

Vorträge

**Optimierung der
bauphysikalischen Eigenschaften
von Bauprodukten mittels
Simulation**

R. Schlegel

Optimierung der bauphysikalischen Eigenschaften von Bauprodukten mittels Simulation

Dr.-Ing. Roger Schlegel
Dynardo GmbH, 99423 Weimar, Luthergasse 1d, www.dynardo.de

1. Vorgehensweisen zur Optimierung von Bauprodukten

Wie in anderen Industriezweigen erzwingt auch im Bauwesen der inzwischen internationale Konkurrenzdruck die immer kostengünstigere Herstellung besonders zuverlässiger und ökologisch verträglicherer Produkte. In der Vergangenheit wurden Bauprodukte häufig auf Versuchen oder praktischen Beobachtungen basierend entwickelt. Der Erfolg einer solchen Produktentwicklung war meist wenig steuerbar und häufig vom Zufall abhängig. Der i.d.R. große Umfang erforderlicher Versuche verursachte relativ hohe Entwicklungskosten bzw. -zeiten und ging stark zu Lasten der Effizienz.

Heute ermöglicht die Kombination moderner numerischer Simulationsverfahren und CAE-gestützter Optimierungsmethoden eine sehr effiziente virtuelle Produktentwicklung, wie sie auch in anderen Branchen (wie z.B. der Automobilindustrie) bereits fest etabliert ist. Durch die Verwendung leistungsfähiger Simulationssoftware können Entwickler praktisch in das zu entwickelnde Produkt „hineinschauen“ und damit die Auswirkungen von Veränderungen unmittelbar visualisieren. Die Untersuchung verschiedener Variationen von Eingangsparametern ist per Simulation in einem Bruchteil des vergleichbaren experimentellen Aufwands durchführbar. Die automatisierte Kopplung der Simulationswerkzeuge mit Methoden der Sensitivitätsanalyse, mathematischen Optimierung und Robustheitsbewertung ermöglicht eine zielgerichtete, best mögliche Optimierung gewünschter Produkteigenschaften. Dabei können auch experimentell gewonnene Erkenntnisse z.B. zur Verifikation oder Kalibrierung des Simulationsmodells jederzeit einbezogen werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt an Hand eines ausgewählten Beispiels den Einsatz simulationsbasierter Optimierungsverfahren und Sensitivitätsanalysen bei der Entwicklung von Bauprodukten auf. Die Firma Dynardo hat hierfür die Optimierungsplattform optiSLang für Sensitivitätsanalysen, Robustheitsbewertung, Ein- und Mehrzieloptimierung und stochastische Analyse entwickelt.

2. Simulationsbasierte Optimierung innerhalb der virtuellen Produktentwicklung

Der Prozess einer simulationsbasierte Optimierung gliedert sich in mehrere Schritte:

i) Aufbau eines geeigneten, parametrischen Simulationsmodells und Simulationsprozesses:

Dabei kann sich das Simulationsmodell aus mehreren Teilmodellen und der Simulationsprozess aus mehreren verschiedenen Analysen (z.B. thermische, hydraulische, mechanische Analyse) zusammensetzen (s. Bild 1). Der gesamte Simulationsprozess (incl. des Simulationsmodells) wird derart aufgebaut, dass er automatisch abläuft und dabei die Inputgrößen (z.B. Geometrieparameter, Materialkennwerte, Einwirkungen) Variablen sind sowie die für die Produktentwicklung erforderlichen Ergebnisgrößen und Ergebnisplots automatisch nach jeder Simulation ausgegeben werden.

ii) Sensitivitätsanalyse:

Das Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, die Sensitivität der einzelnen für die Produktentwicklung wichtigen Ergebnisgrößen auf die Variation der Eingangsparameter zu untersuchen. Hierfür werden durch Variation der Inputparameter innerhalb vorgegebener Parametergrenzen verschiedene Designs erzeugt und berechnet. Für eine aussagekräftige statistische Auswertung ist es notwendig, den gesamten Designraum innerhalb der Ober- und Untergrenzen aller Parameter

möglichst gleichmäßig zu belegen. Hierfür stehen in optiSLang [1] leistungsfähige Samplingverfahren (wie z.B. das Latin Hypercube Sampling) zur Verfügung.

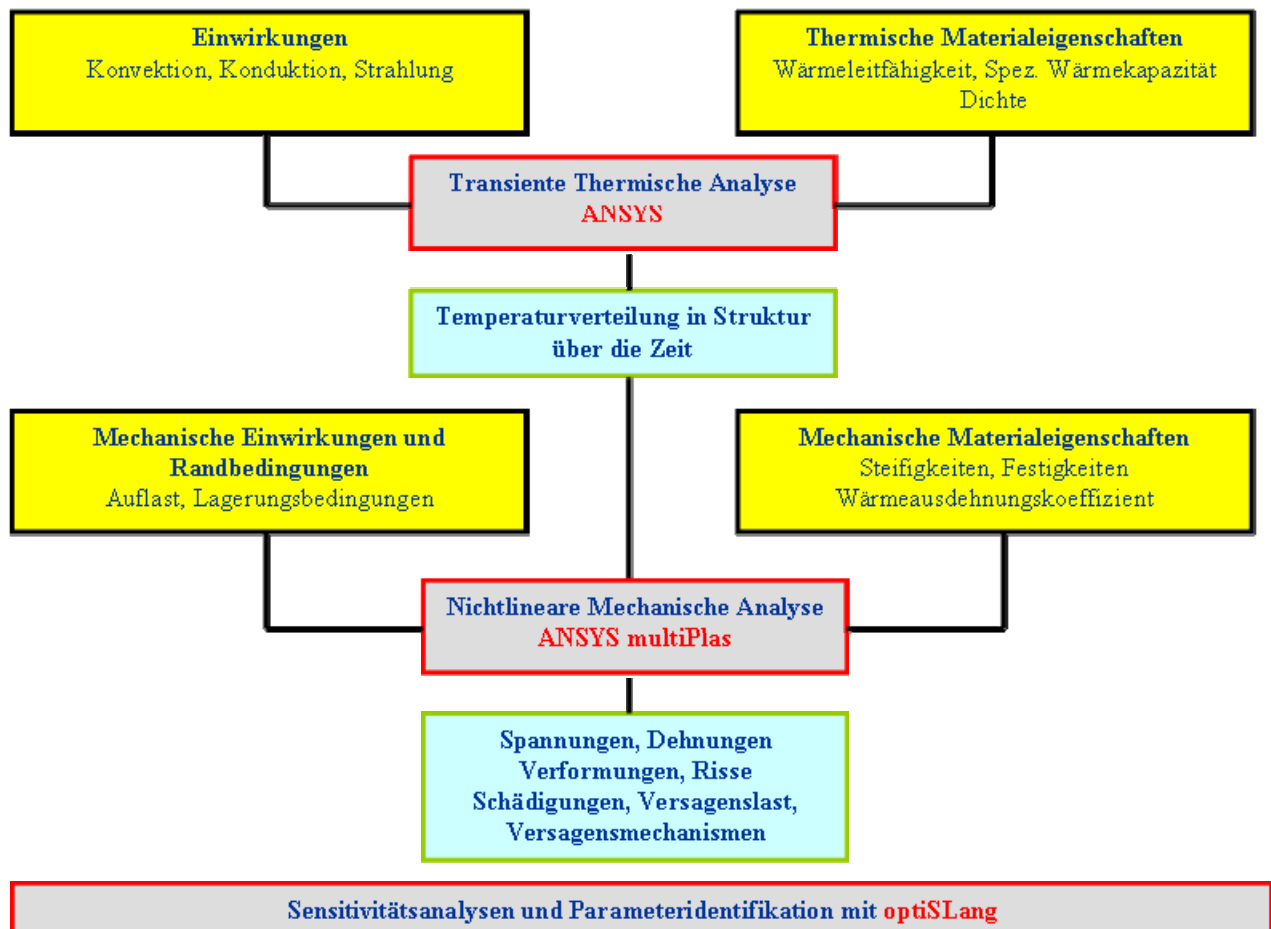


Bild 1: Beispiel für einen thermisch-mechanischen Simulationsprozess zur Untersuchung von brandbeanspruchten Bauprodukten

Im Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse ist es möglich, die für die Optimierung relevanten Inputparameter (also die Parameter, die die Ergebnisgrößen wesentlich beeinflussen) zu identifizieren. Hierdurch können unwichtige Inputparameter aussortiert und der für die Optimierung erforderliche Parameterraum reduziert werden. Weitere wichtige Erkenntnisse können aus den Variationsräumen der Ergebnisgrößen und möglicher Konkurrenzsituationen zwischen verschiedenen Optimierungszielen gewonnen werden.

iii) Optimierung:

In diesem Schritt müssen Zielfunktionen und Nebenbedingungen (bzw. Restriktionen, welche durch eine Optimierung nicht verletzt werden dürfen) definiert werden. Für die Optimierung stehen in optiSLang [1] unterschiedliche Strategien (Gradientenverfahren, Antwortflächenverfahren, Partikelschwarmmethoden sowie evolutionäre und genetische Verfahren) zur Verfügung. Die Eignung der einzelnen Optimierungsverfahren hängt u.a. von der Anzahl der Variablen, vom Typ der Variablen und von der Charakteristik der Zielgrößen ab.

iv) Robustheitsbewertung:

Im Anschluss an eine Optimierung wird die Robustheit des optimalen Designs überprüft. Hierfür wird in einer stochastischen Analyse das optimierte Produkt unter Berücksichtigung der naturgegebenen Streuungen (Verteilungen) der wichtigen Inputparameter berechnet. Im Ergebnis

der Robustheitsbewertung werden die statistischen Maße (Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten) der Ergebnisgrößen / Produkteigenschaften bewertet. Ist die Streuung wichtiger Produkteigenschaften klein, spricht man von einem robusten Design.

3. Beispiel: Optimierung des Lochbilds eines Hochlochziegels

Das Lochbild eines Leichthochlochziegels mit HV-Lochung sollte durch die Variation der Geometrieparameter und der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens optimiert werden. Da die gleichmäßige Struktur des Lochbilds aus n wiederkehrenden Basiszellen besteht, wurde die Optimierung auf die Basiszelle (Bild 2) beschränkt. Das vorrangige Optimierungskriterium war dabei die Minimierung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Basiszelle. Als sekundäres Optimierungskriterium sollte die Maximierung der Ziegelfestigkeit mit Hilfe einer Trendgröße in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Das hier vorgestellte Pilotprojekt zur Ziegeloptimierung wurde gemeinsam von der MFPA-Weimar und der Dynardo GmbH durchgeführt [2].

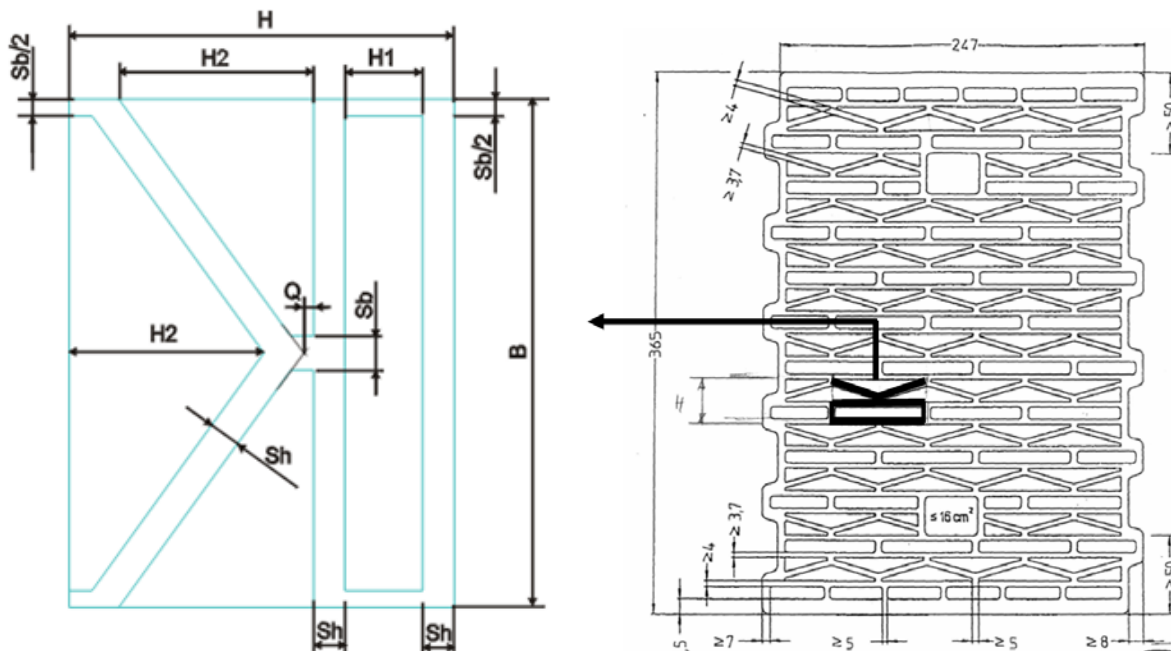


Bild 2: Basiszelle des Leichthochlochziegels

Der Simulationsprozess bestand aus einer thermischen und einer mechanischen Finite-Element-Simulation und wurde mit dem FE-Programmsystem ANSYS generiert.

Die Geometrie der Basiszelle wurde durch sechs unabhängige Parameter beschrieben. Neben den sechs Geometrieparametern wurde im Optimierungsprozess noch die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens als 7. Modellparameter variiert. Jede Kombination dieser sieben Modellparameter stellt ein Design dar. In Tabelle 1 sind die Parametergrenzen (maximaler und minimaler Wert) zusammengestellt. Die Grenzen der Parameter definieren den Designraum (bzw. Parameterraum) des Optimierungsproblems.

Die thermische Simulation zur Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegels berücksichtigte die Strömung und Strahlung in den Lufthohlräumen. Diese Simulationen haben heute einen abgesicherten Stand erreicht, dass sie als Standard für die wärmetechnische Zulassung von Ziegeln eingesetzt werden können.

Für die mechanische Simulation der Ziegeldruckfestigkeit wurden vorbereitend einaxiale Druckversuche nachgerechnet. Alle Ziegel versagten durch ein Ausknicken der Stege. Bild 3 zeigt ein typisches Versagensbild. Da das Druckversagen des Hochlochziegels durch ein Stabilitätsversagen der Ziegelstege ausgelöst wurde, war es naheliegend das Ziegelversagen mit Hilfe einer Beuleigenwertberechnung (Eigenvalue Buckling Analysis) zu beschreiben.

Parameter	Beschreibung	Minimalwert	Maximalwert
q	Abstand Schnittpunkt	0,5 mm	1,5 mm
H1	Höhe des Rechtecklochs	6 mm	15 mm
H2	Höhe des Dreiecklochs	8 mm	40 mm
B	Breite der Basiszelle	45 mm	75 mm
sh	Stegdicke der Längs- und Diagonalstege	3,5 mm	6 mm
sb	Stegdicke der Querstege	3,5 mm	6 mm
$\lambda_{\text{Scherben}}$	Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens	0,25 W/(m K)	0,35 W/(m K)

Tabelle 1: Modellparameter und Designraum

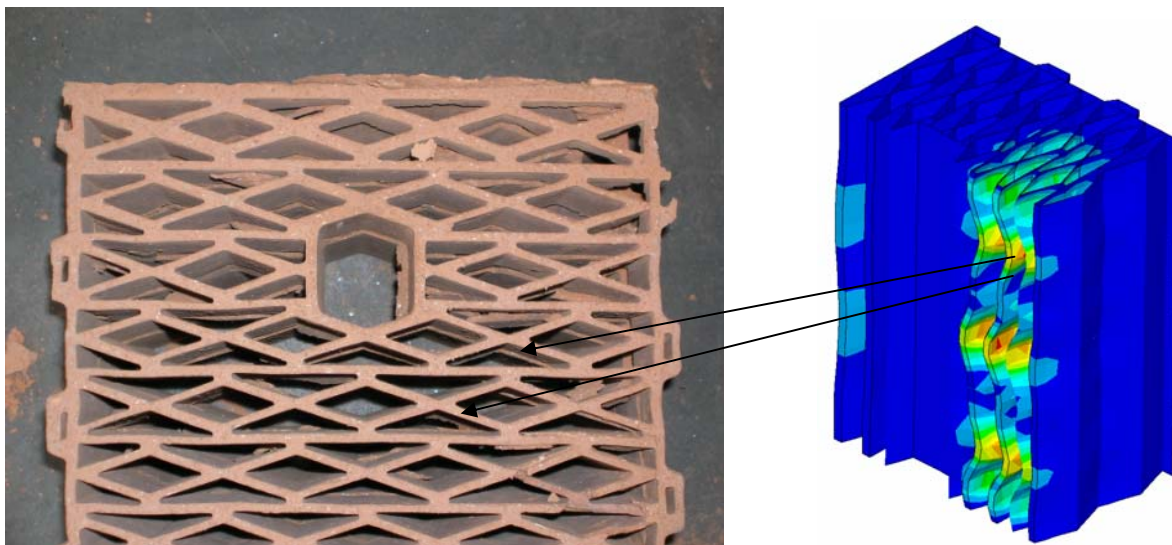


Bild 3: Links: Typisches Versagensbild der Hochlochziegel im einaxialen Druckversuch, Rechts: erste Beuleigenform

Dabei repräsentiert der erste Beuleigenwert nicht die Ziegelfestigkeit selbst sondern eine Trendgröße der Ziegelfestigkeit. Das heißt, wenn der Beuleigenwert maximiert wird, wird auch die Festigkeit des Hochlochziegels maximiert. In Bild 3 ist die erste Beuleigenform des Hochlochziegels dargestellt. Ein Vergleich in Bild 3 (links und rechts) zeigt die sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Knickfigur. Damit konnte nachgewiesen werden, dass mit Hilfe der Beuleigenwertberechnung das Versagen des Hochlochziegels qualitativ sehr gut beschreibbar ist und der erste Beuleigenwert als eine für die Festigkeit des Hochlochziegels aussagenkräftige Trendgröße angesehen werden konnte.

3.1 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden mittels Latin Hypercube Sampling 100 Designs bestimmt und anschließend berechnet (Rechenzeit insgesamt 17 Stunden).

Die in Bild 4 dargestellte Korrelationsmatrix zeigt, dass nennenswerte Korrelationen der Antwortgrößen Wärmeleitfähigkeit (λ_{equi}) und 1. Beuleigenwert (Λ_1) vor allem zu den drei Inputgrößen H2, B und sh bestehen.

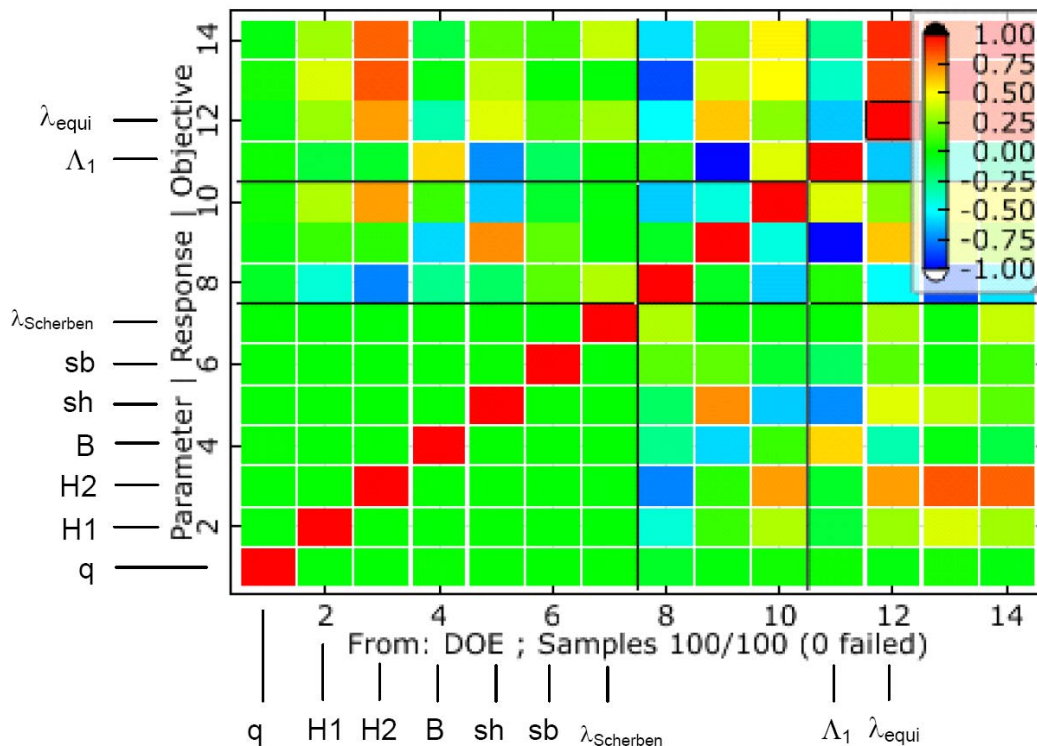


Bild 4: Korrelationsmatrix

In Bild 5 sind die zugehörigen Korrelationskoeffizienten der Inputparameter zur Wärmeleitfähigkeit (links) und 1. Beuleigenwert (rechts) dargestellt.

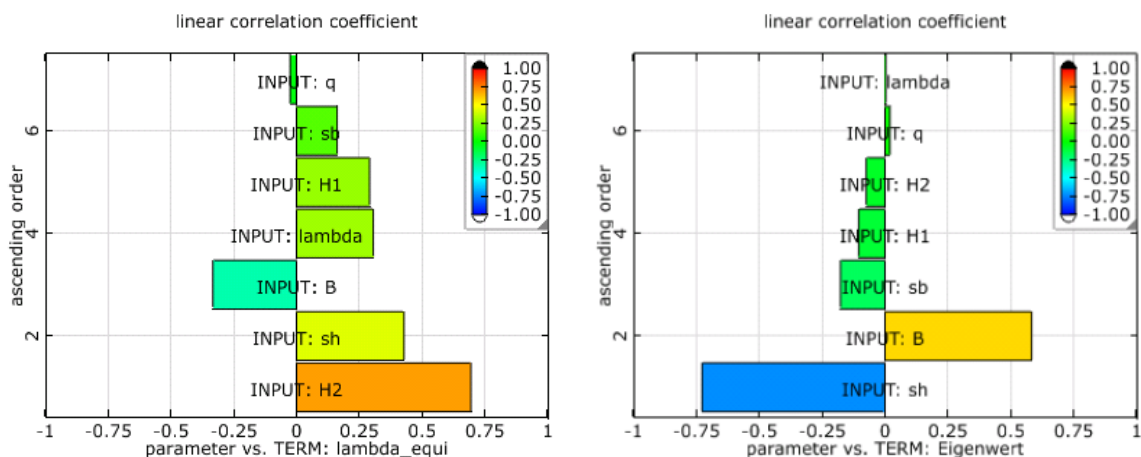


Bild 4: Korrelationskoeffizienten - Links: für die Wärmeleitfähigkeit; Rechts: für den 1. Beuleigenwert

Die stärkste Korrelation mit λ_{equi} zeigt H2. Der Korrelationskoeffizient für H2 beträgt +0,69 (lineare Korrelation). Das zugehörigen Bestimmtheitsmaß beträgt 48 %. Das heißt, dass ca. 48 % der Veränderung von λ_{equi} aus der Variation von H2 erklärt werden können. Weitere nennenswerte Korrelationen mit λ_{equi} zeigen die Modellparameter sh und B, bzw. etwas abgeschwächt λ Scherben und H1. Die angestrebte Minimierung von λ_{equi} geht mit einer Vergrößerung von B und der Verringerung von H2, sh, λ Scherben und H1 einher. Die Modellparameter sb und q beeinflussen λ_{equi} nicht bzw. nur unwesentlich.

Stärkere Korrelationen mit λ_1 zeigen sh und B. Alle anderen Modellparameter sind für λ_1 nur von untergeordneter Bedeutung. Die angestrebte Maximierung von λ_1 geht mit einer Vergrößerung von sh und einer Verringerung von B einher. Dieses Ergebnis ist sehr plausibel, da mit diesem Trend die Neigung der diagonalen Stege zunimmt und damit ein Ausknicken aller Stege reduziert.

Aus der Sensitivitätsstudie wurde weiterhin deutlich, dass die beiden Antwortgrößen λ_{equi} und λ_1 erwartungsgemäß gegenläufige Trends der Modellparameter verursachen. Sichtbar wird das an den Trends der Modellparameter sh und B. Während für die Minimierung von λ_{equi} die Verringerung von sh und die Vergrößerung von B positive Auswirkungen haben, verhalten sich diese Größen für die Maximierung von λ_1 genau entgegengesetzt. Das bedeutet für die nachfolgende Optimierung, dass zwei konkurrierende Zielfunktionen betrachtet werden müssen und es sich damit um ein Problem der Pareto-Optimierung handelt.

3.2 Optimierung

Aufbauend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsstudie wird im vorliegenden Fall eine Pareto-Optimierung (Mehrzieloptimierung) auf der Basis evolutionärer Strategien durchgeführt. Bild 5 erläutert das Wesen einer Pareto-Optimierung.

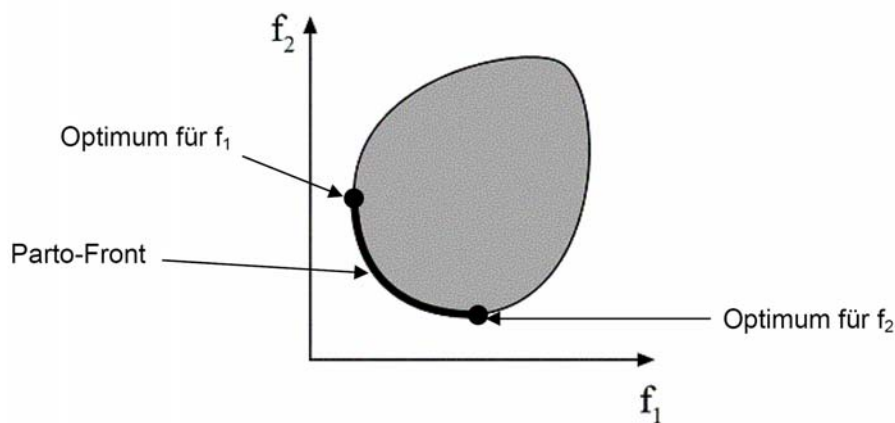


Bild 5: Pareto-Optimierung mit zwei konkurrierenden Zielfunktionen

Die Lösung einer Pareto-Optimierung ist die Pareto-Front. Die Pareto-Front bildet die Summe der besten (pareto-optimalen) Kompromisslösungen. Sie enthält im allgemeinen Fall auch die Optima der einzelnen Zielfunktionen selbst. Pareto-optimal ist eine Lösung dann, wenn es keine andere Lösung gibt die zu einer gleichzeitigen Verbesserung beider Zielkriterien führt. Damit führt jeder Punkt auf der Pareto-Front gegenüber seinem Nachbarn zu einer Verbesserung eines Zielkriteriums bei gleichzeitiger Verschlechterung des anderen Zielkriteriums.

Jeder Punkt auf der Pareto-Front entspricht einem Design. Mit Hilfe der berechneten Pareto-Front ist es möglich das für die konkrete Aufgabe beste Kompromissdesign auszuwählen.

Wegen der prioritären Bedeutung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit wurde im vorliegenden Fall die Berechnung der Pareto-Front auf den für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit relevanten Bereich vom Minimalwert $\lambda_{\text{equi}} = \text{MIN}$ bis zu einer Obergrenze von $\lambda_{\text{equi}} = 0,12 \text{ W/(m K)}$ begrenzt. Die Startdesigns für die Pareto-Optimierung wurden der Sensitivitätsstudie sowie einer Voroptimierung entnommen. Die Pareto-Optimierung wurde mit 144 Designs (d.h. 144 thermischen Berechnungen und 144 Festigkeitsberechnungen) durchgeführt. Die Rechenzeit betrug insgesamt ca. 20 Stunden.

In Bild 6 ist die berechnete Pareto-Front dargestellt. Auf der Ordinate sind die Werte der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit λ_{equi} aufgetragen. Die Werte des ersten Beuleigenwerts λ_1 sind auf der Abszisse (aus formalen Gründen mit negativem Vorzeichen) aufgetragen. Die Pareto-Front zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit und dem ersten Beuleigenwert.

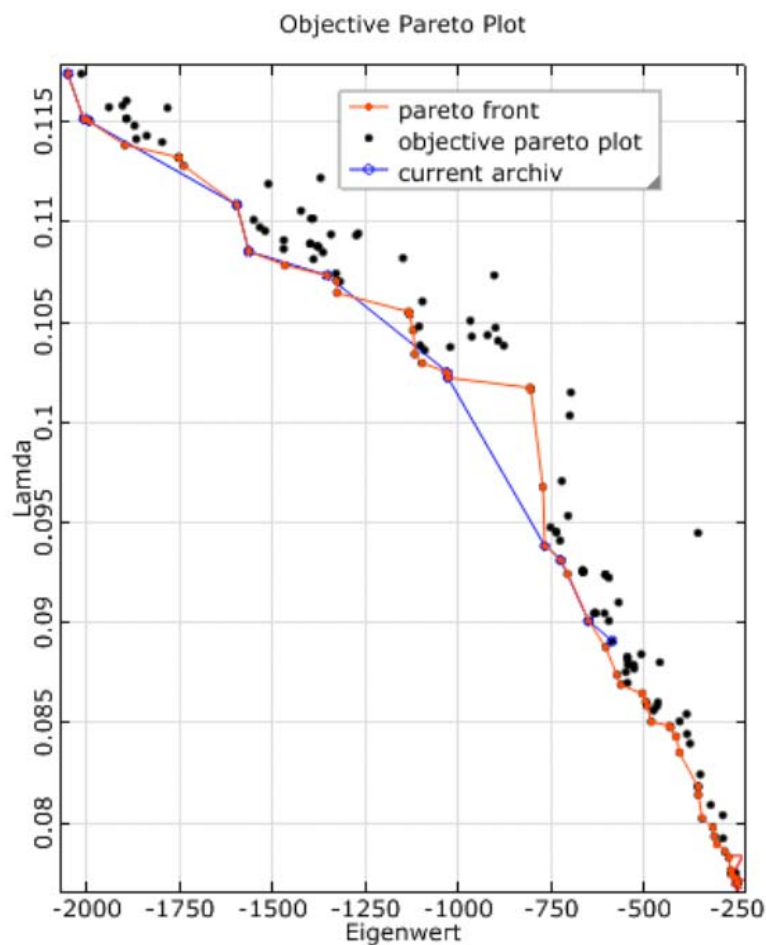


Bild 6: Pareto-Optimierung mit zwei konkurrierenden Zielfunktionen

Literatur

- [1] optiSLang – the optimizing Structural Language version 3.2, DYNARDO GmbH, Weimar, 2011, www.dynardo.de
- [2] Helbig, S.; Schlegel, R.: Optimierung der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit der Grundstruktur eines Ziegels mit HV-Lochung. Technischer Bericht MFPA Weimar und Dynardo GmbH (2005) unveröffentlicht