



Online-Magazin

Zeitschrift für numerische Simulationsmethoden und angrenzende Gebiete
 FEM – CFD – MKS – VR / VIS – PROZESS – SDM

Fachbeiträge in dieser Ausgabe

Strukturoptimierung

- Optimierung einer Positionier- und Haltevorrichtung nach Steifigkeits- und Gewichtsgesichtspunkten

Supraleitersimulation

- Simulation von unkonventionellen Supraleitern – Anwendung der Finite Elemente Methode

Strukturdynamik

- FEM-Echtzeitsimulation für die Dynamik elastischer Körper

...sowie Neuigkeiten, Veranstaltungskalender, Schulungen, ...

Alle bisherigen Ausgaben kostenlos zum Download unter:

www.nafems.org/magazin

Quick-Info

Trainingskurse

Verification & Validation of Models and Analyses
 5. - 6. April, Wiesbaden

Simulation und Analyse von Composites
 12. - 13. April, Wiesbaden

Non-Linear Finite Element Analysis
 18. - 19. April, Wiesbaden

Strömungssimulation (CFD): Theorie / Anwendung
 20. - 21. April, Wiesbaden

Prakt. Anwendung FEM / Ergebnisinterpretation
 9. - 11. Mai, Wiesbaden

e-Learning-Kurse

u. a. zu Fatigue & Fracture, Connections, ...

Deutschsprachige NAFEMS Konferenz

25. - 27. April, Bamberg
www.nafems.org/dach2016

Weitere Termine finden Sie unter

www.nafems.org/events



3. NAFEMS DACH Regionalkonferenz:

unabhängig – übergreifend – neutral

Berechnung und Simulation: Anwendungen – Entwicklungen – Trends

25. - 27. April, Bamberg

- Plenarvorträge u. a. von: Adam Opel, Audi, Daimler, DLR, John Deere, Stadler Rail, Universität Erlangen-Nürnberg, ...
- +110 Fachvorträge aus Industrie, Forschung und Lehre
- Spezialforum: Additive Fertigung / 3D-Druck
- Workshops und Diskussionsrunden
- Umfangreiche Hard- und Softwareausstellung
- Schulungen
- Für Mitglieder (frei: 4 seminar credits*) und Nichtmitglieder

Mit Forum „Additive Fertigung“

Eine Liste der angenommenen Vorträge und weitere Informationen finden Sie auf den Seiten 14 - 19.

www.nafems.org/dach2016

* Freie Teilnahme für NAFEMS Mitglieder unter Verwendung von vier NAFEMS seminar credits .

Sponsoren dieser Ausgabe:



Optimierung einer Positionier- und Haltevorrichtung nach Steifigkeits- und Gewichtsgesichtspunkten

Thomas Most
Dynardo GmbH

Jochen Burkhardt, Christoph Birenbaum
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung

Die automatisierte Montage von Bauteilen findet auch in der Luftfahrtindustrie immer mehr Verbreitung. Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA läuft ein Projekt zur Entwicklung und Erprobung einer roboterbasierten, automatisierten Bohr- und Nieteinheit für die Bearbeitung und Montage von Schalenelementen im Flugzeugbau. Der Roboter sorgt dabei für die richtige Positionierung und die Bohr- und Nieteinheit in Form eines Endeffektors für die eigentliche Fügung. Für die Durchführung von Mess- und Versuchsreihen ist es erforderlich, die gesamte Apparatur unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu betreiben. Hierzu wurde eine Testvorrichtung entwickelt, die Materialproben von Flugzeugbauteilen aufnimmt und die von den Anforderungen an die Bewegungsabläufe des Roboters her den zu montierenden Flugzeugteilen nachempfunden ist.

1 Einleitung

Eine besondere Herausforderung im Projekt ist, dass die Testvorrichtung ungleich steifer sein muss als die zu montierenden Flugzeugteile. Die Flugzeughersteller stellen hohe Anforderungen an die Bearbeitungs- und Montagequalität. Hierzu gehört u.a. auch die Positioniergenauigkeit des Roboters. Um diese unter realen Einsatzbedingungen erfassen zu können, werden Werkstücke auf der Testvorrichtung bearbeitet und vermessen. Damit die Verformung der Testvorrichtung das Ergebnis nicht verfälscht, muss diese sehr steif sein. Die Testvorrichtung muss sowohl die Bearbeitungskräfte aus dem Bohrprozess als auch die Haltekräfte, mit denen sich der Roboter auf dem Werkstück abstützt, aufnehmen. Damit auch die Positionen der Bohrungen zueinander überprüft werden können, ist es erforderlich, dass die einzelnen Probestücke über den gesamten Bewegungsbereich des Roboters in einer Raumrichtung zueinander fixiert sind. Da zudem der Bereich über den Probestücken für die Bearbeitung frei zugänglich sein muss, ergibt sich eine hohe freie Länge der Vorrichtung, die auf Biegung beansprucht wird.

Außerdem soll die Vorrichtung durch Handkraft dreh- und höhenverstellbar ausgeführt sein. Dies bedeutet, das Gewicht so gering wie möglich zu halten. Hinzu kommt, dass dadurch die Verformung durch das Eigengewicht geringer ausfällt. Ein weiteres Kriterium war die hausinterne Fertigbarkeit. Als geeignete Konstruktion erwiesen sich hierbei eine große Metallplatte mit Aufnahmen für die Probestücke und ein geschweißter Fachwerkunterbau aus Vierkantmetallrohren. Zur Findung der idealen Rohrabmessungen wurde eine mechanische Simulation mit Ansys Workbench in Kopplung mit einer Optimierung mit optiSLang durchgeführt. Eingangsparameter waren dabei Geometriegrößen wie Profilbreite, -höhe und -wandstärke. Zudem wurde eine Werkstoffsubstitution von Stahl durch Aluminium bei der Optimierung mit untersucht.

2 Aufgabenbeschreibung

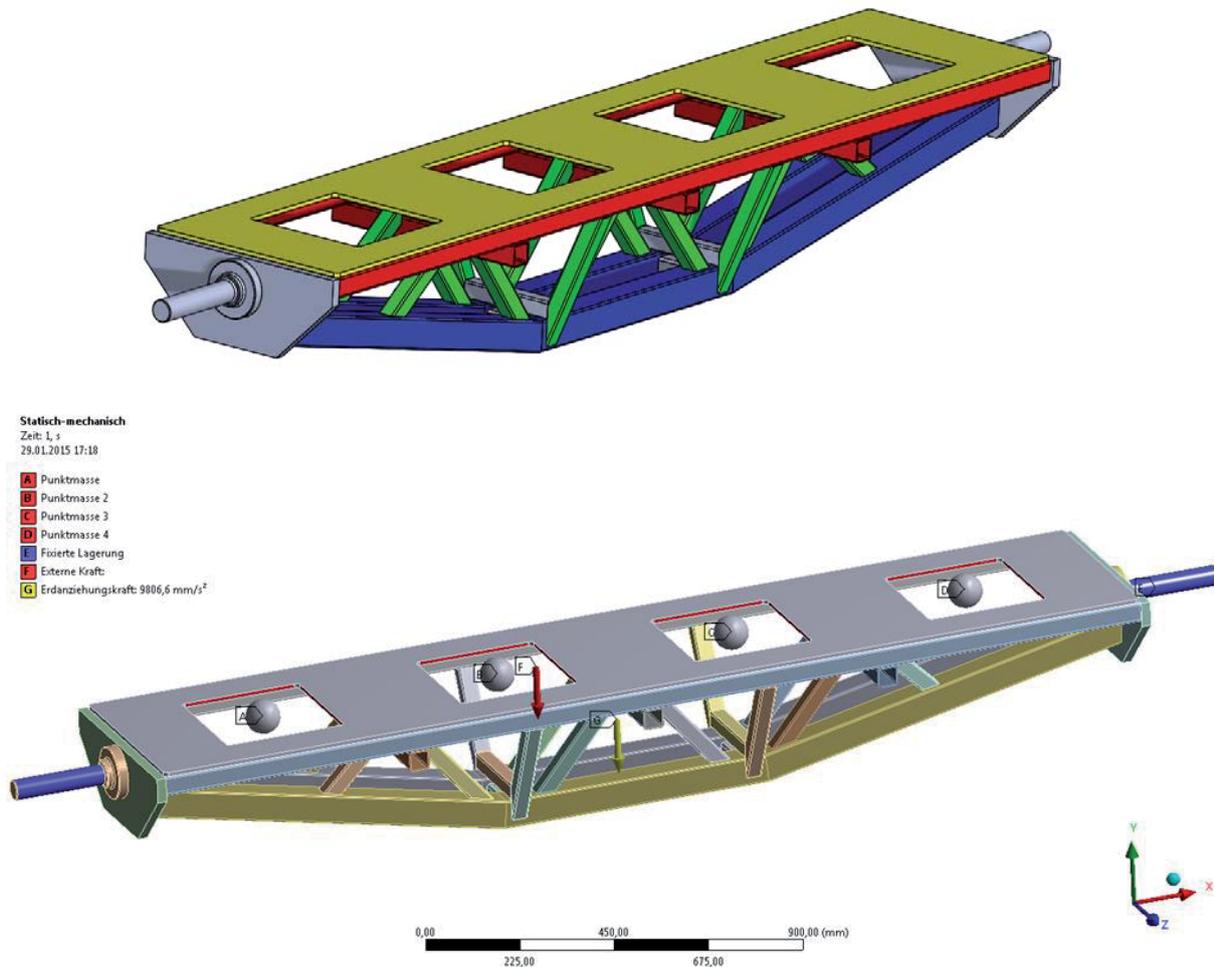


Abb. 1: Parametrisches CAD Modell (oben) mit variablen Abmessungen und Wandstärken der oberen (rot), mittleren (grün) sowie unteren Profile (blau) und idealisierte Punktmassen, externe Kraft sowie Lagerungsbedingungen im Finite-Elemente-Modell (unten)

Für die Haltevorrichtung wurde ein parametrisches CAD-Modell innerhalb der Ansys Workbench aufgebaut. Frei modifizierbare Parameter stellten dabei die Abmessungen und Wandstärken der Hohlprofile der Unterkonstruktion sowie die Plattendicke dar. Dieses CAD-Modell wurde dann in ein Finite-Elemente-Modell mittels automatischer Vernetzung überführt. In den vier Haltepunkten wurden 4 Punktmassen als idealisierte Werkstücke angenommen. Eine externe Kraft an einem der mittleren Werkstücke sollte den Anpressdruck während der Bearbeitung simulieren. Die beiden Wellen wurden fest eingespannt. Unter der Berücksichtigung von 3 Lastfällen wurden die maximalen Deformationen der Rahmenkonstruktion bei einer 0°, 90° und 180° Lage unter Berücksichtigung der entsprechenden Wirkung des Eigengewichtes berechnet.

Als Optimierungsziele sollten einerseits die Gesamtmasse sowie die maximale Deformation der Rahmenkonstruktion bei den 3 Lastfällen minimiert werden. Die Ausgangslösung war eine Ausführung mit einer Aluminiumplatte und einer Stahlrahmenkonstruktion. Diese hatte eine Masse von 207 kg sowie Durchbiegungen zwischen 0,07 und 0,12 mm in den 3 Lastfällen. In der Optimierung sollte zunächst geklärt werden, welche Kompromisse zwischen Durchbiegung und Masse möglich sind und welche Konstruktionsvariante (Stahl+Aluminium oder Aluminium+Aluminium) am besten geeignet wäre. Auf Basis dieser Information sollte ein sinnvoller Kompromiss zwischen Masse und Durchbiegung festgelegt und die Struktur entsprechend angepasst werden. Unter Berücksichtigung der Fertigung sollten einerseits die Abmessungen als kontinuierliche Parameter frei wählbar sein, andererseits als diskrete Parameter den Katalogwerten eines Hohlprofilherstellers entsprechen.

3 Design of Experiments (DoE) und Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe einer virtuellen Versuchsplanung (Design of Experiments) mit anschließender Sensitivitätsanalyse wurden in einem ersten Schritt die Einflüsse der variablen Geometrieparameter auf die Masse und Durchbiegungen analysiert. Dazu wurden 11 Geometrieparameter (Höhe, Breite und Wandstärke der oberen, mittleren und unteren Profile, der Abstand der beiden unteren Profile sowie die Dicke der oberen Platte) in definierten Grenzen variiert. Aufgrund der Vielzahl von Parametern wurde kein klassisches DoE Schema (Full Factorial, Central Composite etc.) sondern ein optimiertes Latin Hypercube Verfahren [Iman 1982] verwendet.

Mit diesem quasi-zufälligem Versuchsplan wurden 200 Parameterkombinationen erzeugt, die den 11-dimensionalen Raum möglichst gut abdecken. Vorteil gegenüber den klassischen Schemen stellt die Unabhängigkeit der Anzahl der Versuche von der Anzahl der Designparameter sowie die Möglichkeit zur Beschreibung nichtlinearer Zusammenhänge dar.

Diese 200 Parameterkombinationen wurden mit beiden Konstruktionsvarianten in den jeweils 3 Lastfällen mit dem Finite Elemente Modell simuliert. In Abbildung 2 ist dargestellt, dass für beide Konstruktionsvarianten etwa 10% der Parameterkombinationen nicht zu einem brauchbaren Simulationsergebnis führten. Diese *failed Designs* traten dann auf, wenn die Höhe des oberen und unteren Profils im vorgegebenen unteren Grenzbereich lag und die externe Kraft aufgrund der zu kleinen Steifigkeit nicht mehr abgetragen werden konnte.

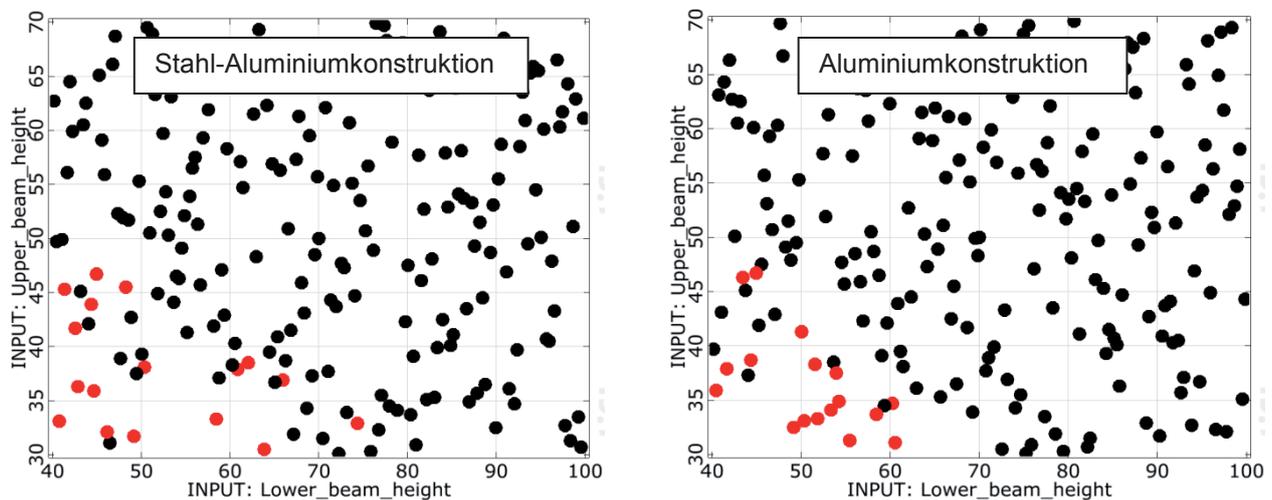


Abb. 2: Von 200 Parameterkombinationen der DoE Studie in den vorgegebenen Parametergrenzen führten etwa 10% zum Versagen der Struktursimulation

Somit lieferte das Simulationsmodell in 90% des Designraums brauchbare Ergebnisse. Mit Hilfe der Ergebnisgrößen der Simulationen sowie den zugehörigen Geometrieparametern wurde anschließend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Mit Hilfe des von der Dynardo GmbH entwickelten *Metamodel of Optimal Prognosis (MOP)* [Most 2011] wurde für jede Antwortgröße ein am besten geeignetes mathematisches Antwortflächenmodell gefunden. Auf dieser Basis war dann eine Quantifizierung des Parametereinflusses möglich. Diese Vorgehensweise erfolgt standardmäßig unter Verwendung der Ergebnisse der DoE-Designs und erfordert keine weiteren Simulationsläufe. In Abbildung 3 sind die Approximationsmodelle für die Masse und eine Durchbiegung in Abhängigkeit der beiden wichtigsten Einflüsse dargestellt.

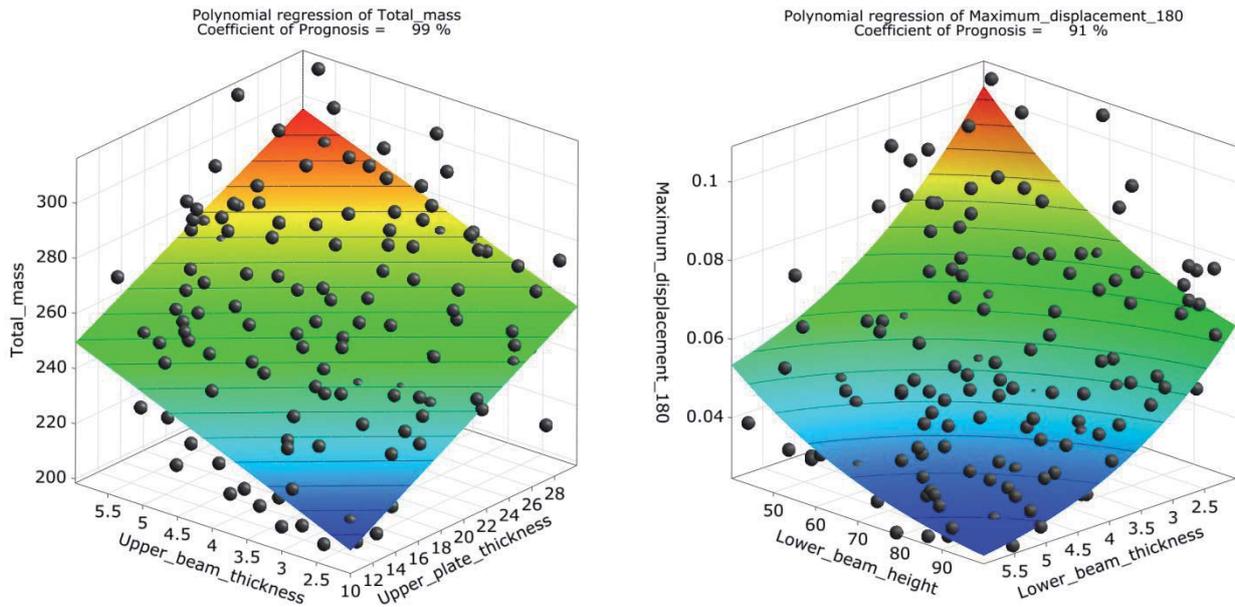


Abb. 3: Approximationsmodelle für die Masse (links) sowie die Durchbiegung in 180°-Lage (rechts) für die Konstruktionsvariante Stahl-Aluminium

Während sich die Masse hervorragend mit einem linearen Modellansatz erklären lässt, ist die bestmögliche Prognose der Durchbiegung zumindest zu 90% mit einem nichtlinearen Modell möglich. Der *Coefficient of Prognosis (CoP)* quantifiziert dabei die durch das Metamodell tatsächlich erklärbare Variation der Ergebnisdaten. Auf Basis des optimalen Approximationsmodells lassen sich die Einflüsse der Eingangsparameter sehr genau quantifizieren. Mit vereinfachten Maßen, wie dem Korrelationskoeffizient, ist dies nur eingeschränkt möglich. In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass für die Masse bei beiden Konstruktionsvarianten die Dicke der oberen Platte dominant ist. Für die Durchbiegung sind jedoch die Abmessungen der unteren Profile maßgebend. Vernachlässigbaren Einfluss hat der Abstand der beiden unteren Profile, der in der folgenden Optimierung konstant belassen wurde.

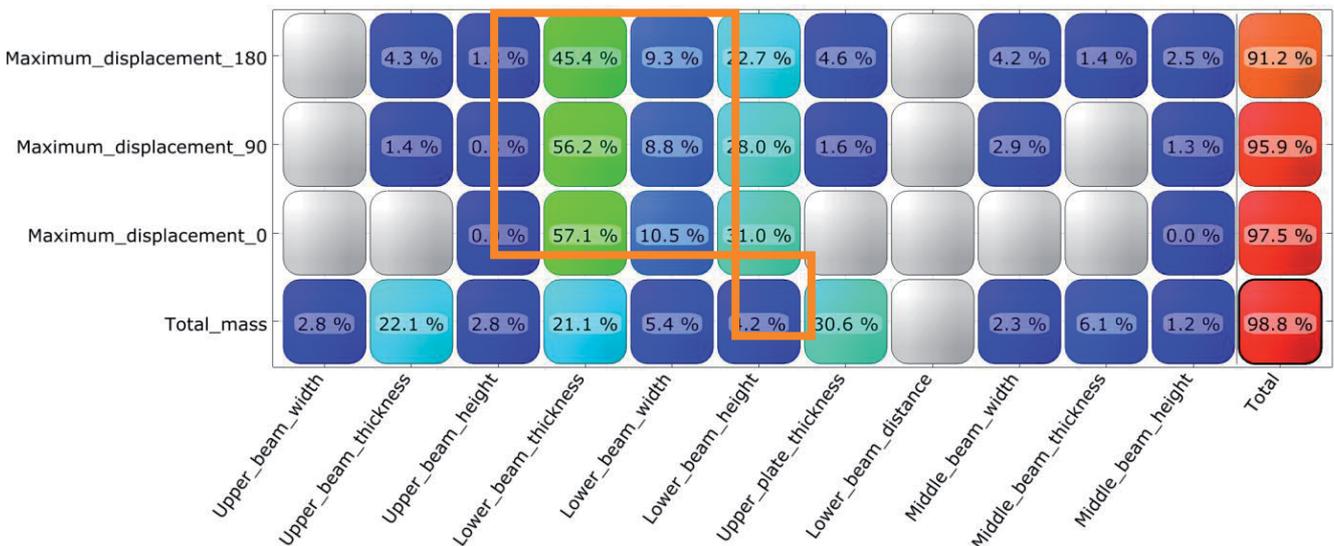


Abb. 4: Einflüsse einzelner Geometrieparameter auf die Variation der Masse und der Durchbiegungen bei der Konstruktionsvariante Stahl+Aluminium (die letzte Spalte enthält die Gesamterklärbarkeit der MOP-Modelle)

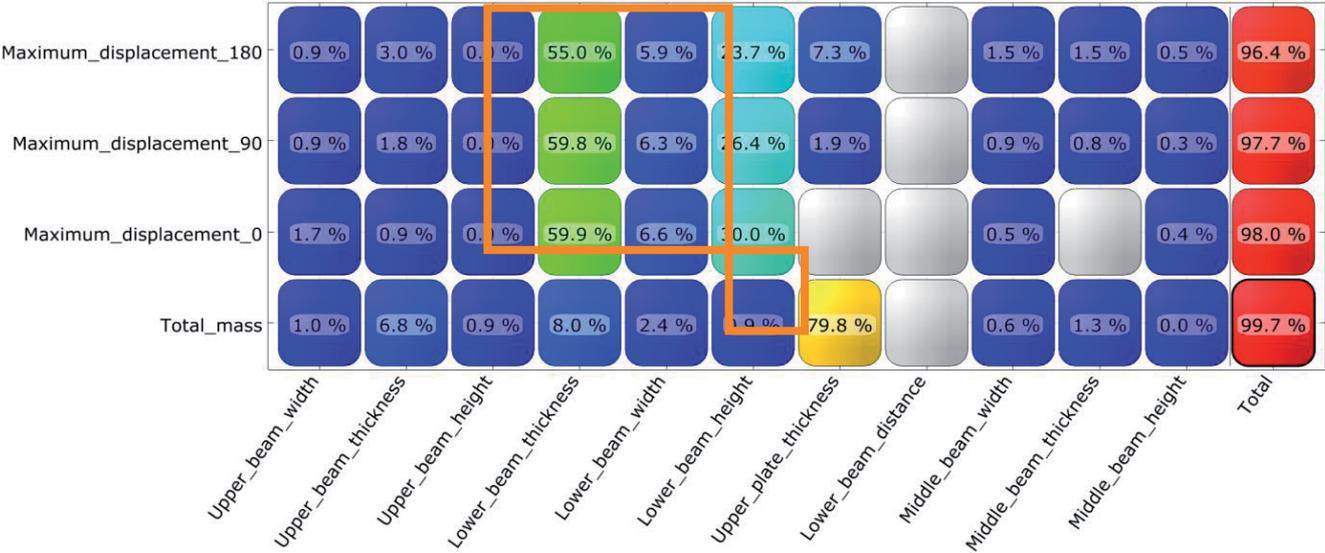


Abb. 5: Einflüsse der Geometrieparameter bei der Konstruktionsvariante Aluminium

4 Multi-kriterielle Optimierung

Im nächsten Schritt sollen sinnvollen Kompromisslösungen zwischen der Minimierung der Masse und der Durchbiegung bestimmt und eine präferierte Konstruktionsvariante abgeleitet werden. Mit Hilfe der multi-kriteriellen bzw. Pareto-Optimierung lassen sich mehrere im Konflikt stehende Zielgrößen analysieren. Als Ergebnis dieser Vorgehensweise erhält man die sogenannte Pareto-Front, mit der sich sinnvolle Kompromisslösungen eingrenzen lassen. Diese Analysen werden üblicherweise mit evolutionären Algorithmen unter einer Vielzahl von Modellaufrufen durchgeführt. In unserem Beispiel sind im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bereits sehr aussagekräftige Ersatzmodelle für jede Ergebnisgröße mit dem MOP-Ansatz gefunden worden. Diese Ersatzmodelle werden nun anstelle des bedeutend aufwendigeren Simulationsmodells innerhalb der Mehrzieloptimierung mit einem evolutionären Algorithmus ausgewertet. Aus den Ergebnissen in Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die Masse und die Deformationen in einem ausgeprägten Konflikt stehen. Kleinere Deformationen sind nur mit einer höheren Masse möglich. Die Deformationen der einzelnen Lastfälle sind jedoch untereinander positiv korreliert und stehen somit in keinem Konflikt. Weiterhin wird in der Abbildung ersichtlich, dass die Konstruktionsvariante aus Aluminium maximale Durchbiegungen von unter 0.15 mm nicht ermöglicht. Daher wurde im weiteren Verlauf des Entwurfsprozesses die Stahl-Aluminium Variante vorgezogen, mit der weitaus kleinere Durchbiegungen möglich sind. Auf Basis der ermittelten Pareto-Front wurde dann eine erlaubte Maximalverschiebung von 0.1 mm festgelegt.

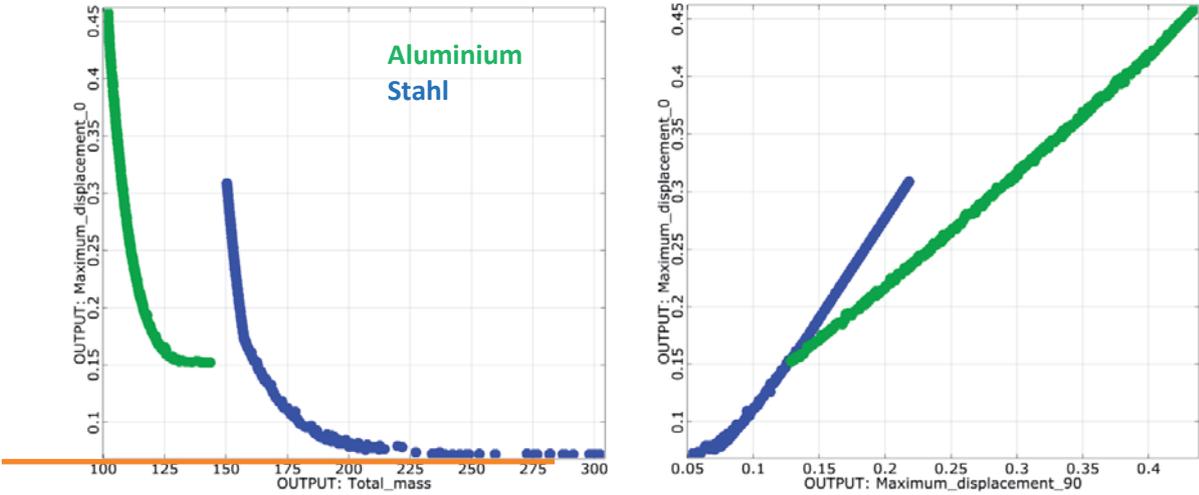


Abb. 5: Ergebnis der multi-kriteriellen Optimierung: Masse und Deformation stehen in einem ausgeprägten Konflikt (links), Deformationen in den unterschiedlichen Lastfällen jedoch nicht (rechts)

5 Einzeloptimierung

Mit Hilfe der Erkenntnisse der multi-kriteriellen Optimierung wurde eine Verschiebungsrestriktion festgelegt, welche für alle Lastfälle eingehalten werden soll. Somit lässt sich das Mehrzieloptimierungsproblem in ein Einzeloptimierungsproblem mit Nebenbedingungen überführen. Dieses wurde nun mit einem adaptiven Antwortflächenverfahren [optiSLang 2015] iterativ gelöst. Bei diesem Verfahren werden schrittweise lokale Approximationsmodelle für die einzelnen Ergebnisgrößen durch neue Stützstellen (weitere Finite Elemente Simulationen) dort verfeinert, wo die optimale Parameterkombination in der vorhergehenden Iteration gefunden wurde. In Abbildung 6 sind der Iterationsverlauf des Optimierungsverfahrens sowie das finale optimale Design dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangslösung wurde die Masse um 10% und die Deformationen um etwa 17 % reduziert.

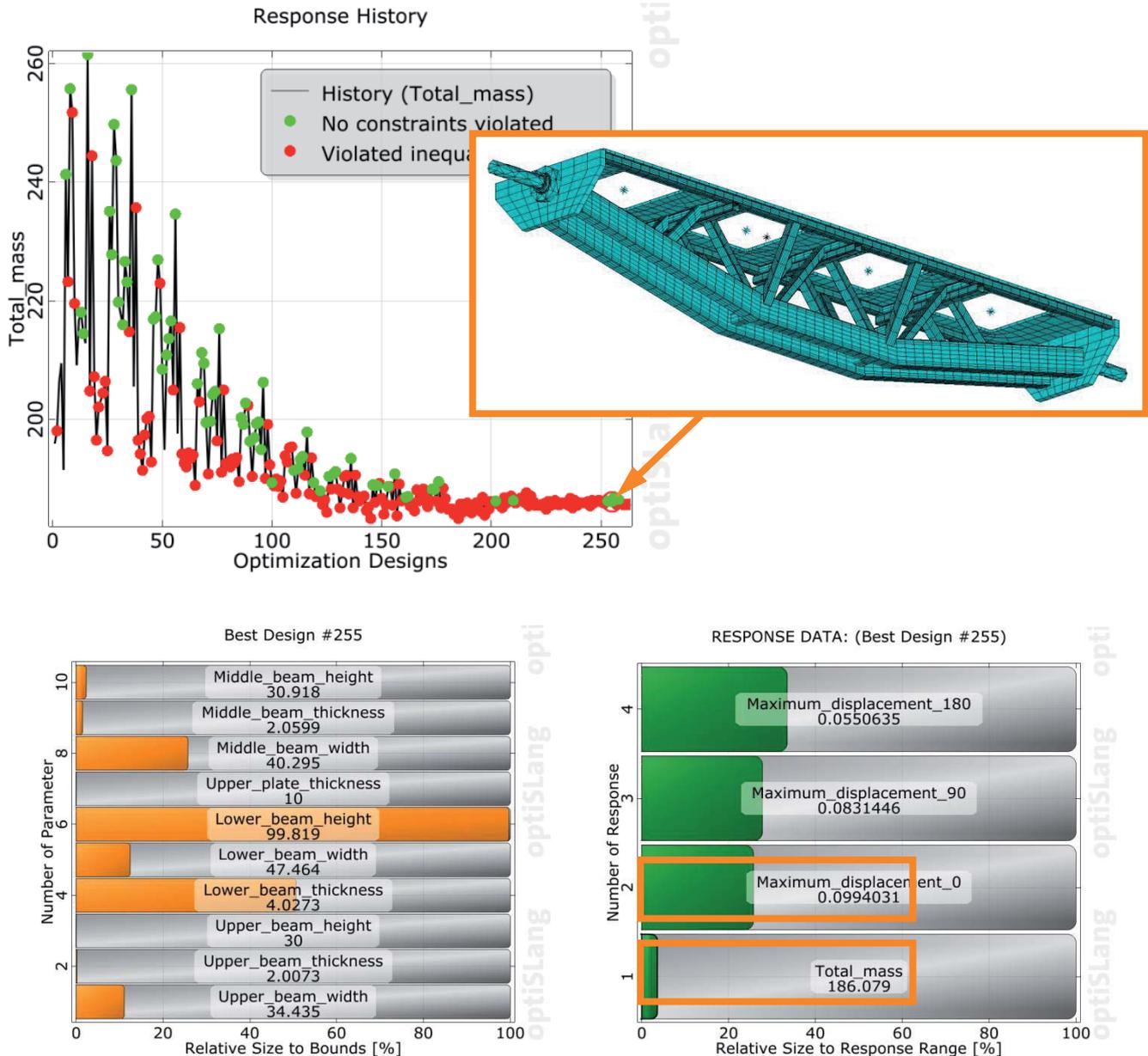


Abb. 6: Bestes Design der Einzeloptimierung unter Minimierung der Masse bei Beschränkung der Durchbiegungen auf kleiner 0.1 mm unter Berücksichtigung von kontinuierlichen Designparametern

Allerdings wird in Abbildung 6 auch ersichtlich, dass die optimalen Parameterwerte durch die kontinuierliche Formulierung teilweise nur schwer in einer Fertigung realisiert werden können. Um eine preiswerte Fertigung zu ermöglichen, ist es daher ratsam, die verfügbaren Parameterwerte innerhalb der Optimierung als diskrete Para-

meter zu berücksichtigen. Dies wurde im Rahmen der Analyse so umgesetzt, dass die verfügbaren Höhen, Breiten und Wandstärken der Stahlprofile einem Herstellerkatalog entnommen [Thyssen 2015] und als diskrete Parameterwerte für den Optimierungsalgorithmus definiert wurden. Für die oberen und mittleren Profile wurden dabei die quadratischen Querschnitte mit jeweils 30, 40, 50, 60 oder 70 mm Breite und Höhe sowie Wandstärken von 2, 2.5, 3, 4 oder 5 mm als verfügbar angesetzt. Bei den beiden unteren Profilen wurden rechteckige Querschnitte mit verschiedenen Höhen und Breiten von 40, 50, 60, 80 oder 100 mm sowie Wandstärken von 2.5, 3, 4 oder 5 mm zugelassen. In Abbildung 7 sind die erhaltenen optimalen Parameter- und Ergebniswerte dargestellt. Aufgrund der geringeren Flexibilität der diskreten Geometrieparameter lässt sich die Masse nur um 7% reduzieren. Die Herstellung ist wegen der verwendeten Standardprofile jedoch bedeutend einfacher und kostengünstiger.

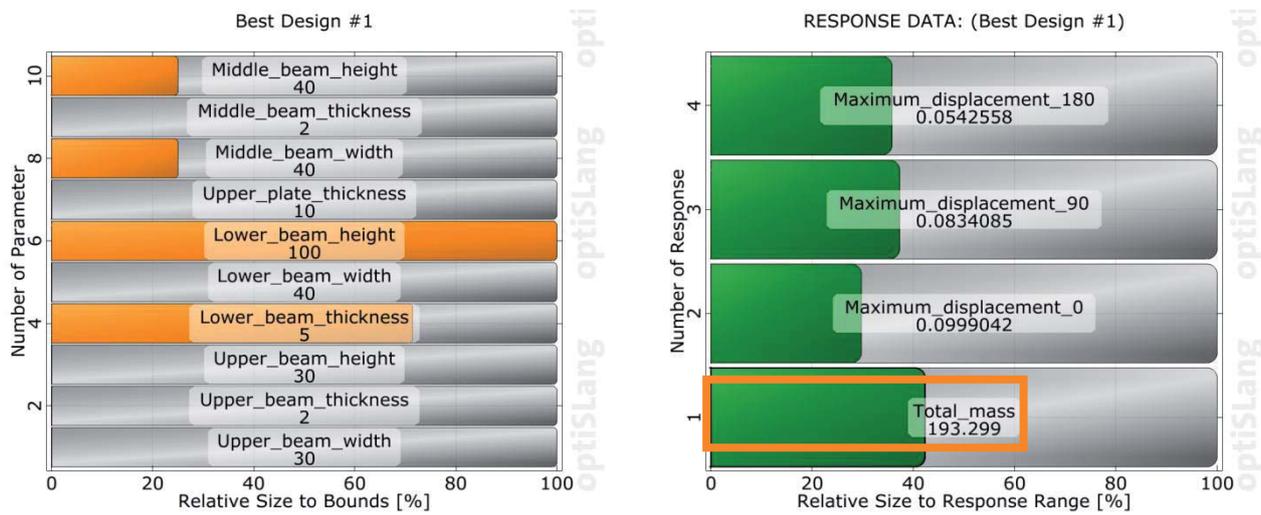
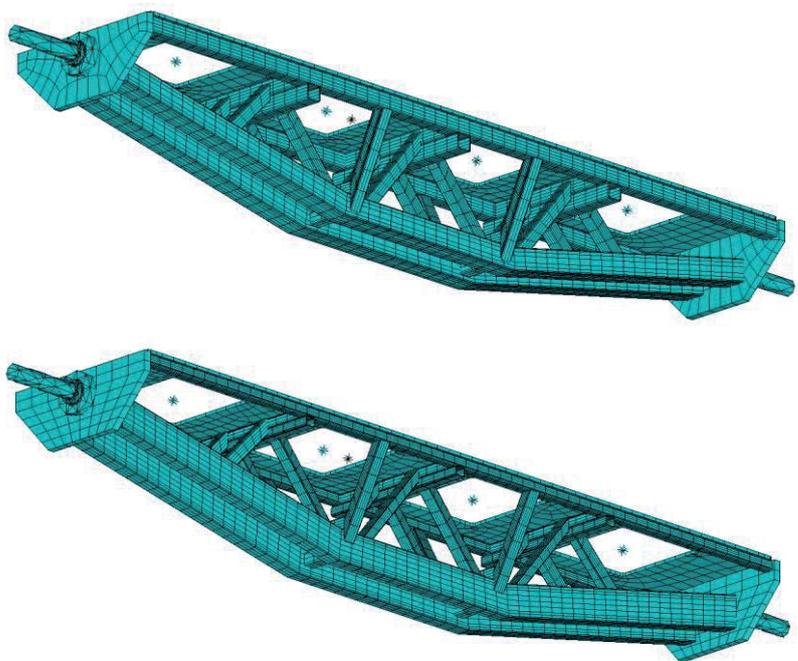


Abb. 7: Bestes Design der Einzeloptimierung unter Berücksichtigung von diskreten Designparametern

6 Zusammenfassung

Initiales Design	
Masse:	207.2 kg
Deformationen:	
0°-Lage:	0.12 mm
90°- Lage :	0.10 mm
180°- Lage :	0.07 mm

Optimierung mit kontinuierlichen Parametern	
Masse:	186.1 kg
Deformationen:	
0°-Lage:	0.10 mm
90°- Lage :	0.08 mm
180°- Lage :	0.05 mm



**Optimierung mit
diskreten Parametern**Masse: **193.3 kg**

Deformationen:

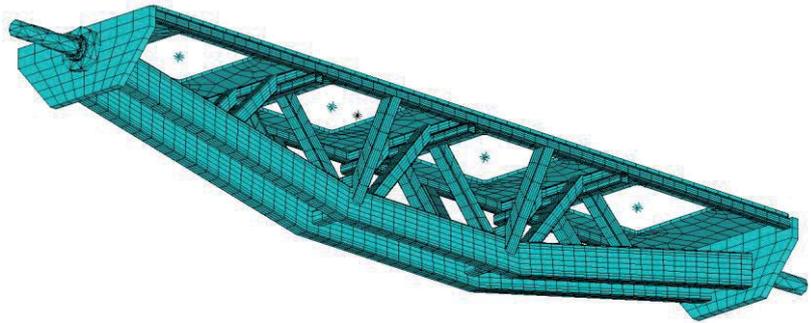
0°-Lage: **0.10 mm**90°- Lage : **0.08 mm**180°- Lage : **0.05 mm**

Abb. 8: Gegenüberstellung der Ausgangssituation mit den Ergebnissen der Optimierung

In diesem Artikel wurde die automatische Optimierung einer Positionier- und Haltevorrichtung unter Verwendung virtueller Methoden dargestellt. Ausgehend von einem parametrischen Geometriemodell konnten die Deformationen mit Hilfe der Finite Elemente Methode berechnet werden. Da anfangs unklar war, welche Zielgröße entscheidend ist, wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse und multi-kriteriellen Optimierungen der Bereich sinnvoller Lösungen eingeschränkt. Bereits in diesem Schritt konnte eine der beiden Konstruktionsvarianten ausgeschlossen werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden maximal erlaubte Deformationen definiert und das Optimierungsproblem direkt gelöst. Als Ergebnis wurde die Masse um 10% und die maximale Deformation um 17% gegenüber der Ausgangssituation reduziert. Um eine kostengünstige Fertigung zu ermöglichen, wurden Standardprofilabmessungen innerhalb des Optimierungsvorgangs berücksichtigt. Auf Basis der eingeschränkten diskreten Parameter konnte die Masse um 7% und die Deformation wiederum um 17% auch unter Berücksichtigung dieser Fertigungsrestriktionen reduziert werden.

Die vorgestellten Analyseschritte wurden mit der Software optiSLang automatisiert durchgeführt. Die Umgebung der Ansys Workbench erlaubte die Kopplung einer vollparametrischen Geometriebeschreibung mit der mechanischen Analyse der verschiedenen Lastfälle. Aufgrund der Komplexität der Fragestellung kann man abschließend beurteilen, dass die automatische parametrische Optimierung hier eine entscheidende Zeitersparnis bei dem Entwurf optimaler Strukturen erbrachte.

7 Literatur

- [Iman 1982] Iman, R. L. & W. J. Conover "A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables" Communications in Statistics - Simulation and Computation 11, 311-334, 1982
- [Most 2011] Most, T. & Will, J., "Sensitivity analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis", Tagesband der Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 8.0, 2011
- [optiSLang 2015] Dynardo GmbH, „Methods for multi-disciplinary optimization and robustness analysis“, optiSLang Dokumentation, Version 4.2.2, 2015
- [Thyssen 2015] ThyssenKrupp Schulte "Kaltgefertigte Stahlbau-Hohlprofile", Produktkatalog, www.thyssenkrupp-schulte.de, 2015