

**Automatische Bemessung, Optimierung
und Kalkulation von Pfettendächern
im Industrieballenbau**

I. Münch, W. Wagner

Mitteilung 8(2002)

**Automatische Bemessung, Optimierung
und Kalkulation von Pfettendächern
im Industriebau**

I. Münch, W. Wagner

Mitteilung 8(2002)



Automatische Bemessung, Optimierung und Kalkulation von Pfettendächern im Industriehallenbau

Ingo Münch, Werner Wagner

Im gewöhnlichen Industriehallenbau kann aus statischer Hinsicht zwischen zwei Arten von Dachaufbauten unterschieden werden. Die tragende Dacheindeckung kann die Belastung direkt oder über Pfetten an die Hallenrahmen abgeben.

Für den Fall, daß Pfetten verwendet werden, stellt sich im Entwurf die Frage, welche Abstände, Materialien und Geometrien für die Pfetten am günstigsten zu wählen sind. Eine computergestützte (automatisierte) Bemessung und Kalkulation der Dacheindeckung kann in kürzester Zeit sämtliche Varianten untersuchen und als Ergebnis einen direkten Vergleich über Materialaufwand und Kosten zur Verfügung stellen. Darüberhinaus kann durch entsprechende Optimierungsverfahren der Material- und Kostenaufwand für bestimmte Pfettenquerschnitte unter Einhaltung der geforderten Tragfähigkeit minimiert werden.

Automatically design, optimization and calculation of purlin roofs for industrial halls.

From a statical point of view one can distinguish in general between two types of roofing in the field of common industrial hall constructions. Vertical loads from the trapezoidal profiles are passed to the frames directly or via purlins. In the second case one has to discuss the question how to choose spacing, material and geometry of the purlins to have an optimal solution. A computerized (automatical) design and calculation of the roof cladding may lead in short time to solutions for all possible combinations. Thus, comparisons can be made under different aspects. Furthermore - using optimization procedures - the material and financial costs can be minimized observing the necessary load-bearing capacity.

1 Einführung

Bei der Vorbemessung und Kalkulation einer gewöhnlichen Industriehalle steht i.allg. nur begrenzt Zeit zur Verfügung. Oft werden Erfahrungswerte, was die Wahl des Materials, der Pfettenabstände, der Querschnitte, etc. angeht herangezogen. Solche Erfahrungswerte stehen jedoch nicht immer zur Verfügung, bzw. die Erfahrung kann falsch oder überholt sein. So ändern sich Preise, technische Möglichkeiten und auch die Normen und damit evtl. die Tragfähigkeitsnachweise. Obwohl die Bemessung von Pfetten zu einer der leichteren Aufgaben des Bauwesens gehört, sind Stabilitätseinflüsse nicht einfach abzuschätzen und rechenaufwändig. Als Ausweg bietet sich die Programmierung der entsprechenden Tragfähigkeitsnachweise an. Diese liegen in den jeweiligen Baunormen bereits in einem Schema mit der entsprechenden Semantik vor. Der nächste Schritt ist ein Programm, welches diese Nachweise eigenständig mit den Eingangswerten der Bemessung

anspricht und auswertet. Die Bemessung von Dächern ist von Randbedingungen abhängig. Zu nennen sind Standort (Schneelastzone, Geländehöhe über NN), Rahmenabstand, Dachneigung und Eigengewicht. Erfasst man alle Randbedingungen in einem Programm, so kann dieses die Aufgabe der Bemessung übernehmen, mehrere Varianten durchspielen und kalkulieren. Die Programmierung kann zudem auf mathematische Methoden zurückgreifen, um Querschnitte mit mehreren Variablen zu optimieren. Damit ist z.B. die Bestimmung einer Holzpfette mit Rechteckquerschnitt möglich, deren Abmessungen (Höhe und Breite) den Materialverbrauch minimiert. Methoden zur Optimierung werden im folgenden anwendungsbezogen vorgestellt.

2 Wege zur Optimierung

Aufgabe der Bemessung ist es, die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mit dazu notwendigem Material und Querschnitt zu gewährleisten, jedoch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Es läßt sich eine zu minimierende Zielfunktion Z

$$\min \{Z(\mathbf{x})\} \quad \text{mit } \mathbf{x} \in \mathcal{R}^n \quad \text{und } Z \in \mathcal{R} \quad (2.1)$$

formulieren, deren Variablen \mathbf{x} verschiedene Nebenbedingungen \mathbf{G} zu erfüllen haben. Die Beschränkung der elastischen Biegespannung nach E DIN 1052 [3] ist beispielsweise eine solche Nebenbedingung G für biegebeanspruchte Holzbalken und lautet:

$$G(\mathbf{x}) = 1 - \left(\frac{|M_y|}{k_m \cdot f_{m,d} \cdot W_y(\mathbf{x})} + \frac{|M_z|}{f_{m,d} \cdot W_z(\mathbf{x})} \right) \geq 0 \quad . \quad (2.2)$$

Die Zielfunktion Z muß zur Minimierung der Kosten als Kostenfunktion formuliert werden. Sind die Kosten dem Materialaufwand proportional, kann man die Kostenminimierung auf die Aufgabe einer Volumen- oder Gewichtsminimierung zurückführen. Dies ist beispielsweise bei Holzbalken der Fall. Viele Sägewerke berechnen für gängige Querschnittsabmessungen das Volumen V der Bestellung, beaufschlagen dies mit einem Faktor P (dem Preis) und stellen das Ergebnis in Rechnung. Die Zielfunktion lautet somit

$$Z(\mathbf{x}) = P \cdot V(\mathbf{x}) \quad . \quad (2.3)$$

Die Zielfunktion Z ist dem Volumen V proportional. Dieses berechnet sich zu

$$V(\mathbf{x}) = b \cdot h \cdot L \quad , \quad (2.4)$$

mit der Balkenlänge L und den Querschnittsabmessungen (Breite b und Höhe h) als Variablen \mathbf{x}

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} b \\ h \end{pmatrix} \quad . \quad (2.5)$$

Die Lösung von Optimierungsaufgaben erfolgt, abgesehen von Sonderfällen, iterativ. Um diesen iterativen Prozess robust zu halten, werden alle Nebenbedingungen so umgeformt, daß diese unabhängig von Vorzeichen und Dimension sind und ihr Wert, bei Einhaltung der Nebenbedingung,

zwischen null und eins liegt. Die Nebenbedingung (2.2) liegt bereits in dieser Form vor. Als Variablen \mathbf{x} der gestellten Optimierungsaufgabe treten Material- und Querschnittswerte auf. Es ist von Vorteil, die Zahl der Variablen klein zu halten. Oft kann dies durch die Dekomposition der Aufgabe realisiert werden.

2.1 Dekomposition der Aufgabe

Nach [6] soll der Möglichkeit der Dekomposition eines Optimierungsproblems besondere Bedeutung beigemessen werden. Darunter ist eine Reihe von plausiblen Entscheidungen zu verstehen, welche die Zahl der Variablen in Teilprobleme aufspalten und somit das Problem dezentralisieren. Dies kann beispielsweise zunächst die Wahl eines Materials, dann der Querschnittsform und zuletzt der Name einer genormten Profilhöhe sein. Als einzige offene Variable bleibt in diesem Fall nur noch der diskrete Wert der Profilhöhe h übrig (vgl. Bild 1). Für eine einzige offene Variable ist der Vorgang der Optimierung ein einfaches Problem. Bei mehreren offenen Variablen, wie es z.B. beim Rechteckprofil der Fall ist, wird ein mathematisches Verfahren zur Auffindung der optimalen Lösung benötigt.

2.2 Systematisches Durchsuchen

Sind die Variablen \mathbf{x} beschränkt und nicht kontinuierlich, sondern diskret, gibt es eine endliche Anzahl Zielfunktionswerte Z . Die Methode des Durchsuchens besteht darin, alle möglichen Anordnungen der Variablen \mathbf{x} zu bilden und deren Zielfunktionswerte zu errechnen. Das Optimum erhält man durch direkten Vergleich der Zielfunktionswerte. Liegen streng monotone Zusammenhänge zwischen Variablen \mathbf{x} und Zielfunktion Z vor, so kann die Durchsuchung systematisiert werden. Der Vorteil dieser Methode liegt in ihrer Einfachheit.

Für den Fall kontinuierlicher Variablen \mathbf{x} sind die Verfahren weitaus aufwändiger und werden den Rest dieses Kapitels ausfüllen.

2.3 Das Verfahren kombinierter Straffunktionen

Das Verfahren erzeugt ein Ersatzproblem Z_i^* ohne Nebenbedingungen, indem auf die Zielfunktion, bei Verletzung der Nebenbedingung(en), Strafterme $S(G)$ aufaddiert werden. Diese sollen verhindern, daß Variablenvektoren \mathbf{x} , welche Nebenbedingungen verletzen, kleinere Zielfunktionswerte Z liefern, als sie zulässigen Variablenvektoren zugeordnet sind. Das Ersatzproblem Z_i^* ist eine Folge und lautet (siehe z.B. [7]):

$$\min_r \left\{ \min_{\mathbf{x}} \left\{ Z_i^*(\mathbf{x}, r = r_i) \equiv Z(\mathbf{x}) + r_i \sum_{j=1}^m S(G_j(\mathbf{x})) \right\} \right\} \quad (2.6)$$

$i \dots$ Folgenindex

r ... Strafparameter

m ... Anzahl der Nebenbedingungen.

Die Straffunktionsterme $S(G_j(\mathbf{x}))$ werden auf zwei Abschnitten definiert. Im ersten Abschnitt ($G(\mathbf{x}) \geq \epsilon$) ist die Nebenbedingung $G(\mathbf{x})$ erfüllt. Im zweiten Abschnitt bewegt sich der Wert der Nebenbedingung entweder in einem zulässigen Grenzbereich ϵ oder im unzulässigen Bereich. Der Grenzbereich ϵ gewährleistet einen stetig differenzierbaren Übergang zwischen den beiden Abschnitten.

$$S(G(\mathbf{x})) = \begin{cases} 1 / G(\mathbf{x}) & \text{für } G(\mathbf{x}) \geq \epsilon \\ 3 / \epsilon - 3G(\mathbf{x}) / \epsilon^2 + G^2(\mathbf{x}) / \epsilon^3 & \text{für } G(\mathbf{x}) < \epsilon \end{cases} \quad (2.7)$$

Der Grenzbereich ϵ wird im Verlauf der Folge i durch Kopplung an den Strafparameter r verändert

$$\epsilon_i = \epsilon_0 \sqrt{r_i} \quad . \quad (2.8)$$

Als Anfangswert für den Grenzbereich empfehlen die Verfasser $\epsilon_0 = 10^{-3}$. Der Strafparameter r_i ist im Verlauf der Folge i nach [7] sukzessive zu verkleinern:

$$\begin{aligned} r_1 &> r_2 > r_3 > \dots \\ r_i / r_{i+1} &= 10 \\ \lim_{i \rightarrow \infty} r_i &= 0 \quad . \end{aligned} \quad (2.9)$$

Für den Fall einer Optimierungsaufgabe mit zwei Variablen kann man sich das Verfahren bildlich vorstellen. Die Zielfunktion Z beschreibt eine Fläche im Raum. Dieser Raum wird durch Nebenbedingungen in einen zulässigen und unzulässigen Bereich getrennt. Der tiefste Punkt der Fläche innerhalb des zulässigen Bereichs wird gesucht. Damit der Variablenvektor auf seiner Suche nach dem tiefsten Punkt den zulässigen Bereich nicht verläßt, wird mit dem Ersatzproblem Z_i^* gearbeitet. Dieses besitzt nach Gl. (2.6) teilweise die Form eines Kessels, dessen Wände umso steiler werden, je weiter sich die Fläche in den unzulässigen Bereich begibt. Innerhalb des zulässigen Bereichs muß die Form der eigentlichen Zielfunktion Z gewahrt werden. Durch sukzessive Verkleinerung des Strafparameters r_i gleicht sich das Ersatzproblem Z_i^* der eigentlichen Zielfunktion Z an. In Bild 2 ist ein Schnitt durch die Situation am Rand des zulässigen Bereichs dargestellt.

Das Verfahren beruht darauf, daß sich Vektoren \mathbf{x} iterativ dem Ziel nähern und den zulässigen Bereich weniger verlassen. Somit kann der Einfluß der Straffunktionen herabgesetzt werden, bis das Ergebnis des Ersatzproblems Z_i^* das Ergebnis des eigentlichen Problems genügend genau repräsentiert. Es wird nun beschrieben, wie sich der Vektor \mathbf{x} dem Ziel nähert.

2.4 Eindimensionale Suche mit dem Gradientenverfahren

Unter eindimensionaler Suche werden numerische Verfahren verstanden, die eine Funktion ohne Nebenbedingung mit einem einzigen Parameter α minimieren. Für das Ersatzproblem Z_i^* aus Gl. (2.6) trifft dies zu.

Ein skalarer Parameter α wird als Schrittweite in einer festgelegten Richtung \mathbf{g} eingeführt. Diese Richtung wird nach [4] bestimmt zu:

$$\mathbf{g}^j = -\nabla Z^*(\mathbf{x}^j) + \frac{(\nabla Z^*(\mathbf{x}^j))^T \nabla Z^*(\mathbf{x}^j)}{(\nabla Z^*(\mathbf{x}^{j-1}))^T \nabla Z^*(\mathbf{x}^{j-1})} \mathbf{g}^{j-1} . \quad (2.10)$$

Dieser Gradient beschreibt ein Gefälle der Zielfunktion Z_i^* an der Stelle \mathbf{x}^j . Folgt man diesem Gefälle, kann man in der Umgebung von \mathbf{x}^j eine weitere Stelle \mathbf{x}^{j+1} mit einem kleineren Zielfunktionswert finden.

Die Schrittweite α in Richtung des Gradienten \mathbf{g}^j folgt aus einer eindimensionalen Optimierungsaufgabe (siehe z.B. [7]):

$$\min_{\alpha} \{ Z_i^*(\alpha) \equiv Z_i^*(\mathbf{x} + \alpha \mathbf{g}^j) \} . \quad (2.11)$$

Zur Lösung dieser Aufgabe wird ein Anfangsintervall $[0, \alpha_0^o]$ aus der Bedingung ermittelt, daß der Zielfunktionswert für $\alpha \in [0, \alpha_0^o[$ kleiner als der Zielfunktionswert für $\alpha = \alpha_0^o$ ist. Die obere Intervallgrenze ist iterativ zu erweitern, bis diese Bedingung erfüllt wird. Ausgehend von diesem Anfangsintervall kann nach [7] mit Hilfe der *Fibonacci*-Suche das Intervall solange verkleinert werden, bis eine ausreichende Genauigkeit für die Schrittweite α erreicht ist.

In Bild 3 ist der Ablauf der eindimensionalen Suche anhand eines Beispiels mit zwei Variablen dargestellt. Die Zielfunktion beschreibt eine Fläche. Ausgehend von einem Startvektor \mathbf{x}^0 werden die oben beschriebenen Vorgänge so oft wiederholt, bis die Länge des Vektors $\alpha \mathbf{g}^j$ ausreichend klein ist. Man befindet sich dann in der Nähe eines Minimums.

Die Methode aus Abschn. 2.1 und die Verfahren aus den Abschnitten 2.2 bis 2.4 werden in ein Programm eingebunden, das sämtliche Berechnungen rund um die Bemessung und Optimierung übernimmt. Dieses Programm wird nun vorgestellt.

3 Ein Programm zur automatischen Bemessung

Das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel hat in den letzten Jahren in etlichen Statikbüros auf vielfältige Weise Einzug erhalten. Excel besitzt standardmäßig eine interne Programmiersprache mit der Bezeichnung Visual Basic for Applications, kurz VBA. Dies ist eine Programmiersprache, die u.a. mit Excelobjekten wie Tabellen, Diagrammen etc. unmittelbar arbeiten kann.

Zur Umsetzung der automatischen Bemessung von Pfetten wurde auf Basis von Excel und VBA ein Programm mit folgenden Vorgaben entwickelt:

1. Die Strukturierung des Programms ist der Wissensbasis angeglichen.
2. Datenbestände sind vom Anwender auf Exceltabellen gut zugänglich und justierbar. Es finden sich dort Querschnittswerte, Preise von gewalzten Profilen, Preise für Holz etc.

3. Komponenten der Eingabe sind in Reihenfolge und Beschreibung dem Denken des Ingenieurs angepaßt.
4. Das Programm übernimmt sämtliche Rechenschritte und führt Interaktionen selbständig aus.
5. Ergebnisse sind in Exceltabellen direkt weiter verarbeitbar.

Nach [5] ist die Abbildung von Fachwissen menschlicher Experten auf Computerprogramme ein erfolgreicher Zweig kognitiver Datenverarbeitung. Voraussetzung dafür ist, daß das Wissen formalisierbar und durch Problemlösungsstrategien erfaßbar ist. In den jeweiligen Baunormen liegt das Wissen menschlicher Experten in einem formalisierten Schema vor und bietet sich zur Programmierung an. Neben wissensbasierten Komponenten, wie Formeln oder Diagrammen, enthält der Text eine Semantik, die den Ablauf des Nachweises steuert.

Der Anwender hat die Möglichkeit, im Programm verarbeitete Normen unter jeweils dem Namen der Norm bezeichneten Modulen einzusehen und ggf. sogar zu ändern. Die Bezeichnungen und Abläufe wurden aus Normen unverändert übernommen und wo nötig mit Kommentaren versehen. In Tabelle 1 wird ein Auszug aus dem programmierten Quelltext vorgestellt. Es handelt sich um den Beulnachweis beidseitig gelagerter Plattenstreifen nach DIN18800 [2], Teil 1, Tabelle 12.

Dieses Unterprogramm ist im Modul mit dem Namen DIN 18800 zu finden. Die Strukturierung wird auf diese Weise der Wissensbasis angeglichen.

Das Programm benötigt Daten wie Querschnittswerte und Preise. Diese sind nur selten oder zeitweise zu ändern und werden dem Anwender nur bei Bedarf auf Exceltabellen zur Kontrolle gezeigt, weshalb man von Kontrollvariablen spricht. Des weiteren gibt es sogenannte Monitorvariablen. Diese werden bei jedem Programmstart dem Anwender zur Selektion, Kontrolle oder Modifikation vorgeführt. Dazu gehören z.B. die Dachneigung der Halle, Materialien der Pfetten, Kalkulationsfaktoren, etc.

Um dem Denken (des Ingenieurs) gerecht zu werden, erfolgt die Eingabe von Monitorvariablen thematisch geordnet auf einer Folge von Eingabemasken. Bild 4 zeigt exemplarisch die erste Eingabemaske.

3.1 Hintergründe des Programms

Das Programm umfaßt die automatische Bemessung einer tragenden Dacheindeckung mit Stahltrapezprofilen. Als maßgebender Lastfall wird Eigengewicht und Schnee verfolgt. Das Eigengewicht der Dacheindeckung und der Pfetten wird im Prozeß aktualisiert und somit genau berücksichtigt. Neben Nachweisen der Tragsicherheit werden Durchbiegungen auf zulässige Werte beschränkt. Grenzen der zulässigen Durchbiegungen können vom Anwender vorgegeben werden.

In Bild 5 ist die Stellung der Optimierung innerhalb der Anwendung des Programms zu sehen. Die Aufgabe der Bemessung wird vollständig vom Programm übernommen. Etwas ersparte Zeit

sollte jedoch zur Kontrolle der Datenbestände, insbesondere in die Justierung der Werkstoff- und Profilpreise investiert werden, ohne die eine aussagekräftige Kalkulation nicht möglich ist.

Der Pfettenabstand ist im gewöhnlichen Industriehallenbau meist eine wählbare Größe. Materialmengen und Kosten für tragende Dacheindeckung und Pfetten sind über den Pfettenabstand gekoppelt. Um einen Überblick der Auswirkungen des Pfettenabstandes zu erhalten, wird die Berechnung für alle äquidistant möglichen Pfettenabstände innerhalb eines definierten Bereichs durchgeführt. Ein Beispiel in Abschn. 4 wird dies noch näher erläutern.

3.2 Pfettenquerschnitte im Programm

Die Art der Optimierungsvariablen bestimmt die Wahl der Optimierungsmethode. Bei Querschnitten mit diskreten Optimierungsvariablen empfiehlt sich systematisches Durchsuchen (vgl. Abschn. 2.2). Bei Querschnitten mit kontinuierlichen Optimierungsvariablen sind Verfahren nach Abschn. 2.3 und 2.4 möglich.

3.2.1 Genormte Doppel-T-Querschnitte

Es stehen die Querschnittsreihen IPE, HEA und HEB zur Verfügung. Sämtliche Querschnittswerte der Reihen sind streng monotone Funktionen der Trägerhöhe. Die Trägerhöhe ist damit einzige und zudem diskrete Variable. Systematisches Durchsuchen führt auf ein kleinstmögliches Profil, das alle Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Die Tragfähigkeitsnachweise umfassen Biegespannung, Schubspannung und Biegedrillknicken. Der Anwender kann entscheiden, ob die Dacheindeckung mit Stahltrapezprofilen im Biegedrillknickenachweis zur Erhöhung der Tragfähigkeit angesetzt wird. Pfettenbemessung und Stahltrapezblechbemessung ist jedoch kein voneinander unabhängiger Vorgang. So wirkt sich die Steifigkeit des Trapezblechs auf die Stabilität der Pfetten aus. Umgekehrt hat die Breite der Pfetten einen Einfluß auf die Tragfähigkeit des Trapezblechs. Im Programm wird diese Interaktion berücksichtigt.

3.2.2 Genormte Rechteckhohlprofile

Die industrielle Fertigung von Rechteckhohlprofilen (RHP) begann nach [9] erst vor knapp 40 Jahren. Mit der Entwicklung moderner Schweiß- und Schneidetechniken ist eine wirtschaftliche Fertigung heute möglich. Im Programm werden quadratische und rechteckige Hohlprofile zu einem Kollektiv zusammengefaßt. Ziel der Optimierung ist, unter Einhaltung der Nebenbedingungen das leichteste Profil zu ermitteln. Dazu wird das Kollektiv nach dem Gewicht sortiert und systematisch durchsucht. Nebenbedingungen sind wiederum Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

3.2.3 Freie Rechteckquerschnitte

Die beiden kontinuierlichen Variablen (Höhe und Breite) werden für Holzpfeiler so optimiert, daß deren Querschnittsfläche minimiert wird. Die Spannungsrestriktion nach Gl. (2.2) berücksichtigt die Kippstabilität des Trägers durch den Faktor $1/k_m$. Die E DIN 1052 [3] erlaubt für Rechteckquerschnitte einen spannungsabmindernden Faktor $k_{red} = 0,7$ für den betragsmäßig kleineren Spannungsterm in Gl. (2.2). Dieser wird hier auf der sicheren Seite vernachlässigt. Zur Einhaltung der Durchbiegungsbeschränkungen werden vier Nebenbedingungen benötigt. Da nach E DIN 1052 [3] sowohl Anfangs- als auch Enddurchbiegung maßgebend sein kann, werden in jeweils zwei Richtungen (parallel und senkrecht zur Dachebene) zwei Nebenbedingungen (Anfangszustand und Endzustand) formuliert.

3.2.4 Koppelpfeiler

Die Durchlaufwirkung von Balken über mehrere Felder ist meist ein erwünschter Effekt. Es stellen sich geringere Verformungen und eine bessere Momentenverteilung ein. Im Falle von Koppelpfeilern werden deshalb Rechteckbalken biegesteif gestoßen. Die Länge der Kopplung zwischen einzelnen Balken wird so gewählt, daß Feldmomente für die Bemessung der Querschnitte maßgebend werden. Über die Länge der Kopplung wird das Stützmoment von zwei Querschnitten abgetragen und somit nicht maßgebend. Die Summe der maximalen Momente der an das Innenaufleger angrenzenden Felder ist bei Gleichstreckenlast und konstanten Feldweiten stets größer als das Stützmoment. Aus der Bedingung, daß das Moment an der Koppelstelle vom Betrag dem maximalen Feldmoment entspricht, ergeben sich nach [1] Überkopplungslängen. Die einzelnen Teilstücke a einer Koppelpfeiler sind damit länger als der Rahmenabstand l und zwar

$$a = \begin{cases} 1,17 \cdot l & \text{für Endfelder} \\ 1,2 \cdot l & \text{für Innenfelder} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.2.5 Freie Rechteckhohlprofile

Rechteckhohlprofile (RHP) sind zur zweiachsigen Lastabtragung bestens geeignet. Dies läßt sich mechanisch mit der Anordnung des Materials erklären. Eliminiert man wenig beanspruchte Bereiche eines Rechteckquerschnitts, der zweiachsig beansprucht wird, so bleibt ein Rechteckhohlprofil übrig. Mit Methoden für kontinuierliche Variablen werden die Abmessungen des Rechteckhohlprofils so bestimmt, daß die Last mit möglichst wenig Material abgetragen wird. Breite und Höhe der Profilmittellinien sowie die Wanddicke des Querschnitts beschreiben eine Optimierungsaufgabe mit drei kontinuierlichen Variablen. Um speziell das Beulversagen auszuschließen, wird in der Optimierung die Einhaltung minimaler Wanddicken gewährleistet. Daraus ergeben sich Nebenbedingungen, die in der DIN 18800 [2], Teil 1, Tabelle 12 als $\text{grenz}(b/t)$ -Verhältnisse formuliert sind (vgl. Quelltext unter Abschn. 3).

Das Ergebnis dieser Optimierung, ein Rechteckhohlprofil beliebiger Größe, ist in der Baupraxis ein noch hypothetischer Fall. Aufgrund üblicher Herstellungsprozesse ist solch ein Profil eine Sonderanfertigung mit entsprechend hohen Kosten und wird vom Programm nicht kalkuliert.

3.3 Massenermittlung und Kalkulation als Postprocess

Als Postprocess kann die Massenermittlung und Kalkulation auf Ergebnisse der Bemessung zurückgreifen. Massen und Kosten für Pfetten und Dachtrapezprofile werden über die gesamte Halle aufsummiert. Die ermittelten Kosten sind reine Werkstoffkosten mit Kostenverlauf proportional zum Materialaufwand. Diese sollen nach [8] als Einzelkosten dem Kostenträger direkt zugerechnet werden. Mehrkosten durch Verschnitt, wie er bei Walzprofilen in der Regel vorkommt, können durch Faktoren berücksichtigt werden. Bei Holzquerschnitten besteht die Möglichkeit, auf Hoblung zu verzichten, was einen nennenswerten Preisunterschied ausmacht (vgl. Bild 6). Das Programm unterscheidet generell zwischen Sattel- und Pultdächern. Für Satteldächer werden zwei Firstpfetten vorgesehen und kalkuliert. Bei Koppelpfetten werden Überkopplungslängen berücksichtigt.

4 Beispiele

4.1 Halle mit Satteldach

Anhand einer Halle mit Satteldach werden Ergebnisse der Optimierung, automatischen Bemessung und Kalkulation vorgeführt. Die Systemwerte der Halle sind Bild 4 zu entnehmen. Das Programm untersucht für äquidistante Pfettenabstände zwischen einem und sechs Metern alle Möglichkeiten der Pfettenanordnung. Für diese Möglichkeiten werden alle in Bild 7 selektierten Querschnitte bemessen bzw. optimiert. Der Preisfaktor für Verschnitt wird einheitlich auf 1,1 festgelegt. Dies soll einen besseren Vergleich der Ergebnisse zulassen, obwohl Holzpfetten auf gewünschte Länge geliefert werden und somit ein Faktor 1,0 möglich wäre.

Bei einem Pfettenabstand von 2,4 m ist in Bild 8 der Verlauf des Optimierungsprozesses nach Gl. (2.6) bis Gl. (2.9) für Koppelpfetten dargestellt. Man nähert sich in einem Verlauf von Folgen an das Ziel der Optimierungsaufgabe.

Das Ergebnis, eine Pfette mit den Abmessungen 10,7 cm x 29,6 cm, erfüllt sämtliche gestellten Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit und zeichnet sich durch minimalen Materialaufwand aus. Diese Abmessungen werden vom Programm auf 11 cm x 30 cm gerundet und dem Postprocess (vgl. Abschn. 3.3) zur Verfügung gestellt. Dort wird das Gesamtgewicht an Dacheindeckung und Pfetten aufsummiert und in tabellarischer sowie grafischer Form festgehalten. In Bild 9 ist der Verlauf des Gesamtgewichts für die selektierten Pfettenquerschnitte zu sehen. Die beiden optimierten Querschnitte (RHP aus Stahl und Koppelpfette aus Holz) führen erwartungsgemäß zu einem geringen Gesamtgewicht der Konstruktion. Dieses setzt sich zu einem großen

Teil aus der tragenden Dacheindeckung mit Trapezblech zusammen (Bild 10). Die Bemessung der Trapezblecheindeckung findet unter Berücksichtigung der Auflagerbreite statt. Da Pfetten das Auflager darstellen, sind verschiedene Auflagerbreiten für verschiedene Pfettenquerschnitte vorhanden. Im vorliegenden Beispiel sind diese Unterschiede gering und es ergibt sich in Bild 10 eine einheitliche Kurve für alle Pfettenquerschnitte.

Die Gesamtkosten in Bild 11 spiegeln einige Tatsachen wider, die in der Baupraxis ihre Bestätigung finden. So kann man für den Pfettenabstand einen Bereich angeben, in dem alle Querschnitte auf ein wirtschaftlich akzeptables Ergebnis führen. In diesem Beispiel liegt dieser Bereich etwa zwischen 2 und 4 m. Für optimierte Querschnitte schwanken Gesamtgewicht und Kosten in diesem Bereich nur wenig. Dies begründet sich mit dem nahezu konstant hohen Ausnutzungsgrad dieser Querschnitte.

Es stellt sich auch klar heraus, daß Hohlprofile gegenüber Doppel-T-Profile zwar eine leichtere, dafür aber teurere Variante sind. Optimierte Koppelpfetten erscheinen in Gewicht und Kosten am günstigsten. Die Tatsache, daß etliche Industriehallen mit Stahlrahmen und Holzpfeilen ausgeführt werden, spiegeln dieses Ergebnis wider.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß das kalkulatorische Ergebnis von der Justierung der Werkstoff- und Profilpreise abhängt. Diese Größen wurden für das Beispiel als gemittelte Werte des Marktes erhoben und sind keineswegs als absolut zu betrachten.

4.2 Pultdachhalle mit großem Rahmenabstand

Es wird eine Halle mit Pultdach und großem Rahmenabstand untersucht. Die Systemwerte sind Bild 12 zu entnehmen. Der große Rahmenabstand, die Dachneigung von 12 Grad und die hohe Belastung durch Schnee (Zone III, 640 ü.NN) und Dachaufbau (1 kN/m^2) lassen große Pfettenquerschnitte erwarten. Für Holzquerschnitte wird deshalb Brettschichtholz BS11 vorgesehen und auf die Kopplung verzichtet (opt. Rechtecke). Für einen Pfettenabstand von 6 m besitzt kein IPE-Profil die notwendige Tragfähigkeit, weshalb in Bild 13 der Verlauf bei 4,8 m endet. Im vorliegenden Fall ist die Wahl von HEA-Profilen bei einem Pfettenabstand von 2,67 m die günstigste Variante.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es gibt im Bauwesen eine ganze Reihe von Bauteilen und Konstruktionen, deren Bemessung automatisierbar sind. Anhand von Pfettendächern im Industriehallenbau wird solch eine Automatisierung vorgestellt. Man benötigt eine (teilweise mathematische) Formulierung der Ziele und es entstehen Optimierungsaufgaben. Den Aufgaben folgen Postprocessing zur Ermittlung von Massen und Kosten. Durch automatische Bemessung können bei der Planung Ressourcen (Arbeit und Zeit) gespart werden. Ein Teil dieser Ressourcen sollten zur Justierung der Kalkulationsgrundlagen

genutzt werden. Dazu können Kalkulationsschlußrechnungen bestehender Projekte herangezogen werden. Dies stellt eine Möglichkeit der Interaktion zwischen Statik und Kalkulation her.

Weitere Informationen und das Programm sind erhältlich unter:

<http://www.uni-karlsruhe.de/~baustatik/home/>

Literatur

- [1] BLASS, H.-J. / GÖRLACHER, R. / STECK, G.: *Step2, Bauteile, Konstruktionen und Details von Holzbauwerken*. Fachverlag HOLZ, Düsseldorf, 1995.
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN: *DIN18800 Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN: *DIN 1052 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken*. Beuth Verlag, Berlin, Mai 2000.
- [4] FLETCHER, R. / REEVES, C.M.: *Function minimization by conjugate gradients.*, Band 7 Comp. Journ, 1964.
- [5] HARTMANN, DIETRICH: *Anwendung wissensbasierter Informationstechnologie in Konstruktion und Planung*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1. Auflage, 1992.
- [6] HUPFER, P.: *Optimierung von Baukonstruktionen*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1980.
- [7] LAWO, M.: *Optimierung im konstruktiven Ingenieurbau*. Vieweg Verlag, 1987.
- [8] MANZ, K. / BREID, V. / BRONNER, T. / DASCHMANN, H.-A. / KOCH, I.: *Kostenrechnung/Controlling*. Verlag Franz Vahlen, München, 1993.
- [9] PUTHLI, R.S.: *Konstruieren mit Stahlhohlprofilen*. Stahlbau 3 (2001), S. 141–152.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Ingo Münch, Prof. Dr.-Ing. Werner Wagner, Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

Abbildungsverzeichnis

1	Bedeutung der Dekomposition in der Problemlösung	13
2	Schnitt am Rand des zulässigen Bereiches	13

3	Eindimensionale Suche an einem Beispiel	14
4	Eingabemaske zur Beschreibung der Systemwerte der Halle	15
5	Ablauf und Ziel der automatischen Bemessung	16
6	Preise sind als Kontrollvariablen dem Anwender zugänglich	17
7	Selektion und Angaben zu Querschnitten	18
8	Verlauf des Optimierungsprozesses	19
9	Verlauf des Gesamtgewichts über den Pfettenabstand	19
10	Verlauf des Trapezblechgewichts über den Pfettenabstand	20
11	Verlauf der Gesamtkosten über den Pfettenabstand	21
12	Systemwerte der Halle	22
13	Verlauf des Gesamtgewichts über den Pfettenabstand	22
14	Verlauf der Gesamtkosten über den Pfettenabstand	23

Tabellenverzeichnis

1	Auszug aus DIN 18800, Teil 1, Tabelle 12	12
---	--	----

	1	3
2	Randspannungs- verhältnis Ψ	grenz(b/t) für Sonderfälle des Randspannungsverhältnisses Ψ
3	1	$37,8 \cdot \sqrt{\frac{240}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$
4	$1 > \Psi > 0$	$27,1(1 - 0,278 \cdot \Psi - 0,025 \cdot \Psi^2) \cdot \sqrt{\frac{8,2}{\Psi + 1,05}} \cdot \sqrt{\frac{240}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$
5	0	$75,8 \cdot \sqrt{\frac{240}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$
6	$0 > \Psi > -1$	$27,1 \cdot \sqrt{7,81 - 6,29 \cdot \Psi + 9,78 \cdot \Psi^2} \cdot \sqrt{\frac{240}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$
7	-1	$133 \cdot \sqrt{\frac{240}{\sigma_1 \cdot \gamma_M}}$

Tabelle 1: Auszug aus DIN 18800, Teil 1, Tabelle 12

Fig. 1: Extract from DIN 18800, part 1, table 12

```

Public Sub grenz_bt(psi, sigma1, max_bt)
'maximale_(b/t)-Verhältnisse nach Teil 1, Tabelle 12
'psi=Spannungsverhältnis, sigma1= maximale Druckspannung [kN/cm^2]
If psi = 1 Then
    max_bt = 37.8 * (24 / (Abs(sigma1) * stahlgamma_m)) ^ (0.5)
ElseIf psi > 0 And psi < 1 Then
    max_bt = 27.1 * (1 - 0.278 * psi - 0.025 * psi ^ 2) * (8.2 / (psi + 1.05)) _
        ^ (0.5) * (24 / (Abs(sigma1) * stahlgamma_m)) ^ (0.5)
ElseIf psi = 0 Then
    max_bt = 75.8 * (24 / (Abs(sigma1) * stahlgamma_m)) ^ (0.5)
ElseIf psi > -1 And psi < 0 Then
    max_bt = 27.1 * (7.81 - 6.29 * psi + 9.78 * psi ^ 2) ^ (0.5) * _
        (24 / (Abs(sigma1) * stahlgamma_m)) ^ (0.5)
ElseIf psi = -1 Then
    max_bt = 133 * (24 / (Abs(sigma1) * stahlgamma_m)) ^ (0.5)
End If
End Sub

```

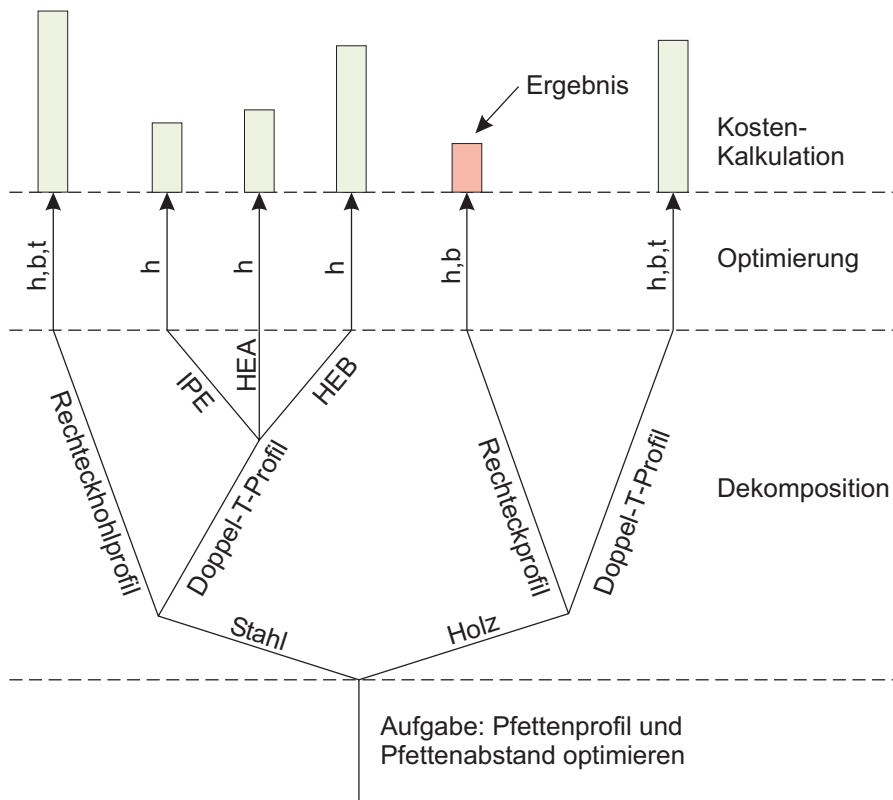


Bild 1: Bedeutung der Dekomposition in der Problemlösung

Fig. 1: Importance of decomposition in the problem solution

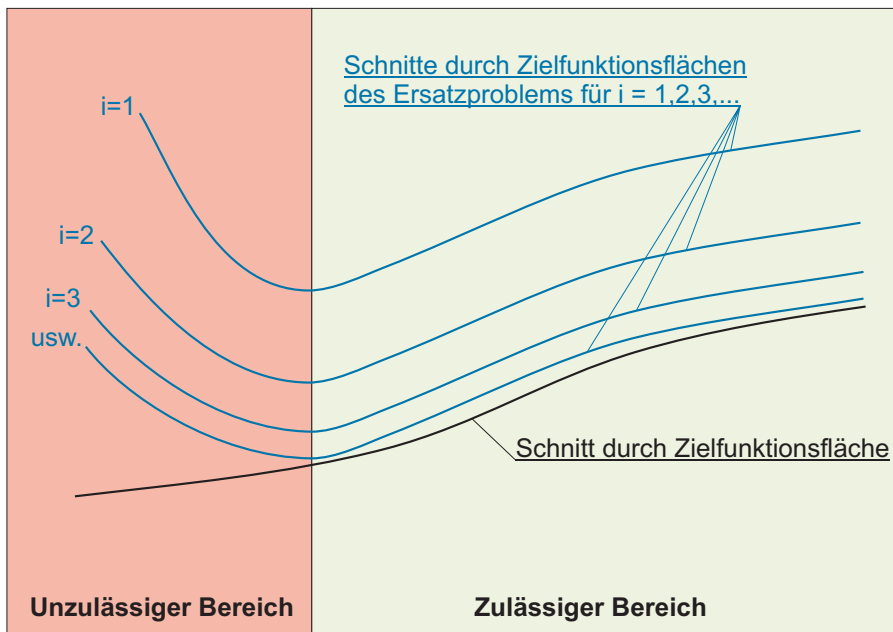


Bild 2: Schnitt am Rand des zulässigen Bereiches

Fig. 2: Sectional view at the border of the admissible region

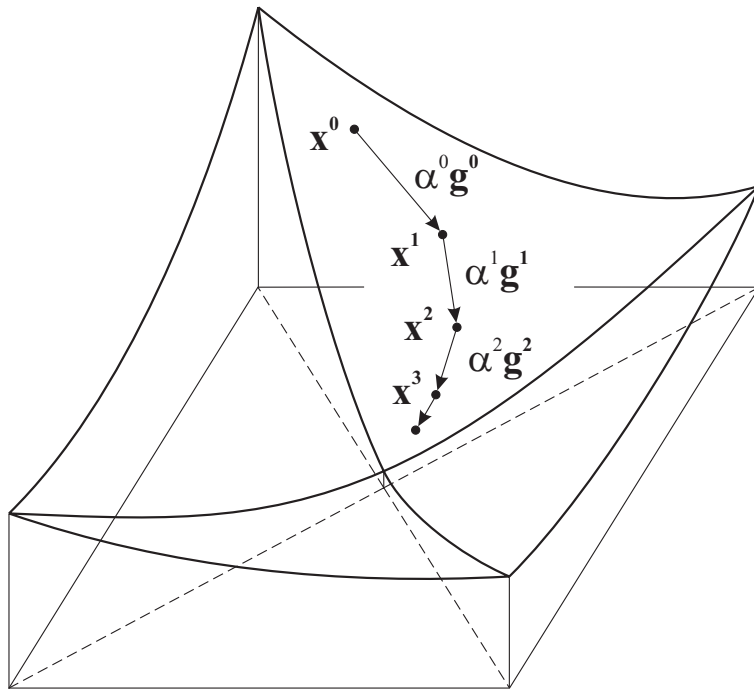


Bild 3: Eindimensionale Suche an einem Beispiel

Fig. 3: One-dimensional search for an example

Systemwerte der Halle

Dachart:

Hallenlänge L = [m]

Hallenbreite B = [m]

Anzahl der Hallenfelder: [1]
(Felder zwischen den Giebelwänden)

Pfettenabstand e zwischen:
 und [m]
(Auf die Grundfläche projiziertes Maß)

Geländehöhe: [m ü. NN]

Dachneigung α = [Grad]

Schneelastzone:

Soll die tragende Dacheindeckung mit einem Stahltrapezprofil automatisch bemessen werden?

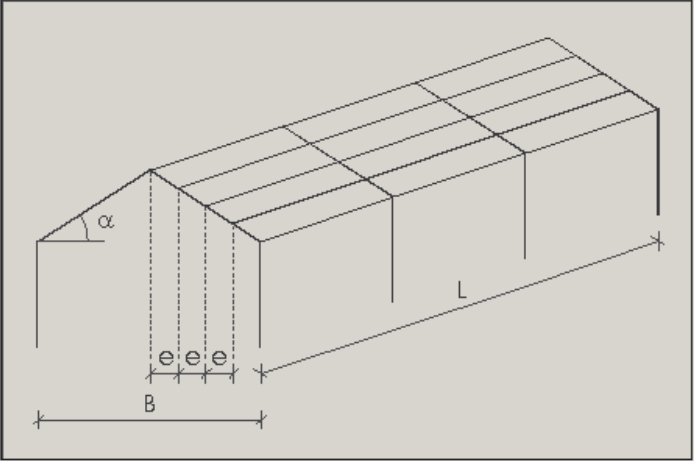


Bild 4: Eingabemaske zur Beschreibung der Systemwerte der Halle

Fig. 4: Input-sheet for the description of general values of halls

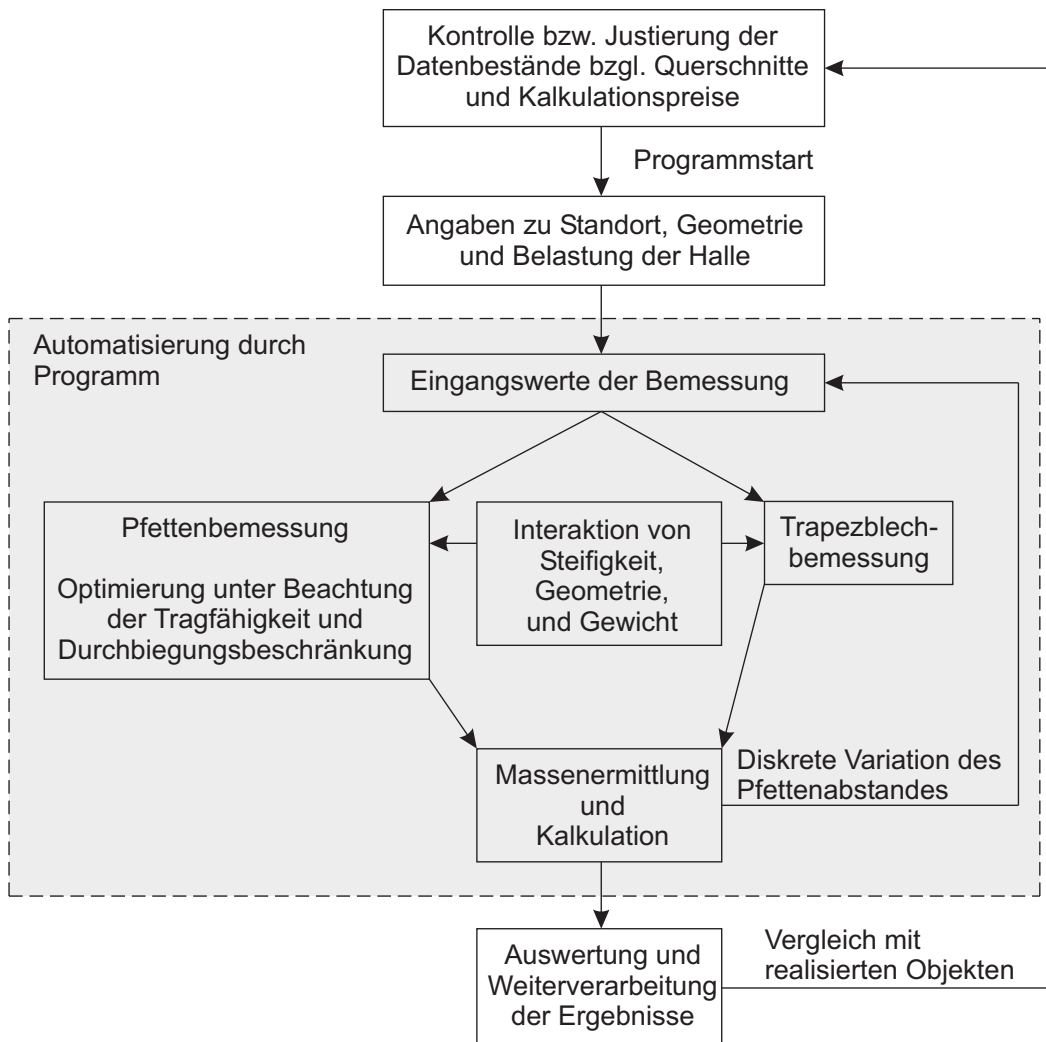


Bild 5: Ablauf und Ziel der automatischen Bemessung

Fig. 5: Sequence and objective of the automatic structural design

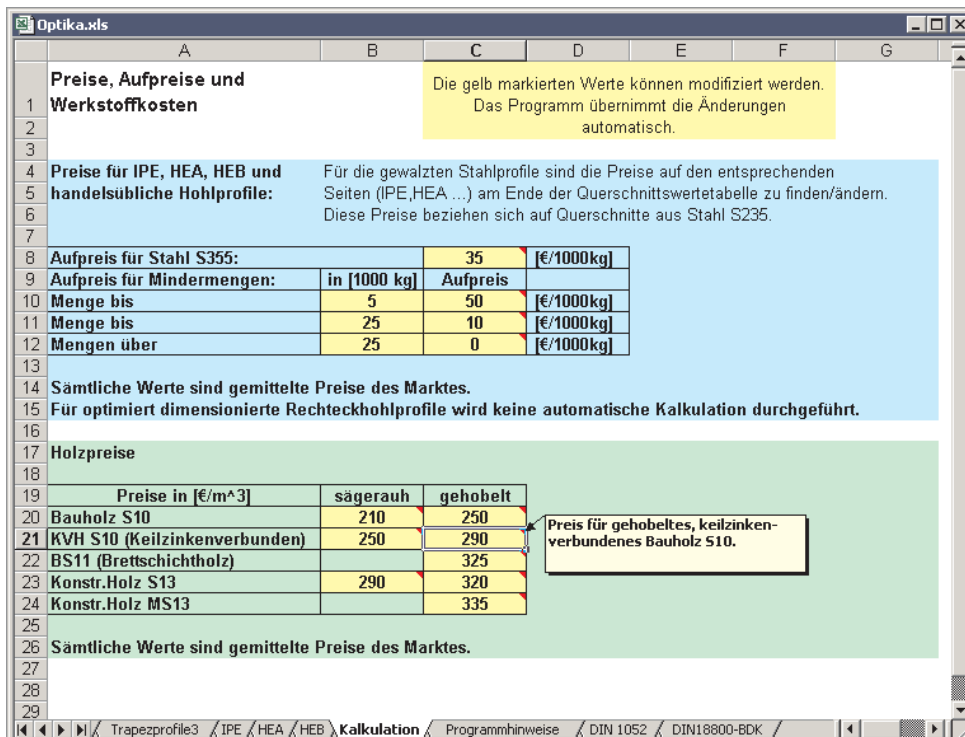


Bild 6: Preise sind als Kontrollvariablen dem Anwender zugänglich

Fig. 6: Costs are accessible for the user as control variables

Bemessung und Kalkulation [X]

Pfettenquerschnitte

Wählen Sie die zu untersuchenden Querschnitte aus:

Stahlquerschnitte

Material: S235

	statisches System:	Preisfaktor für Verschnitt:	Drehbettung durch Trapezblech:
<input checked="" type="checkbox"/> IPE-Reihe	Fünffeldträger	1.1	Ja
<input checked="" type="checkbox"/> HEA-Reihe	Fünffeldträger	1.1	Ja
<input type="checkbox"/> HEB-Reihe	Fünffeldträger	1.1	Nein
<input checked="" type="checkbox"/> Genormte RHP kaltgefertigt	Fünffeldträger	1.1	
<input type="checkbox"/> Genormte RHP warmgefertigt	Fünffeldträger	1.1	
<input checked="" type="checkbox"/> Optimierte RHP	Fünffeldträger	1.1	

Holzquerschnitte

Material: Bauholz S10

	statisches System:	Preisfaktor für Verschnitt:	Oberfläche:
<input type="checkbox"/> Optimierte Rechteckprofile	Einfeldträger	1.1	Sägerauh
<input checked="" type="checkbox"/> Optimierte Koppelpfetten	Fünffeldträger	1.1	Sägerauh sägerauh gehobelt

Weiter Abbrechen

Bild 7: Selektion und Angaben zu Querschnitten

Fig. 7: Selection and specification of cross sections

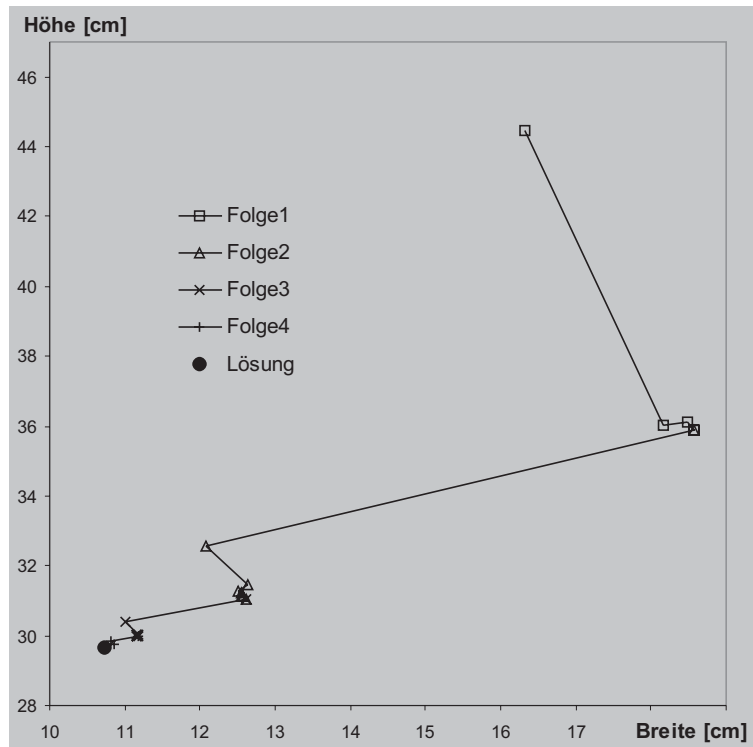


Bild 8: Verlauf des Optimierungsprozesses

Fig. 8: Progress of optimization process

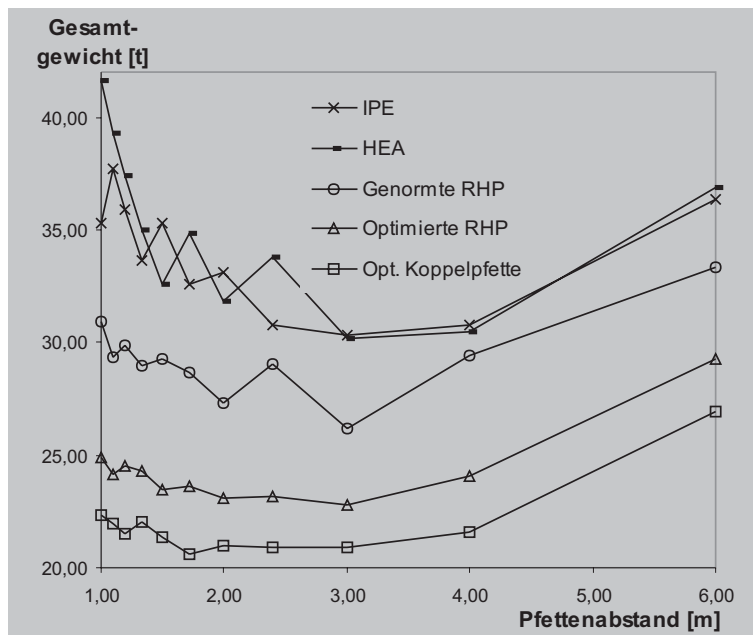


Bild 9: Verlauf des Gesamtgewichts über den Pfettenabstand

Fig. 9: Dependence of total weight with respect to purlin-spacing

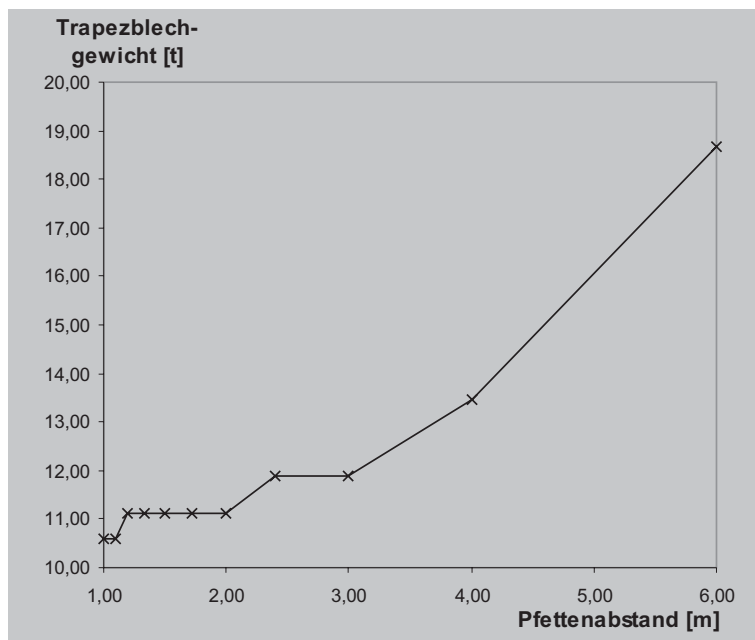


Bild 10: Verlauf des Trapezblechgewichts über den Pfettenabstand

Fig. 10: Dependence of total weight of trapezoidal sheet with respect to purlin-spacing

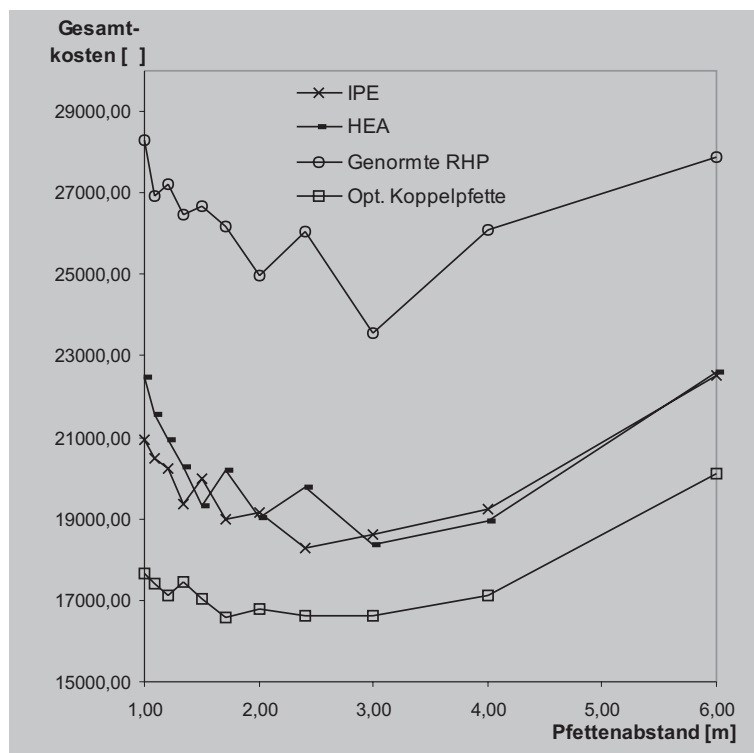


Bild 11: Verlauf der Gesamtkosten über den Pfettenabstand

Fig. 11: Dependence of total costs with respect to purlin-spacing

Systemwerte der Halle

Dachart:

Hallenlänge L = [m]

Hallenbreite B = [m]

Anzahl der Hallenfelder: [1]
(Felder zwischen den Giebelwänden)

Pfettenabstand e zwischen:
 und [m]
(Auf die Grundfläche projiziertes Maß)

Geländehöhe: [m ü. NN]

Dachneigung $\alpha =$ [Grad]

Schneelastzone:

Soll die tragende Dacheindeckung mit einem Stahltrapezprofil automatisch bemessen werden?

Bild 12: Systemwerte der Halle

Fig. 12: General values of hall

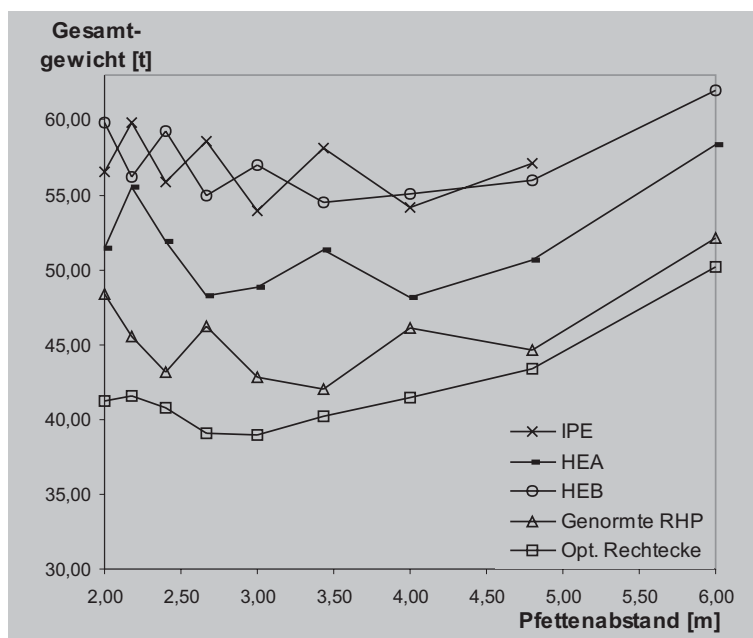


Bild 13: Verlauf des Gesamtgewichts über den Pfettenabstand

Fig. 13: Dependence of total weight with respect to purlin-spacing

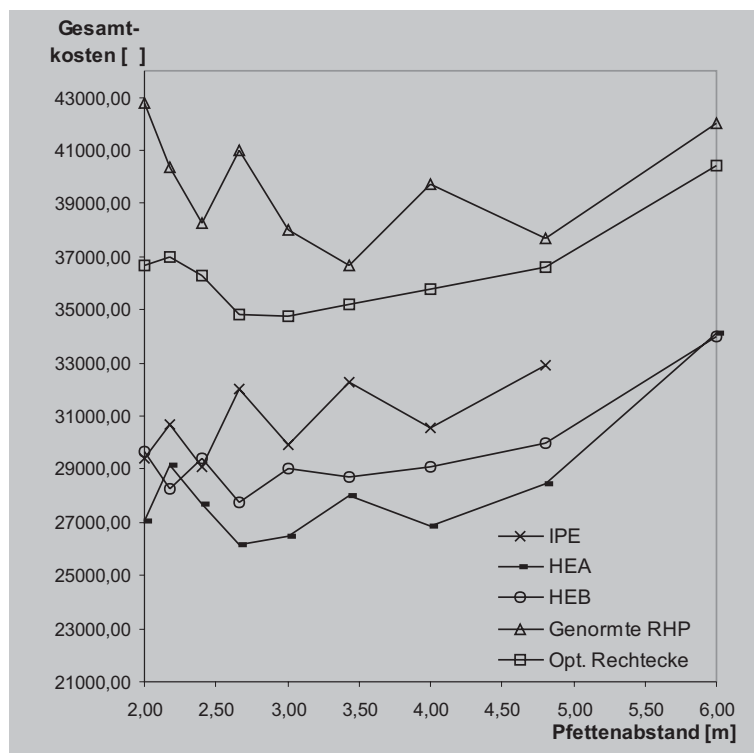


Bild 14: Verlauf der Gesamtkosten über den Pfettenabstand

Fig. 14: Dependence of total costs with respect to purlin-spacing