Veranstaltungen eingeblendet. Zusätzlich haben alle 2D-Grafiken ein Wasserzeichen im Hintergrund.

Neben dem eventuellen Ablaufdatum enthält der Dongle der Pro-Version auch die Information, bis zu welcher maximalen Versionsnummer Updates von der Lizenz abgedeckt sind. Damit Sie den Status ihrer Lizenz jederzeit einsehen können, werden Ihnen alle wichtigen Daten inkl. der Seriennummer des angeschlossenen Dongles und Ihrer Kundennummer in einem Dialogfenster angezeigt, das Sie über den Menüpunkt "Hilfe" - "Info über MESOS" aufrufen können.

MESOS Starter verwendet dagegen keinen USB-Dongle, sondern eine Lizenzdatei, die Sie jederzeit durch eine formlose Mail an mesos@skz.de anfordern können. Die Lizenzdatei wird dann auf Ihre Mailadresse ausgestellt, die fortan als Passwort beim Start von MESOS eingegeben werden muss.

HINWEIS: Experimente, die mit MESOS Pro angelegt oder ausgewertet wurden, können nicht (mehr) mit der Starter-Lizenz geladen werden. Der umgekehrte Weg steht dagegen immer offen.

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Unterschiede zwischen MESOS Pro und MESOS Starter nochmals kurz zusammen:

Features	MESOS Pro	MESOS Starter
Assistent zur Führung durch die Auswertungsschritte	✓	✓
Standard-Versuchspläne (voll- und teilfaktoriell mit 2 Levelstufen, Sternplan)	✓	✓
Erweiterte Versuchspläne (D-optimaler Plan, faktorielle Pläne mit 3 oder mehr Levelstufen)	✓	X
Bis zu 30 Qualitätsmerkmale	✓	X (max. 8)
Tabellarische Messwerteingabe inkl. Datenaustausch über die Zwischenablage	✓	✓
Messwertimport und -export, Schnittstelle zu Messgeräten	✓	X
Kennwertberechnung mit Ausreißertest	✓	✓
Varianzanalyse & Berechnung des Grenzeffekts	✓	✓ (mit Wartezeit)
Test auf Korrelationen	✓	X
Berechnung von Prozessmodellen	✓	✓

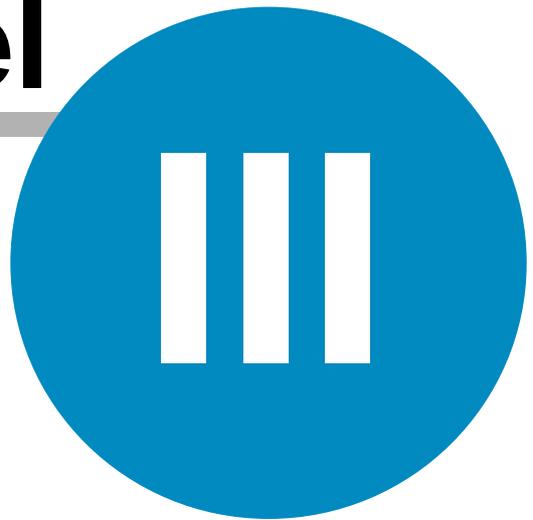
Tabellarische Anzeige der Versuchsreihenkennwerte, Effekte & Extremwerte	✓	✓
Grafische Darstellung der Versuchsreihenkennwerte, Effekte & Prozessmodelle	✓	✓
Grafische Darstellung der Modellgenauigkeit & Qualitätsfunktion	✓	✓ (mit Wartezeit)
Suche nach der robusten Einstellung & den Zentrierungsparametern	✓	X
Prozesssimulation & Prozesszentrierung (Suche nach der besten Kompromisseinstellung)	✓	X
Grafiken abspeichern als Datei & kopieren in die Zwischenablage	✓	X (nur Screenshots)
Ausdrucken der Grafiken	✓	✓ (mit Wasserzeichen)

2.3 Deinstallation des Programms

Bei der Installation von MESOS werden u.a. auch verschiedene Bibliotheken in das Windows-Systemverzeichnis kopiert und automatisch registriert. Diese zentral von Windows verwalteten Bibliotheken werden teilweise von mehreren Programmen gleichzeitig benutzt und können daher nicht risikolos von Hand gelöscht werden. Aus diesem Grund wurde unter Windows eine betriebssystemeigene Funktion geschaffen, die die Deinstallation von solchen Programmen wie etwa MESOS erlaubt, die bei der Installation vorgenommene Veränderungen in einer speziellen Datei protokollieren. Zur Deinstallation folgen Sie bitte diesen Schritten:

- Wählen Sie im Windows-Startmenü den Eintrag "Start" - "Programme" - "MESOS V4" - "MESOS deinstallieren"
- Folgen Sie den weiteren Anweisungen des Deinstallationsprogramms. Falls das Programm nachfragt, ob eine nicht mehr benötigte Komponente entfernt werden darf, können Sie diese Frage mit "Ja" beantworten.

Kapitel



3 Allgemeine Programmbedienung

MESOS orientiert sich als modernes Programm an den bekannten Standards für Programmaufbau und Benutzerführung unter Windows. Neben den aktuellen Komfortdetails (konfigurierbare Iconleisten, Schnellzugriff auf wichtige Befehle über die rechte Maustaste, Assistenten zur Unterstützung des Anwenders bei komplizierteren Abläufen, Vorschaufunktionen, umfangreiche Hilfetexte mit Glossar, elektronisches Handbuch, etc.) verfügt MESOS aber auch über ein paar Besonderheiten, die den Umgang mit dem Programm noch effizienter gestalten sollen:

- ❑ MESOS merkt sich grundsätzlich, an welchem Experiment zuletzt gearbeitet wurde. Beim nächsten Programmstart wird dieses Experiment dann automatisch ohne Ihr Zutun wieder geladen und Sie können sofort dort weitermachen, wo Ihre letzte Sitzung geendet hat.
- ❑ Die eingegebenen Experimentinformationen und Messwerte müssen nicht explizit durch einen Befehl abgespeichert werden, weshalb auch kein Menüpunkt "Datei" - "Speichern" existiert. Statt dessen werden diese sofort nach Verlassen des jeweiligen Dialogfensters automatisch gesichert. Bei einem Rechnerabsturz gehen somit maximal die Eingaben der letzten Minuten verloren. Diese Vorgehensweise ist möglich, da alle nach Abschluss der Messwerteingabe folgenden Auswertungsschritte keine Veränderungen an den Stammdaten mehr vornehmen und somit beliebig oft wiederholt werden können. So kann z.B. der Ausreißertest mit verschiedenen Einstellungen ausprobiert werden, wobei immer wieder die Gesamtzahl der ursprünglich eingegebenen Werte in den Test einbezogen wird. Für die zwischenzeitliche Datensicherung oder die Ablage verschiedener Auswertungen mit unterschiedlichen Einstellungen besteht zudem die Möglichkeit, das komplette Experiment unter einem neuen Experimentnamen als Kopie zu speichern (Menü "Datei" - "Speichern unter").
- ❑ Neben den eigentlichen Messwerten speichert MESOS auch alle Ihre Eingaben in den Dialogfenstern getrennt für jedes Experiment ab. Beim nächsten Aufruf des Experiments können Sie somit leicht nachverfolgen, mit welchen Einstellungen und Randbedingungen die aktuelle, evtl. von einer anderen Person durchgeführte Auswertung vorgenommen wurde.
- ❑ Durch Einführung eines speziellen Platzhalters ("NoValue"-Wert) für noch nicht eingegebene oder nicht vorhandene Messwerte können die Auswertungen auch dann noch durchgeführt werden, wenn bestimmte Versuchsergebnisse fehlen. Da dies nicht nur für einzelne Teilmesswerte, sondern ganze Versuchsreihen und sogar Einstellstufen gilt, kann das Programm sehr vielseitig eingesetzt und bei Bedarf auch zweckentfremdet werden. So wäre es z.B. möglich, die Ergebnisse mehrerer MFR-Messungen einfach über die Zwischenablage in ein neues, noch leeres Experiment zu kopieren, um in MESOS schnell einen Ausreißertest zur Überprüfung auf mögliche Fehlmessungen durchzuführen.

Kapitel



IV

4 Ziele der Optimierung

Neben der generellen Gewinnung von Prozess-Know-How besteht die Aufgabe von MESOS in der Suche nach einer Maschineneinstellung, die sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- geringe Qualitätsschwankungen von Zyklus zu Zyklus, d.h. streuungsarme Produktion
- hohe Prozessrobustheit, d.h. möglichst geringe Reaktion auf äußere Störungen wie Chargenänderungen, ungleichmäßige Rezyklatzugabe, schwankende Umgebungstemperaturen, etc.
- möglichst gute Annäherung der Merkmale an die vorgegebenen Sollwerte

Der Begriff der Robustheitsoptimierung wird dabei am SKZ meist als Sammelbegriff für die beiden ersten Punkte gewertet, da auch die Schwankungen von Zyklus zu Zyklus letztendlich eine Reaktion auf Störeinflüsse oder Ungleichmäßigkeiten im Prozessablauf darstellen. Neben diesen produktionsbezogenen Zielen lässt sich die Methode beispielsweise aber auch im Bereich der Werkzeugabmusterung einsetzen, um

- die Größe des Prozessfensters,
- den möglichen Variationsbereich der Merkmale
- oder die Stärke und Richtung notwendiger Werkzeugkorrekturen zu ermitteln.

Das Ziel der Robustheitsoptimierung stellt eine Besonderheit der SKZ-Methodik gegenüber anderen Anwendern der Versuchsplanung im Spritzgießbereich dar. Um diese sinnvoll nutzen zu können, müssen die Versuche auf der späteren Produktionsmaschine oder zumindest einer baugleichen Technikumsmaschine durchgeführt werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Reproduzierbarkeit der Formteilmerkmale neben der Gleichmäßigkeit der Material- und Umgebungseigenschaften auch stark von der Arbeitsweise der speziellen Spritzgießmaschine in Kombination mit dem jeweiligen Werkzeug und Material abhängt (Genauigkeit der Regelung, Verschleißzustand, Gleichmäßigkeit des Materialeinzugs, Grad der Ausnutzung des maximalen Schussvolumens oder Einspritzdruckes, etc.).

Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, kann auf die Streuungsuntersuchung verzichtet und der Versuchsaufwand noch etwas reduziert werden. Die Ziele der Optimierung konzentrieren sich dann auf solche Aussagen, die rein den Mittelwert der Qualitätsmerkmale betreffen (z.B. Größe des Prozessfensters, Beeinflussbarkeit der Merkmale, Zentrierung auf die Sollwerte). MESOS ist dabei so flexibel ausgelegt, dass die Ergebnisse nach verschiedensten Kriterien, mit oder ohne Streuungsbetrachtung, ausgewertet werden können.

Kapitel



5 Ablauf einer Prozessoptimierung

5.1 Assistent zur Unterstützung beim Optimierungsablauf

Um den Einstieg in die Programmbedienung zu erleichtern, wurde der im Menü "Datei" zu findende Assistent für den Optimierungsablauf geschaffen. Dieser führt Sie schrittweise durch die wichtigsten Menüpunkte, die im Laufe der Aufstellung, Durchführung und Auswertung eines Experiments benötigt werden. Zusätzlich füllt der Assistent, falls möglich, die erscheinenden Dialogfenster bereits mit sinnvollen Vorgaben aus, so dass Sie vielfach nur noch mit OK bestätigen müssen.

Das sichtbare Fenster des Assistenten bleibt auch während der Ausführung der Menüpunkte offen. Ebenso ist es möglich, jeden beliebigen Menüpunkt über das Pulldown-Menü oder die Iconleiste bei aktivem Assistenten aufzurufen. Sie können damit jederzeit auch auf solche Programmfunktionen zurückgreifen, die für Ihre spezielle Auswertung sinnvoll sind, vom Assistenten standardmäßig aber nicht aufgerufen werden.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Assistent für den Optimierungsablauf"

5.2 Anlegen eines neuen Experiments

Alle zu einem Experiment gehörenden Daten und Auswertungen sind in einer einzelnen Datei zusammen gefasst, deren Namen und Speicherort Sie frei wählen können. Die Endung dieser Experimentdatei lautet .expV4 und wurde bei der Installation mit MESOS verknüpft. Sie können dadurch z.B. auch im Windows Explorer auf eine solche Datei doppelklicken und MESOS wird automatisch mit der Datei gestartet.

Für die weitere Auswahl, Verwaltung und Archivierung der Experimente ist die exakte Kenntnis des Experimentnamens nicht immer notwendig, da Sie in einem der folgenden Schritte vom Programm nach verschiedenen Zusatzinformationen zum Experiment (Datum der Durchführung, Formteilname, Maschine, Material, Leiter der Versuche, etc.) gefragt werden. Wenn Sie später dann ein bestimmtes durchgeführtes Experiment erneut laden wollen, können Sie sich über die Experimentsuche eine Liste aller in einem bestimmten Verzeichnis (inkl. Unterverzeichnisse) gefundenen Experimente zusammen mit diesen Zusatzinformationen anzeigen lassen.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Neues Experiment"

"Datei" - "Experiment suchen"

"Datei" - "Experimentdaten"

5.3 Wahl des Versuchsplans

Die Optimierung der Maschineneinstellung basiert bei MESOS auf der Aufstellung von Versuchsplänen sowie deren Auswertung nach den Regeln der statistischen Versuchsmethodik. Die angewandten Vorgehensweisen unterscheiden sich dabei nicht grundlegend vom herkömmlichen "Probieren", die Versuchsmethodik gibt Ihnen jedoch das nötige Werkzeug in die Hand, um aus einer möglichst geringen Zahl von Versuchen möglichst viele Informationen über das Verhalten des Prozesses zu gewinnen.

Um dieses Ziel zu erreichen, existieren prinzipiell unterschiedliche Ansätze (Versuchspläne, Evolutionsstrategie, Gradientenverfahren, etc.) und auch Untergruppen (z.B. verschiedenen Arten von Versuchsplänen). Die Gründe, weshalb das SKZ die in MESOS umgesetzte Methodik der Versuchsplanung gewählt und mit eigenen Ansätzen ergänzt hat, liegen in den besonderen

Eigenschaften des Spritzgießprozesses:

- ❑ Die vermutlichen Einflussgrößen auf die Qualität können meist schon aus der Erfahrung heraus oder über entsprechende Literatur vorselektiert werden. Ihre Zahl ist zudem vergleichsweise gering.
- ❑ Die zu erwartenden Zusammenhänge zwischen den Maschineneinstellgrößen und zumindest den Absolutwerten der Qualitätsmerkmale sind einfacherer Natur, z.B. häufig lineare Abhängigkeit zwischen dem Nachdruck und den Formteilmaßen.
- ❑ Wegen der langsamen Erreichung des thermischen Gleichgewichts nach einer Verstellung der Maschine sollten die Einflussgrößen möglichst selten und auf wenigen Stufen variiert werden. Die Wiederholung der Versuchsdurchführung (Produktion mehrerer Formteile bei einer Einstellung) ist dagegen unkritisch.
- ❑ Bedingt durch Nachkristallisationsvorgänge und Bearbeitungsschritte wie Warmlagerung oder Konditionierung dürfen die Qualitätsmerkmale mitunter erst einige Zeit nach der Produktion der Formteile ermittelt werden. Optimierungsmethoden, bei denen das Ergebnis einer Versuchseinstellung bekannt sein muss, um die nächste Einstellung festzulegen (sukzessive Vorgehensweisen) sind daher weniger geeignet als solche, bei denen die zu fahrenden Einstellungen vor dem eigentlichen Versuchsbeginn feststehen.

Da je nach Art der Qualitätsmerkmale und Ziel der Optimierung verschiedene Versuchspläne sinnvoll sein können, wurde ein weiterer Assistent geschaffen (Menü "Datei" - "Versuchsplan", Knopf "Assistent"), der Sie bei der Auswahl und Aufstellung des Versuchsplans unterstützen soll.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Versuchsplan"

"Datei" - "Versuchsplan - Assistent"

"Datei" - "Experimentdaten"

5.4 Faktorielle Versuchspläne

Im Versuchsplan werden verschiedene, direkt und unabhängig voneinander an der Spritzgießmaschine einstellbare Größen (Maschinenparameter oder kurz Parameter) auf mehreren Einstellstufen (Levelstufen oder kurz Level) variiert, um ihren Einfluss auf die Formteilqualität qualitativ und möglichst auch quantitativ zu erfassen. Die Zahl der notwendigen Einstellstufen pro Parameter hängt dabei davon ab, wie kompliziert die zu untersuchende Zusammenhänge sind.

Bei rein linearen Zusammenhängen (Bild 1, links) reichen beispielsweise bereits zwei Einstellstufen pro Parameter aus. Möchte man nun eine Abschätzung (Vorhersage) über den zu erwartenden Merkmalswert bei einer bisher nicht untersuchten Einstellkombination treffen, so würde es genügen, die Ergebnisse der beiden Einstellstufen linear zu verbinden, um den Zwischenwert aus der Grafik abzulesen. Muss dagegen davon ausgegangen werden, dass die Zusammenhänge zwischen Maschineneinstellung und Formteilqualität spürbar nichtlinear sind, werden mindestens drei Einstellstufen pro Parameter notwendig, um dieses komplexere Verhalten ausreichend genau erfassen zu können (Bild 1, rechts).

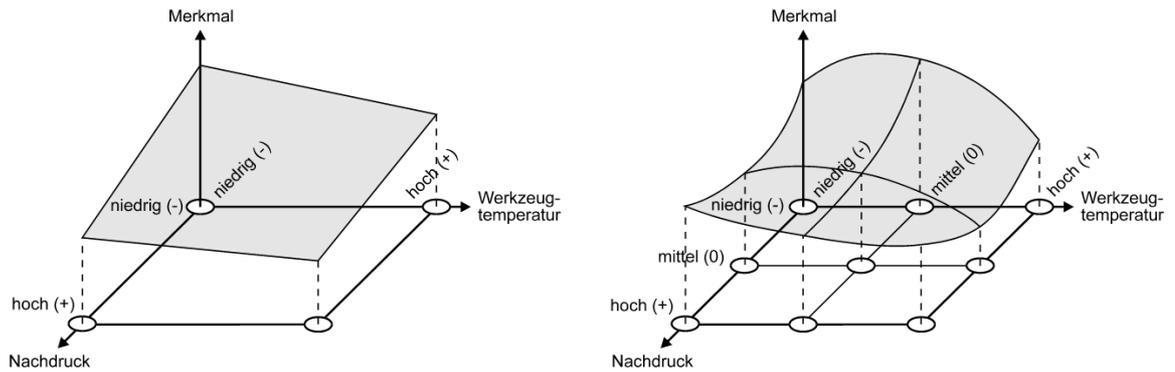


Bild 1: Mögliche Antwortflächen bei zwei oder drei Levelstufen pro Parameter

Die faktoriellen Versuchspläne zeichnen sich speziell dadurch aus, dass alle möglichen Kombinationen aus den Einstellstufen der Parameter im Versuch auch tatsächlich gefahren werden. Für den einfachen Fall von zwei Einflussgrößen (z.B. Werkzeugtemperatur und Nachdruckhöhe) und zwei Levelstufen pro Größe (eine niedrige und eine hohe) würde der Plan daher wie in Bild 2 aussehen:

Versuchsreihe	Werkzeugtemperatur	Nachdruckhöhe
1	hoch	hoch
2	hoch	niedrig
3	niedrig	hoch
4	niedrig	niedrig

Bild 2: Faktorieller Versuchsplan bei zwei Einflussgrößen mit je zwei Levelstufen

Wie in der Mathematik, so ist es auch in der Statistik üblich, so weit wie möglich mit allgemeinen Bezeichnung zu arbeiten und erst zum Schluss die tatsächlichen Werte einzusetzen. Parameter werden dabei üblicherweise durch Großbuchstaben dargestellt (A = erster Parameter, B = zweiter Parameter, usw.) und die Levelstufen durch die Zeichen - und + (- = niedrige Levelstufe, + = hohe Levelstufe; bei Plänen mit drei Levelstufen wird die mittlere Stufe als 0 bezeichnet). In dieser allgemeinen Form würde der Versuchsplan von Bild 2 also wie folgt aussehen:

Versuchsreihe	A	B
1	+	+
2	+	-
3	-	+
4	-	-

Bild 3: Faktorieller Versuchsplan bei zwei Einflussgrößen mit je zwei Levelstufen in der allgemeinen Form

Die Anzahl der möglichen Einstellkombinationen (Versuchsreihen) ergibt sich aus einer Formel, die gleichzeitig die Bezeichnung für den jeweiligen Versuchsplan darstellt:

$$\text{Anzahl Reihen} = \text{Anzahl Levelstufen}^{\text{Anzahl Parameter}}$$

Der Plan in den Bildern 2 und 3 ist demnach ein sog. 2^2 -Plan mit insgesamt 4 unterschiedlichen Versuchsreihen. Analog enthält ein 2^3 -Plan mit 3 untersuchten Einflussgrößen auf 2 Levelstufen 8 Versuchsreihen (Bild 4), usw. Falls die Anzahl der Parameter noch offen bleiben soll, wird ein Plan mit 2 Levelstufen allgemein als 2^k -Plan bezeichnet.

Versuchsreihe	A	B	C
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Bild 4: Faktorieller 2^3 -Versuchsplan

Durch die vielen unterschiedlichen Kombinationen und die gleichzeitige Verstellung mehrerer Parameter ist der faktorielle Versuchsplan auch dazu geeignet, Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen zu erkennen. Eine Wechselwirkung liegt immer dann vor, wenn die Richtung und/oder Stärke des Einflusses einer Größe von der Stellung einer oder mehrerer anderer Größen abhängt. So wäre es beispielsweise vorstellbar, dass die Auswirkung der Nachdruckhöhe auf ein bestimmtes Maß bei hoher Werkzeugtemperatur größer ist als bei kaltem Werkzeug.

Insgesamt sind bei drei Einflussgrößen 4 Wechselwirkungen denkbar:

- Wechselwirkung AB (Parameter A und B beeinflussen sich gegenseitig)
- Wechselwirkung AC (Parameter A und C beeinflussen sich gegenseitig)
- Wechselwirkung BC (Parameter B und C beeinflussen sich gegenseitig)
- Wechselwirkung ABC (Parameter A, B und C beeinflussen sich gegenseitig)

Obwohl diese Wechselwirkungen nicht wie die Parameter selbst an der Spritzgießmaschine eingestellt werden können, sondern je nach untersuchtem Formteil, etc. einfach vorhanden oder nicht vorhanden sind, werden sie oft in weiteren Spalten an den Versuchsplan angehängt (Bild 5). Die ebenfalls eingetragenen Levelstufen dienen dabei nur der späteren Auswertung der Versuche, um herauszubekommen, ob die entsprechende Wechselwirkung existiert oder nicht. Der Wert der Levelstufe (+ oder -) einer Zeile ergibt sich dabei aus der Multiplikation der Vorzeichen der beteiligten Parameter nach folgenden Regeln:

- + mal + = + ($+1 \times +1 = +1$)
- + mal - = - ($+1 \times -1 = -1$)
- mal + = - ($-1 \times +1 = -1$)
- mal - = + ($-1 \times -1 = +1$)

Für die 3-fach-Wechselwirkung ABC würde sich die Levelstufe in der zweiten Versuchsreihe also über die Formel

$$+1 \quad \times \quad +1 \quad \times \quad -1 \quad = \quad -1$$

(A auf Level +) (B auf Level +) (C auf Level -)

ergeben.

Vers.-Reihe	Parameter			Wechselwirkungen			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	-	-	+	+
5	-	+	+	-	-	+	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	-	-	+	+	-	-	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Bild 5: Faktorieller 2³-Versuchsplan mit angehängten Wechselwirkungen

Sobald die Versuche an der Spritzgießmaschine anstehen, werden die allgemeinen Platzhalter gegen die tatsächlichen Bezeichnungen der Einstellgrößen sowie die physikalischen Werte der Levelstufen ausgetauscht und der Versuchsplan ausgedruckt (Menü "Datei" - "Versuchsplan", Knopf "Drucken"). Bei drei Einflussgrößen könnte dieser beispielsweise wie folgt aussehen:

Versuchsreihe	Massetemperatur	Werkzeugtemperatur	Nachdruckhöhe
1	260 °C	60 °C	250 bar
2	260 °C	60 °C	100 bar
3	260 °C	30 °C	250 bar
4	260 °C	30 °C	100 bar
5	200 °C	60 °C	250 bar
6	200 °C	60 °C	100 bar
7	200 °C	30 °C	250 bar
8	200 °C	30 °C	100 bar

Bild 6: Beispiel eines mit realen Werten ausgefüllten 2³-Versuchsplans

5.5 Fraktionierte Versuchspläne

Wie bereits geschildert, ist es bei faktoriellen Versuchsplänen aufgrund der großen Zahl unterschiedlicher Versuchseinstellungen möglich, die Existenz jeder denkbaren Wechselwirkung zu untersuchen. Während das vereinzelt Auftreten von 2-fach-Wechselwirkungen (2 Parameter beeinflussen sich gegenseitig in der Wirkungsrichtung und/oder -stärke) durchaus noch üblich ist, ist aus der Erfahrung bekannt, dass Wechselwirkungen mit 4 oder mehr beteiligten Parametern (teilweise auch schon mit 3 Parametern) bei technischen Prozessen praktisch nicht vorkommen.

Die Idee der fraktionierten Versuchspläne besteht daher darin, auf die Untersuchung einzelner Wechselwirkungen zugunsten eines geringeren Versuchsaufwands zu verzichten. Üblicherweise werden dazu diejenigen Wechselwirkungen mit den meisten beteiligten Parametern verwendet, da deren Existenz am unwahrscheinlichsten ist. Die eigentliche Reduktion des Versuchsaufwands erreicht man dadurch, dass alle Versuchsreihen aus dem Plan gestrichen werden, bei denen die "einzusparende" Wechselwirkung z.B. auf der Levelstufe - stand.

Vers.-Reihe	Parameter			Wechselwirkungen			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	-	-	+	+
5	-	+	+	-	-	+	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	-	-	+	+	-	-	+
8	-	-	-	+	+	+	-



Vers.- Reihe	Parameter			Wechselwirkungen			
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1 (1)	+	+	+	+	+	+	+
2 (4)	+	-	-	-	-	+	+
3 (6)	-	+	-	-	+	-	+
4 (7)	-	-	+	+	-	-	+

Bild 7: Weg zum fraktionierten 2^{3-1} -Versuchsplan

Wie im Beispiel von Bild 7 sichtbar wird, werden die eigentlich interessierenden Parameter in den verbliebenen Versuchsreihen nach wie vor auf zwei Einstellstufen variiert, so dass ihre Auswirkung auf die Formteilmerkmale untersucht werden kann. Gleiches gilt für die 2-fach-Wechselwirkungen, auch wenn deren Levelstufen sich nur rein rechnerisch ergeben und nicht wirklich an der Spritzgießmaschine eingestellt werden können. Die uninteressante 3-fach-Wechselwirkung ABC kann dagegen nicht mehr quantifiziert werden, da sie keine unterschiedlichen Einstellungen mehr annimmt.

Damit sieht es zunächst so aus, als sei das angestrebte Ziel erreicht worden, durch den Verzicht auf eine sowieso unwahrscheinliche Wechselwirkung die Zahl der Versuchsreihen zu halbieren, was sich auch in der Bezeichnung des Plans sowie der Formel zur Berechnung seiner Versuchsreihenanzahl niederschlägt:

$$\text{Anzahl Reihen} = \text{Anzahl Levelstufen}^{\text{Anzahl Parameter} - \text{Anzahl nicht untersuchter Wechselw.}}$$

Bei genauerer Betrachtung des fraktionierten (geteilten bzw. halbierten) Versuchsplans wird jedoch deutlich, dass die drastische Reduzierung des Versuchsaufwands durch bestimmte Nachteile erkauft werden muss. Im Beispiel von Bild 7 bedeutet dies, dass die Abfolge der Levelstufen in den Spalten A und BC, B und AC sowie C und AB identisch ist. Diese Tatsache bezeichnet man als Vermengung. Falls bei der Auswertung festgestellt würde, dass sich eine deutliche Reaktion der Formteilmerkmale von den Versuchsreihen 1 und 2 zu den Versuchsreihen 3 und 4 ergeben hat, könnte als Folge nicht mehr sauber unterschieden werden, ob dieser Effekt auf die geänderte Einstellung des Parameters A oder auf den Einfluss der Wechselwirkung BC zurückzuführen ist (falls ein Synergieeffekt zwischen B und C auftritt und sich diese bei ihren hohen Einstellungen bezüglich der Wirkung gegenseitig verstärken, so wäre dies bei der Reihe 1 spürbar und das erste Reihengpaar würde sich hinsichtlich des erreichten Merkmalsniveaus im Mittel von dem zweiten abheben, auch wenn A nicht gleichzeitig verstellt würde). Der Wunsch, den Einfluss von 6 Größen (3 Parameter und 3 Wechselwirkungen) mit nur 4 Versuchen zu beschreiben ist also mit dem Wunsch zu vergleichen, ein lineares Gleichungssystem mit 6 Unbekannten aus nur 4 Gleichungen zu lösen. In beiden Fällen ist kein eindeutiges Ergebnis vorhanden.

Die daraus entstehende Gefahr einer Fehlinterpretation der Ergebnisse wird immer größer, je mehr Wechselwirkungen zugunsten eines reduzierten Versuchsaufwands aus dem Versuchsplan gestrichen werden. Fraktionierte Versuchspläne werden in MESOS deshalb nur dann verwendet, wenn die Zahl der Versuchsreihen eines vollständigen faktoriellen Plans unrealistisch hoch wäre oder schon im Vorfeld vermutet wird, dass einer der Parameter im Versuchsplan wahrscheinlich keinen Einfluss auf die untersuchten Qualitätsmerkmale hat.

Hierbei wird auch die Tatsache ausgenutzt, dass bei großen Versuchsplänen mit mehr als 3 Parametern die Einflüsse der Parameter nicht mit 2-fach-Wechselwirkungen, sondern mit höheren 3- oder 4-fach-Wechselwirkungen vermengt sind. Tritt dann eine Reaktion der Formteilmerkmale auf, kann mit höherer Wahrscheinlichkeit ausgesagt werden, dass dies eine direkte Reaktion auf die Verstellung des Parameters ist und nicht eine Folge des Einflusses der Wechselwirkung.

5.6 SKZ-Methode des integrierten Experiments

Reine 2^k -Pläne eignen sich prinzipiell nur zur Beschreibung linearer Zusammenhänge. Die zur Erfassung quadratischer Abhängigkeiten notwendigen 3^k -Pläne zeichnen sich demgegenüber durch eine für viele Anwendungen zu hohe Zahl von Versuchsreihen aus.

Das SKZ hat aus diesem Grund den integrierten Versuchsplan entwickelt, der den geringen Aufwand und die Einfachheit des 2^k -Plans mit der Möglichkeit des 3^k -Plans verbindet, zumindest leichte Nichtlinearitäten oder "Sättigungserscheinungen" (das Merkmal steigt oder fällt zunächst linear mit der Einstellung des Parameters; ab einem gewissen Punkt nimmt der Merkmalswert dann nur noch geringfügig zu bzw. ab und strebt einem Endwert zu) bei einzelnen Parametern zu beschreiben (Bild 8). Dazu werden zwei 2^k -Pläne mit verschiedenen physikalischen Levelstufen ineinander geschachtelt und, falls sinnvoll, um einen genau in der Mitte liegenden Zentralpunktversuch ergänzt. Der Teilplan mit den extremen Levelstufen wird dabei als äußeres Experiment und der Teilplan mit den engeren Parametervariationen als inneres Experiment bezeichnet.

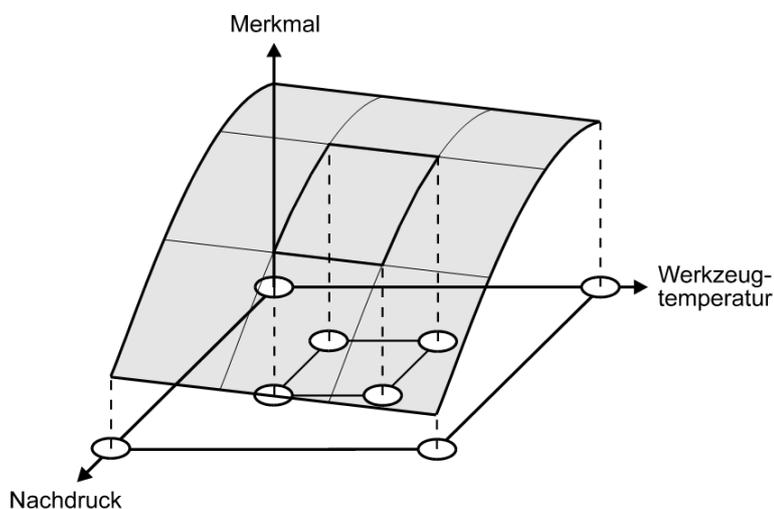


Bild 8: Mögliche nichtlineare Antwortfläche bei einem integrierten Experiment (äußeres und inneres Experiment)

Stehen die Levelstufen des äußeren Experiments ggf. nach Durchführung von Vorversuchen fest (A-: niedrige Levelstufe; A+: hohe Levelstufe), werden die Stufen des inneren (I-: niedrige Levelstufe; I+: hohe Levelstufe) symmetrisch dazu gelegt. Dabei sollte sowohl der Abstand zu den äußeren Levelstufen als auch der Abstand zwischen den Stufen des inneren Experiments etwa gleich sein. Die im Programm mit "Z" abgekürzte Levelstufe des Zentralpunkts liegt genau zwischen den Stufen des inneren bzw. äußeren Experiments. Hierzu ein Beispiel:

Parameter:	Werkzeugtemperatur		
Levelstufe A-:	30°C	Levelstufe A+:	60°C
Levelstufe I-:	40°C	Levelstufe I+:	50°C
Levelstufe Z:	45°C		

Durch die besondere Anordnung der Versuchspunkte eines integrierten Experiments im Versuchsraum können neben linearen Zusammenhängen auch einfache nichtlineare Abhängigkeiten untersucht werden. Dazu sind trotz Ausführung zweier 2^k -Pläne (evtl. plus Zentralpunkt) weniger Versuchseinstellungen notwendig als bei einem 3^k -Plan (Bild 9).

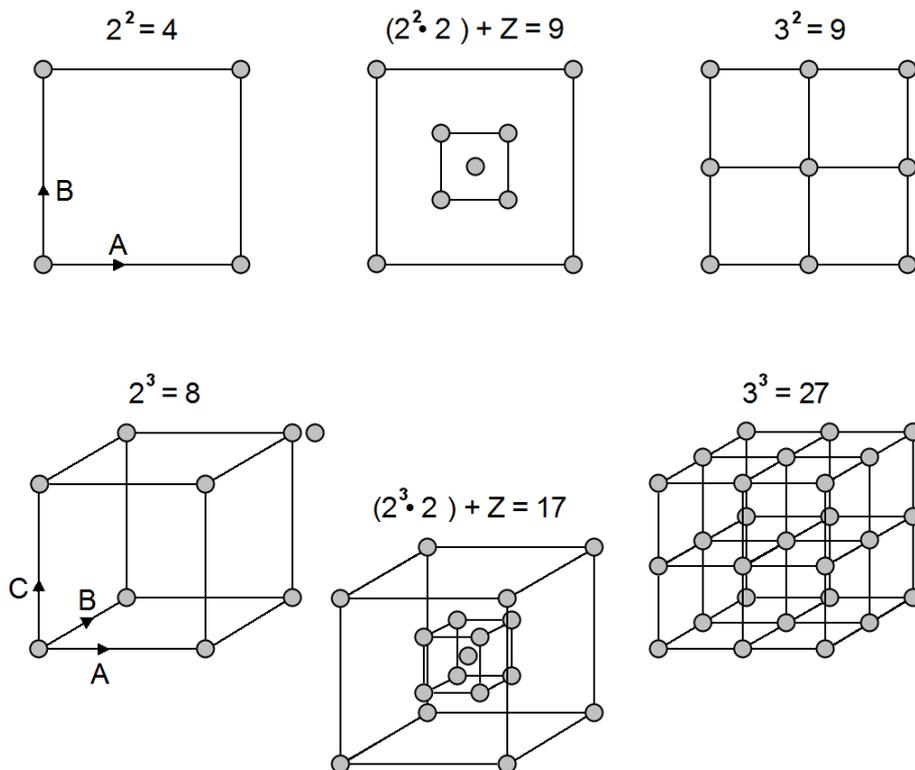


Bild 9: Vergleich der Anzahl von Versuchsreihen bei verschiedenen Versuchsplänen für 2 und 3 Einflussgrößen

Wichtig für das Verständnis ist dabei, dass die beiden Teilpläne (äußeres und inneres Experiment) getrennt nach den Regeln für 2^k -Pläne aufgestellt und bis zu einem gewissen Punkt auch getrennt ausgewertet werden. Erst im Bereich der grafischen Ergebnisdarstellung und Bestimmung der optimalen Maschineneinstellung werden die Ergebnisse dann zusammengeführt und gemeinsam betrachtet. Um diese Trennung deutlich zu machen, sollen die Schritte zur Liste mit den Versuchseinstellungen im folgenden nochmals an einem einfachen Beispiel erläutert werden. Ausgangspunkt ist dabei die allgemeine Form eines 2^3 -Plans (Bild 10).

Versuchsreihe	Massetemp.	Werkzeugtemp.	Nachdruck
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Bild 10: Allgemeine Form des 2^3 -Plans

Die Buchstaben A, B und C stehen dabei für die drei untersuchten Einflussgrößen. In einem konkreten Fall könnten dies beispielsweise folgende Parameter sein:

- A: Massetemperatur
- B: Werkzeugtemperatur
- C: Nachdruckhöhe

Aufgrund von Herstellerangaben, Erfahrungen oder Vorversuchen wurden für diese Parameter die extremen Levelstellungen des äußeren Experiments ermittelt und die Stufen des inneren Experiments und Zentralpunkts symmetrisch dazu gewählt.

Parameter A: Massetemperatur

Levelstufe A-:	200°C	Levelstufe A+:	260°C
Levelstufe I-:	220°C	Levelstufe I+:	240°C
Levelstufe Z:	230°C		

Parameter B: Werkzeugtemperatur

Levelstufe A-:	30°C	Levelstufe A+:	60°C
Levelstufe I-:	40°C	Levelstufe I+:	50°C
Levelstufe Z:	45°C		

Parameter C: Nachdruckhöhe

Levelstufe A-:	100 bar	Levelstufe A+:	250 bar
Levelstufe I-:	150 bar	Levelstufe I+:	200 bar
Levelstufe Z:	175 bar		

Setzt man die physikalischen Einstellwerte nun getrennt für das innere und das äußere Experiment in den Versuchsplan ein, so erhält man eine Abfolge der verschiedenen zu fahrenden Versuchseinstellungen:

Äußeres Experiment:

Versuchsreihe	Massetemp.	Werkzeugtemp.	Nachdruck
A1	260°C	60°C	250 bar
A2	260°C	60°C	100 bar
A3	260°C	30°C	250 bar
A4	260°C	30°C	100 bar
A5	200°C	60°C	250 bar
A6	200°C	60°C	100 bar
A7	200°C	30°C	250 bar
A8	200°C	30°C	100 bar

Inneres Experiment:

Versuchsreihe	Massetemp.	Werkzeugtemp.	Nachdruck
I1	240°C	50°C	200 bar
I2	240°C	50°C	150 bar
I3	240°C	40°C	200 bar
I4	240°C	40°C	150 bar
I5	220°C	50°C	200 bar
I6	220°C	50°C	150 bar
I7	220°C	40°C	200 bar
I8	220°C	40°C	150 bar

Zentralpunktversuch:

Versuchsreihe	Massetemp.	Werkzeugtemp.	Nachdruck
Z	230°C	45°C	175 bar

MESOS bietet die Möglichkeit des integrierten Experiments bei allen vollständigen und fraktionierten 2^k -Plänen an. Es ist Ihnen dabei freigestellt, welche Bestandteile eines integrierten Experiments sie nutzen möchten (mit oder ohne Zentralpunkt, etc.). Ebenso ist es möglich, nachträglich einen Teilplan hinzuzufügen, um, falls nötig, weitere Informationen über das Verhalten des Prozesses in die Auswertung mit einzubeziehen (z.B. Start mit dem äußeren Experiment und dem Zentralpunkt und Hinzunahme des inneren Experiments bei Auftreten von Nichtlinearitäten). Die Angabe über die gewünschten Teilpläne geschieht zusammen mit der Festlegung des Versuchsplantyps im Menüpunkt "Datei" - "Experimentdaten".

5.7 Allgemeine Tipps zur Festlegung des Versuchsplans

Der Assistent versucht, durch gezielte Fragen den für Ihren Zweck vermutlich sinnvollsten Versuchsumfang herauszufinden. Seine Schlussfolgerungen basieren dabei auf den Auswertungen einer Diplomarbeit, in der über 40 Experimente dahingehend untersucht wurden, mit welchem minimalen Aufwand (Anzahl der Versuchsreihen, vermessene Teile pro Reihe, etc.) das Ergebnis erreichbar gewesen wäre.

Der nach statistischen Gesichtspunkten "beste" Versuchsplan muss dabei nicht mühevoll ermittelt werden, sondern ist grundsätzlich bekannt. Logischerweise ist dies immer der Plan mit der größten Informationsmenge, also den meisten Levelstellungen und Versuchsreihen. In der praktischen Anwendung beim Spritzgießer ist dagegen üblicherweise der Versuchsplan mit dem besten Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen gefragt, also der Plan, der die gewünschten Prozessinformationen mit dem geringsten Aufwand liefert. Dazu folgende Tips:

- ❑ Vermeiden Sie Maximalforderungen. Ein Versuchsplan, der alle möglichen Auswertungen erlaubt, führt meist zu einem sehr hohen Versuchs- und Messaufwand. Beschränken Sie sich daher lieber auf die wirklich für Sie wichtigen Informationen über den Prozess.
- ❑ Neben Schwankungen in den Materialeigenschaften bestimmt vor allem auch die Wiederholgenauigkeit der Spritzgießmaschine (Genauigkeit der Regelung, Verschleißzustand, Ausschöpfung der Grenzen der Maschine hinsichtlich Einspritzgeschwindigkeit, Schussvolumen, Zuhaltkraft, etc.) in Verbindung mit dem Werkzeug und Material die Qualitätsschwankungen von Zyklus zu Zyklus. Eine sinnvolle Nutzung der Streuungsoptimierung ist daher nur möglich, wenn die Versuche auf der späteren Produktionsmaschine oder zumindest einer gleichen Technikumsmaschine gefahren werden. Ist dies nicht möglich oder wird das Werkzeug auf wechselnden Maschinen eingesetzt, macht der höhere Versuchsaufwand zur Streuungsoptimierung meist keinen Sinn.
- ❑ Gleiches gilt auch bei schwer zu messenden oder gar nur subjektiv beurteilbaren Qualitätsmerkmalen wie Eigenspannungen, Farbschlieren, etc. Die Auflösung der Messung reicht in diesen Fällen meist gar nicht aus, um die geringen Änderungen in den Qualitätsschwankungen von Versuchsreihe zu Versuchsreihe zu erkennen.
- ❑ Werkzeugtemperaturen und andere Einstellgrößen lassen sich mitunter nur mit einer begrenzten Genauigkeit einstellen und konstant halten. Bei einem kleinen Prozessfenster macht es daher meist keinen Sinn, den Variationsbereich eines Parameters in 4 (äußeres und inneres Experiment) oder gar 5 (zusätzlicher Zentralpunkt) Levelstufen aufzuteilen. Bei einer Temperaturgenauigkeit von z.B. $\pm 3^\circ\text{C}$ und nur 5°C Unterschied zwischen den Leveln könnte dies im Extremfall sogar bedeuten, dass die "höhere" Levelstufe in der Realität aufgrund der Ungenauigkeit eine um 1°C niedrigere Temperatur aufweist als die "niedrigere" Levelstufe. Die aus den Ergebnissen herausgelesenen Informationen über das Prozessverhalten würden dann mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Fehldeutungen führen.
- ❑ Ebenfalls wenig Sinn machen Pläne mit vielen eng abgestuften Levelstufen bei Qualitätsmerkmalen, die nur sehr wenig auf die Maschineneinstellung reagieren oder ungenau zu messen sind. Dazu gehören insbesondere attributive Merkmale wie Oberflächenglanz, Farbe, Stärke der Einfallstellen, Abbildung der Narbung, etc., aber auch beispielsweise mechanische Kennwerte wie die Zugfestigkeit oder Schlagzähigkeit.
- ❑ Falls hauptsächlich qualitative Aussagen benötigt werden (z.B. auf welche Einflussgrößen reagiert ein Merkmal stark oder schwach), reicht meist ein einzelner 2^k -Plan aus. Dies gilt oft auch dann, wenn bereits leichte Nichtlinearitäten im Prozessverhalten auftreten sollten.
- ❑ Versuchen Sie, die Zahl der in den Versuchsplan aufgenommenen Einflussgrößen gering zu halten. Falls Unsicherheiten bei einzelnen Parametern bestehen, kann es bei leicht und schnell zu messenden Merkmalen bereits sinnvoll sein, in einem Vorversuch zwei stark unterschiedliche Einstellungen dieser Größe zu fahren, um ihre Wichtigkeit für die (spritzfrisch gemessenen) Qualitätsmerkmale zu überprüfen.

- Falls Einspritz- und/oder Nachdruckprofile verwendet und zusammen mit anderen Parametern optimiert werden sollen, ist es sinnvoller, nur die bestimmende Größe aus dem Profil als Parameter in den Plan aufzunehmen. Dies kann z.B. die Einspritzgeschwindigkeit sein, mit der der größte Teil des Formteils gefüllt wird oder das Niveau der ersten und längsten Nachdruckstufe. Die anderen Stufen werden dann meist so verändert, dass im Plan das Niveau des gesamten Profils nach oben oder unten verschoben oder das Profil gleichmäßig gestaucht oder gedehnt wird. Sobald der günstigste Wert für die bestimmende Größe des Profils durch die Versuchsauswertung feststeht, kann dann die restliche Feinoptimierung des Profils für die am optimalen Betriebspunkt herrschenden Bedingungen (Temperaturen, etc.) an der Spritzgießmaschine durchgeführt werden.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Experimentdaten"

"Datei" - "Versuchsplan"

"Versuchsplan drucken"

5.8 Festlegung der Einflussgrößen

In die Untersuchung sollten alle Maschineneinstellgrößen (Parameter) aufgenommen werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf den absoluten Wert oder die Streuung der Qualitätsmerkmale aufweisen. Bei vielen Formteilen handelt es sich hierbei um Massetemperatur, Werkzeugtemperatur und Nachdruckhöhe. Je nach Art der Qualitätsmerkmale können hierzu weitere Größen kommen (z.B. Einspritzgeschwindigkeit bei Eigenspannungen oder Oberflächenmerkmalen), oder die Werkzeugtemperatur wird bei Verzugsproblemen getrennt für die Düsen- und Auswurfweise untersucht.

Falls entsprechende Sensoren vorhanden sind, ist es sinnvoll, die tatsächlichen Werte als veränderliche Einstellgrößen einzusetzen (z.B. gemessene Werkzeugwandtemperatur). Ist dies nicht möglich, ist der an der Maschine einstellbare Wert zu verwenden (z.B. Vorlauftemperatur am Temperiergerät). Es bleibt dann zu hoffen, daß der Fehler zwischen Einstellwert und tatsächlicher Größe über den gesamten Versuchsplan hinweg in etwa gleich bleibt.

Kann die Zahl der vermutlichen Einflussgrößen nicht durch Erfahrung oder aufgrund von Hinweisen in der Literatur auf maximal fünf eingegrenzt werden, kommt die Variables Search-Methode nach Shainin zur Anwendung. Hierbei werden die vermutlich unwichtigen Parameter zu einer Gruppe zusammengefasst und in zwei Versuchen variiert. Im ersten Versuch werden alle Parameter der Gruppe auf eine Stufe eingestellt, die sich vermutlich ungünstig auf die Qualität auswirkt. Im zweiten Versuch werden schließlich die günstigen Stufen realisiert und die Ergebnisse verglichen.

Zeigt sich kein signifikanter Unterschied, war die anfängliche Vermutung ("die Parameter in dieser Gruppe sind unwichtig") korrekt. Diese Parameter werden dann nicht in den Versuchsplan aufgenommen. Treten dagegen Unterschiede auf, hat mindestens einer der betrachteten Parameter einen deutlichen Qualitätseinfluss. Um ihn weiter einzugrenzen, wird die Gruppe in zwei Teilgruppen zerlegt und erneut die vermutlich günstigste und ungünstigste Einstellkombination gefahren. Diese Gruppenteilung wird so lange wiederholt, bis der verantwortliche Parameter gefunden ist.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Experimentdaten"

"Datei" - "Versuchsplan"

5.9 Festlegung der Einstellstufen

In dem Versuchsplan wird jeder Maschinenparameter auf mehreren Einstellstufen (Level bzw. Levelstufen) variiert. Die beiden Extremstufen (höchste und niedrigste Stufe des äußeren Experiments) sollten dabei die verarbeitungstechnisch möglichen Grenzen abstecken. Diese Empfehlung geht hauptsächlich auf die Tatsache zurück, dass starke Änderungen der Maschineneinstellung üblicherweise auch starke Qualitätsänderungen hervorrufen, die leichter und sicherer messbar sind. Die Levelstufen können jedoch prinzipiell völlig frei auch nach anderen Gesichtspunkten gewählt werden (z.B. Verstellung der Parameter um einen bestimmten Wert nach oben und unten, ausgehend von der momentanen Produktionseinstellung). Die maximal möglichen Grenzen lassen sich bei den üblichen Parametern wie folgt festlegen:

- Masstemperatur: Vom Rohstoffhersteller angegebener Verarbeitungsbereich, z.B. 200 bis 260°C
- Werkzeugtemperatur: analog
- Nachdruck: obere Grenze: keine Schwimmhäute bei der höchsten Masse- und Werkzeugtemperatur; untere Grenze: gefülltes Teil ohne extreme Einfallstellen

Da im Versuchsplan auch die extremsten Kombinationen auftreten, ist es evtl. notwendig, diese Bereiche noch etwas einzuschränken, um keine Füll- oder Entformungsprobleme zu bekommen. Die Einstellstufen müssen dazu notfalls durch Vorversuche soweit abgesichert werden, dass der gesamte Versuchsplan realisiert werden kann. Eine nachträglich notwendige Veränderung bzw. Anpassung der Stufen bei einzelnen Versuchsreihen verfälscht das Ergebnis und sollte daher auf alle Fälle vermieden werden.

Alle sonstigen, nicht im Versuchsplan variierten Einstellgrößen werden an die jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst (z.B. Umschaltung auf Nachdruck bei dem immer gleichen Füllgrad) oder einfach konstant gehalten. Der Dosierweg sollte beispielsweise so gewählt werden, dass bei den höchsten Temperaturen und dem höchsten Nachdruck noch ein gewisses Restmassepolster verbleibt. Die Nachdruckzeit sollte ebenfalls bei dieser Extremeinstellung bestimmt werden unter der Bedingung, dass der Siegelpunkt erreicht wird. Die gefundenen Einstellungen werden dann während des gesamten Versuchsplans auf diesen Werten belassen. Erst dann, wenn der optimale Betriebspunkt durch die Auswertung gefunden wurde, werden diese Größen an die Randbedingungen der zukünftigen Produktionseinstellung angepasst (evtl. kleinerer Dosierweg, kürzere Nachdruckzeit).

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Versuchsplan"

5.10 Festlegung der Qualitätsmerkmale

Die Erfahrungen zeigen, dass zur Optimierung der Formteilqualität längst nicht alle Maße ausgewertet werden müssen, die in der Zeichnung toleriert sind. Statt dessen sollten nur solche Maße verwendet werden, die für die Funktion besonders kritisch sind oder eine sehr enge Tolerierung aufweisen. Aufgrund gegenseitiger Abhängigkeiten und größerer Toleranzbereiche bei den anderen Maßen ist dann davon auszugehen, dass die optimale Gesamteinstellung auch für die übrigen Maße einen guten Kompromiss darstellt.

Neben den rein maßlichen Merkmalen ist vielfach auch das Gewicht eine sinnvoll einzusetzende Größe. Neben der evtl. interessierenden Korrelation zwischen Gewicht und einzelnen Maßen kann das Gewicht durch seine genaue und reproduzierbare Messbarkeit auch bei der Herausarbeitung der optimalen Maschineneinstellung helfen. Bestehen z.B. beim Längen- und Breitenmaß eines Formteils unterschiedliche Tendenzen hinsichtlich der robusten Einstellung (unterschiedliche optimale Maschineneinstellungen bei beiden Merkmalen), dann zeigt sich oft an den Ergebnissen des Gewichts, bei welchem der beiden Maße evtl. Fehler zu suchen sind (z.B. Tippfehler bei der Eingabe der Messwerte, falsche Zuordnung der Messwerte zu den Versuchseinstellungen).

Bei attributiven (beschreibenden) Merkmalen wie Oberflächenglanz, Farbschlieren, Einfallstellen, etc. sollte versucht werden, ob diese quantitativ erfasst werden können (z.B. Ausmessen der Fläche der Farbschlieren, Tiefe der Einfallstellen), evtl. auch durch Einsatz von leichter messbaren Hilfsmerkmalen. Ist beispielsweise bekannt, dass die Stärke der Einfallstellen mit dem Formteilgewicht korreliert, dann könnte dieses eingesetzt werden, da es messtechnisch besser zu ermitteln ist. Ist keine objektive Messung möglich, sollte die subjektive Beurteilung der Mermalsausprägung durch Referenzteile erleichtert werden, die jeweils ein typisches Beispiel für eine Beurteilungsstufe (z.B. 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = mittel, 4 = schlecht oder Schulnotensystem) darstellen. Die Zahl der Beurteilungsstufen sollte dabei nicht zu klein sein, da einzelne Auswertungen (z.B. Ausreißertest, Berechnung der Prozessmodelle) eigentlich kontinuierliche, normalverteilte Messwerte voraussetzen. Erfahrungsgemäß erfüllt jedoch z.B. die Modellberechnung trotz Verletzung dieser Voraussetzung noch ihre Hauptaufgaben, wenn mindestens 4 oder besser 5 Beurteilungsstufen verwendet wurden (die Prozessmodelle sollten in diesen Fällen jedoch unbedingt auf Plausibilität geprüft werden; zudem muss mit einer schlechteren Vorhersagegenauigkeit gerechnet werden).

Generell sollte bei den einzelnen Merkmalen untersucht werden, wie reproduzierbar das eingesetzte Messsystem ist (Messprinzip, Fixierung des Formteils in der Messlehre, etc.). Im einfachsten Fall wird dazu ein einziges Formteil 10 bis 50 mal hintereinander vermessen. Die dabei auftretenden Schwankungen des Messwerts geben einen Anhaltspunkt für die Wiederholgenauigkeit des gesamten Messaufbaus. Diese muss auf jeden Fall kleiner sein als die Merkmalsveränderung von Versuchseinstellung zu Versuchseinstellung. Soll zudem eine Aussage über die Veränderung der Qualitätsschwankungen in Abhängigkeit von der Maschineneinstellung getroffen werden, müssen auch die geringen Veränderungen von Schuss zu Schuss zuverlässig erfasst werden können.

Die Anzahl der bei einem Merkmal zu vermessenden Teile ist hauptsächlich davon abhängig, ob die Möglichkeit der Streuungsoptimierung genutzt werden soll oder nicht. Da Streuung der Qualitätsmerkmale sehr stark auf Messungenauigkeiten und Ausreißer reagiert, ist zu ihrer genauen Ermittlung eine größere Zahl von Teilen nötig als bei einer reinen Mittelwertbetrachtung. Bei den bisher gelaufenen Optimierungen haben sich dabei 20 Teile pro Versuchsreihe gut bewährt, die Untersuchungen in der Diplomarbeit zur Aufwandsminimierung haben aber gezeigt, dass vielfach bereits mit 10 Teilen ein gutes Ergebnis zu erreichen ist.

Bei reiner Auswertung des Mittelwerts (z.B. Zentrierung des Prozesses auf die Sollwerte ohne Streuungsoptimierung, Abschätzung von nötigen Werkzeugänderungen, Bestimmung des Prozessfensters) kann die Teilezahl meist sogar bis auf 5 Teile pro Einstellung bzw. 5 Teile pro Einstellung und Merkmal bei zerstörenden Prüfungen reduziert werden. Dies gilt insbesondere für Merkmale, deren geringe Schwankungen bei einer konstanten Maschineneinstellung gar nicht quantifiziert werden können. Weitere Kriterien und Ratschläge hinsichtlich der Teilezahl gibt Ihnen auch der Assistent zur Wahl des Versuchsumfangs.

Als Ziele der Optimierung kennt MESOS neben der Sollwerterfüllung auch die allgemeine Minimierung oder Maximierung des Merkmalswertes. Letztere Kriterien sollten dann verwendet werden, wenn kein eigentlicher Sollwert existiert oder der denkbare Sollwert praktisch nicht erreichbar ist. Dies ist beispielsweise bei einem Gewicht der Fall, das minimiert werden soll. Würde hier der eigentlich unrealistische Sollwert 0 g angegeben, würde das Programm die Optimierung sehr stark auf das Gewicht ausrichten, da es erkennen würde, dass dieses Merkmal stärker als alle anderen vom gewünschten Sollwert abweicht. Wird dagegen das Optimierungsziel "Minimieren" gewählt, so ermittelt das Programm zunächst das geringste im Versuchsplan erzielte Formteilgewicht und verwendet dieses dann als sinnvolles und auch in der Praxis erreichbares Optimierungsziel für dieses Merkmal.

Eine weitere Möglichkeit zur Einflussnahme auf die Vorgehensweise des Programms bei der Kompromissfindung zwischen den Ergebnissen der Einzelmerkmale besteht in der Vergabe von Gewichtungsfaktoren. Mit diesen Faktoren kann bestimmt werden, wie stark jedes Merkmal in die Gesamtbeurteilung eingehen soll. Die Gewichtungsfaktoren müssen sich dabei nicht zu 100% ergänzen, entscheidend ist vielmehr das Verhältnis der Zahlen zueinander. Ein Merkmal mit Gewichtungsfaktor 50 würde demnach doppelt so stark bei der Optimierung berücksichtigt wie ein Merkmal mit dem Faktor 25. Ein Gewichtungsfaktor von 0 schließt das Merkmal schließlich vollkommen von der Kompromissfindung aus.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Formteilmerkmale"
"Extras" - "Einstellungen"

5.11 Durchführung der Versuche an der Maschine

Bei jeder Maschineneinstellung aus dem Versuchsplan wird nach Erreichung des thermischen Gleichgewichts der Spritzgießmaschine eine bestimmte Zahl von Teilen produziert und zuordenbar gekennzeichnet (z.B. Beschriftung A4.9 => äußeres Experiment, Versuchsreihe 4, Teil 9).

Um die Auswirkung systematischer Störeinflüsse von Außen (Veränderung der Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, etc.) auf die Ergebnisse möglichst gering zu halten, sollte die Reihenfolge, in der die Versuchsreihen tatsächlich abgefahren werden, zufällig gewählt werden. Dieser allgemeinen Forderung aus der Statistik steht die Tatsache gegenüber, dass im Bereich des Spritzgießens Einflussgrößen existieren, die nur unter großem zeitlichen Aufwand zu verstellen sind. Hierzu gehören typischerweise die Temperaturen, besonders aber die Massetemperatur. In der Praxis wird daher so verfahren, dass alle Versuchsreihen, bei der die Massetemperatur auf der gleichen Stufe steht, direkt hintereinander ausgeführt werden. Wurde der Versuchsplan bereits so aufgestellt, dass der am schwierigsten zu variierende Parameter in der ersten und der am leichtesten zu verändernde in der letzten Spalte steht, ist dies automatisch der Fall.

Eine wichtige Empfehlung bei der Versuchsdurchführung lautet, möglichst viele Randbedingungen (z.B. tatsächliche Abfolge und Uhrzeit der Versuchsreihen, Stellung der nicht im Versuchsplan variierten Einstellgrößen) und alle sonstigen Beobachtungen (z.B. Abweichungen von den eingestellten Temperaturen) aufzunotieren. Falls sich später herausstellt, dass einzelne Ergebnisse nicht in das Gesamtbild passen, können diese Notizen ein erster Anhaltspunkt bei der Ursachenforschung sein. Im Menüpunkt "Datei" - "Experimentdaten" wurde dazu ein Notizfeld geschaffen, das mehrere Seiten Text aufnehmen und mit den restlichen Daten speichern kann.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Datei" - "Experimentdaten"
"Datei" - "Versuchsplan"

5.12 Messung der Qualitätsmerkmale

Der Zeitpunkt der Messung nach der Produktion sollte so gewählt werden, dass sich die Eigenschaften des Formteils bis zur evtl. erfolgenden Wareneingangsprüfung des Kunden nicht mehr wesentlich verändern. Dies bedeutet, dass z.B. bei teilkristallinen Werkstoffen die Nachschwindung abgewartet werden sollte. Gleiches gilt auch für der Produktion nachgeschaltete Schritte wie Warmlagerung oder Konditionierung.

Da die Merkmalsmessung und Werteeingabe ein sehr zeitaufwendiger, aber auch fehlerträchtiger Schritt in der gesamten Prozessoptimierung sein kann, wurde MESOS mit umfangreichen Möglichkeiten zur Messwerterfassung ausgestattet:

- ❑ Tastatureingabe der einzelnen Teilmesswerte in ein Dialogfenster mit programmgesteuerter Abfolge der Messungen. Bei dieser Eingabeart besteht die Möglichkeit, bei hoher Gefahr von Fehlmessungen jedes Teil bis zu 5-mal zu messen mit anschließendem Ausreißertest. Falls im Menüpunkt "Extras" - "Einstellungen", Karteikarte "Messwerteingabe" die entsprechenden Optionen aktiviert wurden, teilt Ihnen das Programm zudem den Abschluss eines Teils, der gesamten Reihe, etc. durch Signaltöne oder gar Sprachausgabe mit, was bei Messungen ohne direkten Blickkontakt zum Monitor eine erhebliche Erleichterung darstellen kann.

- ❑ Einlesen der Werte von einem angeschlossenen Messgerät über die serielle Schnittstelle. Jedem Merkmal kann dazu im Menüpunkt "Datei" - "Formteilmerkmale" ein eigener, selbst definierbarer Schnittstellentreiber zugewiesen werden. Durch die Verwendung des gleichen Dialogfensters wie bei der ersten Eingabeart besteht auch hier die Möglichkeit der Mehrfachmessung mit Ausreißertest, usw. Ebenso können die Eingabe über Tastatur und serielle Schnittstelle beliebig kombiniert werden (z.B. Handeingabe des Gewichts und direktes Einlesen der Länge und Breite in einem Messdurchlauf).
- ❑ Tastatureingabe der extern, z.B. über ein Messgerät mit Speicher- und Statistikfunktion aus allen Teilen einer Versuchsreihe berechneten Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung.
- ❑ Die Fähigkeiten des zur Programmierung eingesetzten Tabellenmoduls machten es sinnvoll, die ursprünglich nur zur übersichtlichen Darstellung der fertig eingegebenen Werte gedachte Messwerttabelle um Editierfunktionen zu ergänzen. Neben einer alternativen Tastatureingabemöglichkeit für solche Merkmale, die nur einmal pro Teil gemessen werden, wurde damit auch die Übernahme von Messwerten aus anderen Programmen über die Windows-Zwischenablage ermöglicht. Ebenso können in Gegenrichtung die in MESOS markierten Werte an ein anderes Programm (z.B. Microsoft Excel) für spezielle Auswertungen (z.B. Berechnung eines Qualitätsmerkmals aus mehreren anderen über eine kompliziertere Formel, z.B. Unrundheit) oder Ergebnisgrafiken übergeben werden.
- ❑ Import der Einzelwerte oder der fertig berechneten Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung jeder Versuchsreihe aus einer lesbaren ASCII-Datei. Hierzu können in weiten Bereichen frei definierbare Importfilter mit Vorschaufunktion angelegt werden. Analog zum vorherigen Punkt ist zudem der umgekehrte Weg des Datenexports an andere Programme möglich.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Messwerte" - "Einzelwerteingabe"
"Messwerte" - "Mittelwerteingabe"
"Messwerte" - "Zusätzliche Versuchspunkte"
"Messwerte" - "Datenimport"
"Messwerte" - "Datenexport"
"Messwerte" - "Messwertaustausch"
"Messwerte" - "Messwerttabelle"
"Extras" - "Schnittstellentreiber anlegen/editieren"
"Extras" - "Importfilter anlegen/editieren"
"Extras" - "Exportfilter anlegen/editieren"
"Extras" - "Einstellungen"

5.13 Kennwertberechnung mit Ausreißertest

Der erste Schritt nach der Messwerteingabe sollte darin bestehen, die Werte auf offensichtlich falsche (z.B. Tippfehler, vergessenes Komma) oder nicht für die Versuchseinstellung repräsentative Ergebnisse (z.B. Teil während der Lagerung unter Zwang verformt, anhaftender Schmutz oder schlecht abgerissener Anguss bei der Gewichtsmessung) zu untersuchen. In der Statistik wurden hierzu sogenannte Ausreißertests entwickelt, die auf einer theoretisch abgesicherten Basis vermutliche Fehlmessungen erkennen können. Solche Messwerte sollten dann bei den weiteren Auswertungen nicht mehr berücksichtigt werden.

Ein einfacher Test, der zudem bereits bei geringen Stichprobenumfängen (Teile pro Maschineneinstellung) angewendet werden kann, ist der Ausreißertest nach Grubbs. Dazu werden zunächst getrennt für jede Versuchsreihe Mittelwert und Standardabweichung aus allen Teilmesswerten bei einer Maschineneinstellung gebildet. Anschließend wird bei jedem Einzelwert ermittelt, das Wievielfache der Standardabweichung er vom Mittelwert entfernt liegt. Liegt dieser Faktor (Vergleichswert) über einem bestimmten Schwellenwert (Ausreißerkriterium), wird der Messwert als Ausreißer betrachtet und eliminiert, d.h. von allen weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Das Ausreißerkriterium kann dazu in Abhängigkeit von der Stichprobengröße n (Zahl der Teile pro Versuchsreihe) und der Wahrscheinlichkeit P , mit der ein entfernter Wert tatsächlich einen Ausreißer darstellt, entsprechenden Tabellen entnommen werden (Bild 11).

Da einzelne starke Ausreißer (z.B. vergessenes Komma) den Mittelwert und die Standardabweichung stark verzerren können, werden Fehlmessungen im eigentlichen Sinn (Teil leicht deformiert, störender Grat an der Messstelle, etc.) im ersten Durchlauf oft nicht erkannt. Es ist daher üblich, den Ausreißertest zyklisch mit den jeweils verbliebenen Messwerten durchzuführen, bis keine auffälligen Messwerte mehr gefunden werden.

N	3	4	5	6	8	10	14	20	25
P=90%	1.148	1.425	1.602	1.729	1.909	2.036	2.213	2.385	2.486
P=95%	1.153	1.463	1.672	1.822	2.032	2.176	2.371	2.557	2.663
P=99%	1.155	1.492	1.749	1.944	2.221	2.410	2.659	2.884	3.009

Bild 11: Ausreißerkriterien für verschiedene Stichprobengrößen n und Aussagewahrscheinlichkeiten P

Durch bereits eliminierte Ausreißer, fehlende Messwerte oder unterschiedliche vermessene Teilezahlen bei den Merkmalen kann die die Zahl der in den Ausreißertest einzubeziehenden Messwerte von Versuchsreihe zu Versuchsreihe deutlich schwanken. MESOS erlaubt daher alternativ die Festlegung des Ausreißerkriteriums über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein entfernter Wert einen Ausreißer darstellt. Das Programm ermittelt dann über eine intern abgespeicherte Tabelle das für die aktuelle Teilezahl richtige Ausreißerkriterium. Zudem kann bei stark von der Normalverteilung abweichenden Messwerten der Ausreißertest auch übersprungen werden.

Falls unlogische Ergebnisse auftreten oder die Tendenzen zwischen den einzelnen Merkmalen nicht zusammenpassen, ist es häufig sinnvoll, durch Variation des Ausreißerkriteriums oder der Aussagewahrscheinlichkeit die Zahl der erkannten Ausreißer zu verändern. Falls dies zu einheitlicheren Ergebnissen führt, kann davon ausgegangen werden, dass bisher unentdeckte Ausreißer oder fälschlicherweise gestrichene Werte die Auswertung verzerrt haben. Damit beliebig viele Ausreißertests möglich sind, speichert MESOS die ursprünglich eingegebenen Messwerte (Stammdaten) und die verbliebenen Messwerte nach dem Ausreißertest (korrigierte Daten) in getrennten Dateien ab. Auf den korrigierten Daten basieren dann grundsätzlich alle weiteren Berechnungen.

Nach dem letzten Testdurchlauf werden aus den verbliebenen Messwerten die statistischen Kennwerte der ganzen Versuchsreihen berechnet und abgespeichert. Neben dem Mittelwert, der Standardabweichung und der Varianz (Quadrat der Standardabweichung) wird dabei ein weiterer Streuungskennwert, das sogenannte Signal/Geräusch-Verhältnis oder kurz S/G-Verhältnis, ermittelt. Diese von dem japanischen Versuchsmethodiker Taguchi aus der Elektrotechnik entlehnte Größe beschreibt das Verhältnis von Nutzsignal (Merkmalsmittelwert \bar{y}) zu Störsignal (Merkmalsstreuung s) nach folgender Formel:

$$S / G = 10 \cdot \text{LOG} \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad [\text{dB}]$$

Durch die Quadrierung und Logarithmierung fallen größere Qualitätsschwankungen überproportional stärker ins Gewicht, was der Philosophie Taguchis einer möglichst schwankungsarmen, robusten Produktion entspricht. Gegenüber der Varianz oder Standardabweichung bietet das S/G-Verhältnis den Vorteil, dass es unabhängig von der Einheit des betrachteten Merkmals ist. Dadurch können die Schwankungen verschiedener Merkmale direkt miteinander verglichen werden. Andererseits reagiert das S/G-Verhältnis nicht nur auf Veränderungen der Streuung, da der Merkmalsmittelwert der Versuchsreihe ebenfalls in die Formel eingeht. Das S/G-Verhältnis wird daher nicht ausschließlich, sondern nur zusammen mit den klassischen Streuungskennwerten Standardabweichung und Varianz im Programm eingesetzt.

Aus den Ergebnissen der Versuchsreihen lassen sich die Einflüsse der untersuchten Parameter noch nicht direkt ablesen. Grund dafür ist die Tatsache, dass die Parameter im Versuchsplan alle gleichzeitig variiert werden, die Auswirkungen eines Parameters also nur in Verbindung mit anderen Parametern auftreten. Zur Isolation des Einflusses eines einzelnen Parameters bedient

man sich daher der Effektberechnung, die vom Programm automatisch und nach Außen hin unsichtbar direkt im Anschluss an den Ausreißertest durchgeführt wird.

Der Effekt eines Parameters ist als die Differenz aus der mittleren Antwort der Versuchsreihen, bei der dieser Parameter auf der hohen Stufe (+) stand und der mittleren Antwort der Versuchsreihen, bei denen er auf der niedrigen Stufe (-) stand, definiert. Somit ist er ein Maß für die Richtung und Stärke des Einflusses eines Parameters auf das Qualitätsmerkmal. Für ein konkretes Beispiel würde dies wie folgt aussehen:

Versuchsreihe	A	B	C	Kennwert
1	+	+	+	Y ₁
2	+	+	-	Y ₂
3	+	-	+	Y ₃
4	+	-	-	Y ₄
5	-	+	+	Y ₅
6	-	+	-	Y ₆
7	-	-	+	Y ₇
8	-	-	-	Y ₈

$$\text{Effekt Parameter B} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_5 + Y_6}{4} - \frac{Y_3 + Y_4 + Y_7 + Y_8}{4}$$

Als Versuchsantwort kann jede Kenngröße aufgefasst werden. Somit lässt sich der Effekt jedes untersuchten Parameters auf den Merkmalsmittelwert und die Merkmalsstreuung (ausgedrückt durch die Kennwerte Varianz und S/G-Verhältnis) berechnen. Darüber hinaus kann die Berechnung der Effekte auch in analoger Weise auf die im Kapitel "[Faktorielle Versuchspläne](#)" erwähnten Spalten der Wechselwirkungen ausgedehnt werden. Ergeben sich hierbei deutliche Effekte, so liegt eine Wechselwirkung zwischen den jeweils beteiligten Einflussgrößen vor.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

- "Numerische Auswertung" - "Kennwertberechnung mit Ausreißertest"
- "Numerische Auswertung" - "Anzeige Versuchsreihenkennwerte"
- "Numerische Auswertung" - "Anzeige Effekte"
- "Numerische Auswertung" - "Anzeige Extremwerte"

5.14 Berechnung der Prozessmodelle

Die statistischen Prozessmodelle sind notwendig, um Vorhersagen über den zu erwartenden Merkmalsmittelwert bei bisher nicht im Versuch gefahrenen Maschineneinstellungen zu treffen. Über die Methode der Regressionsrechnung wird dabei durch Auswertung der Information, welche Maschineneinstellung zu welchem Merkmalsmittelwert geführt hat, eine statistische Näherungsformel berechnet mit den Parameterstellungen als Eingangs- und dem zu erwartenden Merkmalswert als Ausgangsgröße. Im Gegensatz zu einem physikalischen Naturgesetz sind diese Modelle allerdings von einer begrenzten Genauigkeit und auch nur innerhalb des Variationsbereichs der Parameter gültig, in dem sie aufgestellt wurden. Trotzdem sind diese Prozessmodelle eine wichtige Hilfe bei der Abschätzung des Prozessfensters, der Zentrierung auf die Sollwerte, etc., da hier die (vorausberechneten) Ergebnisse bei beliebigen Zwischenstellungen und Kombinationen der Maschinenparameter benötigt werden.

Um die Qualitätsvorhersage bis hin zu prognostizierten Ausschussraten oder cp- und cpk-Werten komplett zu machen, würde nun noch ein zweites Prozessmodell fehlen, das den Zusammenhang zwischen der Maschineneinstellung und der Standardabweichung oder Varianz eines Merkmals beschreibt. Alle tiefergehenden Untersuchungen haben bisher jedoch gezeigt, dass dieser Zusammenhang wesentlich komplexer ist als die Abhängigkeit des Mittelwerts von den Parametern. Die geringe Informationsmenge (Anzahl der Maschineneinstellungen) eines normalen, vom Aufwand her vertretbaren Versuchsplans reicht daher für die Aufstellung eines quantitativ verwertbaren Streuungsmodells leider nicht aus.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Numerische Auswertung" - "Berechnung der Prozessmodelle"
"Numerische Auswertung" - "Signifikanztest Prozessmodell"

5.15 Signifikanztests

Zieht man mehrere Stichproben aus einer gleichmäßig verlaufenden Produktion, so unterscheiden sich diese bereits in Mittelwert und Streuung. Hieraus folgt, dass nicht jede Veränderung des Qualitätsmerkmals (Effekt) auf die von Versuchsreihe zu Versuchsreihe geänderte Maschineneinstellung zurückgeführt werden kann. Beim Mittelwerteffekt lässt sich hierzu aus der mehrfachen Realisierung einer Versuchseinstellung nach zwischenzeitlichem Verstellen der Maschine (z.B. drei Zentralpunktversuche) der sog. Grenzeffekt berechnen. Alle Mittelwerteffekte oberhalb des Grenzeffekts sind mit der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit signifikant, d.h. auf die Veränderung der Parameter zurückzuführen.

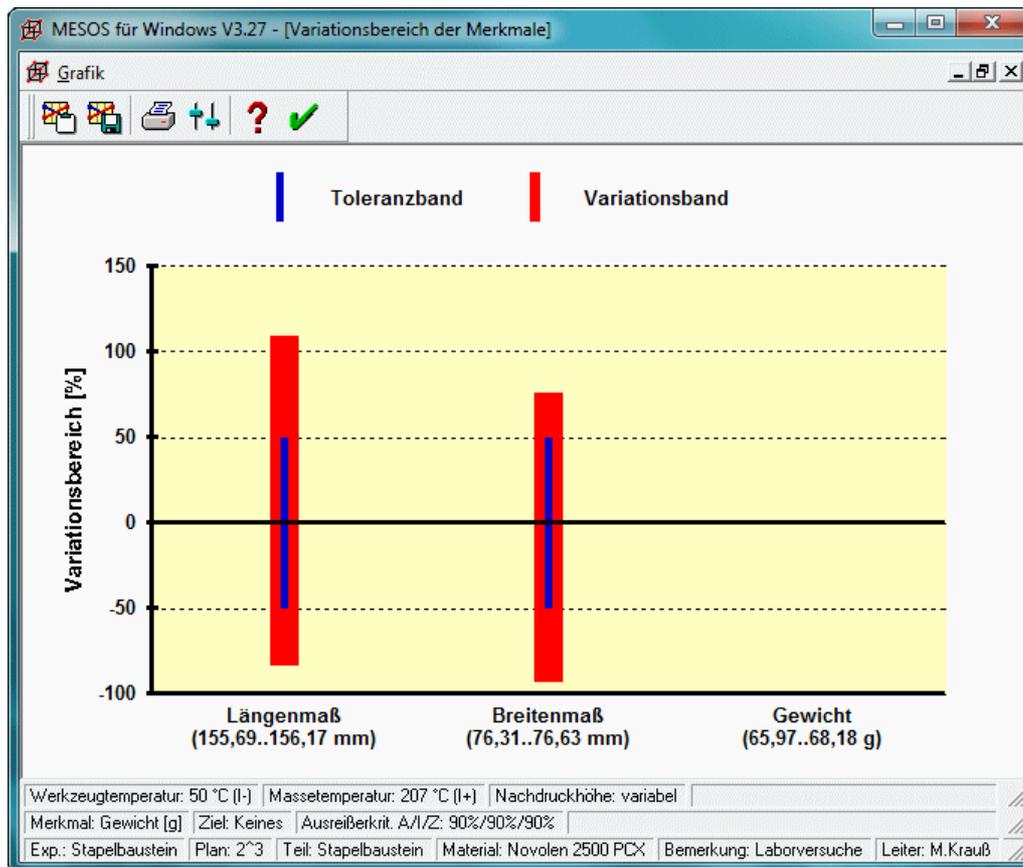
Für die Kennwerte Varianz und S/G-Verhältnis existiert kein analoger Test, jedoch kann über den sog. "F-Test für Varianzen" überprüft werden, ob sich die Varianzen zweier Versuchsreihen signifikant voneinander unterscheiden. Vergleicht man zwei Reihen, die sich nur durch die Einstellung eines einzelnen Parameters unterscheiden, kann auch der Einfluss der Parameter auf die Qualitätsschwankungen statistisch überprüft werden.

Da die obigen Tests entweder zusätzliche Informationen benötigen, die oft nicht vorhanden sind (Mehrfachrealisierung einer Versuchsreihe) oder nicht direkt die gewünschte Aussage liefern (Vergleich zweier Reihen anstatt einer Aussage über den Effekt), wurde im Programm der zusätzliche Menüpunkt "Numerische Auswertung" - "Beurteilung der Versuchsergebnisse" geschaffen. In diesem wird versucht, über eine Kombination aus leicht abgewandelten Tests (z.B. werden nicht alle Voraussetzungen für die Anwendung eines bestimmten hilfreichen Tests erfüllt) und Erfahrungswerten eine Abschätzung zu treffen, welche beobachteten Effekte vermutlich verlässlich sind und ausgewertet werden sollten. Auch wenn diese Abschätzung nicht die Genauigkeit und theoretische Absicherung eines echten statistischen Testverfahrens aufweist, wird Sie doch ihrer Aufgabe gerecht, zu verhindern, dass der Anwender falsche Schlüsse aus der Auswertung minimaler, messtechnisch eigentlich nicht erfassbarer Effekte zieht.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Numerische Auswertung" - "Signifikanztest Versuchsreihen"
"Numerische Auswertung" - "Signifikanztest Mittelwerte"
"Numerische Auswertung" - "Signifikanztest Prozessmodell"

5.16 Variationsbereich der Merkmale



Bei dieser Darstellung berechnet das Programm, in welchem Ausmaß sich der Mittelwert der Qualitätsmerkmale bei Variation eines oder mehrerer Maschinenparameter verändern lässt. Da die Einstellstufen des Versuchsplans im Regelfall bereits dem technisch möglichen oder sinnvollen Verarbeitungsbereich entsprechen, kann somit z.B. festgestellt werden, ob mit dem aktuellen Werkzeugmaß das Toleranzband des Formteilmaßes überhaupt erreicht werden kann. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die ausgewiesenen Kleinst- und Größtwerte auf den Prozessmodellen basieren und daher mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet sind.

Die Balken in der Grafik geben die größenmäßige Beeinflussbarkeit des jeweiligen Merkmals im Verhältnis zu seiner Toleranzbandbreite wieder. Der Bezug auf die Toleranzbandbreite wurde dabei notwendig, um die Ergebnisse mehrerer Merkmale in ein Diagramm mit gemeinsamer Skalierung eintragen zu können. Reagiert ein Merkmal sehr stark auf die variierten Größen, so ist dies ein Zeichen, dass diese Größen bei der späteren Produktion sehr genau eingestellt und auch kontrolliert werden sollten.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Variationsbereich der Merkmale"

5.17 Effekte der Parameter

Wie bereits erklärt, ist der Effekt ein Maß für die Richtung und Stärke des Einflusses eines Maschinenparameters auf Mittelwert oder Streuung eines Qualitätsmerkmals. Die Formel des Effekts kann dabei auch grafisch dargestellt werden (Bild 12). Der eigentliche Zahlenwert des Effekts entspricht dann der Steigung der Geraden.

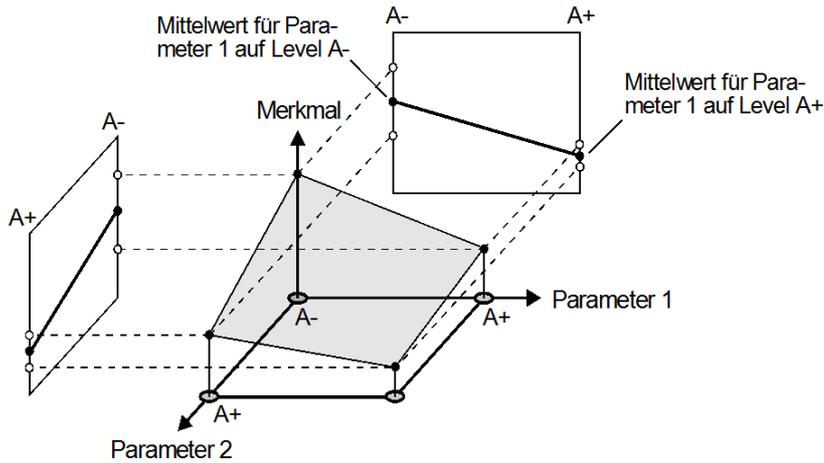


Bild 12: Grafische Erklärung des Effektbegriffs

Um die getrennt aufgestellten und bisher auch getrennt ausgewerteten Teilpläne eines integrierten Experiments zusammenzuführen, werden die Effekte des inneren und äußeren Experiments in eine gemeinsame Grafik eingetragen. Da die Randbedingungen (Levelstufen der jeweils nicht in der Einzelgrafik dargestellten Parameter) bei den Teilplänen jedoch unterschiedlich sind, wird für jeden Teilplan eine eigene Gerade dargestellt und, falls vorhanden, auch der einzelne Zentralpunkt eingetragen (Bild 13).

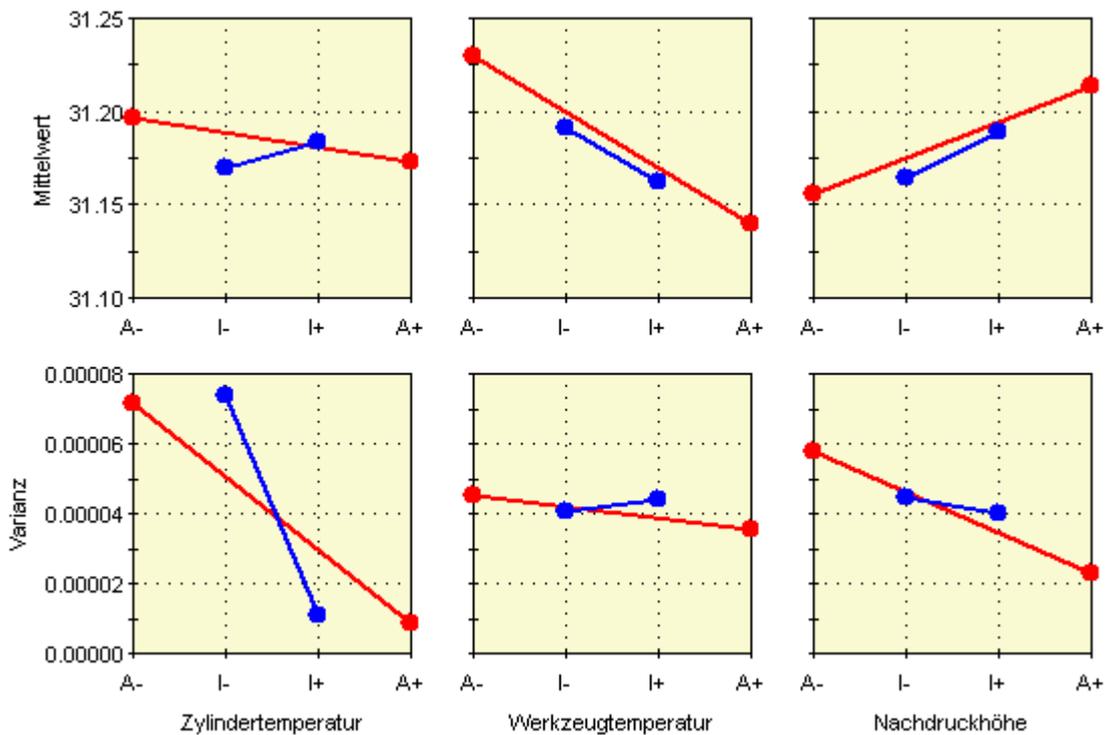


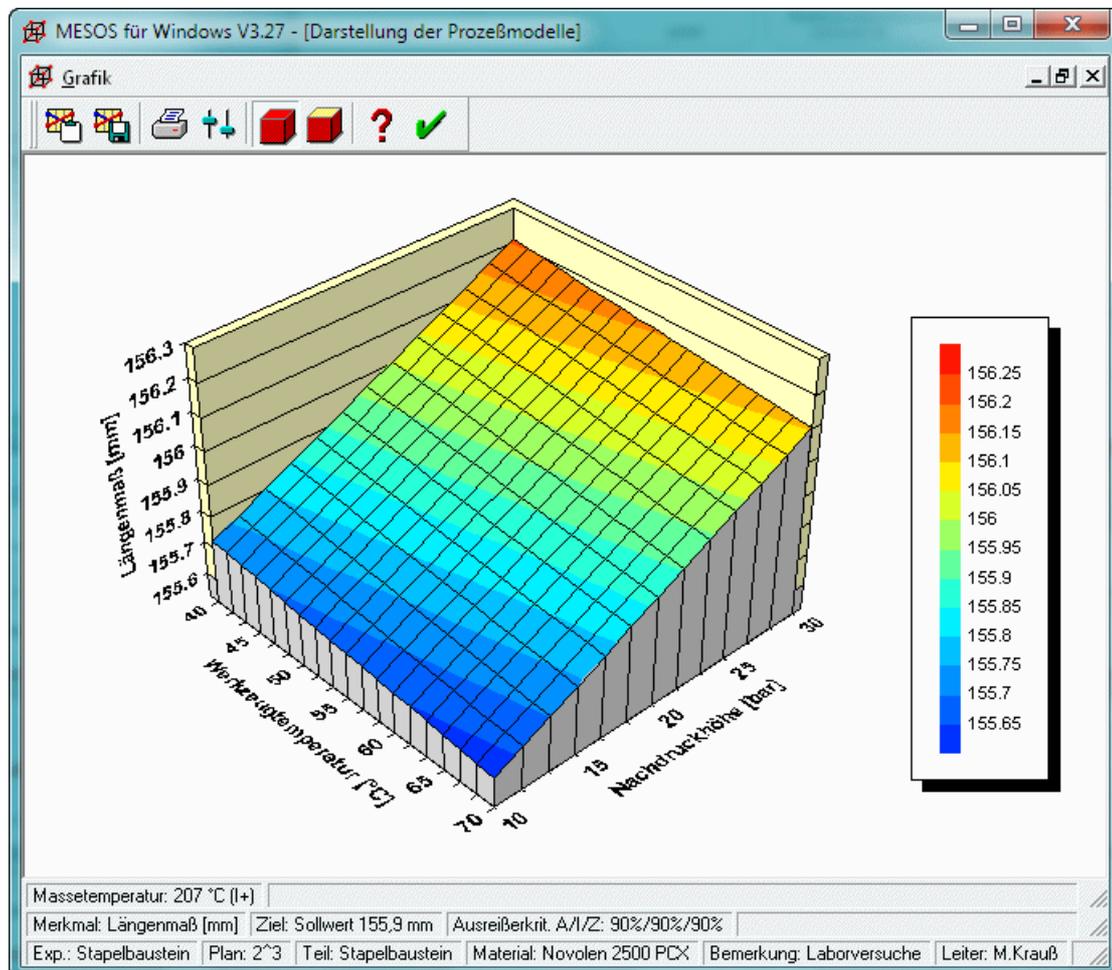
Bild 13: Beispiel einer grafischen Anzeige der Parametereffekte

Im Beispiel von Bild 13 reagiert der Mittelwert des Qualitätsmerkmals am stärksten auf die Werkzeugtemperatur, die Streuungen des Merkmals von Zyklus zu Zyklus hängen dagegen hauptsächlich von der Stellung der Zylindertemperatur ab. Diese Zusammenhänge sind zwar für den Mittelwert teilweise aus der Literatur bekannt, die genaue Stärke der Einflüsse hängt jedoch von vielen Randbedingungen (Wanddickenverhältnisse, Anschnittgröße, Geometrie des Teils, etc.) ab und muss somit teilespezifisch durch Versuche ermittelt werden. Dies gilt insbesondere für alle Aussagen, die die Streuung der Merkmale betreffen.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Effekte der Parameter"

5.18 Grafische Darstellung der Prozessmodelle



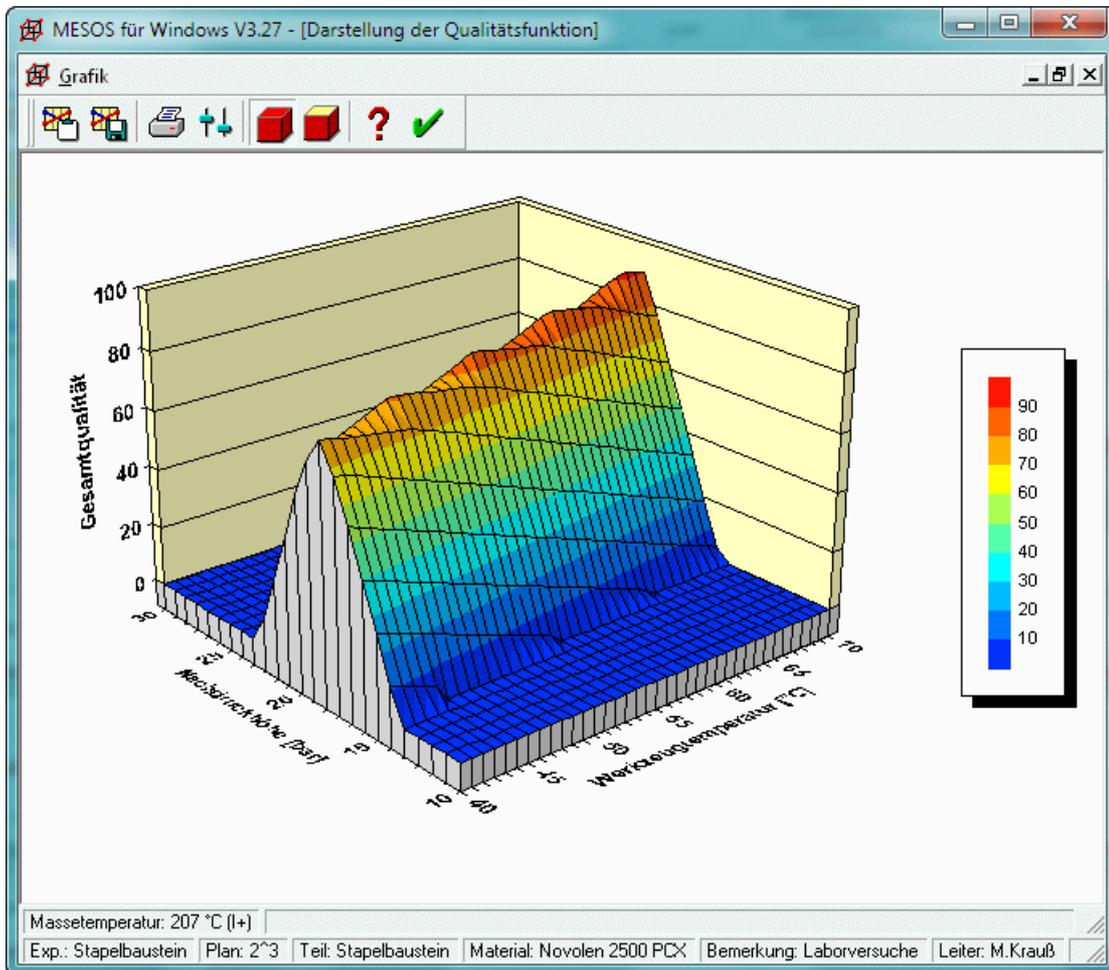
Die Formeln der Prozessmodelle beschreiben mathematisch eine üblicherweise mehrdimensionale Antwortfläche, die den Zusammenhang zwischen der Parameterstellung und dem Mittelwert des Qualitätsmerkmals grafisch darstellt. Da für die Anzeige der Antwortfläche nur drei Raumdimensionen zur Verfügung stehen, kann maximal die Abhängigkeit eines Merkmals von zwei Parametern gleichzeitig dargestellt werden. Die anderen Parameter müssen dann für den Zeitraum der Anzeige auf festen Werten verbleiben, die als Randbedingungen in der Fußzeile der Bildschirmdarstellung aufgeführt sind.

Eingesetzt wird diese Grafik, um ein detaillierteres Bild über die Zusammenhänge zwischen den untersuchten Einstellgrößen und dem Mittelwert des jeweiligen Qualitätsmerkmals zu gewinnen. Im Gegensatz zur Effektanzeige der Parameter, die hauptsächlich Aussagen über generelle Tendenzen und relative Vergleiche zwischen den Parametern erlaubt, kann hier der tatsächlich bei einer bestimmten Einstellkombination zu erwartende Merkmalsmittelwert mit einer bestimmten Genauigkeit abgelesen werden.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle"

5.19 Grafische Darstellung der Qualitätsfunktion



Während ein Prozessmodell nur die Abhängigkeit eines einzelnen Merkmals von der Maschineneinstellung zeigt, gibt die aus den Modellen abgeleitete Qualitätsfunktion den Zusammenhang für mehrere oder gar alle Merkmale gleichzeitig wieder. Dabei werden sowohl die Gewichtungen der Merkmale untereinander als auch die unterschiedlichen Optimierungsziele (Sollwerterfüllung, Minimierung, Maximierung) bei der Berechnung der Gesamtqualität berücksichtigt. Diese kann nur Werte zwischen 0 und 100 annehmen, wobei größere Werte eine höhere Qualität bedeuten. Als Erweiterung der Möglichkeiten bei den Prozessmodellen kann durch die Ausnutzung der Farbe als "vierte Dimension" auch die Abhängigkeit von drei Einflussgrößen gleichzeitig dargestellt werden. Eingesetzt wird diese Grafik hauptsächlich, um manuell die optimal zentrierte Maschineneinstellung zu ermitteln. Daneben kann jedoch auch z.B. die Größe des Verarbeitungsfensters abgelesen werden.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion"

"Extras" - "Einstellungen"

5.20 Prozessoptimierung

Die Festlegung der optimalen Maschineneinstellung erfolgt in drei Stufen:

1. Ermittlung der robusten Einstellung
2. Selektion des Zentrierungsparameters
3. Berechnung der zentriert-robusten Einstellung

Diese Stufen können wahlweise (halb)manuell vom Anwender durch Auswertung verschiedener Grafiken oder automatisch durch das Programm abgearbeitet werden. MESOS verwendet dabei intern die gleichen Regeln, die auch bei der manuellen Interpretation der Grafiken eingesetzt werden. Vorteile für die automatische Auswertung ergeben sich sicherlich dann, wenn ein Kompromiss für eine größere Zahl von Merkmalen gefunden werden muss und diese evtl. unterschiedlich gewichtet werden sollen. Trotzdem sollte auch in solchen Fällen nicht auf die Analyse der Grafiken verzichtet werden, da diese für das Verständnis vom Verhalten des Prozesses besonders wichtig sind. Zudem ist es immer möglich, dass weitere, dem Computer unbekannt Kriterien (z.B. Minimierung des Spritzdrucks wegen erwarteter Probleme mit der Zuhaltkraft) existieren, die eine vom Programmvorschlag abweichende Maschineneinstellung favorisieren.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

- "Grafische Auswertung" - "Effekte der Parameter"
- "Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle"
- "Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion"
- "Prozessoptimierung" - "Robuste Einstellung"
- "Prozessoptimierung" - "Zentrierungsparameter"
- "Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung"
- "Extras" - "Einstellungen"

5.21 Robuste Einstellung

Basis für den ersten beiden Schritte ist die Darstellung der Effekte der Parameter (Bild 14).

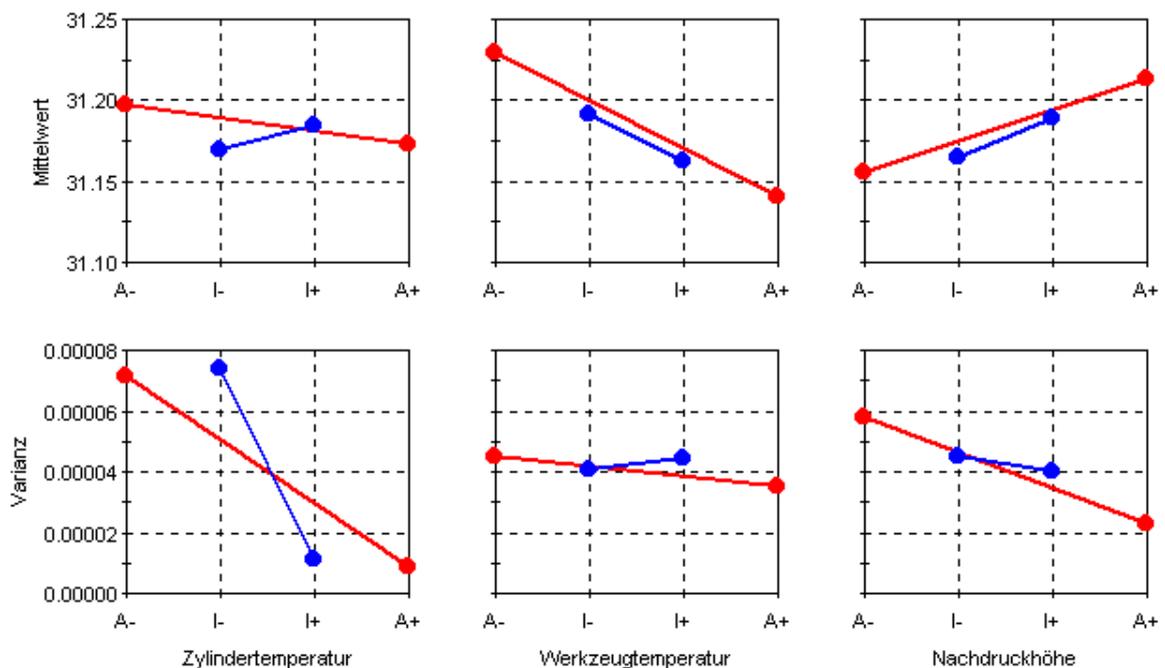


Bild 14: Grafische Effektanzeige für ein einzelnes Merkmal

Im ersten Schritt geht es darum, für jeden Parameter die robuste Levelstufe zu finden. Dazu werden die Darstellungen der Varianz-Effekte betrachtet. Zur Ermittlung der robusten Maschineneinstellung wird für jeden Parameter diejenige Levelstufe herausgesucht, bei der die niedrigste Varianz auftritt. In dem Beispiel von Bild 14 sind dies folgende Stufen:

Massetemperatur	:	A+	(ebenfalls gut: I+)
Werkzeugtemperatur	:	A+	(alle Levelstufen etwa gleich gut)
Nachdruck	:	A+	

Der Grund, weshalb sich diese Einstellstufen nicht nur durch eine geringe Streuung bei konstanten Prozessbedingungen, sondern auch durch eine geringe Reaktion auf äußere Störungen auszeichnen, liegt in der Art der Auswertung. Jeder durch die Geraden verbundene Punkt in der Grafik wurde berechnet als Mittelwert aus den Streuungen der Versuchsreihen, bei denen der Parameter auf dieser Levelstufe stand. Die anderen, nicht in dieser Einzelgrafik dargestellten Parameter standen dann bei diesen Versuchsreihen gemäß Versuchsplan immer wieder auf anderen Levelstufenkombinationen.

Wenn also z.B. bei der Nachdruckhöhe die Stufe A+ das niedrigste Niveau aufweist, dann deshalb, weil hier im Mittel die geringsten Streuungen aufgetreten sind, unabhängig von der Stellung der Werkzeug- und Massetemperatur. Die Veränderungen der Parameter Werkzeug- und Massetemperatur bei der hohen bzw. niedrigen Einstellung des Nachdrucks werden in diesem Fall also schon wie eine äußere Störung auf den Prozess gewertet (z.B. Ausfall eines Zylinderheizbandes).

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Effekte der Parameter"
"Prozessoptimierung" - "Robuste Einstellung"

5.22 Zentrierungsparameter

Da nicht zu erwarten ist, dass bei dieser optimal robusten Einstellung gleichzeitig die Sollwerte möglichst gut angenähert werden, muss in einem weiteren Schritt, ausgehend von dieser Einstellung, die Zentrierung erfolgen. Betrachtet man die Ergebnisse der drei Parameter in [Bild 14](#), so fällt auf, dass sich diese in Art und Höhe des Einflusses auf das Merkmal unterscheiden. Während die Werkzeugtemperatur vornehmlich den Absolutwert des Merkmals aber kaum dessen Schwankung beeinflusst, ist dies bei der Massetemperatur und dem Nachdruck genau umgekehrt. Diese beiden Gruppen von Parametern nennt man Signal- bzw. Zentrierungsparameter (hoher Einfluss auf den Absolutwert, geringer auf die Schwankung) sowie Steuerparameter (hoher Einfluss auf die Schwankung, geringer auf den Absolutwert).

Da es bei einem Zentrierungsparameter für die Qualitätsschwankung und damit die Robustheit weitgehend egal ist, auf welchem Einstellwert er sich befindet, eignet er sich, um die Mittelwerte der Qualitätsmerkmale möglichst nahe an die Sollwerte heranzuführen. Die anderen Parameter verbleiben dabei auf ihren zuvor gefundenen robusten Einstellwerten.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Effekte der Parameter"
"Prozessoptimierung" - "Zentrierungsparameter"

5.23 Prozesszentrierung

Für die Zentrierung ist der genaue Zusammenhang zwischen der Stellung des Zentrierungsparameters und den Absolutwerten der einzelnen Qualitätsmerkmale notwendig. Diese Information ist in den Prozessmodellen sowie der daraus abgeleiteten Qualitätsfunktion enthalten.

Bei der Robustheitsoptimierung nach der SKZ-Methode werden üblicherweise alle Parameter bis auf den Zentrierungsparameter auf ihrer robusten Levelstufe fixiert. Anschließend berechnet MESOS die zu erwartenden Merkmalswerte sowie die Gesamtqualität bei verschiedenen Einstellungen des Zentrierungsparameters. Die Stellung mit der höchsten Gesamtqualität kann dann einer Grafik ("Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion") oder der Ergebnistabelle des Menüpunktes "Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung" entnommen werden.

Falls die Auswertung der Streuungen z.B. aufgrund des Werkzeugeinsatzes auf wechselnden Spritzgießmaschinen keinen Sinn macht, kann MESOS auch angewiesen werden, maximal alle Parameter für die Prozesszentrierung zu variieren. In diesem Fall wird dann ausschließlich versucht, durch eine günstige Kombination der Einstellgrößen möglichst alle Merkmale nahe an ihr Optimierungsziel (meist der Sollwert) heranzubringen.

Aus diesen beiden Extremen sind natürlich auch Mischformen möglich, bei denen beispielsweise der streuungsbestimmende Parameter auf der robusten Levelstufe verbleibt, aber mehrere andere Parameter, die per Definition eigentlich keine Zentrierungsparameter mehr darstellen, vom Programm variiert werden dürfen, um die Sollwerte möglichst auch ohne Werkzeugänderung zu erreichen.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle"
"Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion"
"Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung"
"Extras" - "Einstellungen"

5.24 Prozessfenster

Nach Abschluss des Menüpunktes "Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung" steht die hinsichtlich Schwankungsarmut und/oder Sollwerterfüllung für alle Merkmale beste Kompromisseinstellung fest. Da für die spätere Produktion oft die Information wichtig ist, wie genau diese Einstellung eingehalten werden sollte, kann in diesem Menüpunkt ein Prozessfenster um den optimalen Punkt herum berechnet werden, innerhalb dessen eine geforderte Mindestqualität nicht unterschritten wird.

Als Ergebnis erhält man für jeden gewählten Parameter eine Art Toleranzband, das so beschaffen ist, dass auch die ungünstigste Kombination zwischen den Parametern noch die gewünschte Mindestqualität erreicht.

Betroffene Menüpunkte im Programm:

"Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle"
"Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion"
"Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung"
"Prozessoptimierung" - "Prozessfenster"
"Extras" - "Einstellungen"

5.25 Durchführung des Bestätigungsexperiments

Die Ergebnisse des Versuchsplans basieren auf Stichproben von 10 oder 20 Teilen. Zur Überprüfung der getroffenen Schlussfolgerungen hinsichtlich der robusten Einstellung sollte diese daher länger beobachtet werden. Als Vergleichseinstellung kann dazu, falls vorhanden, die bisherige Produktionseinstellung dienen oder die aus dem Versuchsplan ermittelte, nicht robuste Maschineneinstellung. Die Ergebnisse der beiden Einstellungen werden dann über einen längeren Zeitraum (z.B. 20 Stichproben à 5 Teile im Abstand von 1 Stunde) gegenübergestellt, um das vorhandene Optimierungspotential des Prozesses zu verifizieren.

Die in Bild 15 gezeigten Ergebnisse wurden bei einem Hersteller medizintechnischer Teile für eine Filterkappe aus PC erzielt. Für den Vergleich mit der existierenden Produktionseinstellung wurden über einen Zeitraum von 20 Stunden alle 60 Minuten 5 Formteile aus der Produktion entnommen und vermessen. Der jeweilige Merkmalsmittelwert aus den Ergebnissen der 5 Teile wurde dann in eine Regelkarte eingetragen. Die Abkürzungen in den Grafiken haben folgende Bedeutung:

- OG: Obere Toleranzgrenze
- UG: Untere Toleranzgrenze
- SW: Sollwert
- y: Gesamtmittelwert aus den Einzelmittelwerten der 5er-Stichproben
- sy: Standardabweichung aus den Einzelmittelwerten der 5er-Stichproben

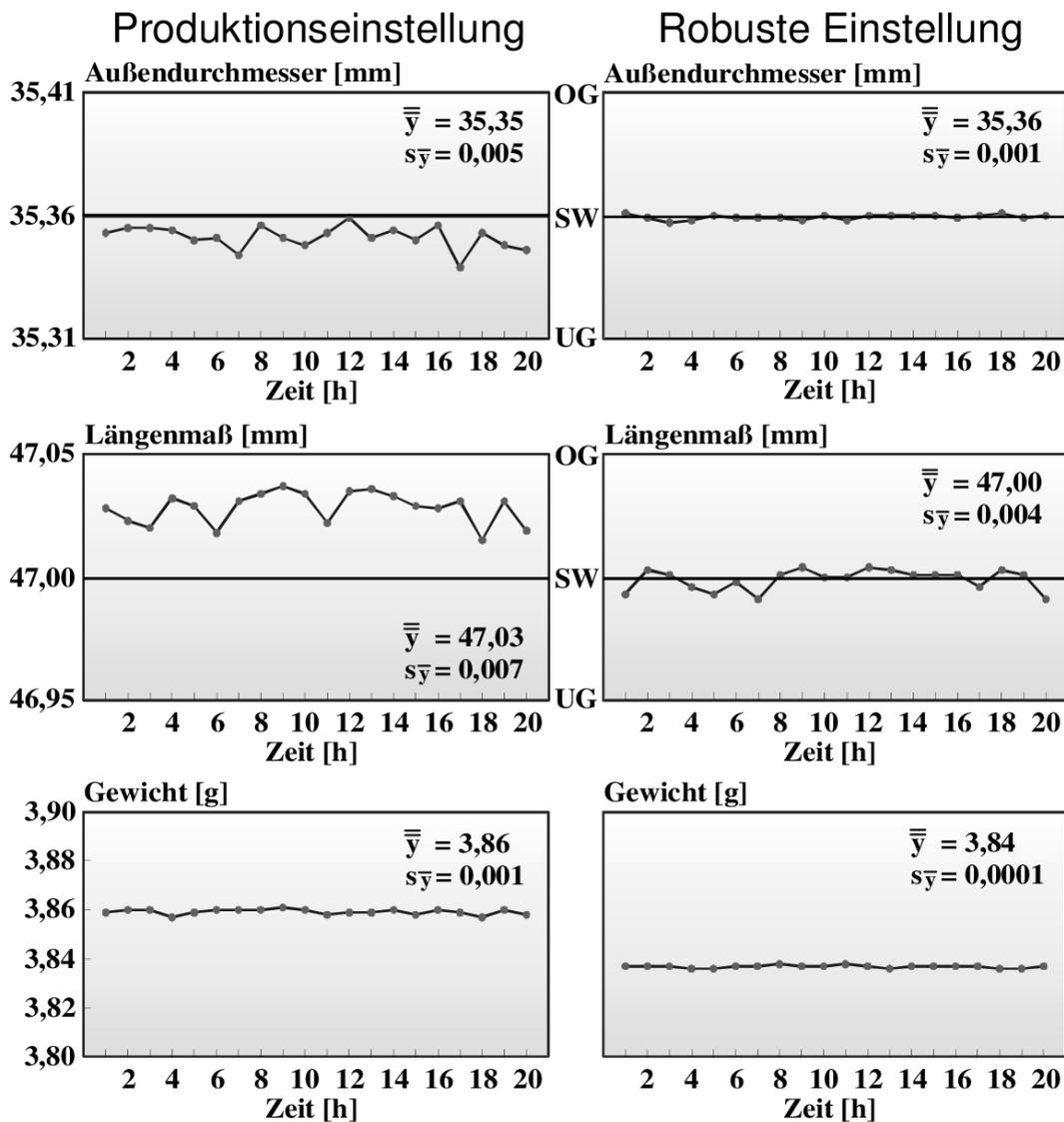


Bild 15: Vergleich der robusten Einstellung mit der Produktionseinstellung bei einer Filterkappe aus PC

Wie aus dem Vergleich deutlich wird, gelang es, die Schwankung der Merkmalswerte durch die Robustheitsoptimierung erheblich zu vermindern (Faktor 5 beim Außendurchmesser, Faktor 1,8 beim Längenmaß und Faktor 10 beim Gewicht). Zusätzlich konnte besonders beim kritischen Längenmaß die Zentrierung auf den Sollwert verbessert werden. Diese beiden Effekte zusammen bewirken insgesamt eine deutliche Verringerung des Ausschussanteils.

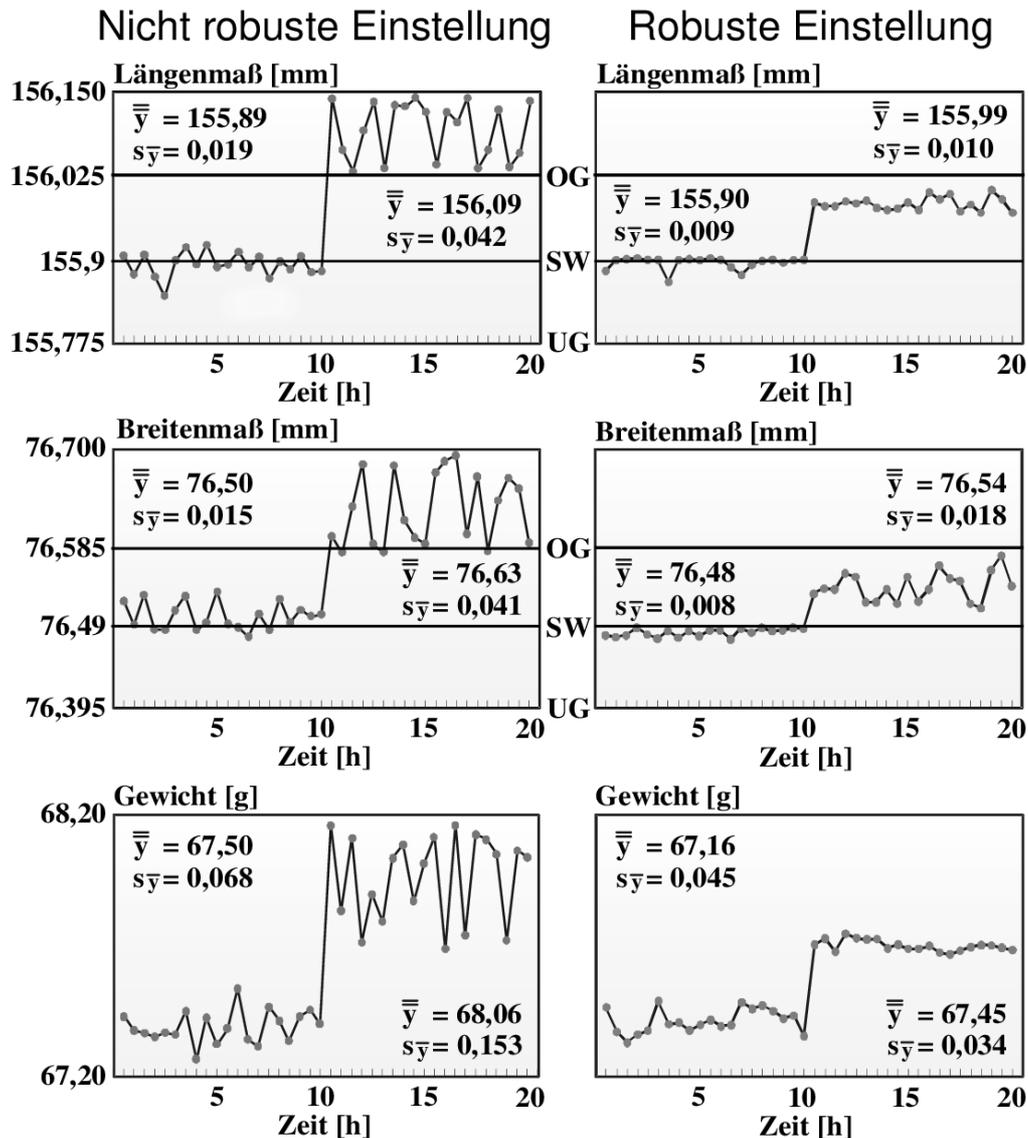


Bild 16: Reaktion des Prozesses auf eine Störung (Umstellung auf Regranulat nach 10 Stunden) bei einem Stapelkasten aus PP

Neben der reinen Übertragbarkeit der Kurzzeitergebnisse auf die Produktion wurde mehrfach auch die Reaktion des Prozesses auf äußere Störeinflüsse untersucht (Bild 16). Im vorliegenden Beispiel eines Stapelkastens wurden dazu aus dem verwendeten Polypropylen zunächst Formteile gespritzt und diese wieder zu Regranulat eingemahlen. Durch die dabei bewusst hervorgerufene Schädigung erhöhte sich der MFR-Wert des Materials um den Faktor 2. Zur Gegenüberstellung wurde anschließend bei der robusten sowie der analog ermittelten nicht robusten Maschineneinstellung (Levelstufen mit den höchsten Varianzen; eine Produktionseinstellung existierte nicht) über einen Zeitraum von 20 Stunden alle 30 Minuten eine 5er-Stichprobe gezogen. Die Auswertung und Bedeutung der Abkürzungen entspricht den Ausführungen zu Bild 15.

Vergleicht man zunächst den Zeitraum bis 10 Stunden, so sind auch hier bei der robusten Einstellung deutlich geringere Merkmalschwankungen festzustellen. Zudem konnte die Zentrierung auf die Sollwerte noch etwas verbessert werden. Zur Simulation einer Chargenschwankung wurde nun nach 10 Stunden das Material von Neuware auf Regranulat umgestellt. Bei der nicht robusten Einstellung führt dieser Wechsel zu einem starken Anstieg der Qualitätsschwankungen, verbunden mit einem Sprung des Mittelwertes. Beide Veränderungen zusammen bewirken, dass sich die Produktion ab diesem Zeitpunkt nicht mehr innerhalb der Toleranzgrenzen befindet.

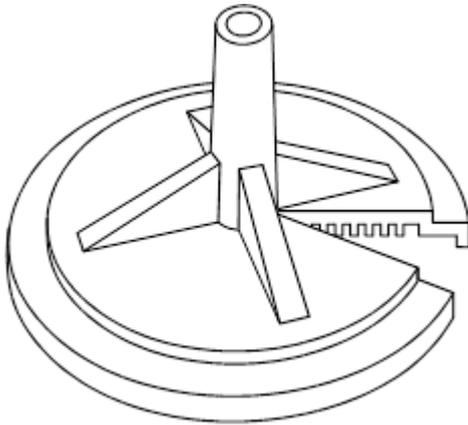
Im Vergleich dazu wirkt sich die Umstellung auf Regranulat bei der robusten Einstellung wesentlich geringer aus. Sowohl die Schwankungen der Merkmale als auch die Mittelwerte verändern sich so gering, dass trotz der Störung (die in diesem Fall nur simuliert ist) noch Teile innerhalb der Toleranzen gefertigt werden.

Kapitel



6 Interpretationsbeispiele

Der folgende Ablauf einer realen Versuchsauswertung soll Ihnen ein Beispiel geben, wie die verschiedenen Grafiken interpretiert werden und welche Einzelergebnisse zum Gesamtbild des Prozessverhaltens beitragen. Bei dem Formteil handelt es sich um das Unterteil eines Filtergehäuses aus PP.



Da das Gehäuse mit einem Oberteil verclipst werden soll, ist der Außendurchmesser (Sollwert 31,15 +0/-0,05 mm) besonders wichtig. Zudem soll das Gewicht minimiert werden. In den Versuchsplan wurden daher folgende Größen aufgenommen:

Parameter		Einstellstufen (Levelstufen)				
Name	Einheit	A-	I-	Z	I+	A+
Zylindertemperatur	°C	210	230	NoValue	250	270
Werkzeugtemperatur	°C	25	35	NoValue	45	55
Nachdruckhöhe	bar	450	550	NoValue	650	750

I-/I+ vorschlagen

OK Abbruch Drucken... Hilfe

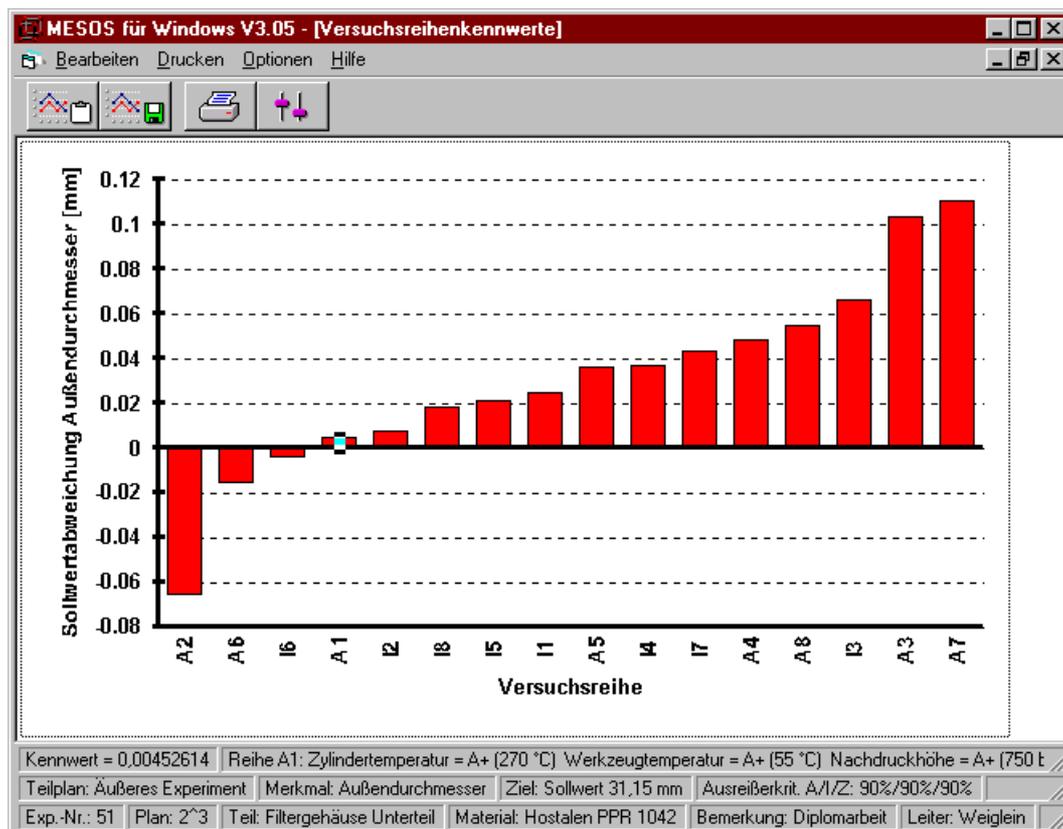
Als Vorbereitung für die folgende Auswertung wurde die Kennwertberechnung mit Ausreißertest (Wahrscheinlichkeit 90%) und die Berechnung der Prozessmodelle (Einstellung "automatisch") durchgeführt.

Ergebnis	Minimum	Maximum	Range
Alle Teilemeßwerte	31,081 (A2, T19)	31,268 (A7, T16)	0,187
Reihe mit min. Range	31,153 (A1, T4)	31,156 (A1, T3)	0,003
Reihe mit max. Range	31,190 (A8, T12)	31,229 (A8, T5)	0,039
Kennwert Mittelwert	31,084 (A2)	31,260 (A7)	0,176
Kennwert Standardabw.	0,0012 (A1)	0,0108 (A8)	0,0096

OK Drucken... Optionen... Hilfe

Zunächst wird überprüft, ob die Merkmale sicher messbar auf die Änderungen der Maschineneinstellung im Versuchsplan reagiert haben. Der Vergleich der Streuungen innerhalb der schlechtesten Versuchsreihe mit der Änderung des Mittelwertes von Reihe zu Reihe im Menüpunkt "Numerische Auswertung" - "Extremwerte" zeigt, dass letztere sowohl beim Außendurchmesser (Abbildung) als auch beim Gewicht um mehr als Faktor 4 größer ist. Aus den Messergebnissen können also zuverlässige Rückschlüsse auf die optimale Maschineneinstellung gezogen werden.

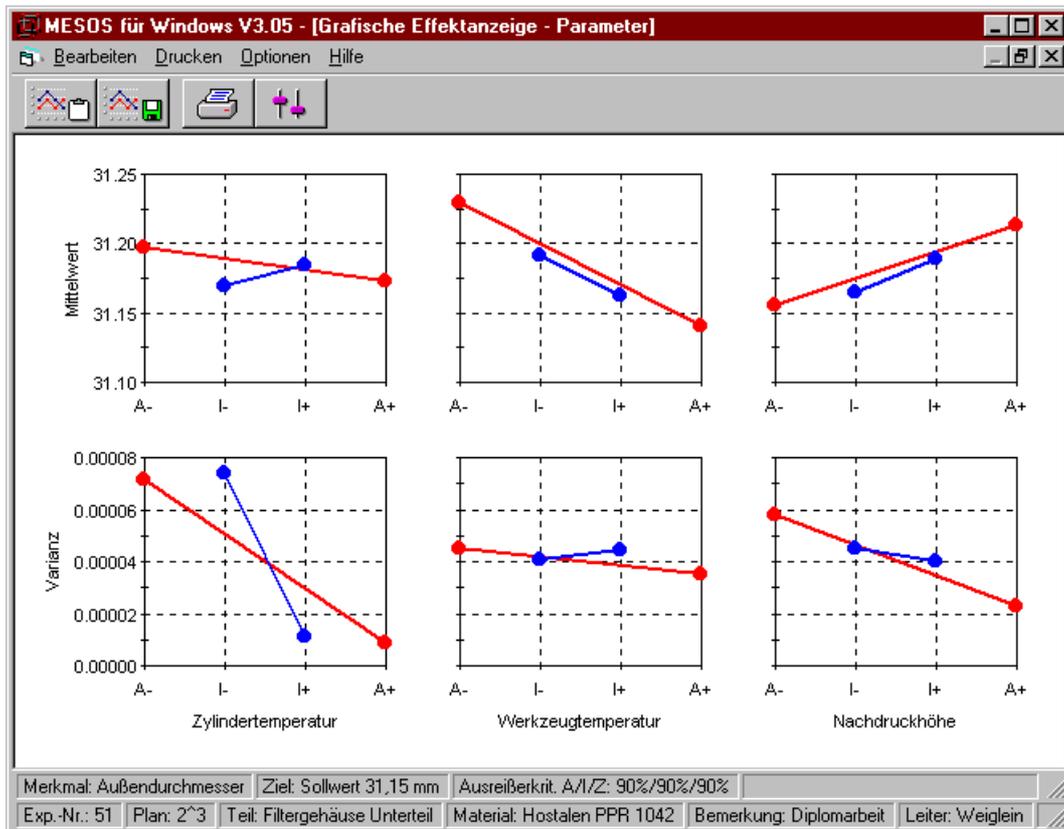
Bevor die komplexeren Auswertungen beginnen, ist es häufig interessant, zunächst einen Blick auf die reinen Versuchsreihenergebnisse zu werfen.



Die Abweichungen vom Sollwert beim Außendurchmesser (Menü "Grafische Auswertung" - "Versuchsreihenkennwerte") zeigen, dass einzelne Versuchsreihen (z.B. A1, I2 und I6) bereits nahe am gewünschten Sollwert liegen. Zudem gibt es sowohl Reihen, bei denen der Merkmalsmittelwert größer als der Sollwert ist, als auch solche, bei denen er kleiner ist. Damit stehen die Chancen gut, eine Maschineneinstellung zu finden, bei der zumindest der Außendurchmesser eine hohe Qualität erreicht. Die Überprüfung der beim Außendurchmesser guten Reihen hinsichtlich des Gewichts zeigt, dass zumindest die Reihen I2 und I6 auch hier gut liegen. Dies gilt auch für die Streuungen, wobei hier die Reihe I2 besser als I6 abschneidet.

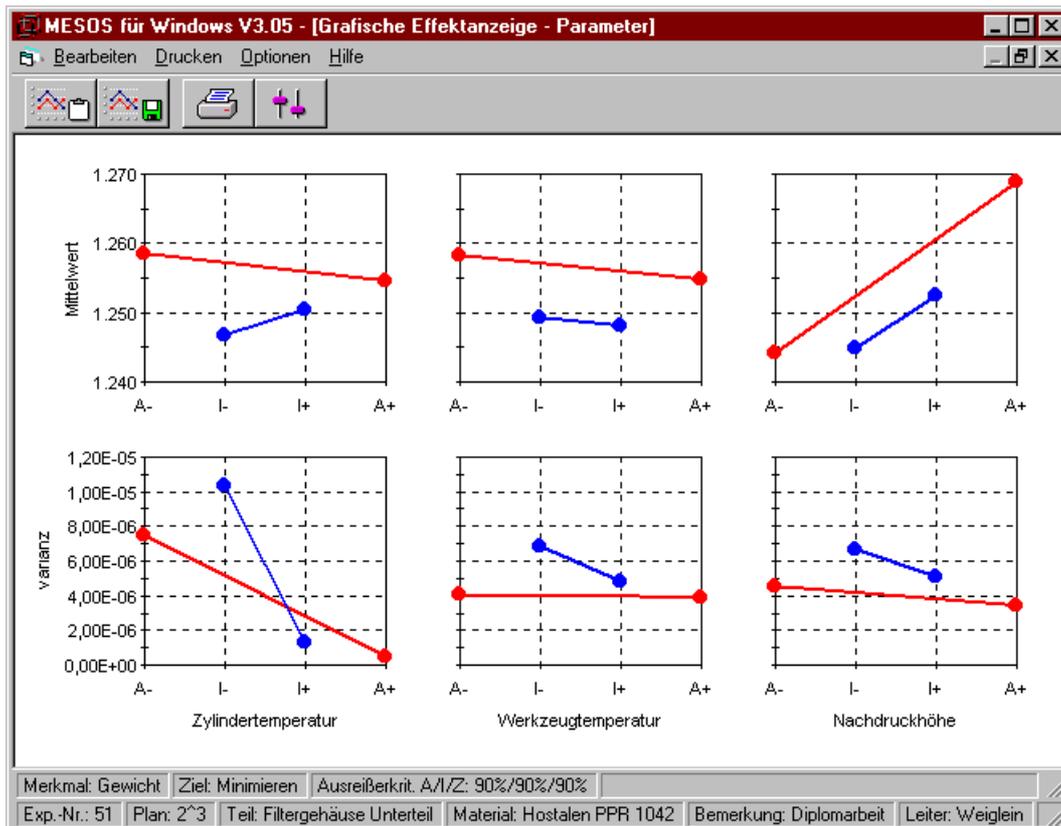
Die Auswertung der reinen Versuchsreihenergebnisse ersetzt nicht die folgenden Schritte, sie kann aber einen ersten Eindruck von den Erfolgchancen und der zu erwartenden Richtung der Optimierung geben. Zudem zeigen die bisherigen Grafiken nur tatsächlich gemessene und damit vergleichsweise zuverlässige Ergebnisse. Sie können damit gut zur Kontrolle derjenigen Auswertungen verwendet werden, die auf den Prozessmodellen und der Qualitätsfunktion aufbauen (diese Modelle sind keine physikalischen Naturgesetze, sondern statistische Näherungs-funktionen und können daher schlimmstenfalls auch unlogische Verhaltensweisen zeigen).

Die zentrale Grafik für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen der Maschineneinstellung und den Formteilmerkmalen verbirgt sich hinter dem Menüpunkt "Grafische Auswertung" - "Effekte der Parameter". Was bei oberflächlicher Betrachtung der Bilder sofort auffällt, ist in diesem Beispiel gute Übereinstimmung zwischen Außendurchmesser und Gewicht hinsichtlich der Tendenzen aller Einzelgrafiken. In der oberen Reihe mit den Mittelwerteffekten sollten bei rein linearen Zusammenhängen die Kurven des inneren und des äußeren Experiments idealerweise auf einer Geraden liegen. Bei dem Mittelwerteffekt der Zylindertemperatur auf den Außendurchmesser (oberes Bild) zeigen sich aber bereits unterschiedliche Steigungen bei innerem und äußerem Experiment. Dieses unerwartete und zunächst unlogische Ergebnis kann häufig ein Hinweis darauf sein, dass der hier (scheinbar) sichtbare Effekt bereits unter die Grenze der Genauigkeit des gesamten Versuchsaufbaus fällt (Genauigkeit der Maschineneinstellung, Messgenauigkeit, etc.).



Ähnliches ist auch beim Gewicht zu vermuten, obwohl auch hier bei der Zylindertemperatur der gleiche gegenläufige Effekt zwischen innerem und äußerem Experiment zu beobachten ist. Hinzu kommt jedoch ein leichter Niveauunterschied zwischen den Ergebnissen beider Teilpläne, der aufgrund seiner Höhe von wenigen tausendstel Gramm eher den prinzipbedingten Ungenauigkeiten bei praktischen Versuchen als einer echten Nichtlinearität oder sonstigen Einflüssen zuzuschreiben sein dürfte.

Die genauere Betrachtung der Effektgrafiken zeigt, dass beim Außendurchmesser die Zylinder- und die Werkzeugtemperatur ein genau gegensätzliches Verhalten zeigen. Während die Werkzeugtemperatur zusammen mit dem Nachdruck sehr stark den Mittelwert beeinflusst aber kaum Einfluss auf die Streuungen hat, ist dies bei der Zylindertemperatur genau umgekehrt. Diese Tendenz zeigt sich in gleicher Weise beim Gewicht, dessen Mittelwert jedoch stärker vom Nachdruck als von der Werkzeugtemperatur geprägt wird.



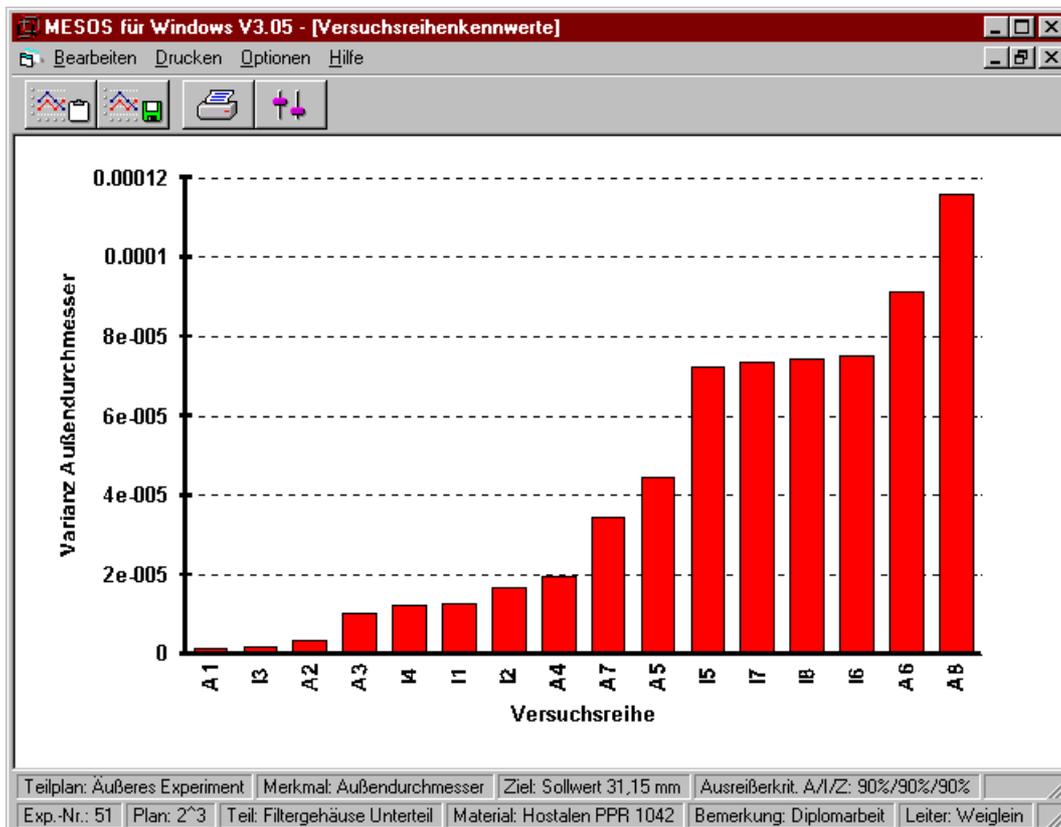
Für den nächsten Schritt der Suche nach der robusten Einstellung gilt es, die jeweils streuungsärmste Levelstufe (kleinste Varianz) für jeden Parameter herauszusuchen. Im Beispiel sind dies:

- Zylindertemperatur : A+ (auch gut: I+)
- Werkzeugtemperatur : A+ (alle Level etwa gleich gut)
- Nachdruckhöhe : A+

Zur gleichen Aussage kommt auch die Programmfunktion zur automatischen Bestimmung der robusten Einstellung im Menüpunkt "Prozessoptimierung" - "Robuste Einstellung", was nicht nur in der Reihenfolge der besten Levelstufen, sondern auch in den Unterschieden zwischen den berechneten Robustheitskennwerten deutlich wird (die Ergebnisse der Levelstufen bei der Werkzeugtemperatur schwanken beispielsweise nur zwischen 43,4 und 62,5, obwohl der Kennwert zwischen 0 und 100 liegen kann):

Merkmal	Zylindertemperatur				Werkzeugtemperatur				Nachdruckhöhe			
	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4
Außendurchmesser *	A+	<<I+	A-	<<I-	A+	<I-	<<I+	<<A-	A+	I+	<I-	A-
Gewicht *	A+	<I+	A-	I-	A+	<<A-	<I+	I-	A+	<A-	<<I+	I-
Gesamtergebnis	A+	I+	A-	I-	A+	A-	I+	I-	A+	I+	A-	I-
Kennwert	100,0	94,1	16,5	0,0	62,5	54,0	50,7	43,4	74,6	52,7	41,9	41,4
Einstellwert	270	250	210	230	55	25	45	35	750	650	450	550

Im Hilfetext zum Menüpunkt "Prozessoptimierung" - "Robuste Einstellung" wird anhand einer Grafik erklärt, weshalb die Ermittlung der robusten Einstellung über die Effektgrafiken der einfacheren Suche nach der Versuchsreihe mit der insgesamt geringsten Streuung vorzuziehen ist. Trotzdem sollte zur Kontrolle im vorliegenden Fall die Tatsache genutzt werden, dass die optimal robuste Einstellung zufällig einer bereits gefahrenen Versuchsreihe entspricht (Reihe 1 des äußeren Experiments). Wie die Darstellung des Kennwerts Varianz im Menüpunkt "Grafische Auswertung" - "Versuchsreihenkenwerte" zeigt, schneidet die Reihe A1 auch bei reiner Betrachtung der Streuungen ohne Berücksichtigung der Störunanfälligkeit hervorragend ab (auch beim nicht abgebildeten Gewicht). Die gefundene Einstellung kann also in jeder Hinsicht als optimal robust bezeichnet werden.



Im nächsten Schritt geht es darum, einen möglichen Parameter für die Zentrierung des Prozesses auf die Sollwerte zu finden. Dieser sollte sich durch einen starken Einfluss auf den Mittelwert der Merkmale und einen geringen Einfluss auf die Streuungen auszeichnen. Aus den Effektgrafiken kommt hierbei beim Außendurchmesser besonders die Werkzeugtemperatur in Frage, aber auch der Nachdruck hat noch keinen allzu deutlichen Effekt auf die Varianz. Zudem reagiert das Gewicht als zweites Merkmal nur vergleichsweise wenig auf die Werkzeugtemperatur, weshalb der Nachdruck wohl den besten Kompromiss darstellt. Trotzdem kann es sinnvoll sein, probeweise die Werkzeugtemperatur als Zentrierungsparameter einzusetzen. Falls die Merkmalswerte bei der robusten Einstellung bereits sehr nahe an den gewünschten Sollwerten liegen, reicht die geringere Mittelwertbeeinflussung der Werkzeugtemperatur vielleicht für die letzte Feinzentrierung aus. In diesem Fall könnte mit einer noch etwas geringeren Robustheitseinbuße als beim Nachdruck gerechnet werden.

Merkmal	1. Nachdruckhöhe			2. Werkzeugtemperatur			3. Zylindertemperatur		
	Gesamt	Robust.	Mittelw.	Gesamt	Robust.	Mittelw.	Gesamt	Robust.	Mittelw.
Außendurchmesser *	69 %	31 %	70 %	95 %	11 %	100 %	16 %	100 %	32 %
Gewicht *	92 %	17 %	100 %	50 %	14 %	14 %	12 %	100 %	24 %
Gesamtergebnis	80 %	24 %	85 %	72 %	12 %	57 %	14 %	100 %	28 %

OK * Bei der Suche berücksichtigte Merkmale Drucken... Hilfe

Die automatische Suche nach dem Zentrierungsparameter im Menüpunkt "Prozessoptimierung" - "Zentrierungsparameter" untermauert die aus der manuellen Grafikauswertung gewonnenen Rückschlüsse. Auch hier wird der Nachdruck als bester Kompromiss für beide Merkmale ausgewiesen, der Gesamtkennwert der Werkzeugtemperatur liegt mit 72% aber nur unwesentlich unter dem des Nachdrucks mit 80%. Der geringe Abstand ergibt sich dabei aus der Tatsache, dass die Werkzeugtemperatur einen äußerst geringen Einfluss (12%) auf die Robustheit hat. Falls Sie zur Prozesszentrierung deutlich von ihrer robusten Levelstufe wegbewegt werden muss, hätte dies also die geringsten Auswirkungen.

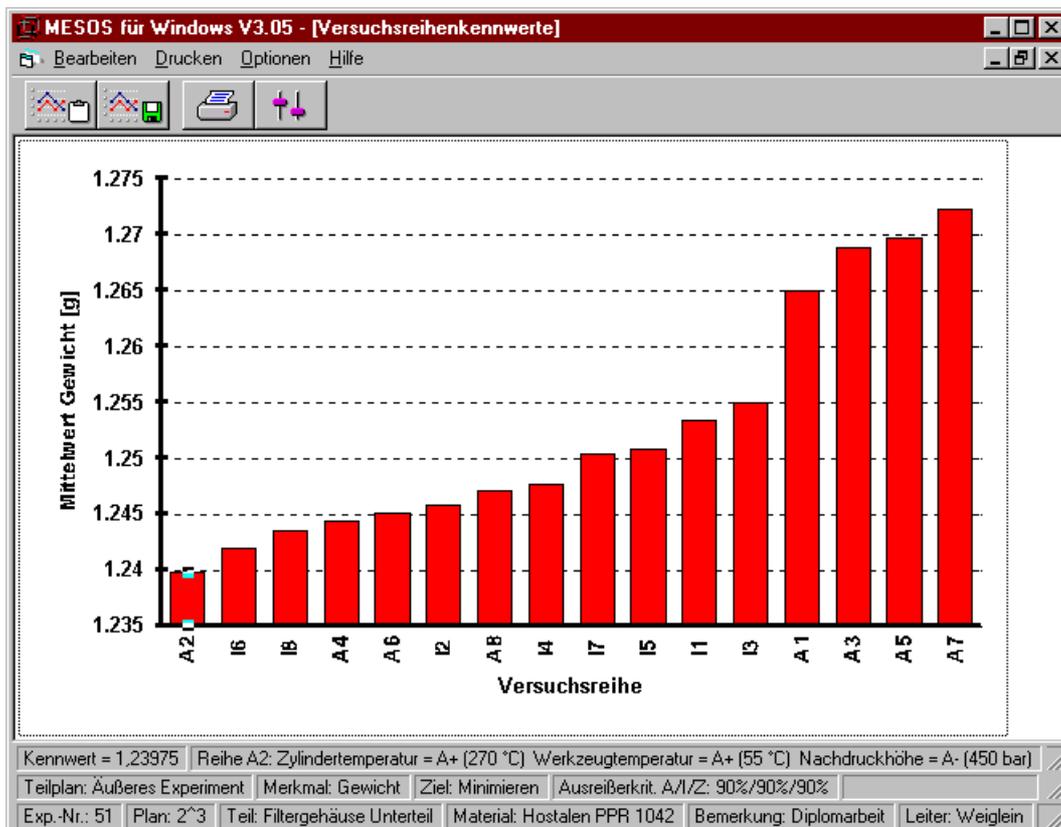
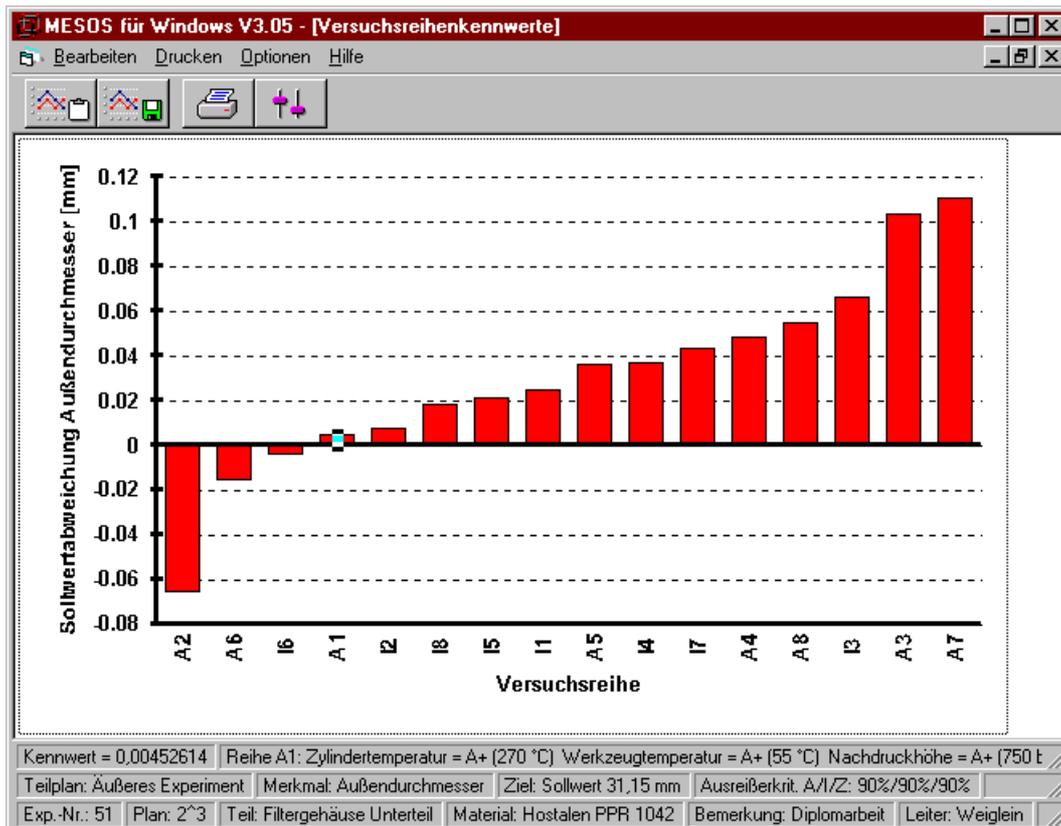
Zur Kontrolle kann an dieser Stelle noch ein kurzer Blick auf die Wechselwirkungen geworfen werden (Menüpunkt "Numerische Auswertung" - "Anzeige Effekte"; die Abbildung gilt für den Außendurchmesser). So könnte es im allerdings sehr unwahrscheinlichen Extremfall möglich sein, dass der Nachdruck unter der speziellen Randbedingung, dass Zylinder- und Werkzeugtemperatur auf ihrer robusten Levelstufe A+ stehen, keinen Einfluss auf Außendurchmesser und Gewicht hat und demnach als Zentrierungsparameter doch ungeeignet wäre.

Nr.	Spalte	Verm.	Parameter	Level -	Level +	Effekt
1	A	----	Zylindertemperatur	31,196	31,173	-0,024
2	B	----	Werkzeugtemperatur	31,229	31,140	-0,089
3	AB	----	Wechselwirkung	31,193	31,176	-0,017
4	C	----	Nachdruckhöhe	31,156	31,214	0,058
5	AC	----	Wechselwirkung	31,182	31,187	0,005
6	BC	----	Wechselwirkung	31,183	31,186	0,003
7	ABC	----	Wechselwirkung	31,182	31,187	0,005

OK Drucken... Optionen... Hilfe

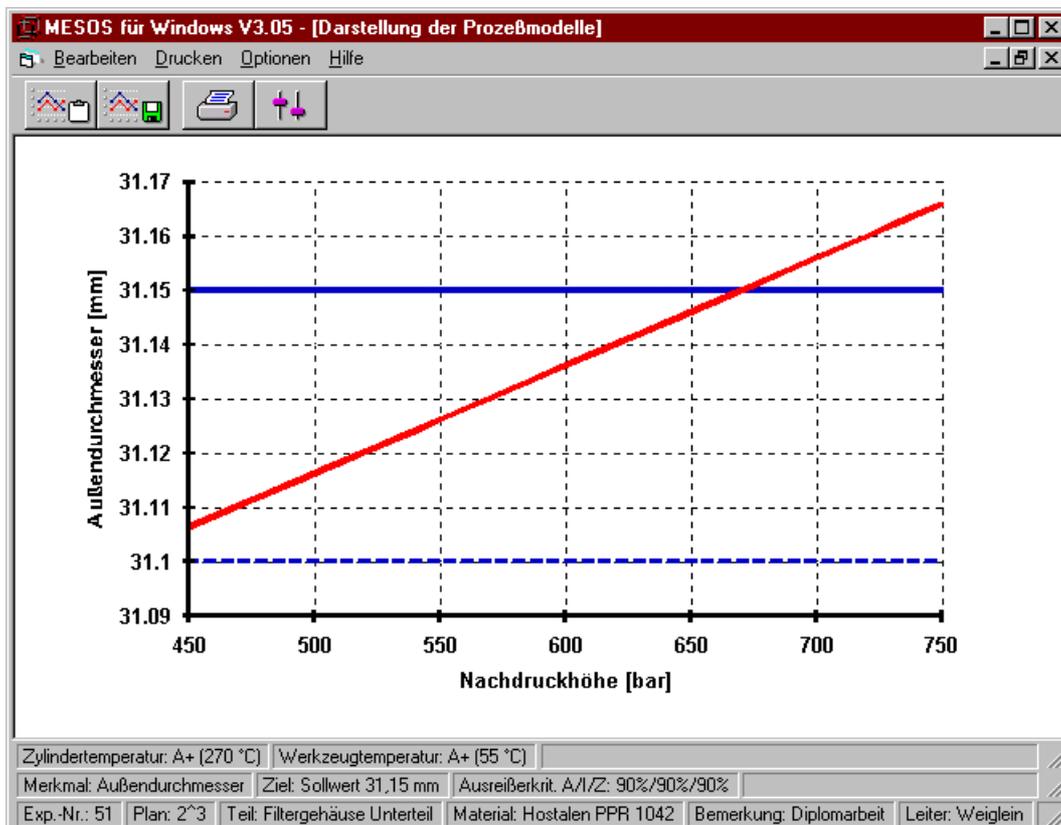
Tatsächlich liegen die Ergebnisse der Wechselwirkungen größtenteils jedoch noch hinter der Zylindertemperatur als unwichtigstem Einstellparameter.

Im letzten Optimierungsschritt geht es schließlich um die Annäherung der Merkmalsmittelwerte an die vorgegebenen Sollwerte. Dazu ist es sinnvoll, zunächst einmal zu überprüfen, wie weit die robuste Einstellung eigentlich von den Sollwerten entfernt liegt. Falls die robuste Einstellung wie hier einer bereits gefahrenen Versuchsreihe entspricht, kann dazu die schon mehrfach eingesetzte Anzeige der Versuchsreihenkenneiwerte im Menü "Grafische Auswertung" - "Versuchsreihenkenneiwerte" verwendet werden.



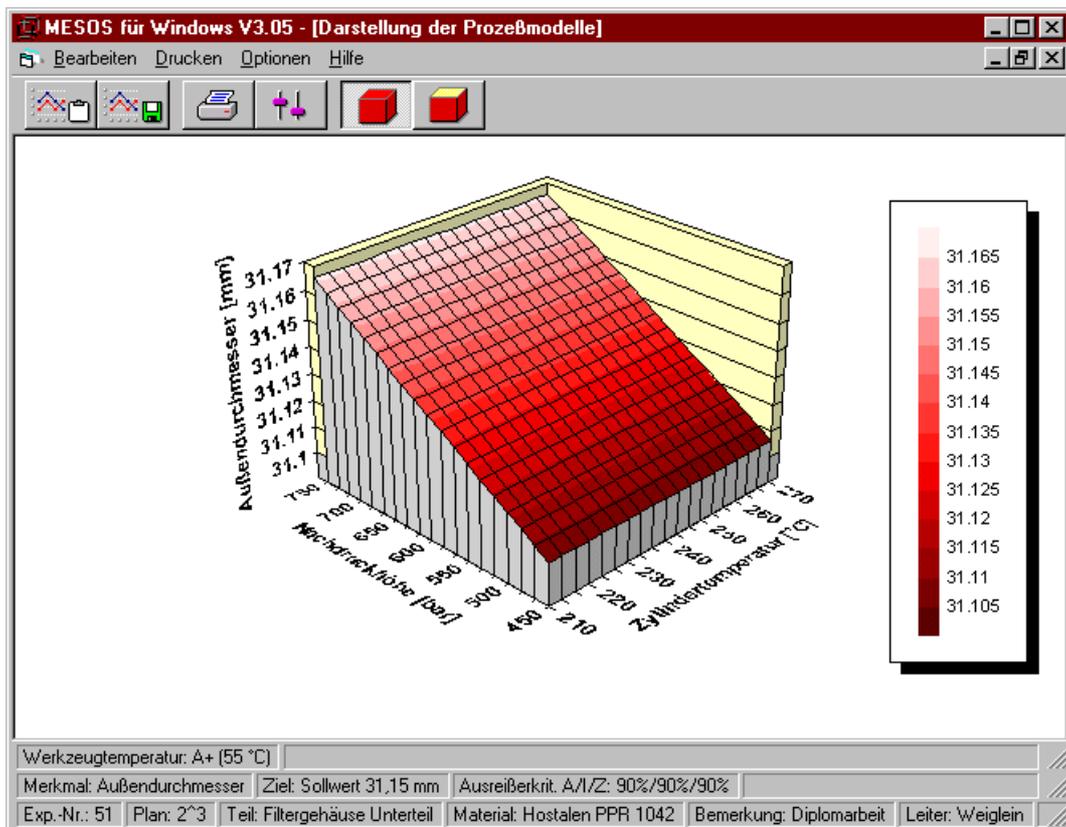
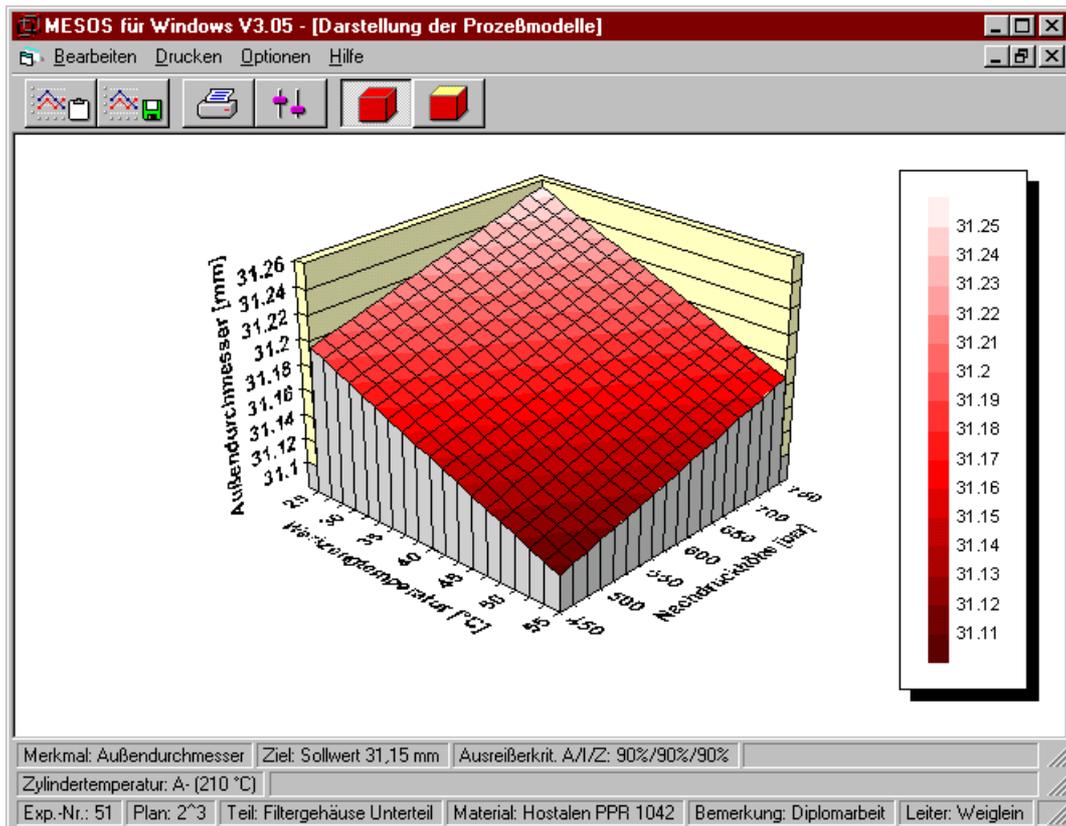
Demnach liegt die Versuchsreihe A1 beim Außendurchmesser (oberes Bild) zwar bereits sehr nahe am Sollwert, durch die Tolerierung des Maßes mit dem Sollwert als oberer Grenze liegt sie aber noch außerhalb des Toleranzbandes. Zudem zeichnet sich die Versuchsreihe als Folge des

hohen Nachdrucks durch ein ungünstig hohes Gewicht aus (unteres Bild). Falls die robuste Einstellung nicht einer bekannten Versuchsreihe entspricht, wären ähnliche Aussagen auch über die Darstellung der Prozessmodelle im Menüpunkt "Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle" möglich gewesen.



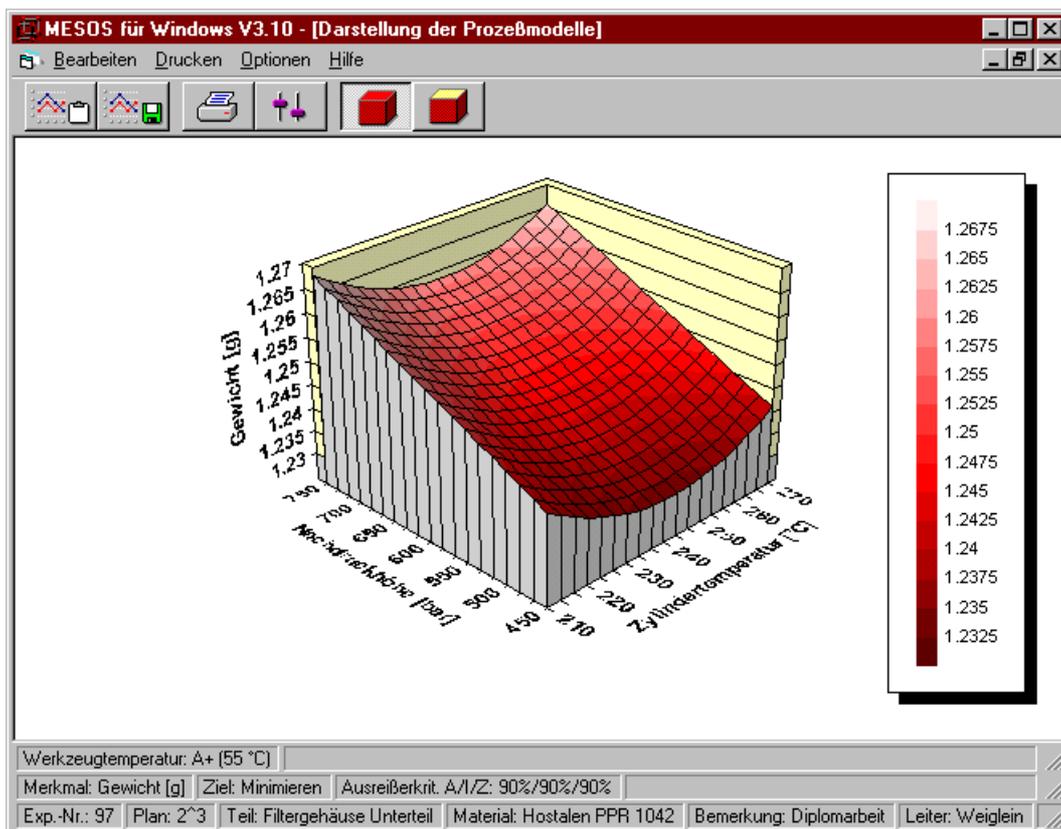
Dazu werden z.B. die Zylinder- und die Massetemperatur auf ihrer optimal robusten Einstellstufe A+ fixiert und die Abhängigkeit der Merkmalsmittelwerte von dem dritten Parameter Nachdruckhöhe dargestellt. Auch hier wird deutlich, dass beim höchsten Nachdruck (A+ bzw. 750 bar sind die robuste Levelstufe des Nachdrucks) der Außendurchmesser und auch das Gewicht noch zu groß sind.

Bevor mit weiteren Auswertungen auf der Basis der Prozessmodelle fortgefahren wird, sollten diese zunächst auf ihre Genauigkeit und eventuelle logische Fehler (z.B. Formteilgewicht, das mit zunehmendem Nachdruck zunächst steigt und dann wieder fällt) überprüft werden. Letzteres geschieht am sinnvollsten durch die grafische Darstellung der Prozessmodelle (Menü "Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle"), da das Auftreten von quadratischen oder kubischen Termen im Modell alleine noch kein Zeichen für unlogisch komplexe Zusammenhänge ist. Zur Beurteilung werden nacheinander immer zwei andere Parameter für die Darstellung variabel gehalten und der Rest auf beliebige feste Werte eingestellt. Die Grafiken für das Längenmaß (siehe Abbildungen) zeigen unter diesen Umständen jeweils lineare Flächen, deren Steigung mit den Effektgrafiken korreliert.

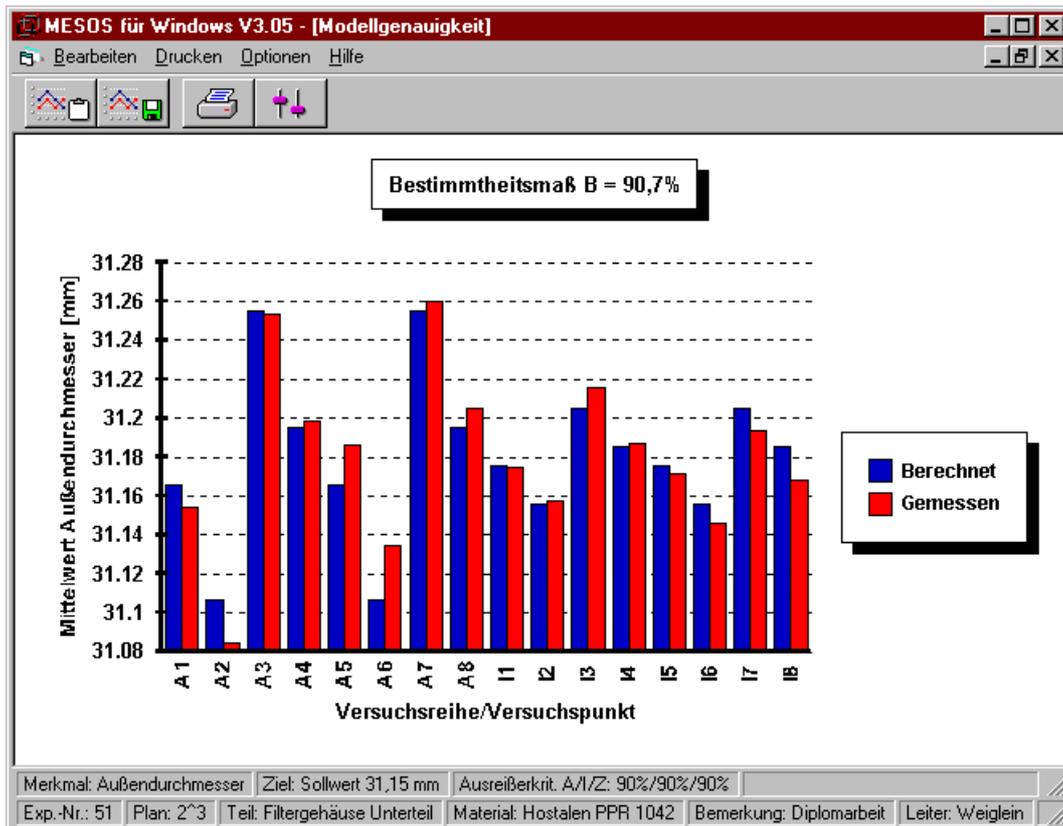


Beim Gewicht wurde dagegen eine in der Realität wohl kaum vorhandene Nichtlinearität bei der Zylindertemperatur in das Modell aufgenommen. Ursache hierfür ist vermutlich der leichte Niveauunterschied zwischen innerem und äußerem Experiment. Betrachtet man die Effekte der

Parameter oder die Beurteilung der Versuchsergebnisse, dann wird jedoch deutlich, dass eigentlich nur der Nachdruck einen wirklich spürbaren Einfluss auf das Gewicht hat. Die Effekte aller anderen Parameter und letztendlich auch der Niveauunterschied zwischen beiden Teilplänen liegen dagegen mit weniger als 0,01 g höchstwahrscheinlich unter der Genauigkeitsgrenze. Da auch im Modell trotz Nichtlinearität der Einfluss der Zylindertemperatur gering ist im Verhältnis zum Nachdruck und beim Gewicht hauptsächlich qualitative Aussagen interessieren, wurde das Modell in diesem Zustand belassen. Falls die offensichtlich unlogische Nichtlinearität dagegen stört, sollte die Modellberechnung für das Merkmal Gewicht mit der Einstellungen "Glättung: stark" neu durchgeführt werden. Die genannte Einstellung sorgt dann dafür, dass nur noch der Nachdruck mit linearem Einfluss in das Modell aufgenommen wird.



Nachdem die Modelle selbst überprüft wurden, sollte noch ein abschließender Blick auf die zu erwartende Genauigkeit geworfen werden. Diese kann im Menüpunkt "Grafische Auswertung" - "Modellgenauigkeit" wahlweise über eine Korrelations- oder Balkengrafik beurteilt werden, wobei letztere auf Anhieb meist schneller zu verstehen ist.



In der Abbildung werden für alle bekannten Einstellungen aus dem Versuchsplan der tatsächlich experimentell ermittelte und der über das Modell vorausberechnete Merkmalsmittelwert des Außendurchmessers nebeneinander aufgetragen. Bis auf einzelne, nicht ganz so gut getroffene Versuchsreihen (A2 und A6), sind die Abweichungen dabei im Verhältnis zum gesamten Variationsbereich des Merkmals gering (dies gilt auch für das nicht dargestellte Gewicht). Zusammenfassend ist daher mit einer zuverlässigen und auch recht genauen Vorhersage der Merkmalswerte zu rechnen.

Die Voraussagemöglichkeiten werden gebraucht, um im folgenden die hinsichtlich der Annäherung an die Sollwerte beste Stellung des Zentrierungsparameters zu finden. Wird der Sollwert beim Außendurchmesser dabei so belassen, wie er ursprünglich eingegeben wurde (Sollwert = obere Toleranzgrenze), dann würde das Programm angewiesen, eine Einstellung zu finden, bei der tatsächlich bereits 50% Ausschuss produziert würden (falls der Produktionsmittelwert exakt dem Sollwert und damit gleichzeitig der oberen Toleranzgrenze entspricht, liegen alle nach oben schwankenden Messwerte außerhalb der Toleranz). Da dies nicht sinnvoll ist, sollte der auf den Formteileinsatz oder die Werkzeugfertigung ausgerichtete Sollwert spätestens jetzt gegen einen fertigungsorientierten Sollwert mit symmetrischem Toleranzband ausgetauscht werden. Beim Außendurchmesser wäre dies dann ein Maß von $31,125 \pm 0,025$ mm statt $31,15 +0/-0,05$ mm.

Zur eigentlichen Bestimmung der optimalen Einstellung des Zentrierungsparameters stehen verschiedene Wege offen, wozu gerade bei nur einer einzigen variablen Größe und zwei Merkmalen auch die manuelle Auswertung der Prozessmodelle und Qualitätsfunktion (Menü "Grafische Auswertung" - "Prozessmodelle" und "Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion") gehört. Bei mehreren Merkmalen, evtl. sogar mit unterschiedlicher Gewichtung, oder mehr als einem variierbaren Parameter ist dagegen die Automatikfunktion im Menüpunkt "Prozessoptimierung" - "Prozesszentrierung" der schnellste Weg. Dazu werden die beiden Temperaturen auf der jeweils robusten Levelstufe A+ fixiert und der Nachdruck vom Programm schrittweise verändert. Die Nachdruckstufe mit der höchsten Gesamtqualität (im Beispiel sind dies ca. 518 bar) wird dann zusammen mit den Merkmalsprognosen in die Ergebnistabelle eingetragen.

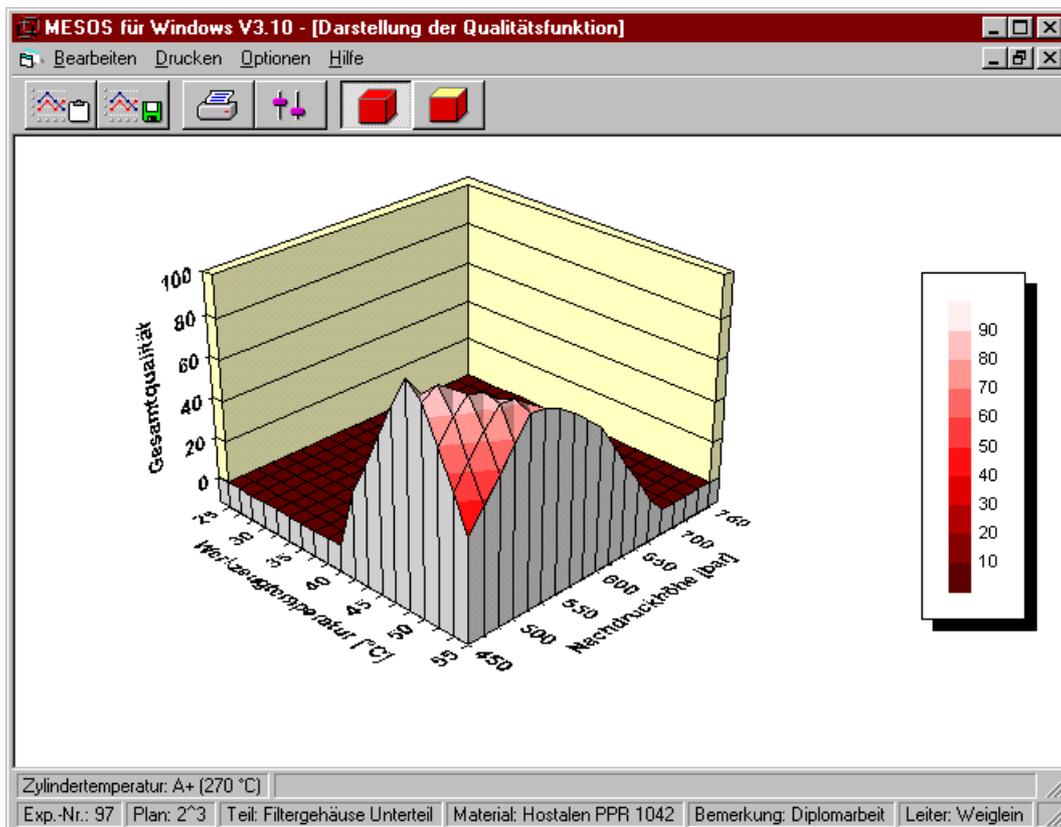
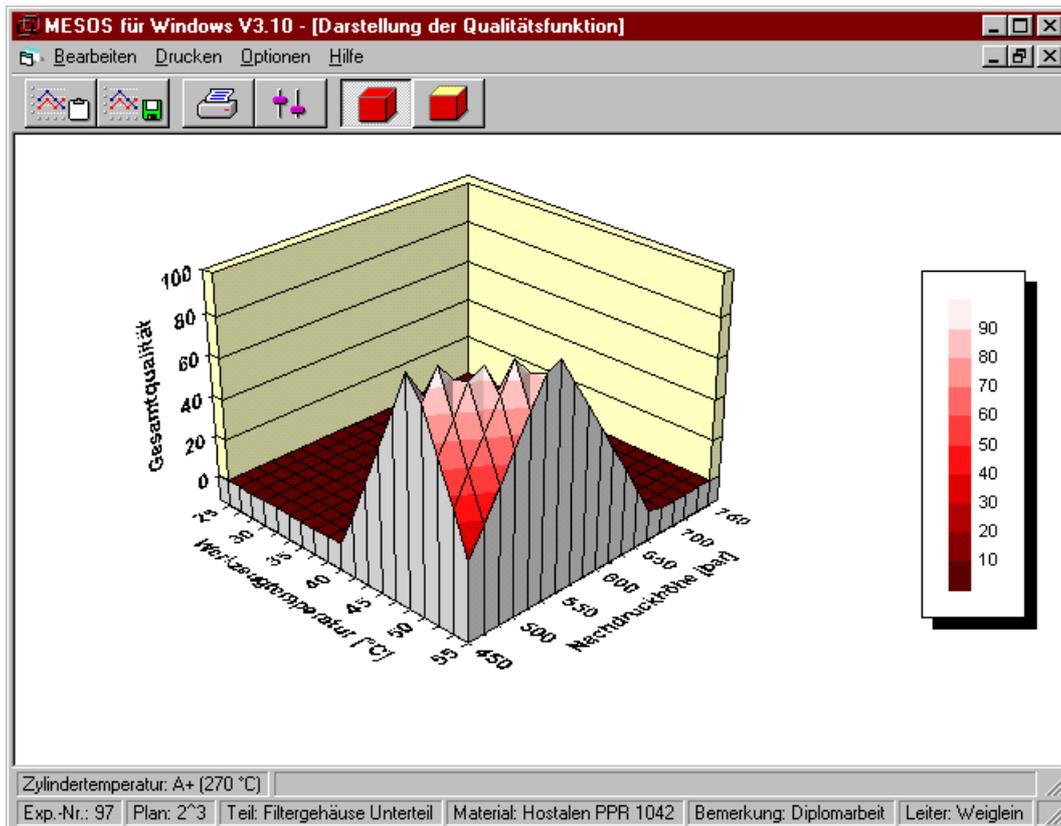
Prozeßzentrierung (Mittelwertoptimierung)				
Beste Gesamtqualität: 78,4		Getestete Einstellkombinationen: 241		
Parameter	Stellung	Genauigkeit		
Zylindertemperatur	270,0 °C (A+)	(fester Wert)		
Werkzeugtemperatur	55,0 °C (A+)	(fester Wert)		
Nachdruckhöhe	517,5 bar	1,3 bar (0,4 %)		
Merkmal	Gewichtung	Einzelqualität	Schätzwert	Sollwert
Außendurchmesser *	50 %	78,9	31,120 mm	31,125 mm
Gewicht *	50 %	78,3	1,247 g	Minimieren
* Berücksichtigte Merkmale				

Wie dabei sichtbar wird, ist die Gesamteinstellung tatsächlich ein Kompromiss aus beiden, im Beispiel gleich gewichteten Merkmalen, denn zugunsten eines geringeren Gewichts wird beim Außendurchmesser ein Wert unterhalb des Sollwerts in Kauf genommen. Falls Ihnen der Außendurchmesser unter diesen Umständen doch wichtiger erscheint, können Sie z.B. seine Gewichtung im Menüpunkt "Datei" - "Formteilerkmale" hochsetzen oder das Merkmal Gewicht in der Tabelle der zu berücksichtigenden Merkmale deaktivieren. Damit wird es schließlich sogar möglich, zumindest in der Vorhersage, exakt den Sollwert des Durchmessers zu erreichen.

Eine weitere mögliche Vorgehensweise ergibt sich aus der Tatsache, dass neben dem Nachdruck mit der Werkzeugtemperatur ein zweiter Parameter existiert, der wenig Einfluss auf die Robustheit hat und daher ohne übermäßige Einbußen von seiner robusten Einstellstufe entfernt werden kann. Tatsächlich errechnet das Programm bei variablem Nachdruck und variabler Werkzeugtemperatur eine von 78 auf 94 gestiegene Gesamtqualität mit einer deutlichen Verbesserung besonders beim Außendurchmesser.

Prozeßzentrierung (Mittelwertoptimierung)				
Beste Gesamtqualität: 94,3		Getestete Einstellkombinationen: 19.881		
Parameter	Stellung	Genauigkeit		
Zylindertemperatur	270,0 °C (A+)	(fester Wert)		
Werkzeugtemperatur	48,8 °C	0,2 °C (0,7 %)		
Nachdruckhöhe	450,0 bar (A-)	2,1 bar (0,7 %)		
Merkmal	Gewichtung	Einzelqualität	Schätzwert	Sollwert
Außendurchmesser *	50 %	99,1	31,125 mm	31,125 mm
Gewicht *	50 %	93,3	1,242 g	Minimieren
* Berücksichtigte Merkmale				

Wie dies zustande kommt, lässt sich am besten wieder über die grafische Darstellung der Zusammenhänge (Menüpunkt "Grafische Auswertung" - "Qualitätsfunktion") ermitteln. Die Einzelqualität des Außendurchmessers (in der Liste der zu berücksichtigenden Merkmale wird nur der Außendurchmesser markiert) zeigt dabei bei verschiedenen Kombinationen aus Nachdruckhöhe und Werkzeugtemperatur ein ähnlich hohes Niveau (oberes Bild). Wird nun zusätzlich berücksichtigt, dass einzig ein niedriger Nachdruck zu dem gewünschten niedrigen Gewicht führt, dann sollte aus diesen Möglichkeiten eine Kombination mit besonders geringem Nachdruck gewählt werden, um beide Merkmale gleichermaßen zu optimieren (unteres Bild: Gesamtqualität für Durchmesser und Gewicht).



Somit lautet die gleichzeitig auf Prozessrobustheit und Sollwerterfüllung ausgerichtete, zentriert-robuste Einstellung:

Zylindertemperatur : A+ (270°C)
Werkzeugtemperatur : 49°C
Nachdruckhöhe : 450 bar

Kapitel



7 Weiterführende Literatur

- /1/ Bourdon, R.: Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, 1994
- /2/ Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S.: Statistics for Experimenters, John Wiley and Sons, New York, 1979
- /3/ Brunner, F.: Die Taguchi-Optimierungsmethoden - ein neuer Qualitätsweg zur dynamischen Wettbewerbsfähigkeit, QZ 34 (1989) 7, S. 339
- /4/ Fisher, R. A.: The Design of Experiments, Oliver and Boyd, Edinburgh, 1935
- /5/ Kaminski, M.: Fallbeispiel einer Qualitätsverbesserung mittels Taguchi-Methoden, QZ 33 (1988) 11, S. 599
- /6/ Khosrow, D.: Quality Control and Robust Design, Wadsworth and Brooks/Cole, Pacific Grove California, 1989
- /7/ Krottmaier, J.: Versuchsplanung - Der Weg zur Qualität des Jahres 2000, TÜV-Rheinland, 1990
- /8/ Lindner, A.: Planen und Auswerten von Versuchen, 3. erw. Auflage, Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart, 1969
- /9/ NN: VDA-Richtlinien: Qualitätskontrolle in der Automobilindustrie, Heft 4, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz, 1986
- /10/ Popp, M.: Handbuch zum Seminar "Statistische Versuchsmethodik beim Spritzgießen - Praktischer Weg zu optimaler Fertigungspräzision und geringen Fehlerkosten", Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 1998, Würzburg
- /11/ Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
- /12/ Taguchi, G.: Systems of Experimental Design Vol. 1 and Vol. 2, American Supplier Institute, Dearborn, Michigan, 1987
- /13/ Taguchi, G.; Wu, Y.: Offline Quality Control, Central Japan Quality Control Association, 1985

Index

- A -

Abfahren der Versuchsreihen 25
Allgemeine Programmbedienung 8
Assistent für den Programmablauf 12
Ausreißertest 26
Äußeres Experiment 18
Auswahl des geeigneten Versuchsplans 21
Auswertungsbeispiele 42

- B -

Beeinflußbarkeit der Merkmale 30
Beispiele 42
Berechnung der Prozessmodelle 28
Bestätigungsexperiment 37

- D -

Deinstallation des Programms 6
Durchführung der Versuche an der Maschine 25
Durchführung des Bestätigungsexperiments 37

- E -

Effekte der Parameter 30
Einflüsse der Parameter 30
Einflussgrößen festlegen 22
Einleitung 2
Einstellstufen festlegen 23
Ergebnisvalidierung 37
Experiment anlegen 12

- F -

Faktorielle Versuchspläne 13
Festlegung der Einflussgrößen 22
Festlegung der Einstellstufen 23
Festlegung der Qualitätsmerkmale 23
Formteileigenschaften festlegen 23
Formteilmerkmale messen 25
Fraktionierte Versuchspläne 16
Freischaltung der Lizenz 5

- G -

Geschachtelte Versuchspläne 18
Gewichtung der Merkmale 23
Grafische Darstellung der Parametereinflüsse 30
Grafische Darstellung der Prozessmodelle 32
Grafische Darstellung der Qualitätsfunktion 33

- I -

Inneres Experiment 18
Installation des Programms 4
Integriertes Experiment 18
Interpretationsbeispiele 42

- K -

Kennwertberechnung mit Ausreißertest 26
Kontaktadresse 2

- L -

Levelstufen festlegen 23
Literaturquellen 58
Lizenzarten 5

- M -

Maschinenparameter festlegen 22
MESOS deinstallieren 6
MESOS installieren 4
MESOS Pro 5
MESOS Starter 5
Meßuhren anschließen 25
Messung der Qualitätsmerkmale 25
Meßwerte eingeben 25
Meßwerte importieren 25
Mittelwertoptimierung 36

- N -

Neues Experiment anlegen 12
Numerische Auswertung 26

- O -

Optimierungsschritte 34
Optimierungsziele 10

- P -

Parameter festlegen	22
Parameter zur Prozesszentrierung	35
Parametereinflüsse	30
Prozessfenster	36
Prozessmodelle berechnen	28
Prozessmodelle grafisch darstellen	32
Prozessoptimierung	34
Prozesszentrierung	36
Prüfung der Ergebnisse	29

- Q -

Qualitätsfunktion darstellen	33
Qualitätsmerkmale festlegen	23
Qualitätsmerkmale messen	25

- R -

Reduzierte Versuchspläne	16
Reihenfolge der Menüpunkte	12
Robuste Einstellung	34

- S -

Schritte zur optimalen Maschineneinstellung	34
Schwankungsarme Maschineneinstellung	34
Signifikanztests	29
SKZ-Methode des integrierten Experiments	18
Statistische Tests	29
Streuungsarme Maschineneinstellung	34
Streuungsoptimierung	34

- T -

Teilezahl pro Versuchsreihe	23
Tipps zur Festlegung des Versuchsplans	21
Toleranzen festlegen	23

- U -

USB-Dongle	5
------------	---

- V -

Variationsbereich der Merkmale	30
Versuchsdurchführung	25

Versuchsplan festlegen	12
Versuchspläne, teilfaktoriell	16
Versuchspläne, vollfaktoriell	13
Versuchsumfang	23
Vollfaktorielle Versuchspläne	13
Vollständige Versuchspläne	13

- W -

Wahl des Versuchsplans	12, 21
Weiterführende Literatur	58

- Z -

Zeitbeschränkte Vollversion	5
Zentralpunkt	18
Zentrierung auf die Merkmalssollwerte	36
Zentrierungsparameter	35
Ziele der Optimierung	10
Zulässiger Verstellbereich der Parameter	36

