

**Metamodelle zur Optimierung der
Pressnahtlage bei
Verbundstrangpresssimulationen**

Christoph Begau

Algorithm Engineering Report

TR08-2-008

Dez. 2008

ISSN 1864-4503

Diplomarbeit

**Metamodelle zur Optimierung der
Pressnahtlage bei
Verbundstrangpresssimulationen**

**Christoph Begau
16. September 2008**

Erstgutachter
Prof. Dr. Günter Rudolph
Fakultät für Informatik
Lehrstuhl für Algorithm Engineering (Ls11)

Zweitgutachter
Dr.-Ing. Marco Schikorra
Fakultät Maschinenbau
Institut für Umformtechnik und Leichtbau

Fakultät für Informatik
Algorithm Engineering (Ls11)
Technische Universität Dortmund
<http://ls11-www.cs.uni-dortmund.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Hintergrund	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik	5
2.1	Strangpressen	5
2.1.1	Verbundstrangpressen	7
2.1.2	Simulation des Strangpressprozesses	9
2.1.3	Netzparametrisierung	12
2.2	Metamodellierung und Optimierung	13
2.2.1	Metamodelle	14
2.2.2	Einbindung von Metamodellen in die Optimierung	18
2.2.3	Versuchsplanung	19
2.2.4	Modellvalidierung	21
2.2.5	Auswahlkriterium	22
2.2.6	Abbruchbedingungen	24
2.2.7	Optimierung unter Randbedingungen	25
3	Bestimmung der Pressnahtlage	27
3.1	Bekannte Ansätze	27
3.2	Partikelverfolgung	29
3.2.1	Zellokalisierung	31
3.2.2	Interpolationsverfahren	33
3.2.3	Integrationsverfahren	35
3.2.4	Besonderheiten der Strangpresssimulationen	36
3.3	Pressnahterkennung durch die Partikelverfolgung	37
3.3.1	Segmentierung	39
3.3.2	Merkmalsextraktion	40
3.4	Vergleichsmetriken	43

4	Bestimmung der Randbedingungen	47
4.1	Pressnahtqualität	47
4.2	Zugspannung auf den Verstärkungselementen	48
4.3	Maximale Presskraft	51
4.4	Netzqualität	51
5	Parallele Auswertungen in Kriging-Metamodellen	53
5.1	GEI-Kriterium für stufenweise Auswertungen	54
5.2	Untersuchungen anhand von Testfunktionen	55
5.2.1	Branin-Funktion	56
5.2.2	Rosenbrock-Funktion	58
5.2.3	Hartmann-Funktion	59
5.3	Fazit	60
6	Optimierung	61
6.1	Aspekte der Implementierung	61
6.2	Optimierung der Pressnahtlage	65
6.2.1	Versuchsmodell 1	65
6.2.2	Versuchsmodell 2	72
6.2.3	Versuchsmodell 3	76
6.2.4	Zusammenfassung	79
7	Fazit und Ausblick	81
A	Testfunktionen	83
B	Streudiagramme der Rosenbrock-Funktion	85
C	Ergebnisse der Optimierungen	87
	Abbildungsverzeichnis	96
	Literaturverzeichnis	100
	Erklärung	100

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Die Verwendung von Leichtbaumaterialien erlangt in vielen Anwendungsbereichen, unter anderem der modernen Verkehrstechnik, eine immer größere Bedeutung. Steigende Anforderungen an Sicherheit und Funktionen erhöhen tendenziell das Gesamtgewicht und dadurch insbesondere den Treibstoffverbrauch. Um diesen Trend entgegenzuwirken, werden unterschiedliche Leichtbaukomponenten unter Einbezug verschiedener Materialien und Herstellungsverfahren verwendet [31].

Aufgrund seiner geringen Dichte und zugleich hohen Festigkeit eignen sich Aluminiumlegierungen besonders als Ausgangswerkstoff in der Leichtbaukonstruktion. Ein Beispiel hierfür stellen stranggepresste Aluminiumhohlprofile dar, die eine sehr komplexe Querschnittsgeometrie aufweisen können. Während die Festigkeit dieser Profile durch den Einsatz von hochfesten Legierungen gesteigert werden kann, ist eine Verbesserung der Steifigkeit aufgrund des nahezu legierungsunabhängigen E-Moduls von Aluminium nur durch eine Erhöhung des Profilquerschnitts zu erreichen [31]. Eine Alternative stellt der Verbund verschiedener Werkstoffe dar, um deren unterschiedliche Eigenschaften miteinander zu kombinieren. Ein solches Verfahren ist das Verbundstrangpressen, das im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10 „Integration von Trennen, Umformen und Fügen zur flexiblen Fertigung leichter Tragwerkstrukturen“ untersucht wird. Durch das Einbringen und Einbetten endloser Verstärkungselemente wie Drähte aus einem höherfesten Werkstoff in den Aluminiumwerkstoff wird eine stoff- und formschlüssige Verbindung erzeugt. Dieser Verbundwerkstoff besitzt bessere mechanische Materialeigenschaften als der unverstärkte Basiswerkstoff. Hierzu wird der Werkstofffluss innerhalb der Werkzeugeinläufe aufgeteilt und nach dem Einleiten der Verstärkungselemente mit diesen zusammen wieder unter hohem Druck und Temperaturen in der Schweißkammer verschweißt. Die Verstärkungselemente lagern sich hierdurch innerhalb des Profils entlang der Verschweißungszone der Teilstränge, der sogenannten Längspressnaht, ab [30]. Als Schwierigkeit stellte sich für

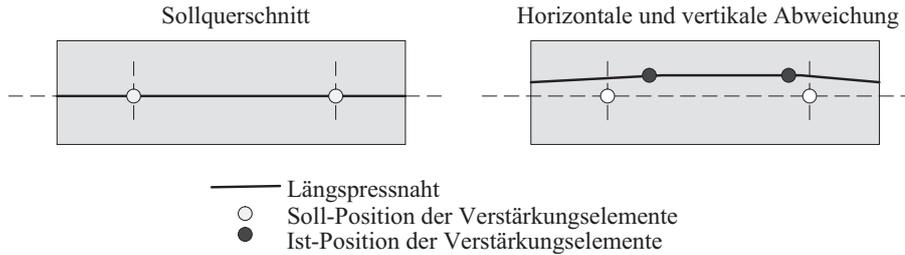


Abbildung 1.1: Problemdefinition: Die Lage der Längspressnaht und der Verstärkungselemente weicht sowohl horizontal als auch vertikal vom Soll ab. (nach [31])

diesen Prozess die exakte Positionierung der Verstärkungselemente innerhalb der Profile heraus. Bei komplexen Profilgeometrien treten deutliche Abweichungen, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu der gewünschten Lage, auf. Diese Abweichungen betreffen sowohl die Lage der Pressnaht, als auch, zum Teil daraus resultierend, die Lage der Verstärkungselemente. Diesen Effekt kann durch eine Modifikation der Werkzeuggeometrie entgegengewirkt werden. Durch eine Veränderung des Werkstoffflusses ist die Pressnahtlage beeinflussbar. In diesem Zusammenhang gewinnt die numerische Simulation auf Basis der Methode der Finiten Elementen (FEM) zunehmend an Bedeutung. Anstatt kosten- und zeitintensive Pressversuche durchzuführen, wird eine computergestützte Simulation für die Untersuchungen der Prozesscharakteristiken verwendet.

Für eine Korrektur der Positionierung der Verstärkungselemente werden Verfahren benötigt, mit denen die Abweichungen der Pressnahtlage anhand der Simulationen erfasst und ausgewertet werden können. Aktuell verfügbare Simulatoren sind nicht in der Lage Verstärkungselemente zu berücksichtigen. Stattdessen soll der Verlauf der Längspressnaht erfasst werden und dessen Verlauf, durch eine Optimierung, dem Soll angeglichen werden. Ohne derartige Verfahren ist eine automatisiert ablaufende Optimierung nicht möglich.

1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens für die Bestimmung und anschließende Optimierung der Längspressnahtlage innerhalb einer Strangpresssimulation. Für die Simulation des Strangpressens wird der kommerzielle FE-Code *HyperXtrude* verwendet. Die Optimierung der Pressnahtlage wird durch die Modifikation der Werkzeuggeometrie erzielt.

Aufgrund der hohen Simulationslaufzeit ist ein effizienter Umgang mit Simulationen entscheidend, um die Gesamtdauer der Optimierung in einem akzeptablen Rahmen zu halten. Die Zusammenhänge zwischen den Eingabeparametern und dem Ausgabewert sind unbekannt. Metamodelle sind in der Lage diesen Zusammenhang näherungsweise abzubilden und daraus eine optimale Parameterkonfiguration abzuleiten. Aus diesem Grund sollen derartige Verfahren für die Optimierung eingesetzt werden, da bekannt ist, dass sie

besonders in Zusammenhang mit Computersimulationen gut geeignet sind [13]. Deren Eignung für die Pressnahtlagenoptimierung soll untersucht werden, insbesondere im Hinblick auf die Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen und die Verwendung multipler paralleler Simulationen.

Neben der Lage der Längspressnaht sollen für eine Optimierung nach Möglichkeit weitere Randbedingungen erfasst werden. Vorgesehene Randbedingungen umfassen sowohl die Qualität der erzielten Verschweißung und die zu erwartende Zugbelastung auf den eingebetteten Verstärkungselementen.

Für die Optimierung wird die Werkzeuggeometrie anhand vorab definierter Parameter modifiziert und deren Einfluss durch erneute Simulation überprüft. Die Definition geeigneter Parameter ist ebenso wie die Erstellung von Strangpresssimulationsmodellen nicht Bestandteil dieser Arbeit. Diese werden durch einen erfahrenen Werkzeugentwickler vorab erstellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel *Stand der Technik* werden zuerst die Grundlagen des Verbundstrangpressens und dessen Simulation sowie die Optimierung mit Metamodellen beschrieben. Kapitel 3 enthält eine detaillierte Beschreibung zu der realisierten Lösung für die Bestimmung der Pressnaht in FE-Simulationen des Strangpressens. Zusätzliche Eigenschaften des Strangpressprozesses und deren Umsetzung als Restriktion der Optimierung werden in Kapitel 4 behandelt. Die beiden folgenden Kapitel behandeln die Vorbereitung und anschließende Umsetzung der Optimierung. Kapitel 5 untersucht die parallelisierte Auswertung auf Krigingmetamodelle, Kapitel 6 enthält weitere Details zur Realisierung und die Ergebnisse der Pressnahtlagenoptimierung. Den Abschluss bilden ein Fazit und eine Übersicht über neue und offene Fragen, die während der Entstehung dieser Arbeit entstanden, in Kapitel 7.

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel bietet im ersten Abschnitt einen Einblick in die Technik des Verbundstrangpressens sowie dessen Simulation. Der zweite Abschnitt enthält einen Überblick auf die in der Literatur beschriebenen Verfahren für die Metamodellierung und deren Verwendung in der Optimierung.

2.1 Strangpressen

Strangpressen wird nach DIN 8583 den Durchdrückverfahren zugeordnet. Bei diesem Verfahren wird ein Pressblock durch einen Aufnehmer (Rezipient) umschlossen und unter hohem Druck plastisch verformt, indem er durch eine formgebende Öffnung (Matrize) gedrückt wird. Als Werkstoff kommen im Bereich des Leichtbaus besonders Aluminiumlegierungen zum Einsatz. Eine weitere Unterteilung des Strangpressens kann hinsichtlich der Umformtemperatur des Werkstoffes, der Profilgeometrie und der Relativbewegung des Werkstoffflusses zur Werkzeugbewegung vorgenommen werden [15].

Bei der letzten Zuordnung wird zwischen dem direkten, dem indirekten und seltener zusätzlich dem hydrostatischen Strangpressen unterschieden. Von diesen ist das wichtigste und meisteingesetzte Verfahren das direkte Strangpressen. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Werkzeugaufbau, bei dem der Werkstoffblock direkt in die Richtung des Pressstempels durch die Matrize gedrückt wird.

Beim Einsatz von Matrizen mit einem hohen Öffnungswinkel bilden sich *tote Zonen* aus, in denen kein Werkstofffluss vorliegt. An diesen Bereichen treten so hohe Schubspannungen auf, dass der Werkstoffzusammenhalt aufgelöst wird und nachfließender Werkstoff entlang der toten Zone abschert. Die Matrizengeometrie hat auf die Ausbildung dieser Zone einen hohen Einfluss. Weitere tote Zonen können an den Außenflächen des Werkzeugs auftreten. Aufgrund der hohen Haftneigung von Aluminium zu Stahl kommt an Stellen hoher Flächenpressung zu einer Haftreibung [31]. Die Reibung des Werkstoffes an der Werkzeugoberfläche besitzt zudem einen entscheidenden Einfluss auf das Fließverhal-

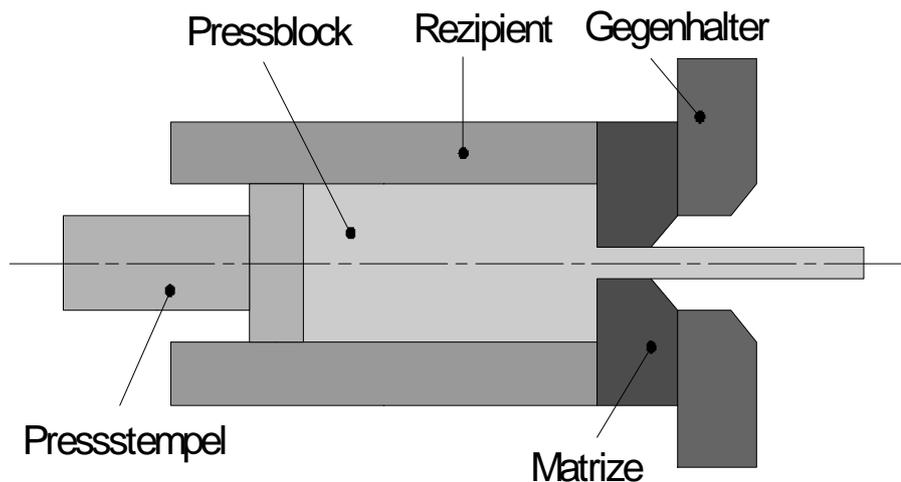


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des direkten Strangpressens

ten innerhalb des Pressblockes. Dieser ist nicht über den gesamten Querschnitt konstant, sondern nimmt aufgrund der Reibung zu den Werkzeugrändern hin ab (siehe Abbildung 2.2). Durch Strangpressen sind unterschiedlich komplexe Profilgeometrien herstellbar. Diese reichen von einfachen runden Vollprofilen, über offene Profile bis hin zu komplexen Hohlprofilen. Für die Herstellung von Hohlprofilen sind angepasste Werkzeuge nötig. Bei symmetrischen Hohlprofilen kann über einen Dorn gepresst werden, bei komplexeren Geometrien wird stattdessen ein Schweißkammerverfahren verwendet [31].

Bei diesen Verfahren wird der Werkstoff zuerst durch mehrere Kammern gedrückt und in einer Schweißkammer wieder zu einem zusammenhängenden Profil vereinigt. Die innere Kontur des Hohlprofils wird mittels eines Dorns erzeugt, der über Stege innerhalb des Werkzeuges fixiert ist. Die Verschweißungszonen zwischen den einzelnen Werkstoffflüssen werden als Längspressnaht bezeichnet. Diese ist von der Querpressnaht zu unterscheiden, die entsteht wenn ein weiterer Werkstoffblock angepresst wird, ohne den Pressrest des vorherigen Blockes aus der Schweißkammer zu entfernen. Die Querpressnaht ist innerhalb dieser Arbeit nicht weiter von Interesse, somit wird bei der Verwendung des Begriffs Pressnaht ausschließlich die Längspressnaht bezeichnet.

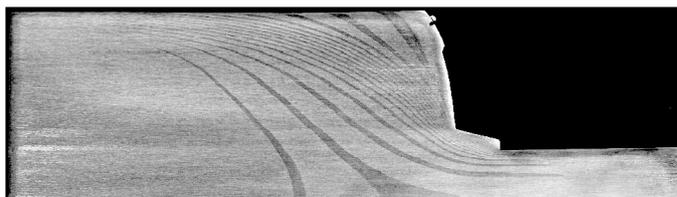


Abbildung 2.2: Deformation der Fließlinien in einem Pressblock. Der Werkstoff fließt an der Werkzeugoberfläche aufgrund von Reibung langsamer als im Zentrum [30]

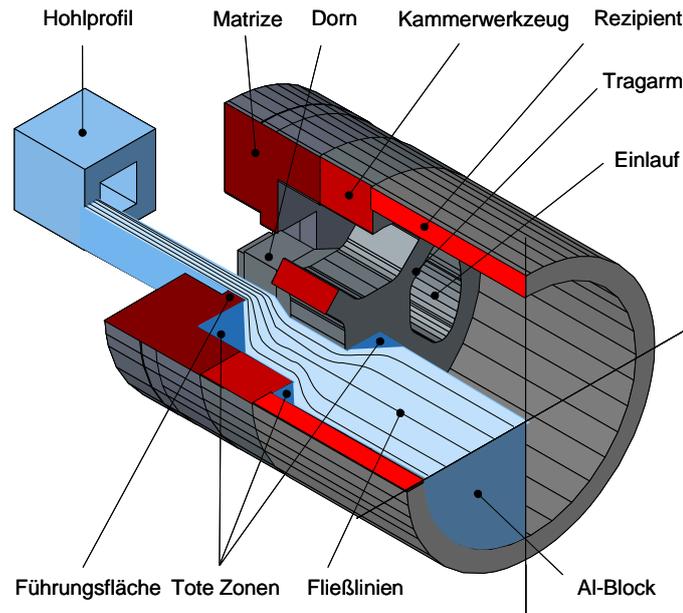


Abbildung 2.3: Aufbau eines Kammerwerkzeugs

2.1.1 Verbundstrangpressen

Für die Herstellung von Verbundprofilen durch Strangpressen existieren unterschiedliche Ansätze. Der Pressblock selbst kann schon in einer verstärkten Form vorliegen, indem beispielsweise homogene kurzfasrige Keramikpartikel in die Aluminiumlegierung eingebettet werden. Ein derartig präparierter Werkstoff ist allerdings aufwendig herzustellen, führt zu einem starken Verschleiß an den Presswerkzeugen und die Festigkeit ist aufgrund nicht gleichmäßiger Verteilung der Partikel nicht kontinuierlich.

Eine Alternative stellen endlos verstärkte Strangpressprofile dar. In diesem Fall werden endlose hochfeste Verstärkungselemente innerhalb des Profilquerschnitts eingebettet, um die mechanischen Eigenschaften des Profils zu verbessern. Als Verstärkungselemente werden insbesondere Drähte verwendet. Seltener kommen Litzen oder Seile zum Einsatz, da diese zu häufigen Abrissen und somit zu einer niedrigen Stabilität des Fertigungsprozesses neigen [31].

Für die Einbettung von Verstärkungselementen in ein Profil werden modifizierte Kammerwerkzeuge verwendet (siehe Abbildung 2.4). Durch seitliche Zuführkanäle werden die Verstärkungselemente über den Pressdorn in die Schweißkammer eingebracht. Die Verstärkungselemente lagern sich zwischen den zusammenfließenden Materialströmungen aus den einzelnen Kammern ab. Im Profilquerschnitt gesehen liegen sie innerhalb der Längspressnaht. Die Lage der Verstärkungselemente kann abhängig vom Einsatzgebiet oder einer späteren Weiterverarbeitung des Profils von entscheidender Bedeutung sein. Bei Abweichungen kann ein Verstärkungselement beispielsweise durch anschließende Bohrungen im Profil beschädigt werden.

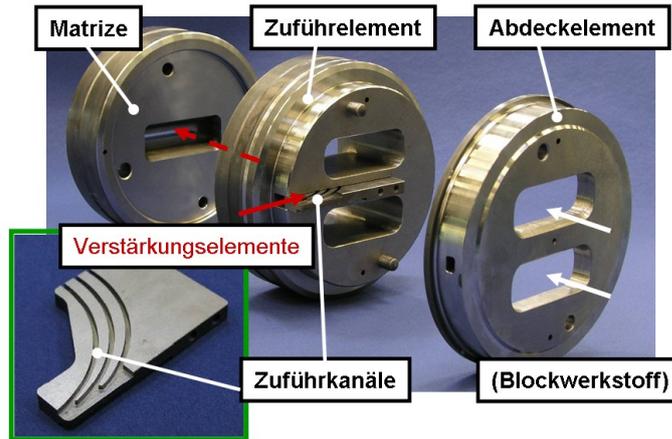


Abbildung 2.4: Werkzeug für die Strangpressung eines verstärkten Flachprofils

Positionierung der Verstärkungselemente Diese Lage der Verstärkungselemente ist abhängig von dem Verlauf der Längspressnaht. Dieser Verlauf wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Besonders die Geometrien der Einläufe sowie der Schweißkammer besitzen einen deutlichen Einfluss auf den Pressnahtverlauf. Weitere Faktoren sind zum Beispiel die Werkstofftemperatur oder die Pressgeschwindigkeit. In Experimenten traten bei der Pressung von Profilen deutliche Abweichungen zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Pressnahtverlauf auf. Hierdurch sind auch die Verstärkungselemente sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung von ihren Sollpositionen verschoben. In Abbildung 2.5 sind die Abweichungen zwischen dem gewünschten und dem erzielten Pressnahtverlauf am Beispiel eines Doppel-T Profils deutlich zu erkennen. Eine Optimierung der Pressnahtlage ist in diesem Fall wünschenswert. Physikalische Experimente sind zu zeitintensiv und aufgrund der aufwendigen Presswerkzeuge auch zu kostspielig um um-

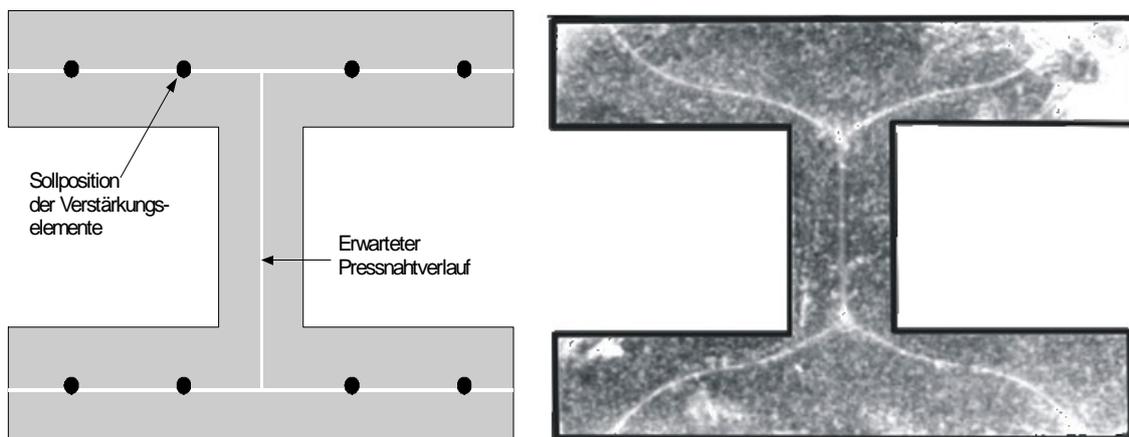


Abbildung 2.5: Erwarteter und realer Pressnahtverlauf für ein Doppel-T Profil. Der reale Pressnahtverlauf ist durch Ätzung sichtbar gemacht worden.

fangreiche Analysen durchzuführen. Für eine Optimierung der Werkzeuggeometrie mit dem Ziel eine geringere Abweichung der Pressnahtlage, und damit der Verstärkungselemente, zu erzielen, ist deshalb eine computergestützte Simulation vorzuziehen.

2.1.2 Simulation des Strangpressprozesses

Simulationen eines physikalischen Prozesses setzen ein theoretisches Modell voraus, welches die realen Beobachtungen erklären kann. Eine analytische Modellierung des Strangpressprozesses gelang bisher aufgrund komplexer Randbedingungen nur für stark vereinfachte Profile.

Durch die Weiterentwicklung der Computerhardware und der Simulationssoftware ist eine Untersuchung des Strangpressprozesses mittels der Methode der finiten Elemente (Finiten-Elemente-Methode FEM) möglich geworden. Dieses Verfahren stellt ein modernes und weitverbreitetes Berechnungsverfahren in einer Vielzahl von Ingenieurwissenschaften dar.

Die FE-Methode eignet sich für die Berechnung einer Vielzahl von physikalischen Problemstellungen, deren Verhalten anhand einer Differenzialgleichung beschrieben werden kann. Die Lösung dieser Gleichung wird mit numerischen Verfahren vorgenommen.

Das Grundgebiet des Problems wird dazu in eine beliebig große Anzahl finiter Unter-elemente unterteilt (Diskretisierung). Für jedes Element werden lokale Ansatzfunktionen abhängig von der Art des Problems definiert. Zusammen mit zusätzlichen Rand- und Nebenbedingungen ergibt sich daraus ein Gleichungssystem, welches numerisch approximativ gelöst wird. Die Gesamtlösung des Problems ergibt sich als eine Summierung der einzelnen Teillösungen.

An dieser Stelle sollen ausschließlich wichtige Aspekte der FEM für die Simulation des Strangpressprozesses und der daraus zu erzielenden Pressnahterkennung vorgestellt werden. Für eine allgemeine Beschreibung der Finiten Elemente Methode wird auf weiterführende Literatur verwiesen [35][10].

Modellierung des Werkstoffflusses Derzeit verwendete FE-Simulationen für das Strangpressen unterscheiden sich in der Art, wie der Werkstofffluss modelliert wird. Dabei wird zwischen der Lagrange- und der Eulerformulierung unterschieden [30].

Bei der Lagrangeformulierung wird der materielle Fluss beschrieben. Für einen gedachten Partikel des Werkstoffs ist in dieser Formulierung zu jedem Zeitpunkt bekannt, an welchem Punkt er sich innerhalb des Kontrollvolumens befindet. Diese Orte beschreiben eine Bahnlinie, die ein Partikel zwischen dem Beginn und dem Ende der Simulation durchläuft.

Vorteile der Lagrangeformulierung liegen in der einfachen Beschreibung von Randbedingungen wie beispielsweise veränderlichen Kontaktbedingungen. Aufgrund der Bewegung der Punkte wird das zugrundeliegende FE-Netz permanent verformt. Die Netzdeform-

mation ist allerdings problematisch für Prozesse wie das Strangpressen, bei denen große Umformungen auftreten. Die Qualität der Simulation ist im hohen Maße abhängig von der Abweichung der Einzelemente von ihrer jeweiligen Idealform. Degenerieren die Elemente zu stark, nimmt die Qualität der Simulation stark ab. Eine Lösung dieses Problems liegt in einer adaptiven Neuvernetzung. Sind die Netze zu sehr deformiert, werden diese durch ein neues unverzerrtes Netz ersetzt. Der entscheidende Nachteil der Lagrange-Formulierung ist der enorme Bedarf an Rechenkapazität, der für eine derartige Simulation benötigt wird.

Die zweite Formulierung nach Euler beschreibt stattdessen den räumlichen Fluss. Hierbei werden nicht die Bewegung einzelner Partikel sondern die Materiebewegung innerhalb eines Elementes beschrieben. Eine Integralkurve über ein Geschwindigkeitsfeld bezeichnet eine Stromlinie, die ein Partikel zu diesem Zeitpunkt verfolgt. Die Beobachtungen sind ortsfest, das Netz wird nicht deformiert. Für das Element wird die lokal stattfindende Veränderung über einen Zeitraum beschrieben. Dies kann beispielsweise ein Geschwindigkeitsvektor für den durchfließenden Werkstoff sein.

Die Euler-Formulierung wird besonders für fluidmechanische Berechnungen verwendet, da hierbei lokal auftretende Phänomene leichter zu beobachten sind. Deutliche Vorteile gegenüber der Lagrangeformulierung ergeben sich in einer einfachen Abbildung stationäre oder quasistationäre Zustände. In einem solchen Zustand ändern sich die Prozessgrößen über einen definierten Zeitraum innerhalb der Elemente nicht und können ohne weitere Iterationen der Berechnung durchgeführt werden.

Modellierung der Reibung Einen wichtigen Einfluss auf die Simulationsergebnisse besitzt die Modellierung der Reibung. Reibung tritt an allen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Presswerkstoff auf und ist neben der Werkzeuggeometrie, der Temperatur und der Pressgeschwindigkeit ein wichtiger Einflussfaktor für die Lage der Verbundentstehung [30].

In der Literatur existiert kein einheitliches Reibmodell für die Strangpresssimulation, sondern es kommen mehrere Ansätze in Frage. Der am häufigsten verwendete Ansatz ist die *Coulomb-Reibung*.

$$|\tau_R| = \mu \cdot |\sigma_N| \quad (2.1)$$

Die Reibschubspannung hängt proportional von der zur Oberflächennormalen orientierten Spannung und einem Reibkoeffizienten μ ab. Für den Fall $\tau \leq \tau_r$ liegt eine Haftreibung vor, in diesem Fall kommt es zu keiner Relativbewegung der Körper.

Das zweite im Bereich der Strangpresssimulation verwendete Verfahren ist die von der Fließbedingung nach Tresca abgeleitete *Tresca-Reibung*.

$$|\tau_R| = m \cdot k_y \text{ mit } 0 \leq m \leq 1 \quad (2.2)$$

In diesem Modell entspricht die Reibschubspannung einer konstanten Funktion. Der Parameter k_y hängt von der Fließspannung k_f ab. Entweder wird $k_y = 0,5k_f$ nach der

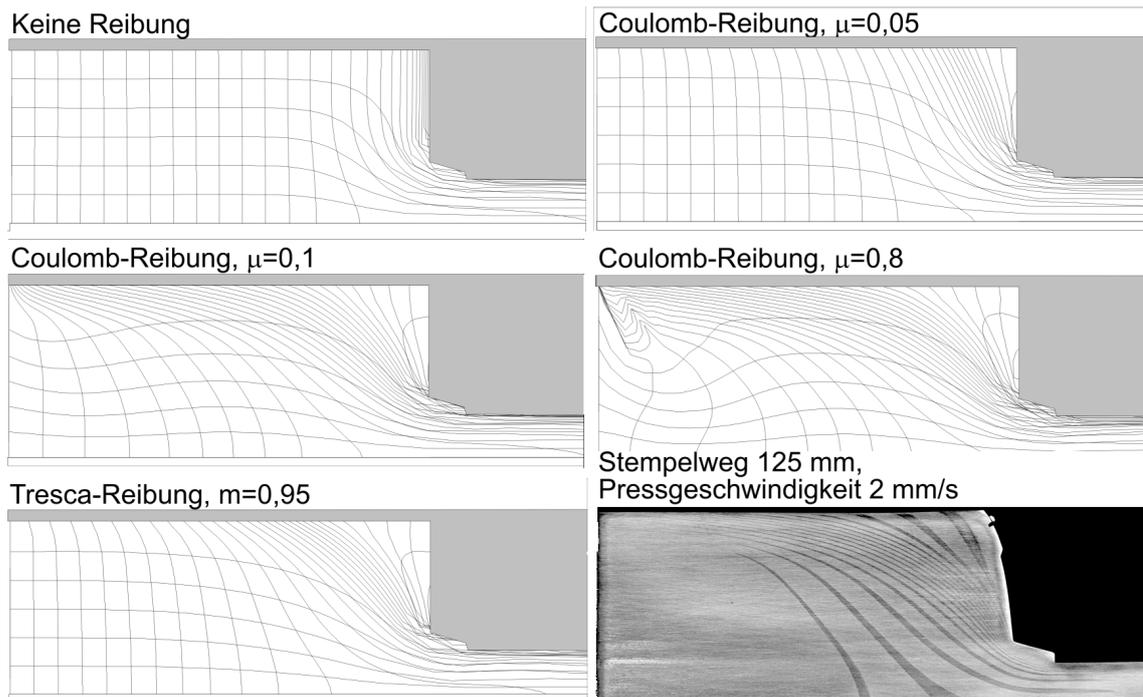


Abbildung 2.6: Deformation der Fließlinien in der Simulation bei unterschiedlicher Reibung, rechts unten zum Vergleich ein realer Pressversuch (aus [30])

Fließbedingung nach Tresca oder $k_y = 0,577k_f$ für die Fließbedingung nach von Mises angenommen [11]. Durch den Parameter m kann die notwendige Schubfließspannung zwischen einem Gleiten ($m = 0$) und einer voller Haftung ($m = 1$) skaliert werden. Zusätzlich existieren noch Kombinationen dieser beiden Modelle, die aber im Fall des Strangpressens selten verwendet werden.

Über die für die Strangpresssimulation geeigneten Koeffizienten herrscht in der Literatur keine Einigkeit. Eine Literaturübersicht zur Simulation des Aluminiumstrangpressens und der darin verwendeten Reibmodell und Koeffizienten enthält [30]. Die verwendeten Koeffizienten der Coloumb-Reibung differieren zwischen $\mu = 0,05$ und $\mu = 0,9$, für die Tresca-Reibung zwischen $m = 0,2$ und $m = 1$.

Vernetzung Der Prozess der Modelldiskretisierung in endliche Teilelemente wird auch Vernetzung genannt. Das Problemgebiet wird in einfachere geometrische Körper unterteilt. Zweidimensionale Gebiete werden typischerweise in Dreiecke oder (konvexe) Vierecke unterteilt, für dreidimensionale Körper werden stattdessen Tetraeder oder Hexaeder für eine Vernetzung verwendet. Andere Elementtypen sind ebenfalls möglich, für die Strangpresssimulation allerdings unüblich. Auch Netze mit gemischten Elementtypen, die sowohl Hexaeder als auch Tetraeder enthalten, sind möglich. Der Grad der Diskretisierung, also die Größe der Elemente, ist entscheidend für die Genauigkeit der FE-Simulation. Bei zu geringer Diskretisierung können lokale Effekte innerhalb eines einzelnen großen Elements nicht

abgebildet werden. Durch eine Netzverfeinerung sind solche Effekte besser zu erfassen, der Rechenbedarf für die Lösung steigt jedoch aufgrund der höheren Anzahl an Elementen und Knoten im Netz stark an. Als Kompromiss kann eine adaptive Netzverfeinerung verwendet werden. Einzelne kritische Bereiche des Problems werden feiner diskretisiert, als Bereiche die für die Simulation wenig Einfluss besitzen. Beispielsweise kann in der Strangpresssimulation eine höhere Vernetzung innerhalb der Schweißkammer verwendet werden, als im Pressblock, um die Pressnahtentstehung besser abbilden zu können. Bei der Vernetzung ist auf eine ausreichende Qualität zu achten, die erzeugten Elemente dürfen nicht zu stark von ihrer Idealform abweichen. Ansonsten sind numerische Instabilitäten in einer FE-Simulation zu erwarten.

2.1.3 Netzparametrisierung

Die Optimierung der Pressnahtlage soll durch eine Modifikation der Einläufe und der Schweißkammergeometrie erzielt werden. Für eine Optimierung ist eine Parametrisierung dieser Modifikationen erforderlich. Hierdurch wird die Veränderung des Werkzeugs durch einen kompakten Satz an Eingabeparametern beschrieben, für den ein Optimierungsalgorithmus eine Konfiguration bestimmt, welche die Pressnahtabweichung minimiert. Eine solche Netzparametrisierung kann derzeit nicht automatisiert generiert werden. Stattdessen wird diese durch einen Konstrukteur auf Grundlage seiner Erfahrung definiert.

Eine Technik, um eine solche parametrisierte Netzbeschreibung zu erzeugen, stellt das sogenannte *Morphing* dar [2]. Mit dieser Funktion ist es möglich, Geometrie- und Größenveränderungen eines FE-Modells in einer intuitiven Form zu beschreiben. Der Vorteil dieses Verfahren ist, dass keine aufwendige Neuvernetzung nötig ist, sondern das nur die Elemente eines bestehenden Netzes verformt werden.

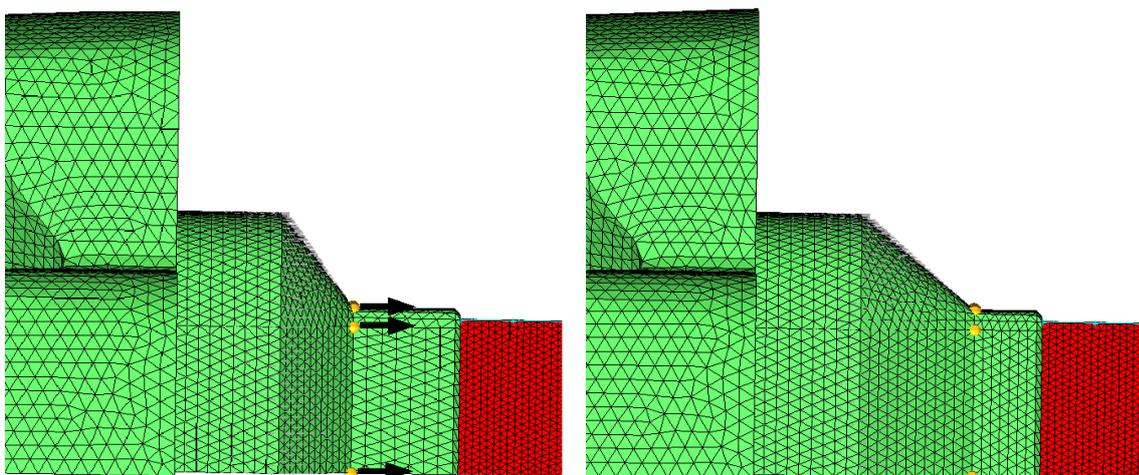


Abbildung 2.7: Anwendung des Morphings: Durch Verschiebung der Kontrollpunkte wird die Schweißkammergeometrie verändert

Für die Erstellung eines Morphingparameters wird eine Knotenmenge des Netzes selektiert und einem Kontrollpunkt zugewiesen. Bei einer Verschiebung des Kontrollpunktes werden die zugehörigen Knoten angepasst. Dabei werden Knoten nahe des Kontrollpunktes stark verschoben, während weiter entfernte Knoten nur eine geringere Verschiebung erfahren. Hierdurch werden ungünstige Netzverformungen vermieden. Das Modell kann auf diese Weise lokal gestaucht werden. Es ist möglich, dass ein Knoten von mehreren Kontrollpunkten abhängig ist, um komplexe Modellgeometrieänderungen zu ermöglichen. Ein solcher Morphingparameter kann als ein skalarer Parameter verwendet werden, indem dem Kontrollpunkt ein fester Richtungsvektor zugewiesen wird. Die Verschiebung der abhängigen Knoten ist dann entsprechend ein Bruchteil dieses Vektors, abhängig von seinem Abstand zum Kontrollpunkt. Hierdurch ist eine einfache Parametrisierung gegeben. Durch eine Verschiebung des Kontrollpunktes mit einem gegebenen Wert wird das Netz entsprechend angepasst. Aufgrund der Kommutativität der Verschiebungen können auch verschiedene Morphingoperationen hintereinander ausgeführt werden.

Verwendete FE-Systeme Für die Erstellung, Parametrisierung und die Simulation wird das kommerzielle FE-Softwarepaket „HyperWorks 8.0“ des Herstellers *Altair* verwendet. Der darin enthaltene FE-Code HyperXtrude für die Simulation von Strangpressmodellen basiert auf der Euler-Formulierung. MSC.Superform, ein alternativer FE-Code mit Lagrange-Formulierung, ist aufgrund der hohen Simulationszeiten im Rahmen dieser Arbeit nicht für die Erkennung der Pressnahtlage untersucht worden.

Die Verstärkungselemente können in der Simulation mit HyperXTrude nicht berücksichtigt werden. Es wird ein homogener Werkstofffluss modelliert, wie er in der unverstärkten Strangpresssimulation verwendet wird. Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Die Lage der Verstärkungselemente auf der Pressnaht ist nicht bekannt, ebenso wenig die auf sie wirkenden Belastungen.
- Verstärkungselemente verhalten sich wie ein Störkörper im Strangpressprozess, in der Simulation werden diese jedoch nicht berücksichtigt. Ausgehend von früheren Untersuchungen wird dieser Störeffekt aber als gering betrachtet und ignoriert. [30].

Die Lage der Verstärkungselemente kann somit nur indirekt über den Verlauf der Pressnaht geschätzt und nicht direkt optimiert werden. Stattdessen ist als Lösung dieses Problems eine Erfassung und Optimierung der Pressnahtlage vorgesehen.

2.2 Metamodellierung und Optimierung

Optimierungsaufgaben treten in unterschiedlichster Form in technischen Systemen auf. Ein Zusammenhang zwischen den Eingabeparametern sowie den Ausgabewerten ist dabei zumeist nicht exakt bekannt und kann somit auch nicht in einem geschlossenen Ausdruck be-

schrieben werden. Als Ausweg werden in komplexen Systemen stattdessen experimentelle Auswertungen vorgenommen. Diese können sowohl physikalischer Natur, oder als Computersimulationsmodell vorliegen. Eine solcher Ansatz wird als „Black-Box“-Simulation bezeichnet. Zu einem gegebenen Satz an Eingabewerten, werden die zugehörigen Antworten geliefert. Solche Simulationen sind typischerweise sehr zeitintensiv. Werden physikalische Experimente verwendet, entstehen zumeist zusätzlich noch hohe Kosten.

Unter diesen Bedingungen ist die Anzahl zeitlich und wirtschaftlich vertretbarer Funktionsauswertungen für eine Optimierung sehr beschränkt und stellen somit eine besondere Herausforderung dar. Die FE-Simulation des Strangpressen stellt ein Beispiel für eine solche „Black-Box“-Simulation dar. Eine Eigenschaft dieses Computermodells ist der Determinismus. Für eine identische Eingabe führen wiederholte Auswertungen zu identischen Ergebnissen.

Um mit möglichst wenigen Auswertungen dennoch eine Optimierung durchführen zu können, wird ausgehend von Punkten, deren Funktionswerte bereits bestimmt sind, eine Approximation für den Zusammenhang aus Eingangs- und Ausgangswerten hergestellt werden. Solche Annäherung stellen ein Modell für eine Simulation dar, welches selbst ein Modell für ein reales System darstellt. Deshalb werden diese Techniken häufig als *Metamodell* bezeichnet. Weitere Bezeichnungen wie Approximationsmodell oder *Surrogate-Modell* sind ebenfalls geläufig und weitgehend synonym zu verwenden [29][27]. Anhand eines Metamodells kann eine Schätzung der Ausgabe für einen bisher nicht untersuchten Satz an Eingabeparametern vorgenommen werden und dadurch die Optimierung geplant werden.

2.2.1 Metamodelle

Es existieren unterschiedliche Ansätze für die Generierung von Metamodellen. Im folgenden Abschnitt werden Verfahren vorgestellt, die für die Optimierung der Pressnahtlage verwendet werden. Ausgegangen wird von der Annahme, dass ein Metamodell einer k -dimensionalen deterministischen Funktion gebildet werden soll. Für n Punkten $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)})$ sind die zugehörigen Funktionswerte $y^{(i)} = y(x^{(i)})$ bekannt. Ein Metamodell wird durch $Y(x) = \hat{y}(x) + \epsilon(x)$ beschrieben. Dabei ist $\hat{y}(x)$ ein geschätzter Funktionswert für einen Punkt x und $\epsilon(x)$ bezeichnet einen Fehlerterm für diese Schätzung.

Regressionsmodelle Die wohl einfachsten Metamodelle stellen Regressionsmodelle dar. Ein solches Modell besteht aus einer Linearkombination von m gewählten Funktionen $f_i : \mathbb{R}^k \mapsto \mathbb{R}$. Die Schätzung eines Regressionsmodell ist die Realisierung des stochastischen Prozesses [20]

$$\hat{y}(x) = \beta_1 f_1(x) + \dots + \beta_m f_m(x) \quad (2.3)$$

$$= f(x)^T \beta \quad (2.4)$$

Der Vektor β bezeichnet die Regressionskoeffizienten. Diese sind unbekannt und müssen anhand der gegebenen Daten angepasst werden. Diese Anpassung geschieht mittels der *Methode der kleinsten Quadrate*, deren Ziel die Minimierung der Fehlerquadratsumme zwischen der Beobachtung und der Schätzung des Modells ist.

$$\min \sum_{i=0}^k (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2 \quad (2.5)$$

Häufig werden polynomiale Regressionmodelle verwendet. Für einen linearen Zusammenhang von k Eingabeparametern lauten die Funktionen f_i dann.

$$f_1(x) = 1, f_2(x) = x_1, f_3(x) = x_2, \dots, f_{k+1}(x) = x_k \quad (2.6)$$

In diesem Fall beträgt $m = k + 1$. Bei Verwendung von Polynomen höheren Grades müssen die Funktionen entsprechend gewählt werden. Besonders interessant ist dieser Ansatz, wenn bekannt ist, oder zumindest vermutet werden kann, dass ein polynomiale Zusammenhang zwischen Eingabeparameter und Ausgabewert existiert. Eine solche Vermutung kann beispielsweise aufgrund vorheriger Experimente begründet sein. Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten ergibt sich über die Lösung des folgenden Gleichungssystems:

$$\begin{pmatrix} f_1(x^{(1)}) & f_2(x^{(1)}) & \dots & f_m(x^{(1)}) \\ f_1(x^{(2)}) & f_2(x^{(2)}) & \dots & f_m(x^{(2)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(x^{(n)}) & f_2(x^{(n)}) & \dots & f_m(x^{(n)}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

oder in Matrixschreibweise $X \cdot \beta = y$. Mittels der Methode der kleinsten Quadrate werden die Residuen minimiert, und man erhält als Lösung den Vektor β der geschätzten Regressionskoeffizienten.

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (2.8)$$

Mit diesem Vektor β ist eine Schätzung $\hat{y}(x)$ für einen nicht untersuchten Punkt x möglich.

$$\hat{y}(x) = \beta \cdot x^T \quad (2.9)$$

Ein solches Regressionsverfahren kann mit jedem beliebigen Polynomgrad vorgenommen werden. Der Modellfehler $y_k - \hat{y}_k$ wird typischerweise durch ungenügende Ansatzfunktionen oder Messfehler begründet.

Viele Funktionen können allerdings nicht ausreichend genau durch Polynome beschrieben werden. Eine Möglichkeit die Flexibilität der Polynome zu erhöhen liegt in hohen Polynomgraden. Mit n Punkte ist die Lösung eines Polynoms $(n-1)$ ten Grades möglich. Polynome hohen Grades neigen allerdings zu einer starken Oszillation und Überspringen zwischen den Stützstellen und stellen selten ein sinnvolles Modell dar. Eine Alternative liegt in der Unterteilung des Suchraumes in einzelne Teilbereiche für die separate Modelle erstellt werden [29]. Für weitere Details und Hintergründe auch für nichtlineare Regressionsmodelle wird beispielsweise auf [8] verwiesen.

Kriging Ein weiteres Metamodellierungsverfahren, welches in jüngster Zeit vermehrt untersucht und verwendet wird, ist *Kriging*. Der Name bezieht sich auf den Geologen Daniel G. Krige der zuerst diesen Ansatz für Schätzungen über das Vorkommen von Bodenschätzen verwendete [16]. Weitere verwendete Bezeichnungen sind in Hinblick auf die verwendeten Techniken *Gauss-Prozess-Modell* oder DACE (*Design and Analysis of Computer Experiments*) nach der gleichnamigen Arbeit von Sacks et al., welche diesen Ansatz besonders auf dem Gebiet der Computereperimente populär machte [25].

Für die Mehrzahl der Metamodelle wird angenommen, dass der Fehler $\epsilon(x)$ unabhängig und normalverteilt ist. In dieser Eigenschaft unterscheiden sich die Krigingmodelle. Bei der Verwendung von Computereperimenten sind Messfehler und Rauschen nicht oder nur sehr gering vorhanden. Der Vorhersagefehler ist ausschließlich durch einen Fehler im Modell zu begründen. Wird der Fehler eines Punkts x durch $\epsilon(x) = \hat{y}(x) - y(x)$ bestimmt, existieren keine vernünftigen Gründe anzunehmen, dass der Modellierungsfehler $\epsilon(x + \delta)$ an einem nahen Punkt deutlich abweicht. Der Fehler ist als systematisch anzusehen und nicht unabhängig. Zwischen räumlich naheliegende Punkte kann eine Korrelation angenommen werden, die anhand eines Gaussprozesses modelliert werden kann [13]. Das Krigingmetamodell setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Einem typischerweise polynominellen Regressionsterm und einem Gaussprozess $Z(x)$:

$$Y(x) = \sum_{i=0}^k \beta_i f_i(x) + Z(x) \quad (2.10)$$

Der Gaussprozess wird angenommen mit dem Erwartungswert $E(Z(x)) = 0$ und einer Kovarianz von

$$V(w, x) = \sigma_p^2 R(w, x) \quad (2.11)$$

zwischen $Z(w)$ und $Z(x)$. σ_p^2 bezeichnet die Prozessvarianz und $R(w, x)$ die Korrelation zwischen den Punkten w und x . Ein Krigingmodell ist nicht nur in der Lage einen Schätzer $\hat{y}(x)$ für einen bisher nicht untersuchten Punkt x zu liefern, sondern zusätzlich auch eine Schätzung über dessen Varianz $\sigma^2(x)$. Um diese Eigenschaften zu erklären, bedarf es zuerst einiger Definitionen.

Zuerst muss für ein Krigingmodell eine passende Korrelationsfunktion gewählt werden, mit dem der Zusammenhang aus 2.11 beschrieben wird. Eine solche Funktion drückt aus, wie stark der Einfluss zwischen zwei Punkte in Abhängigkeit von ihrem Abstand ist. Die Verwendung des euklidischen Abstandes ist möglich, es werden in vielen Fällen allerdings schneller abfallende Funktionen verwendet. Die am häufigsten in DACE verwendete Funktion lautet:

$$R(w, x) = \sum_{i=0}^k e^{-\theta_i |w_i - x_i|^p} \quad (2.12)$$

mit $\theta_i > 0$ und $0 \leq p \leq 2$. Mit steigenden Werten θ verringert sich die Korrelation in Abhängigkeit zum Abstand zwischen den Punkten x und w . Für eine Schätzung an

einem Punkt w hat der Punkt x dann einen geringeren Einfluss. Der Parameter p stellt eine Glättung der Kurve da. Es ist nicht ungewöhnlich dieser Parameter auch konstant zu wählen. Für die n bekannten Punkte kann daraus eine $n \times n$ Matrix R erstellt werden, welche die Korrelation aller Punkte untereinander enthält.

$$R = \{R(x_i), R(x_j)\}, 1 \geq i \geq n; 1 \geq j \geq n \quad (2.13)$$

$$r(x) = [R(x^{(1)}, x), \dots, R(x^{(n)}, x)]^T \quad (2.14)$$

Ferner wird eine $(n \times k)$ -Regressionsmatrix F definiert.

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (2.15)$$

$$F = [f^T(x^{(1)}), \dots, f^T(x^{(n)})]^T \quad (2.16)$$

Das Ziel ist einen *besten linearen erwartungstreuen Schätzer* (engl. best linear unbiased predictor (BLUP)) zu finden. Erwartungstreu bedeutet, dass für einen bekannten Punkt x das Modell den korrekten Wert y als Schätzer erzeugt. Als linearer Schätzer $\hat{y}(x)$ kann eine Linearkombination aller bisher bekannter Beobachtungen $y = [y^{(1)}, \dots, y^{(n)}]$ verwendet werden.

$$\hat{y}(x) = c_x^T y \quad (2.17)$$

Der BLUP wird erzielt durch die Wahl des Vektors c_x der den mittleren quadratischen Fehler

$$MSE[\hat{y}(x)] = E[c_x^T y - Y(x)]^2 \quad (2.18)$$

unter der Randbedingung der Erwartungstreue

$$E[c_x^T y] = E[Y(x)] \quad (2.19)$$

minimiert[25]. Im Gegensatz zu den reinen Regressionsmodellen ist eine Erwartungstreue in Krigingmetamodellen erreichbar. Ein Fehler des Regressionsmodells wird durch den zusätzlichen Gausprozess ausgeglichen. Durch die Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers wird eine möglichst kleine Varianz erzielt. Als beste lineare erwartungstreue Schätzer ergibt sich:

$$\hat{y}(x) = c_x^T y = \begin{pmatrix} f(x)^T & r(x)^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & F^T \\ F & R \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ y \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Eine vereinfachte und effizienter zu implementierende Darstellung lautet

$$\hat{y}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + r(x)^T R^{-1} (y - F \hat{\beta}) \quad (2.21)$$

mit

$$\hat{b} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} y \quad (2.22)$$

Für eine genaue Herleitung des BLUP wird auf [27] verwiesen. Die Varianz des Schätzers lautet:

$$\sigma^2(x) = \sigma_p^2 \left[1 - \begin{pmatrix} f(x)^T & r(x)^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & F^T \\ F & R \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} f(x) \\ r(x) \end{pmatrix} \right] \quad (2.23)$$

Die Schwachstelle dieser Modellierung ist, dass die Parameter θ und p der Korrelationsfunktion, sowie die Prozessvarianz σ_p^2 als bekannt vorausgesetzt sind. Diese sind jedoch unbekannt und können nur anhand der bekannten Daten geschätzt werden. Eine Schätzung $\hat{\sigma}_p^2$ der Prozessvarianz σ_p^2 kann durch eine Maximum-Likelihood Schätzung bestimmt werden [25]:

$$\hat{\sigma}_p^2 = \frac{1}{n} (y - F \hat{\beta})^T R^{-1} (y - F \hat{\beta}) \quad (2.24)$$

Ist dieser Term berechnet bedarf es einer weiteren Schätzung der Korrelationsparameter. Dieses Problem wird durch die Minimierung des folgenden Maximum-Likelihood-Schätzers realisiert.

$$(\det R)^{(1/n)} \hat{\sigma}_p^2 \quad (2.25)$$

Die Parameter θ und p ergeben typischerweise ein hochgradiges multimodales Optimierungsproblem, sodass eine analytische Lösung nicht möglich ist. Stattdessen werden diese Parameter mittels globaler Optimierungsstrategien angepasst.

Weitere Metamodelle Neben den Krigingmetamodellen existiert eine Vielzahl weiterer Metamodelle. Zu nennen sind beispielsweise neuronale Netze oder Radial-Basis-Funktionen. Eine kurze Übersicht über weitere Metamodelle enthält [29]. Diese Verfahren basieren alle auf der Annahme, dass für $y(x) = \hat{y}(x) + \epsilon$ das Residuum ϵ eine unabhängige normalverteilte Zufallsvariable ist. Für Computersimulationen ist dieser Ansatz, wie bereits beschrieben, aufgrund des Fehlens eines Messrauschens wenig sinnvoll. Aus diesem Grund wird eine Optimierung der Pressnahtlage basierend auf Krigingmetamodellen vorgenommen.

2.2.2 Einbindung von Metamodellen in die Optimierung

Ein Krigingmetamodell bietet ausschließlich die Möglichkeiten den Funktionswert, sowie die Varianz an unbekanntem Punkten zu schätzen. Diese Schätzungen können verwendet werden, um möglichst vielversprechende Punkte im Metamodell zu identifizieren, an denen vermutlich eine Verbesserung des Funktionswertes erzielt werden kann. Solche Punkte werden anschließend durch eine Simulation ausgewertet, um den zugehörigen Funktionswert zu bestimmen. Jones et al. beschreiben in [13] einen als EGO (Efficient Global Optimization) bezeichneten Optimierungsalgorithmus, der auf dieser Idee basiert.

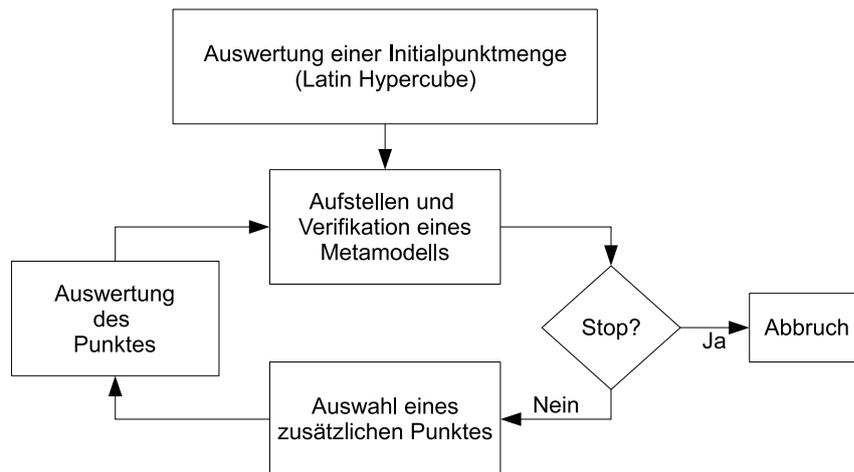


Abbildung 2.8: Ablaufdiagramm des EGO-Algorithmus

Der EGO-Algorithmus stellt ein Grundgerüst für eine globale Optimierung einer Black-Box-Funktion dar. Zuerst wird eine initiale Punktmenge erzeugt, die möglichst gleichmäßig über den Suchraum streut und anschließend durch Simulationen ausgewertet wird. Eine solche Initialisierung wird als *Versuchsplanung* bezeichnet. Mit diesen Punkten und den zugehörigen Funktionswerten wird ein Metamodell gebildet und auf seine Güte geprüft. Ist ein Metamodell ausreichender Qualität aufgestellt worden, wird mittels eines Auswahlkriteriums der wertvollste Punkt bestimmt, um diesen anschließend zu simulieren. Dabei werden gezielt Regionen untersucht, an denen Verbesserungen aufgrund der Schätzungen des Metamodells zu erwarten sind. Eine solche Verbesserung kann sich sowohl auf die Minimierung des Funktionsschätzers, als auch auf eine Reduktion des Schätzfehlers einzelner Gebiete beziehen. Durch diese gezielte Auswahl von interessanten Punkten wird die Anzahl an benötigten Funktionsaufrufen für eine Optimierung gering gehalten.

Für die einzelnen Teilkomponenten des ursprünglichen EGO-Algorithmus sind unterschiedliche Varianten verfügbar, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.2.3 Versuchsplanung

Bevor ein erstes Metamodell erstellt werden kann, wird eine initiale Menge von Punkten samt Funktionswerten benötigt. Anhand dieser Wertepaare kann eine Abhängigkeit zwischen Eingabeparameter und Funktionswerten untersucht werden. Diese Disziplin wird in den Ingenieurwissenschaften als *Versuchsplanung* bezeichnet. Wird die Versuchsplanung für Computereperimente verwendet, besteht allerdings die Notwendigkeit deren Unterschiede zu realen physischen Experimenten zu beachten. Bei der Durchführung von realen Experimenten muss von Abweichungen der Prozessparameter vom vorher definierten Soll, sowie von Messfehlern ausgegangen werden. Diese Faktoren schlagen sich als Rauschen auf das Ergebnis nieder. Computereperimente verlaufen dagegen in der Regel determini-

stisch. Hierdurch werden einige Aspekte der klassischen Versuchsplanung unnötig. Hierzu zählt die Wiederholung von Experimenten oder eine Blockbildung - die Untersuchung einer Menge hochkorrelierter Punkte - zum Zwecke der Fehlerreduzierung [27].

Für eine Versuchsplanung für Krigingmetamodelle sollte beachtet werden, dass der Vorhersagefehler für einen Punkt entscheidend von der Korrelation und damit indirekt von dem Abstand zu den ausgewerteten Punkten abhängt. Daher soll eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Punkte über den gesamten Parameterraum angestrebt werden. Eine solche Versuchsplanung wird auch als *raumfüllende Versuchsplanung* (engl. space-filling design) bezeichnet. Zusätzlich können Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern bei gleichmäßiger Verteilung der Punkte besser erfasst werden. Für eine raumfüllende Versuchsplanung existieren verschiedene Ansätze.

Vollständiger Versuchsplan Die umfangreichste Versuchsplanung ist der *vollständige Versuchsplan* (engl.: full factorial design). Bei diesem Verfahren werden alle Kombinationsmöglichkeiten für jeden einzelnen Parameter untersucht. Die zu untersuchenden Punkte werden auf einem Gitter über den gesamten Suchraum angeordnet. Der Nachteil dieser Versuchsplanung ist die enorme Anzahl an auszuwertenden Punkten. Sollen n Parameter auf jeweils m Teilstufen des Definitionsbereichs untersucht werden entstehen n^m Kombinationsmöglichkeiten, die anhand von Experimenten untersucht werden müssen. Aufgrund des exponentiellen Anwachsens wird stattdessen auf *teilkombinatorische Versuchspläne* (engl.: fractional factorial designs) ausgewichen. Diese unterscheiden sich von den vollständigen Versuchsplänen dadurch, dass nur ein Bruchteil der Experimente durchgeführt wird. Nachteil dieses vereinfachten Verfahrens ist, dass die Wechselwirkungen zwischen mehreren Eingabeparametern auf die Ausgabewerte schlechter erfasst werden können [19].

Latin Hypercube Designs Latin Hypercube Designs (LHDs) sind ein weiterer Ansatz für die Versuchsplanung die von McKay et al. für Computerexperimente entwickelt wurden [18]. Verwendet werden diese besonders aufgrund ihrer einfachen Erzeugbarkeit.

Soll ein LHD mit n Punkten für m Parameter erstellt werden, wird der Wertebereich eines jeden Parameters in n gleichgroße Teilsegmente aufgeteilt. Der Raum der von allen Parametern aufgespannt wird, ist ein Hyperkubus der Größe $[0, n - 1]^m$. Die möglichen Werte der Parameter entsprechen der Menge $0, 1, \dots, n - 1$. Die Erzeugung eines LHD kann anschaulich als ein Urnenexperiment ohne Zurücklegen aufgefasst werden. Für jeden Faktor steht eine Urne bereit die mit allen möglichen Werten gefüllt ist. Für die Erzeugung eines Punktes wird jeweils ein zufälliger Wert für jeden Faktor aus der zugehörigen Urne gezogen.

Durch dieses Verfahren ist sichergestellt, dass für jeden Parameter Punkte über den gesamten Wertebereich verteilt sind. Eine gute raumfüllende Eigenschaft ist hingegen nicht garantiert. Es ist durchaus möglich, dass ein solch zufälliges Design zu einer Diagonalen im

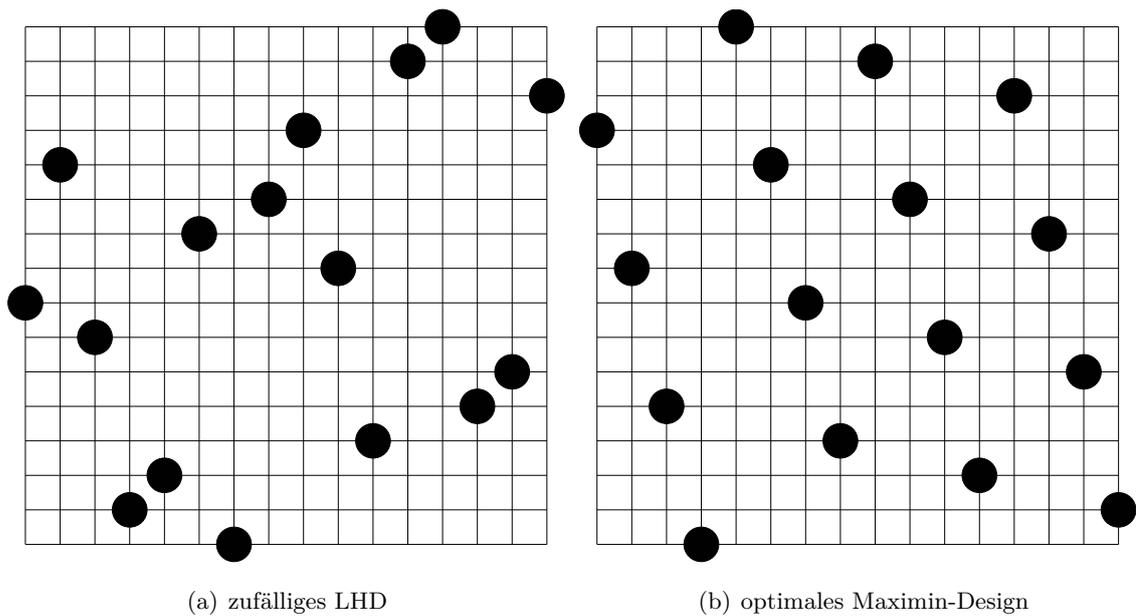


Abbildung 2.9: Beispiel: Zwei Latin Hypercube Designs für $n=16$ auf \mathbb{R}^2

Hyperkubus entartet. Deshalb werden zusätzliche Optimierungen für die Erstellung von LHDs verwendet, um eine bessere Raumfüllung zu erreichen. Als Beurteilungskriterium wird vielfach der Abstand zweier Punkte $x^{(i)}$ und $x^{(j)}$ im euklidischen Raum verwendet, weshalb dies auch als *distanzbasierte Versuchsplanung* bezeichnet wird.

$$d(x^{(i)}, x^{(j)}) = \left(\sum_{i=1}^m |x_i^{(i)} - x_i^{(j)}| \right)^{1/m} \quad (2.26)$$

Um eine optimale Verteilung zu erzielen, können entweder sogenannte Maximin- oder Minimaxdesigns erstellt werden. Bei Maximindesigns ist das Ziel den minimalen Abstand zwischen den zwei beliebigen Punkten zu maximieren, während bei Minimaxdesigns der maximale Abstand minimiert werden soll [27]. Eine solche Optimierung ist für eine große Anzahl an Punkten und Parametern aufwendig, sodass auf Heuristiken zurückgegriffen wird, die diese Eigenschaften nur näherungsweise erfüllen. Sind die Größen der verwendeten LHDs für die Initialmenge eines Metamodells bekannt, bietet sich die Verwendung vorberechneter LHD-Tabellen an, um ohne zusätzlichen Aufwand näherungsweise optimale Designs zu verwenden [9].

2.2.4 Modellvalidierung

Bevor ein Metamodell in der Optimierung eingesetzt wird, sollte vorab überprüft werden, inwiefern dieses Modell den abzubildenden Prozess entspricht. Allerdings ist die Kontur der approximierten Funktion unbekannt, sodass diese nicht für einen Vergleich genutzt werden

kann. Bereits ausgewertete Punkte können aufgrund ihrer Erwartungstreue ebenfalls nicht für eine Qualitätsbestimmung verwendet werden.

Einen Ausweg aus diesem Problem stellt die Überprüfung des Modells durch eine *Kreuzvalidierung* dar. Sind n Punkte samt ihrer Funktionswerte bekannt, wird das Metamodell nur mit $n - 1$ Punkten erstellt. Das Auslassen eines einzelnen Punktes hat nur geringe Auswirkungen auf die Parameter des Metamodells, solange nicht sehr wenige Punkte bekannt sind und auch keine großen Lücken zwischen den Punkten entstehen. Der ausgelassene Punkt sei als $x^{(i)}$ bezeichnet, sein Schätzer des aus den restlichen $n - 1$ Punkten erstellten Metamodells als $\hat{y}_{-i}(x^{(i)})$. Zusätzlich ist auch die Varianz $\sigma_{-i}^2(x^{(i)})$ für diesen Punkt bekannt.

Mit diesen Informationen kann die Güte des Metamodells durch die Verwendung von *standardisierten kreuzvalidierten Residuen* (engl. standardized cross-validated residual) abgeschätzt werden. Dabei sollte die Abweichung zwischen realen Funktionswert und Schätzer weniger als drei Standardabweichungen betragen [13].

$$-3 \geq \frac{y(x^{(i)}) - \hat{y}_{-i}(x^{(i)})}{\sigma_{-i}(x^{(i)})} \geq 3 \quad (2.27)$$

Wird dieses Kriterium verletzt, kann versucht werden durch eine Transformation der Funktionswerte die Modellqualität zu erhöhen. Mögliche Transformationsfunktionen sind der Logarithmus $\ln(y(x))$ oder die Bildung des Inversen $-1/y(x)$. Eine solche Umwandlung hat einen deutlichen Einfluss auf den Vorhersagefehler. Dieser ist von der Prozessvarianz σ_p abhängig, der an die Standardabweichung der Funktionswerte gekoppelt ist.

2.2.5 Auswahlkriterium

Anhand des erstellten Metamodells wird ein Punkt ausgewählt, der in der nächsten Optimierungsiteration ausgewertet wird. Das Kriterium, nach dem dieser Punkt ausgewählt wird, ist ein entscheidender Unterschied zwischen verschiedenen Kriging-basierten Optimierungsalgorithmen. Es kann entweder ein Punkt ausgewählt werden, der dem Minimum des Metamodells entspricht, um eine Verbesserung zu erzielen, oder es wird der Punkt mit der größten Varianz verwendet. Dieser dient der Verbesserung der Modellgüte. Unterschiedliche Kombinationen dieser beiden Eigenschaften sind ebenfalls möglich. Die Wahl des Kriteriums hat einen deutlichen Einfluss auf die Effizienz der Optimierung. Eine Übersicht über unterschiedliche Verfahren enthält [29].

An dieser Stelle soll ausschließlich das am häufigsten in EGO eingesetzte Kriterium vorgestellt werden: das *Kriterium der erwarteten Verbesserung* (engl. Expected Improvement (EI)). Dieses Kriterium bildet einen Kompromiss zwischen einer lokalen Optimierung und einer globalen Suche. Der Term y_{min} bezeichnet das bisherige Minimum über alle zu diesem Zeitpunkt ausgewerteten Punkte. Die Vorhersage des Krigingmodells entspricht der Realisierung der Zufallsvariable Y mit dem Schätzer $\hat{y}(x)$ und der Varianz $\sigma^2(x)$. Als

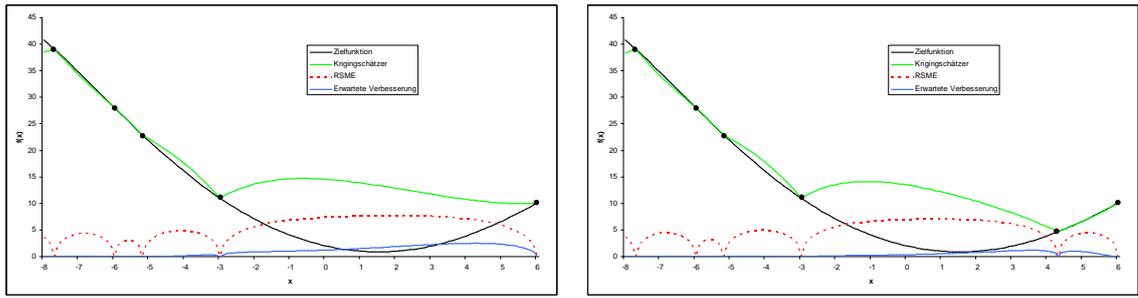


Abbildung 2.10: Beispiel für die erwartete Verbesserung: Links ist eine Funktion abgebildet die auf fünf Punkten ausgewertet ist. Die erwartete Verbesserung besitzt ein Maximum bei $x=4,9$. An diesem Punkt entspricht der Schätzer nahezu dem bisherigen gefunden Minimum, dieser besitzt aber eine hohe Varianz. Rechts ist dieser Punkt zusätzlich ausgewertet, die erwartete Verbesserung beträgt für $x=4,9$ jetzt 0.

Kurzschreibweise wird in diesem Abschnitt hierfür \hat{y} und σ^2 verwendet. Die Verbesserung gegenüber dem bisherigen Minimum ist definiert durch

$$I = \max(y_{\min} - \hat{y}, 0) \quad (2.28)$$

und die erwartete Verbesserung durch

$$E[I] = (y_{\min} - \hat{y}) \cdot \phi\left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{\sigma}\right) + \sigma \varphi\left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{\sigma}\right) \quad (2.29)$$

Dabei bezeichnet $\phi(\cdot)$ die kumulative Verteilungsfunktion und $\varphi(\cdot)$ die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung. Das EI-Kriterium addiert demnach zwei Terme, von denen der erste das Produkt aus der Differenz des aktuell besten Funktionswerts und einem Schätzer multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass $y(x)$ kleiner als y_{\min} ist. Der zweite Term ist die Standardabweichung multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, dass y gleich y_{\min} ist. Das EI-Kriterium steigt dadurch in Bereichen an, in denen entweder \hat{y} kleiner als y_{\min} ist oder an denen die Varianz in der Vorhersage groß ist, sodass trotz eines höheren Schätzers eine Verbesserung möglich ist (siehe auch Abbildung 2.10).

Durch einen zusätzlichen ganzzahligen positiven Parameter g ist eine generalisierte Fassung des EI-Kriteriums möglich. Die generalisierte Verbesserung ist definiert durch:

$$I_g = \max((y_{\min} - \hat{y})^g, 0) \quad (2.30)$$

und die generalisierte erwartete Verbesserung (GEI) durch die rekursive Formel

$$E[I^g] = \begin{cases} \sigma^g \sum_{k=0}^g (-1)^k \cdot \binom{g}{k} \cdot \left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{\sigma}\right)^{g-k} T_k & \text{für } \sigma > 0 \\ 0 & \text{für } \sigma = 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$T_k = -\left(\frac{y_{\min} - \hat{y}}{\sigma}\right)^{k-1} \varphi x + (k-1)T_{k-2} \quad (2.32)$$

beginnend mit $T_0 = \phi\left(\frac{y_{min}-\hat{y}}{\sigma}\right)$ und $T_1 = -\varphi\left(\frac{y_{min}-\hat{y}}{\sigma}\right)$.

Für $g = 1$ entspricht die generalisierte erwartete Verbesserung genau der erwarteten Verbesserung. Mit steigendem Parameter g wird die Unsicherheit in der Vorhersage immer stärker gewichtet und die Optimierung tendiert zu einer globalen Suche.

$$E[I] = \sigma[u\phi(u) + \varphi(u)] \quad (2.33)$$

$$E[I^2] = \sigma^2[(u^2 + 1)\phi(u) + u\varphi(u)] = [E(I)]^2 + Var(I) \quad (2.34)$$

$$E[I^3] = \sigma^3[(u^3 + 3u)\phi(u) + (u^2 + 2)\varphi(u)] \quad (2.35)$$

mit $u = (y_{min} - \hat{y})/\sigma$. In allen Fällen ist die erwartete Verbesserung von bereits bekannten Punkten 0, da die Varianz σ^2 in diesem Fall 0 ist [32].

Unabhängig von dem verwendeten Kriterium und Parameter g muss der Punkt gefunden werden, der dieses Kriterium maximiert. Dieser Punkt ist für die Optimierung am erfolgversprechensten und wird in der nächsten Optimierungsiteration durch ein Experiment ausgewertet. Für die Maximierung kann prinzipiell jedes globale Optimierungsverfahren verwendet werden. Der Berechnungsaufwand der (generalisierten) erwarteten Verbesserung ist so gering, dass eine hohe Anzahl an Funktionsauswertungen ohne Weiteres möglich ist. Jones et al. verwendeten in [13] einen *branch-and-bound* Algorithmus für die Bestimmung des Maximums, Sasena [29] setzte den auf einer Modifikation der Lipschitz-Optimierung basierenden DIRECT-Algorithmus ein. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von evolutionären Optimierungsalgorithmen. Im Folgenden wird die Abkürzung EI für die erwartete Verbesserung und GEI(g) für die generalisierte erwartete Verbesserung mit dem Parameter g verwendet.

2.2.6 Abbruchbedingungen

Sinnvolle Abbruchbedingungen für Optimierungsalgorithmen auf Krigingmetamodelle sind schwierig zu definieren. Es sind nur Approximationen der Funktion verfügbar, anhand deren eine Entscheidung getroffen werden kann, die Optimierung zu stoppen. Universell einsetzbar ist eine Begrenzung der maximalen Simulationsaufrufe. Vorteilhaft an dieser Bedingung ist, dass eine zeitliche Obergrenze der Gesamtoptimierung abgeschätzt werden kann, falls die durchschnittliche Simulationszeit bekannt ist. Wird diese Abbruchbedingung allerdings nicht mit anderen Bedingungen kombiniert, besteht das Risiko, dass mehr Auswertungen vorgenommen werden als nötig. Eine zweite, in bestimmten Optimierungsproblemen einsetzbare Abbruchbedingung besteht darin, die Optimierung vorzeitig abbrechen, falls ein vorher als ausreichend definierter Wert unterschritten wird. Ein solcher Wert kann eine Grenze beschreiben an denen weitere Verbesserungen keine praktische Auswirkung mehr besitzen.

In der Literatur sind weitere Abbruchbedingungen beschrieben, die allerdings zum Teil auf einzelne Auswahlkriterien beschränkt sind. In der Beschreibung des EGO-Algorithmus [13] wird als zusätzliches Abbruchkriterium vorgeschlagen die Optimierung zu stoppen, sobald die zu erwartende Verbesserung unterhalb 1% des bisherigen Minimums fällt. Beachtet werden muss, dass von einer geschätzten relativen Verbesserung ausgegangen wird. Der relative Abstand zum tatsächlichen Minimum der Funktion kann deutlich abweichen.

Die Verteilung neuer Punkte über den Suchraum kann nach [29] ebenfalls als Abbruchkriterium verwendet werden. Liegen die Punkte der letzten n Iterationen innerhalb eines begrenzten prozentualen Bereichs bezogen auf den gesamten Suchraum, kann die Suche vorzeitig abgebrochen werden. Diese Abbruchbedingung wird aktiv, wenn die Optimierung in einen engen Bereich konvergiert, anstatt über den Suchraum zu streuen.

2.2.7 Optimierung unter Randbedingungen

Die Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen ist ein wichtiger Aspekt für viele reale Optimierungsprobleme. Das ursprüngliche Design von Krigingmetamodellen und der darauf aufbauenden Optimierungsalgorithmen wie EGO sehen nur einfache Randbedingungen vor, die den Suchraum auf einen Hyperkubus beschränken. Erweiterungen dieser Ansätze sind nötig, um auch beliebige nichtlineare Randbedingungen in die Optimierung zu integrieren. In diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass die Randbedingungen als zusätzlicher Ausgabewerte zu einem Punkt vorliegen, die unabhängig von dem zu optimierenden Kriterium sind. Diese k Randbedingungsfunktionen werden definiert als $c_1(x), \dots, c_k(x)$. Ziel der Optimierung ist dann:

$$\text{Minimiere } y(x) \text{ unter den Bedingungen } a_i < c_i(x) < b_i, i = 1, \dots, k$$

Verschiedene Verfahren für die Behandlung von Randbedingungen sind in der Literatur beschrieben.

Wahrscheinlichkeits-Methode

Bei der Verwendung eines GEI-Auswahlkriteriums kann das beschränkte Optimierungsproblem in ein unbeschränktes Problem mittels der Wahrscheinlichkeits-Methode (engl. Probability Method) transformiert werden [32]. Für jede Randbedingung wird ein separates Metamodell generiert mit denen für jeden Punkt x die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden kann, dass x die Randbedingung nicht verletzt. Damit wird das Auswahlkriterium entsprechend modifiziert um Punkte auszuwählen, die innerhalb der Randbedingungen liegen.

$$E[I_c^g] = E[I^g] \cdot P(a_1 < c_1(x) < b_1) \cdot \dots \cdot P(a_k < c_k(x) < b_k) \quad (2.36)$$

Die (generalisierte) erwartete Verbesserung wird mit den Wahrscheinlichkeiten multipliziert, dass die Randbedingung erfüllt wird. Diese Wahrscheinlichkeit kann über den Schät-

zer $\tilde{c}(x)$ sowie der Varianz $\sigma_c^2(x)$ für diese Randbedingung berechnet werden. Für eine nach oben beschränkte Funktion lautet die Wahrscheinlichkeit:

$$P(c(x) < b) = \phi\left(\frac{b - \tilde{c}(x)}{\sigma_c(x)}\right) \quad (2.37)$$

Dabei bezeichnet $\phi(\cdot)$ die kumulative Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung. Eine Erweiterung dieses Verfahren, wodurch Korrelationen zwischen den Randbedingungen ausgenutzt werden kann ist möglich. Eine Übersicht zu solchen Verfahren enthält [27]. Eine mögliche Schwäche der Wahrscheinlichkeits-Methode ist, dass Optima welche direkt auf einem Rand liegen nicht identifiziert werden. Durch die Einbeziehung der Wahrscheinlichkeit werden Punkte von den Grenzen der Randbedingung ferngehalten [29]. Ein verwandtes Verfahren stellt die Straffunktion-Methode dar, bei der die möglichen Schwächen der Wahrscheinlichkeitsmethode vermieden werden sollen.

Straffunktions-Methode

Die Straffunktion-Methode nach Björkmann et al. [17] erstellt theoretisch eine scharfe Trennung zwischen zulässigen und nicht zulässigen Bereichen des Parameterraumes. Dazu wird die Wahrscheinlichkeit nicht mit der EI-Funktion multipliziert, sondern ein großer Strafterm aufaddiert, sobald angenommen wird, dass eine Restriktion verletzt wird.

Einen Vergleich zwischen den diesen beiden Methoden wird in [28] vorgenommen. Die Straffunktion erzielte auf Testfunktionen, bei denen ein Optimum an der Grenze einer Randbedingung liegt eine bessere Konvergenz als die Wahrscheinlichkeitsmethode. Dagegen zeigte sich auf einer praxisnahen simulationsbasierten Optimierung kein signifikanter Vorteil der Straffunktions-Methode.

Kapitel 3

Bestimmung der Pressnahtlage

3.1 Bekannte Ansätze

Für die Optimierung des Pressnahtverlaufs durch eine Modifikation der Werkzeuggeometrie ist es zuerst notwendig, die Lage der Pressnaht innerhalb des Profils zu identifizieren. Sobald diese bekannt ist, kann die Abweichung zum Soll quantitativ bestimmt werden. Für einen Optimierungsvorgang ist es zudem notwendig, dass dieses Verfahren zuverlässig und insbesondere automatisiert für unterschiedliche Presswerkzeugmodelle durchgeführt werden kann. Diese unterschiedlichen Modelle werden durch die Veränderungen mittels Morphing erzeugt. Bisher angewandte Verfahren für die Pressnahtidentifikation in FE-Simulationen erfüllten diese Anforderungen nicht. Schikorra beschreibt in [30] zwei Verfahren, mit denen der Pressnahtverlauf zumindest qualitativ beurteilt werden kann. Beide beruhen auf einer rein visuellen Auswertung und sind nicht für eine Optimierung geeignet. Beide Verfahren sollen auf ihre Eignung für eine quantitative Pressnahtlagenbestimmung untersucht werden.

Verwendung der Vergleichsdehnung Die erste Möglichkeit den Pressnahtverlauf zu bestimmen, besteht in der Untersuchung der Vergleichsdehnung. Diese mechanische Kenngröße steigt im Bereich zusammenfließender Teilstränge des Werkstoffes, aufgrund der höheren Umformung stark an. Der Verlauf der größten Dehnung stimmt mit dem Pressnahtverlauf überein. Eine detaillierte Betrachtung offenbart jedoch diverse Schwächen dieses Verfahrens, welche dessen Genauigkeit beeinträchtigen. Die Vergleichsdehnung steigt nicht ausschließlich in der Verbundzone, sondern zusätzlich auch in den Profilaußenbereichen an. Durch diese Überlagerung des Effektes ist eine exakte Bestimmung der Pressnahtlage in den Randbereichen des Profils nahezu unmöglich. Besonders negativ wirkt sich dies für dünnwandige Profile aus. Weiterhin ist die Genauigkeit des Verfahrens vom Diskretisierungsgrad des FE-Modells abhängig. Die Vergleichsdehnung ist nur an den Knoten des Modells exakt bekannt. Die Zwischenräume sind unbekannt und können nur auf Basis der

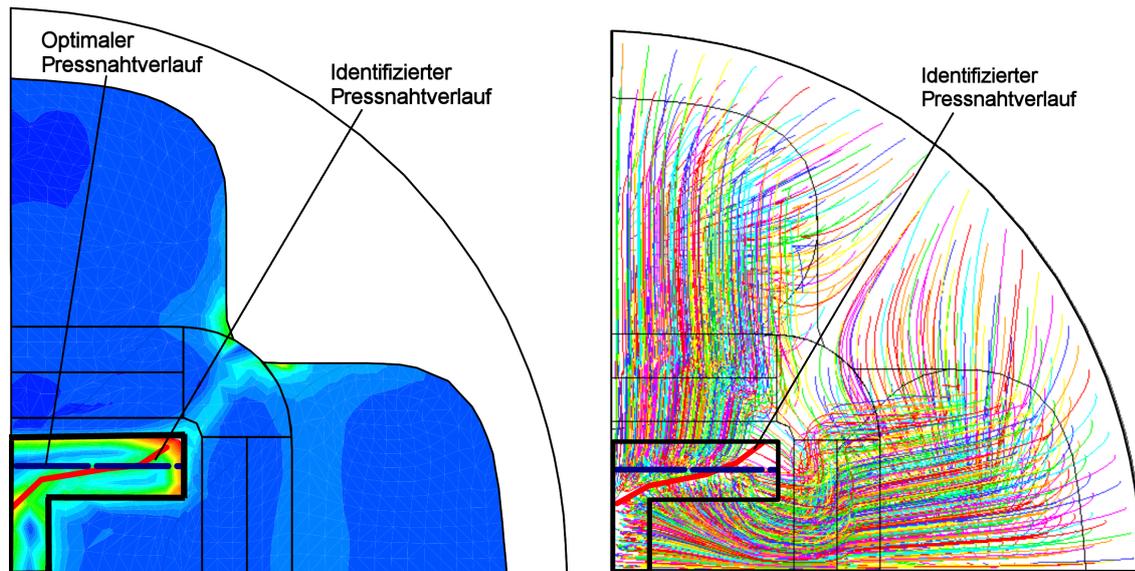


Abbildung 3.1: Visuelle Auswertung der Pressnahtlage durch Darstellung der Vergleichsdehnung und der Partikelverfolgung auf einer Viertelsymmetrie eines Doppel-T Profils aus [30]. Abgebildet ist eine Frontalansicht des Presswerkzeugmodells.

umliegenden Punkte interpoliert werden. Für eine hohe Auflösung der Vergleichsdehnung muss deswegen ein höherer Diskretisierungsgrad verwendet werden. Die Verbesserung der Genauigkeit geht allerdings mit einer Erhöhung der Knotenanzahl im Netz einher und führt zu einer stark erhöhten Simulationslaufzeit. Zudem ist das Maximum der Vergleichsdehnung zum Teil nicht eindeutig ausgeprägt, sondern erstreckt sich über einen breiten Bereich des Profilquerschnitts.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde der Ansatz der Vergleichsdehnung zur Identifikation der Längspressnaht im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Nicht nur erscheint das Verfahren für dünnwandige Profile ungeeignet, für eine ausreichende Genauigkeit ist zudem eine massive Erhöhung der Simulationszeit zu erwarten.

Verwendung der Partikelverfolgung Das zweite bekannte Verfahren für die Bestimmung der Pressnahtlage ist die Partikelverfolgung. Hierbei wird der Fluss einzelner gedachter Werkstoffpartikel innerhalb eines Kontrollvolumens dargestellt. Für jeden Partikel wird eine Bahnlinie erzeugt, die von diesem Partikel durchlaufen wird. Das Ergebnis ist vergleichbar mit einer FE-Simulation nach der Lagrangeformulierung (siehe 2.1.2). Eine Pressnaht entspricht einer Grenzfläche an dem Werkstoff aus unterschiedlichen Einläufen des Presswerkzeugs zusammenfließt. Mittels der Bahnlinien aus der Partikelverfolgung sollen diese Bereiche identifiziert werden. Schikorra konnte in [30] nachweisen, dass dieses Verfahren grundsätzlich für eine Pressnahtbestimmung geeignet ist. Aufgrund des Fehlens geeigneter Auswertungswerkzeuge konnte diese Methode jedoch nicht erfolgreich ein-

gesetzt werden. Die Partikelverfolgung wurde mittels der Visualisierungsfunktionen der HyperWorks-Software erzeugt, dessen Funktionsumfang zu beschränkt ist, um gezielt den Pressnahtverlauf zu identifizieren. So ist es nicht möglich die Anzahl von Partikeln zu begrenzen, oder deren Startpositionen zu definieren. Eine Pressnaht ist in der großen Menge an Bahnlinien kaum zu erkennen. Es existiert zudem keine brauchbare Schnittstelle, um die Ergebnisse der Partikelverfolgung zu exportieren und in externen Applikationen weiterzuverarbeiten.

Die Partikelverfolgung stellt insgesamt einen vielversprechenden Ansatz für die Bestimmung der Pressnahtlage dar. Die verfügbaren Werkzeuge sind allerdings für eine quantitative Bestimmung der Pressnahtabweichung nicht geeignet. Deshalb ist die Entwicklung eines geeigneten Werkzeugs nötig, mit dem eine Partikelverfolgung erstellt und dessen Ergebnis anschließend weiterverarbeitet werden kann. Die hierbei verwendete Methodik wird im Folgendem beschrieben.

3.2 Partikelverfolgung

Die Partikelverfolgung ist ein weitverbreitetes Verfahren in der Visualisierung und Auswertung von Strömungssimulationen. Mithilfe dieser Technik ist es möglich, das Fließverhalten innerhalb eines Kontrollvolumens abzubilden. Dieses Kontrollvolumen besteht üblicherweise aus einem diskretisierten Netz, das aus einzelnen Zellen zusammengesetzt ist. Für die Partikelverfolgung wird der Begriff der Zelle verwendet, während in der FE-Simulation der Begriff des Elements üblich wird. Beide Bezeichnungen werden im Folgendem synonym verwendet. Jedem Knoten innerhalb dieses Netzes sind jeweils ein Geschwindigkeitsvektor und zusätzliche Simulationsgrößen zugeordnet. Der Geschwindigkeitsvektor beschreibt das lokale Strömungsverhalten an der Position des Knotens. Für die Analyse dieses Strömungsfeldes werden Partikel in das Feld eingebracht und ihre Bahnlinie darin berechnet. Diese Bahn beschreibt den örtlichen Verlauf des Partikels über die Zeit. Für die Berechnung einer solchen Partikelbahn bedarf es der numerischen Integration der folgenden gewöhnlichen Differenzialgleichung [14]:

$$\frac{d\vec{p}(t)}{dt} = \vec{v}(\vec{p}(t)) \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnet $\vec{v}(\vec{p}(t))$ den Geschwindigkeitsvektor an der Position des Partikels \vec{p} , t die Zeit und $\vec{p}(t)$ die Position des Partikels zum Zeitpunkt t . Für den gewählten Startpunkt \vec{p}_0 muss ferner gelten:

$$\vec{p}(t_0) = \vec{p}_0 \quad (3.2)$$

Für festgelegte Zeitschritte $\{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ ergeben sich $\{\vec{p}(t_0), \vec{p}(t_1), \dots, \vec{p}(t_n)\}$ als Menge der Partikelpositionen, welche die Bahnlinie des Partikels beschreiben.

Innerhalb der Strömungssimulation wird zwischen zeitlich konstanten und zeitlich veränderlichen Feldern unterschieden. Bei Letzteren sind die Geschwindigkeitsvektoren des

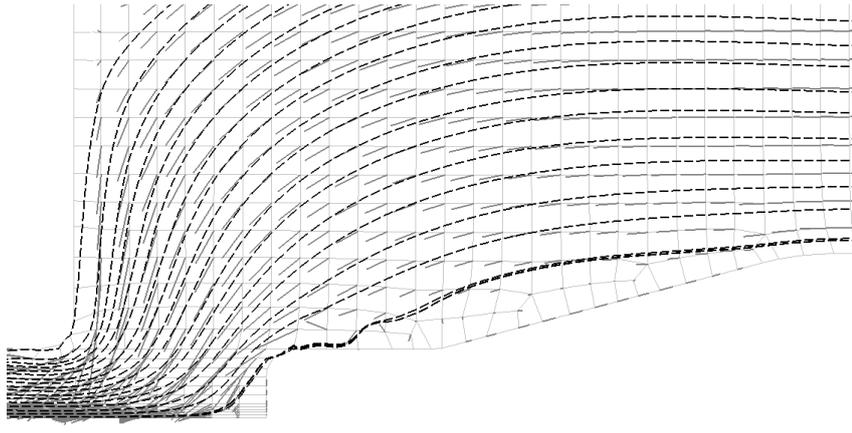


Abbildung 3.2: Ausschnitt einer Partikelverfolgung in einem 2D-Strangpressmodell mit den Geschwindigkeitsvektoren (graue Linien) und Partikelbahnen (schwarze unterbrochene Linien).

Feldes ebenfalls von der Zeit abhängig. In der Strangpresssimulation liegt ein zeitlich konstantes Feld vor, sodass die weiteren beschriebenen Techniken auf diesen Fall beschränkt sind. Dennoch sind viele Aspekte auch für veränderliche Felder anwendbar. Für eine genauere Beschreibung der Unterschiede zwischen den beiden Feldtypen wird auf eine Arbeit von Darmofal et al. [6] verwiesen.

Die Partikelverfolgung ist sowohl in zwei- und dreidimensionalen Räumen möglich. Die beschriebenen Techniken beziehen sich auf dreidimensionale Netze, für die Abbildungen innerhalb dieses Kapitels werden aufgrund besserer Verständlichkeit analoge zweidimensionale Beispiele verwendet.

Als Standardverfahren zur Lösung von Gleichung 3.1 wird eine numerische Integration verwendet. Für die Implementierung der Partikelverfolgung sind zusätzlich weitere Komponenten notwendig. Für diese Komponenten existiert jeweils eine Vielzahl verschiedener Methoden, von denen die für die Pressnahtbestimmung verwendeten Techniken an dieser Stelle vorgestellt werden sollen. Den Grundablauf der Partikelverfolgung beschreibt Algorithmus 3.1 in Pseudocode. Die Geschwindigkeitsvektoren sind ausschließlich an den

```

Bestimme Zelle, die den Startpunkt enthält {Zellokalisierung}
while Partikel im Kontrollvolumen do
  Bestimme Geschwindigkeit an aktueller Position {Interpolation}
  Bestimme neue Position {Integration}
  Bestimme Zelle an der neuen Position {Zellokalisierung}
end while

```

Algorithmus 3.1: Pseudocode der Partikelverfolgung nach [26]

Knoten des Netzes bekannt. Um auch Geschwindigkeiten an anderen Positionen innerhalb einer Zelle bestimmen zu können, wird ein geeignetes Interpolationsverfahren benötigt.

Für diese Interpolation muss bekannt sein, in welcher Zelle sich der Partikel aktuell befindet. Dies geschieht mittels einer Zelllokalisierung [26]. Details zu den einzelnen Methoden werden im Folgendem vorgestellt.

3.2.1 Zelllokalisierung

Bevor eine Interpolation der Geschwindigkeiten innerhalb einer Zelle an der Position eines Partikels durchgeführt werden kann, muss diese Zelle zuerst identifiziert werden. Dieser Vorgang wird in jedem Schleifendurchlauf ausgeführt, sodass auf eine effiziente Methodik zu achten ist. Abhängig von der Anordnung und Aufbau der Zellen im Netz kann dieses Problem auf unterschiedliche Weise gelöst werden. Im einfachsten Fall liegt ein kartesisches Netz vor. Dabei beschreiben die Zellen gleichgroße Würfel, die in einem regelmäßigen Gitter angeordnet sind. Jede Zelle kann über einen einfachen Index identifiziert werden. Um einen Punkt einer Zelle zuzuordnen, ist eine Division der Punktkoordinaten durch die Zellgröße und anschließender Abrundung ausreichend für die Berechnung des Zellindex [26].

Die in der Strangpresssimulation verwendeten Netze entsprechen nicht dieser Anforderung, sondern es liegen unstrukturierte Netze vor. Die darin enthaltenen Zellen unterscheiden sich sowohl in der Größe, als auch ihrer Form. Es sind zudem unterschiedliche Zelltypen möglich die für eine Zelllokalisierung unterstützt werden müssen. So können die Strangpressmodelle sowohl aus Tetraedern, als auch aus Hexaedern aufgebaut sein. Auch gemischte Netze sind möglich. In derartigen Netzen ist es nicht möglich, die Zelle die einen Punkt enthält, direkt zu berechnen.

Eine effiziente Zelllokalisierung in unstrukturierten Netzen wird von Ren et al. in [22] vorgestellt. Hierzu wird die Eigenschaft ausgenutzt, dass aneinander liegende Zellen eine gemeinsame Seite teilen. Die einzigen Ausnahmen bilden Seiten an den Außenflächen des Netzes und der Übergang zwischen tetraeder- und hexaedervernetzten Netzabschnitten. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass bei kleinen Zeitschritten der Partikelverfolgung die neue Position eines Partikel in einer Zelle liegt, die in unmittelbarer Nachbarschaft zur vorherigen Zelle liegt. Aufbauend auf dieser Annahme ist ein heuristisches Suchverfahren möglich, um effizient die Zelle an der neuen Position des Partikels zu bestimmen.

Ren et al. beschränkten sich in ihrem Algorithmus auf Tetraedernetze und schlugen vor andere Zelltypen in Tetraeder zu zerlegen. Auf einen Tetraeder als ein dreidimensionaler Simplex kann der Test, ob ein Punkt \vec{p} innerhalb des Tetraeders liegt effizient durchgeführt werden. Hierzu wird eine Überführung der Knotenkoordinaten in baryzentrische Koordinaten durchgeführt. Die Zerlegung von deformierten Hexaedern kann allerdings zu stark entarteten Tetraedern führen. Innerhalb solcher Tetraeder ist eine Interpolation (siehe 3.2.2) fehleranfällig, sodass eine Hexaederzerlegung vermieden werden sollte.

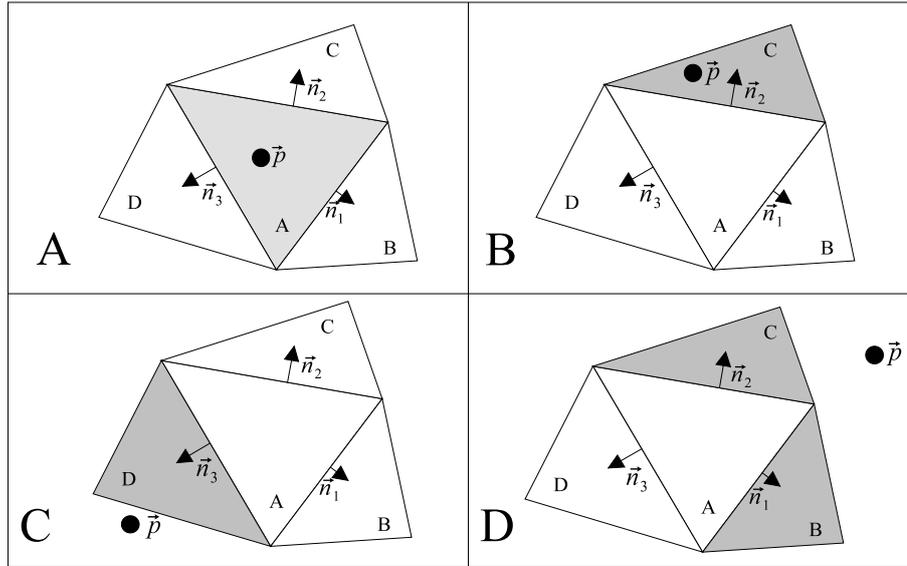


Abbildung 3.3: Prinzip der Nachbarschaftssuche: (A) Punkt \vec{p} liegt in Zelle A, kein Normalenvektor zeigt in Richtung \vec{p} (B) Normale \vec{n}_2 zeigt in Richtung \vec{p} , die Suche wird in Zelle C fortgeführt (C) Normale \vec{n}_3 zeigt in Richtung \vec{p} , die Suche wird in D fortgeführt (D) \vec{n}_1 und \vec{n}_2 zeigen in Richtung \vec{p} , die Suche kann in Zelle B oder C fortgesetzt werden.

Anstatt der Überführung in baryzentrische Koordinaten können auch die Normalenvektoren der einzelnen Zellaußenflächen verwendet werden, um zu prüfen, ob ein Punkt innerhalb der Zelle liegt. Dieser Test ist für jede beliebige konvexe Zellform verwendbar. Dazu wird für jede Seite s einer Zelle der zugehörige Normalenvektor \vec{n}_s bestimmt. Die Orientierung dieses Vektors zeigt von der Zelle weg. Jede Zellfläche wird als eine Ebene aufgefasst, die den Gesamtraum in zwei Teile partitioniert. Der zum Normalenvektor positiv orientierte Teil enthält keine Punkte, die sich innerhalb der Zelle befinden. Die Punkte innerhalb einer Zelle entsprechen in dieser Darstellungsform der Menge aller Punkte, die zu allen durch die Zellseiten definierten Ebenen negativ orientiert sind (siehe Abbildung 3.3 A). Um festzustellen, ob ein Punkt \vec{p} innerhalb einer Zelle liegt, reicht es aus, für jede Seite zu testen, ob der Normalenvektor einen positiven Anteil in Richtung des Punktes besitzt. Dies kann mittels des Vektorprodukts berechnet werden.

$$(\vec{p} - \vec{p}_s) \cdot \vec{n}_s > 0 \quad (3.3)$$

\vec{p}_s bezeichnet hierbei einen beliebigen Punkt auf der Seite s . Geeignet ist diese Berechnung sowohl für Tetraeder als auch für konvexe Hexaeder.

Für die Bestimmung der Zelle an der Initialposition des Partikels ist das heuristische Suchverfahren ungeeignet. Stattdessen wird der Punkttest für jede Zelle des Netzes angewendet, bis die zugehörige Zelle gefunden ist. Diese vollständige Suche wird nur einmalig verwendet, sodass der Aufwand vertretbar ist. Für alle folgenden Zelllokalisierungen kann die schnellere heuristische Nachbarschaftssuche verwendet werden. Dieser Suchalgorithmus

mus verwendet ebenfalls den Punkttest 3.3. Befindet sich der Partikel zum Zeitschritt t an der Position \vec{p}_t in der Zelle Z , wird für die Zelllokalisierung für \vec{p}_{t+1} zuerst getestet, ob dieser Punkt weiterhin in der Zelle Z liegt. Schlägt der Punkttest für eine Seite s fehl, wird der Test rekursiv in den Nachbarzellen zu Z an der Seite s fortgeführt. Dies wird solange fortgeführt, bis entweder die Zelle gefunden ist, die den Punkt \vec{p}_{t+1} enthält oder keine Nachbarzelle existiert. Im letzteren Fall hat der Partikel entweder das Kontrollvolumen verlassen, oder es ist keine Nachbarschaftszelle definiert. Ein solcher Fall kann zum Beispiel bei der Verwendung von Netzen mit verschiedenen Zelltypen auftreten. Schlägt die Nachbarschaftssuche fehl, kann auf eine vollständige Suche ausgewichen werden. Die Abbildung 3.3 veranschaulicht dieses Verfahren für den zweidimensionalen Fall.

Die Zellsuche mittels Nachbarschaftssuche hat den Vorteil, dass auch nach einer Modifikation des Netzes durch Morphing die Nachbarschaftsbeziehungen erhalten bleiben. Einzige die Normalenvektoren müssen neu berechnet werden. Eine alternative Datenstruktur für eine effiziente Zelllokalisierung in unstrukturierten Netzen stellen *Octrees* dar. Octrees unterteilen den Raum hierarchisch in einzelne Würfel. Für jeden Würfel werden die darin enthaltenen Zellen gespeichert. Ist der Würfel bekannt, der den Punkt beinhaltet, ist ein Test für die Zellen ausreichend, die sich innerhalb des Würfels befinden. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass diese Datenstruktur nach einer Netzmodifikation vollständig neu aufgebaut werden muss. Aus diesem Grund ist dieses Verfahren nicht verwendet worden.

3.2.2 Interpolationsverfahren

Aufgrund der Diskretisierung des Netzes sind exakte Geschwindigkeitsvektoren ausschließlich an den Knoten einer Zelle verfügbar. An jeder anderen Position muss die Geschwindigkeit interpoliert werden. Durch die Zelllokalisierung ist bekannt, in welcher Zelle sich der Partikel befindet und welche Knoten für die Interpolation innerhalb dieser Zelle verwendet werden können. Abhängig von den vorliegenden Elementtypen - Hexaeder oder Tetraeder - werden unterschiedliche Interpolationsverfahren genutzt, die von Sardarjoo et al. in [26] beschrieben werden.

Diese Verfahren werden zusätzlich zur Interpolation der Geschwindigkeitsvektoren \vec{v} auch für die Interpolation weiterer Kenngrößen wie Temperatur und Spannungen verwendet. Diese Werte werden für weitergehende Untersuchungen des Simulationsergebnisses verwendet (siehe Kapitel 4). Für deren Berechnung werden die Vektoren \vec{v} durch eine entsprechende skalare Größe ersetzt.

Interpolation in Tetraedern Für die Interpolation in Tetraedern wird ein Verfahren namens *gewichtete Volumen* eingesetzt. Die Eckpunkte des Tetraeders werden als $\vec{x}_0, \dots, \vec{x}_3$ und die zugehörigen Geschwindigkeiten mit $\vec{v}_0, \dots, \vec{v}_3$ bezeichnet; der zu interpolierende Punkt mit \vec{p} . Der Gesamttetraeder wird in vier Subtetraeder aufgeteilt, in denen \vec{p} jeweils einen Eckpunkt bildet. Das Verhältnis des Volumens eines Subtetraeders zum Volumen des

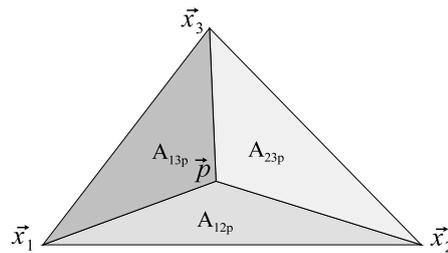


Abbildung 3.4: Gewichtete Flächen nach [26]

Gesamttetraeders wird als Gewichtung für die Geschwindigkeitsvektoren an den Eckknoten verwendet. Die Einzelgewichte lauten:

$$w_0 = \frac{V_{123p}}{V_{0123}} \quad w_1 = \frac{V_{023p}}{V_{0123}} \quad w_2 = \frac{V_{013p}}{V_{0123}} \quad w_3 = \frac{V_{012p}}{V_{0123}} \quad (3.4)$$

V_{ABCD} bezeichnet das Volumens eines Tetraeders mit den Eckpunkten $ABCD$. Die interpolierte Geschwindigkeit \vec{v}_p ergibt sich mit diesen Gewichten aus:

$$\vec{v}_p = w_0 \vec{v}_0 + w_1 \vec{v}_1 + w_2 \vec{v}_2 + w_3 \vec{v}_3 \quad (3.5)$$

Für den zweidimensionalen Fall auf Dreiecken kann eine analoge Interpolation mittels *gewichteten Flächen* verwendet werden (siehe Abbildung 3.4).

Interpolation in Hexaedern Für die Interpolation eines Punktes \vec{p} innerhalb eines Hexaeders wird die sogenannte *Inverse Distanzgewichtung* eingesetzt. Der interpolierte Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_p ergibt sich aus:

$$\vec{v}_p = w_0 \vec{v}_0 + w_1 \vec{v}_1 + \dots + w_7 \vec{v}_7 \quad (3.6)$$

Hierbei bezeichnet $\vec{v}_0, \dots, \vec{v}_7$ die Geschwindigkeitsvektoren an den acht Knoten des Hexaeders, die Position dieser Knoten wird mit $\vec{x}_0, \dots, \vec{x}_7$ bezeichnet. Die Gewichtungen w_0, \dots, w_7 berechnen sich durch:

$$w_i = \frac{(1/d_i^2)}{\sum_{j=0}^7 (1/d_j^2)} \quad (3.7)$$

$$d_i = \|\vec{x}_i - \vec{p}\| \quad (3.8)$$

Die Gewichtung eines Eckknotens ist somit abhängig von seinem euklidischen Abstand zum Punkt \vec{p} . Für den zweidimensionalen Fall kann dies Verfahren analog auf Vierecke angewandt werden.

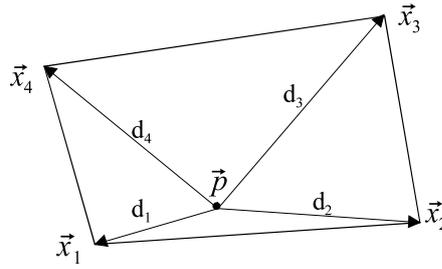


Abbildung 3.5: Inverse Distanzgewichtung nach [26]

3.2.3 Integrationsverfahren

Die Lösung der Grundgleichung der Partikelverfolgung 3.1 wird üblicherweise mittels numerischer Verfahren bestimmt. Hierfür existieren eine große Anzahl verschiedener Algorithmen, die sich in der Genauigkeit der Lösung, sowie dem benötigten Rechenzeitbedarf unterscheiden. Eine sehr umfangreiche Untersuchung zu den verschiedenen Integrationsverfahren und deren Eignung für die Partikelverfolgung enthält [6].

Den einfachsten Integrationsalgorithmus stellt das *Eulerverfahren* dar. Hierbei wird angenommen, dass die Geschwindigkeit und die Richtung des verfolgten Partikels über den gesamten Zeitschritt konstant sind. Mit dem interpolierten Geschwindigkeitsvektor $\vec{v}(\vec{p}_i)$ an der bisherigen Position \vec{p}_i und einem kleinen Zeitschritt t wird die nächste Position \vec{p}_{i+1} berechnet durch:

$$\vec{p}_{i+1} = \vec{p}_i + \vec{v}(\vec{p}_i) \cdot t \quad (3.9)$$

Nachteil dieses Algorithmus ist ein hoher Integrationsfehler, der global mit $O(t)$ nur durch die Größe des Zeitschritts beschränkt ist.

Eine höhere Genauigkeit bei gleichem Zeitschritt t erzielen Integrationsverfahren nach dem *Runge-Kutta-Schema*. Durch die Verwendung zusätzlicher Interpolationen kann der Fehler des Eulerverfahrens zum Teil kompensiert werden. Der Integrationsschritt für das Runge-Kutta-Schema 2.Ordnung (auch Heun- oder verbessertes Eulerverfahren genannt) lautet:

$$\vec{p}_{i+1}^j = \vec{p}_i + \vec{v}(\vec{p}_i) \cdot t \quad (3.10)$$

$$\vec{p}_{i+1} = \vec{p}_i + \frac{1}{2}(\vec{v}(\vec{p}_i) + \vec{v}(\vec{p}_{i+1}^j)) \cdot t \quad (3.11)$$

Im Vergleich zum herkömmlichen Eulerverfahren wird eine zusätzliche Interpolation an dem Punkt vorgenommen, der durch das Eulerverfahren berechnet worden ist. Durch die Mittelung zweier Geschwindigkeitsvektoren wird der Integrationsfehler reduziert und ist für das Runge-Kutta-Schema 2.Ordnung durch $O(t^2)$ beschränkt.

Für die Bestimmung der Pressnahtlage wird, aufgrund eines guten Kompromisses zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand das Runge-Kutta-Schema implementiert. Weitere Verfahren höherer Ordnung erzielen geringere Integrationsfehler, dieses kann ersatzweise

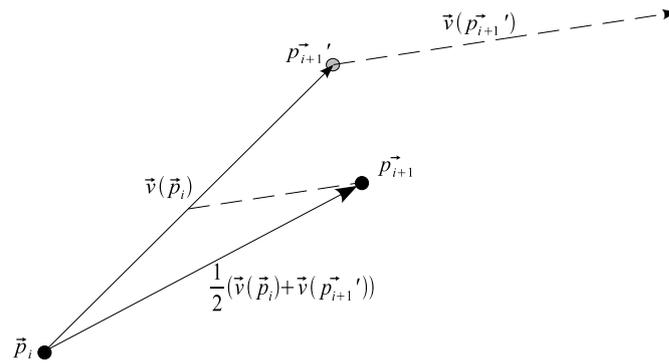


Abbildung 3.6: Beispiel: Runge-Kutta-Schema 2. Ordnung

auch durch eine Reduzierung der Schrittweite erreicht werden. Für eine maximale Genauigkeit existieren ferner numerisch exakte Verfahren. In [14] wird ein solches Verfahren für reine Tetraedernetze beschrieben.

3.2.4 Besonderheiten der Strangpresssimulationen

Die durch HyperXtrude erzeugten Simulationsergebnisse sind aufgrund ihres numerischen Ursprungs nicht fehlerfrei. Diese Simulationsfehler wirken sich auch auf die Partikelverfolgung aus.

Sowohl innerhalb der toten Zonen, sowie an den Außenflächen der Kammern liegt aufgrund von Reibung oder Druck kein Werkstofffluss vor. Im Idealfall ergibt die Simulation in diesen Bereichen eine Geschwindigkeit von 0, aufgrund der numerischen Ungenauigkeiten weichen die tatsächlichen Werte jedoch davon ab. Die Länge der Richtungsvektoren ist zwar sehr gering, allerdings zeigen die Vektoren in beliebige Richtungen. Sogar ein Werkstofffluss gegen die Pressrichtung kann auftreten. Eine Partikelverfolgung in einem derartigen Bereich ergibt keine verwertbaren Ergebnisse. Dieser Effekt muss sowohl bei der Erkennung der Pressnahtlage, als auch bei der Erfassung verschiedener Randbedingungen (siehe Kapitel 4) berücksichtigt werden. Innerhalb von toten Zonen kann es zudem vorkommen, dass anstatt eines Werkstoffstillstandes, eine Zirkulation simuliert wird. Ein Partikel,

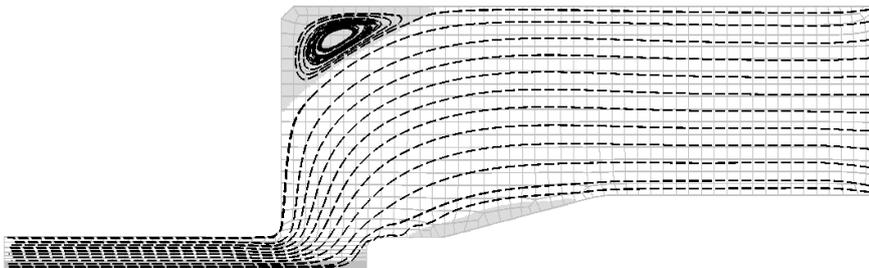


Abbildung 3.7: Zirkulation in einer toten Zone aufgrund von Simulationsfehlern

welches diese Zone betritt, verläuft auf einer zyklischen Bahn und kann das Profil nie verlassen. Um dies zu verhindern, ist es notwendig, die maximale Länge der Partikelbahn zu begrenzen. Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellen fehlerhafte Geschwindigkeitsvektoren an Randknoten des Netzes auf, an denen keine Haftreibung vorliegt. Derartige Situationen treten vereinzelt an abgeschrägten Flächen in der Schweißkammer auf. Ein Partikel der nahe eines solchen Knotens verfolgt werden soll, kann dadurch das Modell an einer Position verlassen, an der es am realen Kammerwerkzeug nicht möglich ist. In einem solchen Fall kann die Partikelverfolgung entweder abgebrochen werden, oder falls der Fehler nur lokal auftritt, der Knoten für die Geschwindigkeitsinterpolation ignoriert werden um den Partikel dennoch weiterverfolgen zu können.

3.3 Pressnahterkennung durch die Partikelverfolgung

Im Strangpressprozess bildet sich eine Pressnaht in den Bereichen aus, an denen der Werkstoff aus unterschiedlichen Einläufen des Presswerkzeuges zusammenfließt. Anhand der Abbildung des Werkstoffflusses 3.8 ist klar zu erkennen, dass der Werkstoff, welches sich zu einer Pressnaht verbindet, vorher entlang der Werkzeugwand der Einläufe fließt.

Dieser Aspekt des Werkstoffflusses kann gezielt mit der Partikelverfolgung nachgebildet werden, um dadurch die Pressnahtlage zu identifizieren. Hierzu werden Partikel im Bereich der Oberfläche der einzelnen Kammern platziert und deren Zusammenfluss analysiert. Durch eine Analyse der Verteilung der entstehenden Partikelbahnen im Bereich des Profilaustritts kann die Lage der Längspressnaht aus den Simulationsdaten abgeschätzt werden.

Für die Abbildung der Pressnaht werden zwei Ebenen definiert, an denen ein Querschnitt durch das Simulationsmodell erzeugt wird. In der ersten Ebene werden die Startpunkte der Partikel platziert, deren Verläufe durch das Profil beobachtet werden sollen. Das Zusammenfließen der Teilstränge wird analysiert, indem die Startpunkte in Höhe der

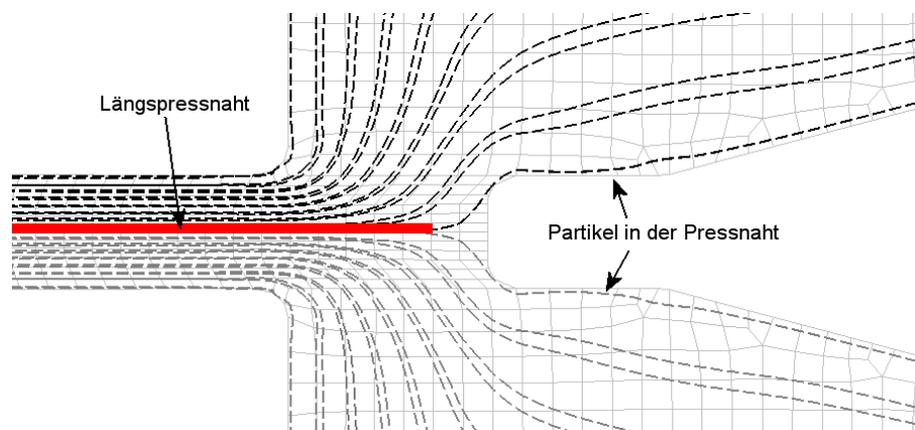


Abbildung 3.8: Entstehung der Pressnaht aus dem Zusammenfluss zweier Werkstoffflüsse

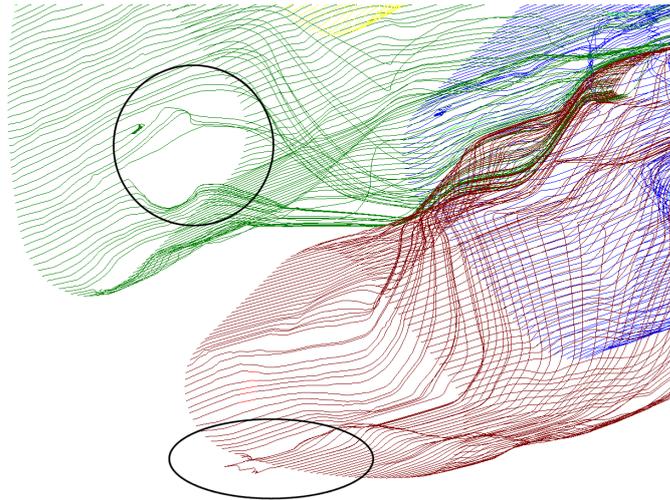


Abbildung 3.9: Fehlerhafte Partikelbahnen aufgrund der Reibung in der Nähe der Profilloberfläche der Einläufe.

Einläufe definiert werden, da an dieser Stelle der Werkstofffluss aufgeteilt ist. Die Startpunkte werden nahe der Profilloberfläche platziert. Werkstoff, der durch diesen Bereich fließt, bildet nach der Umformung in der Schweißkammer entweder die Außenflächen des Profils, oder er befindet sich innerhalb einer Pressnaht. Bei der Platzierung der Startpunkte ist die simulierte Reibung an den Werkzeugoberflächen des Modells zu berücksichtigen. Direkt an den Randflächen findet aufgrund von Haftreibung unter Umständen kein Werkstofffluss statt. Hier liegen numerisch instabile Bereiche vor, die vermieden werden können, indem die Partikelstartpunkte einen geringen Abstand zu der Profilloberfläche einhalten. Dadurch ist eine zuverlässige Ermittlung der Bahnlinien möglich.

Der optimale Abstand ist kein konstanter Wert, sondern ist abhängig von der Elementgröße des Netzes im Bereich der Einläufe sowie des in der Simulation verwendeten Reibungskoeffizienten. Aus diesem Grund muss der Abstand für unterschiedliche Profile individuell gewählt werden. Wird der Abstand zum Rand zu gering gewählt, kann eine erhöhte Anzahl von Partikelbahnen nicht vollständig bestimmt werden (siehe Abbildung 3.9). Diese fehlenden Bahnlinien stehen damit auch der Pressnahterkennung nicht mehr zu Verfügung. Ist der Abstand stattdessen zu groß gewählt, weichen die verfolgten Partikel von dem Werkstoff ab, welches die tatsächliche Pressnaht entstehen lässt. Die Genauigkeit der Pressnahterkennung verringert sich tendenziell mit steigendem Abstand. Der Randabstand muss zwar für unterschiedliche Profile angepasst werden, für Geometriemodifikationen eines zu optimierenden Modells durch Morphing ist ein gleichbleibender Abstand ohne negative Auswirkungen einsetzbar. Somit muss der Wert nur einmalig vor der Optimierung gewählt werden.

Die zweite Schnittebene wird am Ende des Modells im Bereich des Profilaustritts definiert. In dieser Ebene ist der Umformvorgang abgeschlossen, eine Veränderung der

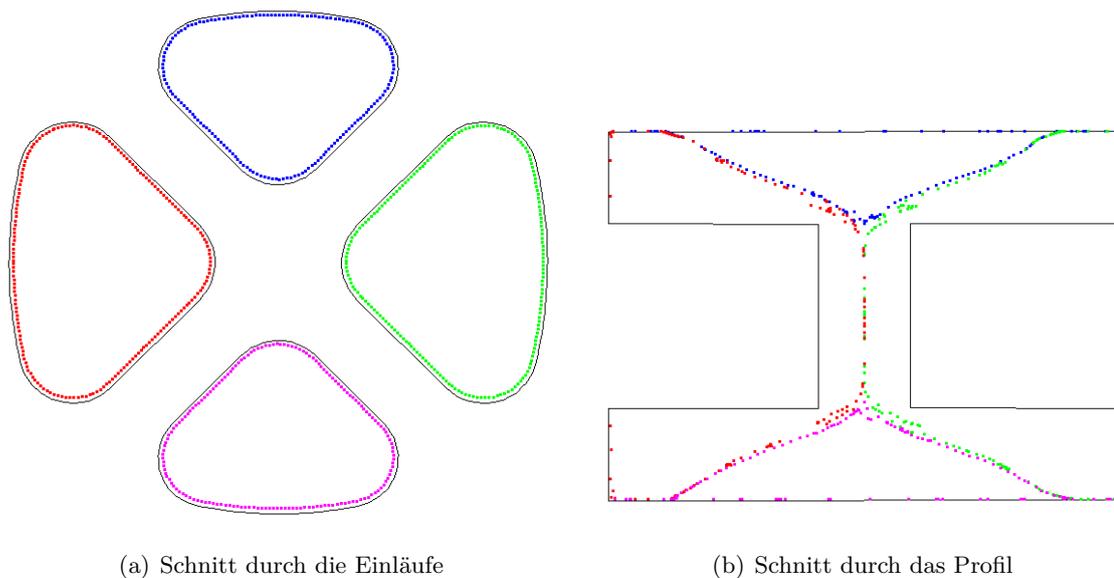


Abbildung 3.10: Platzierung der Startpunkte entlang der Profiloberflächen in den Einläufen und deren Verteilung im umgeformten Profil

Pressnahtlage tritt nicht mehr auf. Die Partikelverfolgung eines Partikels wird beendet, sobald diese Ebene überschritten wird. Durch die Bestimmung der exakten Position, an denen die verschiedenen Partikelbahnen diese Ebene passieren, entsteht eine Abbildung, die den Zusammenfluss der Außenbereiche der Einläufe und somit die Längspressnähte darstellt (siehe Abbildung 3.10(b)). Aus dieser Abbildung kann unter Verwendung einer entsprechenden Mustererkennung aus den einzelnen Punkten ein kontinuierlicher Pressnahtverlauf extrahiert werden.

3.3.1 Segmentierung

Bevor aus der Querschnittsdarstellung eine kontinuierliche Pressnaht interpoliert werden kann, ist es zuerst notwendig, diejenigen Punkte herauszufiltern, die nicht innerhalb einer Pressnaht liegen. Diese Punkte befinden sich entweder in der Nähe der Profiloberfläche, oder sind durch lokale Störungen des Simulationsmodells entstanden und können an jeder beliebigen Position im Profil auftreten. Während die Punkte am Rand keiner Pressnaht zugehörig sind, ist für Ausreißer keine eindeutige Aussage zu treffen, ob sie zu einer Pressnaht gehören. Enthält das FE-Modell mehr als zwei Einläufe, ist zudem zu unterscheiden, zu welcher Teilpressnaht die jeweiligen Punkte gehören. Jedes Segment der Gesamtpressnaht, bei der eine Verschweißungszone aus zwei unterschiedlichen Kammern vorhanden ist, wird als separate Teilpressnaht erfasst.

Alle Punkte, die einen vorab definierten Mindestabstand zum Profilrand unterschreiten, werden entfernt und für die weitere Pressnahterkennung nicht berücksichtigt. Auf diese Weise verbleiben ausschließlich Punkte in einer Pressnaht, sowie durch Rauschen

verursachte Ausreißer in der Punktmenge. Die Filterung der Ausreißer, sowie die Aufteilung der Partikel zu den einzelnen Pressnahtsegmenten wird in einem weiteren Schritt vorgenommen.

Die Pressnaht bildet sich aus Partikel, deren Ursprung sich in unterschiedlichen Kammern befindet. Um dies identifizieren zu können, wird für jeden Punkt ein Index gespeichert, der die Ursprungskammer kennzeichnet. Existiert innerhalb eines definierten Umkreises um den Punkt ein weiterer Punkt, dessen Ursprung in einer weiteren Kammer liegt, werden diese beiden Punkte der Pressnaht der beteiligten Kammern zugeordnet. Für den Fall, dass in dem Profil mehr als zwei Einläufe vorliegen, kann ein Punkt, der sich im Bereich zusammenfließender Pressnähte befindet, mehreren Segmenten zugeordnet werden. Stark verrauschte Punkte treten üblicherweise räumlich isoliert innerhalb des Profils auf, wodurch keine Zuordnung zu einer Pressnaht festgelegt wird. Somit werden die Punkte für die Interpolation der Pressnaht nicht berücksichtigt. Für optimale Ergebnisse ist es zweckmäßig den Toleranzradius für jedes Pressnahtsegment individuell zu definieren.

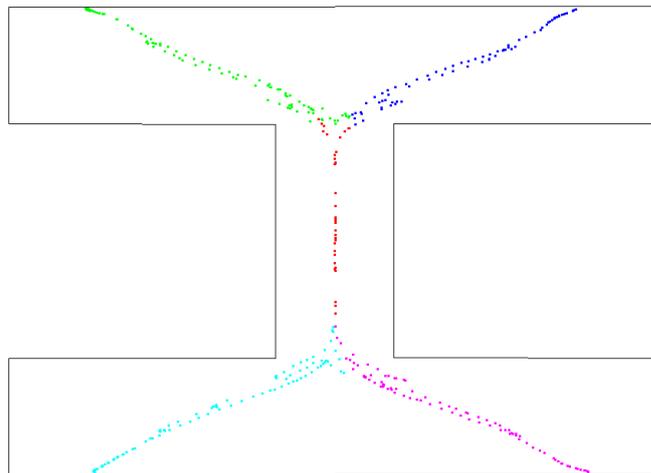


Abbildung 3.11: Segmentierung der Pressnaht: Punkte in der Nähe des Randes sind entfernt und die einzelnen Punkten den Pressnahtsegmenten zugeordnet.

3.3.2 Merkmalsextraktion

Ausgehend von den segmentierten Punkten kann ein kontinuierlicher Pressnahtverlauf als eine Approximation zwischen den Punkten erzeugt werden. Ziel ist es die Pressnähte als Kurven zu beschreiben, um diese anschließend mit einer Metrik quantitativ beurteilen zu können. Eine Interpolation durch die Punkte ist aufgrund deren Streuung nicht sinnvoll, weshalb Approximationsalgorithmen verwendet werden, die eine Glättung zwischen den Punkten erzeugen. Eine solche Glättung ist anzustreben, da diese Eigenschaft ebenfalls bei einem realen Pressnahtverlauf zu erwarten ist. Durch die vorangegangene Segmentierung sind die einzelnen Punkte bereits den Pressnahtsegmenten zugeordnet worden. Die

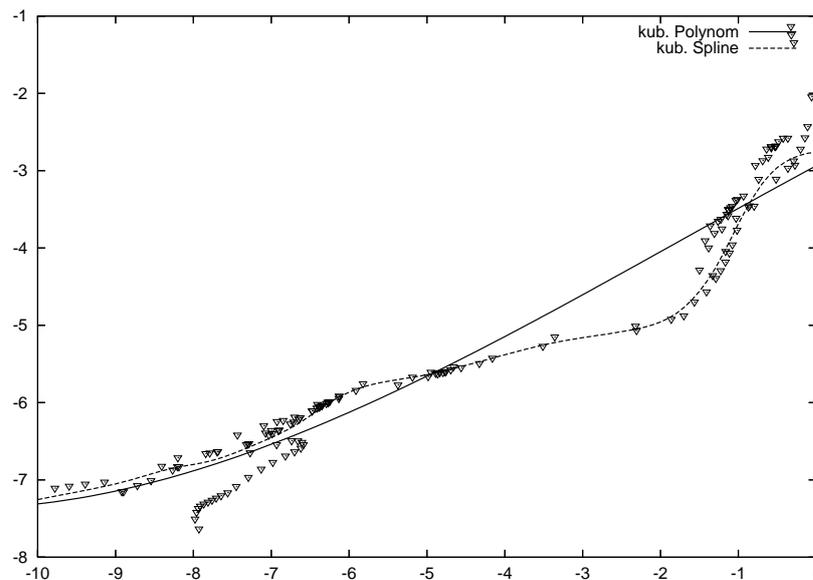


Abbildung 3.12: Approximation einer Punktmenge mittels eines kubischen Polynoms und eines kubischen Splines

Pressnahtapproximation wird separat für jedes Teilsegment vorgenommen und abschließend zu einem zusammenhängenden Pressnahtverlauf kombiniert.

Die einfachste Approximationsmethode stellen Ausgleichspolynome dar. Diese Polynome niedrigen Grades werden mittels einer Regressionsanalyse auf Grundlage der *Methode der kleinsten Quadrate* erstellt (vgl. Abschnitt 2.2.1). Für die Realisierung wird zumeist der *Levenberg-Marquardt-Algorithmus* verwendet [34]. Approximationspolynome sind sowohl einfach zu verarbeiten und weisen abhängig vom verwendeten Polynomgrad eine hohe Glattheit auf. Allerdings sind Polynome niedrigen Grades nicht flexibel genug um beliebige Pressnahtverläufe genau zu approximieren, während Polynome hohen Grades zu Überschwingen und zur Oszillation zwischen den Punkten neigen. Beide Einschränkungen führen zu unzureichenden Kurven um eine Pressnaht zu beschreiben. Zum Teil treten deutliche Abweichungen zu den Pressnahtpunkten auf.

Ein flexiblerer Kurvenverlauf ist mittels einer Approximation durch kubische Splinefunktionen möglich. Eine kubische Splinefunktion ist eine aus abschnittsweise definierten kubischen Polynomen zusammengesetzte Funktion, bei denen durch zusätzliche Randbedingungen an den Übergängen zwischen den Teilstücken eine C^2 -stetige Gesamtfunktion entsteht. Eine solche Funktion besitzt somit eine stetige Krümmung. Kubische Splines werden sowohl für die Interpolation von Punkten, als auch seit der Entwicklung geeigneter Algorithmen in den späten 60er Jahren für die Approximation von Punkten eingesetzt [21]. Im Gegensatz zu polynomienellen Ansätzen können nahezu beliebige Kurvenverläufe sehr genau approximiert werden. Zusätzlich besteht für approximierende Splinefunktionen die Möglichkeit, den Glättungsgrad der Kurve festzulegen. Die Extrema liegen hierbei

zwischen einer Interpolation der Kurve durch alle Punkte und der Degeneration der Approximationsfunktion zu einer Ausgleichsgeraden [5]. Durch die Splineapproximation werden die durch die Partikelverfolgung generierten Punkte in eine geglättete Kurve umgewandelt, welchen den Pressnahtverlauf repräsentiert. Um die Qualität der Approximation zu erhöhen, besteht zusätzlich die Möglichkeit die einzelnen Punkte individuell zu gewichten. Dadurch kann gezielt der Einfluss von Punkten reduziert werden, von denen eine Ungenauigkeit auf die Pressnahtlage ausgeht. Diese Gewichtung wird aus der vorangegangenen Segmentierung abgeleitet. Für jeden Partikel ist hierbei der euklidische Abstand zum nächsten Partikel bekannt, dessen Ursprung in einem anderen Einlauf liegt. Dieser Abstand wird als Gewichtung verwendet. Sind Punkte aus unterschiedlichen Einläufen deckungsgleich, der Abstand also null, wird für diese Punkte eine Gewichtung von 1 verwendet. Entspricht der Abstand zwischen den Punkten stattdessen dem Toleranzradius der Segmentierung, wird der Punkt mit 0 gewichtet und somit nicht berücksichtigt. Zwischen diesen Extremen wird die Gewichtung linear zum Abstand interpoliert. Die mittels der Splineapproximation erzeugten Kurven bilden die Pressnaht flexibel aber dennoch genau nach (siehe auch Abbildung 3.12). An den Rändern der Funktion neigen sie allerdings zu Ungenauigkeiten. Die Ursache hierfür liegt sowohl in der Problematik der Partikelverfolgung an den Profilrändern, als auch in der Segmentierung der einzelnen Punkte. In der Segmentierung werden Punkte in direkter Umgebung des Profilrands entfernt. Zusätzlich treten Abweichungen der Partikelverfolgung auf, wenn große Randabstände zu den Einläufen aufgrund großer Reibung benötigt sind. Um die Pressnahtkurve bis zum Rand zu verlängern, wird eine Extrapolation verwendet. Die der Splinefunktion zugrunde liegenden kubischen Polynome sind für eine Extrapolation von nur sehr kurzen Strecken geeignet. Stattdessen wird eine lineare Extrapolation der Kurvenenden vorgenommen. Die Enden der Pressnahtap-

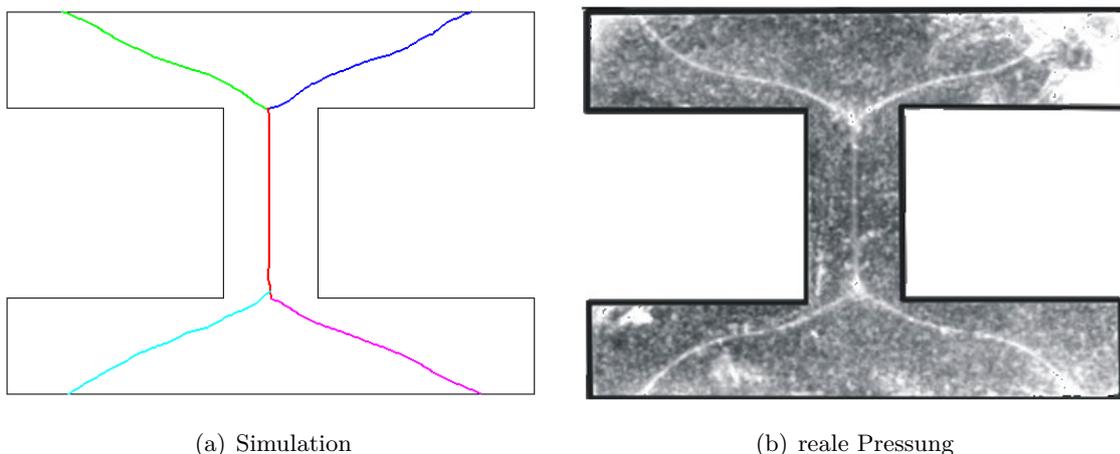


Abbildung 3.13: Extrahierte Pressnahtsegmente einer Simulation im Vergleich zu einer realen Pressung.

proximation werden durch eine Gerade beschrieben, deren Steigung aus den letzten 5% des Verlaufs der Splinefunktion abgeleitet wird. Existieren mehrere Pressnahtsegmente in dem Profil müssen die erkannten Pressnähte zusätzlich miteinander verschnitten werden, um Überschneidungen zu eliminieren. Die extrahierten Pressnahtsegmente aus einer Simulation sind mit einer realen Pressung vergleichbar (siehe Abbildung 3.13). Die auftretenden Abweichungen sind unter anderem durch eine zu geringe Reibung in der Simulation ($\mu = 0.01$) zu erklären. Weitere prozessbedingte Störquellen sind Fertigungstoleranzen des Presswerkzeugs oder Abweichungen der Presstemperaturen.

3.4 Vergleichsmetriken

Ziel der Optimierung der Pressnahtlage ist eine Annäherung des tatsächlichen Verlaufs an einen vorher definierten gewünschten Verlauf. Um unterschiedliche Werkzeuggeometrien vergleichen zu können, bedarf es einer geeigneten Metrik um eine quantitative Aussage über die Abweichung der Pressnahtlage vom Soll zu treffen. An eine solche Metrik werden folgende Ansprüche gestellt:

- Universelle Anwendbarkeit auf beliebige Pressnahtverläufe
- Anwendbarkeit für eine oder mehrere Pressnahtsegmente in einem Profil
- Berücksichtigung der Abweichungen über den gesamten Pressnahtverlauf und nicht ausschließlich von einzelnen Extrema
- Effiziente Berechenbarkeit

Die Verwendung der eingeschlossenen Fläche zwischen der Soll- und der extrahierten Pressnahtkurve bietet sich unter diesen Aspekten als Metrik an. Sie ist für jeden beliebigen Kurvenverlauf definiert, die Flächen mehrerer Pressnähte können einfach addiert werden und sie ist effizient berechenbar. Zudem ist es ein intuitiv sehr gut nachvollziehbares Maß. Die Fläche zwischen zwei Kurven im Intervall $[a, b]$ ist definiert als:

$$A = \int_a^b |f(x) - g(x)| dx \quad (3.12)$$

Um eine Integration der Splinefunktion zu vermeiden, ist eine numerische Integration zum Beispiel durch die Simpsonregel vorzuziehen.

Im Optimalfall liegt eine absolute Deckung zwischen der Soll- und der Istkurve vor, die Fläche ist dann 0. Mit steigender Abweichung wächst auch die eingeschlossene Fläche. Beachtet werden muss, dass bei einer deutlichen Abweichung des Pressnahtverlaufs, Soll- und Istkurven nicht immer im gleichen Intervall definiert sind. Eine Kurve kann deutlich kürzer sein, als die andere (siehe Abbildung 3.14). In einem derartigen Fall ist es sinnvoll die nicht definierten Abschnitte als Rechteck aufzufassen und auf die eingeschlossene Fläche zu addieren.

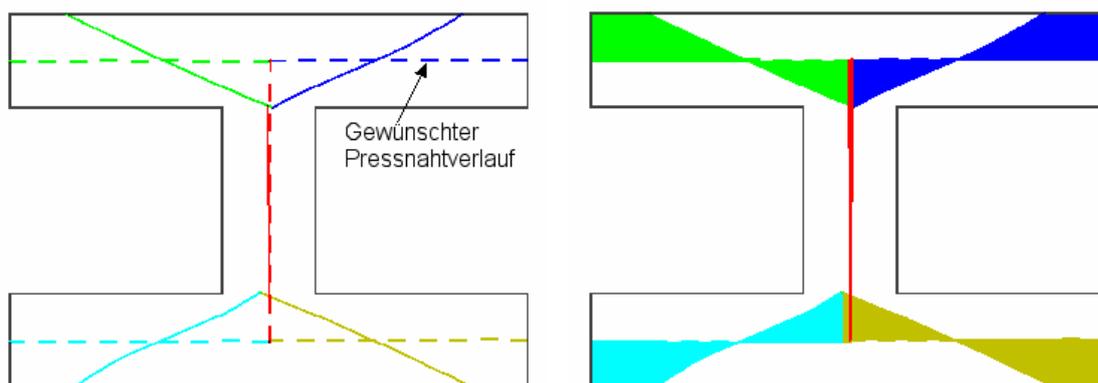


Abbildung 3.14: Darstellung der eingeschlossenen Fläche

Die Verwendung der Fläche als Metrik besitzt eine entscheidende Schwäche. Für unterschiedliche Kurvenverläufe liefert die Metrik identische Ergebnisse. Beispielsweise ergibt sich für einzelne große lokale Abweichungen eine identische Metrik, wie für eine globale geringe Abweichung. Für den Verlauf der Pressnaht sind geringe globale Differenzen, einzelnen großen Abweichungen vorzuziehen, um einen sicheren Abstand der Pressnaht zum Profilrand einzuhalten.

Eine derartige Eigenschaft kann in einer Verallgemeinerung der Flächenmetrik berücksichtigt werden. Diese Verallgemeinerung besteht in der Verwendung von L_p -Metriken [23]:

$$\left(\int_a^b |f(x) - g(x)|^p dx \right)^{1/p}, \text{ für } p \geq 1 \quad (3.13)$$

Für $p = 1$ entspricht diese Formel der Flächenmetrik 3.12. Durch die Potenzierung der Differenzen bei steigenden Parameter p , ergeben sich höhere Werte bei Funktionen die eine größere Varianz aufweisen. Diese Eigenschaft kann bereits an einen einfachen Beispiel mit der L_2 -Metrik veranschaulicht werden. Die beiden Funktionen $f_1(x) = 1$ und $f_2(x) = 2x$

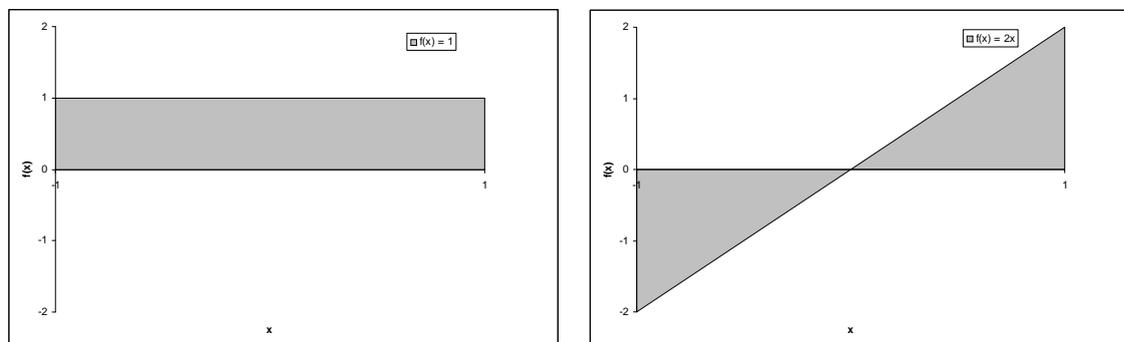


Abbildung 3.15: Anwendung der Metriken: Die eingeschlossene Fläche ist in beiden Fällen identisch, die L_2 -Metrik liefert einen kleineren Wert für f_1 .

schließen in Intervall $[0, 1]$ beide eine Fläche von 1 zur x-Achse ein. Bei der Verwendung der L_2 -Metrik ergibt sich ein differenziertes Bild. Während für f_1 die Metrik weiterhin 1 beträgt, ergibt sich für f_2 die Metrik $\sqrt{4/3}$. Die Funktion mit der geringeren Varianz wird bevorzugt. Die Verwendung der L_2 -Metrik liefert zwar weniger intuitive Ergebnisse, dennoch ist diese aufgrund der angesprochenen Vorteile für den Vergleich unterschiedliche Pressnahtverläufe zu bevorzugen.

Kapitel 4

Bestimmung der Randbedingungen

Bei der Optimierung der Pressnahtlage sind verschiedene Restriktionen zu berücksichtigen. Diese Randbedingungen beschreiben weitere Prozesseigenschaften eines Strangpressprofils oder Einschränkungen zu dessen Herstellbarkeit. Zusätzlich werden durch Restriktionen auch Anforderungen an die Qualität der Vernetzung für die numerische Simulation erfasst. Diese Eigenschaften sollen innerhalb vorgegebener Grenzwerte liegen, um die Simulation als Vorbereitung für einen stabilen realen Fertigungsprozess einzusetzen. Hintergründe zu den realisierten Randbedingungen sowie Details zu deren Implementierung werden im Folgenden vorgestellt.

4.1 Pressnahtqualität

Ein wichtiger Aspekt des Mehrkammerstrangpressens ist die Qualität der Verschweißungen. Bei einer zu schwachen Verschweißung drohen Ausfälle des Profils. Ein solcher Ausfall äußert sich beispielsweise in einer Rissbildung an schlecht verschweißten Bereichen unter hohen Belastungen. Die Güte der Verschweißung ist im hohen Maße, aber nicht ausschließlich, von der Schweißkammergeometrie abhängig. Durch eine zu starke Verkürzung der Schweißkammer oder bei zu niedrigen Pressdrücken kann eine deutliche Schwächung des Profils auftreten. Diese Pressnahtqualität ist deshalb während der Optimierung der Pressnahtlage zu beachten.

Für eine Beurteilung der Pressnahtqualität existieren verschiedene Modelle. Frühere Ansätze basierten auf rein konstruktiven Eigenschaften der Schweißkammergeometrie. Durch die Verwendung der FE-Simulation können zusätzlich charakteristische Werte wie Druck, Spannungen oder Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Einen Überblick über verschiedene Nahtentstehungsmodelle beschreibt Donati in [7]. Ein hierin beschriebenes besonders vielversprechendes als K-Kriterium bezeichnetes Modell basiert auf dem Ver-

hältnis zwischen dem Druck p und der effektiven Spannung σ über die gesamte Verschweißungsfläche in der Schweißkammer.

$$K_n = \int_A \frac{p}{\sigma} dA \geq C_{cr} \quad (4.1)$$

Dieses Integral darf einen werkstoffabhängigen kritischen Wert C_{cr} nicht unterschreiten, um von einer ausreichenden Pressnahtqualität ausgehen zu können. Dieses Verfahren hat den Vorteil, verschiedene Eigenschaften der Schweißkammergeometrie zu berücksichtigen. Der nötige kritische Wert kann sowohl mit niedrigem Druck auf langen Schweißkammern, wie auch mit hohem Druck in einer kurzen Schweißkammer erzielt werden. Problematisch an diesem K-Kriterium ist, dass der exakte Verlauf der Pressflächen sowie der werkstoffabhängige Grenzwert bekannt sein muss.

Ist für den verwendeten Werkstoff kein kritischer Wert bekannt, kann als Alternative ein Kriterium nach Kim et al. [12] verwendet werden. Dieses Kriterium basiert auf dem Verhältnis zwischen Druck und Fließspannung auf der Pressnaht.

$$a = \frac{p_{weld}}{k_f} \quad (4.2)$$

Dabei wird bei Überschreitung eines Grenzwertes $a > 3$ von einer zuverlässigen Pressnaht ausgegangen. Dieses Kriterium wird als Restriktion in der Optimierung verwendet.

Die Pressnahtqualität muss über die gesamte Pressnaht ausreichend hoch sein. Um einzelne Schwachstellen erkennen zu können, wird die extrahierte Pressnaht des Profils in einzelne Segmente mit einer Breite von maximal 1mm aufgeteilt. Für jedes Segment wird eine Bahnlinie mit einer rückwärts ablaufenden Partikelverfolgung generiert, auf der das Maximum des Druck/Fließspannungsverhältnis bestimmt wird. Für die Einhaltung der Restriktion müssen alle Segmente jeder Pressnaht den vorher definierten Grenzwert überschreiten.

4.2 Zugspannung auf den Verstärkungselementen

Die Verstärkungselemente sind in der Umformzone hohen Zugkräften ausgesetzt. Die Einbettung der Verstärkungselemente erfolgt mit einer konstanten Geschwindigkeit. Dagegen erhöht sich die Fließgeschwindigkeit des Basismaterials durch die sich verengende Schweißkammer. Diese Geschwindigkeitsdifferenzen erzeugen Zugkräfte auf dem Verstärkungselement. Werden diese Kräfte zu groß, besteht die Gefahr einer Abscherung innerhalb des Profils; das Element reißt und es entsteht eine Schwächung der Profileigenschaften. Durch eine Begrenzung der maximalen Zugkräfte unterhalb der werkstoffabhängigen Grenzwerte der Verstärkungselemente kann ein Versagen des Profils verhindert werden.

Die verwendete auf der Eulerformulierung basierende FE-Simulation erlaubt nicht die Berücksichtigung der Verstärkungselemente. Während für die Simulation ein homogenes

Material angenommen wird, stellen in realen Prozess Verstärkungselemente einen Fremdkörper innerhalb des Aluminiums dar. Der Einfluss der Verstärkungselemente auf den Werkstofffluss wird in der Simulation nicht berücksichtigt, umgekehrt sind auch keine Informationen über den Verlauf der Verstärkungselemente aus der Simulation zu erhalten. Unter vereinfachten Annahmen kann der Verlauf eines Verstärkungselements zumindest näherungsweise abgeleitet werden. Ist der Verlauf der Verstärkungselemente bekannt, kann auch die zu erwartende Zugbelastung ermittelt werden. Daraus wird abgeschätzt, ob dieses Verstärkungselement bei der verwendeten Werkzeuggeometrie zu reißen droht. Für die Bestimmung des Verstärkungselementverlaufs werden folgenden Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Die berechneten Druckspannungen des Basismaterials innerhalb der Schweißkammer wirken ebenfalls auf die Verstärkungselemente.
- Innerhalb der Verstärkungselemente wirken keine Schubspannungen.
- Tritt das Verstärkungselement in der Schweißkammer in eine Pressnaht ein, entsteht eine stoffschlüssige Verbindung aufgrund der Druckspannungen sowie der hohen Temperaturen.
- Der Eintrittspunkt der Verstärkungselemente ist vorgegeben.
- Die Abscherung des Verstärkungselements wird verursacht durch eine Relativgeschwindigkeit im Bezug auf das Basismaterial. Aufgrund von Schubspannungen an der Oberfläche entstehen Zugkräfte in den Verstärkungselementen.

Unter diesen Voraussetzungen kann eine Näherung für den Verlauf der Verstärkungselemente ermittelt werden. Durch die stoffschlüssige Verbindung mit dem Basiswerkstoff kann angenommen werden, dass dessen Bahn identisch ist mit dem des eingebetteten Verstärkungselements. Dieser Verlauf kann mittels der Partikelverfolgung bestimmt werden. Das Problem dieses Ansatzes ist, dass sich die Eintrittspunkte der Verstärkungselemente am Pressdorn in einer toten Zone befinden. Der Weg vom Eintrittspunkt bis zur Verschweißung in der Pressnaht ist somit unbekannt. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass das Verstärkungselement in der kürzestmöglichen Bahn vom Eintrittspunkt zur Verschweißung in der ausbildenden Pressnaht verläuft. Diese Bahn wird demnach durch eine Gerade beschrieben. Der weitere Verlauf wird über die Partikelverfolgung generiert (siehe Abbildung 4.1).

Auf der Bahn des Verstärkungselementes wird die maximale Zugspannung berechnet. Die lokale Spannung wird mittels der Von-Mises Vergleichsspannung für die Hauptspannungszustände bestimmt:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]} \quad (4.3)$$

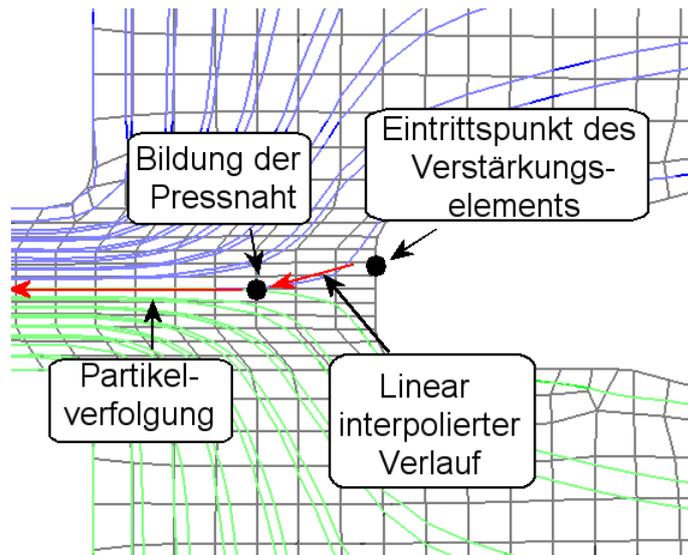


Abbildung 4.1: Bestimmung des Verlaufs eines Verstärkungselements

Für σ_I und σ_{II} werden die Druckspannungen des Basismaterials aus der Simulation verwendet, für σ_{III} wird stattdessen die maximale Spannung für ein Verstärkungselemente verwendet [30]:

$$\sigma_{III} = \sigma_{\text{verstärkung}} = \frac{2}{r_{\text{verstärkung}}} \cdot l_{\text{verbund}} \cdot \tau_{\text{max,Verbund}} \quad (4.4)$$

$$\tau_{\text{max,Verbund}} = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

$\tau_{\text{max,Verbund}}$ bezeichnet die maximale übertragbare Schubspannung nach von Mises mit der Fließspannung k_f . Die Fließspannung k_f wird der Simulation entnommen. Die maximale Spannung ist damit abhängig von der Fließspannung, der Länge der Schweißkammer und dem Durchmesser der Verstärkungselemente. Für die Bestimmung der Gesamtzugspannung auf einem Verstärkungselement werden die Zugspannungen über die Länge der Schweißkammer integriert.

$$\sigma_{\text{verstärkung,gesamt}} = \int_{l_{\text{verbund}}} \sigma_{\text{verstärkung}} dl_{\text{verbund}} \quad (4.6)$$

Das Integral wird numerisch inkrementell berechnet. Sind in einem Profil mehrere Verstärkungselemente vorhanden, wird die maximale Zugspannung aller Verstärkungselemente in der Restriktion verwendet.

Die Bestimmung der maximalen Zugspannung führt zugleich auch zu einer Prognose der Lage der eingebetteten Verstärkungselemente im Profil. Die Reduzierung von der Sollabweichung stellt das eigentliche Optimierungsziel des Strangpressprozesses dar. Aufgrund der Vielzahl von vereinfachenden Annahmen ist eine experimentelle Überprüfung der Ergebnisse nötig, bevor die Position der Verstärkungselemente als Ziel der Optimie-

nung genutzt werden kann. Für die Abschätzung der maximalen Zugspannung werden die Ergebnisse allerdings als ausreichend genau angenommen.

4.3 Maximale Presskraft

Für die Herstellung eines Profils muss eine Kraft aufgewendet werden, welche nötig ist, den Werkstoff durch die Werkzeugmatrize zu drücken. Soll die Simulation als Vorbereitung einer anschließenden Fertigung eingesetzt werden, ist die maximale Presskraft zu berücksichtigen. Übersteigt die benötigte Presskraft die maximale Presskraft der vorgesehenen Maschine, ist eine Herstellung des Profils mit der in der Simulation verwendeten Geschwindigkeit nicht möglich. Da die Werkzeug- und insbesondere die Schweißkammergeometrie einen signifikanten Einfluss auf die benötigte Presskraft besitzen, ist dieser Wert als Restriktion während der Optimierung der Pressnahtlage zu beachten.

Die benötigte Presskraft ist Bestandteil des Simulationsergebnisses aus HyperXtrude. Diese Größe kann ohne weitere Berechnungen direkt mit dem vorgegebenen Grenzwert verglichen werden. Für den praktischen Einsatz ist zu beachten, dass bei der Simulation einer Halb- oder Viertelgeometrie die real benötigte Presskraft das entsprechende Vielfache der Simulation beträgt.

4.4 Netzqualität

Die Netzqualität unterscheidet sich von den bisher beschriebenen Randbedingungen insofern, dass diese bereits vor der FE-Simulation überprüft wird. Bei einer Verletzung der Randbedingung ist eine Simulation nicht möglich, eine Bestimmung der Pressnahtlage und weiterer Prozesseigenschaften scheidet dadurch aus.

Die Ursache für eine Verletzung der Netzqualität liegt in der Verformung durch die Morphingoperatoren. Durch diese Veränderungen können einzelne Elemente des Netzes so stark von ihrer Idealform abweichen, dass die Qualität der numerischen Simulation abnimmt. Im Extremfall degenerieren Elemente vollständig; eine Simulation dieser Netze mit HyperXtrude ist nicht möglich. Der Rechenzeitbedarf für die Überprüfung eines Netzes beträgt nur einen Bruchteil einer FE-Simulation, ist jedoch zu hoch, um direkt bei der Punktauswahl berücksichtigt zu werden. Stattdessen wird diese Restriktion ebenfalls über ein Metamodell geschätzt und erst vor der Simulation vollständig geprüft.

Für die Bewertung der Netzqualität existiert eine Vielzahl von Kriterien. HyperMesh enthält insgesamt zwölf verschiedene Kriterien mit denen die Qualität eines jeden Elements des Netzes geprüft werden kann. Für die Überprüfung vor der Optimierung werden ausschließlich zwei Aspekte untersucht. Die Verformung eines Elementes wird mittels des *Aspect-Ratio* beurteilt. Das Prinzip dieses Kriteriums ist das Verhältnis zwischen der längsten und der kürzesten Kante eines Elements zu bestimmen, die genaue Implementierung

und die Obergrenze ist abhängig von dem zu prüfenden Element. Die vorgenommene Implementierung entspricht der Beschreibung des HyperMesh Online Manuals zur Bestimmung des Aspect-Ratios. Für einen Tetraeder wird ein Verhältnis für jede Seite zwischen dessen längster Kante und der Höhe des Tetraeders über dieser Fläche gebildet. Bei Hexaedern wird stattdessen das Verhältnis zwischen längster und kürzester Kante einer jeden Seite bestimmt. Bei beiden Elementtypen wird ein Verhältnis größer 5 als Verletzung des Kriteriums bewertet. Es wurde festgelegt, dass maximal 1% der Elemente innerhalb des Netzes dieses Kriterium verletzen darf.

Als zweites Kriterium wird zusätzlich die Jacobi-Determinante eines Elementes verwendet. Hiermit kann geprüft werden, ob degenerierte Elemente vorliegen. Ein solches Element besitzt einen negativen Wert der Jacobi-Determinanten. Eine FE-Simulation ist mit solchen Elementen nicht möglich, folglich darf dieses Kriterium von keinem Element verletzt werden.

Kapitel 5

Parallele Auswertungen in Kriging-Metamodellen

Eine parallele Ausführung von mehr als einer Simulation ist aufgrund der heutzutage allgemeinen Verfügbarkeit von Rechnernetzen oder Rechnern mit mehr als nur einer CPU eine naheliegende Möglichkeit für die Reduzierung des Gesamtzeitbedarfs einer Optimierung. Die Mehrzahl aktueller FE-Codes ist zudem in der Lage, mehr als einen Prozessor gleichzeitig für die Lösung zu verwenden. Eine solche Multiprozessorunterstützung fehlt der aktuellen Version von HyperXtrude jedoch, sodass eine parallele Ausführung multipler Simulationen den einzigen Weg dargestellt, von mehreren Recheninstanzen profitieren zu können.

Für die Verwendung paralleler Auswertungen sind entsprechende Anpassungen an dem Optimierungsalgorithmus notwendig. Für die Simulation einer initialen Lösungsmenge, zum Beispiel ein Latin-Hypercube, ist eine Aufteilung auf mehrere Rechnerinstanzen trivial, da diese voneinander unabhängig sind. Der EGO-Optimierungsalgorithmus ist in seiner Basisversion für serialisierte Auswertungen entwickelt worden, und muss demnach erweitert werden. Der naheliegende Ansatz ist nach der Generierung des Metamodells nicht nur einen einzelnen Punkt mittels der in 2.2.5 vorgestellten Verfahren auszuwählen, sondern mehrere. Die Optimierung gliedert sich dadurch in einzelne Stufen, in denen jeweils mehrere neue Punkte parallel simuliert werden. Die Metamodellierung selbst bedarf keiner Modifikation. Ob die einzelnen Punkte nacheinander oder parallel erzeugt worden sind, hat auf das Ergebnis des Modells keinen Einfluss.

Die benötigten Erweiterungen an den Auswahlverfahren und ihren Einfluss auf das Optimierungsverhalten sind bisher wenig untersucht. Eine erste Methode verwendeten Schonlau et al. in [32] für eine Erweiterung der GEI-Funktion. Diese wurde erfolgreich an einem praktischen Optimierungsproblem eines Kolbendesigns eingesetzt. Dieses Beispiel beschränkte sich auf die Erweiterung der GEI(2)-Auswahlfunktion sowie zehn parallelen Auswertungen. Eine weitere Untersuchung paralleler Auswertungen auf Metamodellen ent-

hält [33]. Hierin wird das Konvergenzverhalten bei steigender Anzahl paralleler Auswertungen verglichen. Es werden allerdings keine Kriging-Metamodelle verwendet, sondern Radial-Basis-Funktionen als Metamodell. Als Auswahlkriterium wurde in dieser Arbeit das EI-Kriterium verwendet. Für die untersuchten Testfunktionen konnte eine deutliche Steigerung der Konvergenzrate bezogen auf die einzelnen Stufen bei steigender Anzahl paralleler Auswertungen beobachtet werden. Zum Teil konnte sogar eine bessere Konvergenz nach einer festgelegten Anzahl von Auswertungen bei parallelen Auswertungen gegenüber sequenzieller Auswertung beobachtet werden. Eine Erklärung für dieses Verhalten wird nicht genannt.

Ein Vergleich, ob und wenn ja welchen Einfluss unterschiedliche Auswahlkriterien bei paralleler Ausführung auf die Konvergenzrate besitzen, konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Das leicht konfigurierbare GEI-Kriterium ist hierbei ein geeigneter Kandidat. Mit steigendem Parameter tendiert dieses Kriterium von einer lokalen Optimierung zu einer globalen Suche. Vermutet wird, dass sich unterschiedliche Effekte auf die Verteilung der Punkte in den einzelnen Stufen abzeichnen. Inwiefern diese Unterschiede Auswirkungen auf das Konvergenzverhalten bei stufenweiser Auswertung besitzen, soll im Folgendem untersucht werden.

5.1 GEI-Kriterium für stufenweise Auswertungen

Bei der Auswahl mehrerer Punkte innerhalb einer Stufe ist darauf zu achten, dass sich diese nicht an nahezu identischen Positionen befinden. Eine Auswertung nah beieinanderliegenden Punkte liefert nur wenig zusätzliche Informationen über den lokalen Verlauf der Funktion, als wenn dort in dieser Stufe nur ein einzelner Punkt ausgewertet wird. Stattdessen sollten die Punkte einen räumlichen Abstand zueinander besitzen. Für eine sequenzielle Optimierung wird eine Suche nach einem globalen Maximum des verwendeten Auswahlkriteriums vorgenommen. Für eine Erweiterung auf mehrere Punkte sollten stattdessen die n besten lokalen Maxima über den gesamten Lösungsraum gewählt werden, um diese parallel auszuwerten und die gewonnenen Informationen für die Erstellung eines neuen Metamodells zu verwenden. Problematisch an dieser Auswahl ist die typischerweise sehr hohe Multimodalität der zugrundeliegenden Auswahlfunktion, durch die es sehr schwierig ist, diese Punktmenge zu bestimmen.

Um dieses Problem zu lösen, ist eine Vereinfachung möglich die im bereits angesprochenem Artikel von Schonlau et al. [32] beschrieben wird. Mittels dieser Vereinfachung werden beliebig viele Punkte für eine Optimierungsstufe sequenziell mittels eines modifizierten GEI-Auswahlkriteriums bestimmt. Dies bedeutet, dass sobald ein Punkt x_{n+1}

ausgewählt wurde, dieser für die Auswahl von x_{n+2} als bereits ausgewertet angenommen wird. Das in bereits in 2.2.5 vorgestellte GEI-Kriterium wird ersetzt durch:

$$E_{n+1}(I^g) = \sigma_{n+i-1}^g \sum_{k=0}^g (-1)^k \binom{g}{k} u^{g-k} T_k \quad (5.1)$$

Die Wurzel σ des mittleren quadratischen Fehlers der Vorhersage ist ausschließlich abhängig von der Korrelation zwischen den Punkten und wird somit nur durch ihre Lage zueinander bestimmt, nicht jedoch von ihren jeweiligen Funktionswerten. Nach der Auswahl des Punktes x_{n+1} wird dieser Punkt auch im Term σ_{n+1} berücksichtigt. Durch dieses Verfahren ist sichergestellt, dass nicht mehrfach an gleichen Orten Punkte ausgewertet werden. Für die Auswahl des Punktes x_{n+2} ist der Fehler σ_{n+1} an allen Punkten x_1 bis x_{n+1} gleich 0 und sehr klein in deren direkter Umgebung. Indem jedesmal das Maximum der modifizierten GEI-Funktion gesucht wird, werden Bereiche, in deren Nähe bereits ein Punkt ausgewählt ist, ignoriert. Eine lokale Anhäufung von Punkten wird vermieden. Die Vereinfachung dieses Verfahrens besteht darin die restlichen Parameter wie die Prozessvarianz σ_p^2 und der Vektor der Korrelationskoeffizienten θ (siehe 2.2.1) als konstant über die sequenzielle Auswahl anzunehmen. Diese basieren weiterhin nur auf dem Punkten x_1, \dots, x_n und deren zugehörigen Funktionswerten. Erst nach der Simulation der gewählten Punkte, kann das Metamodell und somit diese Parameter aktualisiert werden.

5.2 Untersuchungen anhand von Testfunktionen

Anhand dreier Testfunktionen wurde das Konvergenzverhalten der stufenweisen parallelen Auswertung unterschiedlicher GEI-Funktionen untersucht. Hierbei werden sowohl die Ergebnisse der GEI(2)- sowie der EI (=GEI(1))-Funktion als auch unterschiedliche Parallelisierungsgrade (1, 2, 4 und 8 parallele Auswertungen) verglichen. Die Menge der initialen Startpunkte bildet ein maximin-optimierter Latin-Hypercube. Dieser enthält $5d$ Punkte, wobei d die Dimensionsgrad der Testfunktion bezeichnet. In den Optimierungsiterationen werden jeweils 100 Auswertungen vorgenommen, im Falle der achtfachen Parallelität 104. Die Anzahl an Optimierungsiterationen liegt damit zwischen 13 Stufen für acht parallele Auswertungen und 100 Stufen für die rein sequenzielle Ausführung. Aufgrund der Verwendung nichtdeterministischer Optimierungsalgorithmen für die Metamodellerzeugung sowie der Punkteauswahl können die Ergebnisse der Optimierung bei mehreren Durchläufen voneinander abweichen. Für aussagekräftige Ergebnisse werden die Optimierungen mehrfach unabhängig wiederholt. Für die Untersuchungen wurden Funktionen ausgewählt, bei denen vermutet wurde, dass deren Funktionslandschaften ähnliche Charakteristiken aufweisen, wie die der Pressnahtoptimierungen. Diese Funktionen weisen einzelne Optima auf, enthalten aber keine periodischen Schwingungen. Im Einzelnen sind dies die zweidimensionale Branin-Funktion, die Rosenbrock-Funktion auf vier, sowie die Hartmann-Funktion $h_{6,4}$ auf

sechs Dimensionen. Die Definition dieser Funktionen, die Definitionsbereiche, sowie die Lage und Funktionswerte der Optima enthält Anhang A. Die erzeugten Kringingmetamodelle basieren auf einer linearen Regression und der exponentiellen Korrelationsfunktion.

5.2.1 Branin-Funktion

Auf der zweidimensionalen Branin-Funktion ist auf allen Konfigurationen eine sehr gute Konvergenz zu erkennen. Bereits mit einem sehr kleinen Latin-Hypercube mit 10 Punkten, war spätestens nach 24 Auswertungen in allen Fällen ein Punkt gefunden der weniger als 50% vom Optimum abweicht. Nach weiteren 24 Auswertungen weicht das gefundene Optimum in keinem Fall um mehr als 10% vom tatsächlichen Optimum ab. Anhand der Konvergenzverläufe sind keine signifikanten Unterschiede zwischen dem EI- und dem GEI(2)-Kriterium zu erkennen. Jeder Test wurde insgesamt viermal unabhängig wiederholt, die Streuung der Ergebnisse ist vernachlässigbar. Die Standardabweichung zwischen den einzelnen Läufen betrug nur in Ausnahmefällen mehr als 10% des Durchschnitts, wobei tendenziell größere Schwankungen zu Beginn der Optimierung und bei einer hohen Parallelität beobachtet wurden. Bezogen auf die Stufenzahl ist bei beiden Auswahlverfahren eine Steigerung der Konvergenzrate mit zunehmender Parallelität zu beobachten.

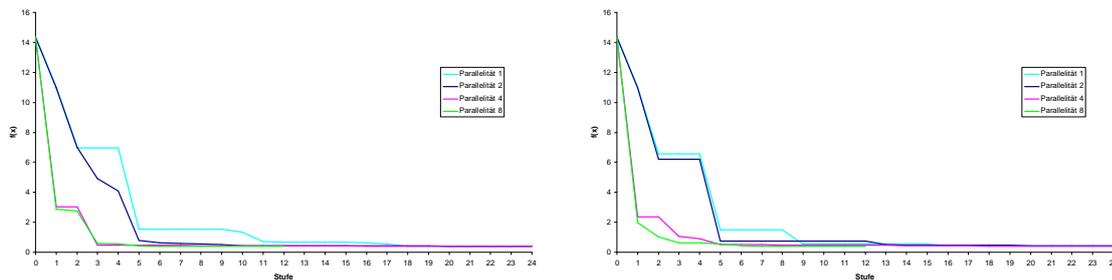


Abbildung 5.1: Konvergenz auf der Branin-Funktion: Links bei Verwendung des EI-Kriteriums, rechts mit GEI(2). Darstellt ist der Durchschnitt aus 4 Wiederholungen.

Während keine signifikanten Abweichungen zwischen den verschiedenen Kriterien bezogen auf die Konvergenz zu bemerken sind, existieren deutliche Unterschiede in der Verteilung der Punkte über den Suchraum. Auf der Branin-Funktion existieren drei globale Minima, wobei es für die Konvergenz beliebig ist, welches dieser Minima gefunden wird. Auffällig ist, dass bei dem EI-Kriterium nahezu ausschließlich in der Region eines Minimums optimiert wird, wohingegen die Punkte des GEI(2)-Kriterium deutlich auf zwei Regionen verteilt sind. Dieses Verhalten ist mit der stärkeren Gewichtung des erwarteten Fehlers zu erklären. Bei einer hohen Parallelität nähert sich das Verhalten des EI-Kriteriums tendenziell dem des GEI(2)-Kriteriums an. Durch die Unterdrückung eines Clusterings verteilen sich die Punkte stärker, falls eine große Anzahl von Punkten sequenziell ausgewählt werden. Dadurch können auch Punkte in bisher nur unzureichend

ausgewerteten Regionen ausgewählt werden, bei denen der erwartete Fehler jedoch groß ist. Dagegen sind keine Veränderungen an der Verteilung der Punkte für das GEI(2)-Kriterium bei steigender Punkteanzahl festzustellen. Im Gegensatz zur EI-Funktion ist die Punkteverteilung allerdings durchgehend deutlich stärker gestreut. Auffällig ist, dass unabhängig von der Anzahl gleichzeitig untersuchter Punkte diese sich über die Region zweier Optima verteilen. Es wird keines dieser Optima in bestimmten Optimierungsstufen bevorzugt.

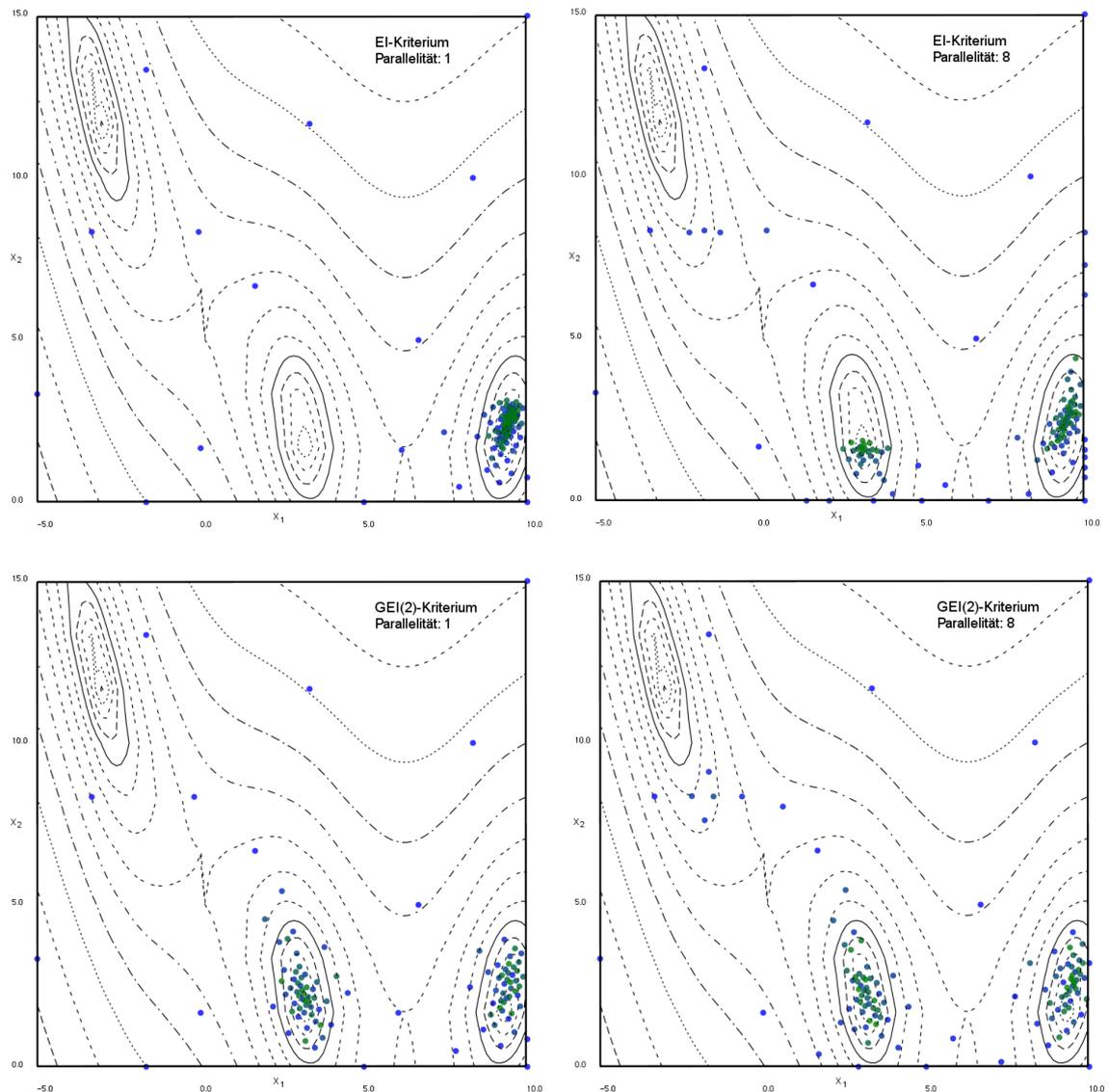
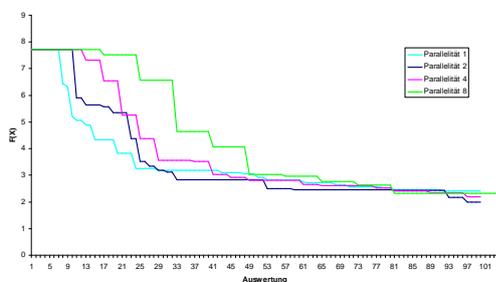


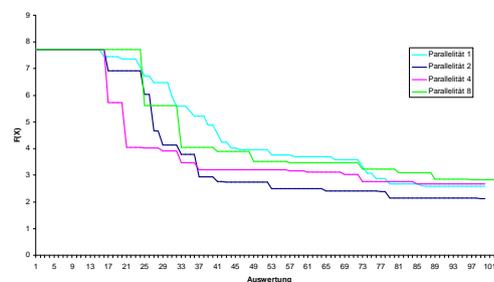
Abbildung 5.2: Verteilung der Punkte im Suchraum auf der Braninfunktion: Die Farbe der Punkte entspricht dem Zeitpunkt der Auswertung. Blaue Punkte entstammen frühen Optimierungsstufen, grüne späteren.

5.2.2 Rosenbrock-Funktion

Die vierdimensionale Rosenbrock-Funktion stellt eine deutlich schwieriger zu optimierende Funktion dar. Das globale Minimum befindet sich innerhalb eines schmalen lang gezogenen Grabens in der Funktionslandschaft. Zu den Rändern dieses Grabens steigt die Funktion stark an. Den Graben zu identifizieren ist für eine Optimierung einfach, das globale Minimum selbst zu finden dagegen schwierig. Bei vier und mehr Dimensionen existiert mindestens ein weiteres lokales Minimum innerhalb des Grabens. Der Latin-Hypercube umfasste in diesen Fall 20 Punkte. In allen Testläufen wurde der Graben unabhängig vom Auswahlkriterium und Parallelisierungsgrad identifiziert, eine Konvergenz zum globalen Minimum trat hingegen in keinem Fall auf. Auffällig ist die deutliche Streuung, die für jede Kombination aus Auswahlkriterium und Parallelisierungsgrad auftritt (siehe auch Anhang B). Aus diesem Grund wurden jeweils 8 Wiederholungen durchgeführt. Der Durchschnitt dieser Wiederholungen deutet auf eine leicht bessere Konvergenz des EI-Kriteriums gegenüber dem GEI(2)-Kriteriums hin. Auffällig ist die deutlich bessere Konvergenz bei 4 und mehr parallelen Auswertungen in Verbindung mit GEI(2) zu Beginn der Optimierung. Dieser anfängliche Vorteil egalisiert sich allerdings mit fortschreitender Optimierung. Unabhängig von dem verwendeten Auswahlkriterium und Parallelisierungsgrad konnte kein Punkt in unmittelbarer Nähe zum globalen Minimum identifiziert werden, sondern die Optimierung konvergierte in lokalen Minima.



(a) EI



(b) GEI(2)

Abbildung 5.3: Durchschnittliche Konvergenz auf der Rosenbrock-Funktion in Abhängigkeit zur Anzahl der Auswertung.

Auf der Rosenbrockfunktion ist keine eindeutige Aussage zu treffen, inwiefern sich der Parallelismus auf die Konvergenz von verschiedenen Auswahlkriterien auswirkt. Vielmehr ist festzustellen, dass die Rosenbrockfunktion sehr anspruchsvoll ist und die Genauigkeit der Metamodellierung nicht ausreicht, den schmalen Graben der Funktion abzubilden und dadurch das globale Minimum zu identifizieren.

5.2.3 Hartmann-Funktion

Als dritte Testfunktion wird die Hartmann-Funktion h_{64} verwendet. Für eine Initialisierung des Metamodells wird ein LHD aus 30 Punkten über den sechsdimensionalen Definitionsbereich der Funktion verwendet. Die Hartmann-Funktion enthält auf dem verwendeten Definitionsbereich neben dem globalen Minimum weitere sechs lokale Minima. Für jede der Konfigurationen aus Parallelisierungsgrad und Auswahlkriterium sind acht Wiederholungen vorgenommen worden, in den Grafiken sind die Durchschnittswerte verwendet worden. Die Konvergenzverläufe sind über die unabhängigen Läufe sehr stabil, die Standardabweichung liegt in jeder Stufe und jeder Konfiguration unter 0,4. Bei der Darstellung der Konvergenzverläufe ist ein Trade-Off für den Einsatz der Parallelität zu erkennbar. Bei hohen Parallelisierungsgraden steigt deutlich die Konvergenz pro Stufe. Wird stattdessen die Anzahl an Auswertungen als Vergleichskriterium verwendet, ist eine sequenzielle Vorgehensweise vorzuziehen.

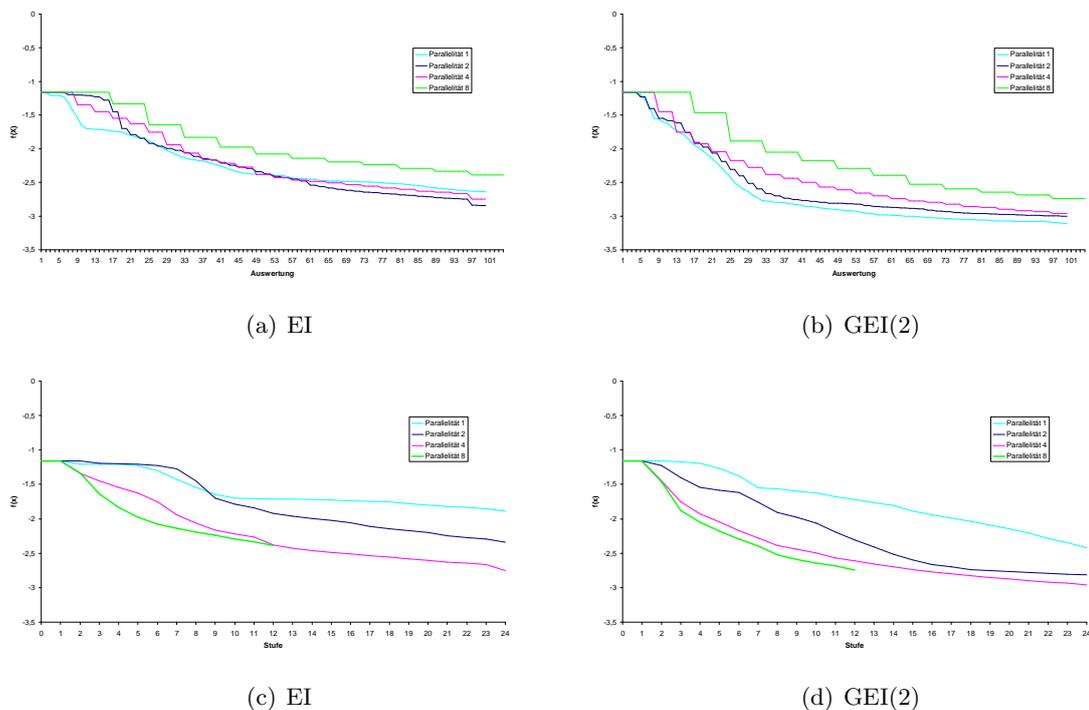


Abbildung 5.4: Durchschnittliche Konvergenz auf der Hartmann-Funktion in Abhängigkeit zu der Anzahl der Auswertungen und der parallelisierten Stufen.

Das GEI(2)-Kriterium ist auf dieser Funktion deutlich überlegen. Das schlechte Konvergenzverhalten bezogen auf die Auswertungen des nicht parallelisierten EI-Kriteriums, deutet auf eine Anfälligkeit gegenüber lokalen Minima hin. Bei höheren Parallelisierungsgraden verbessert sich diese Konvergenz. Bei beiden Kriterien ist festzustellen, dass sich die Konvergenzverläufe bezogen auf die Optimierungsstufen zwischen 4 und 8 parallelen

Auswertungen nur wenig unterscheiden. Eine hohe Parallelität bringt an dieser Stelle nur wenig Zugewinn.

5.3 Fazit

Anhand der untersuchten Testfunktionen konnte gezeigt werden, dass eine Parallelisierung erfolgreich in Kriging-Metamodelle integriert werden kann. Es ergaben sich jedoch keine eindeutigen Hinweise darauf, ob das EI- und das GEI(2)-Auswahlkriterium unterschiedlich stark von einer parallelisierten Auswertung profitieren. Generell erscheint das verwendete Kriterium einen höheren Einfluss zu besitzen. Dennoch sind einige interessante Eigenschaften zu beobachten. Bei der sehr lokal optimierenden EI-Funktion verteilen sich die untersuchten Punkte besonders auf der Branin-Funktion über einen deutlich größeren Bereich, falls eine Parallelisierung genutzt wird. Dieses Kriterium profitiert in diesem Fall von den clusterverhindenden Eigenschaften der Parallelisierung. Es wird dadurch insgesamt unanfälliger gegenüber einer vorzeitigen Konvergenz in einem lokalen Minimum. Auf den untersuchten Funktionen ist dennoch die GEI(2)-Funktion vorzuziehen. Diese besitzt sowohl ein gleichwertiges oder besseres Konvergenzverhalten, als auch eine geringere Anfälligkeit gegenüber lokalen Minima. Aus diesen Gründen wird dieses Auswahlkriterium für die Optimierung der Pressnahtlage eingesetzt.

Kapitel 6

Optimierung

6.1 Aspekte der Implementierung

Die Implementierung der Pressnahterkennung und der Optimierungsalgorithmen erfolgte in der Programmiersprache JAVA. Das ausschlaggebende Argument für die Verwendung dieser Sprache liegt in der Plattformunabhängigkeit der damit erstellten Programme. Dadurch kann die Optimierung auf allen Systemen durchgeführt werden, auf denen HyperXtrude als FE-Code zur Verfügung steht.

Die Software ist in zwei Komponenten aufgeteilt. Eine Komponente dient der visuellen Analyse einer Strangpresssimulation sowie der Definition von Optimierungszielen und der Randbedingungen. Die zweite Komponente ist eine kommandozeilenbasierte Applikation, mit der die Optimierung der Pressnahtlage durchgeführt wird.

Visualisierung und Analyse Für eine qualitative Beurteilung der Pressnaht, der Partikelverfolgung und der Geschwindigkeitsvektoren im FE-Modell wird eine Visualisierung der Simulationsergebnisse vorgenommen. Für die Modelldarstellungen wird eine Kombination aus AWT/Swing für zweidimensionale Ansichten, sowie der Java-OpenGL-Schnittstelle JOGL für dreidimensionale Modelle verwendet. Durch die JOGL-Bibliothek ist eine direkte 3D-Hardwareunterstützung aus Java auf einer Vielzahl von Betriebssystemen möglich. Hierdurch lassen sich komplexe Gittermodelle performant darstellen.

Die FE-Modellgeometrie sowie die Simulationsergebnisse aus HyperXtrude werden über zwei Dateien importiert. Die Geometrie des Netzes wird durch das *Grid-File-Format* aus HyperMesh beschrieben. Dieses Format beschreibt die Position der Knoten, den Aufbau der Elemente sowie die Randflächen eines Modells in lesbarem ASCII Text. Eine vollständige Dokumentation enthält [1]. Die Simulationsdaten werden über das *HyperMesh-Result*-Format importiert. Diese in einem Binärformat vorliegende Datei enthält für jeden Knoten des Modells die Simulationsergebnisse der unterschiedlichen physikalischen Größen wie Geschwindigkeit, Temperatur und Spannung. Eine öffentliche Dokumentation ist

nicht bekannt, die Dateistruktur wurde durch Reverse-Engineering soweit nachvollzogen, um den Import der enthaltenen Daten zu ermöglichen. Für die Erstellung und Visualisierung der Approximationssplines für die Pressnahtlage wird die *Java-AppLib*-Bibliothek verwendet [24].

Die dreidimensionale Darstellung der Partikelverfolgung ist besonders geeignet, um bestimmen zu können, wie stark die Reibung des Werkstoffs an den Werkzeugwänden ist. Ferner ermöglicht es die Erkennung von toten Zonen. Eine zweite Darstellungsform besteht aus einem Querschnitt durch das FE-Modell in Pressrichtung. Hierin können zusätzlich, falls vorhanden, Pressnähte sowie die geschätzte Position der Verstärkungselemente dargestellt werden. Durch diese Visualisierung kann vorab beurteilt werden, inwiefern die FE-Modellqualität für eine Optimierung geeignet ist, indem die Verteilung der Partikelbahnen im Querschnitt angezeigt wird. Neben dieser Funktion für eine rein visuelle Bestimmung der Pressnahtlage dient die Programmkomponente zusätzlich als Werkzeug für die Definition des Optimierungsziels sowie der Analyseparameter der Partikelverfolgung.

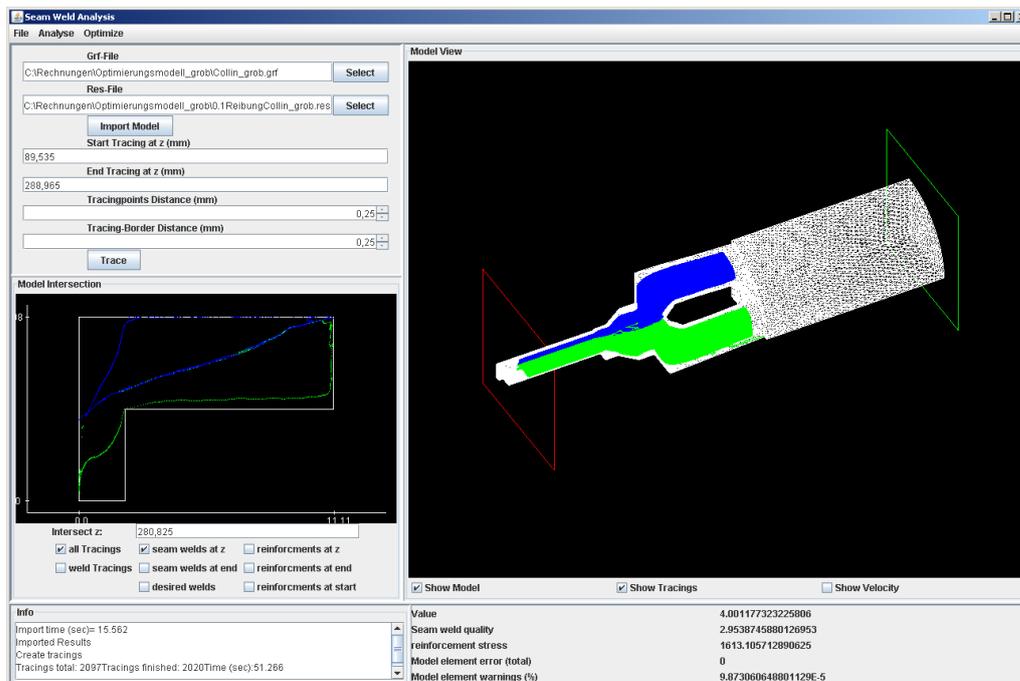


Abbildung 6.1: Visualisierungen für die Analyse von FE-Modellen

Zielfunktionsdefinition und Optimierung Bevor eine Optimierung der Pressnahtlage vorgenommen werden kann, müssen zuerst die zu erzielenden Pressnähte und die Grenzwerte der Randbedingungen definiert werden. Neben diesen Zielwerten muss der Definitionsbereich der verschiedenen bereits vorab erzeugten Morphingparameter festgelegt werden, mit denen die Optimierung vorgenommen werden soll. Zusätzlich müssen die Parameter der Partikelverfolgung und der Pressnahterkennung definiert werden, wie

sie in Kapitel 3.3 beschrieben sind. Diese Parameter müssen anhand einer vorab erstellten Simulation modellabhängig festgelegt werden. Dadurch ist es auch möglich beurteilen zu können, inwiefern das erstellte Modell für eine Optimierung geeignet ist. Bei einer zu geringen Diskretisierung ist eine Pressnahterkennung fehleranfällig, oder gar unmöglich. Um anschließend eine Optimierung vornehmen zu können, werden alle benötigten Parameter und Dateien in einen gemeinsamen Container verpackt, um eine möglichst einfache Weitergabe der Daten an die Optimierungskomponente zu ermöglichen.

Diese Komponente ist ein eigenständiges Kommandozeilenprogramm. Durch eine solche Trennung kann die Optimierung auch auf Servern ohne grafische Ausgabemöglichkeit vorgenommen werden.

Implementierung der Metamodellierung Für die Implementierung der Krigingmetamodelle diente die Bibliothek *DACE-Toolbox* als Grundlage [20]. Diese Bibliothek enthält *Matlab*-Routinen für die Erzeugung und Auswertung von Krigingmetamodellen. Obwohl Schnittstellen von Java zu Matlab, als auch quelloffene kompatible Alternativen zu Matlab existieren, wurde eine Portierung der Routinen in reinen Java-Code vorgenommen, um unabhängig von weiterer Software zu sein. Als Regressionsmodell kommt eine lineare Regression zum Einsatz, für das Korrelationsmodell die exponentielle Funktion bei denen der Parameter $p = 1$ als konstant angenommen wird (vgl. 2.2.1). Das DACE-Toolkit nutzt für die Modellanpassung einen deterministischen *Dace-Fit* genannten Optimierungsalgorithmus. Dieser wurde allerdings aufgrund von Zweifel an der Qualität des Verfahrens ersetzt. Stattdessen wird als globaler Optimierungsalgorithmus die Java-Implementierung von CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) verwendet, wie dies von Wagner et al. in [4] vorgeschlagen wird. Der CMA-ES ist eine Evolutionsstrategie mit anwachsender Populationsgröße und gilt als einer der besten globalen Optimierungsverfahren [3]. Um den Zeitbedarf der Modellanpassung zu beschränken, ist eine Obergrenze von 2500 Funktionsauswertungen für den CMA-ES vorgesehen. Ein weiterer Unterschied zur DACE-Toolbox besteht in der Normalisierung der Eingabeparameter. Das originale Toolkit normalisiert die Eingaben über den Mittelwert und die Standardabweichung automatisch, um mit beliebigen Intervallen für unterschiedliche Parameter zu funktionieren. Für die Pressnahtoptimierung ist der Suchraum allerdings vorher bekannt, sodass er bereits normalisiert auf einen [0-1] Hyperkubus an die Metamodellgenerierung übergeben wird.

Die initialen LHDs werden nicht während der Optimierung erstellt, sondern es werden vorberechnete Tabellen verwendet (<http://www.spacefillingdesigns.nl> [9]), deren LHDs sehr gute raumfüllende Eigenschaften aufweisen. Jones et al. schlagen in [13] vor, den EGO-Algorithmus mit einem LHD der Größe $10 \cdot \text{Anzahl Parameter}$ zu initialisieren. Dieser Wert erscheint für die Pressnahtoptimierung als zu groß. Stattdessen werden, wie auch bei der Untersuchung der parallelen Auswertung, LHDs mit einer Größe von

5 · *Anzahl Parameter* verwendet. Bei der Implementierung des EGO-Algorithmus ist auf eine Modellvalidierung während der Optimierung ebenfalls verzichtet worden.

Für die Auswahl weiterer Punkte wird aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5 das GEI(2)-Kriterium für parallele Auswertungen eingesetzt. Die Anzahl parallel auszuwertender Punkte entspricht der Anzahl zur Verfügung stehender FE-Simulatoren, um eine optimale Auslastung zu garantieren. An dieser Stelle wird ebenfalls der CMA-ES Algorithmus für die Suche nach dem Punkt mit der höchsten erwarteten Verbesserung eingesetzt. Als Startpunkt des CMA-ES wird der beste Punkt aus einem sehr großen randomisierten Latin-Hypercube mit $1000 \cdot \textit{Anzahl Morphingparameter}$ Punkten verwendet, um das Maximum über den gesamten Suchraum zu finden. Für die Berücksichtigung der Randbedingungen wird die Wahrscheinlichkeits-Methode verwendet.

Bei den Randbedingungen nimmt die Modellqualität eine Sonderrolle ein. Diese Restriktion muss bereits vor der Simulation geprüft werden. Der Rechenaufwand für die Prüfung eines komplexen FE-Modells beträgt zwar nur einen Bruchteil der Simulationszeit, ist aber dennoch zu hoch um die Qualität direkt während der Punkteauswahl zu prüfen. Wird vor der FE-Simulation festgestellt, dass ein FE-Modell aufgrund fehlerhafter Elemente nicht berechnet werden kann, wird das Restriktionsmodell für die Modellqualität neu aufgestellt und ein neuer gültiger Ersatzpunkt gesucht. Hierdurch wird vermieden, dass einzelne Simulatoren in einer Optimierungsstufe unbenutzt bleiben.

Als Abbruchkriterium ist ausschließlich ein Erreichen einer vordefinierten Obergrenze an Optimierungsstufen implementiert. Die Optimierung kann nach ihrer Beendigung wieder aufgenommen werden, sodass es möglich ist, die Anzahl an Optimierungsstufen zu erhöhen, falls die vorherigen Schritte darauf schließen lassen, dass weitere Verbesserungen möglich sind.

6.2 Optimierung der Pressnahtlage

Die in Kapitel 3 und 4 vorgestellten Techniken wurden an insgesamt drei verschiedenen FE-Modellen ansteigender Komplexität experimentell getestet. Der Versuchsaufbau, die Durchführung sowie die Ergebnisse sind Bestandteil des folgenden Abschnittes. Die im Folgenden angegebenen Simulationszeiten beziehen sich auf die verwendeten Rechner-systeme, mit denen die Optimierungen durchgeführt wurden. Entweder wurde ein Rechner mit einem Intel Core2Quad 6600 unter WindowsXP (32Bit), oder ein Rechner mit zwei AMD Opteron 2216 unter Red Hat Linux (64Bit) verwendet. Beide Systeme unterscheiden sich in ihrer Performance kaum, sodass nur ein Wert genannt wird. Aufgrund beschränkter Softwarelizenzen des FE-Codes waren zum Zeitpunkt dieser Arbeit maximal fünf parallele Simulationen möglich. Weitere Projekte des Instituts benötigten zumindest zeitweise ebenfalls einzelne Lizenzen, sodass die Anzahl praktisch auf drei oder vier parallele Instanzen beschränkt war. Die vollständigen Ergebnisse aller durchgeführten Versuche enthält Anhang C.

6.2.1 Versuchsmodell 1

Das erste FE-Modell beschreibt ein Strangpresswerkzeug für die Fertigung eines Doppel-T Profils. Aufgrund der Symmetrie des Werkzeuges wird statt eines Vollprofils eine Viertelgeometrie verwendet. Hierdurch reduziert sich die benötigte Simulationszeit deutlich, die Simulationsergebnisse sind dennoch nahezu vollständig auf ein Vollprofil übertragbar. Dieses Modell wurde nicht unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten entwickelt. Stattdessen wurde auf eine einfache Parametrisierung und eine niedrige Gesamtsimulationszeit geachtet. Die rechteckige Geometrie des Modells ist aufgrund ihrer ausgeprägten Neigung zu toten Zonen nur bedingt für reale Versuche geeignet. Ziel war die Erschaffung eines Referenzmodells, mit denen Informationen über den Einfluss der Morphingparameter auf die Pressnaht gewonnen werden können, um diese für spätere realitätsnähere Modelle wei-

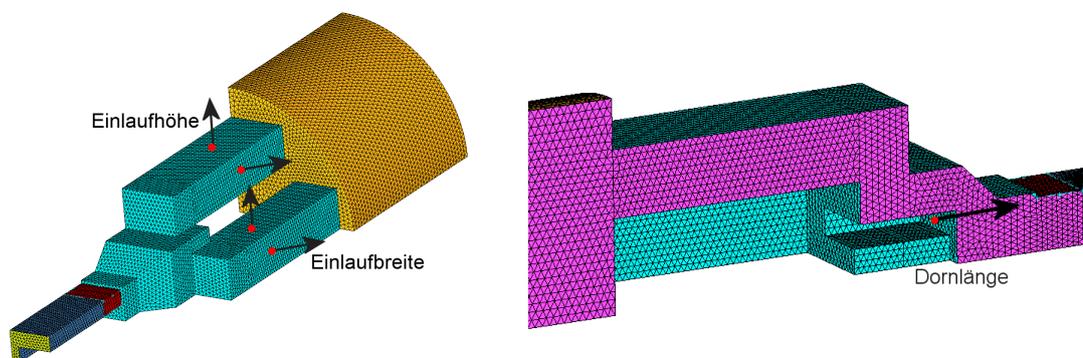


Abbildung 6.2: Aufbau: Versuchsmodell 1. Die Pfeile deuten die verwendeten Morphingoperationen an.

terzuverwenden. Zusätzlich sind aufgrund der geringen Simulationszeit umfangreiche Tests zur Pressnahtanalyse und der Bestimmung der Randbedingungen möglich. Anhand dieser Ergebnisse erfolgt die Planung und Durchführung einer Optimierung von komplexeren Modellen.

Voruntersuchungen und Versuchsaufbau Für dieses Modell sind insgesamt fünf Morphingparameter definiert worden, anhand deren eine Verbesserung der Pressnahtlage erzielt werden soll. Modifizierbare Größen stellen die Höhe und Breite der beiden vorhandenen Einläufe sowie die Länge des Pressdorns, über dessen Stirnfläche die Verstärkungselemente in das Profil eingeleitet werden, dar. Die Breite der Viertelgeometrie beträgt 11.11mm, die Höhe 8.08mm. Die gewünschte Pressnaht soll den oberen Bereich des T-Profiles bei 6,06mm halbieren. In das Profil werden über Bohrungen im Pressdorn zwei Verstärkungselemente zugeführt. Die Zuführpunkte befinden sich an den Koordinaten $(4; 6, 06; z)$ und $(8; 6, 06; z)$ auf der Stirnfläche des Dorns, die fehlenden z-Koordinate ist aufgrund der variablen Länge des Dorns keine Konstante. Diese Koordinate wird für jede mögliche Geometrie individuell ermittelt. Das FE-Modell enthält insgesamt 30640 Knoten und besteht aus 138926 Tetraederelementen. Auf eine Simulation von Reibung wurde in diesem Fall verzichtet, wodurch die Laufzeit gegenüber einer Simulation mit Reibung in etwa halbiert wird. Auf den verwendeten Systemen lag die Rechenzeit bei ca. 25 Minuten pro Simulation.

Durch vorherige Experimente war bekannt, dass insbesondere die Länge des Pressdorns einen sehr hohen Einfluss auf den Verlauf der Pressnaht besitzt. Deshalb wurde für diesen Parameter eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss genauer zu untersuchen. Dazu wurde der Pressdorn in Schritten von jeweils 0.3mm um bis zu 3mm verkürzt oder verlängert und die daraus resultierende Veränderung für die Pressnahtlage, sowie der Prozessrandbedingungen beobachtet. Die Simulation deckte sich in diesen Fall mit bekannten Experimenten. Eine Verlängerung des Pressdorns verbessert deutlich die Lage der

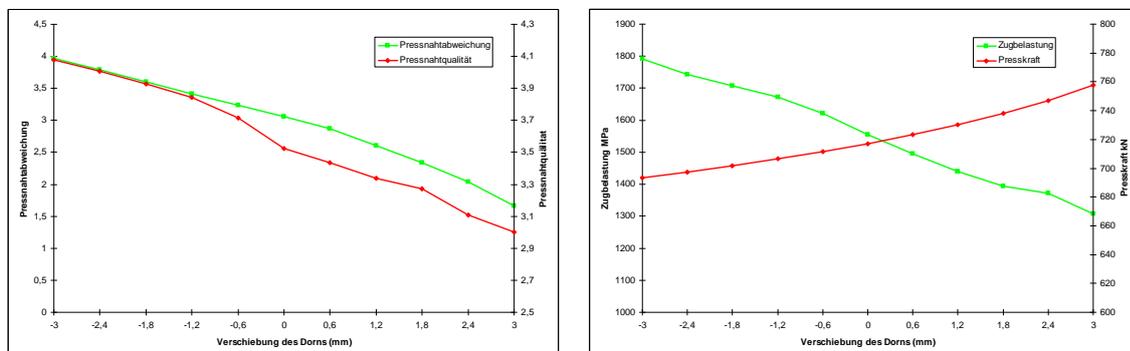


Abbildung 6.3: Sensitivitätsanalyse der Dornlänge und dessen Einfluss auf die Pressnahtlage sowie die Restriktionen

Pressnaht, jedoch steigt die benötigte Presskraft aufgrund der sich verengenden Schweißkammer an. Ebenso ist ein Absinken der Pressnahtqualität zu beobachten, die ebenfalls durch eine verkürzte Verschweißungszone zu begründen ist. Die Minimalwerte der Pressqualität treten zur Profilmitte hin auf, während sie zum Rand ansteigen. Entscheidend für diese Eigenschaft ist das Minimum, welches auch als Restriktion verwendet wird. Die Zugspannung auf den Verstärkungselementen nimmt mit steigender Dornlänge ab. Erklärt werden kann dies über den Verlauf der Pressnaht. Durch eine Verringerung der Pressnahtlagenabweichung reduzieren sich ebenfalls die Abweichungen der Verstärkungselemente und somit die Zugbelastungen, die durch horizontale oder vertikale Verschiebung entstehen. Auffällig ist die Rauschermut der untersuchten Kriterien für die verwendeten Punkte (siehe Abbildung 6.3). Die vier Kurven verlaufen in einer gleichmäßigen Krümmung, einzig für die Pressnahtqualität sind leichte Schwankungen zu erkennen.

Aus diesen gewonnenen Daten ist eine konfliktionäre Situation für die Optimierung zu entnehmen. Einerseits ist eine deutliche Verbesserung der Pressnahtlage durch die Verlängerung des Pressdorns zu erzielen, andererseits reduziert sich die Qualität der Verschweißung und es werden hohe Presskräfte benötigt. Beide Eigenschaften müssen sich innerhalb vorgegebener Grenzwerte befinden, um von einem zuverlässigen Fertigungsprozess ausgehen zu können. Ausgehend von der Voruntersuchung ist zu vermuten, dass für die Optimierung des Profils diese Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss haben werden. Für eine Optimierung unter Verwendung aller Morphingparameter wurden folgende Grenzwerte gewählt:

Randbedingung	Grenzwert
Presskraft F_{press}	<750 kN
Pressnahtqualität Q	>3
Zugbelastung P_{zug}	<2000 MPa

Die Intervalle der Morphingparameter wurden so gewählt, dass es auch bei beliebiger Kombination keine degenerierten Elemente im FE-Netz auftreten. Die Randbedingung, dass solche Elemente vermieden werden müssen, schränkt in diesem Fall den Suchraum der Optimierung nicht zusätzlich ein. Ausgangspunkt für die Optimierung bildete wie auch in den vorangegangenen Untersuchungen zur parallelen Auswertung von Krigingmodellen ein vorberechneter LHD mit 25 Punkten [9]. Anschließend wurden jeweils drei Simulationen parallel durchgeführt. Für die Auswahl der Punkte wurde das GEI(2)-Kriterium verwendet. Um die Varianz der Optimierung zu untersuchen, wurden insgesamt drei unabhängige Läufe vorgenommen, bei denen jeweils 10 Iterationsstufen ausgeführt werden. Insgesamt werden in dieser Konfiguration 55 Funktionsauswertungen mit den dazugehörigen FE-Simulationen durchgeführt, bis die Optimierung terminiert. Wird im folgenden

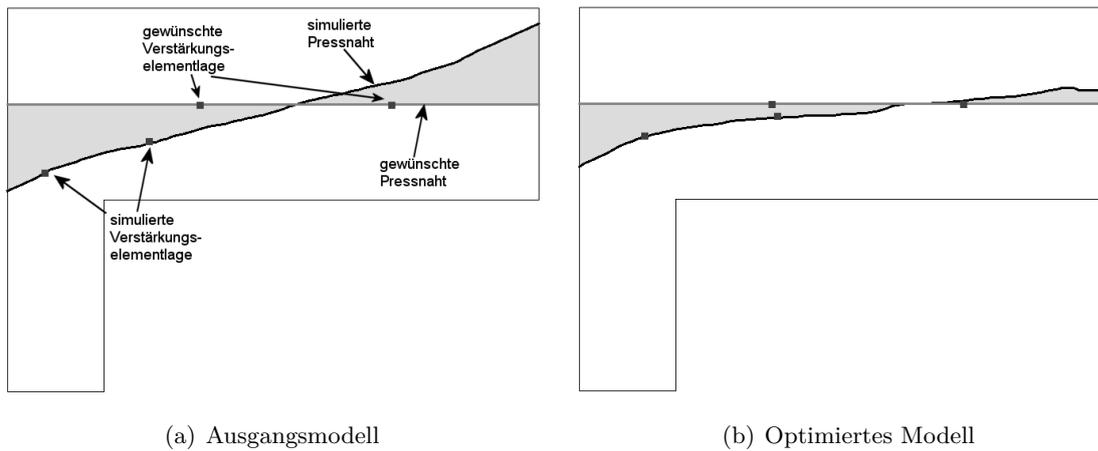


Abbildung 6.4: a) Pressnahtverlauf des Versuchsmodells 1 vor der Optimierung, b) die beste gefundene Lösung, die alle Randbedingungen erfüllt.

Text ein einheitsloses Maß für die Pressnahtabweichung verwendet, entspricht dies der in Abschnitt 3.4 definierten L_2 -Metrik .

Ergebnisse Die Endergebnisse der drei unabhängigen Optimierungen weisen nur eine geringe Varianz auf. Der Durchschnittswert der Pressnahtabweichung über alle Läufe liegt bei 1,58248 mit einer Varianz von nur 0,02387. Die Abweichung des nicht optimierten Modells ist mit 3,0646 annähernd doppelt so hoch. Die eingeschlossene Fläche als intuitives Vergleichsmaß verringert sich ebenfalls deutlich. Diese sinkt von $8,6296\text{mm}^2$ auf $3,911\text{mm}^2$ für das beste in allen Optimierungen gefundene FE-Modell, welches auch alle Randbedingungen erfüllt. Durch die Optimierung ist die Abweichung mehr als halbiert worden. Eine deutliche Pressnahtabweichung tritt weiterhin zur Profilmitte hin auf. Dieser Bereich ist offenbar mit den definierten Parametern nicht ausreichend korrigierbar.

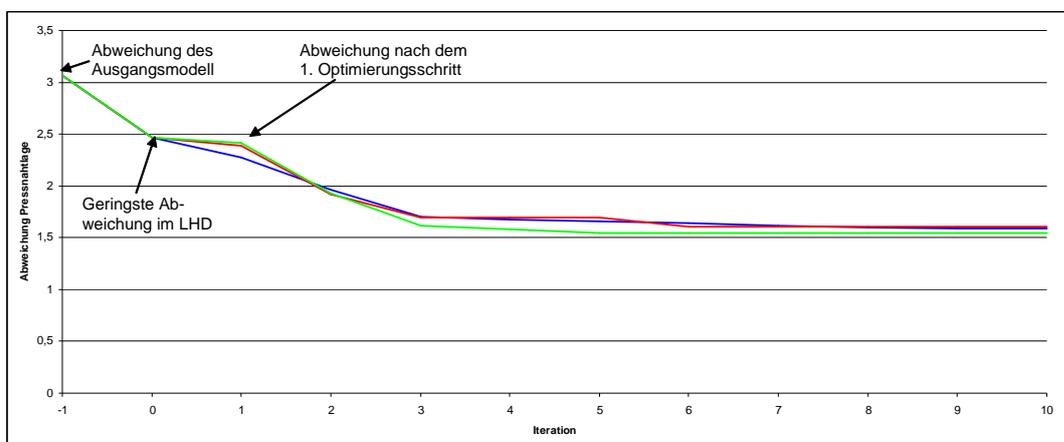


Abbildung 6.5: Konvergenzverlauf für das Testmodell 1 über die drei Versuche

Neben diesen Endergebnissen ist eine Analyse der Optimierung aufschlussreich, um weitere Informationen über dessen Ablauf zu gewinnen. Als Erstes soll das Konvergenzverhalten untersucht werden. Für die Konvergenzverläufe sind ebenso wie für die Endresultate nur geringe Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen zu erkennen. Dieses Verhalten ist zumindest zu Beginn der Optimierung durch die identischen Startwerte des LHDs erklärbar. Aufgrund der nichtdeterministischen Optimierungsalgorithmen für die Metamodellanpassung sowie der Punkteauswahl kommt es in den folgenden Schritten zu Abweichungen in der Optimierungsabfolge, dennoch beschränken sich alle Versuche auf das gleiche Gebiet, in dem ein Minimum vorliegt. Dieser Bereich um das Minimum wird sehr schnell identifiziert. In allen drei Fällen war bereits in der dritten Optimierungsiteration, also nach der Durchführung von neun Simulationen, ein Punkt gefunden, der weniger als 10% vom besten überhaupt gefundenen Punkt abweicht. Die folgenden Optimierungsschritte bringen nur noch geringe Verbesserungen. Zur Kontrolle wurde ein Versuch erweitert, indem anstatt zehn insgesamt 16 Iterationen vorgenommen wurden. Die in diesen zusätzlichen Iterationen erzielte Verbesserung war allerdings nur gering. Es wurde eine Verbesserung von 1,593 auf 1,555 erzielt, die allerdings immer noch über den besten überhaupt gefundenen Punkt mit 1,549 lag. Ein weiteres Indiz für eine Konvergenz stellt die generalisierte erwartete Verbesserung dar, anhand der neue Punkte ausgewählt werden. Diese Werte sinken kontinuierlich und betragen am Ende der Optimierung nur noch wenige Hundertstel bis Tausendstel der Werte zu Beginn der Optimierung.

Eine weitere Eigenschaft, die an der Optimierung untersucht werden kann, ist die Behandlung von Randbedingungen. Diese wurde explizit so definiert, dass ein Optimum auf der Randbedingung liegen wird, um die Restriktionsbehandlung zu testen und zu untersuchen. Für die Presskraft, die auf 750 kN begrenzt wurde, treten Werte im Intervall von [680,9;781,86] auf, wobei die Extrema Punkte aus der Menge des LHDs sind. Die

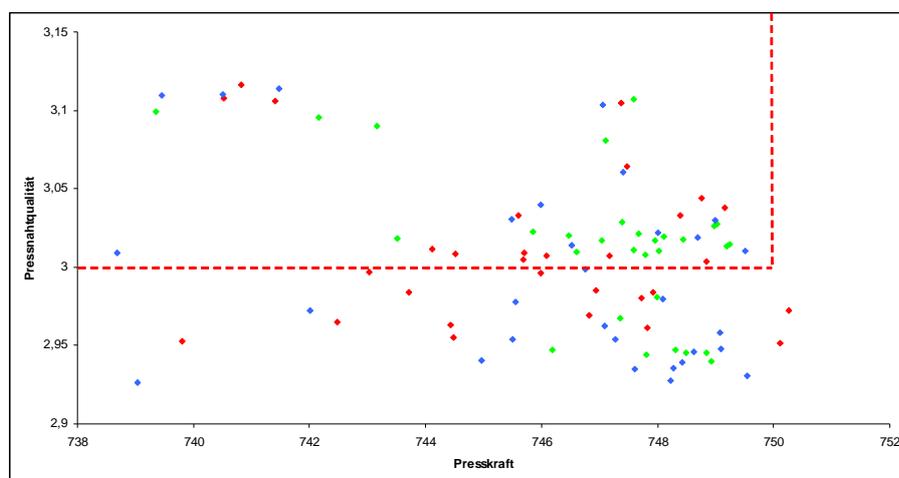


Abbildung 6.6: Verteilung der Punkte im Bezug auf die Einhaltung der Randbedingungen

Restriktion wird zum Teil deutlich verletzt, wodurch der von den Morphingparametern aufgespannte Suchraum erheblich eingeschränkt wird. Eine ähnliche Situation liegt bei der Pressnahtqualität vor. Diese Ergebnisse liegen im Intervall $[4,087;2,926]$ und damit zum Teil unter dem festgelegten Grenzwert von 3. Für eine bessere Beurteilung über die Einhaltung der Restriktion ist eine graphische Darstellung der Verteilung der Lösungen im Bezug zu diesen Restriktionen sinnvoll. Abbildung 6.6 stellt alle in den drei Optimierungen erzeugten Lösungen im Bezug zu Presskraft und Verschweißungsqualität dar. Gut zu erkennen ist, dass die auftretenden Presskräfte in der Nähe der maximal erlaubten Presskraft liegen, aber bis auf zwei Fälle nicht überschritten wird. Anders verhält sich die Pressnahtqualität, deren Restriktion deutlich häufiger verletzt wird. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Funktion ein schwaches Rauschen enthält, wie es sich in der Sensitivitätsanalyse zum Pressdorn andeutete. Dadurch wird eine genaue Vorhersage, wie sie in diesem Fall nötig ist, erschwert. Tendenziell treten Verletzungen der Randbedingungen häufiger gegen Ende der Optimierung auf. Auf der Suche nach weiteren möglichen Verbesserungen können weniger erforschte Gebiete und damit großen Varianzschätzer, trotz hoher wahrscheinlicher Restriktionsverletzung einen höheren Wert für das GEI(2)-Kriterium aufweisen, als bereits genauer untersuchte Regionen innerhalb der Randbedingungen. Für eine abschließende Klärung dieser Frage sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Auf eine Modellvalidierung, wie sie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben wird, ist während der Optimierung verzichtet worden. Es wurde stattdessen eine geeignete Verteilung der Funktionswerte angenommen, die ohne Transformation ein aussagekräftiges Metamodell ermöglicht. Diese Annahme soll anhand der erfolgten Optimierungen nachträglich überprüft werden. Die Untersuchung der standardisierten Residuen (siehe Formel 2.27) bedarf für eine nachträgliche Untersuchung keiner Kreuzvalidierung. Stattdessen werden die Schätzer

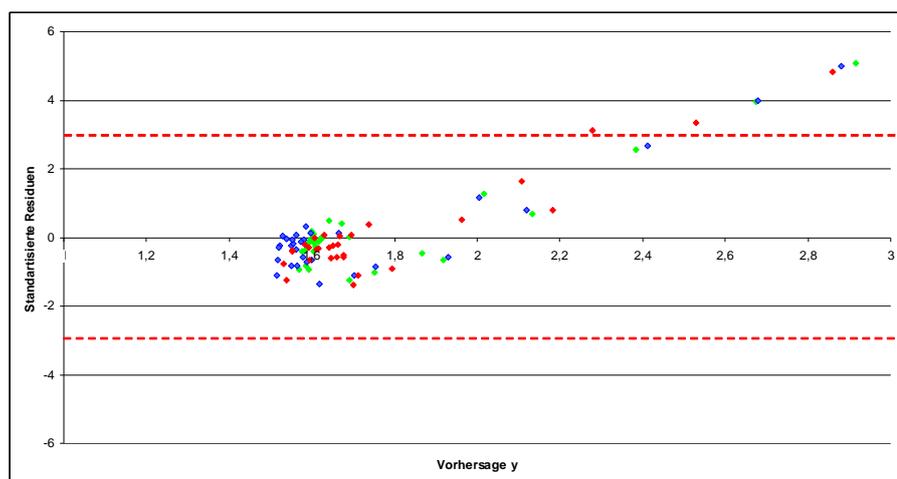


Abbildung 6.7: Streudiagramm der standardisierten Residuen: Für eine gute Modellapproximation sollen sich alle Residuen im Intervall $[-3;3]$ befinden

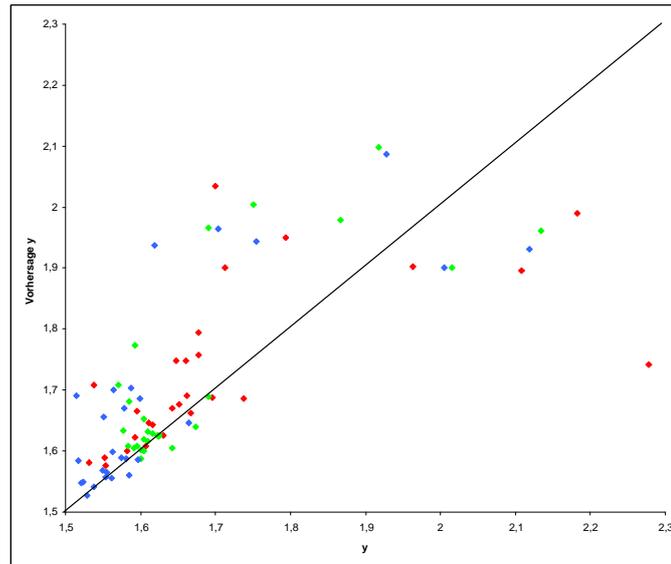


Abbildung 6.8: Vergleich der Vorhersagen $\hat{y}(x)$ mit den Funktionswerten $y(x)$, Punkte über der Diagonalen wurden als zu groß geschätzt, Punkte darunter als zu klein.

$\hat{y}(x)$ und deren Varianz σ^2 sowie die tatsächlichen Abweichungen der Pressnahtlage $y(x)$ verwendet, die im Laufe der Optimierung generiert wurden. Im Streudiagramm 6.7 sind die standardisierten Residuen aller Optimierungspunkte gegen die vorhergesagten Werte $\hat{y}(x)$ aufgetragen. Bis auf sehr wenige Ausnahmen befinden sich die Residuen alle im Intervall $[-3;3]$, für Punkte, bei denen niedrige Funktionswerte vorhergesagt wurden, ist der Betrag der Residuen fast immer kleiner als 1. An dieser Stelle kann demnach von einer sehr guten Modellqualität ausgegangen werden. Punkte, für die eine höherer Abweichung der Pressnahtlage angenommen wird, streuen allerdings deutlich stärker. Dies ist dadurch zu erklären, dass diese zu Beginn der Optimierung erzeugt wurden, als die Metamodellierung nur aus wenigen Punkten bestand, sodass auch größere Schwankungen auftreten können. Dennoch liegen sie bis auf drei Ausnahmen pro Lauf deutlich innerhalb des als akzeptable Abweichung definierten Intervalls. Bei einer genauen Analyse der Ausreißer wurde festgestellt, dass diese Punkte alle der ersten Optimierungsiteration entstammen und in den Eckpunkten des hyperkubischen Suchraumes angeordnet sind. Eine Erklärung, warum diese Punkte so schlecht approximiert wurden, konnte nicht gefunden werden, vermutet ist aber, dass der initiale LHD diese Regionen schlecht erfasst. Ein solche schlechte raumfüllende Eigenschaft einiger Ecken des LHDs ist bereits im zweidimensionalen Fall (siehe Abbildung 2.9(b)) ansatzweise zu erkennen.

Eine zweite Möglichkeit die Modellqualität zu prüfen, besteht durch den Vergleich der Vorhersage der Pressnahtabweichung $\hat{y}(x)$ mit der tatsächlich durch die Simulation ermittelten Abweichung $y(x)$. Im Diagramm 6.8 sind die diese beiden Werte gegeneinander aufgetragen. Im Idealfall sollten alle Punkte auf der Hauptdiagonalen liegen; in einem

solchen Fall existiert keine Abweichung zwischen Vorhersage und tatsächlichem Wert. Aufgetragen sind in dieser Darstellung alle Punkte der drei Läufe inklusive denjenigen, welche eine oder mehrere Restriktionen verletzen. Entfernt wurden allerdings drei Ausreißer um eine bessere Darstellung für die restlichen Ergebnisse zu erzielen. Bei diesem Vergleich ist festzustellen, dass die Vorhersage tendenziell zu hohe Werte schätzt. Wie auch bereits bei der Untersuchung der Residuen sind die Ausreißer der ersten Optimierungsiteration zu erkennen. Diese Pressnahtabweichungen für diese Punkte wurden deutlich kleiner geschätzt, als sie tatsächlich sind.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass für diesen Versuch die Pressnahterkennung zuverlässige Ergebnisse erzielt. Die metamodellbasierte Optimierung erreichte eine signifikante Verbesserung der Pressnahtlage unter Berücksichtigung der Randbedingungen bereits mit weniger als 50 Simulationen. Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen soll die Optimierung auf anspruchsvollere FE-Modelle angewendet werden.

6.2.2 Versuchsmodell 2

Das Versuchsmodell 2 ist eine Erweiterung des vorherigen FE-Modells. Das zu fertigende T-Profil ist identisch, allerdings sind die Schweißkammer sowie die Einläufe komplexer aufgebaut. Dieser Aufbau ist besser für eine reale Pressung geeignet und bietet zudem vielfältigere Möglichkeiten das Modell mittels Morphing zu modifizieren. Verändert werden kann sowohl die Höhe, die Breite als auch die Länge verschiedener Schweißkammerbereiche.

Versuchsaufbau Im Gegensatz zu dem ersten FE-Modell wird in diesem Fall eine Coulomb-Reibung von $\mu = 0,1$ simuliert. Das Versuchsmodell 2 besteht aus 31075 Knoten in 141800 Tetraedern und damit nur aus wenig mehr Elementen als Modell 1. Der Diskretisierungsgrad ist allerdings nicht über das gesamte FE-Modell gleichmäßig. Innerhalb der in der Umformung kritischen Regionen, der Schweißkammer und der Einläufe, ist die durchschnittliche Elementgröße bedeutend kleiner als im Pressblock. Durch diese Anpassung ist eine bessere Auflösung der Partikelverfolgung für die Identifikation der Pressnahtbildung zu erreichen, ohne die Simulationszeit übermäßig zu erhöhen. Die Simulationszeit beträgt etwa 50 Minuten.

In einem ersten Versuch wurden insgesamt neun Parameter für die Schweißkammer definiert und eine Optimierung durchgeführt. Diese schlug allerdings aufgrund zweier Eigenschaften fehl. Zum einen waren die Definitionsbereiche der einzelnen Parameter zu groß gewählt. Durch die gegenseitigen Überlagerungen war der überwiegende Teil der Simulationen aufgrund illegaler FE-Netze nicht durchführbar. Zum anderen verletzten die restlichen Lösungen häufig die Mindestpressnahtqualität oder die maximale Zugbelastung. Von insgesamt 95 Simulationen lieferten nur 21 eine Lösung, die keine der Restriktionen verletzte. Die Abweichung der Pressnahtlage konnte dabei nur von 4,002 auf 3,0315 re-

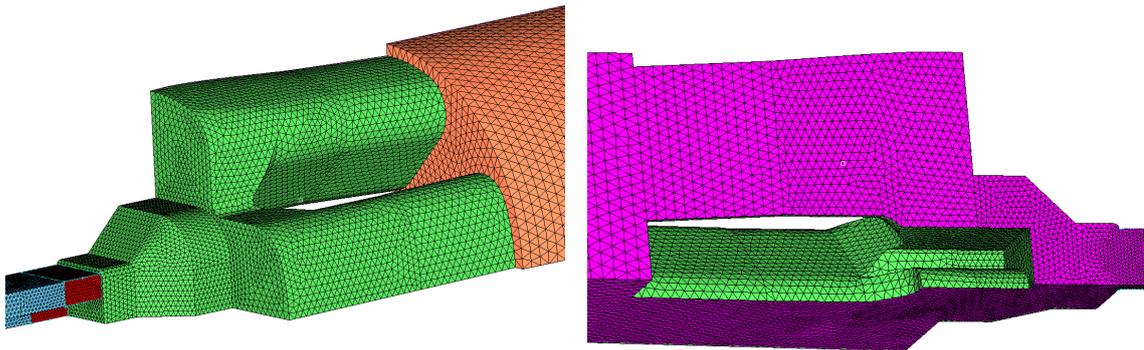


Abbildung 6.9: Aufbau: Versuchsmodell 2. Im Gegensatz zu Versuchsmodell 1 sind die Einläufe und die Schweißkammer komplexer aufgebaut. Zu erkennen ist der höhere Diskretisierungsgrad der Schweißkammer gegenüber dem Pressblock.

duziert werden. Ausgehend von den wenigen Ergebnissen erschien eine reine Modifikation der Schweißkammer ohne Veränderungen der Einläufe als wenig Erfolg versprechend.

Der Versuchsaufbau wurde auf Grundlage dieser Ergebnisse überarbeitet. Anstatt ausschließlich die Schweißkammer zu verändern, sind drei Parameter der Schweißkammer entfernt und stattdessen durch zwei Parameter für eine Modifikation der Einläufe ersetzt worden. Die Intervalle der bestehenden Parameter wurden verkleinert, um das Auftreten illegale FE-Netze zu reduzieren. Zudem wurde die minimale Pressnahtqualität von 3 um 10% auf 2,7 reduziert. Der initiale LHD umfasste 40 Punkte, anschließend sind 10 Optimierungssiterationen mit jeweils drei parallelen Simulationen durchgeführt worden. Traten in einem Optimierungsschritt illegale FE-Netze auf, so wurden diese verworfen und durch neue gültige Netze ersetzt. Ein Optimierungsschritt kann dadurch mehr als drei Punkte enthalten, von denen allerdings maximal drei ein gültiges Ergebnis liefern. Insgesamt wurden für eine Optimierung 70 Funktionsauswertungen vorgenommen, bei Bedarf konnten weitere Iterationsschritte hinzugefügt werden, falls keine Konvergenz erzielt wird. Für eine Kontrolle der Ergebnisse sind wie auch schon im vorherigen Fall drei Optimierungen vorgenommen worden.

Ergebnisse Das Endergebnis der Optimierung ist wie auch schon im Modell 1 zufriedenstellend. Auch für einen komplexeren Werkzeugaufbau und bei Berücksichtigung von Reibung ist eine deutliche Annäherung an die gewünschte Pressnahtlage erzielt worden. Die Abweichung zum Soll sank von 4,002 auf Werte zwischen 1,797 und 1,697. Die eingeschlossene Fläche zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Pressnaht verringerte sich von $11,183\text{mm}^2$ auf bis zu $4,631\text{mm}^2$. Für dieses Versuchsmodell ist der Konvergenzverlauf der Optimierung besonders interessant. Auffällig ist, dass in allen Läufen eine nahezu optimale Geometrie in der ersten Optimierungssiteration gefunden wurde. Dieser Punkt

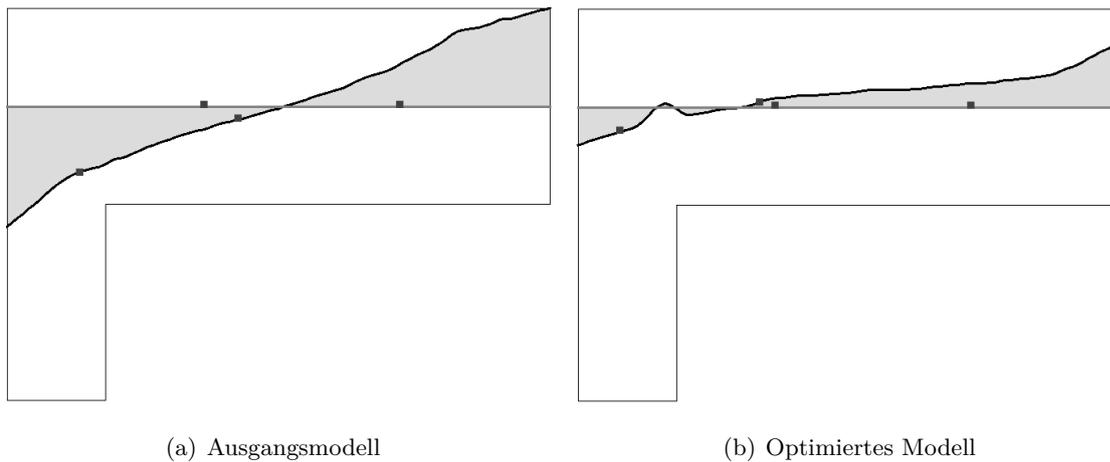


Abbildung 6.10: Pressnahtverlauf des Versuchsmodells 2 vor und nach der Optimierung

ist allen vorher innerhalb des LHDs untersuchten Punkten deutlich überlegen. Der gefundene Punkt befindet sich in der Nähe eines Eckpunktes des hyperkubischen Suchraums. Der Eckpunkt selbst wird ebenfalls in der ersten Optimierungsiteration ausgewählt, kann aufgrund einer illegalen Geometrie des FE-Netzes selbst nicht berechnet werden. Weitere Punkte in der Nähe des Eckpunktes ergeben jedoch gültige Netze und erfüllen auch die sonstigen Randbedingungen.

Von den drei unabhängigen Optimierungen erzielte der erste Lauf nach der ersten Iteration keine Verbesserung mehr. Der globale Suchalgorithmus zum Auffinden eines Maximums der $GEI(2)$ -Funktion konnte keine weitere Verbesserung identifizieren. Für die folgenden Versuche wurde dieser Suchalgorithmus dahin gehend erweitert, dass bei einer fehlgeschlagenen globalen Suche, eine lokal beschränkte Suche im Umfeld des bisherigen optimalen Punktes angeschlossen wird. Somit sind die folgenden Optimierungsiterationen

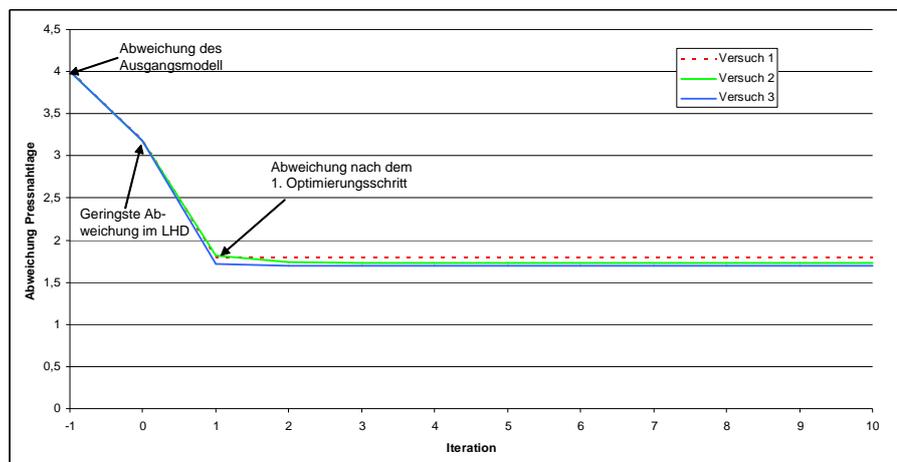


Abbildung 6.11: Konvergenzverlauf des Versuchsmodells 2

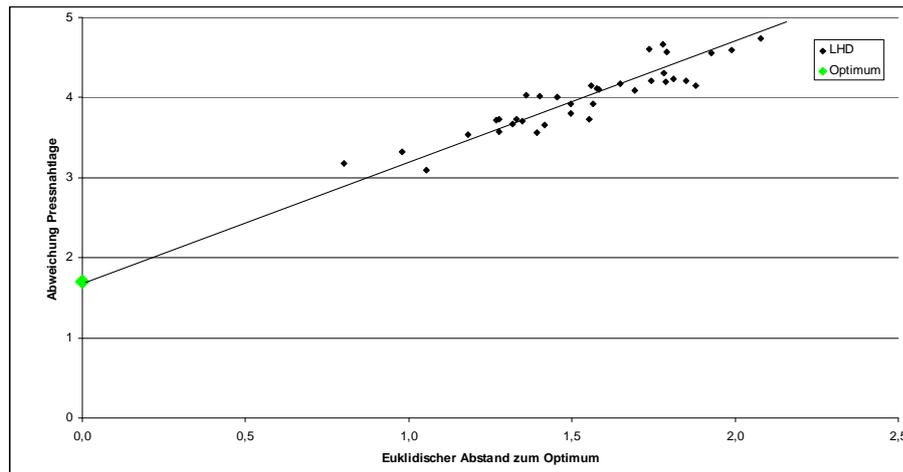


Abbildung 6.12: Zusammenhang zwischen dem Abstand zum Optimum und der Pressnahtabweichung

von Lauf 2 und 3 nicht mit Lauf 1 vergleichbar. Selbst mit dem angepassten Suchalgorithmus erzielten die weiteren Optimierungsiterationen nur noch minimale Verbesserungen. Bei einer derartig schnellen Konvergenz ist die Frage berechtigt, ob dieses Verhalten Zufall oder eine korrekte Vorhersage des Minimums ausgehend von den Korrelationen der bekannten Punkte durch das Metamodell ist. Die ersten Hinweise liefern die Vorhersage und die Varianz für diesen Punkt. Die Metamodelle erstellten eine Vorhersage mit jeweils einen Wert, der unterhalb des besten Wertes im LHD liegt. Diese Vorhersage liegt jedoch bis zu 5 Standardabweichungen über dem tatsächlichen Funktionswert. Das aus den initialen Punkten gebildete Metamodell ist tendenziell korrekt, dessen Minimum wird dennoch deutlich unterschätzt. Um dennoch die Korrelation zwischen den Punkten für die Prüfung der Plausibilität heranzuziehen, kann der euklidische Abstand der initialen Punkte zum Optimum auf dem normalisierten Suchraum in Zusammenhang mit der Pressnahtabweichung in Verbindung gebracht werden. (siehe Abbildung 6.12). Der euklidische Abstand kann ebenfalls als Korrelationsfunktion in Metamodellen verwendet werden. Dabei ist zu erkennen, dass Punkte in der Nähe des Optimums die geringste Abweichung der Pressnahtlage aufweisen. Insgesamt ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Abstand zum Optimum und Pressnahtabweichung zu erkennen. Die genaue Verteilung der Punkte enthält Anhang C. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse ist das sehr gute Konvergenzverhalten der Optimierung zwar ungewöhnlich, aber dennoch durch die Funktion der Metamodelle zu erklären.

Verletzungen der Randbedingungen traten in diesem Versuchsaufbau kaum auf. Einzig illegale FE-Netze treten an den Randbereichen des Suchraumes und insbesondere im Umfeld des Optimums vermehrt auf.

6.2.3 Versuchsmodell 3

Das dritte Versuchsmodell unterscheidet sich von den beiden Vorherigen darin, dass anstatt eines halboffenen Profils die Pressung eines Hohlprofils simuliert wird.

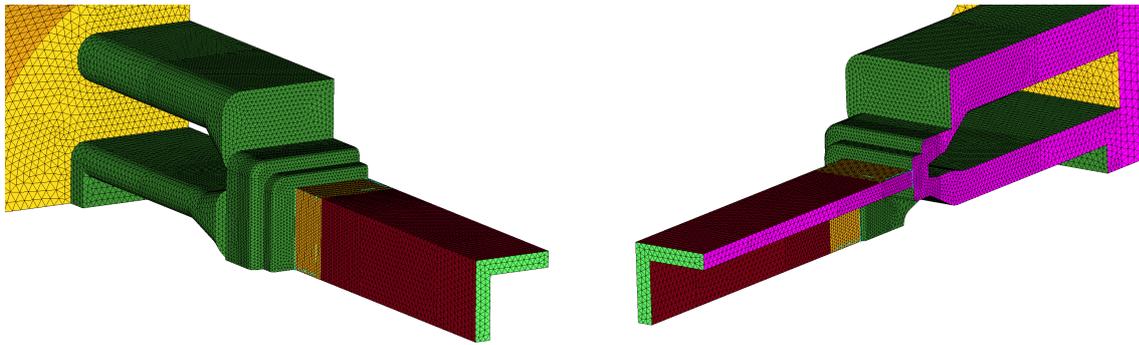


Abbildung 6.13: Aufbau Versuchsmodell 3: Viertelsymmetrie eines quadratischen Hohlprofils

Versuchsaufbau Das quadratische Hohlprofil besitzt eine Kantenlänge von 50,5mm an der Außenkante und eine Wandstärke von 5mm. Im Vergleich zum Doppel-T Profil ist dieses Modell als dünnwändig zu bezeichnen. Durch diese Eigenschaft ist die Lage der Pressnaht innerhalb des Profils besonders kritisch. Es besteht das Risiko, dass die Verstärkungselemente auf der Pressnaht in die Nähe des Profilrandes gedrängt werden. Bei einer Berührung mit den Führungsflächen ist ein Reißen der Verstärkungselemente zu erwarten. Wie auch in den vorherigen Modellen ist aufgrund der Symmetrie eine Viertelgeometrie simuliert worden. Das FE-Netz besteht aus 39476 Knoten, die durch 202185 Tetraeder verbunden sind. Auf eine Reibung wurde in der Simulation verzichtet. Die Simulationszeit beläuft sich auf etwa 40 Minuten.

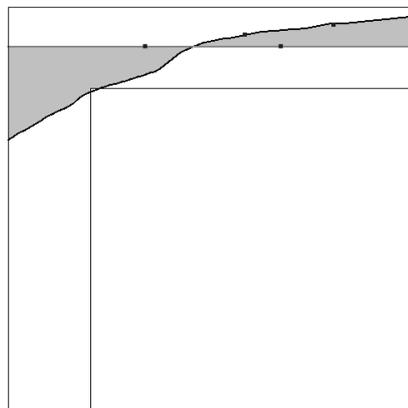


Abbildung 6.14: Pressnahtlage des Versuchsmodells 3 vor der Optimierung

Das Simulationsergebnis des Ausgangsmodells zeigt eine sehr deutliche Abdrängung der Pressnaht vom Sollverlauf. Die Pressnaht wird gegen den Profilrand gepresst, sodass effektiv zwei Teilpressnähte entstehen. Eine derartige Abdrängung der Pressnaht ist nicht erwartet worden, die extrahierte Pressnahtlage schneidet sogar die Außenkontur des Profils. Durch diese Abweichung droht eine Schwächung des Profils, da nicht eine lange kontinuierliche Pressnaht, sondern zwei getrennte kurze Pressnähte vorliegen. Zusätzlich kommt es gegebenenfalls zu einem Abriss der Verstärkungselemente durch eine Berührung mit den Führungsflächen. Für die beiden vordefinierten Verstärkungselemente ist dies jedoch nicht zu erwarten. Diese werden in der Horizontalen in Richtung der Profilmitte abgedrängt. Weiterhin ist festzustellen, dass die Pressnahtqualität konstruktionsbedingt sehr schlecht ist. Dieser liegt mit einem Minimum von 1,9 weit unter den vorgesehenen Grenzwert von 3. Ebenso liegt die benötigte Presskraft mit 3,15MN ebenfalls deutlich über der vorgesehenen Grenze von 2,5MN. Für die Optimierung ist ein Satz von acht Morphingparametern definiert worden, mit denen der Pressdorn, die Einläufe und die Schweißkammer modifiziert werden kann. Die Simulation eines LHDs mit 40 Punkten zeigte, dass keine Geometrie die vorgesehenen Grenzwerte ansatzweise einhalten kann. Um dennoch die Optimierung an diesem Modell zu testen, wurden bis auf die FE-Netzgüte auf weitere Randbedingungen verzichtet. Für die Optimierung sind 12 Iterationen mit jeweils 3 parallelen Simulationen verwendet worden. Eine Wiederholung der Optimierung wurde in diesem Fall nicht durchgeführt.

Ergebnisse Das Endergebnis der Optimierung entspricht nahezu vollständig der Zielvorgabe. Die Gesamtabweichung ist sehr gering und sank von 11,945 auf Basis der Ausgangsgeometrie auf 2,115 ab. Die eingeschlossene Fläche verringerte sich von $48,218\text{mm}^2$ auf $9,558\text{mm}^2$ auf einer Länge der Pressnaht von 25,25mm.

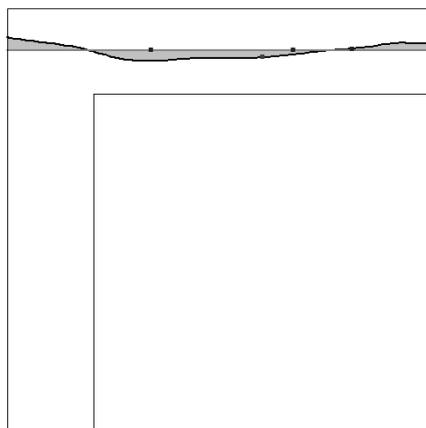


Abbildung 6.15: optimierte Pressnahtlage des Versuchsmodells 3

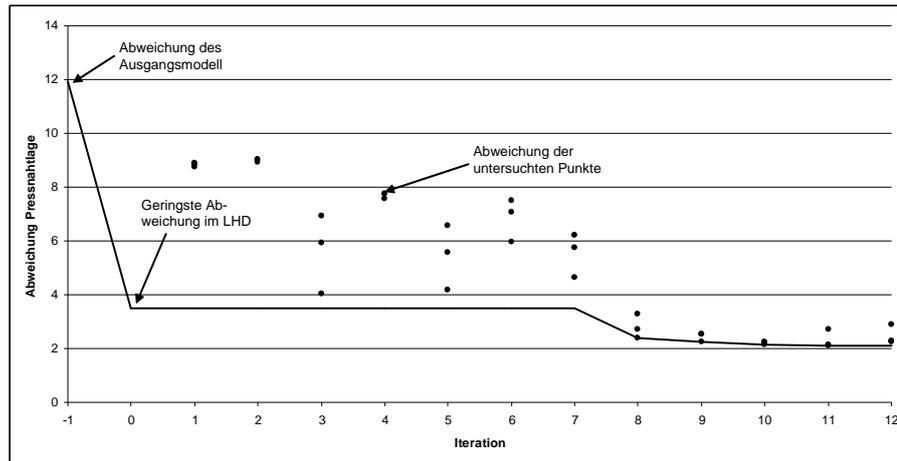


Abbildung 6.16: Konvergenzverlauf Versuchsmodell 3

Dieser Versuch unterschied sich von den Vorherigen dadurch, dass mit Ausnahme der Prüfung auf illegale FE-Netze auf Restriktionen verzichtet wurde. Bei einer Analyse der Optimierung ergeben sich einige Auffälligkeiten. Eine erste deutliche Verbesserung der Pressnahtlage im Vergleich zum Ausgangsmodell konnte bereits an einem Punkt des LHDs erzielt werden. Ebenso wie in den beiden vorherigen Versuchsmodellen erzielten in den ersten Iterationen besonders Punkte an den Rändern des Suchraumes eine sehr hohe erwartete Verbesserung. Die Punkte der ersten Iteration werden mit einem negativen Schätzer von etwa -9 vorhergesagt, dieser Wert weicht allerdings um mehr als 4 Standardabweichungen von der tatsächlichen Pressnahtabweichung ab (siehe Abbildung. 6.17). Aufgrund des Verzichtes auf weitere Restriktionen, die den Suchraum verkleinern können, werden deutlich mehr Punkte in den Randbereichen untersucht, als in den Optimierungen der beiden vorherigen Modelle. Die ersten sieben Iterationen, entsprechend 21 Simulationen, erzielten keine weitere Verbesserung. Der Schätzer dieser Punkte war in allen Fällen deutlich kleiner als der tatsächliche Wert. Weiterhin treten an den Randbereichen des Suchraumes vielfach illegale FE-Netze aufgrund starker Netzdeformationen auf. Neben den 21 simulierten Netzen sind weitere 23 Geometrien verworfen worden, da hierbei illegale Elemente auftraten. Erst im achten Iterationsschritt wird eine weitere Verbesserung erzielt, die in den folgenden Schritten noch minimal verbessert werden kann. Zu diesem Zeitpunkt ist das Metamodell für diesen Bereich sehr genau, die Schätzungen der Punkte liegen minimal über den tatsächlichen Werten. Basierend auf der sehr geringen erzielten Pressnahtabweichung sind weitere signifikante Verbesserungen nicht zu erwarten. Aus diesem Grund ist die Optimierung nicht weiter fortgeführt, sondern nach 12 Iterationsschritten beendet worden.

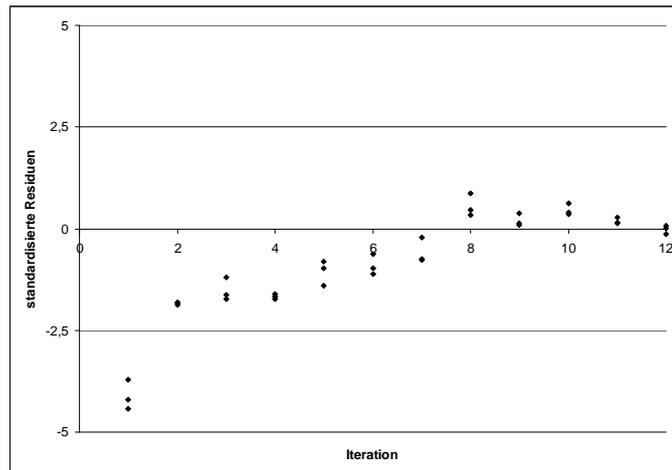


Abbildung 6.17: Standardisierte Residuen im Versuchsmodell 3: Deutlich zu erkennen sind starke Fehleinschätzung zu Beginn der Optimierung

6.2.4 Zusammenfassung

In jedem der drei untersuchten Modelle konnte eine erhebliche Verbesserung der Pressnahtlage erzielt werden. Restriktionen durch zusätzliche Prozessanforderungen werden dabei, sofern vorhanden, berücksichtigt. Die Effizienz der Optimierung ist als zufriedenstellend zu bezeichnen. Bei acht Parametern sind in den untersuchten Modellen 70 oder weniger Simulationen notwendig, um ein Optimum zu erzielen. Wiederholungen der Optimierung führten bei dem Versuchsmodell 1 und 2 zu nahezu identischen Ergebnissen, sodass von einem stabilen Optimierungsprozess ausgegangen werden darf.

Kapitel 7

Fazit und Ausblick

In der Partikelverfolgung ist ein Verfahren gefunden worden, mit dem eine genaue Identifikation der Pressnahtlage in Strangpresssimulationen möglich ist. Die Abweichung dieser Pressnahtlage vom Soll kann dadurch quantitativ bestimmt und als Zielkriterium einer Optimierung verwendet werden. Mithilfe der Partikelverfolgung ist es zudem möglich weitere Eigenschaften des Strangpressprozesses zu erfassen. Hierzu zählen die Verschweißungsqualität der Pressnaht sowie die Zugspannungen auf den Verstärkungselementen. Zusätzlich ist durch die Erfassung der Zugspannung eine Prognose für die Position der Verstärkungselemente auf der Pressnaht möglich.

Eine effiziente Optimierung der Pressnahtlage konnte durch den Einsatz von Krigingmetamodellen erzielt werden. In allen untersuchten Strangpressmodellen ist eine deutliche Verbesserung der Pressnahtlage zum ursprünglichen Werkzeugmodell erzielt worden. Dieses Verfahren konvergierte mit einer geringen Anzahl von Funktionsauswertungen gegen ein Optimum. Eine vollständige Optimierung der Pressnahtlage ist innerhalb einer akzeptablen Zeit von wenigen Stunden bis Tagen, abhängig von der Komplexität des Modells, möglich. Um einen zuverlässigen Fertigungsprozess zu garantieren, werden in der Optimierung vorab definierte Randbedingungen berücksichtigt. Ferner sind für eine optimale Ausnutzung der verfügbaren Simulationslizenzen, die metamodellbasierten Optimierungsalgorithmen für parallele Simulationen erweitert worden. Die Eignung dieser Erweiterung ist vorab anhand von Testfunktionen untersucht worden.

Experimentelle Verifikationen der Optimierungsergebnisse stehen allerdings noch aus. Besonders die simulierte Lage von Verstärkungselementen muss überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Diese Eigenschaft ist bisher nur mittels erheblich vereinfachter Annahmen zu ermitteln. Sobald die Lage der Verstärkungselemente näherungsweise korrekt simuliert werden kann, ist es möglich, diese Eigenschaft in die Optimierung einzubeziehen. Für eine genauere Platzierung der Verstärkungselemente bietet die Partikelverfolgung weitere Vorteile. Bisher wird der Eintrittspunkt eines Verstärkungselementes definiert und davon ausgehend, dessen Position im Profil berechnet. Mit einem korrekten Modell zum

Verlauf der Verstärkungselemente kann durch eine Definition der zu erzielenden Position der dazu nötige Eintrittspunkt über eine rückwärts ablaufende Partikelverfolgung bestimmt werden.

Die Optimierung der Pressnahtlage bietet ebenfalls weiteres Potenzial für Verbesserungen. Anhand der gewonnenen Daten aus den bisher durchgeführten Optimierungen ist die Erstellung eines verbesserten Abbruchkriteriums möglich. Sinkt die erwartete Verbesserung stark ab, kann eine vorzeitige Terminierung vorgenommen werden. Ein komplexeres Problem betrifft die Werkzeugparametrisierung. Die Anpassung der Werkzeuggeometrie geschieht derzeit ausschließlich über per Hand vordefinierte Mophingparameter. Um eine deutliche Verbesserung der Pressnahtlage zu erzielen, ist es notwendig diejenigen Bereiche des Werkzeuges zu parametrisieren, die einen signifikanten Einfluss auf die Pressnahtlage besitzen. Dieses Wissen kann nur durch Versuche gewonnen werden. Die erzielbare Verbesserung der Pressnaht ist somit von der Erfahrung des Werkzeugkonstruktors abhängig. Aus diesem Grund entsteht der Wunsch eine automatisierte Anpassung der Werkzeuggeometrie vornehmen zu können.

Abschließend ist festzuhalten, dass mit den entwickelten Verfahren eine Optimierung der Pressnahtlage möglich ist. Gleichzeitig ergaben sich zahlreiche neue Fragen, die in weiteren Untersuchungen behandelt werden können.

Anhang A

Testfunktionen

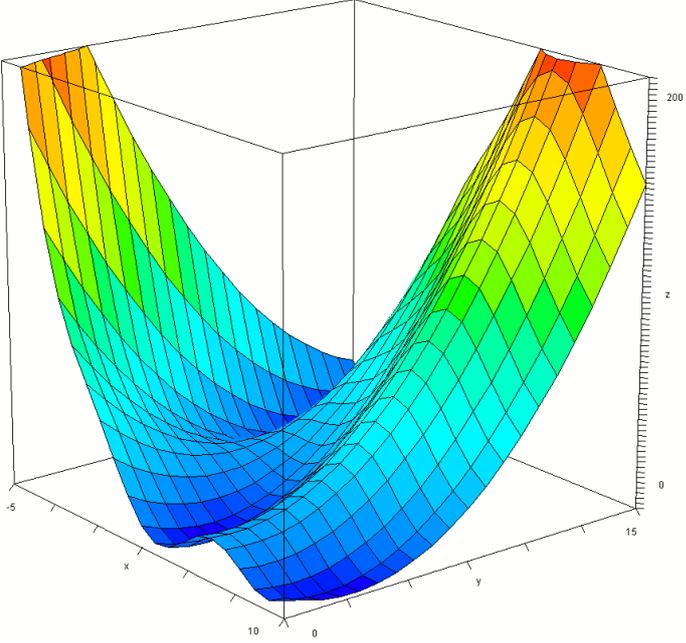
Anzahl an Variablen:	2
Defintion:	$f(x) = \left(x_2 - \frac{5}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos(x_1) + 10$
Suchraum:	$-5 \leq x_1 \leq 10; 0 \leq x_2 \leq 15$
Anzahl lokaler Minima:	Keine außer den globalen Optima
Globales Minima:	$x^* = (-\pi; 12, 275), (\pi; 2, 275), (9, 4247; 8, 2475)$ $f(x^*) = 0, 397887$
Funktionsplot:	

Tabelle A.1: Branin-Funktion

Anzahl an Variablen:	$n \geq 2$
Defintion:	$f(x) = \sum_{n=i}^{n-1} [100(x_n^2 - x_{n+1})^2 + (x_n - 1)^2]$
Suchraum:	$-2 \leq x_i \leq 2; i = 1, \dots, n$
Anzahl lokaler Minima:	Mindestens ein lokales Minimum für $n \geq 4$
Globales Minima:	$x^* = (1, \dots, 1)$ $f(x^*) = 0$

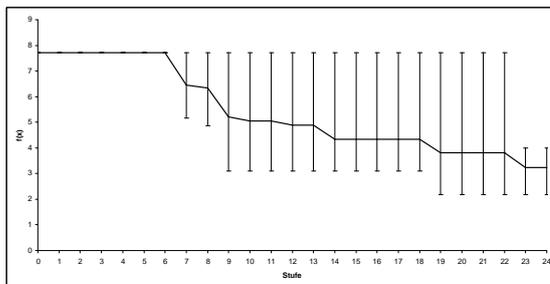
Tabelle A.2: Rosenbrock-Funktion

Anzahl an Variablen:	6
Defintion:	$H_{6,4}(x) = \sum_{i=1}^j a_i \cdot \exp \left[- \sum_{j=1}^6 B_{ij} (x_j - Q_{ij})^2 \right]$ $a = [1; 1, 2; 3; 3, 2]^T$ $B = \begin{bmatrix} 10 & 3 & 17 & 3,5 & 1,7 & 8 \\ 0,05 & 10 & 17 & 0,1 & 8 & 14 \\ 3 & 3,5 & 1,7 & 10 & 17 & 8 \\ 17 & 8 & 0,05 & 10 & 0,1 & 1 \end{bmatrix}$ $Q = 10^{-4} \begin{bmatrix} 1312 & 1696 & 5569 & 0124 & 8283 & 5886 \\ 2329 & 4135 & 8307 & 3736 & 1004 & 9991 \\ 2348 & 1451 & 3522 & 2883 & 3047 & 6650 \\ 4047 & 8828 & 8732 & 5743 & 1091 & 0381 \end{bmatrix}$
Suchraum:	$0 \leq x_i \leq 1; i = 1, \dots, 6$
Anzahl lokaler Minima:	6 lokale Mimima
Globales Minima:	$x^* = \begin{bmatrix} 0,20169 \\ 0,150011 \\ 0,467874 \\ 0,275331 \\ 0,311652 \\ 0,6573 \end{bmatrix}^T$ $H_{6,4}(x^*) = -3,32237$

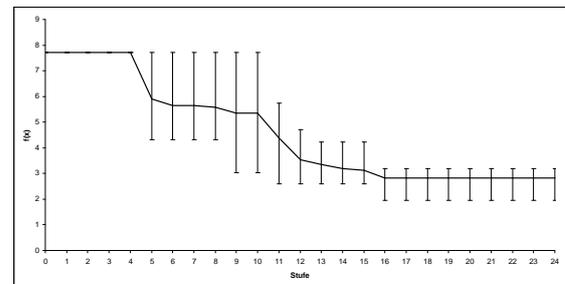
Tabelle A.3: Hartmann-Funktion $h_{6,4}$

Anhang B

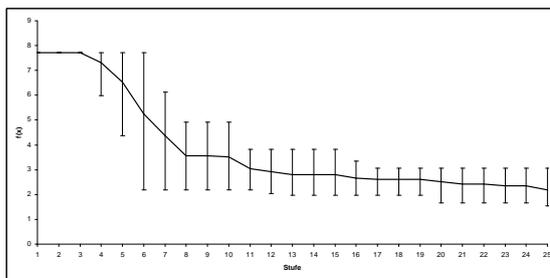
Streudiagramme der Rosenbrock-Funktion



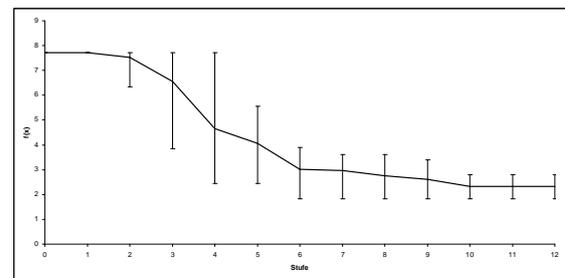
(a) EI;Parallel=1



(b) EI;Parallel=2

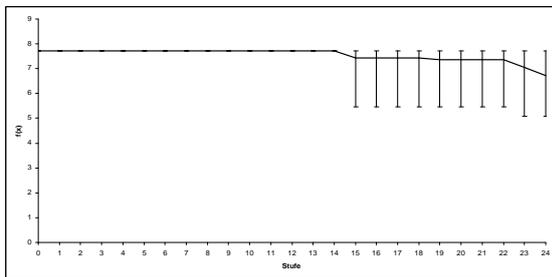


(c) EI;Parallel=4

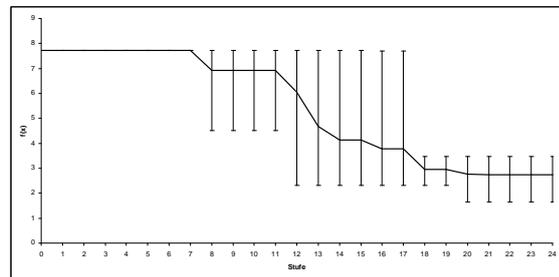


(d) EI;Parallel=8

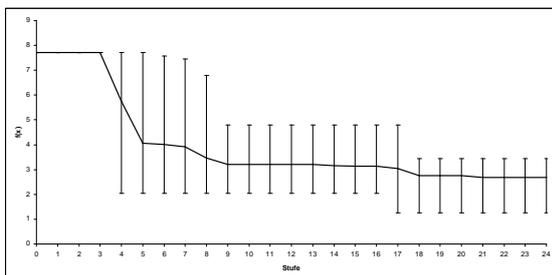
Abbildung B.1: Streuung der unabhängigen Läufe auf der Rosenbrock-Funktion (EI)



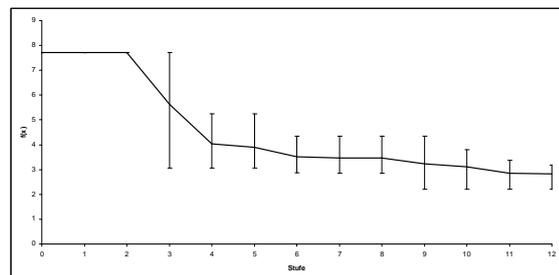
(a) GEI(2);Parallel=1



(b) GEI(2);Parallel=2



(c) GEI(2);Parallel=4



(d) GEI(2);Parallel=8

Abbildung B.2: Streuung der unabhängigen Läufe auf der Rosenbrock-Funktion (GEI2)

Anhang C

Ergebnisse der Optimierungen

Morph-parameter	Untergrenze (mm)	Obergrenze (mm)
Einlauf oben Höhe	-2	1,3
Einlauf oben Breite	-2	1,3
Einlauf rechts Höhe	-1,5	1,2
Einlauf rechts Breite	-1,5	1,2
Dornlänge	-3	3

Randbedingung	Grenzwert
Presskraft F_{press}	<750 kN
Pressnahtqualität Q	>3
Zugbelastung P_{zug}	<2000 MPa
Fehler FE-Netz #FE	<1

Tabelle C.1: Grenzen der Morphingparameter **Tabelle C.2:** Randbedingungen des Versuchs-Versuchsmodell 1

Parameter	Pressnaht-abweichung	F_{press}	Q	P_{zug} (Mpa)
-1,8625;-2,0000;0,0375;0,7125;2,25	3,6568	773,95	3,1128	1350,7408
-1,3125;-1,5875;-0,0750;0,7500;-0,75	3,4171	751,30	3,6409	1668,2286
-2,0000;0,8875;0,1500;-0,1875;1,25	2,9735	761,06	3,2370	1503,6654
0,4750;-1,7250;-0,8625;0,4875;1,50	2,6592	750,03	3,2963	1451,9169
-0,9000;0,0625;-0,5250;1,1625;2,50	2,5540	761,85	3,1777	1322,7413
-1,0375;-0,3500;-1,2000;-0,6375; 1,75	2,2711	781,86	3,1341	1522,0847
-0,3500;-1,4500;0,6000;-0,5250;2,75	2,0575	769,43	2,9962	1373,5516
0,8875;0,3375;-0,1875;0,0375;3,00	1,7512	754,09	2,9496	1398,0961
0,6125;-1,0375;-0,6375; 0,1500;-3,00	4,1523	703,43	4,0872	1825,2773
0,0625;-0,2125;1,2750;0,8250;-2,75	4,0011	680,90	4,0341	1775,3701
-0,6250;-1,8625;0,2625;1,0500;-1,25	3,9276	715,39	3,7308	1692,2754
-1,5875;0,4750;0,4875;1,3875;-1,00	3,8843	713,42	3,8011	1618,4329
1,1625;0,7500;0,3750;-0,3000;-2,00	3,7165	687,59	3,9299	1736,9998
-1,4500;-0,4875;-1,0875;0,6000;-1,50	3,7046	741,49	3,8453	1702,9711
-0,7625;0,2000;-0,9750;-1,0875;-2,25	3,6935	736,95	3,9475	1789,8373
-1,7250;-0,6250;1,5000;-0,0750;0,00	3,6889	731,45	3,5063	1568,6659
-1,1750;1,0250;0,7125;-0,4125;-2,50	3,6664	711,01	4,0107	1790,5787
0,2000;-1,1750;1,3875;-0,8625;-1,75	3,5412	707,23	3,8966	1721,0483
1,0250;-0,0750;-0,3000;1,5000;-0,50	3,4067	698,35	3,6710	1604,1152
-0,4875;-0,9000;1,1625;1,2750;2,00	3,2441	731,08	3,1355	1410,4703
1,3000;-1,3125;0,8250;0,3750;0,50	3,0886	709,15	3,4532	1503,0612
-0,2125;1,3000;-0,7500;0,2625;-0,25	3,0520	723,59	3,5525	1625,3901
0,7500;-0,7625;-0,4125;-1,2000;0,25	3,0425	736,37	3,5396	1544,9178
0,3375;1,1625;1,0500;0,9375;0,75	2,8222	703,05	3,4129	1482,8433
-0,0750;0,6125;0,9375;-0,9750;1,00	2,4708	732,40	3,3011	1558,7870

Tabelle C.3: initialer Versuchsplan Versuch 1

Iteration	Parameter	Pressn.- abw.	F_{press}	Q	P_{zug}	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	2,0000;2,0000;-0,3698;-1,2000;2,3632	2,8585	742,16	3,0955	1.395,64	1,6448	0,2520	0,7449
1	1,5875;2,0000;-0,4875;-0,4714;2,4406	2,2779	743,16	3,0902	1.394,08	1,7417	0,1715	0,5603
1	2,0000;2,0000;0,1985;-1,2000;2,4717	2,5300	739,35	3,0993	1.380,15	1,6830	0,2542	0,6843
2	1,5875;1,0375;-0,4875;-0,3568;2,4406	2,1081	747,11	3,0807	1.406,09	1,8965	0,1291	0,1621
2	1,6073;1,0375;-0,4875;0,0375;2,6109	1,9635	746,47	3,0202	1.442,49	1,9028	0,1200	0,1551
2	1,5875;1,0375;0,0054;-1,0532;2,3632	2,1826	747,59	3,1072	1.371,80	1,9902	0,2432	0,1390
3	1,5875;1,0375;0,1985;0,0375;2,8167	1,7124	743,52	3,0184	1.325,53	1,9003	0,1690	0,0250
3	0,8662;2,0000;0,4125;-0,6090;2,6109	1,6992	747,67	3,0213	1.423,72	2,0349	0,2434	0,0181
3	1,5875;1,0881;-0,5448;0,4632;2,8493	1,7935	747,95	3,0170	1.329,97	1,9493	0,1692	0,0163
4	1,1574;1,2213;0,2483;-0,0478;2,7879	1,6774	747,03	3,0172	1.355,31	1,7947	0,2016	0,0090
4	0,8977;2,0000;0,1985;-0,1673;2,7412	1,6471	747,36	2,9671	1.434,28	1,7482	0,1703	0,0090
4	0,9639;1,6703;0,4125;-0,5250;2,6634	1,6769	748,02	3,0102	1.414,69	1,7576	0,1551	0,0063
5	0,9327;1,0882;0,3491;0,0369;2,7382	1,7380	747,39	3,0290	1.336,41	1,6858	0,1404	0,0089
5	1,2682;1,0881;0,2999;-0,1673;2,8272	1,6622	747,79	3,0078	1.376,77	1,6912	0,1371	0,0079
5	0,8412;1,5333;0,4124;-0,2771;2,6859	1,6954	747,99	2,9811	1.408,97	1,6872	0,1311	0,0076
6	1,0903;1,0881;0,2999;-0,1673;2,7879	1,6677	749,02	3,0273	1.335,84	1,6626	0,0960	0,0046
6	1,4079;1,0882;0,2483;-0,0478;2,8774	1,6508	746,61	3,0099	1.321,27	1,6764	0,1099	0,0049
6	1,2120;1,0375;0,1985;0,0375;2,8486	1,6423	748,11	3,0196	1.334,79	1,6698	0,0972	0,0042
7	0,8977;1,1025;0,9203;-0,5355;2,7879	1,6602	748,97	3,0263	1.329,21	1,7483	0,1505	0,0032
7	1,1922;1,0882;0,2201;-0,0491;2,8774	1,6306	749,24	3,0147	1.317,99	1,6258	0,0603	0,0028
7	1,3325;1,0741;0,1985;0,0754;2,9160	1,6156	747,59	3,0111	1.316,54	1,6432	0,0856	0,0036
8	1,1389;1,0741;0,1985;0,2224;2,9439	1,6116	748,85	2,9455	1.373,41	1,6456	0,0943	0,0026
8	1,1703;1,1025;0,6754;-0,5250;2,8486	1,5952	749,19	3,0134	1.345,90	1,6650	0,1070	0,0026
8	0,8866;1,7250;1,1379;-0,6800;2,7942	1,5381	746,18	2,9469	1.404,34	1,7077	0,1365	0,0028
9	1,1377;1,1025;1,1379;-0,5355;2,8657	1,6066	745,86	3,0227	1.314,53	1,6081	0,1005	0,0041
9	1,0161;1,0741;1,0431;-0,5354;2,8820	1,5931	748,44	3,0177	1.316,90	1,6217	0,0980	0,0031
9	1,1190;1,3537;0,6542;-0,5355;2,8486	1,5828	748,92	2,9396	1.405,14	1,6006	0,0850	0,0033
10	0,8866;1,8381;0,5951;-0,4412;2,8084	1,5520	748,3	2,9472	1.410,12	1,5885	0,0919	0,0046
10	1,0623;1,0741;1,1140;-0,5354;2,9439	1,5535	748,49	2,9453	1.358,20	1,5763	0,0601	0,0028
10	1,1764;1,0741;1,0431;-0,5354;2,9395	1,5318	747,81	2,9443	1.365,39	1,5818	0,0640	0,0027

Tabelle C.4: Ergebnis Versuch 1 Lauf 1

Iteration	Parameter	Pressn.- abw.	F_{press}	Q	P_{zug}	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	2,0000;2,0000;-0,4875;1,1467;2,2873	2,9165	741,41	3,1058	1.392,75	1,6596	0,2469	0,7190
1	2,0000;2,0000;-0,0676;-1,2000;2,4155	2,6733	740,53	3,1075	1.382,54	1,6694	0,2539	0,7068
1	1,7385;2,0000;0,2381;-1,2000;2,3994	2,3846	740,82	3,1161	1.372,89	1,7408	0,2519	0,5963
2	1,5875;1,0375;-0,4869;-0,0418;2,5118	2,0157	745,6	3,0329	1.461,83	1,9009	0,0911	0,2422
2	1,1906;1,8625;0,6336;-1,2000;2,5520	1,9180	747,47	3,0641	1.364,27	2,0977	0,2741	0,1524
2	1,5875;1,0375;0,2381;-1,1769;2,3994	2,1346	747,38	3,1047	1.379,47	1,9604	0,2494	0,2413
3	1,3794;1,8114;0,7500;-1,2000;2,7673	1,8661	748,39	3,0331	1.353,88	1,9781	0,2405	0,0191
3	1,1906;1,7250;0,8943;-1,2000;2,7080	1,7508	748,76	3,0438	1.346,99	2,0047	0,2502	0,0174
3	1,0737;1,8883;0,9858;-1,2000;2,7349	1,6902	749,16	3,0380	1.359,84	1,9660	0,2227	0,0174
4	0,9915;1,7250;1,2000;-1,2000;2,7957	1,5702	750,27	2,9723	1.409,48	1,7088	0,1464	0,0087
4	1,0737;1,7250;0,8946;-0,5170;2,7543	1,5922	743,71	2,9839	1.405,68	1,7734	0,1960	0,0093
4	1,1161;1,7250;1,1763;-1,2000;2,8559	1,5848	750,12	2,9512	1.414,58	1,6809	0,1171	0,0078
5	1,0011;1,7250;1,1763;-0,6838;2,7080	1,5947	743,03	2,9969	1.400,76	1,6080	0,1267	0,0203
5	0,9549;1,7250;1,0098;-0,8622;2,7543	1,5764	747,73	2,9800	1.405,52	1,6339	0,1369	0,0173
5	1,0515;1,7250;1,2000;-0,3651;2,7562	1,6259	739,81	2,9529	1.402,28	1,6259	0,1321	0,0178
6	0,9683;1,6138;0,9439;-0,6838;2,7000	1,6049	745,71	3,0090	1.398,53	1,6192	0,0892	0,0121
6	1,0529;1,1111;1,0326;-0,7003;2,6611	1,6907	745,69	3,0046	1.403,18	1,6899	0,1316	0,0087
6	1,0111;1,7250;0,9859;-1,0377;2,7349	1,6235	748,84	3,0033	1.409,52	1,6241	0,0874	0,0110
7	0,8317;1,7250;0,9439;-0,6838;2,7000	1,6049	746,82	2,9692	1.412,72	1,6533	0,1176	0,0034
7	0,9350;1,5323;0,7840;-0,6269;2,7307	1,6157	747,82	2,9612	1.424,78	1,6287	0,1023	0,0036
7	0,9820;1,7180;0,9750;-0,6135;2,7192	1,6002	744,44	2,9628	1.424,92	1,5882	0,0676	0,0033
8	1,0797;1,5906;1,1356;-0,7963;2,7001	1,6093	744,12	3,0115	1.399,10	1,6324	0,0871	0,0022
8	0,9967;1,6797;0,8197;-0,7657;2,7068	1,6231	747,17	3,0070	1.406,05	1,6255	0,0791	0,0020
8	1,1029;1,6379;1,0099;-0,6838;2,7537	1,5910	744,48	2,9551	1.412,85	1,6048	0,0753	0,0028
9	0,9590;1,6411;1,1144;-0,5170;2,7000	1,6419	742,47	2,9646	1.423,86	1,6047	0,0761	0,0029
9	0,9915;1,4824;1,0776;-0,7963;2,7001	1,6095	746,08	3,0073	1.396,83	1,6158	0,0675	0,0017
9	1,0038;1,3892;0,9445;-0,5170;2,7000	1,6730	744,52	3,0087	1.393,21	1,6400	0,0832	0,0017
10	1,0314;1,5727;0,9112;-0,8425;2,7429	1,6007	747,93	2,9842	1.410,52	1,6015	0,0648	0,0023
10	0,9780;1,5796;1,2000;-0,8932;2,7079	1,5842	745,99	2,9965	1.401,93	1,6079	0,0639	0,0019
10	1,0646;1,5278;0,9439;-0,8051;2,7359	1,6048	746,93	2,9849	1.410,41	1,6000	0,0547	0,0017

Tabelle C.5: Ergebnis Versuch 1 Lauf 2

Iteration	Parameter	Pressn.- abw.	F_{press}	Q	P_{zug}	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	2,0000;2,0000;-0,4875;-1,0992;2,3151	2,8808	741,47	3,1140	1.389,14	1,6576	0,2449	0,7213
1	2,0000;2,0000;-0,0646;-1,2000;2,4160	2,6794	740,51	3,1099	1.383,80	1,6665	0,2541	0,7116
1	1,8136;2,0000;0,3000;-1,2000;2,4002	2,4121	739,45	3,1098	1.376,55	1,7324	0,2534	0,6095
2	1,58751,0375;-0,4689;-0,0159;2,5286	2,0046	745,49	3,0304	1.455,31	1,9005	0,0891	0,2696
2	1,2057;1,8625;0,6114;-1,2000;2,5478	1,9286	747,4	3,0603	1.364,90	2,0865	0,2748	0,1778
2	1,5875;1,037;0,3037;1,2000;2,4002	2,1192	747,06	3,1037	1.379,42	1,9311	0,2393	0,2883
3	0,9610;2,0000;0,3886;-0,5250;2,6459	1,7033	746,52	3,0139	1.430,91	1,9640	0,2389	0,0224
3	1,1921;2,0000;0,1960;-0,4125;2,7287	1,7549	745,98	3,0399	1.362,34	1,9445	0,2219	0,0219
3	0,8261;2,0000;1,1205;-1,2000;2,6758	1,6194	749,51	3,0104	1.412,37	1,9376	0,2361	0,0262
4	0,8261;2,0000;0,5184;-0,4125;2,7678	1,5777	748,01	3,0221	1.365,36	1,6706	0,1593	0,0074
4	0,7776;2,0000;0,974;-0,7859;2,6786	1,5872	746,76	2,9984	1.406,34	1,7043	0,1632	0,0054
4	0,9053;2,0000;1,1205;-0,4125;2,7849	1,5638	742,01	2,9725	1.386,51	1,7001	0,1643	0,0057
5	0,7537;2,0000;0,5702;-0,4125;2,7808	1,5622	748,63	2,9458	1.409,64	1,5987	0,1030	0,0038
5	0,8749;2,0000;0,5184;-0,4125;2,8354	1,5494	748,69	3,0188	1.341,29	1,5680	0,0785	0,0037
5	0,8473;2,0000;0,7228;-0,4125;2,7500	1,5814	745,55	2,9776	1.400,46	1,5868	0,0836	0,0029
6	0,8670;2,0000;0,5184;-0,2308;2,9010	1,5174	748,23	2,9278	1.408,05	1,5849	0,1016	0,0029
6	0,7918;1,9999;1,2000;-0,6001; 2,8048	1,5228	744,96	2,9406	1.396,06	1,5499	0,1085	0,0059
6	1,0145;1,7622;0,5184;-0,3627;2,8799	1,5511	748,42	2,9392	1.406,11	1,6553	0,1274	0,0018
7	0,7913;1,7622;0,3023;-0,0977;2,7500	1,6641	748,09	2,9798	1.398,60	1,6465	0,1320	0,0023
7	0,8607;1,6828;0,9776;-0,5426; 2,8493	1,5376	747,6	2,9351	1.391,29	1,5409	0,1101	0,0069
7	0,8580;2,0000;0,5184;-0,4125;2,8706	1,5292	749,55	2,9309	1.409,70	1,5277	0,0411	0,0018
8	0,8762;1,7974;0,6330;-0,2823;2,8420	1,5618	747,27	2,9542	1.387,18	1,5562	0,0736	0,0023
8	0,8823;1,9879;0,5805;-0,6277; 2,7678	1,5963	749	3,0297	1.352,26	1,5853	0,0837	0,0017
8	0,8749;1,6606;0,5387;-0,3298;2,8354	1,5844	749,1	2,9477	1.415,72	1,5606	0,0710	0,0019
9	1,3677;1,9879;1,0358;-0,2383;2,9448	1,5144	739,03	2,9263	1.395,86	1,6902	0,1577	0,0024
9	0,5650;1,9876;1,0533;-0,5759;2,7167	1,5986	747,08	2,9623	1.400,89	1,6864	0,1346	0,0013
9	0,8823;2,0000;0,4476;-0,3113;2,8354	1,5552	748,27	2,9355	1.418,29	1,5654	0,0585	0,0011
10	1,0895;1,9878;1,0358;0,0371;2,9108	1,5743	738,69	3,0088	1.325,68	1,5886	0,1220	0,0043
10	0,8772;1,9353; 0,5511;-0,4564;2,8354	1,5537	749,07	2,9580	1.406,48	1,5572	0,0527	0,0011
10	1,0113;1,9716;1,0505;-0,6868;2,8456	1,5209	745,5	2,9537	1.398,80	1,5473	0,0895	0,0042

Tabelle C.6: Ergebnis Versuch 1 Lauf 3

Morph- parameter	Untergrenze (mm)	Obergrenze (mm)
Dorn Breite 1	-3	3
Dorn Breite 2	-3	3
Dorn Höhe	-2	2
Schweißkammerlänge 2	-3,5	3,5
Schweißkammerhöhe 2	-2	2
Schweißkammerlänge 2	-2,5	2,5
Einlauf Breite	0	3,5
Einlauf Höhe	0	3.5

Randbedingung	Grenzwert
Presskraft F_{press}	<625 Kn
Pressnahtqualität Q	>2,7
Zugbelastung P_{zug}	<1800 MPa
Fehler FE-Netz #FE	<1

Tabelle C.7: Grenzen der Morphingparameter
Versuchsmodell 2Tabelle C.8: Randbedingungen des Versuchs-
modells 2

Parameter	Pressnaht-abweichung	F_{press}	Q	P_{zug}	FE-Fehler
-2,6923;-0,3846;-1,7949;0,9872;0,5641;0,5769;1,3462;3,3205	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	0
-0,0769;0,8462;0,3590;2,9615;-1,4872;2,1154;1,9744;3,4103	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1
0,3846;1,3077;1,3846;2,6026;-2,0000;1,3462;1,8846;0,8974	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1
1,9231;-2,5385;0,5641;0,2692;-1,8974;-0,5769;1,1667;2,8718	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1
-1,7692;0,2308;-0,1538;-1,3462;-1,5897;-0,4487;3,5000;3,0513	4,6628	540,97	3,0675	2.212,44	0
0,2308;-0,6923;-1,8974;-2,0641;-1,7949;0,7051;1,5256;0,2692	4,6088	506,25	3,1787	2.039,77	0
1,4615;-0,5385;-2,0000;-3,3205;-0,3590;-1,0897;1,7949;3,1410	4,5915	511,05	3,5893	1.874,59	0
-2,0769;1,9231;0,2564;-2,4231;-0,1538;-1,4744;1,2564;0,0897	4,5703	521,02	3,2114	2.226,95	0
-0,8462;2,5385;-0,2564;-3,1410;-0,7692;1,8590;1,0769;2,6923	4,5534	523,46	3,2699	1.918,11	0
-2,8462;-2,8462;0,0513;-2,7821;-0,6667;0,1923;0,4487;1,7949	4,3091	534,05	3,3016	1.842,20	0
2,6923;2,3846;-1,2821;-0,2692;-0,0513;-1,2179;0,7179;0,9872	4,2376	513,06	3,0979	1.817,58	0
-1,6154;3,0000;-1,5897;2,2436;-1,0769;0,4487;2,1538;1,1667	4,2035	549,86	2,6208	2.053,59	0
1,3077;1,6154;1,8974 ; -2,6026;-0,4615;-1,6026;1,4359;2,5128	4,1962	515,11	3,4767	1.882,33	0
-1,1538;0,5385;0,1538;3,1410;1,8974;1,6026;2,8718;1,8846	3,0918	595,67	2,6928	1.218,44	0
-1,4615;0,6923;-0,8718;0,0897;-1,6923;-2,1154;0,1795;2,3333	4,7381	520,2	3,2146	1.696,54	0
0,6923;2,6923;-0,5641;1,7051;0,2564;-1,8590;2,2436;3,5000	4,2144	549,79	2,8997	1.580,12	0
-0,3846;-0,0769;-1,3846;-2,2436;1,6923;-0,1923;3,1410;1,6154	4,1675	538,74	4,0485	1.420,65	0
0,0769;-1,0000;1,2821;-0,6282;0,9744;1,4744;0,0897;3,2308	4,1526	545,22	3,2184	1.460,16	0
-1,0000;0,0769;-0,3590;-1,7051;2,0000;-2,5000;0,5385;2,4231	4,1434	538,59	3,6078	1.554,95	0
1,7692;-3,0000;-1,1795;-0,8077;0,7692;-0,0641;0,0000;1,3462	4,1147	516,28	3,2239	1.524,88	0
0,8462;-1,3077;-1,6923;2,7821;-1,2821;-1,7308;2,9615;1,7051	4,0958	535,73	2,7347	1.449,72	0
-2,5385;2,8462;1,6923;1,3462;0,1538;0,0641;0,8974;2,2436	4,0857	565,33	2,8524	1.444,80	0
2,8462;-0,2308;0,6667;-3,5000;1,5897;1,0897;1,7051;1,2564	4,0239	520,34	3,8396	1.456,82	0
2,0769;2,2308;0,7692;-0,9872;-0,9744;1,3462;3,4103;1,4359	4,0227	535,03	4,2912	1.319,13	0
1,6154;-1,923;0,4615;-1,8846;-0,5641;-2,2436;2,4231;0,4487	4,0066	512,1	4,6209	1.336,02	0
2,3846;1,0000;-1,4872;0,4487;1,0769;2,5000;1,6154;2,9615	3,9254	546,28	3,0569	1.418,52	0
-0,6923;1,4615;-0,6667;-0,0897;1,3846;1,9872;0,3590;0,5385	3,9202	542,91	3,0041	1.764,05	0
1,1538;-0,0769;1,4872;-1,1667;-1,3846;1,7308;0,2692;0,7179	3,7980	519,12	3,3460	1.546,21	0
-2,2308;-1,4615;0,8718;2,4231;0,0513;-2,3718;2,0641;2,6026	3,7322	562,4	4,7047	1.226,16	0
-2,3846;-1,7692;-1,0769;0,6282;0,8718;-0,8333;2,6923;0,1795	3,7315	548,9	3,1022	1.572,31	0
2,2308;-2,2308;-0,0513;0,8077;1,7949;-0,9615;2,5128;2,7821	3,7304	549,48	3,5365	1.248,53	0
-0,2308;-2,3846;-0,9744;-1,5256;0,3590;2,3718;3,3205;1,9744	3,7222	541,68	3,2341	1.552,92	0
-3,0000;0,3846;0,9744;-0,4487;-0,8718;-2,2436;2,6026;0,8077	3,7062	552,57	3,0932	1.604,44	0
3,0000;1,1538;1,1795;3,5000;0,6667;0,3205;0,9872;2,1538	3,6712	557,69	2,7259	1.183,34	0
-1,9231;-1,1538;1,5897;-2,9615;1,2821;-0,3205;2,7821;2,0641	3,6585	550,14	3,8551	1.522,77	0
1,0000;1,7692;1,0769;1,5256;1,4872;-1,987;3,051;0,6282	3,5772	558,33	3,4071	1.201,17	0
-1,3077;-2,0769;-0,4615;3,3205;-1,1795;0,9615;1,8077;1,0769	3,5604	554,8	2,7820	1.230,11	0
-0,5385;-1,6154;1,7949;1,1667;1,1795;-0,7051;0,6282;0,3590	3,5428	547,87	3,6996	1.243,88	0
2,5385;-0,8462;-0,7692;2,0641;0,4615;1,2179;2,3333;0,0000	3,3231	542,94	2,8600	1.276,85	0
0,5385;-2,6923;2,0000;1,8846;-0,2564;0,8333;3,2308;1,5256	3,1757	562,83	3,4506	1.185,37	0

Tabelle C.9: initialer Versuchsplan Versuch 2

Iteration	Parameter	Pressn.-abw.	F_{press}	Q	P_{zug}	#FE	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	1,5098;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	2,4255	0,1537	0,5864
1	3,0000;-3,0000;2,0000;3,5000;1,6779;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	2	2,4668	0,1548	0,5266
1	-1,1538;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8974;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	4	2,4322	0,1458	0,5741
1	1,5098;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,1569;3,5000;0,0000	1,7973	593,87	2,7875	1.171,39	0	2,4515	0,1525	0,5477
1	3,0000;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;1,3985;2,6897;0,0000	2,3642	572,38	2,7843	1.183,81	0	2,5737	0,1501	0,3849
1	-0,9217;-2,6921;2,0000;3,5000;1,9518;0,8333;2,8718;0,0000	2,4254	596,17	2,8755	1.122,29	0	2,6103	0,1363	0,3382

Tabelle C.10: Ergebnis Versuch 2 Lauf 1. Die Ergebnisse der weiteren Iterationen sind aufgrund eines Fehlers in der Auswahlfunktion nicht relevant (siehe 6.2.2).

Iteration	Parameter	Pressn.- abweich.	F_{press}	Q	P_{zug}	#FE	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	-0,9837;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	3	2,4240	0,1498	0,5874
1	3,0000;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	2	2,4149	0,1580	0,6038
1	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8625;2,5000;3,2579;0,0000	1,8144	598,16	2,7094	1.186,45	0	2,4700	0,1487	0,5201
1	2,9999;-3,0000;2,0000;3,4515;1,8625;2,5000;3,2579;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	2,4656	0,1545	0,5280
1	-1,1538;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8974;1,7440;2,8718;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	3	2,5177	0,1324	0,4506
1	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8625;2,4083;3,2579;0,0000	1,8332	595,39	2,7150	1.183,20	0	2,4770	0,1483	0,5103
1	2,9999;-2,1705;2,0000;3,4515;1,7845;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	-1,0000	Fehler	1	2,5117	0,1535	0,4645
1	0,8822;-2,6922;2,0000;3,5000;1,8625;2,5000;3,2579;0,0000	1,8376	599,33	2,7012	1.190,21	0	2,4897	0,1478	0,4925
2	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8813;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8705	0,0903	0,0014
2	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,9596;2,5000;3,3305;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8949	0,0985	0,0011
2	0,9795;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8625;2,5000;3,3930;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8842	0,0907	0,0010
2	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8895;2,5000;3,3230;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8475	0,0659	0,0009
2	0,8090;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8625;2,5000;3,2991;0,0048	1,8227	598,68	2,7081	1.187,38	0	1,8676	0,0739	0,0007
2	0,9945;-2,9999;2,0000;3,5000;1,8626;2,5000;3,270;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8716	0,0767	0,0008
2	0,8822;-2,9999;2,0000;3,5000;1,9596;2,5000;3,2579;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8846	0,0899	0,0010
2	0,9128;-2,9999;2,0000;3,5000;1,8748;2,5000;3,2580;0,0208	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8693	0,0733	0,0007
2	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8625;2,5000;3,4530;0,0000	1,7431	600,33	2,9129	1.171,95	0	1,8506	0,0748	0,0012
2	0,8822;-3,0000;2,0000;3,4307;1,8625;2,5000;3,3305;0,0000	1,8277	598,95	2,7281	1.182,73	0	1,8671	0,0721	0,0007
3	0,8875;-3,0000;2,0000;3,5000;8437;2,5000;3,5000;0,0000	1,7277	600,15	2,7633	1.192,80	0	1,7792	0,0597	0,0006
3	0,8822;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8617;2,5000;3,5000;0,0566	1,7363	600,78	2,7160	1.180,82	0	1,7891	0,0611	0,0005
3	0,8822;-3,0000;1,9585;3,5000;1,8650;2,5000;3,5000;0,0000	1,7423	599,54	2,7336	1.186,82	0	1,7718	0,0517	0,0005
4	1,4114;-2,9998;2,0000;3,5000;1,8501;2,4999;3,4843;0,0001	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7858	0,0743	0,0007
4	0,8875;-2,9941;2,0000;3,5000;1,8025;2,5000;3,5000;0,0000	1,7411	599,51	2,7082	1.182,95	0	1,7629	0,0480	0,0003
4	1,8147;-3,0000;2,0000;3,4998;1,9855;2,4997;3,4998;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8540	0,1150	0,0008
4	1,7545;-3,0000;1,9999;3,5000;1,9136;2,4999;3,4999;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8307	0,1013	0,0007
4	2,1913;-2,9997;2,0000;3,4998;1,9393;2,4998;3,4999;0,0003	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8692	0,1188	0,0007
4	1,6934;-2,9999;2,0000;3,5000;1,8494;2,5000;3,5000;0,0001	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8078	0,0887	0,0007
4	1,2088;-2,9999;1,9732;3,4999;1,8446;2,5000;3,4807;0,0261	1,7459	596,68	2,8643	1.169,19	0	1,7751	0,0614	0,0005
4	1,2088;-3,0000;1,9596;3,5000;1,8446;2,5000;3,4800;0,0097	1,7311	598,03	2,8886	1.171,72	0	1,7766	0,0611	0,0004
5	1,9910;-3,0000;1,9999;3,5000;1,9752;2,4785;3,4800;0,1379	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7690	0,0744	0,0010
5	2,4598;-3,0000;2,0000;3,3037;1,8438;2,4856;3,4943;0,0097	1,7826	588,84	2,8656	1.189,52	0	1,8173	0,0864	0,0005
5	1,2089;-3,0000;1,9996;3,2241;1,9999;2,5000;3,4939;0,0559	1,8184	595,23	3,0944	1.184,69	0	1,8160	0,0736	0,0003
5	1,2415;-3,0000;1,9999;3,3125;1,8437;2,4801;3,4999;0,0729	1,8067	596,3	2,7517	1.188,76	0	1,8079	0,0615	0,0001
6	0,9218;-2,7905;1,8632;3,1930;1,7375;2,2640;3,4385;0,1740	2,0180	593,73	2,7278	1.186,10	0	2,0344	0,0970	0,0000
6	1,9203;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,4478;3,4943;0,0097	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7275	0,0577	0,0017
6	0,6518;-2,7659;1,9047;3,1615;1,7554;2,2600;3,3975;0,1664	1,9960	593,31	2,7556	1.189,62	0	2,0632	0,0996	0,0000
6	1,2088;-3,0000;2,0000;3,5000;1,9999;2,3379;3,5000;0,0097	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7771	0,0647	0,0005
6	2,4598;-3,0000;2,0000;3,5000;1,8438;2,3514;3,4945;0,0097	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7742	0,0645	0,0006
6	2,3042;-3,0000;2,0000;3,4780;1,9884;2,3545;3,4956;0,0098	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7741	0,0705	0,0008
6	1,2089;-3,0000;1,9596;3,5000;1,9999;2,3195;3,4987;0,0096	1,7802	598,49	2,7443	1.186,38	0	1,7962	0,0693	0,0004
7	0,8433;-2,8867;1,8467;3,3066;1,8504;2,4098;3,4402;0,0663	1,8540	596,42	2,7313	1.196,43	0	1,8913	0,0435	0,0000
7	0,8730;2,8259;1,9003;3,2872;1,7847;2,3746;3,4588;0,2034	1,9058	594,19	2,7241	1.189,47	0	1,9411	0,0524	0,0000
7	1,0409;-2,8038;1,8861;3,0797;1,8510;2,3182;3,4327;0,2318	1,9811	593,99	2,7378	1.235,40	0	2,0043	0,0608	0,0000
8	0,6374;-2,8328;1,8982;3,3612;1,9185;2,3384;3,4284;0,1286	1,8700	596,25	2,7237	1.197,05	0	1,8845	0,0455	0,0000
8	0,7988;-2,5659;1,8459;3,3873;1,8432;2,3463;3,3965;0,1049	1,9085	597,76	2,7072	1.189,26	0	1,9211	0,0476	0,0000
8	0,8871;-2,9607;1,9596;3,5000;1,9992;2,0561;3,4797;0,0097	1,8434	598,17	2,7667	1.184,84	0	1,8648	0,0661	0,0000
9	1,0972;-2,9066;1,8444;3,3956;1,8568;2,2190;3,2877;0,0814	1,9229	591,04	2,7068	1.190,27	0	1,9508	0,0431	0,0000
9	1,0637;-2,7412;1,8353;3,3823;1,8896;2,3769;3,4327;0,0733	1,8519	593,78	2,7114	1.196,93	0	1,8750	0,0369	0,0000
9	0,9796;-2,8124;1,8392;3,3729;1,6805;2,3925;3,3644;0,1242	1,8779	594,18	2,7104	1.327,69	0	1,9842	0,0537	0,0000
10	0,9980;-2,7923;1,9063;3,2145;1,7896;2,0967;3,4421;0,0702	1,9488	589,93	2,7173	1.200,86	0	1,9777	0,0454	0,0000
10	1,0288;-2,7897;1,8478;3,1500;1,8742;2,3886;3,4646;0,2795	1,9768	594,56	2,7271	1.201,89	0	1,9541	0,0452	0,0000
10	1,1174;-2,9670;1,9598;3,5000;2,0000;2,5000;3,4945;0,2993	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7975	0,0570	0,0001
10	1,1150;-2,8172;1,9081;3,2427;1,8266;2,4467;3,4142;0,0912	1,8932	592,92	2,7440	1.187,23	0	1,8763	0,0389	0,0000

Tabelle C.11: Ergebnis Versuch 2 Lauf 2

Iteration	Parameter	P.naht- abweichung	F_{press}	Q	P_{zug}	#FE	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	-0,6728;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	2	2,4274	0,1505	0,5825
1	3,0000;-3,0000;2,0000;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	2	2,4125	0,1576	0,6073
1	1,1354;-3,0000;2,0000;3,5000;1,7140;2,5000;3,5000;0,0000	1,7196	597,68	2,9715	1.169,47	0	2,4769	0,1502	0,5110
1	-1,1538;-2,0765;2,0000;3,5000;1,8974;1,9097;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	3	2,5294	0,1395	0,4371
1	1,6707;-2,4304;2,0000;3,5000;1,7140;2,3877;3,5000;0,0000	1,7956	591,94	2,6880	1.193,02	0	2,5212	0,1492	0,4507
1	1,6707;-3,0000;2,0000;3,4349;1,7140;2,5000;3,4991;0,0000	1,7253	593,23	3,0014	1.172,03	0	2,4821	0,1510	0,5039
2	1,5057;-3,0000;2,0000;3,5000;1,7556;2,5000;3,5000;0,0046	1,6970	596,07	2,7063	1.246,71	0	1,7621	0,0733	0,0010
2	1,4643;-3,0000;2,0000;3,5000;1,7196;2,5000;3,4728;0,0000	1,7264	595,42	2,8120	1.196,45	0	1,7659	0,0703	0,0008
2	2,0641;-3,0000;2,0000;3,5000;1,7140;2,5000;3,5000;0,0175	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7601	0,0715	0,0009
2	1,2146;-3,0000;2,0000;3,5000;1,7715;2,5000;3,4991;0,0000	1,7274	596,78	2,7126	1.192,51	0	1,7682	0,0760	0,0009
3	1,5739;-3,0000;1,9882;3,5000;2,0000;2,4726;3,5000;0,0070	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7000	0,0576	0,0015
3	1,5185;-2,9999;2,0000;3,4876;2,0000;2,5000;3,5000;0,0521	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7320	0,0757	0,0013
3	1,5121;-3,0000;1,9422;3,5000;2,0000;2,5000;3,5000;0,0046	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7228	0,0692	0,0013
3	1,5057;-3,0000;2,0000;3,4373;1,8841;2,4725;3,5000;0,0414	1,7635	593,61	2,7085	1.201,03	0	1,7463	0,0707	0,0007
3	1,5385;-3,0000;1,9494;3,4999;1,9014;2,4955;3,5000;0,0046	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7279	0,0637	0,0009
3	1,5741;-2,9998;2,0000;3,4424;1,8536;2,5000;3,5000;0,0963	1,7517	593,24	2,7115	1.198,99	0	1,7964	0,0922	0,0005
3	2,3269;-3,0000;1,9628;3,4998;1,6877;2,4724;3,4999;0,0046	1,6996	590,83	2,7554	1.192,76	0	1,7558	0,0761	0,0007
4	2,4070;-2,9999;1,9849;3,4998;1,7313;2,5000;3,5000;0,0000	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,6893	0,0400	0,0011
4	1,5552;-2,9999;2,0000;3,5000;1,6949;2,5000;3,3795;0,0046	1,7726	594,11	2,9104	1.181,99	0	1,7734	0,0629	0,0002
4	2,6183;-2,9999;1,9630;3,4349;1,7524;2,4962;3,4914;0,0054	1,7215	588,63	2,7538	1.182,74	0	1,7126	0,0528	0,0008
4	1,5061;-2,9999;2,0000;3,5000;1,6511;2,5000;3,5000;0,0046	1,7091	594,3	2,7406	1.196,22	0	1,7265	0,0448	0,0003
5	1,7785;-3,0000;2,0000;3,4997;1,8497;2,3050;3,5000;0,0046	1,7520	591,45	2,7189	1.190,06	0	1,7937	0,0811	0,0003
5	2,3307;-3,0000;1,9674;3,5000;1,7139;2,2230;3,5000;0,0046	1,7781	588,56	2,8148	1.192,58	0	1,8381	0,0994	0,0003
5	2,8039;-3,0000;1,9629;3,5000;1,7137;2,5000;3,5000;0,1472	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	2	1,7411	0,0565	0,0004
5	2,3262;-3,0000;1,9628;3,4434;1,9717;2,3531;3,5000;0,0047	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,7632	0,0729	0,0005
5	1,5952;-2,9999;1,9999;3,4612;1,9361;2,3174;3,5000;0,0047	1,7640	592,26	2,7012	1.194,47	0	1,7997	0,0790	0,0002
6	2,2649;-3,0000;2,0000;3,4980;1,6950;2,4999;3,5000;0,2670	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8073	0,0793	0,0002
6	1,8993;-2,9999;2,0000;3,3103;1,9437;2,4999;3,5000;0,0046	1,7914	590,52	2,7186	1.202,67	0	1,7531	0,0596	0,0003
6	1,3437;-2,7768;1,8877;3,3664;1,8724;2,4167;3,4216;0,1935	1,8785	592,97	2,7340	1.189,56	0	1,9414	0,0823	0,0000
6	2,6028;-2,9998;1,9760;3,2170;1,9902;2,4997;3,5000;0,0046	1,8314	587,59	2,7441	1.151,10	0	1,7750	0,0721	0,0003
7	1,3960;-2,9999;2,0000;3,4997;1,7139;2,4959;3,5000;0,3354	1,8000	594,45	2,9382	1.168,78	0	1,8091	0,0717	0,0001
7	1,2307;-2,8820;1,9219;3,3168;1,6262;2,3789;3,4024;0,1780	1,9132	591,83	2,7230	1.196,21	0	1,9375	0,0552	0,0000
7	1,1842;-2,8311;1,9101;3,1850;1,7011;2,4100;3,3220;0,3175	2,0237	592,06	2,7273	1.191,75	0	2,0417	0,0831	0,0000
8	2,5848;-2,9995;1,9630;3,4990;1,7140;2,4994;3,0839;0,0031	Fehler	Fehler	Fehler	Fehler	1	1,8389	0,0667	0,0000
8	1,1832;-2,8755;1,8008;3,3832;1,8058;2,2751;3,2840;0,1433	1,9544	592,79	2,7069	1.189,77	0	1,9619	0,0600	0,0000
8	1,5501;-2,8007;1,8793;3,2302;1,7218;2,0244;3,2831;0,1662	2,1005	586,27	2,7412	1.199,31	0	2,0668	0,0756	0,0000
8	1,5857;-2,8371;1,8780;3,4291;1,7888;2,3795;3,2894;0,1545	1,9479	592,46	2,7011	1.192,05	0	1,8924	0,0513	0,0000
9	1,5600;-2,8499;1,8041;3,3145;1,7589;2,3862;3,4129;0,0744	1,8744	591,74	2,8870	1.191,11	0	1,8980	0,0462	0,0000
9	1,5971;-2,7750;1,8611;3,3509;1,8444;2,4036;3,3002;0,0878	1,9326	590,63	2,7371	1.193,59	0	1,9399	0,0427	0,0000
9	1,3227;-2,8231;1,9031;3,4475;1,7299;2,3280;3,4173;0,0804	1,8413	593,5	2,7146	1.179,66	0	1,8570	0,0443	0,0000
10	1,4886;-2,7157;1,8856;3,2761;1,6817;2,3826;3,4431;0,2180	1,8926	588,56	2,7874	1.192,25	0	1,9286	0,0403	0,0000
10	1,3366;-2,8683;1,9155;3,3150;1,7248;2,1701;3,4563;0,0969	1,8941	589,43	2,7215	1.194,03	0	1,9143	0,0424	0,0000
10	1,6989;-2,7178;1,7282;3,3934;1,8106;2,3828;3,3828;0,1042	1,8896	591,11	2,7102	1.188,27	0	1,9084	0,0421	0,0000

Tabelle C.12: Ergebnis Versuch 2 Lauf 3

Morph- parameter	Untergrenze (mm)	Obergrenze (mm)
Dornlänge	-2	2
Dornoberseite Höhe	-2	2
Dornunterseite Höhe	-2	2
Schweißkammerbreite 2	-2	4
Schweißkammerhöhe 2	-2	4
Einlauf unten Höhe	-3	3
Schweißkammerlänge aussen	-2	3
Einlauf oben Höhe	-3	3

Randbedingung	Grenzwert
Fehler FE-Netz #FE	<1

Tabelle C.13: Grenzen der Morphingparameter Versuchsmodell 3

Tabelle C.14: Randbedingungen des Versuchsmodells 3

Parameter	Pressnaht- abweichung	#FE
-1,6923;1,8974;1,6923;2,1538;1,2308;0,0769;-0,7179;0,8462	Fehler	5
-1,4872;-0,9744;0,8718;3,0769;1,0769;-2,8462;0,9487;1,4615	Fehler	0
0,8718;1,0769;1,8974;-1,2308;0,3077;-1,9231;0,0513;1,3077	Fehler	5
1,7949;1,5897;-1,2821;0,7692;0,9231;-1,4615;-0,9744;-1,3077	Fehler	3
2,0000;0,7692;1,1795;4,0000;2,0000;0,3846;-0,5897;0,6923	Fehler	4
-0,6667;0,0513;-0,3590;-0,4615;4,0000;-3,0000;-1,2308;1,1538	46,5837	0
0,4615;1,7949;-0,5641;2,4615;1,3846;-2,2308;1,2051;3,0000	36,5784	0
0,6667;1,1795;1,0769;2,3077;3,2308;-2,3846;2,3590;-1,9231	31,8465	0
-0,9744;0,4615;-0,8718;1,0769;-1,5385;-2,5385;-1,7436;1,0000	31,4894	0
1,4872;-1,4872;-0,0513;1,6923;3,6923;-1,1538;1,5897;1,7692	30,0067	0
1,0769;-1,2821;0,4615;-0,6154;0,1538;-2,6923;1,4615;-2,2308	27,4130	0
0,9744;-0,3590;-2,0000;-1,8462;0,4615;-1,3077;0,5641;2,3846	27,1244	0
0,5641;-0,8718;-1,6923;3,3846;-0,9231;-2,0769;2,2308;-0,0769	26,6346	0
-1,3846;1,2821;0,2564;-1,0769;0,7692;-1,7692;-0,2051;-2,8462	18,9459	0
-0,2564;1,3846;-1,3846;-0,9231;3,5385;-0,2308;2,4872;-0,2308	18,2570	0
-1,2821;-0,7692;1,5897;-1,5385;2,9231;-0,3846;1,9744;0,5385	17,6801	0
-1,7949;-0,2564;-1,7949;1,8462;1,8462;0,6923;-0,0769;2,6923	15,5320	0
-1,1795;0,1538;-0,1538;-0,1538;-1,3846;-0,5385;3,0000;2,2308	15,1814	0
-1,5897;-1,1795;-1,0769;1,5385;2,3077;-1,0000;1,8462;-2,6923	15,1575	0
1,1795;-2,0000;-1,1795;0,3077;2,1538;-0,0769;-2,0000;-0,6923	13,8758	0
0,2564;0,8718;1,3846;3,2308;-2,0000;-1,6154;0,6923;-1,4615	13,8519	0
1,2821;-1,6923;0,5641;1,2308;-1,8462;-0,6923;-0,3333;1,9231	13,3410	0
-0,3590;-1,0769;1,7949;2,0000;2,7692;-0,8462;-1,1026;-2,3846	13,1524	0
-1,8974;-1,8974;0,0513;-1,3846;0,0000;0,2308;-1,3590;0,0769	10,8739	0
-1,0769;2,0000;-1,5897;2,9231;-0,6154;0,5385;1,0769;-1,0000	9,9376	0
0,1538;-0,4615;-1,8974;-0,7692;-1,6923;0,8462;0,1795;-2,5385	8,3365	0
-0,5641;1,6923;-0,2564;-1,6923;-0,1538;2,2308;-0,4615;1,6154	8,0728	0
0,0513;-0,6667;1,2821;0,4615;2,4615;1,7692;-1,8718;2,5385	7,9516	0
-0,8718;-1,3846;-0,4615;3,8462;-0,7692;1,1538;-0,8462;-1,1538	7,3268	0
1,5897;0,6667;-1,4872;1,3846;2,6154;3,0000;0,3077;2,0769	7,3038	0
-0,7692;0,3590;0,1538;3,6923;3,8462;1,9231;2,1026;0,2308	7,1797	0
-0,0513;0,5641;0,3590;3,5385;-1,2308;2,5385;0,8205;2,8462	7,0083	0
0,7692;-0,0513;1,4872;0,0000;-1,0769;2,0769;-1,6154;-1,7692	6,8867	0
-2,0000;0,2564;0,9744;0,6154;-0,3077;2,6923;1,7179;-1,6154	6,4624	0
1,3846;1,4872;0,7692;0,1538;-0,4615;1,6154;2,8718;-0,5385	5,8011	0
1,8974;-0,1538;0,6667;-2,0000;3,3846;1,3077;0,4359;-0,8462	5,6131	0
-0,4615;0,9744;-0,6667;0,9231;3,0769;2,3846;-1,4872;-2,0769	5,2698	0
-0,1538;-1,5897;-0,9744;-0,3077;1,5385;2,8462;2,7436;0,3846	4,6141	0
1,6923;-0,5641;-0,7692;2,7692;1,6923;1,4615;1,3333;-3,0000	4,5160	0
0,3590;-1,7949;2,0000;2,6154;0,6154;1,0000;2,6154;-0,3846	3,5030	0

Tabelle C.15: Initialer Versuchsplan Versuch 3

Iteration	Parameter	P. nahtabweichung	#FE	\hat{y}	σ	GEI(2)
1	-0,4507;-2,0000;2,0000;3,9491;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	8,7602	0	-9,0369	4,0207	173,4153
1	1,8973;-2,0000;1,6177;-2,0000;-2,0000;3,0000;2,6642;-3,0000	Fehler	5	-7,9640	4,1742	148,9077
1	1,1360;-2,0000;2,0000;2,6154;0,6154;3,0000;3,0000;-3,0000	Fehler	6	-6,0420	3,7714	105,3167
1	-0,4507;-2,0000;0,4843;3,9491;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	8,8835	0	-7,4792	3,9009	135,8220
1	-2,0000;-2,0000;2,0000;1,7649;-2,0000;3,0000;1,8184;-3,0000	Fehler	58	-7,5619	3,8868	137,5351
1	2,0000;-2,0000;-1,2298;4,0000;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	8,8569	0	-6,6052	4,1680	119,5209
2	2,0000;-0,6683;-0,9853;-2,0000;-2,0000;3,0000;-2,0000;-3,0000	Fehler	37	-3,4509	5,5561	77,9228
2	2,0000;-1,5743;-1,2452;-2,0000;-2,0000;3,0000;-2,0000;-3,0000	Fehler	31	-3,6083	5,5981	80,6437
2	2,0000;-1,0896;-1,1366;-2,0000;-2,0000;3,0000;-1,4985;-3,0000	Fehler	4	-3,4030	5,5181	76,8557
2	2,0000;-0,8049;-1,2298;4,0000;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	8,9946	0	-0,6969	5,2065	41,6541
2	2,0000;-0,1688;-1,2298;4,0000;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	9,0271	0	-0,5893	5,2348	40,8587
2	2,0000;-1,2260;-1,2298;4,0000;-2,0000;3,0000;3,0000;-3,0000	8,9391	0	-0,3557	5,1427	37,9478
3	2,0000;-2,0000;0,2187;2,7692;1,6923;3,0000;1,3333;-3,0000	5,9313	0	-1,4407	4,5221	43,6400
3	0,5734;-1,7949;2,0000;2,6154;0,6154;3,0000;2,6154;-0,3846	Fehler	1	-1,6391	4,4241	44,9934
3	2,0000;-2,0000;0,8570;0,9131;0,6154;3,0000;3,0000;-3,0000	6,9194	0	-1,6586	4,9651	49,5940
3	0,5734;-1,7949;1,5806;2,6154;0,6154;2,9999;2,6154;-0,3846	4,0342	0	-1,2486	4,4187	40,8606
4	2,0000;-2,0000;-1,3129;3,5862;-2,0000;3,0000;-2,0000;-1,1271	Fehler	23	-0,0549	4,8700	33,2117
4	2,0000;-2,0000;-2,0000;-2,0000;-2,0000;3,0000;-1,4985;-0,6932	Fehler	218	-0,3793	4,9856	36,9230
4	2,0000;-2,0000;-0,0634;2,2654;-2,0000;3,0000;-2,0000;0,2308	Fehler	20	-0,0121	4,7376	31,8752
4	-2,0000;-1,8138;2,0000;3,9761;-2,0000;3,0000;-2,0000;-1,1271	Fehler	73	-1,6237	5,0430	49,8687
4	-2,0000;-0,1538;2,0000;4,0000;-2,0000;3,0000;0,2776;-0,7151	Fehler	60	-0,9467	4,5904	39,1737
4	-2,0000;-2,0000;2,0000;4,0000;-2,0000;3,0000;3,0000;-1,3647	Fehler	58	-0,4380	4,6282	34,7277
4	-2,0000;-0,6060;2,0000;2,3777;-0,6331;3,0000;3,0000;-2,1405	Fehler	60	0,6366	4,4472	24,8581
4	-0,8718;-2,0000;2,0000;3,8462;-0,7692;3,0000;2,9902;-1,1538	Fehler	1	0,6877	4,4503	24,5159
4	-2,0000;2,0000;2,0000;-0,2238;-2,0000;3,0000;3,0000;-0,8462	Fehler	74	-0,1883	4,8239	34,0030
4	-0,8718;-2,0000;2,0000;3,8462;-0,7289;3,0000;2,9902;-1,1538	Fehler	1	0,7182	4,4489	24,2926
4	2,0000;-2,0000;2,0000;4,0000;1,6923;3,0000;-2,0000;-2,1613	Fehler	31	0,4774	4,7722	28,2419
4	2,0000;-2,0000;2,0000;4,0000;1,1608;3,0000;-2,0000;-0,9599	Fehler	31	0,6456	4,7930	27,1332
4	0,5734;-2,0000;2,0000;4,0000;-2,0000;3,0000;2,6154;-1,1190	7,7552	0	0,0630	4,4408	29,1497
4	0,7692;-2,0000;2,0000;4,0000;1,9045;3,0000;-1,6154;-2,0604	Fehler	4	0,5922	4,6278	26,3879
4	-0,8718;-2,0000;2,0000;3,8462;-0,7692;3,0000;2,9902;-0,8895	Fehler	1	0,7889	4,3747	23,3224
4	-0,4507;-2,0000;2,0000;4,0000;-1,8140;3,0000;3,0000;-1,1859	7,5538	0	0,0592	4,4841	29,4816
4	-0,4507;-2,0000;2,0000;4,0000;-1,5124;3,0000;3,0000;-2,0064	7,7666	0	0,6677	4,4251	24,4925
5	-1,1953;-2,0000;2,0000;-0,9909;4,0000;3,0000;1,1845;-3,0000	Fehler	5	-0,1954	5,1569	36,6259
5	-1,4615;-2,0000;1,8424;-2,0000;4,0000;3,0000;2,7060;-3,0000	Fehler	6	0,0492	5,3673	36,1599
5	0,0534;-1,7949;2,0000;-2,0000;4,0000;3,0000;1,3120;-3,0000	Fehler	1	0,2406	5,0917	32,4271
5	-0,1538;-2,0000;2,0000;3,9491;2,2510;3,0000;-0,2452;-3,0000	5,5847	0	0,7204	4,9909	27,9722
5	0,0534;-1,7949;2,0000;-2,0000;4,0000;3,0000;1,4770;-3,0000	Fehler	1	0,3309	5,0888	31,6778
5	-0,8455;-1,7949;2,0000;-0,9909;4,0000;3,0000;1,2001;-3,0000	Fehler	4	0,1255	5,0830	33,3071
5	-1,1953;-2,0000;1,6177;-0,9909;4,0000;3,0000;1,1845;-3,0000	4,1723	0	0,0215	5,1294	34,5342
5	-1,5678;-1,6114;0,9744;2,8722;0,7764;3,0000;0,6138;-3,0000	6,5890	0	-0,2453	4,8790	34,9134
6	-0,4507;-1,7949;2,0000;3,9491;-1,8140;1,9231;2,1026;-3,0000	7,5028	0	2,7713	4,2709	11,8937
6	-0,7692;-1,6114;2,0000;2,8722;0,6154;2,2136;2,6154;-3,0000	Fehler	1	3,6386	4,1576	8,2021
6	0,7692;-1,8955;2,0000;4,0000;-2,0000;2,4515;0,9974;-3,0000	Fehler	1	2,4761	4,2228	12,9375
6	-0,4507;-1,7949;2,0000;3,9491;-1,4957;1,9231;2,1026;-3,0000	7,0806	0	2,9188	4,2436	11,1591
6	0,7692;-0,0513;2,0000;0,0000;-1,1578;2,0769;2,6153;-1,7692	Fehler	5	3,3849	4,1975	9,2121
6	0,3590;-1,7731;1,5806;0,6154;-1,0769;2,0769;2,2515;-1,7692	5,9549	0	3,3339	4,2084	9,4379
7	0,3590;-1,0690;1,5806;2,6154;-0,1703;1,3077;2,6154;-3,0000	4,6366	0	3,9138	3,2326	4,2470
7	0,7692;-1,8524;2,0000;1,3578;0,6154;1,4615;1,3333;-3,0000	Fehler	2	3,6421	3,2249	4,8518
7	0,7692;-1,7949;1,9733;2,6154;-1,4957;1,0000;2,6154;-3,0000	5,7484	0	3,4185	3,0352	4,8145
7	0,7692;-1,7949;2,0000;2,5840;0,6154;1,3077;2,6154;-3,0000	Fehler	2	3,7981	3,1807	4,3521
7	0,7692;-1,7731;1,4872;0,4567;-1,3774;1,3077;2,6154;-3,0000	6,2178	0	3,6964	3,4239	5,3517
8	0,3590;-0,5641;1,4872;2,6154;0,6154;1,5362;1,3254;-0,8462	3,2938	0	4,2135	2,7788	2,5209
8	0,3590;-1,3576;1,6177;2,6154;1,1022;1,7190;2,6154;-0,3846	2,3876	0	4,7951	2,7891	1,7471
8	-0,7692;0,9744;1,9733;2,6154;1,6923;1,6154;0,9778;-3,0000	Fehler	1	4,8234	3,2860	2,7163
8	0,3590;-0,5641;2,0000;2,7692;0,6154;1,4939;1,3579;-1,1538	2,7076	0	4,0339	2,8201	2,9160
9	0,0513;-1,3405;2,0000;2,6154;0,6154;1,4615;2,6154;-0,3846	2,5373	0	2,8202	2,2564	1,8555
9	0,2260;-0,9522;2,0000;2,5091;0,6154;1,6927;1,8485;-0,3846	2,5195	0	2,7324	2,1518	1,7801
9	0,3590;-1,1275;2,0000;2,3541;1,1161;1,6047;2,6154;-1,1942	2,2543	0	3,0824	2,2372	1,4839
10	0,2260;-1,0769;2,0000;2,3541;1,7802;2,4030;2,4872;-0,3846	2,1571	0	3,7576	2,5615	1,1647
10	0,0654;-0,5641;1,9733;2,0000;1,5385;1,7507;2,6154;-0,6933	2,2563	0	3,0737	2,0996	1,1326
10	0,2564;-1,3576;1,9733;2,6154;1,6923;1,6573;0,4359;-1,1859	2,2211	0	3,0251	2,1896	1,3200
11	0,2260;-0,5438;2,0000;2,0090;2,6324;2,8283;2,5644;-0,3846	Fehler	1	3,3784	2,3787	1,1665
11	0,2564;-1,1795;2,0000;2,6154;1,7802;1,8167;2,4658;-1,1538	2,1155	0	2,3809	1,6830	1,1399
11	0,2260;-0,8828;2,0000;2,6154;1,6682;1,9834;2,7436;-0,3846	2,1365	0	2,6567	1,8665	1,1138
11	0,5734;-1,2911;1,9848;2,0000;2,1538;2,5482;1,0769;-0,3846	Fehler	2	3,1198	2,2936	1,2807
11	0,1343;-1,0769;1,9733;1,4504;1,6923;2,8214;1,8485;-0,3846	2,7005	0	2,9823	2,2592	1,3722
12	0,4318;-1,0769;2,0000;2,6927;1,6923;1,6413;2,3733;-0,5385	Fehler	1	2,2015	1,5087	1,0381
12	0,3590;-1,3405;2,0000;2,2654;1,6121;1,8682;1,8920;-0,3846	2,2964	0	2,3122	1,6430	1,1105
12	0,2260;-1,1041;1,9735;2,4334;1,6682;1,4073;1,4157;-0,8895	2,8765	0	2,6376	1,7903	0,9825
12	0,1343;-1,3576;1,9733;2,3541;1,5130;1,8688;1,3578;-0,4239	2,2369	0	2,3705	1,7730	1,2423

Tabelle C.16: Ergebnis Versuch 3

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abweichung der Längspressnaht und der Verstärkungselemente	2
2.1	Schematische Darstellung des direkten Strangpressens	6
2.2	Deformation der Fließlinien	6
2.3	Aufbau eines Kammerwerkzeugs	7
2.4	Werkzeug für die Strangpressung eines verstärkten Flachprofils	8
2.5	Erwarteter und realer Pressnahtverlauf	8
2.6	Deformation der Fließlinien in der Simulation bei unterschiedlicher Reibung	11
2.7	Anwendung des Morphings	12
2.8	Ablaufdiagramm des EGO-Algorithmus	19
2.9	Beispiel: Latin Hypercube Designs	21
2.10	Beispiel für die erwartete Verbesserung	23
3.1	Tracing und Dehnung für die Pressnahterkennung	28
3.2	Ausschnitt Partikelverfolgung in einem 2D-Strangpressmodell	30
3.3	Prinzip der Nachbarschaftsuche	32
3.4	Gewichtete Flächen	34
3.5	Inverse Distanzgewichtung	35
3.6	Runge-Kutta-Schema 2. Ordnung	36
3.7	Zirkulation in einer toten Zone	36
3.8	Entstehung der Pressnaht	37
3.9	Fehlerhafte Partikelbahnen aufgrund der Reibung in der Nähe der Profilo- berfläche der Einläufe.	38
3.10	Platzierung der Startpunkte entlang der Profiloberflächen in den Einläufen und deren Verteilung im umgeformten Profil	39
3.11	Segmentierung der Pressnaht	40
3.12	Approximation einer Punktmenge mittels eines kubischen Polynoms und eines kubischen Splines	41
3.13	Extrahierte Pressnahtsegmente	42
3.14	Darstellung der eingeschlossenen Fläche	44

3.15	Anwendung der Metriken	44
4.1	Bestimmung des Verlaufs eines Verstärkungselements	50
5.1	Konvergenz auf der Branin-Funktion	56
5.2	Verteilung der Punkte auf der Braninfunktion	57
5.3	Konvergenz auf der Rosenbrock-Funktion	58
5.4	Konvergenz auf der Hartmann-Funktion	59
6.1	Visualisierungen für die Analyse von FE-Modellen	62
6.2	Aufbau: Versuchsmodell 1	65
6.3	Sensitivitätsanalyse der Dornlänge	66
6.4	Pressnahtverlauf des Versuchsmodells 1	68
6.5	Konvergenzverlauf Testmodell1	68
6.6	Verteilung der Punkte zu den Randbedingungen Versuch 1	69
6.7	Streudiagramm der standardisierten Residuen	70
6.8	Vergleich der Vorhersage mit Funktionswerten	71
6.9	Aufbau: Versuchsmodell 2	73
6.10	Pressnahtverlauf des Versuchsmodells 2	74
6.11	Konvergenzverlauf des Versuchsmodells 2	74
6.12	Zusammenhang zwischen dem Abstand zum Optimum und der Pressnaht- abweichung	75
6.13	Aufbau: Versuchsmodell 3	76
6.14	Pressnahtlage des Versuchsmodells 3	76
6.15	optimierte Pressnahtlage des Versuchsmodells 3	77
6.16	Konvergenzverlauf Versuchsmodell 3	78
6.17	Standardisierte Residuen im Versuchsmodell 3	79

Literaturverzeichnis

- [1] ALTAIR ENGINEERING: *Altair HyperXtrude 7.0 User's Manual*, 2004.
- [2] ALTAIR ENGINEERING: *HyperMorph Introduction: Methods for Morphing Finite Element Models*, 2006.
- [3] AUGER, ANNE und NIKOLAUS HANSEN: *A Restart CMA Evolution Strategy With Increasing Population Size*. In: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2005)*, Seite 1769–1776, 2005.
- [4] BIERMANN, D., K. WEINERT und T. WAGNER: *Model-Based Optimization Revisited: Towards Real-World Processes*. In: *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008)*, Seiten 2980–2987, 2008.
- [5] BOOR, C. DE: *A Practical Guide to Splines*. Springer, NewYork, 1978.
- [6] DARMOFAL, D. L. und R. HAIMES: *An analysis of 3D particle path integration algorithms*. *J. Comput. Phys.*, 123(1):182–195, 1996.
- [7] DONATI, LORENZO und LUCA TOMESANI: *Evaluation of a new finite element method (FEM) criterion for seam welds quality prediction in aluminum extruded profiles*. In: *Proceedings of the Eighth International Aluminum Extrusion Technology Seminar*, Band II, Seite 221–235. Aluminum Extruders Council and The Aluminum Association, Orlando, FL, 2004.
- [8] FOX, JOHN: *Applied Regression Analysis, Linear Models, and Related Methods*. SAGE, 1997.
- [9] HUSSLAGHE, BART, GIJS RENNEN, EDWIN R. VAN DAM und DICK DEN HERTOG: *Space-Filling latin hypercube designs for computer experiments*. Technischer Bericht, Department of Econometrics and Operations Research, Tilburg University, Niederlande, 2006. <http://arno.uvt.nl/show.cgi?fid=53884>, <http://spacefillingdesigns.nl>.
- [10] HUTTON, DAVID V.: *Fundamentals of finite element analysis*. McGraw-Hill, 2004.

- [11] I., FLITTA und SHEPPARD T.: *Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow*. Materials science and technology, 19(7):837–846, 2003.
- [12] JO, H.H., C.S. JEONG, S.K. LEE und B.M. KIM: *Determination of welding pressure in the non-steady-state porthole die extrusion of improved Al7003 hollow section tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 139:428—433, 2003.
- [13] JONES, DONALD R., MATTHIAS SCHONLAU und WILLIAM J. WELCH: *Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions*. J. of Global Optimization, 13(4):455–492, 1998.
- [14] KIPFER, PETER, FRANK RECK und GÜNTHER GREINER: *Local Exact Particle Tracing on Unstructured Grids*. Computer Graphics Forum, 22(2):133–142, 2003.
- [15] KOPP, REINER und HERBERT WIEGELS: *Einführung in die Umformtechnik*. Verlag Mainz, Aachen, 2. korrigierte Auflage Auflage, 1999.
- [16] KRIGE, DANIEL G.: *A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the witwatersrand*. Diplomarbeit, University of Witwatersrand, 1951.
- [17] M., BJÖRKMAN und HOLMSTRÖM K.: *Global Optimization of Costly Nonconvex Functions Using Radial Basis Functions*. Optimization and Engineering, 1(4):373 – 297, 2000.
- [18] MCKAY, M.D., R. J. BECKMAN und W.J. CONOVER: *A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code*. Technometrics, 21(2):239–245, 1979.
- [19] MONTGOMERY, DOUGLAS C.: *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 5 Auflage, 2006.
- [20] NIELSEN, HANS BRUUN, SØREN NYMAND LOPHAVEN und JACOB SØNDERGAARD: *Aspects of the Matlab Toolbox DACE*. Technischer Bericht IMM-TR-200, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2002. <http://www2.imm.dtu.dk/~hbn/dace/>.
- [21] REINSCH, CHRISTIAN H.: *Smoothing by spline functions*. Numerische Mathematik, 10(3):177–183, 1967.
- [22] REN, JICHENG, GUANGZHOU ZENG und SHENQUAN LIU: *Interactive Particle Tracing Algorithm for Unstructured Grids*. In: *ICSC '95: Proceedings of the Third International Computer Science Conference on Image Analysis Applications and Computer Graphics*, Seiten 59–65, London, UK, 1995. Springer-Verlag.

- [23] ROTE, GÜNTER: *A New Metric Between Polygons and How to Compute it*. In: *ICALP '92: Proceedings of the 19th International Colloquium on Automata, Languages and Programming*, Seiten 404–415, London, UK, 1992. Springer-Verlag.
- [24] ROZHENKO, ALEXANDER I.: *Java AppLib: Approximation Library for Java*. <http://www.sssc.ru/matso/rozhenko/applib/index.html>, 2000.
- [25] SACKS, JEROME, WILLIAM J. WELCH, TOBY J. MITCHELL und HENRY P. WYNN: *Design and Analysis of Computer Experiments*. *Statistical Science*, 4(4):409–423, 1989.
- [26] SADARJOEN, I. ARI, THEO VAN WALSUM, ANDREA J. S. HIM und FRITS H. POST: *Practicle Tracing Algorithms for 3D Curvilinear Grids*. In: *Scientific Visualization, Overviews, Methodologies, and Techniques*, Seiten 311–335, Washington, DC, USA, 1994. IEEE Computer Society.
- [27] SANTNER, T. J., WILLIAMS B. und NOTZ W.: *The Design and Analysis of Computer Experiments*. Springer-Verlag, 2 Auflage, 2003.
- [28] SASENA, MICHAEL J., PANOS PAPALAMBROS und PIERRE GOOVAERTS: *Exploration of metamodeling sampling criteria for constrained global optimization*. *Engineering Optimization*, 34:2002, 2002.
- [29] SASENA, MICHAEL JAMES: *Flexibility and Efficiency Enhancements for Constrained Global Design Optimization with Kriging Approximations*. Doktorarbeit, University of Michigan, 2002.
- [30] SCHIKORRA, MARCO: *Modellierung und simulationsgestützte Analyse des Verbundstrangpressens*. Doktorarbeit, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Universität Dortmund, 2006.
- [31] SCHOMÄCKER, MICHEAL: *Verbundstrangpressen von Aluminiumprofilen mit endlosen metallischen Verstärkungselementen*. Doktorarbeit, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Universität Dortmund, 2006.
- [32] SCHONLAU, MATTHIAS, WILLIAM J. WELCH und DONALD R. JONES: *Global Versus Local Search in Constrained Optimization of Computer Models*. *New Developments and Applications in Experimental Design*, 34:11–25, 1998.
- [33] SOBESTER, ANDRÁS, STEPHEN LEARY und ANDY J. KEANE: *A parallel updating scheme for approximating and optimizing high fidelity computer simulations*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 27:371–383(13), July 2004.

- [34] VETTERLING, WILLIAM T., SAUL A. TEUKOLSKY und WILLIAM H. PRESS: *Numerical Recipes: Example Book (FORTRAN)*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 1992.
- [35] ZIENKIEWICZ, O.C. und R.L. TAYLOR: *The Finite Element Method*, Band 1: The Basis. Butterworth-Heinemann, 5. Auflage Auflage, 2000.

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dortmund, den 16. September 2008

Christoph Begau

