

**Beitrag zur Lösung ingenieurtechnischer Entwurfsaufgaben unter
Verwendung Evolutionärer Algorithmen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Steffi Schilling

geb. am 22.12.1972 in Meiningen

Weimar 2003

Gutachter: 1. Prof. Dr. Ing. Frank Werner
 2. Dr. sc. Techn. Josef Trabert
 3. Prof. Dr. Ing. Jörg Lange

Tag der Disputation: 18.06.2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielstellung und Schwerpunkte.....	2
1.3	Abgrenzungen.....	3
2	Entwurfsaufgaben im Bauwesen	4
2.1	Problemsituation.....	4
2.2	Entwurfskomponenten.....	6
2.3	Entwurfsobjekte.....	10
2.3.1	Vorbemerkungen.....	10
2.3.2	Strukturierung.....	10
2.4	Spezifische Entwurfsaufgaben des Stahlhochbaus.....	14
2.4.1	Vorbemerkungen.....	14
2.4.2	Entwurfsobjekte.....	14
2.4.2.1	Allgemeines.....	14
2.4.2.2	Entwurfsobjekt Halle.....	15
2.4.2.2.1	Besonderheiten von Hallen in der Praxis.....	15
2.4.2.2.2	Zusammenstellung von Entwurfskomponenten für Hallen.....	25
3	Überblick zu Entwurfsstrategien im Bauwesen	30
3.1	Gegenwärtiger Stand.....	30
3.2	Optimierungsbasierte Entwurfsstrategien.....	35
3.2.1	Methodik.....	35
3.2.2	Formulierung von Entwurfsaufgabe als Optimierungsaufgabe.....	35
3.2.2.1	Mathematische Formulierung von Optimierungsaufgaben.....	35
3.2.2.2	Optimierungsverfahren.....	38
3.3	Defizite.....	41
4	Optimierungsbasierte Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen	43
4.1	Vorbemerkungen.....	43
4.2	Prinzip Evolutionärer Algorithmen.....	43
4.3	Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen.....	46

4.4	Evolutionäre Algorithmen im Bauwesen.....	64
4.4.1	Besonderheiten.....	64
4.4.2	Einfluss von Einstellungen der Teilprozesse auf die Qualität Evolutionärer Algorithmen.....	66
4.5	Entwicklung hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz.....	91
4.5.1	Übersicht.....	91
4.5.2	Wachstumsorientierte Algorithmen.....	92
4.5.3	Hybride Evolutionäre Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz,....	98
4.6	Vergleich von Evolutionären Algorithmen und hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz.....	100
4.6.1	Vorbemerkungen.....	100
4.6.2	Ergebnisauswertung.....	102
4.7	Schlussfolgerung.....	104
5	Lösung ausgewählter Entwurfsaufgaben aus der Baupraxis	106
5.1	Allgemeines.....	106
5.2	Entwurf ausgewählter Bauwerke des Stahlhochbaus.....	106
5.2.1	Vorbemerkungen zum Entwurfsobjekt Halle in Stahlbauweise.....	106
5.2.2	Element Rahmen mit tragender Funktion.....	108
5.2.2.1	Einschiffiger Rahmen.....	108
5.2.2.1.1	Untersuchungen zur konstruktiven Ausbildung.....	108
5.2.2.1.2	Vergleich von Evolutionärem Algorithmus und hybridem Evolutionärem Algorithmus mit adaptivem Wachstumsansatz.....	116
5.2.2.2	Zweischiffiger Rahmen.....	119
5.2.3	Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle mit tragender Funktion.....	124
5.2.4	Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle mit tragender und bauphysikalischer Funktion.....	131
5.3	Entwurf ausgewählter Ingenieurbauwerke der Baupraxis.....	140
5.4	Zusammenfassung.....	154
6	Schlussbemerkungen	155
	Glossar	157
	Verzeichnisse	160
	Anlagen	

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bauwerke sind eigenständige, technische und oft unikate Gebilde der gebauten Umwelt. Der Charakter von Bauwerken wird geprägt durch ihre Nutzung, ihren Standort und ihre Erscheinungsform.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Errichtung von Bauwerken ist die Objektplanung, zu der die Entwurfsplanung zählt. Der Prozess Entwurfsplanung (= Entwurfsprozess) umfasst die Erarbeitung einer Entwurfslösung mit Anfertigung notwendiger zeichnerischer und verbaler Bauwerksbeschreibungen, die durch statische und ökonomische Nachweise untermauert werden.

Ingenieure stehen im Entwurfsprozess von Bauwerken vor der Aufgabe, Entwurfsvarianten zu finden, die fixierte Anforderungen an das Bauwerk erfüllen, wie:

- nutzertechnologische, bautechnische und herstellungstechnologische Bedingungen
- gesellschaftliche und standortbedingte Prämissen
- gestalterische Vorgaben
- ökonomische Forderungen.

Entwurfsaufgaben im Bauwesen zählen zur Klasse der Synthesprobleme. Eine Vielzahl an Informationen ist so zu verdichten, dass sinnvolle Entscheidungen und Abgrenzungen zur Erfüllung der Anforderungen getroffen werden können.

Im Entwurfsprozess sollte ein ganzheitlicher Anspruch an das Bauwerk, angefangen von der Planungsphase Projektentwicklung bis zur Planungsphase Abbruch, einfließen. Der gegenwärtige Trend eines Entwurfes unter Einbeziehung ganzheitlicher Aspekte ist verbunden mit einer wachsenden Anzahl zu berücksichtigender Anforderungen.

In den letzten Jahrzehnten haben sich der Kosten- und Termindruck kontinuierlich verstärkt. Die Planungsbüros und Ausführungsbetriebe sind zur Erhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit gezwungen, den Entwurfsprozess (\Rightarrow Qualität der Entwurfslösungen und Bearbeitungszeit) bzw. Herstellungsprozess (\Rightarrow Ausführungsqualität und Bauzeit) zu systematisieren und rationalisieren.

Zur Unterstützung des Entwurfsprozesses sollte der Planer über Hilfsmittel verfügen, die vor allem eine schnelle und sichere Verarbeitung von so genannten Routineprozessen ermöglichen. Das Ziel einer effektiven Gestaltung des Entwurfsprozesses ist die Erstellung und Bewertung zahlreicher Entwurfsvarianten in der zur Verfügung stehenden Zeit.

In der Gegenwart ist die Verwendung von Analyse- bzw. Bemessungssoftware mit entsprechender Hardware ein standardmäßiges Werkzeug zur Bewertung von Entwurfsvarianten. Entscheidungen zur Findung und Festlegungen von Entwurfsvarianten werden bisher hauptsächlich durch den Ingenieur getroffen. Die Qualität der Entwurfsvarianten hängt daher vor allem von der Erfahrung, der Kreativität und der Intuition des Bearbeiters ab.

Existierende Ansätze der Einbeziehung von rechnergestützter mathematischer Optimierung zur Lösungsfindung (= Synthese) scheiterten bisher an der Leistungsfähigkeit der Hardware bzw. der Qualität verfügbarer Optimierungsverfahren und deren Umsetzung in entsprechender Software.

Aus Entwurfsaufgaben formulierte Optimierungsaufgaben sind in der Regel gekennzeichnet durch:

- nichtlineare Zielfunktionen
- nichtlineare Nebenbedingungen in Form von Ungleichungen
- diskret-kontinuierliche Optimierungsvariablen.

Die Anzahl und Qualität optimierter Lösungsvarianten wird durch das verwendete Optimierungsverfahren bestimmt. Die Mehrzahl existierender Optimierungsverfahren eignet sich in der Regel zur Lösung von Optimierungsaufgaben spezieller Problemklassen, wie z.B. solcher mit linearen bzw. quadratischen Zielfunktionen. Für die Anwendung der mathematischen Optimierung in der Entwurfspraxis bedeutet diese Eingrenzung meistens eine starke Abstraktion der Realität im Optimierungsmodell. Die erzielten Ergebnisse sind oftmals für die Praxis unbrauchbar, so dass sich der Optimierungsansatz in der Entwurfspraxis bisher nicht durchsetzen konnte.

Evolutionäre Algorithmen sind Optimierungsverfahren mit keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Eigenschaften von Zielfunktionen, Nebenbedingungen und Optimierungsvariablen. Sie eignen sich zur Lösung von Optimierungsaufgaben unterschiedlichster Problemklassen und sind daher interessant und zukunftsweisend für praktische Anwendungen im Bauwesen. Des Weiteren ermöglichen die aktuellen Entwicklungen paralleler Prozessoren in der Rechentechnik eine rationelle Umsetzung evolutionärer Prozesse.

Bisher fehlen allerdings konkrete Aussagen, inwieweit sich Evolutionäre Algorithmen als Optimierungsverfahren im Entwurfsprozess eignen. Daher sind Evolutionärer Algorithmen zu untersuchen, hinsichtlich der:

- Einstellungen algorithmierter Teilprozesse
- vorhandenen Schwachstellen und Anwendungsgrenzen.

1.2 Zielstellung und Schwerpunkte

Die vorliegende Arbeit unternimmt den Versuch, existierende Erkenntnisse zur Automatisierung spezifischer Syntheseprozesse, als einen Schritt der Rationalisierung des Entwurfsprozesses, aufzubereiten und umzusetzen. Hierzu wird die Anwendung Evolutionärer Algorithmen als Optimierungsverfahren zur Lösung von Entwurfsaufgaben analysiert und bewertet.

Die wesentlichen Problemstellungen lassen sich wie folgt formulieren:

- **Anpassung** und **Erweiterung** Evolutionärer Algorithmen als Optimierungsverfahren zur Lösung von Entwurfsaufgaben:

-
- Untersuchungen zu Einstellungen ausgewählter Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen für eine vorgegebene Entwurfsaufgabe
 - Ableitung und anwenderfreundliche Darstellung von Empfehlungen zu den Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen für die Anwendung Evolutionärer Algorithmen in der Entwurfspraxis
 - Entwicklung von hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz
 - **Anwendung** von Evolutionären Algorithmen bzw. von hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz exemplarisch an Entwurfsaufgaben des Stahlhochbaus:
 - Bearbeitung ausgewählter objektbezogener Entwurfsaufgaben des Stahlhochbaus mit unterschiedlichen Qualitäten und Quantitäten der Entwurfskomponenten
 - Vergleich zwischen erzielten Entwurfsergebnissen mit vorliegenden Ergebnissen aus Veröffentlichungen sowie existierenden Objekten der Praxis
 - **Bewertung** von Evolutionären Algorithmen und hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz hinsichtlich ihrer Eignung als Optimierungsverfahren zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Stahlhochbau:
 - Diskussion der Untersuchungsergebnisse und Bewertung hinsichtlich Zuverlässigkeit und Effizienz
 - Darlegung der Anwendungsgrenzen und Beurteilung ihrer praktischen Nutzbarkeit

1.3 Abgrenzungen

Ein so umfangreiches Themengebiet mit Variationsmöglichkeiten von verfahrensbezogenen Einstellungen und Entwurfsgrößen lässt sich nur betrachten, indem Eingrenzungen auf spezielle Bereiche vorgenommen werden. Folgende Einschränkungen ergeben sich für die Arbeit:

- entwurfsorientierte Einschränkungen
 - Betrachtung von Entwurfsaufgaben ohne Einbeziehung des Herstellungsprozesses von Objekten
 - Betrachtung von ausschließlich Objekten des Stahlhochbaus
 - Begrenzung der Entwurfsziele auf vorwiegend ein Entwurfsziel
- verfahrensorientierte Einschränkungen
 - Ausschluss von detaillierten Untersuchungen zur Parallelisierung
 - Verwendung von Evolutionären Algorithmen mit den Prinzipien Genetischer Algorithmen.

2 Entwurfsaufgaben im Bauwesen

2.1 Problemsituation

Die Verwendung des Begriffes Entwurf ist nicht eindeutig. In den Fachgebieten werden unterschiedliche Definitionen verwendet. Büttner und Hampe [BUE77] haben Definitionen mit unterschiedlichen Interpretationen zur Entwurfsproblematik zusammengestellt. Conrad [CON98] definiert das Entwerfen als Prozess synthetisch intuitiven Denkens des Ingenieurs. Das Ergebnis dieses Prozesses sind Entwurfsvarianten, die vorgegebene Anforderungen erfüllen müssen.

Im Bauwesen wird der Entwurf allgemein als die Vorbereitung für das Herstellen eines baulichen Objektes oder Prozesses beschrieben und umfasst die gedankliche und materielle Erarbeitung einer technischen Konzeption auf Grundlage einer Aufgabenstellung [MOR87]. In der vorliegenden Arbeit wird diese Definition für den Entwurf verwendet.

Aus zahlreichen Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen im Bereich Maschinenbau [CON98, PAH97, GER98] zu den Themen „Entwerfen“ und „Konstruieren“ resultieren Richtlinien [VDI2221, VDI2222], die partiell auf das Bauwesen anwendbar sind.

In der vorindustriellen Zeit gab es den Baumeister mit einem ganzheitlichen vernetzten Denken, Planen und Handeln als Generalisten. Er war Architekt, Städteplaner, Landschaftsplaner, Vermesser und Bauingenieur zugleich. Seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts ist der Bauprozess durch eine Einteilung in die Berufsgruppen Architekt, Ingenieur, Betriebswirt, Bauunternehmer und Handwerker gekennzeichnet. Eine Zunahme der Spezialisierungen ist zu verzeichnen, wobei der Bauingenieur sich vorwiegend mit den Belangen der Tragkonstruktion beschäftigt. Das zeigt sich auch durch eine Spezifizierung in Architektenentwurf und Ingenieurentwurf. Die Unterschiede liegen nach Abbildung 2.1 in den Tätigkeitsfeldern der Ausführenden.

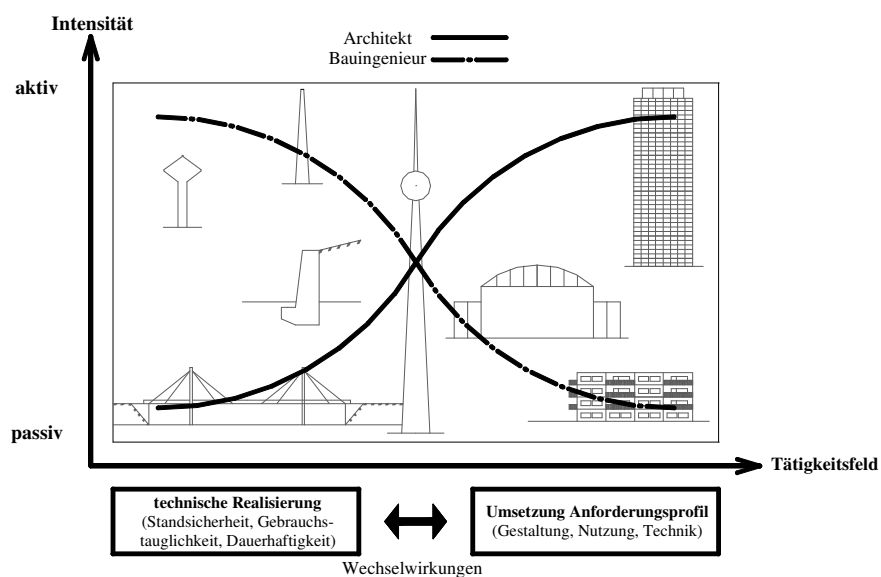


Abbildung 2.1: Tätigkeitsfelder von Architekt und Bauingenieur (nach[WAP02, BUE77])

Der Architekt beschäftigt sich meist mit den funktionalen und ästhetischen Elementen im Entwurf. Der Bauingenieur ist vorwiegend für die technische Umsetzung verantwortlich. Der Entwurf von Bauwerken enthält beide Elemente, die in Wechselwirkungen zueinander stehen.

Detailliert beschreiben [FIS90, FER93, POL87, WAP02, KOL90] die Besonderheiten architektonischer und ingenieurtechnischer Entwürfe. Fischer [FIS90] und Kollár [KOL90] versuchen die Vielseitigkeit der Entwurfsarbeit eines Ingenieurs darzulegen. Sie weisen darauf hin, dass die Klärung technischer Fragestellungen wesentlich den Entwurfsalltag des Ingenieurs bestimmt. Weiterhin zeigen Fischer [FIS90] und Kollár [KOL90], dass es für Ingenieure unerlässlich ist, sich mit den Grundlagen der Gestaltung zu beschäftigen. Die Autoren betrachten das ingenieurtechnische Entwerfen teils als Wissenschaft und teils als Kunst.

Einen umfassenden Überblick über die geschichtliche Entwicklung des ingenieurtechnischen Entwerfens und der Bauingenieurkunst liefern [GRA97, RIC98, JES96].

Zur Lösung von Entwurfsaufgaben werden zwei Typen von *Entwurfsstrategien* in Abbildung 2.2 unterschieden.

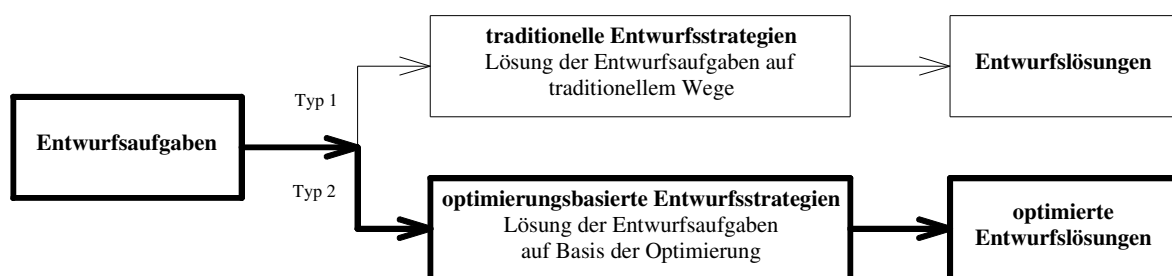


Abbildung 2.2: Entwurfstrategien

Allgemeingültiges Ziel von Entwurfstrategien ist das Finden der „besten“ Entwurfslösung aus einer Menge adäquater Alternativlösungen unter Berücksichtigung von Entwurfsanforderungen. Die Bereitstellung und Bewertung einer Vielzahl von Entwurfsvarianten sollte in kurzer Zeit realisierbar sein.

Die *traditionellen Entwurfstrategien* sind gekennzeichnet durch die Kreativität und Lernfähigkeit des Entwerfenden. Entwurfsentscheidungen werden meist intuitiv bzw. gewohnheitsbedingt getroffen. Die Festlegung von Entwurfsvarianten und ihre Bewertung haben somit einen subjektiven Charakter, da die Erfahrungen und persönlichen Veranlagungen des Bearbeiters entscheidend einfließen. Bei einfachen Entwurfsaufgaben sind diese Strategien noch immer erfolgreich. Für umfangreiche Aufgabenstellungen ist nur ein beschränkter Einsatz möglich, da in der zur Verfügung stehenden Zeit nur eine begrenzte Zahl von Entwurfsvarianten bearbeitet werden kann.

Die *optimierungsbasierten Entwurfstrategien* beruhen auf der Formulierung von Optimierungsaufgaben im Entwurf. Im Gegensatz zu den traditionellen Entwurfstrategien erfolgt daher die Umsetzung der Entwurfsanforderungen in einem mathematischen Optimierungsmodell. In der Regel sind die formulierten Optimierungsaufgaben gekennzeichnet durch nichtlineare Zielfunktionen, nichtlineare Nebenbedingungen in Form von Gleichungen bzw. Unglei-

chungen sowie diskret-kontinuierliche Optimierungsvariablen. Zur Lösung der Optimierungsaufgaben existieren Verfahren, die eine Vielzahl von Lösungsvarianten unabhängig von der Kreativität des Entwerfenden erzeugen. Die Qualitäten der Lösungen hängen im Wesentlichen von den Fähigkeiten des verwendeten Optimierungsverfahrens ab.

Bisher finden die optimierungsbasierten Entwurfsstrategien kaum Anwendung in der Baupraxis, da der Aufwand zur Aufbereitung von Strategieparametern sehr groß sein kann und oftmals keine entsprechende Hard- und/oder Software zur Verfügung steht.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den Bereich des Ingenieurentwurfes unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategien, bei dem die technische Entwicklung und Realisierung von Entwurfsalternativen unter den Bedingungen der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit überwiegt.

2.2 Entwurfskomponenten

Die Bearbeitung und Lösung von Entwurfsaufgaben wird durch eine Vielzahl von Anforderungen, festgelegt durch subjektive Entscheidungen von Architekt, Ingenieur, Bauherr u.a., beeinflusst (Abb. 2.3).

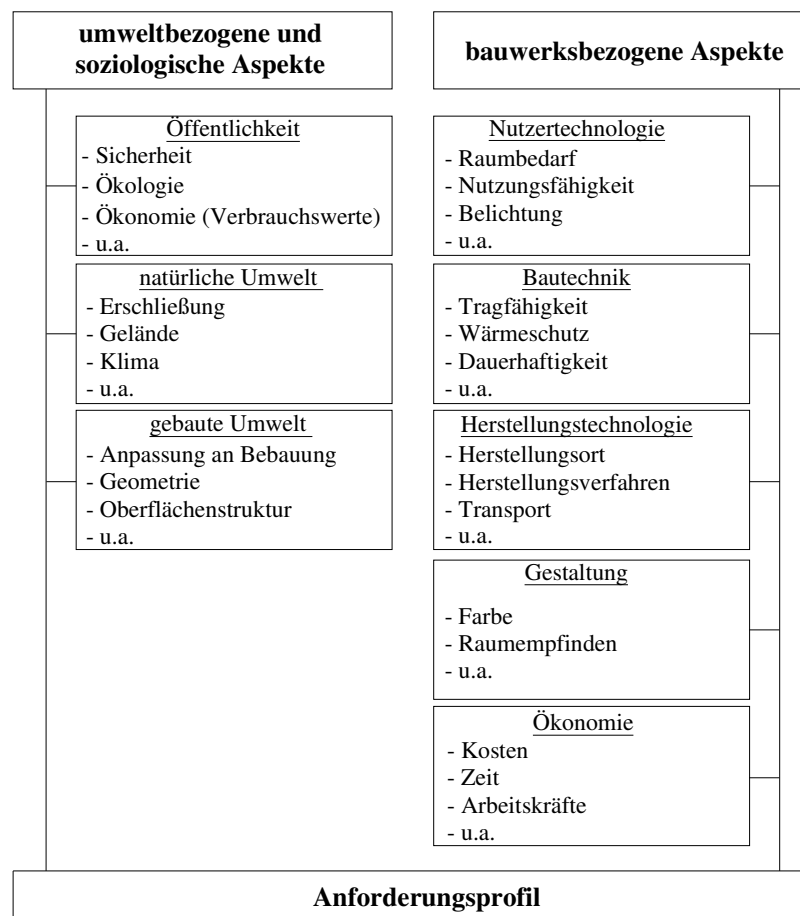


Abbildung 2.3: Anforderungsprofil für Entwurfsaufgaben im Bauwesen

Die Anforderungen werden nach umweltbezogenen, soziologischen und bauwerksbezogenen Aspekten klassifiziert und ergeben das sogenannten Anforderungsprofil.

Einen wesentlichen Einfluß auf den Entwurf haben die Anforderungen unter dem Aspekt der Nutzung. Sie definieren den Zweck von Bauwerken.

Weiterhin bestehen Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen verschiedener Aspekte, z.B. bewirken klimabezogene Anforderungen wie Klimazone und Standort unter dem Aspekt natürliche Umwelt die Berücksichtigung von Anforderungen der Dauerhaftigkeit, wie Korrosionsschutz oder Holzschutz unter dem Aspekt Bautechnik.

Aus dem Anforderungsprofil lassen sich die Entwurfskomponenten, die allgemein als *Stellgrößen*, *Bewertungsgrößen* und *Entwurfsbedingungen* bezeichnet werden, ableiten (Abb. 2.4).

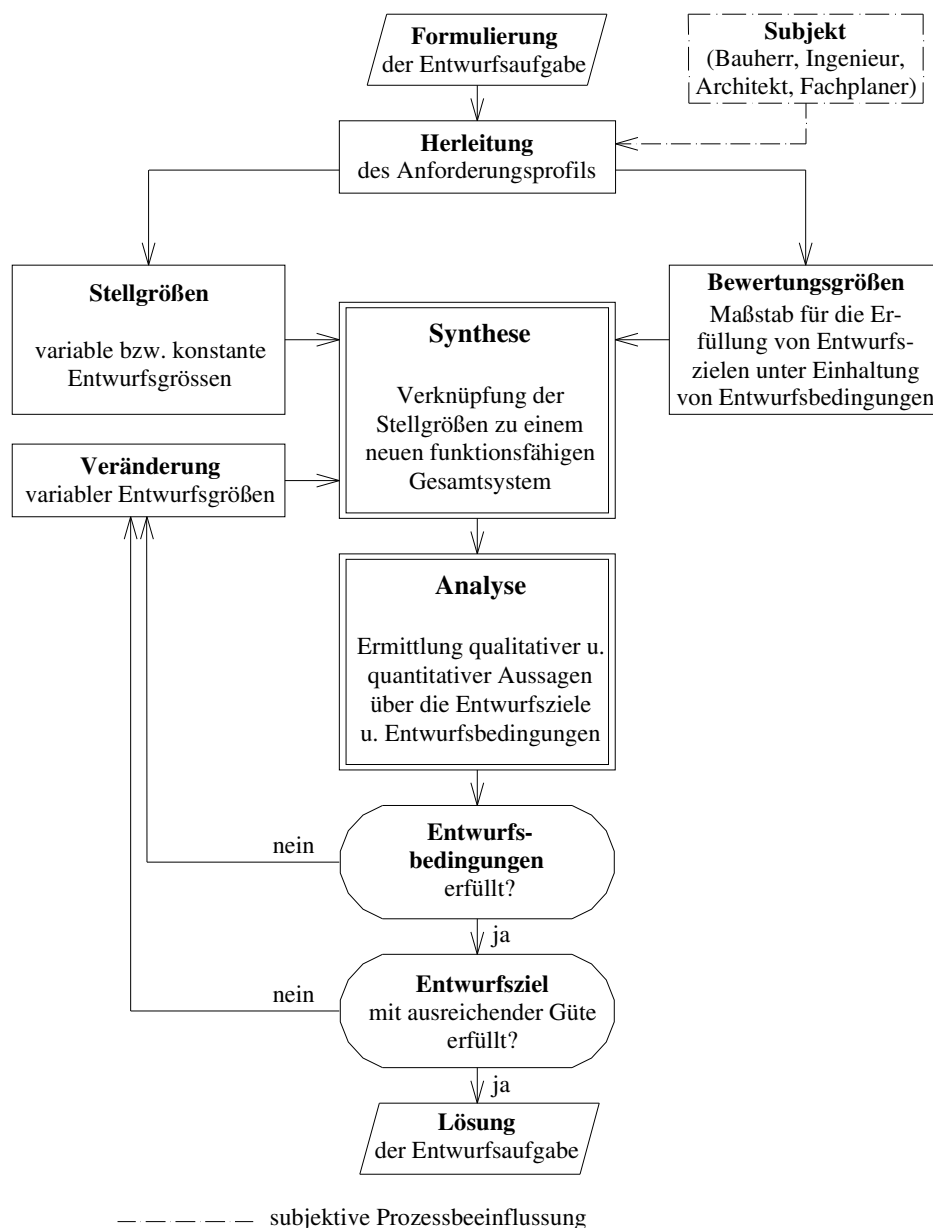


Abbildung 2.4: Entwurfsprozess mit Stell-, Bewertungsgrößen und Entwurfsbedingungen

Unter *Stellgrößen* sind variable und konstante Entwurfsgrößen zu verstehen. Variable Entwurfsgrößen sind zur Variation freigegebene Größen der Entwurfsaufgabe. Hingegen beinhalten konstante Entwurfsgrößen Angaben, die zur Lösung der Entwurfsaufgabe notwendig sind und im Laufe der Bearbeitung der Entwurfsaufgabe nicht verändert werden. Der Unterschied zwischen variablen und konstanten Entwurfsgrößen besteht in der späteren mathematischen Umsetzung.

Eine Möglichkeit, Stellgrößen zu klassifizieren, ist bei Hupfer [HUP70] zu finden. Er unterteilt die Stellgrößen in die Gruppen: Typ der Konstruktion, Topologie, Materialwerte, Geometrie und Querschnittswerte.

In der vorliegenden Arbeit wird die Einteilung Hupfers [HUP70] aufgegriffen und erweitert. In Abbildung 2.5 werden Stellgrößen nach folgenden Aspekten unterschieden:

- *Standort, Nutzung und Herstellung* werden bei praktischen Entwurfsaufgaben üblicherweise als konstante Entwurfsgrößen vorgegeben.
- Die Stellgrößen unter den Aspekten *Form, Topologie, Material* und *Konstruktion* werden vor allem durch Intuition, Phantasie und vorhandene Erfahrung des Ingenieurs festgelegt
- *Geometrische* Stellgrößen sind in der Praxis die am häufigsten variierten Größen, d.h. variable Entwurfsgrößen, um ein definiertes Entwurfsziel zu erreichen. Weiterhin stellen geometrische Stellgrößen einen Spezialfall der Form dar, da eine Variation des Querschnittes zu einer Änderung der Form führt.

Eine Überführung von variabler Entwurfsgröße in konstante Entwurfsgröße erweist sich oftmals als zweckmäßig, wenn eine Eingrenzung der Entwurfsaufgaben erreicht werden soll. Allerdings führt eine zu starke Eingrenzung zu einer Reduzierung der Variationsvielfalt des Entwurfsraumes.

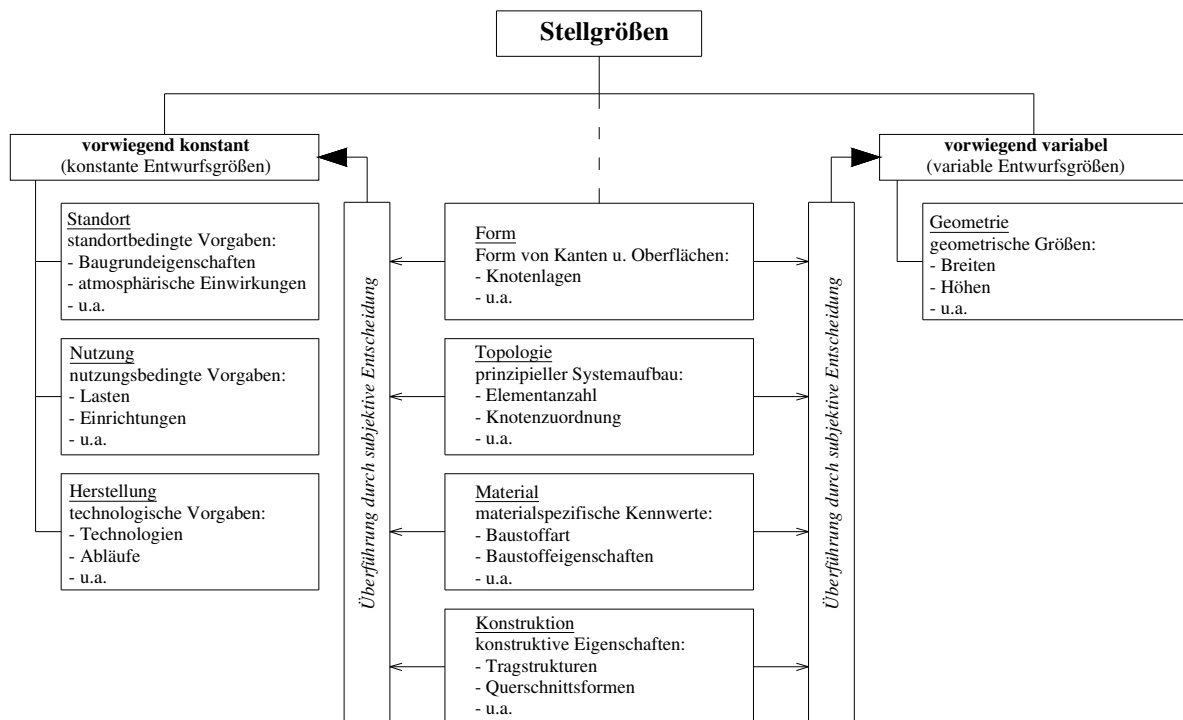


Abbildung 2.5: Ausgewählte Stellgrößen von Entwurfsaufgaben

Die *Bewertungsgrößen* sind der Maßstab für die Erfüllung festgelegter Entwurfsziele unter Einhaltung formulierter Entwurfsbedingungen.

Häufig vorkommende Entwurfsziele (allein oder kombiniert) im Bauwesen sind die Minimierung von Gewicht (Tragwerk, Bauwerk), Materialverbrauch, Herstell- und Betriebskosten, Verformungen, Transportweg sowie Bauzeit. Eine Kombination dieser Entwurfsziele entspricht den Belangen des Entwurfszieles „nachhaltiges Bauen“ mit der Betrachtung des Entwurfsobjektes unter ganzheitlichen Aspekten.

„Nachhaltiges Bauen strebt für alle Phasen des Lebenszykluses von Gebäuden – von der Planung, der Erstellung über die Nutzung und Erneuerung bis zum Rückbau – eine Minimierung des Verbrauchs von Energie und Ressourcen sowie eine möglichst geringe Belastung des Naturhaushaltes an.“ [BMVBW01], S. 1

Weitere Erläuterungen zum Thema Nachhaltigkeit sind in [WAP02, VBI01, SCH01d] zu finden.

Die *Entwurfsbedingungen* sind die oberen und unteren Schranken der variablen Entwurfsgrößen und Einschränkungen aus umweltbezogenen, soziologischen bzw. bauwerksbezogenen Aspekten für die Lösung einer Entwurfsaufgabe.

Die Entwurfsziele und Entwurfsbedingungen werden nach den gleichen Aspekten wie das Anforderungsprofil strukturiert (Abb. 2.6).

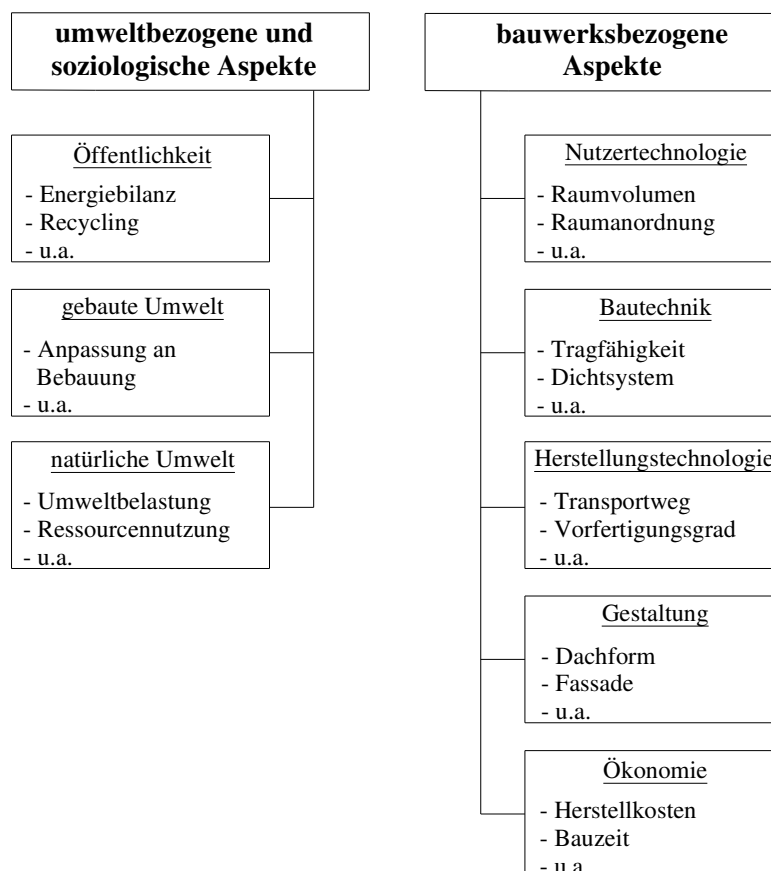


Abbildung 2.6: Ausgewählte Entwurfsziele und Entwurfsbedingungen von Entwurfsaufgaben

Zusammenfassend lässt sich das Vorgehen bei der Lösung einer Entwurfsaufgabe wie folgt definieren:

Stellgrößen werden so variiert, dass formulierte Entwurfsziele, unter Einhaltung festgelegter Entwurfsbedingungen, mit ausreichender Güte erfüllt werden.

Eine Einstufung der Entwurfskomponenten in quantifizierbare Größen (Querschnittsabmessungen Elementanzahl, Kosten, Materialverbrauch, Zeit, Transportweg u.a.) und qualifizierbare Größen (Dachform, Dichtsystem, Baustoffart, Raumanordnung u.a.) ist möglich.

2.3 Entwurfsobjekte

2.3.1 Vorbemerkungen

Im Lösungsprozess von Entwurfsaufgaben sind zahlreiche Anforderungen zu berücksichtigen (Abschnitt 2.2), die in einem nach Aspekten gegliederten Anforderungsprofil (Abb. 2.3) zusammengefasst werden.

Im Bauwesen werden objekt- und prozessbezogene Entwurfsaufgaben unterschieden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit objektbezogenen Entwurfsaufgaben. Die weiteren Ausführungen nehmen hierauf Bezug.

2.3.2 Strukturierung

Zur Bearbeitung objektbezogener Entwurfsaufgaben ist die Abbildung des realen Entwurfsobjektes in einem Modell erforderlich. Hierzu wird eine Strukturierung der Entwurfsobjekte in Systemstufen und Funktionen gewählt.

Systemstufen

In der Literatur nimmt Thanh [THA85] im Bereich der optimierungsbasierten Entwurfsstrategien eine Differenzierung nach Bauwerkselement, Bauwerk und Bauwerkssystem vor. Diese Einteilung wird aufgegriffen und in Form von Systemstufen (Abb. 2.7) verwendet.

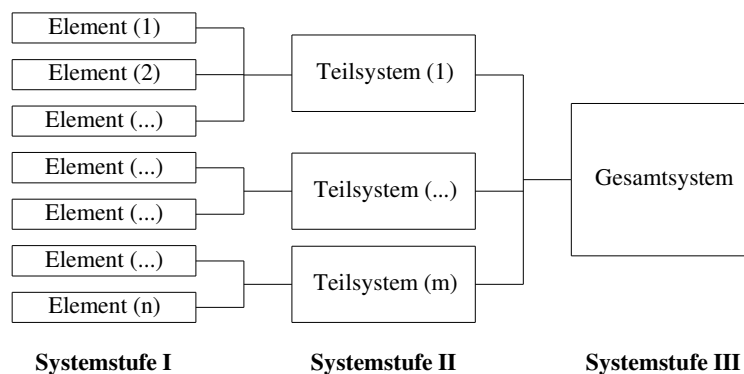


Abbildung 2.7: Systemstufen in Entwurfsobjekten

- Systemstufe I – Element

Ein Element ist grundlegendes Einzelteil eines Ganzen [LAN]. Bei diesem Entwurfsaufgabentyp wird ein eigenständiges Bauteil (z.B. Querscheibe, Unterzug) aus einem Entwurfsobjekt herausgelöst und unter Definition idealisierter Randbedingungen (z.B. Kopplungs- bzw. Lagerungsbedingungen, Lasten) unabhängig von den anderen Bauteilen des Entwurfsobjektes entworfen.

Die variablen und konstanten Entwurfsgrößen sind in den meisten Fällen überschaubar, so dass derartige Entwurfsaufgaben mit logischem Vorgehen (Ingenieurerfahrung, Kombinationsbildung der variablen Entwurfsgrößen) in kurzer Zeit und erträglichem Rechenaufwand gelöst werden können. Die Qualität der Entwurfslösungen wird bestimmt durch die Vorgehensweise im Entwurfsprozess sowie durch die eingesetzten Hilfsmittel und Werkzeuge.

- Systemstufe II – Teilsystem

Ein Teilsystem ist eine funktionale Einheit, bestehend aus mehreren Bauteilen, die zur Ausführung einer bestimmten Aufgabe oder einer Reihe von Aufgaben dient [LAN]. Die zusammenhängende Untersuchung mehrerer Bauteile eines Entwurfsobjektes ist Kennzeichen dieser Entwurfsaufgaben. Verbindungen und Beziehungen von Bauteilen sind zu berücksichtigen.

In der Regel werden mehr variable und konstante Entwurfsgrößen als bei Systemstufe I definiert. Der Entwurfsraum weitet sich aus, die Formulierung von Entwurfszielen wird umfangreicher und die Anzahl der Entwurfsbedingungen vergrößert sich. Letzteres führt zu einer Unüberschaubarkeit der Bereiche zulässiger Lösungen im Entwurfsraum.

Erfahrung, Intuition und Routine des Bearbeiters, kombiniert mit geeigneten Hilfsmitteln und Werkzeugen, sind notwendig, um zufriedenstellende Ergebnisse in der zur Verfügung stehenden Entwurfszeit zu erzielen.

- Systemstufe III – Gesamtsystem

Alle Bauteile bzw. Teilsysteme eines Entwurfsobjektes werden bei Systemstufe III berücksichtigt. Unzählige Verknüpfungen, Beziehungen und Abhängigkeiten der Bauteile bzw. Teilsysteme sind dabei zu formulieren. Dies führt in den meisten Fällen zu einem unakzeptablen Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei der Formulierung und Bearbeitung der Entwurfsziele und -bedingungen von Entwurfsaufgaben. Selbst größte Erfahrung und Intuition des Entwerfenden in Verbindung mit der Nutzung modernster Lösungsansätze und aktuellster Rechentechnik führen zu einem unwirtschaftlichen Bearbeitungsaufwand.

Es sind Einschränkungen bei der Definition der variablen und konstanten Entwurfsgrößen notwendig, um die Defizite von Systemstufe III zu reduzieren. Die Auswahl der variablen und konstanten Entwurfsgrößen ist dahingehend vorzunehmen, dass das Gesamtsystem unter einem ausgeglichenen Aufwand-Nutzen-Verhältnis hinreichend beschrieben wird. Als zweckmäßig zur Bestimmung relevanter Entwurfsgrößen erweist sich die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse.

Ein erheblicher Forschungsbedarf für Systemstufe III besteht vor allem im Bereich neuer rechnergestützter Lösungsansätze und der Weiterentwicklung von Hard- und Software.

Funktionen

Eine weitere Möglichkeit ist die Klassifizierung der Bauteile eines Entwurfsobjektes nach Funktionen. Wesentliche Funktionen von Bauteilen sind:

- tragende Funktion
- bauphysikalische Funktion
- nutzertechnologische Funktion
- herstellungstechnologische Funktion
- gestalterische Funktion.

Die vorliegende Arbeit ist im Bereich objektbezogener Entwurfsaufgaben angesiedelt, daher wird die herstellungstechnologische Funktion, vorwiegend durch Prozesse gekennzeichnet, nicht näher betrachtet. Ebenso wird die gestalterische Funktion ausgegrenzt, da diese schwerpunktmäßig im Aufgabenfeld der Architekten liegt.

Die weiteren Betrachtungen beschränken sich auf Bauteile mit tragender, bauphysikalischer bzw. nutzertechnologischer Funktion.

- Bauteil mit tragender Funktion

Die Bauteile mit tragender Funktion sind für die Aufnahme, Weiterleitung und Abtragung der Einwirkungen in den Baugrund verantwortlich und werden in folgende Kategorien eingestuft:

- Bauteil mit primärer Tragfunktion
- Bauteil mit sekundärer Tragfunktion
- Bauteil mit tertiärer Tragfunktion.

Petersen [PET93] verwendet diese Einteilung ebenfalls, jedoch mit etwas abweichender Definition und Zuordnung.

- Bauteil mit primärer Tragfunktion

Bauteile, die alle vorhandenen Einwirkungen aus Umwelt und Nutzung aufnehmen und in die Fundamente weiterleiten. Eine Beschädigung dieser Bauteile könnte den Einsturz eines Entwurfsobjektes (Bauwerk) nach sich ziehen.

(z.B. Halle: Hauptrahmen; Giebelwand)

- Bauteil mit sekundärer Tragfunktion

Bauteile, die Dach- und Fassadenkonstruktion tragen und die Einwirkungen an Bauteile mit primärer Tragfunktion abgeben. Eine Beschädigung von Bauteilen mit sekundärer Tragfunktion könnte zu deren Versagen führen, jedoch ohne Beeinträchtigung der Bauteile mit primärer Tragfunktion.

(z.B. Halle: Pfetten, Wandriegel, Kranbahnkonsole)

- Bauteil mit tertiärer Tragfunktion

Bauteile mit raumabschließender bzw. funktioneller Funktion, sofern sie nicht zu den Bauteilen mit primärer oder sekundärer Tragfunktion zählen. Eine Beschädigung dieser Bauteile führt zu keinen größeren Schadensfolgen.

(z.B. Fassadenelemente)

- Bauteil mit bauphysikalischer Funktion

Die Bauteile mit bauphysikalischer Funktion können nach folgenden Unterfunktionen gegliedert werden:

- Dämmfunktion (Vermeidung/Behinderung von Wärmeströmen)
- Schutzfunktion (Schutz vor Schall und/oder Brand)
- Dichtfunktion (Schutz vor Feuchtigkeit)

- Bauteil mit nutzertechnologischer Funktion

Der Entwurf von Bauteilen mit nutzertechnologischer Funktion wird vorwiegend durch spezialisierte Ingenieure vorgenommen. Aus diesem Grunde soll in der vorliegenden Arbeit gegebenenfalls die Berücksichtigung von Bauteilen mit nutzertechnologischer Funktion erfolgen.

In zahlreichen Fällen kann keine klare Trennung zwischen den Funktionen vorgenommen werden, da von vielen Bauteilen mehrere Funktionen (z.B. Sandwichelemente: tragende und bauphysikalische Funktion) gleichzeitig wahrgenommen werden.

In Abbildung 2.8 sind symbolisch ausgewählte Entwurfsaufgaben nach den zuvor beschriebenen Systemstufen und Funktionen dargestellt. Bei Anwendung einer optimierungsbasierten Entwurfsstrategie in Abschnitt fünf wird partiell auf diese Einteilung zurückgegriffen.


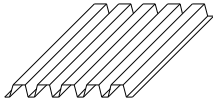
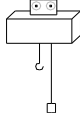
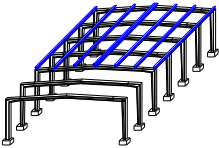
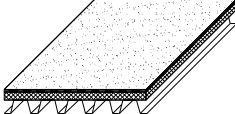
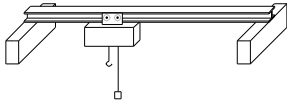
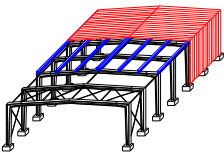
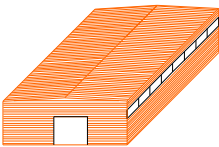
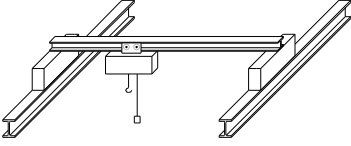
Fkt. Syst.	Bauteile mit tragender Funktion	Bauteile mit bauphysikalischer Funktion	Bauteile mit nutzertechnologischer Funktion
Systemstufe I - Element -	 Rahmen	 Trapezprofil	 Krankatzte
Systemstufe II - Teilsystem -	 Rahmen+Pfeffen+Fundamente	 Aufbau einer Hüllkonstruktion	 Kranbrücke
Systemstufe III - Gesamtsystem -	 Bauteile einer Halle mit Tragfunktion (= Tragelemente)	 Hüllkonstruktion einer Halle	 Bauteile einer Kranbahn

Abbildung 2.8: Strukturierung von Entwurfsaufgaben nach Systemstufen und Funktionen

2.4 Spezifische Entwurfsaufgaben des Stahlhochbaus

2.4.1 Vorbemerkungen

Die Anwendung einer optimierungsbasierten Entwurfsstrategie wird im Abschnitt fünf an zwei Hallen in Stahlbauweise demonstriert. Für diese Entwurfsobjekte sind ausreichende Erfahrungen über zweckmäßige Systeme und statisch-konstruktive Durchbildung vorhanden. In diesem Zusammenhang wurde eine Umfrage [SCH00] bei den marktführenden Hallenherstellern in Deutschland durchgeführt. Die Ergebnisse der Befragung dienen als Vergleichs- und Bewertungsgrundlage in Abschnitt fünf.

2.4.2 Entwurfsobjekte

2.4.2.1 Allgemeines

Die Stahl- und Leichtmetallerzeugnisse werden in vielfältigster Art und Weise im Bauwesen eingesetzt (Tab. 2.1 und Abb. 2.9).

Tabelle 2.1: Verwendung der Stahl- und Leichtbauerzeugnisse (nach [DSTV00a])

Stahlhochbau	Sonstige Erzeugnisse
<ul style="list-style-type: none"> - Skelettbaukonstruktionen - Stütz- und Trägerkonstruktionen - Hallen mit und ohne Einbauten - Türme, Gittermaste und Gerüstkonstruktionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Brücken und Brückenbauelemente - Stahlwasserbau - Fertigteilmbauten - Fertigteilmbauten aus Profilblechen - Konstruktionen für Tunnel und Schachtbau - Schalungsgerüste / sonstiges Schalungsmaterial - Stahlbauelemente - Bauteile aus Stahlblech - Konstruktionen aus Leichtmetall

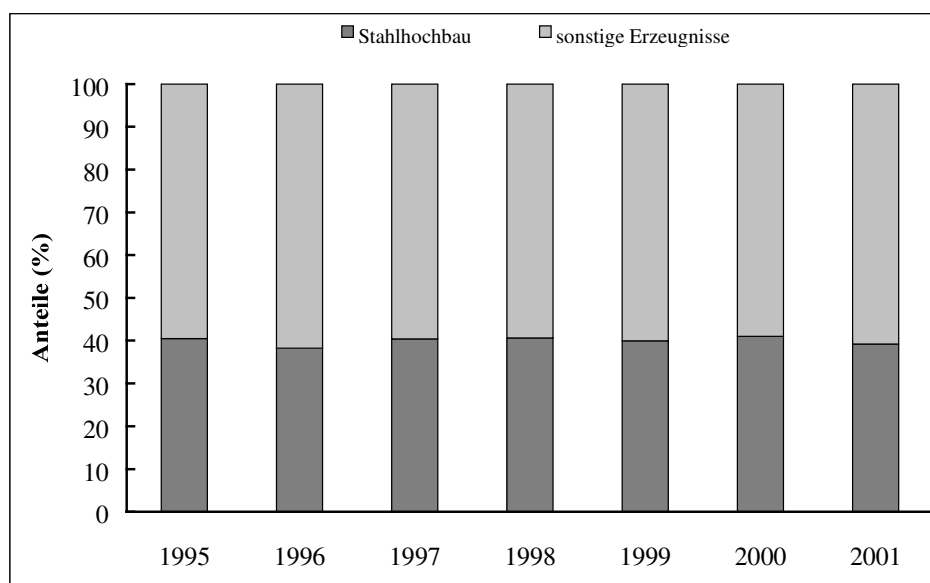


Abbildung 2.9: Anteile von Stahlhochbau und sonstigen Erzeugnissen [SBA02]

Danach bleibt der Bereich des Stahlhochbaus in den Jahren 1995 bis 2001 nahezu konstant mit 40% der gesamten Stahl- und Leichtbauerzeugnisse (Abb. 2.9).

In Abbildung 2.10 sind die Produktgruppen des Stahlhochbaus für den Zeitraum von 1995 bis 2001 dargestellt. Die einzelnen Bereiche unterliegen keinen großen Schwankungen. Es zeigt sich aus Abbildung 2.10 weiterhin, dass die Hallen nahezu ein Viertel des gesamten Stahlhochbaus einnehmen.

Der Entwurf von Stahlhallen mit einer optimierungsbasierten Entwurfsstrategie ist somit für die Praxis interessant, da damit neue Erkenntnisse über das Entwurfsobjekt Stahlhalle erlangt werden können, um diese dann letztlich für eine bessere Wirtschaftlichkeit zu nutzen.

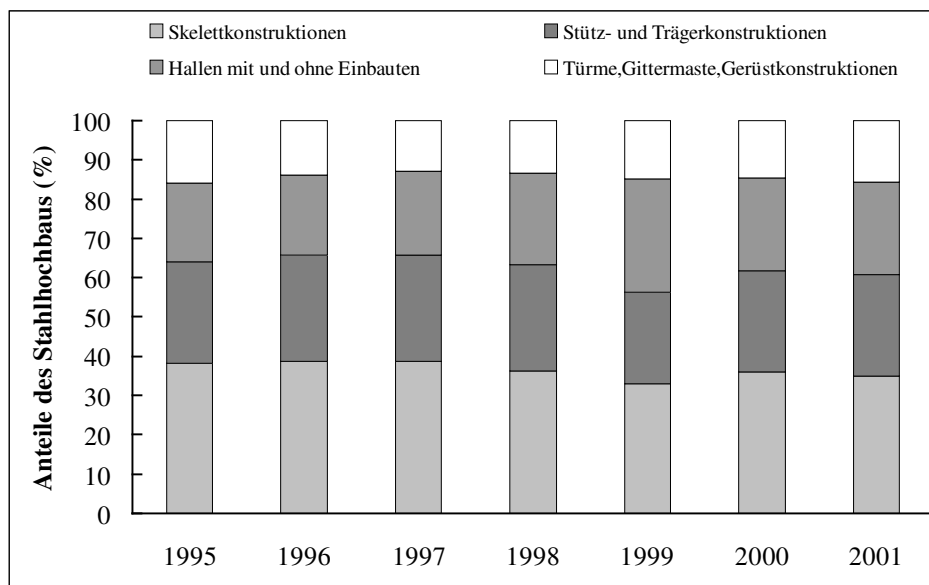


Abbildung 2.10: Anteile der Produktgruppen des Stahlhochbaus [SBA02]

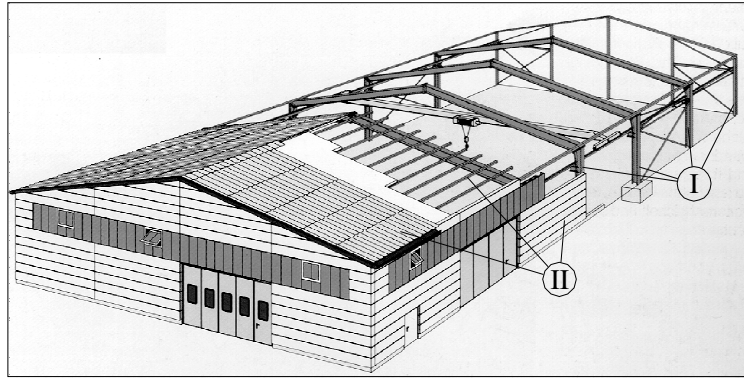
2.4.2.2 Entwurfsobjekt Halle

2.4.2.2.1 Besonderheiten von Hallen in der Praxis

Im Industriebau werden Hallen als Produktions- und Lagerhallen und im Gesellschaftsbau Sport-, Messe- und Stadthallen sowie Einkaufszentren errichtet.

Stahlhallen sind häufig Einzelbauwerke, aber auch Serienanfertigungen (Systemhallen) gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Eine typische Stahlhalle für den Industriebau zeigt die Abbildung 2.11. In der Arbeit werden Hallen mit rechteckigem Grundriss, die den weitaus dominierenden Anwendungsfall darstellen, untersucht. Hierzu wurde im Rahmen einer Umfrage [SCH00], der in Anlage I ausgearbeitete Fragebogen zu konstruktiven und statischen Gesichtspunkten des Stahlhallenbaus an 97 Hallenhersteller in Deutschland verschickt. Die nachfolgende Auswertung der Umfrageergebnisse beruht auf 34 Rückantworten für Hallen mit Spannweiten von 15 – 30 m und 26 Rückantworten für Hallen mit Spannweiten von 30 – 60 m. Die Umfrageergebnisse werden mit Aussagen verschiedener Veröffentlichungen verglichen und dienen als Vergleichsgrundlage der Entwurflösungen in Abschnitt fünf.



I – Bauteile mit primärer Tragfunktion (= Primärtragelemente)

II - Bauteile mit sekundärer bzw. tertiärer Tragfunktion (= Sekundär- bzw. Tertiärtragelemente)

Abbildung 2.11: Typische Konstruktion einer einschiffigen Halle mit rechteckigem Grundriss [DON]

Primärtragelemente

- statisch-konstruktive Durchbildung

Die Primärtragelemente von Hallen sind gewalzte bzw. geschweißte Vollwandkonstruktionen mit größtenteils I-Querschnitt, die gegenüber den Fachwerkkonstruktionen den Vorteil eines geringeren Fertigungsaufwandes haben. Allerdings weisen Vollwandkonstruktionen meist einen höheren Materialverbrauch auf. Dieser Nachteil wird teilweise durch Ausbildung von Stegunterbrechungen (Waben-, Lochträger) und Vouten (Anpassung der Querschnittsform der Querscheiben an den Momentenverlauf) aufgehoben.

Die vorzugsweise verwendeten Systeme primärer Tragelemente einschiffiger Stahlhallen sind in Abbildung 2.12 zusammengestellt.

Rahmensysteme	<p>Zweigelenrahmen Dreigelenrahmen eingespannter Rahmen</p>
Stützen-Binder-Systeme	<p>Binder auf eingespannten Stützen Binder auf gelenkig gelagerten Stützen mit Aussteifung</p>
Sondersysteme	<p>Seiltragwerk mit Abspannung Raumfachwerk auf eingespannten Stützen</p>

Abbildung 2.12: Primärtragelemente von Stahlhallen [FUE89]

Füg [FUE89] verweist auf Entscheidungshilfen für den planenden Ingenieur zur Wahl von Systemen primärer Tragelemente bezüglich einer Reduzierung des Materialaufwandes. Für typisierte Industriehallen liegen entsprechende Vergleichsuntersuchungen vor. Im Fall individueller Konstruktionen des Industriebaus sind Abschätzungen notwendig.

In den meisten Fällen werden Rahmen verschiedener statischer Randbedingungen für ein- und mehrschiffige Hallen verwendet.

Die statische und konstruktive Ausbildung der Rahmen hängt unter anderem von folgenden Faktoren ab:

- Nutzung (geometrische Abmessungen der Halle, Verkehrslasten u.a.)
- Standort (Einwirkungen, Baugrund u.a.)
- Herstellung (Transport, Montagetechnologien u.a.).

Gegenüber Stützen-Binder-Systemen haben Rahmen den Vorteil, dass durch die biegesteife Eckverbindung die Biegebeanspruchungen auf Riegel und Stiel verteilt wird. Daraus resultiert ein günstigeres Tragverhalten, auf das in aktuellen Veröffentlichungen [SCH95c, WER99, PAS96] eingegangen wird.

In der Praxis wird für einschiffige Hallen mit Spannweiten von 15 bis 60 m am häufigsten der Zweigelenrahmen verwendet (Abb. 2.13).

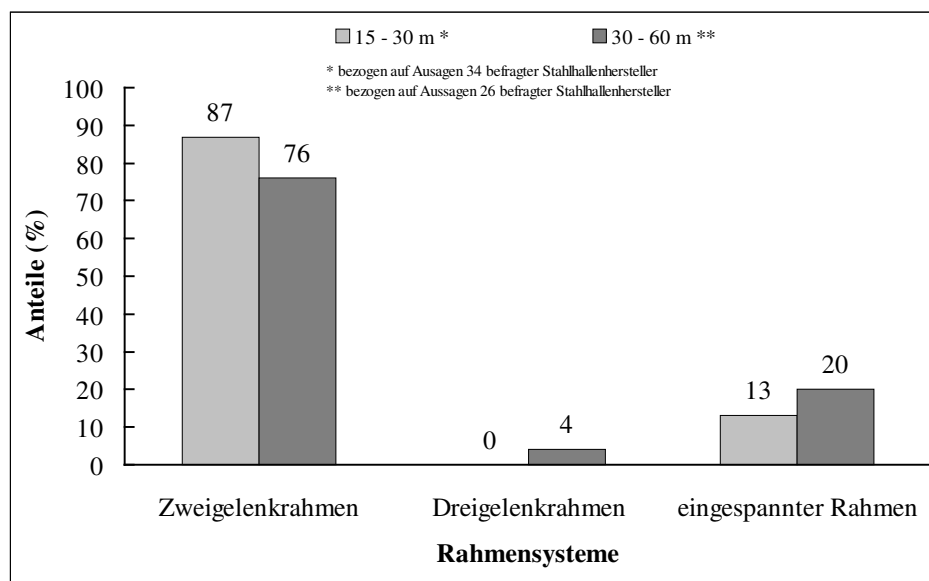


Abbildung 2.13: Ergebnisse der Umfrage zu Rahmensystemen [SCH00]

In den Veröffentlichungen [SCH98b, KRU98, SCH95c, FUE89] wird der Zweigelenrahmen auch als die Vorzugslösung bezeichnet. Als wesentliche Vorteile dieses Rahmentyps sind zu nennen:

- geringe Fundamentabmessungen
- geringer Aufwand für Fußpunktausbildung der Stiele
- Eignung für leichten und mittelschweren Kranbetrieb.

Füg [FUE89] und Scheer [SCH95c] beschreiben als typisches Merkmal von Zweigelenrahmen die Verjüngung der Stiele zum gelenkig gelagerten Fußpunkt aus materialwirtschaftlichen und gestalterischen Gründen. In diesem Zusammenhang verweist Werner [WER99] auf damit verbundene Auswirkungen, wie die Veränderung von Steifigkeitsverteilung und Verformungsverhalten.

Dagegen bewertet Schroeter [SCH98b] konische Rahmenstiele als eher selten. Die Meinung von Schroeter [SCH98b] wird durch die Ergebnisse der Umfrage [SCH00] bestätigt. Aus Abbildung 2.14 wird ersichtlich, dass konische Rahmenstiele vorwiegend bei Spannweiten von 30 – 60 m realisiert werden.

Die konische Ausbildung von Rahmenstielen ist mit einem erhöhten Herstellungsaufwand verbunden, so dass oftmals bewusst auf eine Materialeinsparung verzichtet wird und die Rahmenstiele mit konstanten Querschnittsabmessungen hergestellt werden [FUE89]. Die Aussagen der befragten Stahlhallenhersteller bestätigen diese Aussage für Spannweiten von 15 – 30 m.

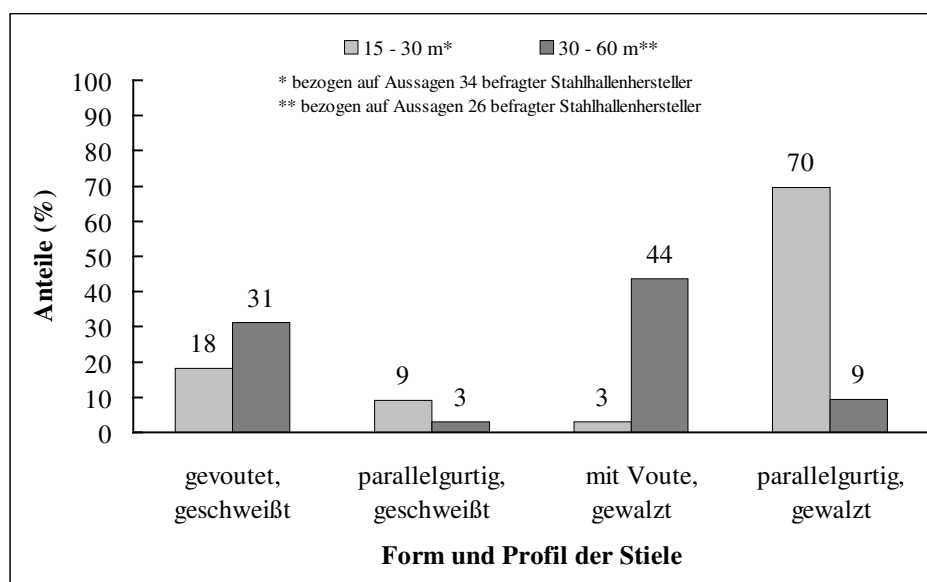


Abbildung 2.14: Ergebnisse der Umfrage zu Form und Profil der Stiele [SCH00]

Vollwandige Rahmenriegel werden zur Aufnahme der meist größeren Rahmeneckmomente oft mit Vouten ausgebildet.

Jedoch zeigen die Ergebnisse der Umfrage [SCH00], dass für Spannweiten von 15 – 30 m häufig Walzprofile (ohne Vouten) eingesetzt werden. Für Spannweiten von 30 – 60 m nimmt die Ausbildung von Vouten im Riegel zu (Abb. 2.15).

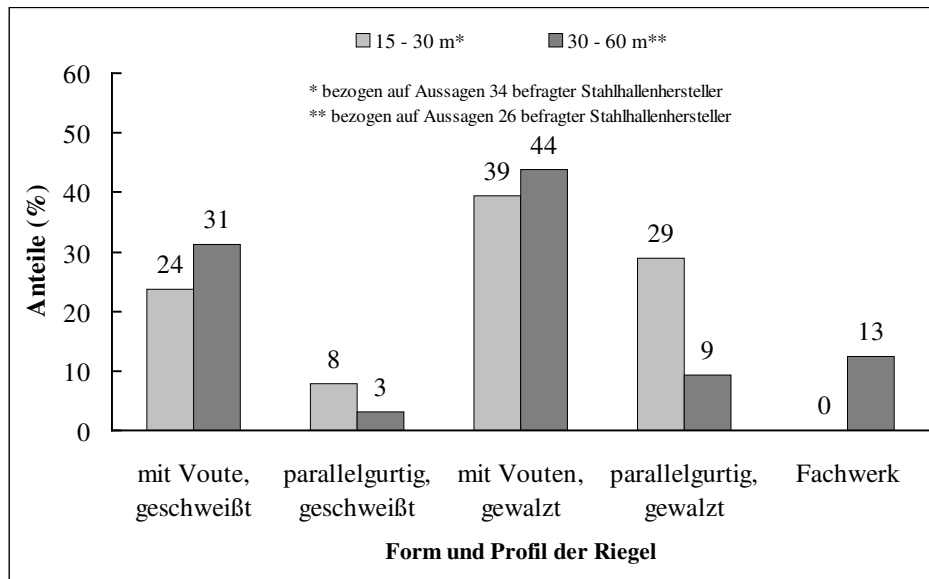


Abbildung 2.15: Ergebnisse der Umfrage zu Form und Profil der Riegel [SCH00]

Füg [FUE89] ergänzt hierzu, dass bei Spannweiten $< 18\text{m}$ und einer geringen Belastung für Riegel und Stiele oftmals nur Walzprofile verwendet werden.

In der Regel werden ein- und mehrschiffige Hallen mit Sattel- oder Pultdach gebaut. Dagegen kommen die Sonderformen wie z.B. Sheddach und Flachdach äußerst selten zum Einsatz.

Zur Vermeidung konstruktiv aufwändiger Mittelrinnen (Abb. 2.16 a)) bei mehrschiffigen Hallen wird die Dachform über die Schiffe geführt (Abb. 2.16 b und c)).

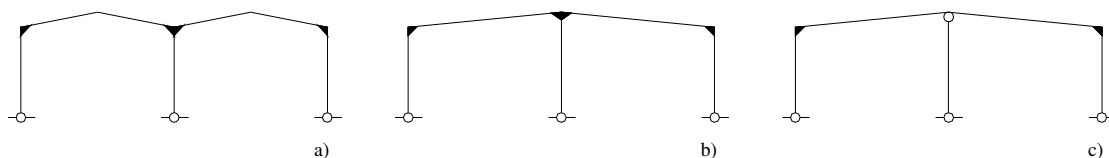


Abbildung 2.16: Ausbildungsmerkmale mehrschiffiger Hallen

Im Fall mehrschiffiger Hallen mit hoher Vertikalbeanspruchung und geringer Horizontalbeanspruchung wird als wirtschaftliche Variante die Mittelstütze meist als Pendelstütze ausgebildet (Abb. 2.16 c)).

In Abhängigkeit der vorhandenen Dachneigung werden flache, flach geneigte, geneigte und steile Dächer unterschieden. Im Hallenbau überwiegen laut den Aussagen der befragten Stahlhallenhersteller (Abb. 2.17) flach geneigte bzw. geneigte Dächer.

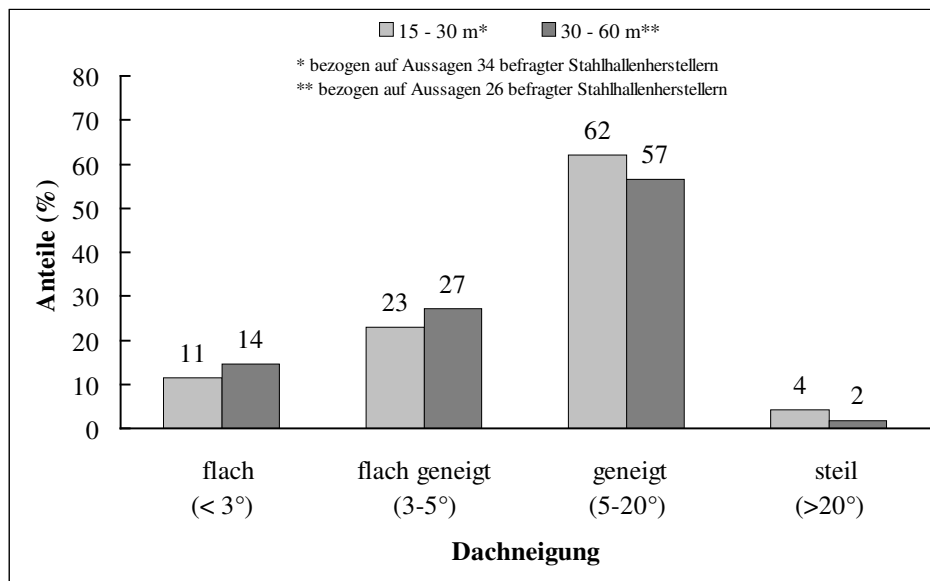


Abbildung 2.17: Ergebnisse der Umfrage zur Dachneigung [SCH00]

- Material

Laut Umfrageergebnis (Abb. 2.18) werden die Primärbauteile bei Spannweiten von 15 – 30 m vorwiegend aus S235 hergestellt. Bei Spannweiten von 30 – 60 m kommt häufiger der qualitativ hochwertigere S355 zum Einsatz.

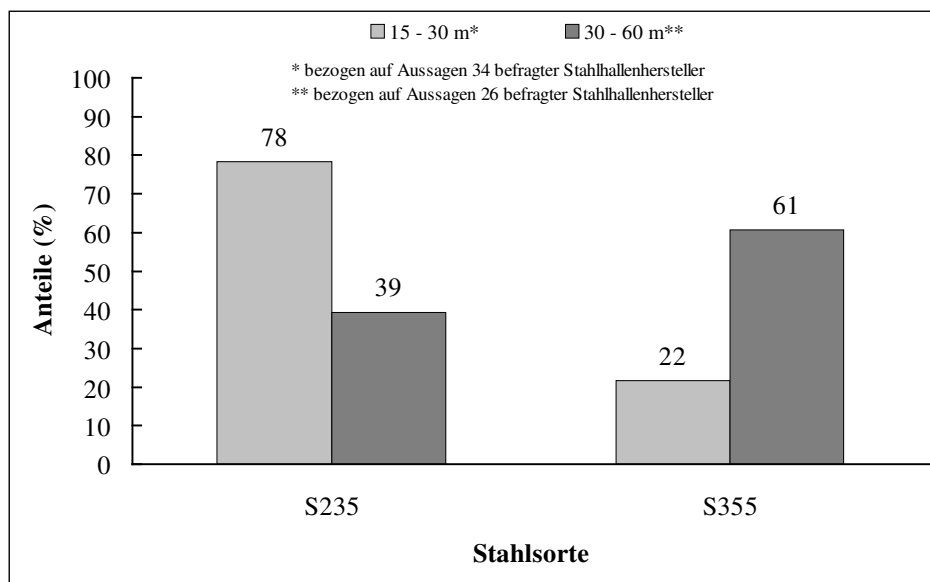


Abbildung 2.18: Ergebnisse der Umfrage zu verwendeten Stahlsorten [SCH00]

- Achsabstand

Die Ergebnisauswertung der Befragung (Abb. 2.19) zeigt, dass die Vorzugsmaße mit annähernd gleicher Anwendungshäufigkeit 5 m, 6 m und 7 m sind. Auch 7,5 m und 8 m kommen noch bei über 10 % der Hallen zum Einsatz.

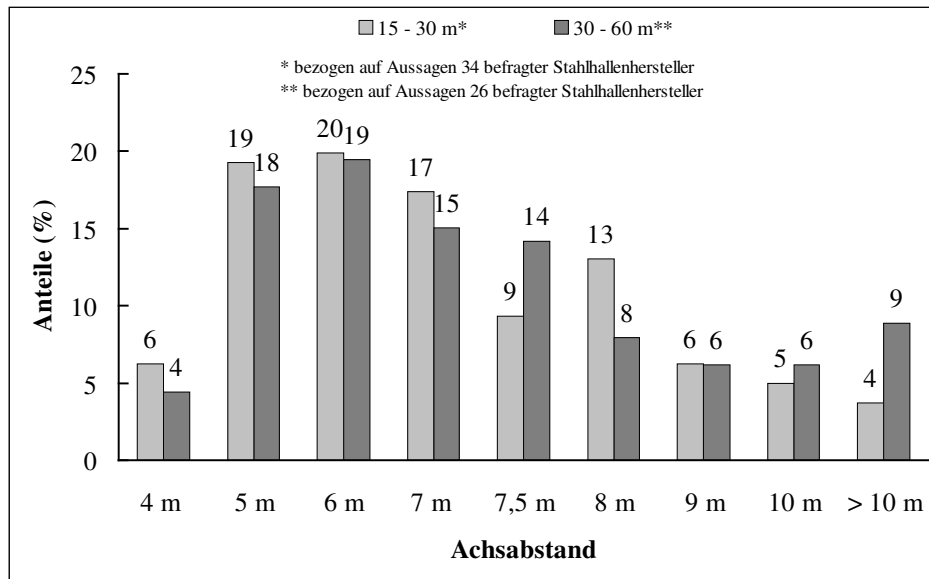


Abbildung 2.19: Ergebnisse der Umfrage zum Achsabstand [SCH00]

Sekundär- und Tertiärtragelemente

Für die Hüllkonstruktion von Hallen existieren verschiedenartige Dach- und Wandsysteme. In den Veröffentlichungen [BMS00c, SIZ00, GRI99, KIN99] werden typische Hüllelemente (Tertiärtragelemente) wie Sandwichelemente, Stahltrapezprofile und Betonfertigteile hinsichtlich des Transports, der Montage, der bauphysikalischen Anforderungen u.a. beurteilt.

Zwischen den Hüllelementen und der Ausbildung der Sekundärtragelemente (Pfetten und Wandriegel) bestehen Wechselwirkungen hinsichtlich Abstand und Querschnitt der Sekundärtragelemente.

▪ Dachausbildung

Im Hallenbau werden folgende Arten der Dachausbildung unterschieden:

- pfettenlose Dächer
- Pfettendächer.

Entscheidungen von Planer und Bauherr zur Art der Dachausbildung werden oftmals durch die herstellenden Firmen beeinflusst. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen (Abb. 2.20), dass die befragten Firmen vorwiegend Pfettendächer ausbilden, wobei gegenwärtig für die Pfetten vorzugsweise kaltgewalzte Profile (C-, Z- bzw. Σ -Profile) verwendet werden.

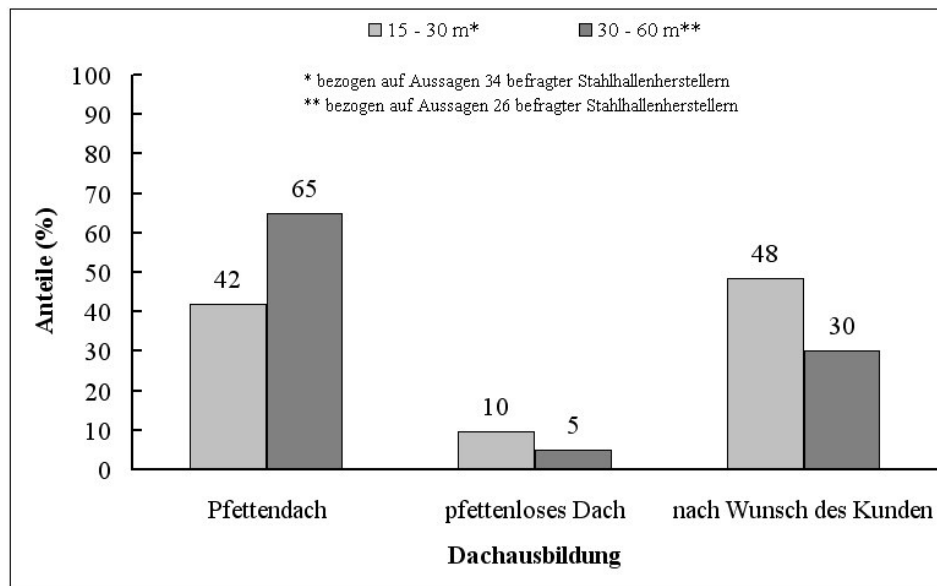


Abbildung 2.20: Ergebnisse der Umfrage zur Dachausbildung [SCH00]

▪ Wandausbildung

Im Fall der Wandausbildung (Abb. 2.21) wird unterschieden zwischen:

- Hallen mit Wandriegeln
- Hallen ohne Wandriegeln.

In der Praxis dominieren derzeit Hallen mit Wandriegeln. Übliche Hüllelemente für Hallen mit Wandriegeln sind Stahltrapezprofile und Sandwichelemente [BMS99b, BMS00b]. Die Wandriegel werden wie die Pfetten vorwiegend aus kaltgewalzten Profilen hergestellt.

Für Hallen ohne Wandriegel werden als Hüllelemente häufig Stahlkassettenprofile und Porenbetonwandplatten verwendet [BMS91a, BMS91b].

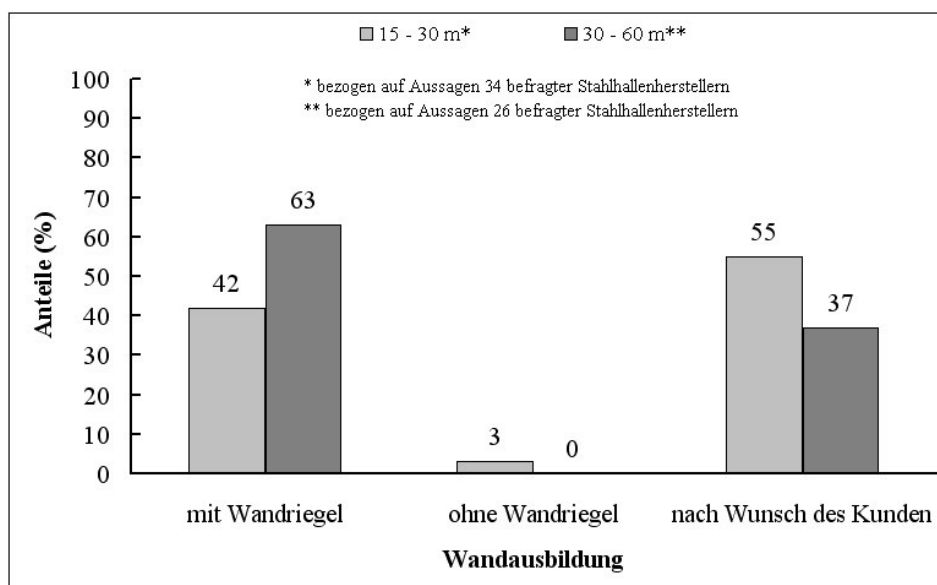


Abbildung 2.21: Ergebnisse der Umfrage zur Wandausbildung [SCH00]

▪ Stabilisierung

Zur Stabilisierung von Bauwerken ist die Ausführung horizontal und vertikal ausreichender Tragelemente erforderlich, die im Hallenbau in Dach- und Wandebene auszubilden sind. Bei Stahlhallen wird dies üblicherweise durch Verbände realisiert. In der Praxis sind dies größtenteils Diagonalverbände (Abb. 2.22). An zweiter Stelle folgen die K-Verbände. Die Ausbildung von Schubfeldern ist dagegen relativ selten.

Als weitere Möglichkeit zur Stabilisierung von Hallen werden ebenso steife Hüllelemente, wie z.B. Porenbetonfertigteile oder massives Mauerwerk, verwendet.

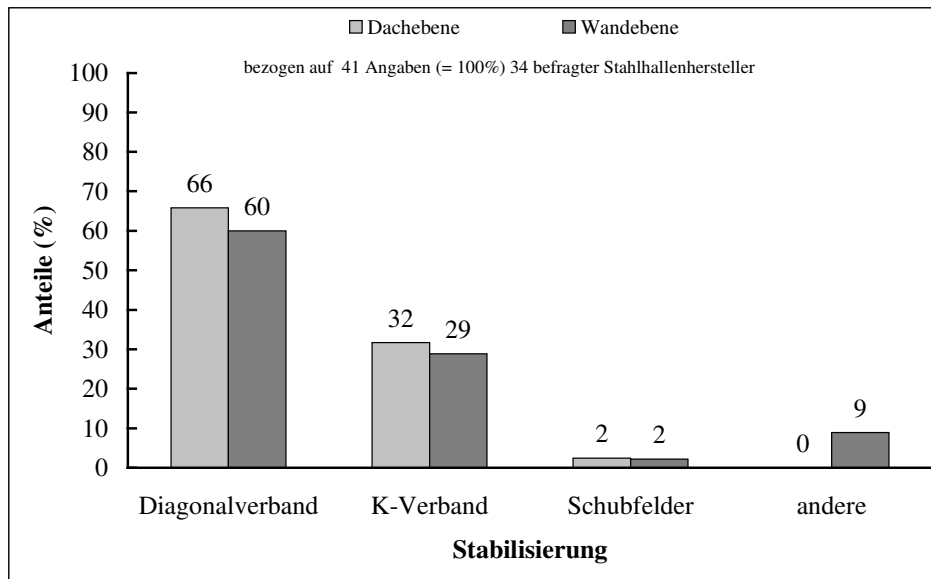


Abbildung 2.22: Ergebnisse der Umfrage zur Stabilisierung von Stahlhallen [SCH00]

▪ Entwurfsziele

Im Rahmen der durchgeführten Datenerhebung zu Stahlhallen wurden die Herstellerfirmen zu den Entwurfszielen Gewicht und Flexibilität von Tragkonstruktionen befragt. Eine Wichtung zu den genannten Entwurfszielen war vorzunehmen. Die Ergebnisse in Abbildung 2.23 zeigen, dass für nahezu 70 % der befragten Stahlhallenhersteller das Entwurfsziel Gewichtsminimierung einen hohen Stellenwert hat.

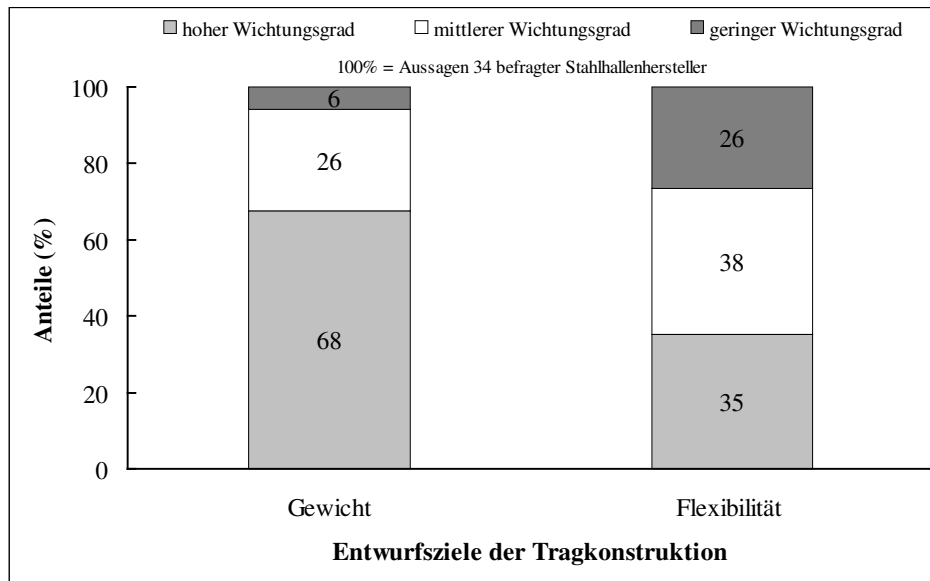


Abbildung 2.23: Ergebnisse der Umfrage zu Entwurfszielen der Tragkonstruktion [SCH00]

Die Ergebnisse der Umfrage [SCH00] unter Berücksichtigung der Literaturlauswertung zeigen, dass die Mehrzahl der einschiffigen Hallen in der Praxis durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet ist:

- Primärtragelemente
 - Zweigelenkrahmen (SB = 15 – 30 m) aus S235
 - Satteldach mit einer Dachneigungen von 5–20°
 - gewalzte Stiele
 - gewalzte Riegel mit Voute
 - Achsabstände zwischen 5 und 7 m
- Sekundär- und Tertiärtragelemente
 - Pfettendach mit Pfetten aus kaltgewalzten Profilen (C-, Z- bzw. Σ -Profile)
 - Wandriegel aus kaltgewalzten Profilen (C-, Z- bzw. Σ -Profile)
 - Diagonalverbände für Dach- und Längswandverbände

Die in Abschnitt 5 untersuchte einschiffige Halle hat diese Eigenschaften.

2.4.2.2.2 Zusammenstellung von Entwurfskomponenten für Hallen

Auf der Grundlage der erstellten Klassifizierungsschemata für die Entwurfskomponenten in den Abbildungen 2.5 und 2.6 werden nachfolgend übliche Stellgrößen für Stahlhallen des Industriebaus in Tabelle 2.2 sowie Entwurfsziele und -bedingungen in Tabelle 2.3 zusammengestellt.

1) Stellgrößen

Standortbedingte Stellgrößen sind atmosphärische Einwirkungen und Beanspruchungen sowie Baugrundeigenschaften. Die Erfassung und Berücksichtigung dieser Stellgrößen ist entscheidend für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Entwurfsobjekten.

Nutzungsbedingte Stellgrößen ergeben sich aus den Bedürfnissen der jeweiligen Inanspruchnahme. In der Regel sind hierfür subjektive Entscheidungen von Bauherrn, Architekten und Ingenieur sowie damit verbundene Festlegungen in Normen, Richtlinien usw. maßgebend.

Die Stellgrößen der *Herstellung* sind prozessbezogen. Eine Umsetzung in den Anwendungen im Abschnitt fünf ist nicht vorgesehen.

Veränderungen von Stellgrößen unter dem Aspekt *Form* sind bei Stahlhallen meist auf die Lage des Firstknotens (= Dachneigung) beschränkt.

Topologische Stellgrößen von Stahlhallen unterliegen meist nutzertechnologischen Zwängen, so dass gegebenenfalls nur eine Topologieveränderung einzelner Elementen möglich ist.

Im Stahlbau beschränken sich die Stellgrößen des *Materials* besonders auf die:

- Stahlsorte
- Verbindungsmittel
- Hüllkonstruktion (Dach- und Wandhülle).

Besonders die Stellgrößen der *Konstruktion* werden durch die spezifischen Eigenschaften der Bauweise beeinflusst. Für Hallen aus Stahl werden in der Arbeit nachfolgende Konstruktionseigenschaften untersucht:

- Dach- und Wandausbildung
- Querschnittsform
- Querschnittsverlauf
- statische Erfassung.

Folgende *geometrische Stellgrößen* werden unterschieden:

- Querschnittsabmessungen von Tragelementen
- geometrische Abmessungen von Hallen.

Hauptsächlich werden die Querschnittsabmessungen der Tragelemente von Hallen variiert. Die geometrischen Abmessungen von Hallen sind fast ausschließlich durch die Festlegung der Nutzung gegeben.

Viele Stellgrößen können gleichzeitig quantitative und qualitative Eigenschaften besitzen, so dass in Tabelle 2.2 mehrmals Doppelbelegungen vorliegen.

Tabelle 2.2: Auswahl von Stellgrößen für Stahlhallen des Industriebaus

		quantitativ		qualitativ	
		variable Entwurfsgröße	konstante Entwurfsgröße	variable Entwurfsgröße	konstante Entwurfsgröße
Standort	atmosphärische Einwirkungen (Schnee, Wind, u.a.)		+		
	atmosphärische Beanspruchungen (Korrosionsbelastung u.a.)		+		+
	Baugrundeigenschaften		+		+
				
Nutzung	Anforderungen der Bauphysik ¹		+		+
	Anforderungen der technischen Gebäudeausrüstung ²	-	+	-	+
	Anforderungen des Brandschutzes	-	+	-	+
	Krantechnik (Traglasten u.a.)	-	+	-	+
	Konstruktionsgewichte	-	+		
	Lichtraumprofile	-	+		
	Anordnung von Fenstern, Tore und Türen	-	+	-	+
	Erweiterungsmöglichkeiten	-	+	-	+
.....					
Herstellung	Herstellungsverfahren			+	-
	Transportmittel	+		-	+
	Transportweg	-	+	-	+
	Montageverfahren			-	+
	Montageablauf			-	+
				
Form	Lage des Firstknotens	+	+		
	Querschnittsverlauf			+	+
				
Topologie	Anzahl der Knoten	-	+		
	Elementzuordnungen	-	+		
				

¹ Wärmeschutz, Schallschutz, Feuchteschutz² Be- und Entlüftung, Klimatisierung

		quantitativ		qualitativ	
		variable Entwurfsgröße	konstante Entwurfsgröße	variable Entwurfsgröße	konstante Entwurfsgröße
Konstruktion	Anzahl der Schiffe	-	+		
	Dachform			-	+
	Dachausbildung			-	+
	Wandausbildung			-	+
	Anbauten	+	+	+	+
	Detailausbildungen			-	+
	statische Randbedingungen			+	-
	Eigengewicht der Konstruktion	+	+		
	Art der Tragstruktur			-	+
	Querschnittsform			-	+
				
Material	Stahlsorte			-	+
	Materialeigenschaften von Stahlsorte	-	+		
	Art der Verbindungsmittel			-	+
	Materialeigenschaften von Verbindungsmittel	-	+		
	Art der Hüllelemente			-	+
	Materialeigenschaften von Hüllelementen	-	+		
.....					
Geometrie	geometrische Hallenabmessungen (Längen, Breiten, Höhen)	-	+		
	Achsabstände	-	+		
	Dachüberstände	-	+		
	Baumaße innerhalb und außerhalb der Verkleidung	-	+		
	Querschnittsabmessungen	+	-		
	Elementlängen	-	+		
				
+ häufig; - selten; □ - nicht zutreffend					

2) Entwurfsziele und -bedingungen

Ein wichtiges *Entwurfsziel* der Praxis ist die Minimierung von Herstellungs- und/oder Betriebskosten, wobei die Herstellungskosten im Wesentlichen durch firmenspezifische (z.B. vorhandene Fertigungstechnologien) und gesellschaftliche Faktoren (z.B. Marktsituation) beeinflusst werden.

Oftmals wird auch das Konstruktionsgewicht als Entwurfsziel formuliert. Dieses bietet sich an, wenn Vergleiche mit Ergebnissen in Veröffentlichungen oder Konstruktionen realisierter Objekte durchgeführt werden.

Wesentliche *Entwurfsbedingungen* im Entwurf von Stahlhallen sind die Einhaltung der Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise.

- Nachweise der Tragsicherheit

In der DIN 18800 Teil 1 bis 3 [DIN18800T1, DIN18800T2, DIN18800T3] sind die Nachweise der Tragsicherheit geregelt. Die wichtigsten Tragsicherheitsnachweise sind:

- Nachweis von Grenzspannungen (Nachweisverfahren E-E) bzw. von Grenzschnittgrößen (Nachweisverfahren E-P bzw. P-P);
- Stabilitätsnachweise (Knicken, Biegedrillknicken, Beulen).

- Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

In der Regel beschränken sich die Gebrauchstauglichkeitsnachweise auf einen Nachweis einzuhaltender Verformungen.

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind durch Vereinbarungen festzulegen, soweit keine Regelungen in Fachnormen vorliegen.

Des Weiteren sind öfters subjektive Wünsche und Bedürfnisse von Bauherrn, Architekt, Ingenieur u.a. zu berücksichtigen. Hierzu zählen vor allem nutzertechnologische Entwurfsbedingungen, wie die Vorgabe von Lichtraumprofilen und Baumaßen.

Typische Entwurfsziele und –bedingungen für den Entwurf von Stahlhallen des Industriebaus enthält Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3:Auswahl von Entwurfszielen und –bedingungen für Stahlhallen des Industriebaus

		quantitativ		qualitativ	
		Entwurfsziel	Entwurfsbedingung	Entwurfsziel	Entwurfsbedingung
Öffentlichkeit	Energiebilanz	-	-		
	Verbrauchswerte	-	-	-	-
	Bauzeit	-	-		
				
gebaute Umwelt.	Anpassung an Bebauung		-		-
	Anpassung an Nachbarbebauung		-		-
nat. Umwelt	Anpassung an Gelände		-		-
	Primärenergieaufwand	-	-		
	Umweltbelastung	-	-		
				
Nutzertechn.	Flexibilität der Konstruktion			-	-
	nutzbare Fläche	-	-		
	Lichtraumprofile		+		
	Baumaße		+		
Bau-technik	Nachweise der Tragfähigkeit	- ³	+		
	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	- ⁴	+		
				
Herst.-techn.	Transportweg	-	-	-	-
	Montageablauf	-	-	-	-
Gestal-tung	Konstruktionstyp			-	+
	Farbgebung und Oberflächenstruktur der Hüllkonstruktion				-
				
Ökonomie	Gewicht	+	-		
	Herstellkosten	+	-		
	Betriebskosten	+	-		
	Bauzeit	+	+		
				

+ häufig; - selten; □ - nicht zutreffend; ³ z.B. Spannungsauslastung, ⁴ z.B. Verformungsbegrenzung

3 Überblick zu Entwurfsstrategien im Bauwesen

3.1 Gegenwärtiger Stand

Die Grundprinzipien traditioneller und optimierungsbasierter Entwurfsstrategien für die Synthese im Entwurfsprozess sind in Abbildung 3.1 gegenübergestellt.

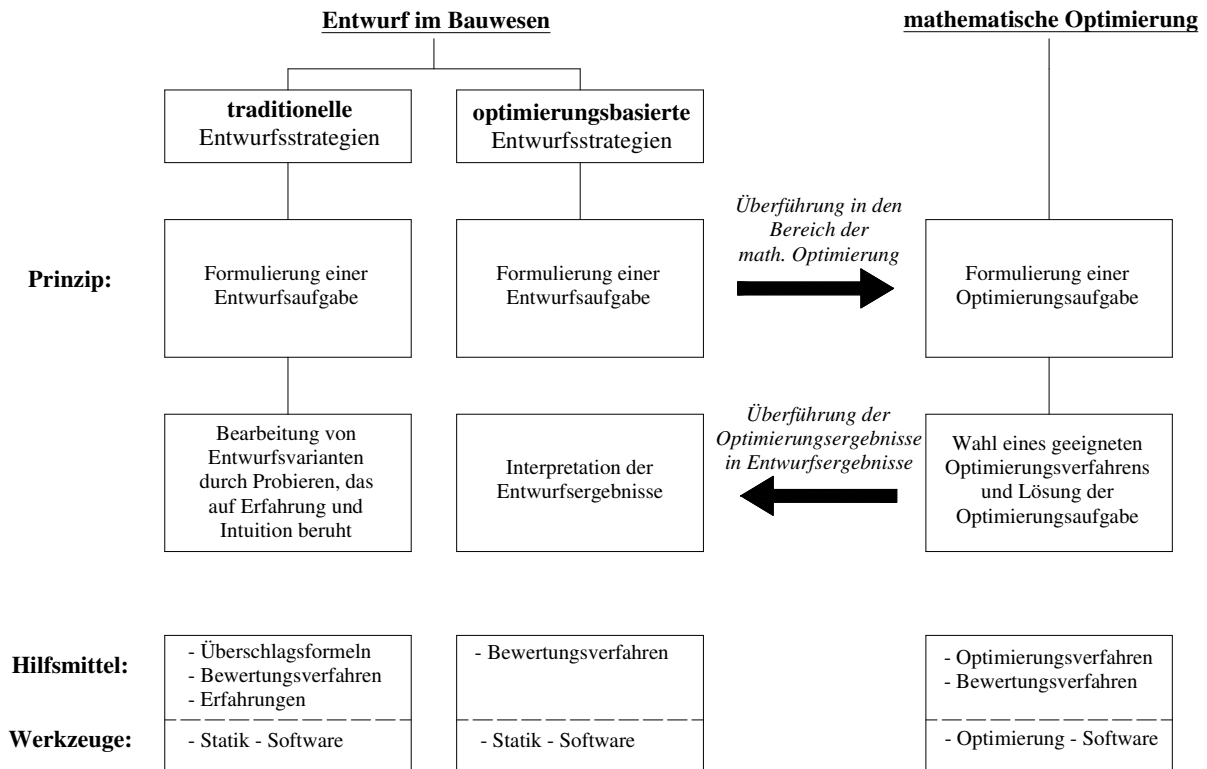


Abbildung 3.1: Prinzip traditioneller und optimierungsbasierter Entwurfsstrategien

Im Bereich der *traditionellen Entwurfstrategien* stehen dem Ingenieur Hilfsmittel und Werkzeuge, wie verschiedene Entwurfsmethoden und unterschiedliche Ingenieursoftware, zur Verfügung. Mortensen [MOR87] beschreibt in knappen Ausführungen verschiedene Entwurfsmethoden (z.B. morphologischer Kasten, Bionik [NAC98], ZIS-Spinne), die den Ingenieurentwurf unterstützen. Er weist darauf hin, dass diese Entwurfsmethoden vorwiegend nur für Teilprozesse im Entwurf, wie beispielsweise Ideenfindung und Bewertung von Entwurfsvarianten, gelten.

Seitdem der Bauingenieur Konrad Zuse im Mai 1941 den ersten funktionsfähigen, frei programmierbaren und mit binärem Code arbeitenden Rechner Z3 fertig stellte, beginnt die Geschichte der Ingenieursoftware. Zuses Ziel war es, den planerisch denkenden Menschen von der Ausführung reproduzierbarer Rechenoperationen zu entlasten [MAA01].

Die Verwendung von Rechentechnik im Entwurfsprozess ist keinesfalls zwingend, aber durch ihren Einsatz werden vor allem die Faktoren Zeit, Wirtschaftlichkeit und Produktivität positiv beeinflusst. Auch Mortensen [MOR87] geht auf die tief greifenden Veränderungen im Entwurfsprozess, hervorgerufen durch den Einsatz der Rechentechnik, ein.

Maas [MAA01] untersucht Entwurfsprozesse der Tragwerkskonzeption von Architekt und Bauingenieur, die durch den Einsatz von Rechentechnik unterstützt werden. Auf der Basis einer umfassenden Analyse und Prüfung moderner Informationstechnologien für den Tragwerksentwurf, entwickelt er eine computergestützte Methode für das Entwerfen von Tragkonstruktionen. Diese Methode ist die Kombination aus einem Programm zur Vordimensionierung verschiedener Bauelemente des Hochbaus sowie einem Programm, welches vorrangig der autodidaktischen Wissenserschließung von Grundlagen der Tragkonstruktionen dient.

Rottke [ROT98] bearbeitet und verknüpft die Themengebiete architektonischer Tragwerksentwurf und EDV-Einsatz. Das Arbeitsergebnis ist eine praxisorientierte und architekturegerechte Software. Architekten können sowohl eigene Erfahrungen mit dem Tragverhalten durch Experimentieren erweitern, als auch Beratung und Kontrolle durch integriertes Expertenwissen nutzen.

Die Anfänge *optimierungsbasierter Entwurfsstrategien* gehen ins 17. Jahrhundert zurück. Im Jahre 1638 hat Galilei Untersuchungen an einem Kragbalken mit Rechteckquerschnitt, der am auskragenden Ende mit einem Gewicht belastet wird (Abb. 3.2), durchgeführt. Das Ergebnis seiner Untersuchungen ist, dass sich bei konstanter Balkenbreite an jeder Stelle der Balkenlängsrichtung der gleiche Biege­widerstand einstellt, wenn die Querschnittshöhe von der Einspannstelle zum freien Ende parabolisch abnimmt. Durch die Ausbildung der optimalen Höhe kann ungefähr ein Drittel Material eingespart werden.

Geschichtliche Abhandlungen zur optimierungsbasierten Entwurfsstrategie sind unter anderem in den Veröffentlichungen von [HUP70, LES70, ZHO97] nachzulesen.

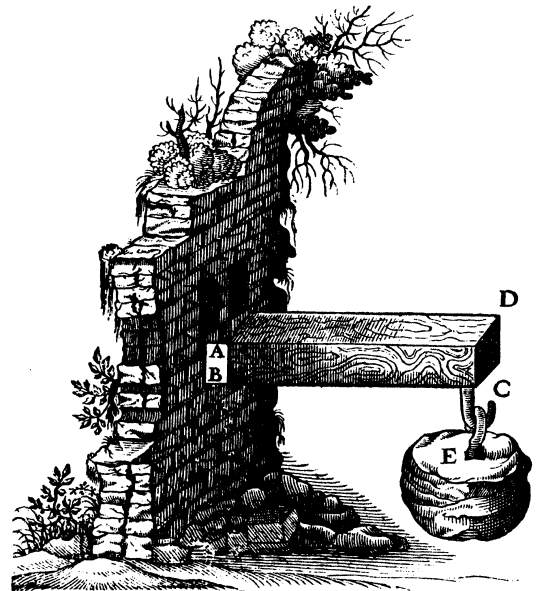


Abbildung 3.2: Eingespannter Balken aus *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze* (Leyden 1638) [SZ80]

Das Grundprinzip optimierungsbasierter Entwurfsstrategien ist die *Formulierung von Entwurfsaufgaben als Optimierungsaufgaben*. Zur Lösung des mathematisch formulierten Optimierungsmodells stehen Optimierungsverfahren zur Verfügung, die manuell oder maschinell in Form von Software einsetzbar sind. Letzteres ermöglicht eine starke Reduzierung des Rechenaufwandes für den Ingenieur.

Die optimierungsbasierten Entwurfsstrategien werden vor allem im Bereich der Strukturmechanik eingesetzt. Für diesen Anwendungsbereich wird vorrangig der Begriff *Strukturoptimierung* verwendet [BLE88]. Hauptanwendungsgebiet ist hier die *Querschnittsoptimierung* von Bauteilen mit Tragfunktion. In erster Linie steht als Entwurfsziel die Gewichtsminimierung. Die Entwurfsbedingungen beschränken sich vorrangig auf Kriterien der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit vom untersuchten Tragelement.

Besonders die nachfolgenden Tragelemente sind Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten:

- Biegeträger [PIT77, SCH01c, LES70, HAR78, DIM82, FER87, HUP70, LAW87]
- Fachwerkträger [BAI94, HOE76, SAS89, LIP76, PET98, BER96, GRI98, RAJ95]
- ebene Rahmentragwerke [LIP76, CAM97]
- Schalentragwerke [MAU98, HAR74].

Mit Problemen der *Form- und Topologieoptimierung* in der Strukturoptimierung beschäftigen sich [SCH88b, HOE76, MAU98].

Die Spezifik der Strukturoptimierung erfordert oftmals Optimierungsverfahren, die den speziellen Bedürfnissen angepasst sind. Beschreibungen zu speziellen Optimierungsverfahren der Strukturoptimierung, wie CAO-Methode und SKO-Methode, liefern die Veröffentlichungen [BRI96, BAI94, MAT92, MAT97].

Als Forschungsgegenstand ist der Entwurf von einzelnen Tragelementen, vor allem die Querschnittsoptimierung, im Wesentlichen abgeklärt. Offene Fragen existieren beim Entwurf von Teil- und Gesamtsystemen.

Ansätze zur Lösung von Teilsystemen mit tragender und bauphysikalischer Funktion liefert Schopbach [SCH01c].

Mit dem Problemkreis Gesamtsystem beschäftigen sich die Veröffentlichungen von Schäfer [SCH88b] und Thanh [THA85]. Schäfer [SCH88a] betrachtet das Gesamtsystem Stahlhalle mit dem Entwurfsziel Minimierung der Gesamtkosten. Als Optimierungsverfahren verwendet er die vollständige Enumeration. Thanh [THA87] untersucht das Gesamtsystem Brücke. Das Entwurfsziel ist ebenso die Kostenminimierung der Konstruktion. Als Optimierungsverfahren setzt Thanh verschiedene stochastische Suchverfahren ein und nimmt eine Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit vor.

Die Mehrheit der existierenden *Optimierungsverfahren* eignet sich nur für bestimmte Problemklassen. Konkrete Anforderungen an Zielfunktionen (z.B. linear, quadratisch), Nebenbedingungen (z.B. lineare Gleichungen) und Optimierungsvariablen (z.B. reellwertig) schränken ihren Anwendungsbereich stark ein.

Aufgrund der typischen Eigenschaften von Optimierungsaufgaben, formuliert aus Entwurfsaufgaben (Abschnitt 2.2), kann daher ein Großteil dieser Optimierungsverfahren nur mit Einschränkungen bzw. vereinfachten Annahmen verwendet werden.

Beschreibungen zu Optimierungsverfahren, die sich zur Lösung von Aufgaben aus dem Bereich des Ingenieurentwurfes eignen, sind in [ZHO97, BAI94, HUP70, LES70, SCH01c, LAW87] zu finden.

In den letzten Jahren werden zunehmend *Evolutionäre Algorithmen* als modernes Optimierungsverfahren verwendet. Zahlreiche Forschungsarbeiten setzen sich mit dieser Problemstellung auseinander [HAR74, GRI98, PET98, RAJ92].

Die Entwicklung der Hauptformen Evolutionärer Algorithmen zeigt Abbildung 3.3. Zu ihrer Entstehung haben das Gedankengut der Kybernetik sowie die allmähliche Verfügbarkeit elektronischer Rechenanlagen beigetragen.

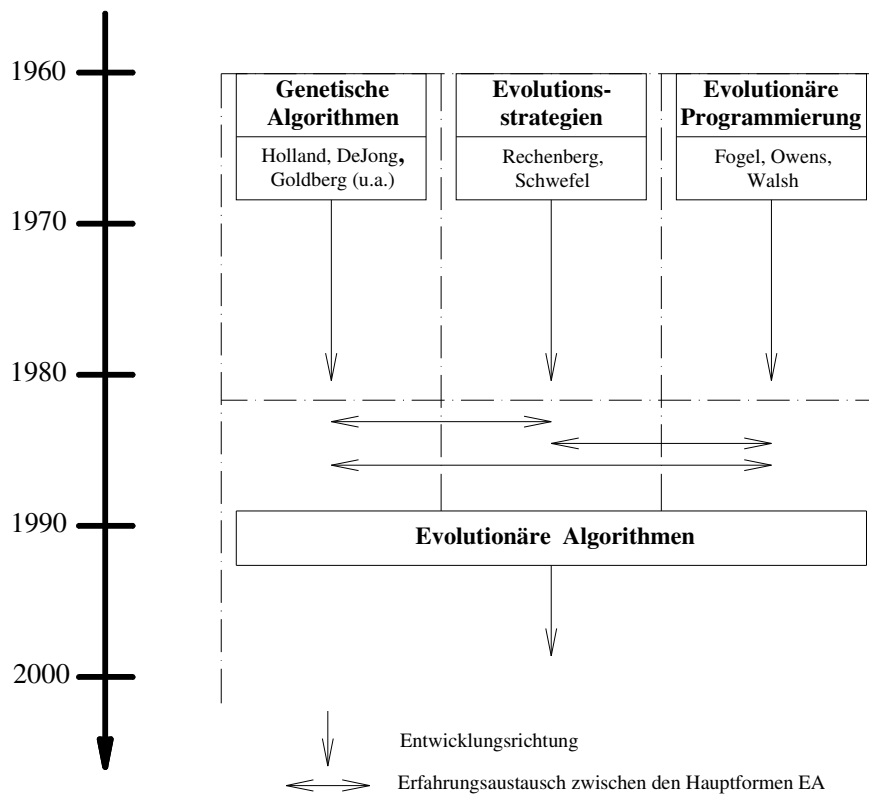


Abbildung 3.3: Vereinfachter Entwicklungspfad der Hauptformen Evolutionärer Algorithmen

Genetische Algorithmen, Evolutionsstrategien und Evolutionäre Programmierung wurden, inspiriert durch das natürliche Vorbild der biologischen Evolution, nahezu gleichzeitig entwickelt. Der wesentliche Unterschied von Genetischen Algorithmen, Evolutionsstrategien und Evolutionärer Programmierung liegt in der verschiedenartigen Umsetzung und Anwendung des Evolutionsprinzips.

Holland [HOL75] entwickelte in den 60er Jahren die *Genetischen Algorithmen*. Sein Ziel war es, möglichst genau evolutionäre Vorgänge auf Computersystemen zu simulieren. Das Fundament der heute dominierenden Anwendung von Genetischen Algorithmen legte De Jong [DEJ75], der anhand von 5 Beispielen mathematischer Funktionen die Algorithmen erweiterte und verbesserte. Goldberg [GOL83] verwendete Genetische Algorithmen zur Optimierung der Steuerung von Gasleitungssystemen und beschreibt in seiner Arbeit ihren ersten wirksamen Einsatz im Bereich der Ingenieuroptimierung.

Unabhängig von dieser Entwicklung schufen Rechenberg und Schwefel [REC73] zur gleichen Zeit an der TU Berlin die *Evolutionsstrategien*. Ausgangspunkt für deren Entwicklung war die Optimierung des Windwiderstandes eines Stromlinienkörpers. Als sich die Aufgabe mit mathematischen Methoden nicht lösen ließ, wurde eine schrittweise Optimierung des Problems unter Einbeziehung von Prinzipien der Evolution in vereinfachter Form vorgenommen. Hartmann [HAR74] nutzte die Evolutionsstrategien für die Optimierung tonnenartiger Zylinderschalen aus Stahlbeton und legte damit den Grundstein für deren Verwendung im Bereich der Ingenieuroptimierung.

Die *Evolutionäre Programmierung* wurde 1966 durch Fogel, Owens und Walsh [FOG66] mit dem Ziel entwickelt, künstlich - intelligente Automaten zu generieren. Viele Jahre fand die Evolutionäre Programmierung keine nennenswerte Beachtung. Erst in den 80er Jahren wurden die Ansätze der Evolutionären Programmierung durch David Fogel [FOG92] neu belebt.

Lange Zeit konnten nur geringe Fortschritte bei den Hauptformen der Evolutionären Algorithmen erzielt werden, da zwischen den verschiedenen evolutionären Ansätzen eine gegenseitige Ignoranz herrschte und die Tätigkeit auf kleine Forschergruppen begrenzt war. So fanden die Evolutionären Algorithmen anfänglich kein sehr großes Interesse, das aber vor allem aufgrund vorhandener leistungsfähiger Hardware in den 80er Jahren stieg. Ein erstes Zusammentreffen der Vertreter der Hauptformen fand 1985 statt. Seit diesem Zeitpunkt erfolgten ein Informationsaustausch untereinander sowie eine zunehmende Verschmelzung miteinander, hauptsächlich durch regelmäßig stattfindende Konferenzen. Seit Anfang der 90er Jahre haben sich die führenden Vertreter der Gebiete Genetischer Algorithmen, Evolutionsstrategien und Evolutionären Programmierung geeinigt, allgemein den Begriff Evolutionäre Algorithmen zu verwenden [POH00]. Jedoch bestehen die grundlegenden Vorgehensweisen der verschiedenen evolutionären Schulen bis heute weiter [WEI02].

Ausführliche Dokumentationen über die geschichtliche Entwicklung der Hauptformen Evolutionärer Algorithmen sind in [BEC97, BRU96, DAS97, GEN00, KIN94b, MIC99, NIS94, NIS97, POH00, RIC95, SPE00, WEI02] zu finden. Informationen über Eigenschaften und Anwendungsbereiche Evolutionärer Algorithmen liefern unter anderem die Veröffentlichungen von [BRU96, GEN00, GEN97, GRI98, HAM98, HAU98, KIN94b, NIS94, POH00, QUA98, REC74, SCH75, WEI02].

Die stetige Zunahme der Verwendung Evolutionärer Algorithmen basiert auf nachstehenden Gründen:

- leistungsfähige Hardware (z.B. Parallelrechner) ermöglicht eine natürliche Abbildung der Evolution erst in jüngster Zeit
- die Ergebnisqualität zahlreicher Optimierungsprobleme kann durch Anwendung Evolutionärer Algorithmen verbessert werden.

Weiterhin unterliegen Evolutionäre Algorithmen einer ständigen Weiterentwicklung mit folgenden Zielen:

- Minderung von Schwachpunkten
- Steigerung der Leistungsfähigkeit
- Erweiterung der Anwendungsbereiche
- Entwicklung effizienter Algorithmen für spezielle Anwendungsprobleme.

Somit entstehen immer wieder neue verbesserte Varianten.

Erfahrungen zu Anwendungen Evolutionärer Algorithmen im Entwurfsprozess liegen bezüglich folgender Systeme vor:

- Fachwerkquerschnitt [GOL86, RAJ97, KOU94, PET98, RAJ92]
- geschweißter Vollwandträger [DEB91]
- Rahmensystem [PEZ00, CAM97]
- Schwergewichtsmauer [HEL89].

3.2 Optimierungsbasierte Entwurfsstrategien

3.2.1 Methodik

Zunächst werden die Entwurfskomponenten (Entwurfsvariablen, -konstanten, -ziele und -bedingungen) definiert. Danach erfolgt die Überführung der Entwurfskomponenten in Optimierungsvariablen, Optimierungskonstanten, Zielfunktionen und Nebenbedingungen, d.h. die Entwurfsaufgabe wird als eine mathematische Optimierungsaufgabe formuliert.

Unter Verwendung eines geeigneten Optimierungsverfahrens wird die formulierte Optimierungsaufgabe gelöst. Die Optimierungsergebnisse werden in Entwurfsergebnisse überführt.

Vorrangig werden die optimierungsbasierten Entwurfsstrategien im Bauwesen für die Bemessung von Tragelementen verwendet. Eine wesentliche Rolle spielt dabei das verwendete Optimierungsverfahren. In zahlreichen Veröffentlichungen, wie [FIG88, BAI94] werden Eigenschaften verschiedener Optimierungsverfahren und ihre Anwendung im Bereich des Ingenieurwesens beschrieben.

3.2.2 Formulierung von Entwurfsaufgabe als Optimierungsaufgabe

3.2.2.1 Mathematische Formulierung von Optimierungsaufgaben

Bei der Lösung von Optimierungsaufgaben sind die Werte eines Optimierungsvariablenvektors \underline{x} (Gl. 3-2) so zu wählen, dass eine Zielfunktion $Z = f(\underline{x})$ (Gl. 3-1) einen Extremwert annimmt. Dabei ist die Einhaltung von festgelegten Ungleichheitsnebenbedingungen (Gl. 3-4), Gleichheitsnebenbedingungen (Gl. 3-5) und die Berücksichtigung von Optimierungskonstanten \underline{y} (Gl. 3-3) gefordert (Abb. 3.4).

$$Z = f(\underline{x}) \rightarrow \text{Extremum} \quad (3-1)$$

$$\underline{x} = (x_1, \dots, x_n) \quad (3-2)$$

$$\underline{y} = (y_1, \dots, y_m) \quad (3-3)$$

$$g_i(\underline{x}) \leq 0, (i= 1, 2, \dots, q) \quad (3-4)$$

$$h_j(\underline{x}) = 0, (j = 1, 2, \dots, p) \quad (3-5)$$

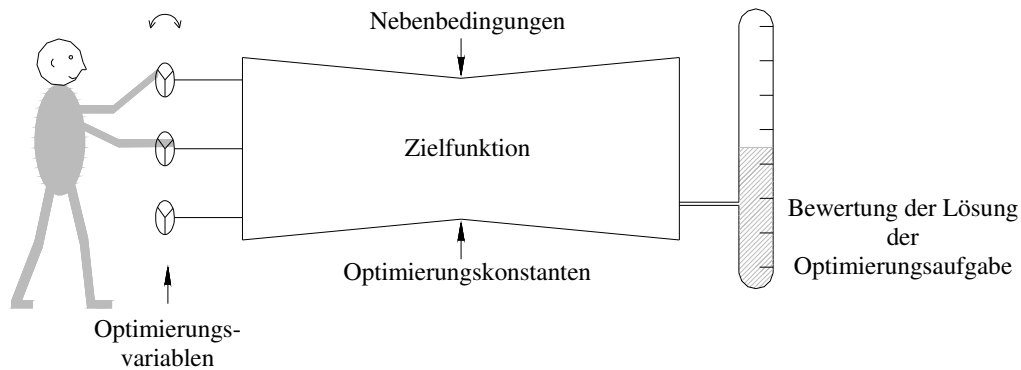


Abbildung 3.4: Schema Optimierungsaufgabe (Darstellung nach [SCH01c, FIG88])

Die *Zielfunktion* ist eine reellwertige Funktion der Optimierungsvariablen. Innerhalb von Zielfunktionen werden die Optimierungsvariablen und -konstanten zu einem Wert (=Zielfunktionswert) verknüpft. Durch die Zielfunktion wird das Optimalitätskriterium (=Bewertungskriterium) einer Optimierungsaufgabe definiert.

Die *Optimierungsvariablen* repräsentieren die zur Variation freigegebenen Größen der Optimierungsaufgabe und modifizieren das Ergebnis des Zielfunktionswertes. Oftmals ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit (= Rechendauer) und der Handhabbarkeit des Problems (= Formulierung des mathematischen Modells) eine Reduzierung der Anzahl der Optimierungsvariablen notwendig.

Unter den *Optimierungskonstanten* werden alle Angaben zusammengefasst, die zur Lösung der Optimierungsaufgabe notwendig sind, aber im Suchverlauf nicht verändert werden.

Die *Nebenbedingungen*¹ legen den Bereich zulässiger Lösungen von Optimierungsaufgaben fest. Gewöhnlich sind dies Gleichungen (Gl. 3-5) bzw. Ungleichungen (Gl. 3-4), die im speziellen Fall auch die Schranken von Optimierungsvariablen definieren.

In Abhängigkeit der Eigenschaften von Zielfunktionen, Optimierungsvariablen und/oder Nebenbedingungen werden Optimierungsaufgaben in Gruppen eingeteilt (Abb. 3.5). Figel [FIG88] beschreibt Kriterien zur Charakterisierung dieser Gruppen.

¹ In zahlreichen Veröffentlichungen wird auch der Begriff Restriktionen benutzt.

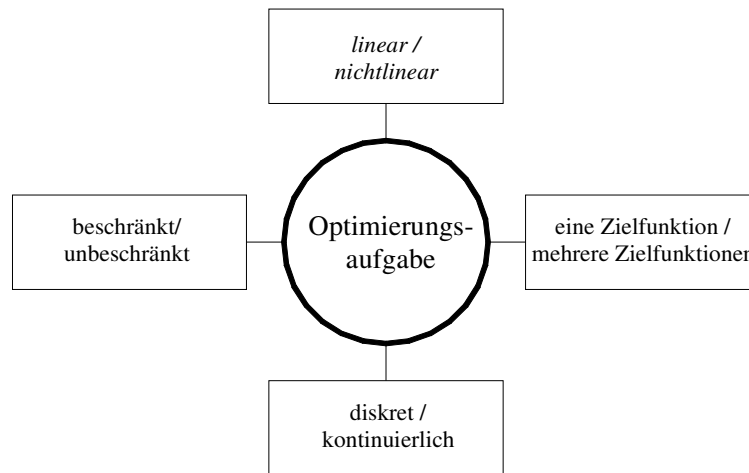


Abbildung 3.5: Klassifizierungsmöglichkeiten von Optimierungsaufgaben

Die Einteilung in lineare und nichtlineare Optimierungsaufgaben orientiert sich an der Beschaffenheit von Zielfunktionen und Nebenbedingungen (Tab. 3.1).

Tabelle 3.1: Klassifizierung von linearen und nichtlinearen Optimierungsaufgaben

Ziel-funktionen	Nebenbedingungen	
	linear	nichtlinear
linear	lineare Optimierungsaufgabe	nichtlineare Optimierungsaufgabe
nichtlinear	nichtlineare Optimierungsaufgabe	nichtlineare Optimierungsaufgabe

Je nachdem ob Nebenbedingungen vorliegen oder nicht, wird zwischen beschränkten (= mit Nebenbedingungen) und unbeschränkten Optimierungsaufgaben (= ohne Nebenbedingungen) unterschieden.

Die Anzahl der Zielfunktionen stellt eine weitere Einteilungsmöglichkeit von Optimierungsaufgaben dar. Ausführliche Informationen über Mehrzieloptimierung werden unter anderem in [DUE78, EST87, POH00, NIS94, NIS97, BAI94] diskutiert. Zu empfehlen ist auch Literatur aus dem Themengebiet der Entscheidungstheorie.

In Abhängigkeit der Art der Optimierungsvariablen werden kontinuierliche und diskrete Optimierungsaufgaben differenziert. Bei kontinuierlichen Optimierungsaufgaben sind die Werte der Optimierungsvariablen innerhalb der definierten Wertebereiche variabel wählbar. Diskrete Optimierungsaufgaben sind durch Optimierungsvariable, die nur diskrete Werte annehmen können, gekennzeichnet. Mit dem Thema diskrete Optimierung beschäftigen sich die Veröffentlichungen von [DUE77, GUT97, KOE92, BER96, CAI95].

Allgemein sind Optimierungsaufgaben, abgeleitet aus Entwurfsaufgaben des Bauwesens, gekennzeichnet durch:

- hochgradig nichtlineare, restriktionsbehaftete, multimodale² Zielfunktionen, deren erste und zweite Ableitungen sich in den meisten Fällen nicht bilden lassen;
- nichtlineare und/oder lineare Nebenbedingungen die in Form von Gleichungen und/oder Ungleichungen vorliegen;
- diskrete bzw. diskret-kontinuierliche Optimierungsvariablen, die nur selten korrelieren.

3.2.2.2 Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren dienen als Hilfsmittel zur Auffindung der „Besten“ aller adäquaten Lösungen einer Optimierungsaufgabe. Trotz der Existenz zahlreicher Optimierungsverfahren, eignen sich die meisten nur für spezielle Problemklassen von Optimierungsaufgaben. Figel [FIG88] nimmt eine Zuordnung von Optimierungsverfahren für verschiedene Problemklassen von Optimierungsaufgaben vor. Einen Vergleich zwischen verschiedenen Optimierungsverfahren für ausgewählte Problemklassen liefert Schwefel [SCH75].

Grill [GRI98] stellt fest, dass Optimierungsverfahren in ähnlicher Weise wie Optimierungsaufgaben nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden können. Er weist darauf hin, dass es keine strengen Abgrenzungen gibt, sondern dass sie je nach Fragestellungen als Orientierungshilfe dienen. In Abhängigkeit der gewählten Klassifizierung können unterschiedliche Zuordnungen möglich sein. Teilweise bestehen zwischen den verschiedenen Optimierungsverfahren Äquivalenzen oder Abhängigkeiten. Einige Möglichkeiten der Klassifizierungen sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

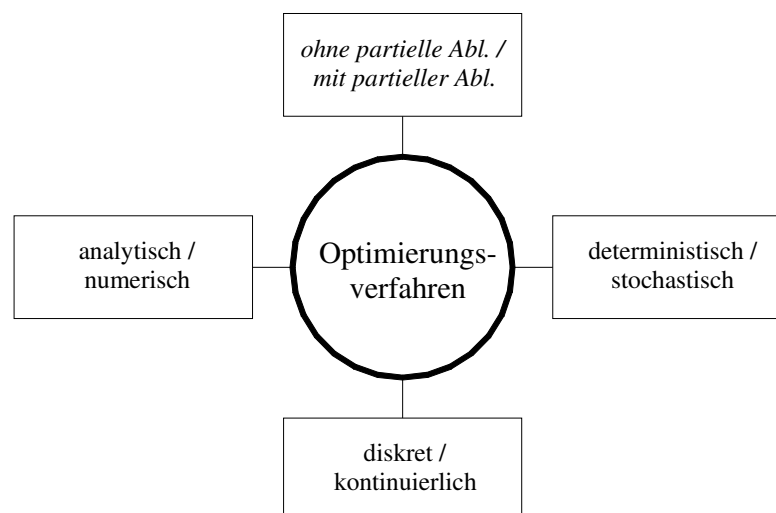


Abbildung 3.6: Klassifizierungsmöglichkeiten von Optimierungsverfahren

² Multimodale Funktionen besitzen eine Vielzahl von Extremwerten. Diese Art von Funktionen ist sehr häufig bei praktischen Entwurfsproblemen zu finden.

Für ausgewählte Optimierungsverfahren wird in Abbildung 3.7 eine Zuordnung vorgenommen, die sich nach der höchsten vorhandenen Ordnung der Ableitung richtet.

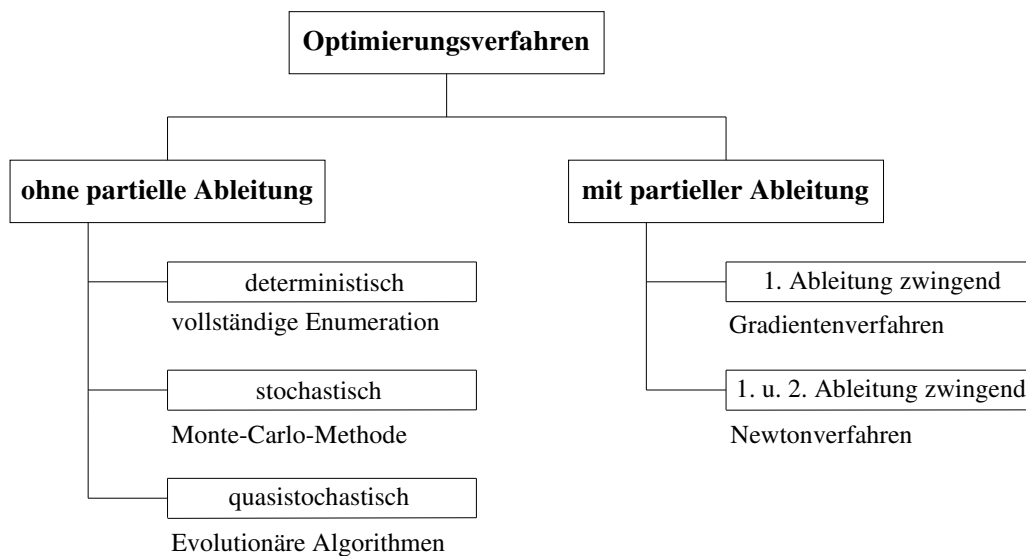


Abbildung 3.7: Zuordnung von Optimierungsverfahren

Beschreibungen zu diesen Optimierungsverfahren sind in den Veröffentlichungen [HUP70, LAW87, BAI94, GRI98, FAR97, LES70, PIT77, SCH01c] zu finden.

Die Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens ist nach den Kriterien Allgemeingültigkeit, Effizienz und Zuverlässigkeit vorzunehmen.

Allgemeingültigkeit beinhaltet die Problemneutralität, d.h. die Vielfalt unterschiedlichster Problemstellungen, die gelöst werden können. *Zuverlässigkeit* ist die Erfolgswahrscheinlichkeit (Qualität) und Sicherheit, mit der ein Problem gelöst werden kann. *Effizienz* umfasst die Konvergenzgeschwindigkeit und die Dauer der Rechenzeit, die häufig durch die Anzahl notwendiger Berechnungen und Auswertungen bestimmt wird.

Aufgrund der typischen Eigenschaften von Optimierungsaufgaben, formuliert aus den Entwurfskomponenten (Abschnitt 2.2), kommen als geeignete Optimierungsverfahren vollständige Enumeration, Monte-Carlo-Methode und Evolutionäre Algorithmen in Betracht.

Das Prinzip der *vollständige Enumeration* ist die Berechnung der Zielfunktionswerte aller möglichen Optimierungsvariablenvektoren im Suchraum. Die Größe des Suchraumes bestimmt die Dauer der Rechenzeit. Schon eine geringe Anzahl möglicher Optimierungsvariablenvektoren führt bei vollständiger Enumeration zu einem unverträglich hohen Rechenaufwand. Aus diesem Grunde wird die vollständige Enumeration nicht weiter betrachtet.

Als gemeinsame Eigenschaften von Evolutionären Algorithmen und Monte-Carlo-Methode sind zu nennen:

- keine Einschränkungen hinsichtlich Stetigkeit und Differenzierbarkeit der Zielfunktionen, es genügt die Spezifikation der Güte der Lösungen als Zielfunktion;

- kontinuierliche und diskrete Optimierungsvariablen können verarbeitet werden
- Aussagen zu Zwischenlösungen sind zu beliebigen Zeitpunkten möglich
- Möglichkeit der Kombination mit anderen Verfahren (hybride Verfahren).

Bei der *Monte-Carlo-Methode* findet eine zufallsbedingte Wahl der Optimierungsvariablen aus dem Suchraum statt. Zwischen bereits ermittelten und neuen Lösungen bestehen keinerlei Abhängigkeiten. Daher hat das Erreichen einer bereits guten Lösung auf den weiteren Verlauf der Suche keinerlei Einfluss. Diese Vorgehensweise kann als "blinde" Suche bezeichnet werden.

Schopbach [SCH01c] schreibt, dass mit Verwendung der Monte Carlo Methode, bei Vorgabe einer ausreichenden Stichprobenanzahl, die optimale Lösung mit einem Fehler von 5 bis 10 % gefunden wird. Wenn die geforderte Genauigkeit des Optimierungsergebnisses jedoch höher liegt, muss der Rechenaufwand (Zunahme der Stichprobenanzahl) vervielfacht werden.

Die Vorgehensweise *Evolutionärer Algorithmen* ist eine Kombination aus stochastischen und deterministischen Prinzipien. Diese Algorithmen sind durch folgende Aspekte gekennzeichnet [DEB90]:

- Suche geht von einer Lösungsmenge und nicht von einer einzigen Lösung aus
- Verwendung von bereits vorhandenen Lösungsinformationen (Qualität der Zielfunktion) und nicht von Zusatzinformationen (Ableitungen, Trends)
- Dominanz von Wahrscheinlichkeitsregeln gegenüber deterministischen Regeln.

Evolutionäre Algorithmen arbeiten auf einer Menge von Lösungen (= Population) mit gespeicherten Erbinformationen, die als „Gedächtnis“ fungieren. Diese Population orientiert sich auf Erfolg versprechende Gebiete des Suchraumes. Die Suche wird durch Teilprozesse, die das Prinzip der natürlichen biologischen Evolution imitieren, gesteuert. Die Qualität der Evolutionären Algorithmen hängt dabei enorm von den Einstellungen der Teilprozesse ab. Der Anwender steht somit vor einem fast unlösbaren Problem, da es bisher keine theoretisch fundierten Empfehlungen für diese Einstellungen gibt. Ausführliche Analysen in Abhängigkeit der jeweiligen Optimierungsaufgabe sind zur Festlegung der Einstellungen notwendig.

Pohlheim [POH00] sowie Rudolph und Sprave [RUD95] definieren für Evolutionäre Algorithmen geeignete und ungeeignete Optimierungsaufgaben. Für Optimierungsaufgaben mit stark nichtlinearen, diskontinuierlichen und multimodalen Zielfunktionen mit Nebenbedingungen sowie bei Vorhandensein von Optimierungsvariablen unterschiedlicher Codierungen (z.B. binär, reell, ganzzahlig) eignen sie sich besonders. Eine Vielzahl dieser Eigenschaften kennzeichnen die aus Entwurfsaufgaben formulierten Optimierungsaufgaben.

Zur Lösung von Optimierungsaufgaben, für die bereits spezielle Optimierungsverfahren entwickelt wurden, sollten sie nicht unbedingt verwendet werden.

„Niemand sollte erwarten, dass Evolutions- wie auch andere heuristische Optimierungssuchverfahren bei Aufgaben der linearen, quadratischen oder auch allgemeiner konvexer Optimierung mit zweimal stetig differenzierbarer unimodaler Zielfunktion den hierfür speziell entwickelten Algorithmen auch nur halbwegs ebenbürtig wären.“
[SCH88c], S. 157

„Evolutionäre Algorithmen sind keine universellen Problemlöser. Sie sind vielmehr universelle Suchheuristiken, die auch dann noch befriedigende Resultate liefern können, wenn keine aufgabenspezifischen Verfahren existieren oder deren Entwicklung einen unvermeidbaren hohen Aufwand erfordert. Sie sind in vielen Anwendungsbereichen (z.B. lineare oder quadratische Optimierung) traditionellen Verfahren völlig unterlegen. Ihre Stärken sind dagegen Flexibilität, Robustheit und Adaptivität.“ [HAM98]

Bei Optimierungsaufgaben mit Zielfunktionen, die aufwendige Berechnungen benötigen, ist der Einsatz Evolutionärer Algorithmen partiell zu empfehlen. Diese Eingrenzung wird in den letzten Jahren zunehmend durch den Einsatz ständig weiterentwickelter Rechentechnik abgeschwächt. Typische Anwendungsgebiete der Evolutionären Algorithmen im Bereich der Parameteroptimierung sind:

- technischer Entwurf (Flugzeugbau, elektronische Schaltungen, Strukturoptimierung)
- Extremwertberechnung mathematischer Funktionen

Im Bereich der kombinatorischen Optimierung sind folgende Anwendungen häufig zu finden:

- Stundenplanung (Personalbelegungspläne)
- Routenplanung (Handlungsreisendenproblem)
- Zeitplanung (Maschinenbelegungspläne)

Weitere Anwendungsgebiete sind in den Veröffentlichungen von Deb [DEB90], Nissen [NIS94] [NIS97] und Weicker [WEI02] zu finden.

3.3 Defizite

Gegenwärtiger Stand:

Zahlreiche Forschungsaktivitäten zur Verwendung der mathematischen Optimierung im Entwurfsprozess (= optimierungsbasierte Entwurfsstrategien) existieren schwerpunktmäßig für den Entwurf von Bauteilen mit Tragfunktion.

Die formulierten Optimierungsaufgaben im Entwurfsprozess sind in der Regel gekennzeichnet durch nichtlineare Zielfunktionen, nichtlineare Nebenbedingungen in Form von Ungleichungen und diskret-kontinuierliche Optimierungsvariablen. Diese Eigenschaften grenzen die Zahl geeigneter Optimierungsverfahren zur Lösung der Optimierungsaufgaben stark ein.

Evolutionäre Algorithmen sind moderne Optimierungsverfahren, die keine Einschränkungen bezüglich der Eigenschaften von Zielfunktionen, Nebenbedingungen und Optimierungsvariablen haben. Infolgedessen ist ihr Anwendungsspektrum weit gefächert, so dass ihre Verwendung zur Lösung von Optimierungsaufgaben im baupraktischen Entwurf nahe liegt.

Schwachstellen:

In der Praxis werden die optimierungsbasierten Entwurfsstrategien bisher nur selten verwendet, da:

- die Mehrzahl der Optimierungsverfahren sich lediglich zur Lösung von Optimierungsaufgaben spezieller Problemklassen eignen
- oftmals keine erforderliche Hard- und Software zur Verfügung steht.

Hinsichtlich Evolutionärer Algorithmen fehlen bisher ausreichende Aussagen über ihre Qualität bei einer Variation der:

- Anzahl der Optimierungsvariablen
- Einstellungen der Teilprozesse.

Daraus ergibt sich die Aufgabe zu klären:

- inwieweit sich Evolutionäre Algorithmen als Optimierungsverfahren zur Lösung von Optimierungsaufgaben, formuliert aus Entwurfsaufgaben, eignen
- welcher Aufbereitungsaufwand hinsichtlich der Festlegung verfahrensbezogener Einstellungen für eine praktische Anwendung Evolutionärer Algorithmen im Entwurfsprozess erforderlich ist.

Aufgabenstellung:

Zur Klärung dieser Fragestellungen sind Untersuchungen hilfreich, die an konkret ausgewählten Entwurfsobjekten durchgeführt werden. Neben der Beantwortung der methodischen Fragen sind die Untersuchungsergebnisse für eine Anwendung Evolutionärer Algorithmen im praktischen Entwurf aufzubereiten.

Des Weiteren ist eine Anpassung Evolutionärer Algorithmen an die Spezifik von Entwurfsaufgaben im Bauwesen durch Entwicklung hybrider Evolutionärer Algorithmen angedacht.

4 Optimierungsbasierte Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen

4.1 Vorbemerkungen

Evolutionäre Algorithmen eignen sich besonders zur Lösung von Optimierungsaufgaben gekennzeichnet durch nichtlineare, diskontinuierliche und multimodale Zielfunktionen mit Nebenbedingungen. Diese Eigenschaften sind auch charakteristisch für die Mehrzahl der Entwurfsaufgaben im Bauwesen. Weiterhin ermöglicht die derzeitige Hardware eine genauere Abbildung der biologischen Evolutionsprozesse.

Die vorliegende Arbeit setzt sich das Ziel, die Eignung Evolutionärer Algorithmen als Optimierungsverfahren zur Lösung von Optimierungsaufgaben, formuliert aus Entwurfsaufgaben im Bauwesen, zu untersuchen.

4.2 Prinzip Evolutionärer Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen orientieren sich an den Prinzipien der natürlichen biologischen Evolution, indem sie deren Grundmechanismen in Form von Teilprozessen auf abstrakter Ebene kopieren. Darwin [DAR89] beschreibt folgende Beobachtungen zur natürlichen biologischen Evolution:

- Es existiert eine große Vielfalt von Individuen einer Art (= Population), aber jedes Individuum ist einzigartig.
- Überlebensfähig sind nur die Lebewesen, deren Eigenschaften zum Futtererwerb, zur Ausnutzung des Lebensraums und zur Paarung am günstigsten entwickelt sind (Prinzip: "survival of the fittest" = natürliche Selektion), die schwächeren Lebewesen werden verdrängt und sterben aus.
- Es werden mehr Nachkommen erzeugt, als zum Erhalt der Rasse notwendig wären, jedoch bleibt die Populationsgröße, abgesehen von zeitweiligen Schwankungen, verhältnismäßig konstant.
- Die Nachkommen eines Elternpaares variieren in ihren Eigenschaften und Fähigkeiten.
- Natürliche Selektion führt über Generationen (= Evolutionsstufen) hinweg zu einer allmählichen Umbildung der Arten.

Die Schlussfolgerung Darwins ist:

Natürliche Selektion und Evolution funktionieren nur dann, wenn es eine Population von Individuen gibt, die Eigenschaften der Individuen variieren, und die Überlebensfähigkeit der Individuen von diesen Eigenschaften abhängt.

Petzold [PET98], Wuketits [WUK88] und Weickert [WEI02] stellen überschaubar die Zusammenhänge der Begriffswelt zwischen Biologie und Nachahmung dar. In [VDI3550] sind die wichtigsten Begriffe Evolutionärer Algorithmen mit Definitionen aufgeführt.

Die Abbildung 4.1 zeigt das prinzipielle Schema Evolutionärer Algorithmen.

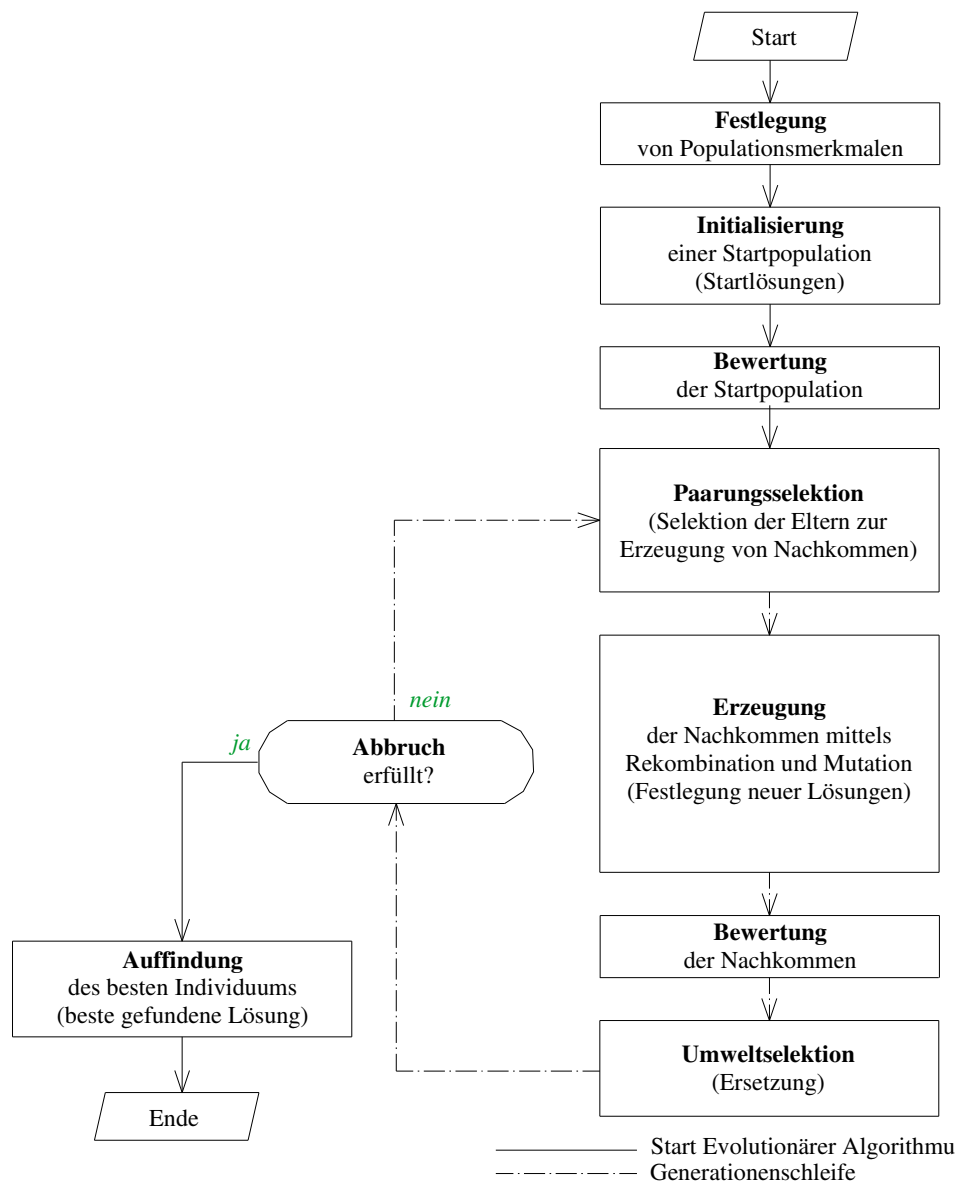


Abbildung 4.1: Prinzip Evolutionärer Algorithmen mit Darstellung der Teilprozesse

Die wesentlichen Teilprozesse werden nachfolgend erläutert:

- **Festlegung von Populationsmerkmalen:** Die Festlegung von Repräsentation der Individuen, Populationsmodell und Populationsgröße ist vorzunehmen.
- **Initialisierung einer Startpopulation:** Eine Anzahl von Individuen wird initialisiert. Dies erfolgt durch stochastische Auswahl oder durch definierte Vorgabe.
- **Bewertung der Startpopulation:** Jedem Individuum wird eine Fitness zugewiesen. Dann geht der Algorithmus in die Generationenschleife.
- **Paarungsselektion:** Auf der Grundlage eines gewählten Auswahlverfahrens, das sich an der Fitness orientiert, werden die Eltern ermittelt.
- **Erzeugung:** Mittels evolutionärer Operatoren (Rekombination und Mutation) werden aus den Eltern Nachkommen (neue modifizierte Lösungen) erzeugt.

- **Bewertung der Nachkommen:** Jedem Nachkommen wird eine Fitness zugewiesen, um eine Bewertung der Individuen zu ermöglichen.
- **Umweltselektion:** Ein ausgewähltes Ersetzungsschema entscheidet am Ende einer Generationenschleife, aus welchen Individuen sich die neue Population zusammensetzt. Ohne die Umweltselektion könnte keine konstante Populationsgröße garantiert werden. Sie würde immer weiter anwachsen.
- **Abbruch:** Jeder Iterationsschritt einer Populationsfolge ist eine Generation und wiederholt sich, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist.
- **Auffindung:** Das Individuum mit der höchsten Fitness, liegt nach Abbruch der Generationenschleife als bestes Individuum (beste gefundene Lösung des Suchverlaufes) vor.

Durch die simulierte Evolution mit dem Prinzip "survival of the fittest" und der Verwendung von Informationen des bisherigen Suchverlaufes kommt es bei Evolutionären Algorithmen zu einer Suche in Erfolg versprechenden Bereichen. Die Bevorzugung von Individuen besserer Qualität steigert die Wahrscheinlichkeit, das globale Optimum zu finden.

Die wesentlichen Vor- und Nachteile Evolutionärer Algorithmen sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile Evolutionärer Algorithmen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - einfache Basisprinzipien - keine Einschränkungen für Zielfunktionen (insbesondere keine Stetigkeit und Differenzierbarkeit erforderlich) - keine Einschränkungen für Nebenbedingungen - breites Anwendungsspektrum und flexible Anpassungsmöglichkeiten - geeignet für komplexe Suchräume - kombinierbar mit anderen Optimierungsverfahren - ermöglicht parallele Suche - ist startwertunabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> - vorzeitige Konvergenz (genetische Drift) vermindert die Qualität Evolutionärer Algorithmen - Problem der Behandlung von Nebenbedingungen ist unzureichend gelöst - ineffektive Schlussphase der Suche - schwierige Anpassung an Problemstellung und Festlegung der Einstellungen der Teilprozesse - fehlende Garantie, globale Lösung in beschränkter Zeit zu finden - großer Analyseaufwand, bedingt durch Anzahl erforderlicher Berechnungen

Das Ziel Evolutionärer Algorithmen ist das Auffinden eines Individuums mit maximaler Fitness. Der Suchprozess nach diesem Individuum wird durch die Einstellungen der Teilprozesse gesteuert. Diese Einstellungen umfassen:

- allgemeine Populationsmerkmale
- evolutionäre Verfahren und Parameter.

4.3 Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen

In dieser Arbeit wird ein *Evolutionärer Algorithmus* auf der Basis *Genetischer Algorithmen* verwendet. Demzufolge werden vorzugsweise die Besonderheiten Genetischer Algorithmen beschrieben.

Allgemein führen alle Evolutionären Algorithmen nur dann zu einem effektiven Ergebnis, wenn die Einstellungen der Teilprozesse aufeinander abgestimmt sind. Theoretisch fundierte Empfehlungen zu den Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen gibt es bisher nicht, d.h. es existiert kein allgemeingültiger Evolutionärer Algorithmus.

Die fehlenden Aussagen über die Wechselwirkungen zwischen den Einstellungen der Teilprozesse erklären die Existenz der zahlreichen Evolutionären Algorithmen, die sich durch die Einstellungen der Teilprozesse unterscheiden. Die Festlegung dieser Einstellungen ist in der Regel eine zeitintensive Aufgabe. Neben notwendigen Untersuchungen und Vergleichsrechnungen an Testfunktionen bzw. Testproblemen aus der Literatur sind ebenso Erfahrungen und Erkenntnisse anderer Forscher zu nutzen. Weiterhin liegen nur teilweise empirische Vergleiche unterschiedlicher Formen Evolutionärer Algorithmen für typische Anwendungsprobleme vor. Hinweise zu einigen evolutionären Merkmalen, Verfahren und Operatoren gibt Pohlheim [POH00]. Er differenziert seine Empfehlungen nach den Problemklassen Allgemeingültigkeit, Parameteroptimierungen und Reihenfolgeoptimierungen.

Nachfolgend werden die Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen in dem Umfang vorgestellt, wie es für die weiteren Betrachtungen notwendig ist. Des Weiteren werden Hinweise und Bewertungen aus der Literatur wiedergegeben.

Auf eine direkte Differenzierung entsprechend der Hauptformen Evolutionärer Algorithmen wird bewusst verzichtet, da sie seit den letzten Jahren eine Symbiose bilden. Ausführliche Erläuterungen zu den einzelnen Hauptformen liefern [NIS94, NIS97, POH00, BAE00a, BAE00b].

Teilprozess: Festlegung von Populationsmerkmalen

Zunächst erfolgen Aussagen über die *Populationsmerkmale* Repräsentation der Individuen, Populationsgröße und Populationsmodelle.

Die *Repräsentation der Individuen* ist auf binärer sowie dekadischer Basis möglich. In Abhängigkeit der betrachteten Aufgabe ist eine geeignete Repräsentation der Individuen zu wählen. Ein Exkurs zu den Hauptformen Evolutionärer Algorithmen zeigt Unterschiede in den herkömmlich genutzten Repräsentationen der Individuen. Klassische Genetische Algorithmen arbeiten auf Grundlage des binären Codes und jeder String symbolisiert ein Individuum. Evolutionsstrategien arbeiten mit reellwertigen Vektoren, wobei jeder Vektor ein Individuum darstellt.

Michalewicz [MIC99] nimmt einen Vergleich der Codierungen vor, indem er deren Eigenschaften an Beispieluntersuchungen bewertet. Ergebnis seiner Betrachtungen ist, dass die Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis (reellwertige Zahlen) vorteilhafter ist als auf binärer Basis, hinsichtlich:

- Schnelligkeit des Durchlaufs vom Algorithmus
- Kontinuität der Entwicklung von Generation zu Generation.

Hammel und Bäck [HAM98] zeigen die Unterschiede verschiedener Repräsentationen der Individuen auf. Bei Wardlaw und Sharif [WAR99] wird auf die Vorzüge der dekadischen Basis gegenüber der binären Basis eingegangen.

Entscheidend für die Wahl der *Populationsgröße* ist die Gewährleistung einer möglichst vollständigen Durchforschung des Suchraumes, um tatsächlich das globale Optimum zu finden. Konkrete Aussagen zur Bestimmung der Populationsgröße existieren nicht.

In der Regel erfolgt die Festlegung der Populationsgröße in Abhängigkeit der jeweiligen Problemstellung. Hierzu sind mehrere Untersuchungen (Testläufe) und Vergleiche mit Ergebnissen anderer Forscher erforderlich.

Kinnebrock [KIN94b] empfiehlt bei Genetischen Algorithmen eine Populationsgröße von 50 bis einigen hundert. Nissen [NIS97] nennt für die Populationsgröße Werte zwischen 30 und 500. Er weist darauf hin, dass die Populationsgröße im Allgemeinen eine gerade Zahl sein sollte.

Bei den historisch interessanten Vorläufern der heutigen Evolutionsstrategien bestand die Populationsgröße lediglich aus einer Lösung.

Zu Beginn der Verwendung Evolutionärer Algorithmen wurde mit einer Gesamtpopulation gearbeitet. Die Entwicklung von Parallelrechnern aktivierte die Ansätze, Berechnungen auf mehrere Prozessoren zu verteilen, um eine Reduzierung der Rechenzeit zu ermöglichen und größere Probleme zu lösen. Mit der Parallelisierung wurde die Aufteilung einer Population möglich.

Es wird zwischen Aufspaltung von Populationen (= *Populationsmodelle*) und Aufteilung einzelner Schritte Evolutionärer Algorithmen (Rekombination, Mutation, Systemanalysen) der Gesamtpopulation unterschieden.

Für die Aufspaltung einer Population werden folgende Populationsmodelle unterschieden:

- globales Modell (= Gesamtpopulation)
- regionales Modell (= Inselmodell oder Migrationsmodell)
- lokales Modell (= Nachbarschaftsmodell oder Diffusionsmodell)

Die Arbeiten von Pohlheim [POH00], Kohlmorgen [KOH99] und Hammel/Bäck [HAM98] befassen sich mit dem Thema Populationsmodelle.

Teilprozess: Initialisierung einer Startpopulation

Zur Erzeugung von Startpopulationen gibt es zwei Möglichkeiten.

Stochastische Initialisierung von Individuen mit gleichen Wahrscheinlichkeiten aus einem definierten Datenpool ist die wohl am häufigsten verwendete Variante. Eine große Heterogenität der Ausgangspopulation wird gewährleistet und das Ausschließen von Bereichen des Suchraumes verhindert.

Die *deterministische Vorgabe* von Individuen kennzeichnet die zweite Variante. Hier werden bislang bekannte Individuen, z. B. aus vorangegangenen Optimierungen oder durch Festlegung auf der Grundlage von Expertenwissen, vorgegeben. Die definierten und in eine Population eingefügten Individuen können so dominant sein, dass die Suche vorzeitig konvergiert.

Pohlheim [POH96] beschreibt die Einbeziehung von aufgabenspezifischem Wissen am Beispiel der Optimierung eines Gewächshausklimamodells. Er geht auf die Vorgehensweise und die erzielten Resultate ein.

Teilprozess: Bewertung der Startpopulation bzw. der Nachkommen

Die Bewertung von Individuen erfolgt anhand ihrer Fitness.

In der Biologie bezeichnet die Fitness den Grad der Anpassung eines Individuums an die jeweilige Lebensumgebung. Je höher die Fitness eines Individuums ist, desto größer ist seine Überlebensfähigkeit.

Bei Evolutionären Algorithmen wird durch ein gewähltes *Verfahren der Fitnesszuweisung* jedem Individuum einer Population eine Fitness zugewiesen, die sich unter Einbeziehung von Zielfunktionswert bzw. modifiziertem Zielfunktionswert¹ ergibt. Dabei erhalten bessere Individuen eine höhere Fitness als schlechtere Individuen.

Die Verfahren der Fitnesszuweisung legen in der Regel die Selektionswahrscheinlichkeiten der Individuen, durch die Steuerung des Selektionsdruckes, fest.

Folgende Verfahren der Fitnesszuweisung werden unterschieden:

- proportionale Fitnesszuweisung
- rangbasierte Fitnesszuweisung
- mehrkriterielle Fitnesszuweisung.

Bei *proportionaler Fitnesszuweisung* [GOL89] wird jedem Individuum eine Fitness zugeordnet, die proportional zu seinem Zielfunktionswert bzw. modifiziertem Zielfunktionswert ist. Unterschieden wird zwischen linearen (Gl. 4-1), linear dynamischen (Gl. 4-2), logarithmischen (Gl. 4-3) und exponentiellen Skalierungen (Gl. 4-4) [POH00].

$$Fitness(Ind) = a * ZFW(Ind) + b \quad (4-1)$$

$$Fitness(Ind) = a * ZFW(Ind) + b(Gnr_i) \quad (4-2)$$

$$Fitness(Ind) = b - \log(ZFW(Ind)) \quad (4-3)$$

$$Fitness(Ind) = (a * ZFW(Ind) + b)^k \quad (4-4)$$

Fitness(Ind) - Fitness von Individuum i

ZFW(Ind) – Zielfunktionswert von Individuum i

a, b, k – problemspezifische Skalierungsgrößen

Gnr_i – aktuelle Generation

Eine effektive Steuerung des Selektionsdruckes ist nicht möglich. Der entscheidende Faktor für den vorliegenden Selektionsdruck ist die Zusammensetzung der Population [POH00].

Eine Vielzahl gleich guter Individuen führt zu einem niedrigen Selektionsdruck, d.h. die Selektionswahrscheinlichkeiten der Individuen sind nahezu gleich groß.

¹ Einbeziehung verletzter Nebenbedingungen

Dominiert eine geringe Anzahl gleich guter Individuen die Population, so wird diesen Individuen eine hohe Fitness zugewiesen. Hieraus resultieren hohe Selektionswahrscheinlichkeiten der besten Individuen, die zu einem hohen Selektionsdruck führen.

Proportionale Fitnesszuweisung bringt viele Probleme mit sich, wie beispielsweise die Ineffektivität von Rekombination als Suchoperator und damit verbunden die Abhängigkeit von Suchfortschritten allein durch Mutation. Dies führt zu einer kaum genutzten Verwendung in der Praxis.

Die *rangbasierte Fitnesszuweisung*, auch als ranking bezeichnet, wird dagegen häufig für praktische Aufgaben eingesetzt. Die Individuen einer Population werden abhängig von ihrem Zielfunktions- bzw. modifizierten Zielfunktionswert in absteigender Form sortiert (bestes Individuum: Pos = PopSize, schlechtestes Individuum: Pos = 1). Entsprechend ihrer Position in der Rangordnung der aktuellen Population wird jeder Lösung eine Fitness zugewiesen. Unterschieden werden linear rangbasierte Fitnesszuweisung (Gl. 4-5) und nichtlinear rangbasierte Fitnesszuweisung (Gl. 4-6) [POH00].

$$Fitness(Ind) = 2 - p_s + 2 * (p_s - 1) * \frac{(Pos - 1)}{PopSize - 1} \quad (4-5)$$

$$Fitness(Ind) = \frac{PopSize * X^{Pos-1}}{\sum_{i=1}^{\mu} X^{i-1}} \quad (4-6)$$

Fitness(Ind) - Fitness von Individuum i

p_s - Selektionsdruck

Pos - Rang von Individuum i im sortierten Selektionspool

PopSize - Populationsgröße

X – Lösung des folgenden Polynoms:

$$0 = (p_s - 1) * X^{PopSize-1} + p_s * X^{PopSize-2} + \dots + p_s * X + p_s$$

Für linear rangbasierte Fitnesszuweisung ist ein Selektionsdruck p_s zwischen 1,0 und 2,0 erlaubt. Für nichtlinear rangbasierte Fitnesszuweisung sind auch höhere Werte möglich. Die absoluten Differenzen zwischen den Werten der Fitness entfallen bei rangbasierter Fitnesszuweisung. Eine gleichmäßige Skalierung des Selektionspools wird möglich.

Die *mehrkriterielle Fitnesszuweisung* [HAM98, POH00, NIS97] spielt bei Existenz mehrerer Zielfunktionen eine Rolle. Für praktische Anwendungen muss entschieden werden, ob eine Ersatzzielfunktion zur Lösung des Problems ausreicht oder ob die Berücksichtigung aller Zielfunktionen notwendig ist. Letzteres kann beispielsweise durch die Ermittlung einer Pareto-Menge erfolgen. Das Pareto-Optimum wird von keinem anderen Individuum dominiert. Häufig reicht jedoch für Probleme der Praxis die Bildung einer Ersatzzielfunktion, in der alle Zielfunktionen mit eventuellen Wichtungsfaktoren enthalten sind, aus.

Ausführliche Bewertungen der zu den Verfahren der Fitnesszuweisung sind bei Pohlheim [POH00] zu finden, der linear rangbasierte Fitnesszuweisung empfiehlt. Entscheidend ist dabei der Selektionsdruck, reguliert durch p_s . Gute Erfahrungen (nach Pohlheim) wurden mit einem Selektionsdruck von $1,5 \leq p_s \leq 2,0$ gemacht, wobei mit Zunahme der Populationsgröße ($\text{PopSize} > 500$) ein höherer Selektionsdruck zu verwenden ist. Baker [BAK85] empfiehlt für p_s einen Wert von 1,1.

Oftmals sind bei Optimierungsaufgaben Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Die Verletzung von Nebenbedingungen ist innerhalb Evolutionärer Algorithmen erlaubt. Ein wesentlicher Grund ist der Erhalt guter genetischer Erbinformationen, die auch in Individuen mit verletzten Nebenbedingungen enthalten sein können.

Zur Berücksichtigung verletzter Nebenbedingungen werden vorwiegend Straffunktionen verwendet, deren Grundidee die Bestrafung unzulässiger Lösungen (= Individuen) ist. Es gibt innere und äußere Straffunktionen. Die Vorteile der äußeren Straffunktion gegenüber der inneren Straffunktion sind:

- Berücksichtigung von Nebenbedingungen in Form von Gleichungen und Ungleichungen²
- Lage von Startlösungen im unzulässigen Bereich möglich.

Innerhalb Evolutionärer Algorithmen wird meist die Methode der äußeren Straffunktionen verwendet [GRI98, NIS97, BRU96]. Der Strafterm C_{ges} (Gl. 4-7) setzt sich aus den verletzten Nebenbedingungen zusammen ($g_i(\underline{x})$ - Ungleichungen, $h_j(\underline{x})$ - Gleichungen).

$$C_{\text{ges}} = \alpha \cdot \sum_{i=1}^q C_i + (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^p C_j \quad (4-7)$$

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{wenn } g_i(\underline{x}) \leq 0 \\ g_i & \text{wenn } g_i(\underline{x}) > 0 \end{cases}$$

$$C_j = \begin{cases} 0 & \text{wenn } h_j(\underline{x}) = 0 \\ h_j & \text{wenn } h_j(\underline{x}) > 0 \\ |h_j| & \text{wenn } h_j(\underline{x}) < 0 \end{cases}$$

α = Wichtungsfaktor

Durch Addition von Zielfunktion Z und Strafterm C_{ges} wird eine modifizierte Zielfunktion Z' (Gl. 4-8) gebildet.

$$Z' = Z + r * C_{\text{ges}} \quad (4-8)$$

r = Strafparameter

Der Faktor r dient zur Wichtung des Strafterms C_{ges} in der modifizierten Zielfunktion Z' und wird als Strafparameter bezeichnet.

Da die numerischen Werte von Z und C_{ges} je nach Problemstellung stark voneinander abweichen können, sollten die verletzten Nebenbedingungen in einer normalisierten Form in die modifizierte Zielfunktion Z' (Gl. 4-9) eingebracht werden.

$$Z' = Z(1 + r * C_{\text{ges}}) \quad (4-9)$$

² innere Straffunktion: nur Ungleichungen

„Um Konvergenz von $f(x)^3$ gegen die Lösung des restriktionsbehafteten Ausgangsproblems im Generationsablauf der Evolutionsstrategie zu erreichen, wird der Strafparameter r ausgehend von einem Anfangswert $r^{(1)} = 1$ in jedem Generationsschritt erhöht, z.B. verdoppelt. Diese Vorgehensweise ist algorithmisch einfach und hat sich in verschiedenen Anwendungen der Strukturmechanik als angemessen gezeigt., [GRI98], S. 39

In der vorliegenden Arbeit wird die modifizierte Zielfunktion Z' nach Gleichung 4-10 [PEZ00] ermittelt. Der Strafparameter r ist mit dem Wert 1 belegt und wird im Generationenverlauf nicht erhöht.

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad (4-10)$$

Weitere Hinweise zu Straffunktionen liefern [HAM98, LAW87, BRU96, RIC89, BAE00b, GOT00, PET98]. Die beiden letzteren [GOT00, PET98] gehen weiterhin auf alternative Methoden zur Behandlung von Nebenbedingungen ein.

Teilprozess: Paarungsselektion

Unter Verwendung eines *Auswahlverfahren* wird auf Grundlage reellwertiger Selektionswahrscheinlichkeiten, ermittelt durch ein Verfahren der Fitnesszuweisung, die ganzzahlige Menge selektierter Individuen (= Eltern) festgelegt. Um eine Populationsvielfalt zu erhalten bzw. zu erreichen, muss im Allgemeinen sichergestellt werden, dass alle Individuen ausgewählt werden können, sowohl die mit hoher Fitness als auch die mit niedriger Fitness.

Die wichtigsten Auswahlverfahren sind:

- Rouletteselektion
- stochastic universal sampling
- Wettkampfselektion.

Rouletteselektion, auch roulette wheel selection oder stochastic sampling with replacement genannt, ist das wohl bekannteste Auswahlverfahren.

Anhand eines Rouletterades (Abb. 4.2) kann dessen Prinzip beschrieben werden. Auf dem Rouletterad, versehen mit einem Zeiger, werden die reellwertigen Selektionswahrscheinlichkeiten der einzelnen Individuen abgebildet. Durch Drehen des Rouletterades wird jeweils ein Individuum durch den Zeiger gewählt und in den so genannten mating pool gelegt. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis die definierte Anzahl der Individuen für den mating pool erreicht ist. Nachteil dieses Verfahrens ist die Gefahr, dass durch die durchgeführten stochastischen Experimente des mehrmaligen Drehens des Rouletterades gleiche Individuen mehrfach im mating pool landen können.

³ gleich Z

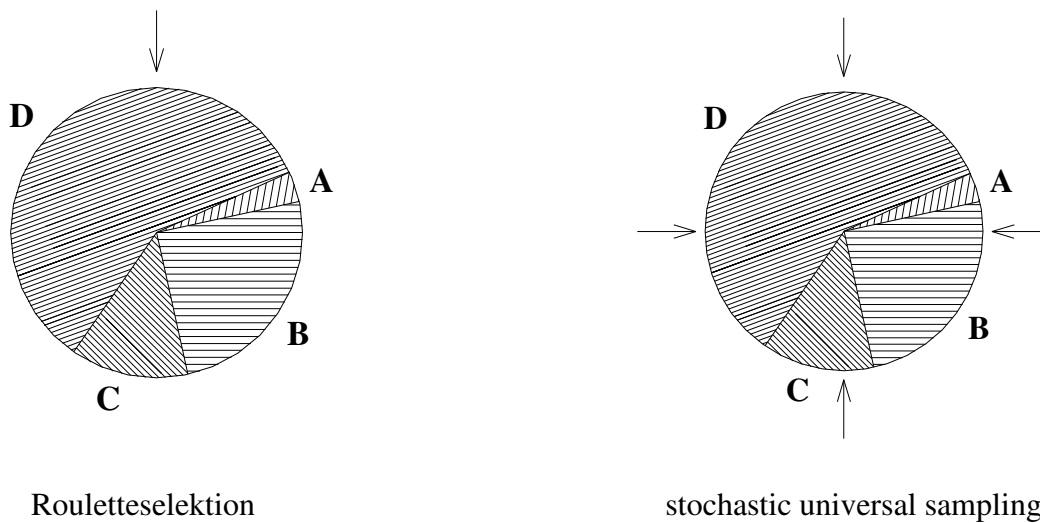


Abbildung 4.2: Prinzip von Rouletteselektion und stochastic universal sampling

Stochastic universal sampling besitzt eine Anzahl von n Zeigern (= Anzahl erforderlicher Individuen für den mating pool) (Abb. 4.2), welche in gleichen Abständen um das Rouletterad verteilt sind. Lediglich ein einmaliges Drehen ist erforderlich, um den mating pool zu füllen.

Wettkampfselektion, häufig auch als Turniererlektion bezeichnet, geht auf nicht veröffentlichte Überlegungen von Wetzel zurück [NIS97]. Prinzip des Verfahrens ist das Durchführen von Turnieren zwischen Individuen. Durch die Turniergröße $TourSize$ ($2 \leq TourSize \leq PopSize$) wird die Anzahl der Individuen (Gegner) für ein Turnier definiert. Die Auswahl der Individuen erfolgt gleichmäßig verteilt aus dem Selektionspool. Sieger eines Turniers und somit ausgewähltes Individuum ist das mit der höchsten Fitness. Es werden so viele Turniere durchgeführt, wie Individuen für den mating pool auszuwählen sind. Bei konstanter Populationsgröße und Zunahme von $TourSize$ steigt der Selektionsdruck. Yang und Soh [YAN97] verwenden die Wettkampfselektion zur Lösung von Aufgaben in der Strukturoptimierung.

Für die Wettkampfselektion ist eine Fitnesszuweisung erforderlich mit monotoner Zuweisung der Fitness entsprechend der Reihenfolge der Zielfunktionswerte bzw. modifizierten Zielfunktionswerte. Diese Forderung wird von den zuvor beschriebenen Verfahren der Fitnesszuweisung erfüllt.

Teilprozess: Erzeugung von Nachkommen mittels Rekombination

Rekombination imitiert in abstrakter Form die sexuelle Fortpflanzung. Durch zufallsgesteuerten Austausch bzw. Vermischung genetischer Informationen (= Erbanlagen) selektierter Eltern werden Nachkommen gebildet. Für Genetische Algorithmen ist Rekombination der primäre Operator, für Evolutionsstrategien der sekundäre Operator.

Gegenwärtig gehen die Ansichten noch weit auseinander, auf welche Weise Rekombination zur Lokalisierung guter Individuen beiträgt.

Pohlheim [POH00] differenziert zwischen Rekombination für:

- Probleme der Parameteroptimierung
 - Repräsentation der Individuen auf binärer Basis
 - Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis (reell, ganzzahlig, diskret)
- Probleme der Reihenfolgeoptimierung.

Für Problemstellungen mit binärer Codierung finden spezielle Rekombinationsverfahren ihre Anwendung, die mit crossover bezeichnet werden. Beim crossover werden die genetischen Erbinformationen der Eltern an einigen Stellen aufgebrochen und die sich ergebenden Teilstücke "kreuzweise" wieder zusammengefügt. Die Vorgehensweise beim crossover wird gezielt durch stochastische Entscheidungen beeinflusst. Einzelne Teilstrukturen von den Eltern werden auf die Nachkommen übertragen.

Pohlheim [POH00] weist darauf hin, dass Aufgaben der global orientierten Parameteroptimierung (Individuen werden durch reellwertige und ganzzahlige Größen beschrieben) auch mit crossover-Verfahren gelöst werden können.

In den letzten Jahrzehnten sind viele Rekombinationsverfahren entwickelt worden. Die wichtigsten Rekombinationsverfahren für Parameteroptimierungen (Tab. 4.2) werden erläutert und ihr Wirkungsprinzip im Abschnitt 4.4.2 untersucht.

Tabelle 4.2: Rekombinationsverfahren

Repräsentation der Individuen auf binärer Basis (= crossover)	Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis
(1) Multipoint crossover (2) Shuffle crossover (3) Uniform crossover	(4) Diskrete Rekombination (5) Intermediäre Rekombination

(1) Multipoint crossover

Multipoint crossover wurde von DeJong [DEJ75] entwickelt. Das Prinzip des multipoint crossover besteht in der Splittung und dem anschließenden Austausch der Gene zweier Eltern. Die crossover Punkte (= Aufspaltungspunkt AP) an denen die Individuen getrennt und getauscht werden, erfolgt auf der Basis einer Gleichverteilung zwischen 1 und L-1 (L = Anzahl der Positionen eines Individuums).

In Abbildung 4.3 ist die Arbeitsweise von multipoint crossover dargestellt. Bislang ist die Frage nach der geeigneten Anzahl der Aufspaltungspunkte noch nicht geklärt [SCH92]. Aus Symmetriegründen wählt man meist gerade Zahlen, sehr häufig wird als Anzahl der Aufspaltungspunkte AP = 2 gewählt. Dies wird auch als twopoint oder doublepoint crossover bezeichnet.

Nach [POH00] wird mit Zunahme der crossover Punkte ein stärkerer Auseinanderreißender Effekt erzielt. Die Durchmischung der genetischen Informationen nimmt zu und eine verstärkte Breitensuche wird erzielt, anstatt sehr gute Individuen in der Suche sehr zeitig zu bevorzugen. Multipoint crossover kann als ein Rekombinationsverfahren mit robusterer Suche

vorzuzug. Multipoint crossover kann als ein Rekombinationsverfahren mit robusterer Suche bezeichnet werden.

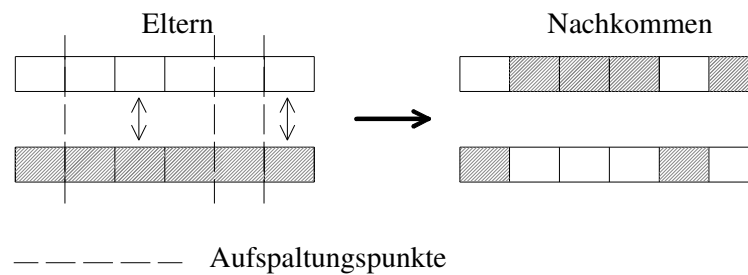


Abbildung 4.3: Prinzip von multipoint crossover

Singlepoint crossover (Abb.4.4) stellt den Spezialfall von multipoint crossover mit nur einem Aufspaltungspunkt AP dar und geht auf Holland [HOL75] zurück (Verwendung im traditionellen kanonischen Genetischen Algorithmus). Die Erbanlagen von zwei Eltern werden an einem Aufspaltungspunkt ausgetauscht. Über eine gleichverteilte Zufallszahl n ($1 \leq n \leq L$) wird der Aufspaltungspunkt der genetischen Erbanlagen definiert. Ab n bis L erfolgt der Austausch der Erbinformationen beider Eltern.

Bei diesem Rekombinationsverfahren liegt eine relativ geringe vermischende Wirkung vor, d.h. eine geringe Explorativität⁴.

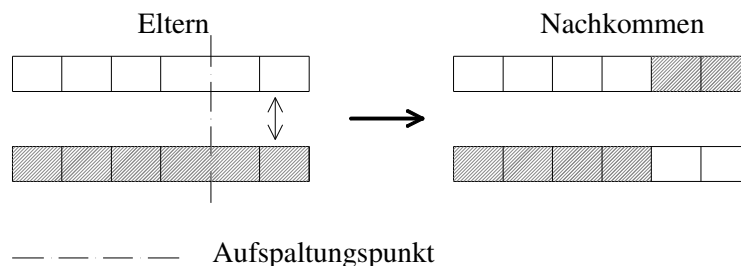


Abbildung 4.4: Prinzip von singlepoint crossover

(2) Shuffle crossover (shuffle = mischen)

Die Entwickler des *shuffle crossover* sind Caruana, Eshelman und Schaffer [CAR89]. Das Wirkprinzip (Abb. 4.5) ist ähnlich dem von multipoint und singlepoint crossover.

Wesentlicher Unterschied zu den zuvor beschriebenen Vorgehensweisen liegt in der Vermischung der genetischen Erbinformationen beider Elternteile, bevor das Aufspalten und Austauschen wirksam wird. Das Vermischen der Erbinformationen verhindert die Bevorzugung von bestimmten Positionen.

Die Nummerierung der Gene vor dem Mischen ist erforderlich, damit nach dem Zusammenfügen der Abschnitte, die Gene wieder „entmischt“ werden können, d.h. die Einordnung an ihre ursprüngliche Position im Individuum.

⁴ Generierung und testen von Individuen in neuen Bereichen des Suchraums

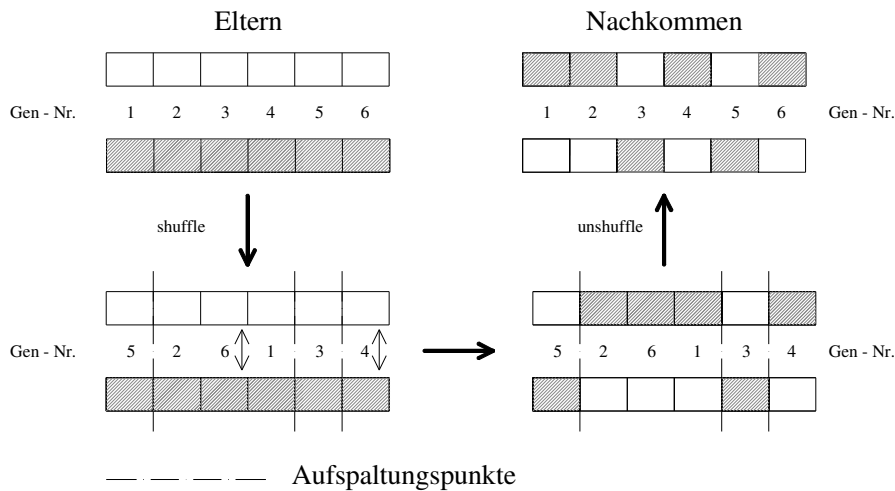


Abbildung 4.5: Prinzip von shuffle crossover (Darstellung nach [NIS97])

(3) Uniform crossover – Diskrete Rekombination

Uniform crossover und *diskrete Rekombination* (Abb. 4.6) besitzen die gleiche Vorgehensweise. Der Unterschied liegt in ihrem Anwendungsbereich. Bei Problemstellungen mit binärer Codierung findet uniform crossover Anwendung (entwickelt von Davis [DAV91] und Syswerda [SYS89] für binäre Codierung, d.h. aus dem Bereich der Genetische Algorithmen). Für Aufgaben mit Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis wird diskrete Rekombination (Bereich Evolutionsstrategien) verwendet.

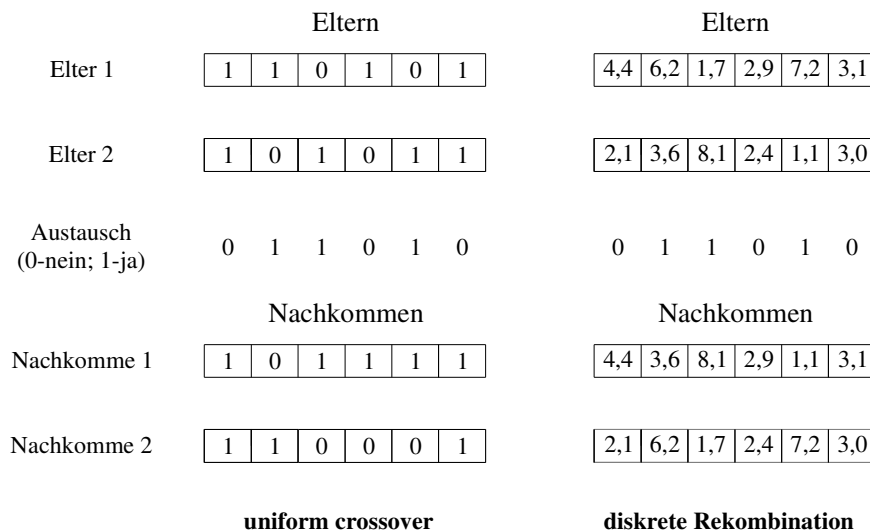


Abbildung 4.6: Prinzip von uniform crossover und diskreter Rekombination (Darstellung nach [NIS97])

Das Prinzip dieser Rekombinationsverfahren beruht auf der Festlegung, ob für die Positionen der Eltern (binär – Bitposition; reell, ganzzahlig oder diskret – Genposition) ein Austausch erfolgt oder nicht. Dieser Austausch findet bei uniform crossover mit einer positionsbezogenen Austauschwahrscheinlichkeit p_{ux} statt. Bei Nissen [NIS97] werden hierfür Werte von $0,5 \leq p_{ux} \leq 0,8$ empfohlen.

Bei diskreter Rekombination wird für jede Genposition die Austauschwahrscheinlichkeit nach Gleichung 4-11 [POH00] neu bestimmt.

$$\text{Gen}_i^N = \text{Gen}_i^{E_1} * a_i + \text{Gen}_i^{E_2} * (1 - a_i) \quad i \in (1, 2, \dots, N_{\text{Gen}}) \quad (4-11)$$

N_{gen} – Anzahl der Genpositionen eines Individuums i

$a_i \in \{0, 1\}$ – Skalierungsfaktor, gleichverteilte Zufallszahl

(a_i für jede Position i neu bestimmt)

(4) Intermediäre Rekombination

Bei *intermediärer Rekombination* findet kein Austausch der Gene statt, sondern deren Verschmelzung. Insofern ist dieses Verfahren lediglich für reelle oder ganzzahlige Größen geeignet. Falls eine binäre Codierung vorliegt, ist zuvor eine Decodierung notwendig.

Traditionell stammt die intermediäre Rekombination aus dem Bereich der Evolutionsstrategien. Hier wird sie auch als Mittelwertrekombination (= Mittelwertbildung) bezeichnet, d.h. der Skalierungsfaktor a_i wird auf 0,5 gesetzt (Abbildung 4.7 - Variante 1). Aus einem Elternpaar wird somit ein Nachkomme erzeugt.

	Eltern	Eltern												
Elter 1	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">4,4</td> <td style="padding: 2px 5px;">6,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">1,7</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">7,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,1</td> </tr> </table>	4,4	6,2	1,7	2,9	7,2	3,1	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">4,4</td> <td style="padding: 2px 5px;">6,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">1,7</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">7,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,1</td> </tr> </table>	4,4	6,2	1,7	2,9	7,2	3,1
4,4	6,2	1,7	2,9	7,2	3,1									
4,4	6,2	1,7	2,9	7,2	3,1									
Elter 2	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">2,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,6</td> <td style="padding: 2px 5px;">8,1</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,5</td> <td style="padding: 2px 5px;">1,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,0</td> </tr> </table>	2,2	3,6	8,1	2,5	1,2	3,0	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">2,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,6</td> <td style="padding: 2px 5px;">8,1</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,5</td> <td style="padding: 2px 5px;">1,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,0</td> </tr> </table>	2,2	3,6	8,1	2,5	1,2	3,0
2,2	3,6	8,1	2,5	1,2	3,0									
2,2	3,6	8,1	2,5	1,2	3,0									
a_i	0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	0,4 0,1 0,6 0,8 0,4 0,5												
$1-a_i$	0,5 0,5 0,5 0,5 0,5 0,5	0,6 0,9 0,4 0,2 0,6 0,5												
	Nachkomme	Nachkommen												
Nachkomme 1	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">3,3</td> <td style="padding: 2px 5px;">4,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">4,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,7</td> <td style="padding: 2px 5px;">4,2</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,1</td> </tr> </table>	3,3	4,9	4,9	2,7	4,2	3,1	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">3,1</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">4,3</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,8</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,6</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,1</td> </tr> </table>	3,1	3,9	4,3	2,8	3,6	3,1
3,3	4,9	4,9	2,7	4,2	3,1									
3,1	3,9	4,3	2,8	3,6	3,1									
Nachkomme 2	—————	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">3,5</td> <td style="padding: 2px 5px;">5,9</td> <td style="padding: 2px 5px;">5,5</td> <td style="padding: 2px 5px;">2,6</td> <td style="padding: 2px 5px;">4,8</td> <td style="padding: 2px 5px;">3,0</td> </tr> </table>	3,5	5,9	5,5	2,6	4,8	3,0						
3,5	5,9	5,5	2,6	4,8	3,0									
	Variante 1	Variante 2												

Abbildung 4.7: Prinzip von intermediärer Rekombination (Darstellung nach [NIS94])

Bei Variante 2 (Gl. 4-12 nach [POH00]) (Abb. 4.7 - Variante 2) wird der Faktor a_i für jede Genposition im Intervall $[0, 1]$ als gleichverteilte Zufallszahl neu bestimmt. Da die Nachkommen im Lösungsbereich der Eltern liegen, reduziert sich die Lösungsvielfalt schnell. Eine höhere Mutationsrate ist erforderlich, um die explorativen Eigenschaft zu erhalten. Daher empfiehlt Pohlheim [POH00], den Skalierungsfaktor a_i gleichverteilt im Intervall $[-0,25, 1,25]$ zu wählen.

$$\text{Gen}_i^N = \text{Gen}_i^{E1} * a_i + \text{Gen}_i^{E2} * (1 - a_i) \quad i \in (1, 2, \dots, N_{\text{Gen}}) \quad (4-12)$$

$a_i \in [-d, 1+d]$ – Skalierungsfaktor, gleichverteilte Zufallszahl, $d = 0,25$

(a_i für jede Position i neu bestimmt)

Laut Nissen [NIS97] ist momentan die bisexuelle Rekombination (zwei Eltern) bedeutend, aber in Zukunft wird wahrscheinlich die multisexuelle Rekombination eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. In [NIS97] werden Beispiele für multisexuelle Rekombination, z.B. diagonal crossover, vorgestellt.

Bisher fehlen zufrieden stellende Aussagen, welches Rekombinationsverfahren zu verwenden ist. Nissen [NIS97] weist darauf hin, dass gegenwärtig multipoint crossover und uniform crossover als Standard anzusehen sind und singlepoint crossover nicht als Rekombinationsverfahren zu empfehlen ist. Für global orientierte Parameteroptimierung eignen sich alle Rekombinationsverfahren laut Pohlheim [POH00]. Als günstigstes benennt er die diskrete Rekombination.

Neben der Wahl eines geeigneten Rekombinationsverfahrens ist auch die Höhe der Rekombinationswahrscheinlichkeit von Bedeutung. Eindeutige Hinweise für die Höhe der Rekombinationswahrscheinlichkeit existieren nicht. Kinnebrock [KIN94b] und Wardlaw/Sharif [WAR99] empfehlen eine Rekombinationswahrscheinlichkeit zwischen $0,5 \leq p_R \leq 1,0$. Pohlheim [POH00] schlägt für global orientierte Parameteroptimierungen vor, p_R auf 1,0 zu setzen.

In [WAR99] wird auf einen wichtigen Aspekt hingewiesen, der sich auf die Repräsentation der Individuen bezieht. Wardlaw und Sharif gehen darauf ein, dass bei binär codierten Individuen crossover nur an den Grenzen der Gene durchgeführt werden sollten. Bei reellwertigen Individuen ist auf diesen Umstand nicht zu achten, da die Gene an sich aus einem Wert bestehen und nicht wie bei binär codierten Genen aus einer Anzahl von Bits zusammengesetzt sind.

„An important aspect of crossover in application to a multivariate problem in binary coding is that crossover should occur only at gene boundaries, because each gene consists of alleles, or bits, and crossover split the genes. This is not an issue for real-value representations. In real-value coding the gene comprises a single allele and is itself the parameter value.” [WAR99], S. 15

Teilprozess: Erzeugung von Nachkommen mittels Mutation

In der Biologie bewirkt Mutation die Erzeugung neuen Erbmaterials durch sprunghafte zufällige Veränderung der genetischen Informationen. Die Veränderungen sind relativ gering. Häufig führt Mutation zu nicht lebensfähigen Individuen, die durch Selektion (Paarungs- und Umweltselektion) schnell wieder eliminiert werden.

Bei Evolutionären Algorithmen wird das Prinzip der Mutation durch einen evolutionären Operator realisiert, der im Bereich der Evolutionsstrategien als Primäroperator und bei Genetischen Algorithmen als Sekundäroperator wirkt. Die Anzahl der Veränderungen wird als *Mutationswahrscheinlichkeit* (= Mutationsrate) und die Veränderung an sich als *Mutationsschritt* bezeichnet. Im Normalfall findet die Mutation nach der Rekombination an den Nachkommen statt.

Folgende Effekte werden innerhalb Evolutionärer Algorithmen mit Mutation erzielt:

- Erzeugung bislang noch nicht vorhandener genetischer Informationen (Erschließung neuer Gebiete des Suchraumes)
 - Gewährleistung der Inhomogenität innerhalb einer Population
 - Vermeidung einer frühzeitigen Konvergenz des Suchverlaufes (Entweichen aus lokalen Extrema)
- Einfügung durch Selektion verloren gegangener genetischer Informationen (wirkt in Verbindung mit Rekombination dem Informationsverlust durch Selektion entgegen).

Pohlheim [POH00] weist darauf hin, dass zwei grundlegende Vorgehensweisen für die Wahl der Mutationswahrscheinlichkeit und des Mutationsschrittes unterschieden werden:

- *konstant*: Mutationswahrscheinlichkeiten und Mutationsschritte sind während des Durchlaufs des Algorithmus konstant
- *adaptiv*: Mutationswahrscheinlichkeiten und Mutationsschritte verändern sich während des Durchlaufs des Algorithmus.

Das adaptive Vorgehen stammt aus den Bereichen der Evolutionsstrategien und der Evolutionären Programmierung. Die Veröffentlichungen [HAM98, OST97, REC94, POH00, BAE00b] befassen sich mit diesem Problem. In der vorliegenden Arbeit wird der adaptive Ansatz nur im Bereich der Mutationsschrittweiten verwendet, so dass für nähere Erläuterungen auf die angegebene Literatur verwiesen wird.

Pohlheim [POH00] beschreibt ausführlich die Mutation, gegliedert nach Art der Anwendung (Parameteroptimierung, Reihenfolgeoptimierung) und Repräsentation der Individuen (binäre Basis, dekadische Basis).

(1) Mutationswahrscheinlichkeit (Mutationsrate)

An dieser Stelle ist eine Differenzierung zwischen Evolutionsstrategien und Genetischen Algorithmen notwendig.

Innerhalb der Evolutionsstrategien werden im Normalfall alle Nachkommen mutiert, denn Mutation ist hier der Hauptoperator.

“Die Evolutionsstrategen richten ihr Augenmerk vor allem auf die Mutationsstrategie. ... Ein neues Individuum wird erzeugt, indem der Variablenvektor des Ausgangsindividuum (der Elter) dupliziert und dann mutiert wird.“ [SCH95b], S. 72

Im Bereich der Genetischen Algorithmen wird nicht jeder Nachkomme mutiert. Die Mutation ist lediglich Sekundäroperator. Außer der Tatsache, die Mutationswahrscheinlichkeit klein zu wählen, fehlen konkrete Aussagen über einen geeigneten Wert. Ein zu großer Wert kann dazu führen, dass sinnvolle genetische Informationen zerstört werden.

„The higher the mutation probability, the smaller is the danger of premature convergence. A high mutation probability however transform a GA to a pure random search algorithm, which is of course not the intention of this algorithm.“ [DAW99], S. 46

„Tests carried out by De Jong [DEJ75] showed that increasing the probability of mutation (fixed at the beginning of the program) had bad effects on the convergence of the algorithm: the higher this probability is, the closer we are to a purely random search.“ [AND01], S. 54

“The mutation rate controls the rate at which new genes are introduced into the population for trial. If it too low, many genes that would have been useful are never tried out; but if it is too high, there will be much random perturbation, the offspring will start losing their resemblance to the parents, and the algorithm will lose the ability to learn from history of the search.“ [GEN97], S. 4

Bruns [BRU96] beschreibt die Unterschiede von Positionsmutation (individuell) und Individuenmutation (global).

- Individuenmutation

Auf Individuen bezogene Mutationswahrscheinlichkeiten werden als *Individuenmutation* (global) bezeichnet. Diese Art der Mutation wird insbesondere bei dekadischer Basis der Repräsentation der Individuen verwendet. Das Prinzip ist die Festlegung der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum mutiert wird oder nicht. Findet eine Mutation des Individuums statt, so wird eine Position r ($r = 1, \dots, L$; binär: L – Anzahl der Bitpositionen eines Individuums; dekadisch: L – Anzahl der Genpositionen eines Individuums) gleichverteilt zufällig gewählt und mutiert. Andernfalls wird das Individuum unverändert übernommen.

Kinnebrock [KIN94] charakterisiert die Individuenmutation folgendermaßen:

„Bei Individuen mit p Bits und einer Population des Umfanges N 5 ermittle man zwei Zufallszahlen i und j mit $1 \leq i \leq N$ und $1 \leq j \leq p$ und verändere das Bit Nr. j im Individuum Nr. i .“ [KIN94], S. 78

Er empfiehlt für die Wahl des Individuums $1/\text{PopSize}$ ($\text{PopSize} = \text{Populationsgröße}$). Nissen [NIS97] und Pohlheim [POH00] verweisen auf Untersuchungen von Mühlenbein [MUE93], der als optimale Mutationswahrscheinlichkeit pro Individuum $1/L$ ($L = \text{Anzahl der Bit- bzw. Genpositionen eines Individuums}$) vorschlägt.

Pohlheim bemerkt dazu, dass $1/L$ auf binär codierte und reellwertige Repräsentationsformen zutrifft (binär: L – Anzahl der Bitpositionen eines Individuums; dekadisch: L – Anzahl der Genpositionen eines Individuums). Diese Empfehlung eignet sich besonders für unimodale Funktionen. Da es für multimodale Funktionen keine Angaben gibt, wird dieser Vorschlag auch hier verwendet. Ebenso verwendet Gottlieb [GOT00] als Mutationswahrscheinlichkeit den Wert $1/L$.

Wardlaw [WAR99] untersucht für Individuenmutation, inwieweit die Mutationswahrscheinlichkeit die Suche nach Individuen mit hoher Fitness beeinflusst. Seine Analysen führt er für unterschiedliche Repräsentationen der Individuen durch. Die Ergebnisse von Wardlaw Abbildung 4.8 bestätigen die Empfehlung von Mühlenbein [MUE92], die Mutationswahrscheinlichkeit mit $1/L$ zu wählen.

⁵ Populationsgröße

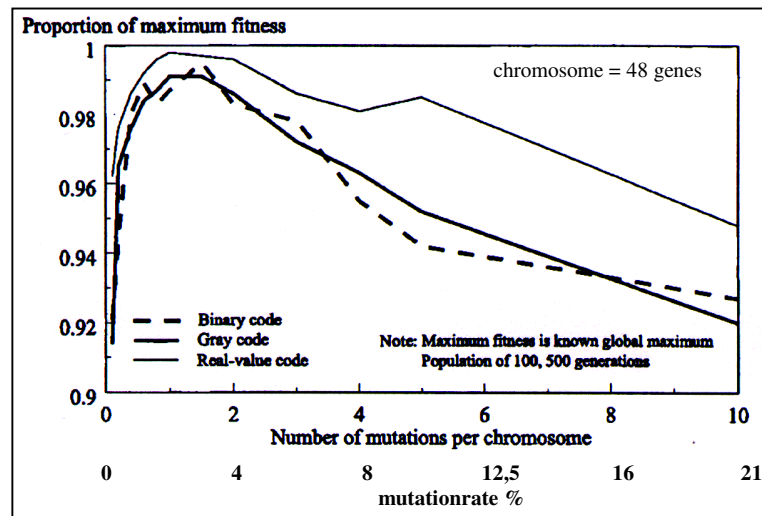


Abbildung 4.8: Sensitivität der Mutationswahrscheinlichkeit [WAR99]

- Positionsmutation

Wesentlich häufiger ist die *Positionsmutation* zu finden. Sie geht zurück auf den kanonischen Genetischen Algorithmus. Jede Position aller Individuen der Population besitzt die gleiche Wahrscheinlichkeit mutiert zu werden⁶.

„The mutation rate (denoted by pm) is defined as the percentage of the total number of genes in the population.“ [GEN97], S. 4

Die gewählte Mutationswahrscheinlichkeit legt die Anzahl der durchzuführenden Mutationen fest. Folgende Unterschiede in der Repräsentationsform sind dabei zu beachten.

Repräsentation der Individuen auf binärer Basis

Anzahl mutierter Bits = Populationsgröße * Anzahl der Bits pro Individuum * Mutationswahrscheinlichkeit p_M

Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis

Anzahl mutierter Gene = Populationsgröße * Anzahl der Gene pro Individuum * Mutationswahrscheinlichkeit p_M

Haupt [HAU98] empfiehlt für Mutation reellwertiger und binärer Repräsentationsform eine Mutationswahrscheinlichkeit zwischen 1 % und 20 % pro Position (binär: Bit; reell: Gen) der Population.

„... As with the binary genetic algorithm, a mutation rate between 1 and 20% often works well. If the mutation rate is above 20%, too many good parameters are mutated, and the algorithm stalls...“ [HAU98], S. 60

⁶ d.h. für jede Position wird von neuem eine Zufallszahl im Intervall [0,1] gleichverteilt gewählt, die über eine Mutation der Position entscheidet

Auch Hauser [HAU94] empfiehlt auf Grund seiner Untersuchungen eine Mutationswahrscheinlichkeit von 1 % pro Position.

Nissen [NIS97] schlägt bei binärer Codierung für p_M Werte von 0,01 bzw. 0,001 pro Bit vor. In [CAM96, DAW99] wird für binär codierte Individuen als Mutationswahrscheinlichkeit 0,001 pro Bit angegeben.

(2) Mutationsschritt

- Repräsentation der Individuen auf binärer Basis

Mutation bei binär codierten Lösungen bedeutet, dass ausgewählte Bits invertiert werden (Abb. 4.9). Die Invertierung kann dazu führen, dass der codierte reellwertige oder ganzzahlige Variablenwert eine zu große Veränderung erfährt.

vor der Mutation	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
						↓					↓		
nach der Mutation	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1

Abbildung 4.9: Mutation an einem binär codierten Individuum

- Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis

Bei Repräsentation der Individuen auf dekadischer Basis (i.d.R. ganzzahlige oder reellwertige Gene der Individuen) wird die Mutation meist als additiv normalverteilter Prozess ausgebildet [HAM98]. Die Festlegung der Größe des Mutationsschrittes ist schwierig und stellt ein heuristisches Problem dar. Die Mutationsschrittweite wird über eine gewählte stochastische Dichtefunktion⁷ gesteuert und ihre Größe wird festgelegt durch den Definitionsbereich der Optimierungsvariablen und den definierten Mutationsbereich.

Pohlheim [POH00] empfiehlt bei längeren Läufen eine Adaption der Schrittweiten beginnend mit einer größeren Mutationschrittweite, die im Verlauf des Algorithmus vermindert wird. Die anfänglich größer gewählte Mutationsschrittweite ermöglicht eine globale Suche die gegen Ende in eine lokale Suche umkippt. Er schlägt für die grobe Suche einen Mutationsbereich⁸ von 0,05 bis 0,20 und für die feine Suche Werte bis zu 10^{-8} vor. Auch Kohlmorgen [KOH99] rät für eine Verbesserung der lokalen Suche gegen Ende des Algorithmus, den Mutationsbereich mit fortlaufender Zeit zu verringern.

Die Besonderheiten der Mutation bei Evolutionsstrategien werden nicht weiter erläutert. Als Literaturhinweise sind [REC94, NIS97, WEI02, KIN94b] zu empfehlen. Nissen [NIS97] weist darauf hin, dass die Arten der Mutation von Evolutionsstrategien und Evolutionärer Programmierung auch für Genetische Algorithmen verwendet werden können.

⁷ Normalverteilung, abgeschnittene Normalverteilung, Gleichverteilung

⁸ Wert des größten Mutationsschrittes im Verhältnis zum Definitionsbereich des jeweiligen Gen i

Teilprozess: Umweltselektion (= Ersetzung)

Nach Erzeugung der Nachkommen durch Rekombination und Mutation ist ein Schema zu wählen, welches die Neuzusammensetzung der nächsten Population festlegt. An dieser Stelle des Evolutionären Algorithmus ist ebenso die Auslese nach Darwin zu nutzen, d.h. Individuen mit hoher Fitness sollten vorzugsweise in die nächste Generation übernommen werden. Schöneburg [SCH95b] und Pohlheim [POH00] beschreiben verschiedene Schemata der Ersetzung. Nachfolgend werden die klassischen Ersetzungsschemata der Genetischen Algorithmen (1) und Evolutionsstrategien (2) vorgestellt.

(1) Ersetzung bei Genetischen Algorithmen

generational replacement

Alle Eltern werden durch ihre Nachkommen ersetzt. Diese Variante der Ersetzung ist in den meisten GA-Implementierungen zu finden (auch im Basis GA von Holland [HOL75]). Inzwischen existiert eine Vielzahl von Erweiterungen.

steady-state-GA

Bei jeder Generation werden nur wenige Individuen ersetzt, meistens die schlechtesten. Diese Variante der Ersetzung geht auf Entwicklungen von Syswerda [SYS89] und Whitley [WHI89] zurück.

(2) Ersetzung bei Evolutionsstrategien

$(\mu^{\rho}, \lambda^{10})$ -Ansatz

Bei diesem Schema erzeugen μ Eltern λ Nachkommen. Ähnlich dem *generational replacement* bei Genetischen Algorithmen überleben nur die Nachkommen und bilden die neue Population, d.h. die Lebensdauer der einzelnen Individuen ist auf eine Generation begrenzt.

$(\mu^{\rho} + \lambda^{10})$ -Ansatz:

Auch hier werden aus μ Eltern λ Nachkommen produziert. Im Gegensatz zum (μ, λ) -Ansatz überleben von den μ Eltern und den λ Nachkommen nur die Besten und bilden die neue Population. Theoretisch wäre für einzelne Lösungen eine unbegrenzte Lebensdauer möglich.

Ein sehr häufig eingesetztes und empfehlenswertes Schema ist die so genannte *elitest-Strategie* [DEJ75]. Hierbei werden die n besten Individuen (= Eliten; in der Regel wird die Anzahl der Eliten $n_{\text{Elit}} = 1$ gesetzt) unverändert in die Population der nächsten Generation übernommen. Alle anderen Eltern sterben aus und werden durch die Nachkommen ersetzt.

Mit diesem Schema wird nicht die Leistung des Algorithmus verbessert, aber es wird sichergestellt, dass die bisher besten gefundenen Lösungen nicht verloren gehen. Eine gleich bleibende Konvergenz über die Generationen hinweg ist garantiert. Es besteht bei diesem Schema jedoch die Gefahr, dass die Suche frühzeitig in einem Suboptimum endet. Mitchell [MIT96], Pohlheim [POH00], Gottlieb [GOT00] und Nissen [NIS97] empfehlen trotz dieses Nachteils die Verwendung der *elitest-Strategie*.

¹³ Eltern

¹⁰ Nachkommen

Teilprozess: Abbruch

Abbruchkriterien werden in direkte und abgeleitete Kriterien unterschieden (Tab. 4.3). Direkte Abbruchkriterien ergeben sich aus dem Kontext der Optimierung. Ihre Entwicklung innerhalb des Optimierungslaufs ist vorhersehbar. Abgeleitete Abbruchkriterien erfordern die Berechnung von Hilfsgrößen, und die Entwicklung ist nicht überschaubar. Für eine intensive Betrachtung der Abbruchkriterien sind Pohlheim [POH00] und [GRI98] zu empfehlen. In der Tabelle 4.3 sind wesentliche Abbruchkriterien aus der Literatur aufgelistet.

Ein sehr häufig verwendetes Abbruchkriterium ist die Definition einer *maximalen Anzahl von Generationen*. Durch die meist lineare Abhängigkeit von Rechenzeit zur Anzahl der Generationen wird der Abbruch der Optimierung garantiert und das Ende ist vorhersehbar. Entscheidend ist die definierte Anzahl der Generationen. Ein zu klein gewählter Wert führt zu einem frühzeitigen Abbruch des Algorithmus, wobei möglicherweise das beste Individuum noch nicht gefunden wurde. Eine zu groß gewählte Generationenanzahl kann dazu führen, dass der Prozess sehr lange läuft, auch wenn kein besseres Individuum mehr gefunden wird. Für praktische Anwendungen ist die Verwendung dieses Abbruchkriteriums ungeeignet.

Bei den abgeleiteten Abbruchkriterien garantiert nur das *Kriterium des laufenden Mittelwertes* das Erzielen des Abbruchpunktes. Alle anderen Möglichkeiten gewährleisten dies nicht, und ihre Anwendung kann nicht empfohlen werden.

Die auf Fitnesswerte bezogenen Abbruchkriterien können ebenso auf die Zielfunktionswerte bzw. die modifizierten Zielfunktionswerte bezogen werden.

Tabelle 4.3: Klassifizierung der Abbruchkriterien nach [POH00]

Direkte Abbruchkriterien	Abgeleitete Abbruchkriterien
<ul style="list-style-type: none"> - Begrenzung der maximalen Anzahl von Generationen bzw. Fitnesswertberechnungen - Begrenzung der maximalen Rechenzeit (absolut oder CPU-Zeit) - Definition eines „globalen“ Optimums (Differenz zwischen bestem Fitnesswert und einem vorgegebenen Wert) 	<ul style="list-style-type: none"> - Standardabweichung aller Fitnesswerte der aktuellen Generation (Standardabweichung) - Differenz zwischen Mittelwert der besten Fitnesswerte der letzten Generationen und dem besten Fitnesswert der aktuellen Generation (laufender Mittelwert) - Differenz zwischen den Fitnesswerten des besten und schlechtesten Individuums der aktuellen Generation (Guter/Schlechtester) - Quotient aus Mittelwert aller Fitnesswerte und dem besten Fitnesswert der aktuellen Generation (Phi) - Gleichartigkeit der Variablenwerte der Individuen der Population (Kappa)

Eine Verbindung von maximaler Generationenanzahl mit dem Kriterium des laufenden Mittelwertes führt bei praktischen Anwendungen zu einem wirtschaftlichen Suchverlauf hinsichtlich der erzielten Ergebnisqualitäten und garantiert den Abbruch der Suche [POH00].

Teilprozess: Auffindung

Nach Abbruch der Generationenschleife wird das Individuum mit der höchsten Fitness aus der letzten Population herausgelesen.

4.4 Evolutionäre Algorithmen im Bauwesen

4.4.1 Besonderheiten

Bauwerke sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- eigenständiger, technischer und unikater Charakter
- Abdeckung unterschiedlicher Funktionen.

Für den Entwurf von Bauwerken können daher keine allgemeingültigen Regeln festgelegt werden.

Die Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen als Optimierungsverfahren erweist sich als interessant und zukunftsweisend für den Entwurf von Bauwerken.

Zur Bewertung von Entwurfsvarianten, die innerhalb Evolutionärer Algorithmen als Individuen repräsentiert werden, ist die Berücksichtigung entwurfsspezifischer Nebenbedingungen erforderlich. Dies sind in der Regel:

- Einhaltung von Beanspruchbarkeiten $R_{d,i}$ (Gl. 4-13) bei der Untersuchung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

$$\frac{S_{d,i}}{R_{d,i}} \quad (4-13)$$

$S_{d,i}$ = vorhandene Beanspruchung an der Stelle i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$R_{d,i}$ = vorhandene Beanspruchbarkeit an der Stelle i ($i = 1, 2, \dots, n$)

- Berücksichtigung bauphysikalischer Anforderungen (Wärmeschutz, Schallschutz u.a.).

Zur Erfassung entwurfsspezifischer Nebenbedingungen, ist die Analyse des Entwurfsgegenstandes mit der Ermittlung erforderlicher Entwurfskenngrößen, z.B. Strukturanalyse zur Ermittlung vorhandener Beanspruchungen, notwendig (Abb. 4.10).

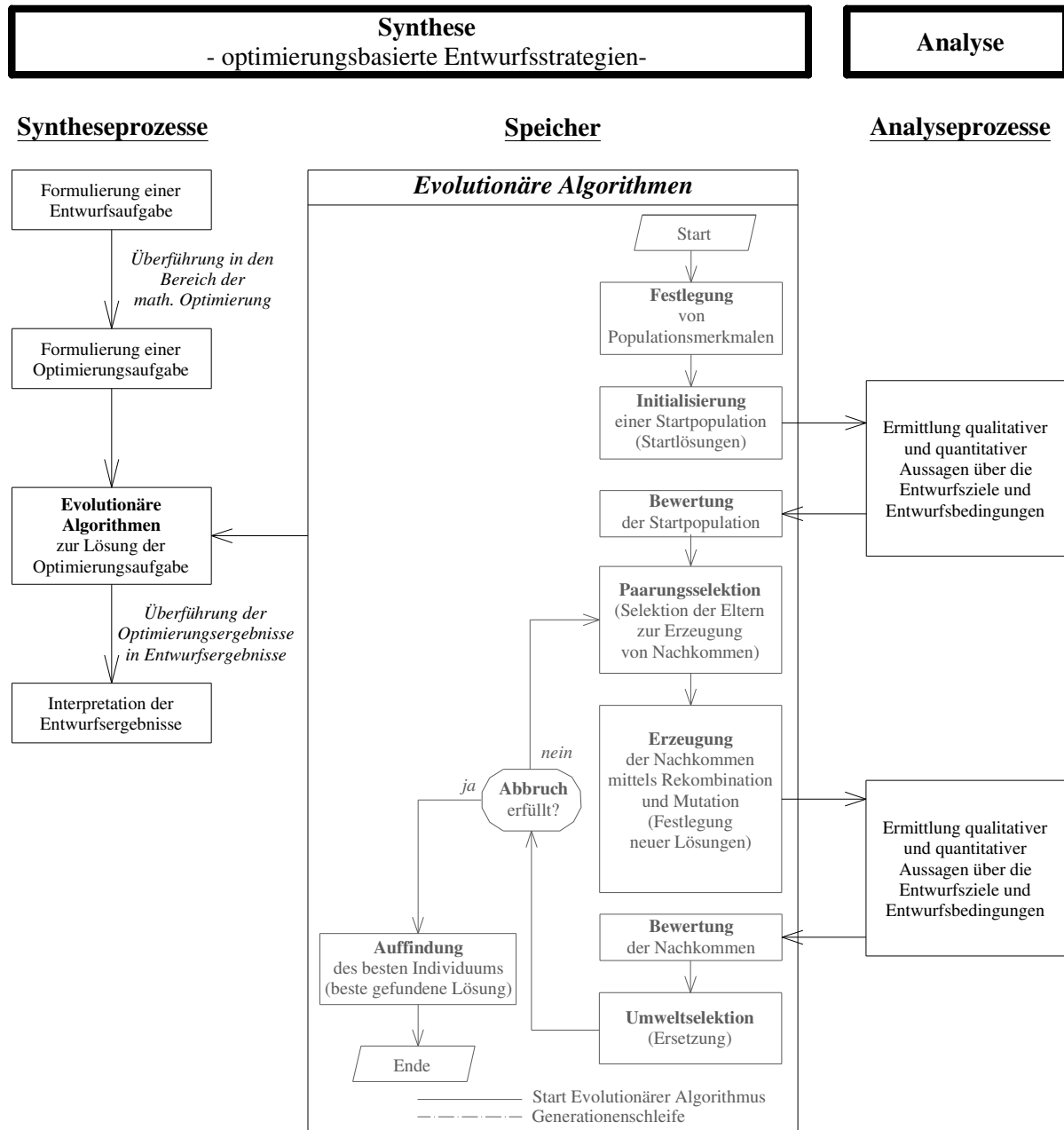


Abbildung 4.10: Optimierungsbasierte Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Bauwesen

Die Zielstellung der nachfolgenden Untersuchungen ist die Festlegung geeigneter Einstellungen für die Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen (nach Abb. 4.1) zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Bauwesen.

4.4.2 Einfluss von Einstellungen der Teilprozesse auf die Qualität Evolutionärer Algorithmen

In der Vergangenheit wurde die Bewertung von Optimierungsverfahren vorrangig auf der Grundlage von Beispielen vorgenommen. Dies unterstreicht folgende Aussage:

„Zur Überprüfung des Optimierungsverfahrens bietet die Literatur zahlreiche Fachwerkkonstruktionen, die mit den verschiedensten Verfahren optimiert werden. Dadurch ist ein sehr guter Vergleich möglich, der sich nicht nur auf die erzielten Ergebnisse beschränkt, sondern auch eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zulässt.“
 [LIP76], S. 84

An drei Tragkonstruktionen (10-Stäbe Fachwerk, Zweifeldträger und einschiffiger Rahmen) wird der Einfluss verschiedener Einstellungen folgender Teilprozesse auf die Qualität Evolutionärer Algorithmen untersucht:

- Festlegung von Populationsmerkmalen
- Bewertung der Startpopulation bzw. der Nachkommen
- Paarungsselektion
- Erzeugung der Nachkommen mittels Rekombination und Mutation.

Die hier variierten Einstellungen sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Die Verfahren der Fitnesszuweisung und die Auswahlverfahren werden in der Regel als Einheit untersucht und als Selektionsverfahren bezeichnet.

Tabelle 4.4: Variierte Einstellungen ausgewählter Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen

Teilprozesse	Einstellungen
<i>Festlegung</i> von Populationsmerkmalen	Populationsgröße
<i>Bewertung</i> der Startpopulation bzw. der Nachkommen	Verfahren der Fitnesszuweisung
<i>Paarungsselektion</i> (Selektion der Eltern zur Erzeugung der Nachkommen)	Auswahlverfahren
<i>Erzeugung</i> der Nachkommen mittels Rekombination und Mutation	– Rekombinationsverfahren – Mutationswahrscheinlichkeit

Aus den einzelnen Einstellungen resultieren verschiedene Evolutionäre Algorithmen (eine festgelegte Einstellung entspricht einem Evolutionären Algorithmus) mit unterschiedlichen Qualitäten, die unter folgenden Bewertungskriterien zu beurteilen sind.

- *Zuverlässigkeit* bei der Bestimmung der Individuen (= Entwurfslösungen):
 - Qualität der Individuen (= Entwurfslösungen), gemessen durch die Fitness
 - Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Individuen (= Entwurfslösungen)

- *Effizienz* zur Auffindung der Individuen (= Entwurfslösungen)
 - Konvergenzgeschwindigkeit (= Anzahl erforderlicher Generationen)
 - Rechenzeit.

Die Anzahl durchgeführter Simulationsserien pro untersuchter Einstellung beträgt 15 Simulationen.

Aus den Ergebnissen abgeleitete Feststellungen werden mit den Aussagen in unterschiedlichen Veröffentlichungen verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Festlegung eines Evolutionären Algorithmus nach Abbildung 4.10 zur Lösung praxisbezogener Entwurfsaufgaben in Abschnitt fünf.

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgt mit der Forschungssoftware SLang, in der Kommandos für Evolutionäre Algorithmen und für Strukturanalysen implementiert sind. Weitere Hinweise zu Slang sind in Anlage II zu finden.

Während der durchgeführten Untersuchungen werden gegenwärtig nicht analysierte Einstellungen der Teilprozesse mit konstanten Einstellungen belegt. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse erfolgt hinsichtlich der variierten Einstellungen der Teilprozesse.

Für nachstehende Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen sind immer folgende konstante Einstellungen definiert:

- Populationsmodell
Alle durchgeführten Untersuchungen basieren auf dem globalen Populationsmodell.
- Rekombinationswahrscheinlichkeit
Entsprechend den Empfehlungen von Pohlheim [POH00] wird die Rekombinationswahrscheinlichkeit p_R auf 1,0 gesetzt.
- Mutationsschrittweiten
Es wird eine adaptive Schrittweitenregelung über die maximale Anzahl von Generationen festgelegt mit:
 - MutStddev1 (Anfang) = 0,5
 - MutStddev2 (Ende) = 0,01.
- Ersetzung
Als Grundlage für die Ersetzung wird die elitest-Strategie mit $n_{\text{elit}} = 1$ verwendet.
- Abbruchkriterium
Der Evolutionäre Algorithmus bricht ab, wenn die Bedingung in Gleichung 4-14 erfüllt ist oder die festgelegte maximale Anzahl möglicher Generationen (= 600 Gnr) erreicht ist. Um einen frühzeitigen Abbruch des Algorithmus zu vermeiden, wird eine Mindestanzahl von Generationen (= 20 Gnr) vorgeschrieben.

$$\frac{F_{Gnr_i}^{best}}{1 + \sum_{i=Gnr_i - RunMeanGnr}^{Gnr_i-1} F_i^{best}} \leq 1,005 \quad (4-14)$$

$F_{Gnr_i}^{best}$ - beste Fitness der aktuellen Generation

F_i^{best} - beste Fitness der Generation i

RunMeanGnr - Anzahl der verwendeten zurückliegenden Generationen

Innerhalb Evolutionären Algorithmen kann die Verletzung von Nebenbedingungen vorkommen. Am häufigsten werden Straffunktionen zur Erfassung verletzter Nebenbedingungen verwendet. Hierfür wird ein Strafterm C_{ges} definiert. Durch die Verknüpfung von Zielfunktionswert und Strafterm ergibt sich ein modifizierter Zielfunktionswert Z' (Gl. 4-15).

Da es sich um ein Minimierungsproblem handelt, wird für die drei untersuchten Tragkonstruktionen die Fitness der Individuen (= Entwurflösungen) durch Gleichung 4-16 ermittelt.

$$Z' = Z * (1 + C_{ges}) \quad (4-15)$$

$$\text{Fitness(Ind)} = \frac{1}{Z'} \quad (4-16)$$

A Tragkonstruktion: 10-Stäbe Fachwerk

A.1 Entwurfsaufgabe

Eine in der Literatur häufig verwendete Entwurfsaufgabe zur Beurteilung von Verfahren ist der Entwurf der in Abbildung 4.11 dargestellten Fachwerkkonstruktion [RAJ95, BER96, SOH00, ELP88, VEN71].

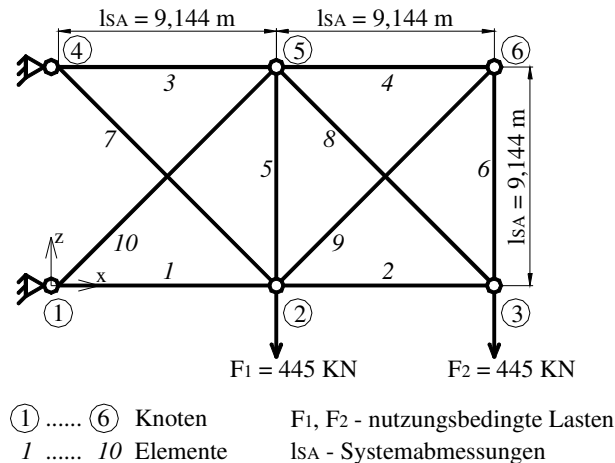


Abbildung 4.11: 10-Stäbe Fachwerk, System

Das Entwurfsziel ist die Minimierung des Gewichtes unter Einhaltung von Grenzspannungen in allen Fachwerkstäben sowie zulässiger Verformungen für alle freien Knoten.

Variable Entwurfsgrößen sind die Querschnittsflächen der 10 Fachwerkstäbe. Die möglichen Querschnittsflächen für alle 10 variablen Entwurfsgrößen sind aus der Literatur [RAJ95, BER96] entnommen und in Tabelle 4.5 aufgelistet. Es handelt sich um eine Entwurfsaufgabe mit diskreten variablen Entwurfsgrößen. Der Suchraum hat eine Größe von $1,708^{16}$ ($= 42^{10}$).

Gegenüber vorliegenden Referenzlösungen aus der Literatur wird unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit einem Evolutionären Algorithmus als Optimierungsverfahren eine gleichwertige Entwurfslösung erzielt. Auf die Bestimmung der Teilprozeßeinstellungen dieses Evolutionären Algorithmus wird nachfolgend eingegangen.

Tabelle 4.5: 10-Stäbe Fachwerk, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen

Querschnittsflächen [mm ²]						
1045	1696	2238	2696	3303	8967	12838
1161	1858	2290	2722	3703	9161	14193
1283	1890	2341	2896	4658	9999	14774
1374	1993	2477	2961	5141	10322	17096
1535	2019	2496	3096	7419	10903	19354
1690	2180	2503	3206	8709	12129	21612

-
- Entwurfsziel
 - Ökonomie: Gewichtsminimum

 - variable Entwurfsgrößen
 - Geometrie: Querschnittsflächen der Fachwerkstäbe

 - konstante Entwurfsgrößen
 - Nutzung: Die Bemessungswerte infolge nutzungsbedingter Lasten F_1 und F_2 sind Abbildung 4.11 zu entnehmen.

 - Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
(Knotenlagen, Elementzuordnungen)

 - Material:
 - $E = 68900 \text{ N/mm}^2$
 - $\rho_{\text{Alu}} = 27 \text{ kN/m}^3$
 - $\sigma_{\text{grenz}} = 172,25 \text{ N/mm}^2$
 - $u_{\text{grenz}(z)} = 51 \text{ mm}$

 - Geometrie:
 - $l_{\text{SA}} = 9,144 \text{ m}$ (Abb. 4.11)
 - $l_i = \text{Länge Stab } i, (i = 1, 2, \dots, 10)$ (Abb. 4.11)

 - Entwurfsbedingungen
 - Bautechnik: Nachweise der:
 - Tragsicherheit
(Grenzspannungsnachweis)
 - Gebrauchstauglichkeit
(Nachweis bezüglich der Verformungen)

A.2 Optimierungsaufgabe

Aus der Entwurfsaufgabe folgt die Formulierung einer allgemeinen Optimierungsaufgabe in Anlage III mit Zielfunktion (Gl. III-3), Optimierungsvariablenvektor \underline{A} (Gl. III-1), Optimierungskonstantenvektor \underline{y} (Gl. III-2) und Nebenbedingungen (Gl. III-4 und III-5). Der Strafterm C_{ges} wird nach Gleichung III-6 ermittelt.

A.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind Anlage III zu entnehmen.

A.4 Ergebnisauswertung

A.4.1 Populationsgröße

Die Festlegung der Populationsgröße stellt zum jetzigen Zeitpunkt ein unzureichend geklärtes Problem dar (Abschnitt 4.3). Im Folgenden wird der Einfluss verschiedener Populationsgrößen auf die Effizienz und Zuverlässigkeit Evolutionärer Algorithmen untersucht.

Als weitere konstante Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen werden festgelegt:

Verfahren der Fitnesszuweisung:	linear rangbasierte Fitnesszuweisung ($p_s = 1,1$)
Selektionsverfahren:	Roulette Selektion
Rekombinationsverfahren:	uniform crossover ($p_{ux} = 0,6$)
Mutationswahrscheinlichkeit:	$p_M = 0,03$ (= 3%)

- Zuverlässigkeit (Abb. III-2 und Abb. III-3 in Anlage III)

Mit ansteigender Populationsgröße werden zunehmend Individuen mit hoher Fitness gefunden (Abb. III-2). Die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen (Abb. III-3) der einzelnen Simulationsserien bestätigen diese Aussage.

Dagegen sind die Qualitätsunterschiede zwischen den Individuen mit der höchsten Fitness für die untersuchten Populationsgrößen gering. Dieses Ergebnis stimmt mit den Resultaten von Wardlaw [WAR99] (Abb. 4.12) und Hauser [HAU94] überein.

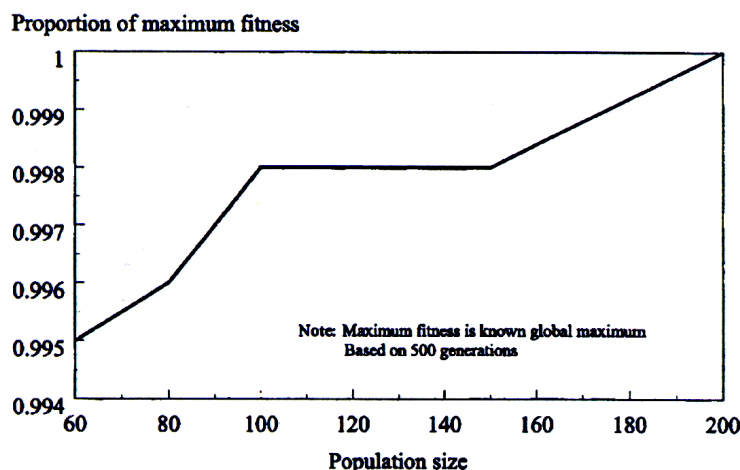


Abbildung 4.12: Fitnessvergleich für verschiedene Populationsgrößen [WAR99]

- Effizienz (Abb. III-4 und Abb. III-5 in Anlage III)

Die Konvergenzgeschwindigkeit wird durch die Erhöhung der Populationsgröße kaum beeinflusst (Abb. III-4). Dagegen steigt die erforderliche Rechenzeit, die ein Produkt aus der Populationsgröße und der Anzahl erforderlicher Generationen (= Konvergenzgeschwindigkeit) ist, stark nichtlinear an (Abb. III-5).

Um Aussagen über Abhängigkeiten zwischen Optimierungsvariablenanzahl und Populationsgröße treffen zu können, werden weitere Untersuchungen an einer zweiten Entwurfsaufgabe (Beispiel B - Zweifeldträger) durchgeführt.

A.4.2 Selektions- und Rekombinationsverfahren

A.4.2.1 Vorbemerkungen

Die Selektionsverfahren (= Kombination aus Verfahren der Fitnesszuweisung und Auswahlverfahren) und Rekombinationsverfahren werden zusammenhängend betrachtet, d.h. für jede Kombinationsmöglichkeit zwischen Selektions- und Rekombinationsverfahren werden 15 Simulationen durchgeführt und die Mittelwerte sowie Standardabweichungen berechnet. Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse erfolgt getrennt voneinander.

Die folgenden Einstellungen werden mit konstanten Größen belegt:

Populationsgröße: PopSize = 30
 Mutationswahrscheinlichkeit: $p_M = 0,03$ (= 3%).

Die Steuerung des Selektionsdruckes erfolgt entweder durch das Verfahren der Fitnesszuweisung oder durch das Auswahlverfahren. In den Tabellen 4.6 und 4.7 sind die Abhängigkeiten zwischen Selektionsdruck und zugehörigen Einstellungen der analysierten Verfahren der Fitnesszuweisung bzw. Auswahlverfahren angegeben.

Unter Berücksichtigung festgelegter partiell vorhandener Adaptionsschrittweiten für den Selektionsdruck werden die folgenden *Verfahren der Fitnesszuweisung* untersucht:

- linear proportionale Fitnesszuweisung (prop)
- linear rangbasierte Fitnesszuweisung (rank mit $p_S = 1,0; 1,1; 1,5; 2,0$).

Als Auswahlverfahren für diese Verfahren der Fitnesszuweisung wird die in Slang implementierte Rouletteselektion verwendet.

Die Bewertung der nachstehenden *Auswahlverfahren* erfolgt ebenso unter Berücksichtigung festgelegter partiell vorhandener Adaptionsschrittweiten für den Selektionsdruck:

- Rouletteselektion (Roul)
- Wettkampfselektion (Tour mit TourSize = 2 Ind; 10 Ind; 20 Ind; 30 Ind).

Für das Auswahlverfahren Wettkampfselektion ist eine monotone Zuweisung der Fitness entsprechend der Reihenfolge der Zielfunktionswerte bzw. modifizierten Zielfunktionswerte vorzunehmen. Diese Forderung wird von den Verfahren der Fitnesszuweisung - linear fitnessproportionale und linear rangbasierte Fitnesszuweisung - erfüllt.

Die Untersuchungen werden jedoch nur mit linear fitnessproportionaler Fitnesszuweisung durchgeführt.

Durch Kombination der zuvor beschriebenen Verfahren der Fitnesszuweisung und Auswahlverfahren ergeben sich nachstehende Selektionsverfahren:

- linear proportionale Fitnesszuweisung mit Rouletteselection (propRoul);
- linear rangbasierte Fitnesszuweisung mit Rouletteselection (rankRoul mit $p_s = 1,0; 1,1; 1,5; 2,0$);
- linear proportionale Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion (propTour mit TourSize = 2 Ind; 10 Ind; 20 Ind; 30 Ind).

Die Wirkung der einstellbaren Selektionsdrücke, bei linear rangbasierter Fitnesszuweisung durch p_s (= Verfahren der Fitnesszuweisung) und bei Wettkampfselektion durch TourSize (= Auswahlverfahren) ist zu beurteilen.

Tabelle 4.6: Selektionsdrücke in Abhängigkeit verschiedener Verfahren der Fitnesszuweisung

Selektionsdruck	linear proportionale Fitnesszuweisung mit Rouletteselection*	linear rangbasierte Fitnesszuweisung mit Rouletteselection
niedrig	viele gleich gute Individuen in Startpopulation	$p_s = 1,0$
·		$p_s = 1,1$
·		$p_s = 1,5$
·	wenig gleich gute Individuen in Startpopulation	$p_s = 2,0$
hoch		
* indirekte Regulierung des Selektionsdruckes		

Tabelle 4.7: Selektionsdrücke in Abhängigkeit verschiedener Auswahlverfahren

Selektionsdruck	Rouletteselection mit linear proportionaler bzw. linear rangbasierter Fitnesszuweisung	Wettkampfselektion mit linear proportionaler Fitnesszuweisung
niedrig		TourSize = 2 Ind
·		TourSize = 10 Ind
·	Regulierung durch das Verfahren der Fitnesszuweisung	TourSize = 20 Ind
·		TourSize = 30 Ind
hoch		

Rekombinationsverfahren vermischen in Evolutionären Algorithmen die Erbgutinformationen von Individuen, wodurch neue Bereiche des Suchraumes erschlossen (= exploration) werden.

Folgende Rekombinationsverfahren werden in Verbindung mit der Variation teilweise regulierbarer Vermischungsintensitäten beurteilt:

- multipoint crossover (Anzahl der Aufspaltungspunkte AP = 1, 2, 3, 6, 9)
- shuffle crossover (Anzahl der Aufspaltungspunkte AP = 1, 2, 3, 6, 9)
- uniform crossover ($p_{ux} = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$)
- intermediäre Rekombination.

Die Bedeutung der Vermischungsintensitäten ist in Tabelle 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.8: Vermischungsintensitäten verschiedener Rekombinationsverfahren

Vermischungsintensitäten	multipoint crossover	shuffle crossover	uniform crossover	intermediäre Rekombination
niedrig	AP = 1 (= singlepoint)	AP = 1 (= singlepoint)	$p_{ux} = 0,5$	indirekt definiert durch Schema der Zusammensetzung
.	AP = 2 (= doublepoint)	AP = 2 (= doublepoint)	$p_{ux} = 0,6$	
.	AP = 3	AP = 3	$p_{ux} = 0,7$	
.	AP = 6	AP = 6	$p_{ux} = 0,8$	
hoch	AP = 9	AP = 9	$p_{ux} = 0,8$	

A.4.2.2 Selektionsverfahren

Ein äquivalenter Qualitätsvergleich der Individuen in Abhängigkeit der untersuchten Selektionsverfahren ist aus nachfolgenden Gründen nur ansatzweise möglich:

- Die Entwurfslösungen ermittelt unter Verwendung von *linear rangbasierter Fitnesszuweisung mit Rouletteselektion* bzw. *linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion*, werden **direkt** durch die Einstellung des Selektionsdruckes p_s bzw. TourSize beeinflusst.
- Bei *linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Rouletteselektion* wird der Selektionsdruck **indirekt** durch die Zusammensetzung der Populationen reguliert.
- Zuverlässigkeit (Abb. III-6 und Abb. III-7 in Anlage III)

Durch die ausgeprägten Qualitätsunterschiede zwischen den ermittelten Individuen bei dem Selektionsverfahren *proportionale Fitnesszuweisung mit Rouletteselektion* (Abb. III-6) wird die Aussage, dass hier der Selektionsdruck von der Populationszusammensetzung abhängt (Abschnitt 4.3 – Teilprozess Bewertung der Startpopulation bzw. der Nachkommen), bestätigt.

Unter Vorbehalt ist die Qualität der Individuen, ermittelt mit den Selektionsverfahren *linear rangbasierte Fitnesszuweisung mit Rouletteselektion* und *linear proportionale Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion*, robuster gegenüber diesen Differenzen. Die Höhe des eingestellten Selektionsdruckes ist der entscheidende Faktor dieser Selektionsverfahren. Mit Erhöhung des Selektionsdruckes (linear rangbasierte Fitnesszuweisung: p_s von 1,0 auf 2,0; Wettkampfselektion: TourSize von 2 Ind auf 10 Ind) verschlechtert sich die

Qualität der Individuen (Abb. III-6). Die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen bestätigen diese Aussage (Abb. III-7).

Die Empfehlungen von Baker [BAK85], den Selektionsdruck p_s bei linear rangbasierter Fitnesszuweisung auf 1,1 zu setzen, werden durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt. Für Wettkampfselektion werden in [GEN00, NIS97] zwei Wettkampfgegner (TourSize = 2 Ind) als geeignete Größenordnung vorgeschlagen. Diese Empfehlung wird durch die erzielten Ergebnisse untermauert.

Yang und Soh [YAN99] führen einen Vergleich zwischen linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Rouletteselection und linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion (TourSize = 2 Ind) durch. Die Schlussfolgerung ihrer Untersuchungsergebnisse ist die Feststellung einer höheren Sucheeffizienz bei linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion (TourSize = 2 Ind) gegenüber linear rangbasierter Fitnesszuweisung mit Rouletteselection. Das heißt, unter Verwendung von linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion (TourSize = 2 Ind) werden Individuen mit höherer Fitness aufgefunden. Eigene Untersuchungsergebnisse bestätigen diese Schlussfolgerung.

- Effizienz (Abb. III-8 und Abb. III-9 in Anlage III)

Aus den Untersuchungsergebnissen zur *proportionalen Fitnesszuweisung mit Rouletteselection* können keine bindenden Aussagen über Konvergenzgeschwindigkeit und Rechenzeit abgeleitet werden. Die erforderliche Konvergenzgeschwindigkeit (Abb. III-8) und die erforderliche Rechenzeit (Abb. III-9) bis zum Abbruch des Evolutionären Algorithmus sind von der Zusammensetzung der Population abhängig.

Bei einer geringen Anzahl sehr guter Individuen in der Population konvergiert der Evolutionäre Algorithmus schnell und die Rechenzeit verkürzt sich im Vergleich zu dem Fall, dass die Population aus gleichwertigen Individuen besteht.

Die Ergebnisse *linear rangbasierter Fitnesszuweisung mit Rouletteselection* und *proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfselektion* zeigen, dass zwischen Selektionsdruck und Konvergenzgeschwindigkeit (Abb. III-8) bzw. Rechenzeit (Abb. III-9) ein enger Zusammenhang besteht. Mit Zunahme des Selektionsdruckes erhöht sich die Konvergenzgeschwindigkeit, d.h. die Rechenzeit verkürzt sich.

Goldberg und Deb [GOL91] untersuchen die Auswirkung unterschiedlicher Anzahl von Wettkampfgegnern auf die Konvergenzgeschwindigkeit. Ihre Ergebnisse stimmen mit den zuvor formulierten Feststellungen überein.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen deutlich, dass der Selektionsdruck entscheidend die Zuverlässigkeit und Effizienz Evolutionärer Algorithmen beeinflusst. Die tendenziellen Abhängigkeiten zwischen den Qualitäten der Bewertungskriterien (Zuverlässigkeit und Effizienz) und Selektionsdruck sind in Abbildung 4.13 dargestellt.

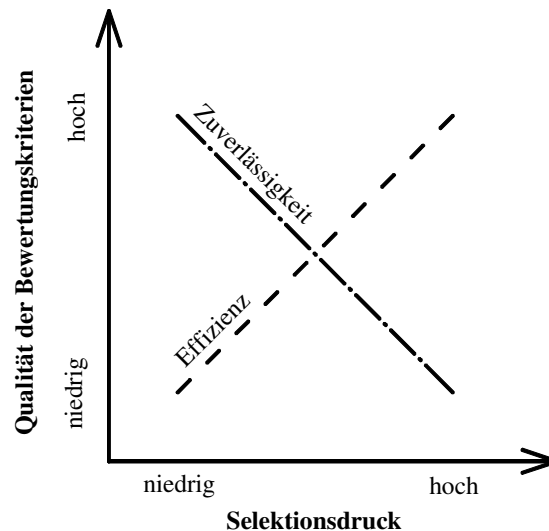


Abbildung 4.13: 10-Stäbe Fachwerk, Einflusstendenzen von Selektionsverfahren

A.4.2.3 Rekombinationsverfahren

- Zuverlässigkeit (Abb. III-10 und Abb. III-11 in Anlage III)

Die Qualität der Individuen und die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen für die Qualität der Individuen liegen bei den durchgeführten Simulationsserien zur Rekombination in nahezu gleichen Größenordnungen.

Durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann daher die Aussage Pohlheims [POH00], dass die Erhöhung von Vermischungsintensitäten (Tab. 4.8) eine sehr zeitige Bevorzugung besonders guter Individuen vermindert und die Durchforschung des Suchraums intensiviert, nicht bestätigt werden.

- Effizienz (Abb. III-12 und Abb. III-13 in Anlage III)

Die Konvergenzgeschwindigkeiten (Abb. III-12) und Rechenzeiten (Abb. III-13) für die untersuchten Einstellungen der Rekombination haben ebenso gleiche Größenordnungen.

Eine Ausnahme bildet die intermediäre Rekombination, die im Vergleich zu den anderen betrachteten Rekombinationsverfahren wesentlich langsamer konvergiert und eine längere Rechenzeit benötigt.

Mitchell [MIT96] weist darauf hin, dass unzählige Faktoren wie z.B. Repräsentation der Individuen und Verfahren der Fitnesszuweisung die Wirkungsweise von Rekombinationsverfahren innerhalb Evolutionärer Algorithmen beeinflussen. Weiterhin, so Mitchell [MIT96], sind diese Abhängigkeiten nur unzureichend erfasst. Nissen [NIS97] bezeichnet multipoint crossover und uniform crossover als gegenwärtigen Standard der Rekombinationsverfahren. Der Vorteil von uniform crossover liegt in der Problemneutralität, d.h. die Festlegung der Vermischungsintensitäten erfolgt durch die Wahrscheinlichkeit p_{ux} , so dass keine Abhängigkeit zu den Größenordnungen von Individuen besteht.

A.4.2.4 Ergebnisvergleich von Selektions- und Rekombinationsverfahren

Die Selektionsverfahren (Kombination von Fitnesszuweisung und Auswahlverfahren) haben einen größeren Einfluss auf Zuverlässigkeit und Effizienz Evolutionärer Algorithmen als die Rekombinationsverfahren (Abb. 4.14 und 4.15).

“Selection is such a critical piece of the GA puzzle that better understanding at its foundation can only help advance the state of genetic algorithm art.” [GOL91], S. 91

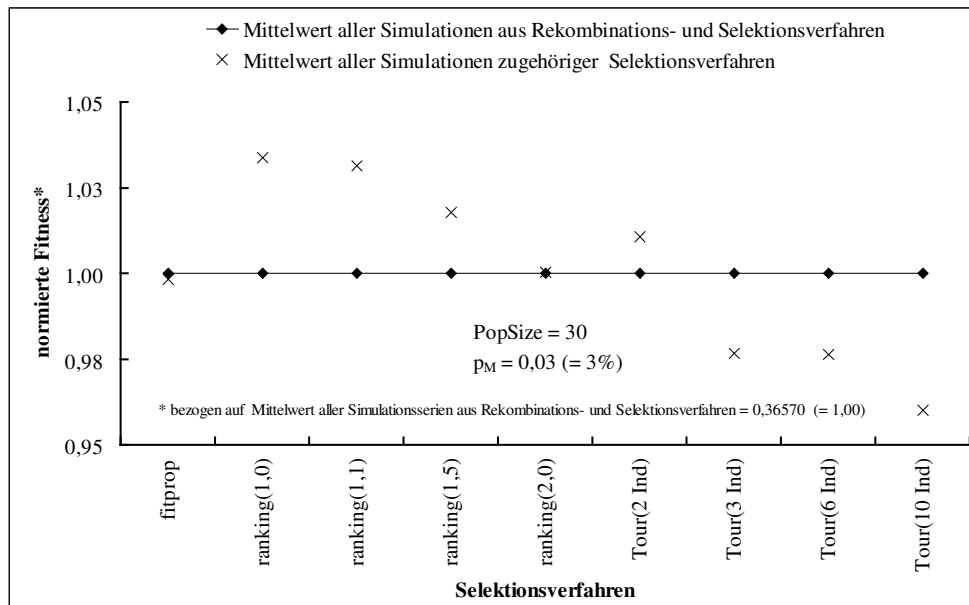


Abbildung 4.14: 10-Stäbe Fachwerk, Einfluss von Selektionsverfahren innerhalb Evolutionärer Algorithmen

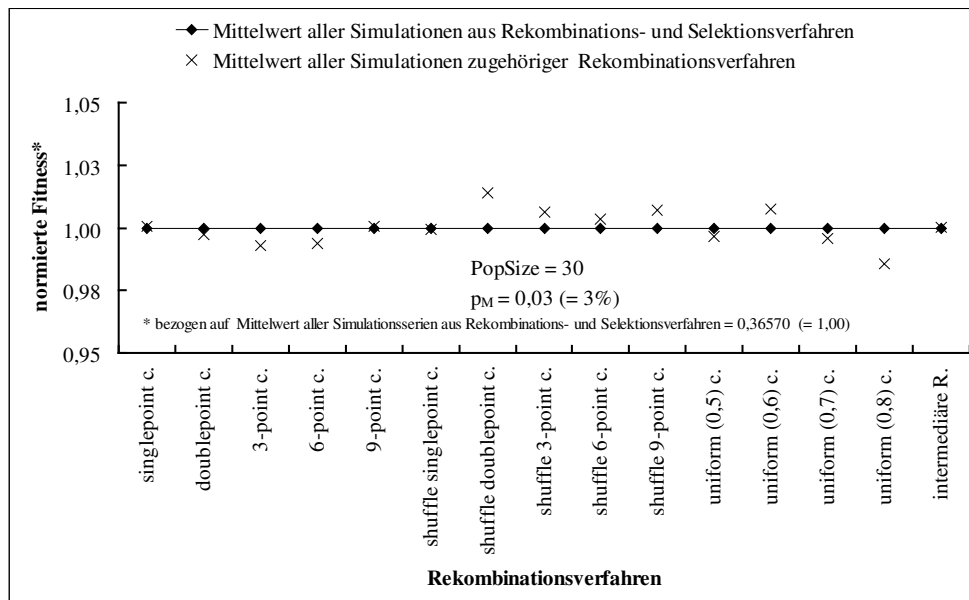


Abbildung 4.15: 10-Stäbe Fachwerk, Einfluss von Rekombinationsverfahren innerhalb Evolutionärer Algorithmen

A.4.3 Mutationswahrscheinlichkeit

Wie in Abschnitt 4.3 (Teilprozess Erzeugung der Nachkommen mittels Rekombination und Mutation) dargestellt, wird zwischen Individuen- und Positionsmutation unterschieden. Letztere ist in der verwendeten Forschungssoftware SLang implementiert und wird nachfolgend analysiert.

Es wird der Einfluss unterschiedlicher Mutationswahrscheinlichkeiten (0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 %) auf *Zuverlässigkeit* und *Effizienz* Evolutionärer Algorithmen untersucht. Dies erfolgt für Populationen mit 20, 50 und 100 Individuen.

Als weitere konstante Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen werden definiert:

Verfahren der Fitnesszuweisung: linear rangbasierte Fitnesszuweisung ($p_s = 1,1$)

Auswahlverfahren: Rouletteselektion

Rekombinationsverfahren: uniform crossover ($p_{ux} = 0,6$).

– Zuverlässigkeit (Abb. III-14 bis Abb. III-17 in Anlage III)

Für die drei untersuchten Populationsgrößen (PopSize = 20, 50 und 100) werden bei Mutationswahrscheinlichkeiten von 0 % und > 10% gegenüber Mutationswahrscheinlichkeiten zwischen 1 % und 10% Individuen mit niedriger Fitness gefunden. Diese Feststellung stimmt mit den Aussagen in [DAW99, AND01, GEN97, HAU98] überein, dass die Höhe der Mutationswahrscheinlichkeit entscheidend den Suchverlauf Evolutionärer Algorithmen beeinflusst.

In den Abbildungen III-15, III-16 und III-17 der Anlage III sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der durchgeführten Simulationsserien für die untersuchten Populationsgrößen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Standardabweichungen bei Mutationswahrscheinlichkeiten von 3% bis 15% am geringsten sind, ausgenommen die Population mit 100 Individuen. Hier sind relativ konstante Standardabweichungen bis ca. 15% Mutationswahrscheinlichkeit vorhanden.

– Effizienz (Abb. III-18 und Abb. III-19 in Anlage III)

Alle drei Populationsgrößen haben ähnliche Konvergenzgeschwindigkeiten und Rechenzeiten. Die Konvergenzgeschwindigkeiten und Rechenzeiten hängen von der Höhe der Mutationswahrscheinlichkeit ab.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Effizienz (Abb. III-18 und Abb. III-19) und Qualität der Individuen (Abb. III-14) zeigt umgekehrte Proportionalitäten, d.h., Mutationswahrscheinlichkeiten, die Individuen mit hoher Fitness ermitteln, benötigen zur Bestimmung dieser Individuen höhere Rechenzeiten und führen zu einer Reduzierung der Konvergenzgeschwindigkeit.

A.4 Schlussfolgerung

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen unter Einbeziehung von Anmerkungen aus der Literatur über die Wirkungsweise von Populationsgröße, Selektionsverfahren (Kombination aus Verfahren von Fitnesszuweisung und Auswahlverfahren), Rekombinationsverfahren und Mutationswahrscheinlichkeit innerhalb Evolutionärer Algorithmen, bezogen auf die Anwendung im Entwurfsprozess, ableiten:

⇒ *Populationsgröße*

- Die Qualität der ermittelten Entwurfslösung ist abhängig von der Populationsgröße.
- Die erforderliche Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösung steigt mit zunehmender Populationsgröße.
- Eine Aussage zur optimalen Populationsgröße ist nicht möglich.

⇒ *Selektionsverfahren*

- Durch die Regulierung des Selektionsdruckes innerhalb der Selektionsverfahren kann die Zuverlässigkeit und Effizienz Evolutionärer Algorithmen bei der Bestimmung einer Entwurfslösung sowie die erforderliche Konvergenzgeschwindigkeit und Rechenzeit zur Auffindung dieser Entwurfslösung beeinflusst werden.
- Die Erhöhung des Selektionsdruckes, bei linear rangbasierter Fitnesszuweisung mit Rouletteauswahl von $p_s = 1,0$ auf $2,0$ bzw. bei linear proportionaler Fitnesszuweisung mit Wettkampfauswahl von $\text{TourSize} = 2$ Ind auf 30 Ind, bewirkt:
 - Verschlechterung der Qualität erzielter Entwurfslösungen, d.h. Ermittlung von Entwurfslösungen, die definierte Gütekriterien nur unzureichend erfüllen
 - Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit
 - Reduzierung der Rechenzeit.

⇒ *Rekombinationsverfahren*

- Nahezu alle untersuchten *Rekombinationsverfahren* mit Variation der Vermischungsintensitäten beeinflussen die Zuverlässigkeit und Effizienz Evolutionärer Algorithmen nahezu im gleichen Maße (Abb. III-10 bis Abb. III-13).
- Unter Verwendung intermediärer Rekombination werden bezüglich der benötigten Rechenzeit zur Ermittlung einer Entwurfslösung gegenüber den anderen untersuchten Rekombinationsverfahren schlechtere Resultate erzielt.

⇒ *Mutationswahrscheinlichkeit*

- Die Höhe der Mutationswahrscheinlichkeit ist ein entscheidender Faktor bei der Suche nach einer qualitativ hochwertigen Entwurfslösung hinsichtlich der Güte definierter Entwurfsziele.
- Die Definition einer zu niedrigen bzw. hohen Mutationswahrscheinlichkeit führt in der Regel zur frühzeitigen Stagnation der Suche und die ermittelte Entwurfslösung erfüllt das definierte Gütekriterium oft nur unzureichend.

Die Qualität Evolutionärer Algorithmen wird durch die Einstellungen ihrer Teilprozesse gesteuert. Die Festlegung dieser Einstellungen ist ein schwieriger und zeitaufwändiger Prozess.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse zu der Tragkonstruktion 10-Stäbe Fachwerk in Verbindung mit Aussagen in zahlreichen Veröffentlichungen werden basierend auf dem allgemeinen Evolutionären Algorithmus in Abbildung 4.1 zwei Evolutionäre Algorithmen (EA-I und EA-II) mit unterschiedlichen Wirkungsweisen definiert. Diese Evolutionären Algorithmen unterscheiden sich durch die Einstellungen für Selektion und Rekombination (Abb. 4.16). Für die Mutationswahrscheinlichkeit p_M werden 3 % aufgrund eigener Ergebnisse in Verbindung mit den Aussagen bei [DAW99, AND01, GEN97] festgelegt.

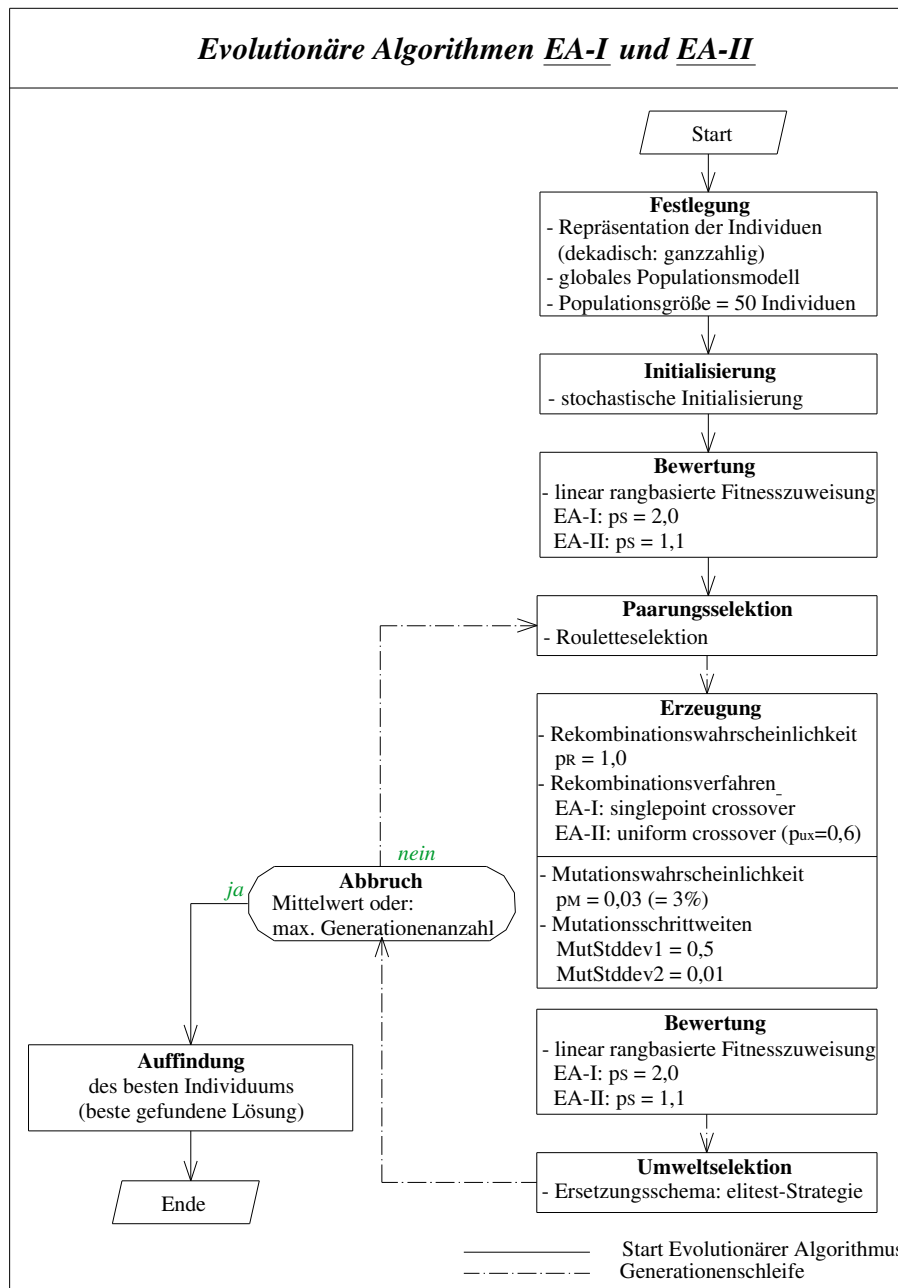


Abbildung 4.16: Evolutionäre Algorithmen EA-I und EA-II

EA-I

Durch die linear rangbasierte Fitnesszuweisung mit hohem Selektionsdruck werden Individuen mit hoher Fitness (= Entwurfslösung, die definierte Gütekriterien ausreichend erfüllen) bevorzugt behandelt. Die Suche konzentriert sich auf die Bereiche des Suchraumes, in denen diese Individuen (= Entwurfslösungen) gefunden wurden.

Das Rekombinationsverfahren singlepoint crossover hat gegenüber den anderen analysierten Rekombinationsverfahren einen geringen Vermischungseffekt der genetischen Informationen, so dass die Erforschung neuer Regionen nur unzureichend aktiviert wird.

Der Suchbereich wird schnell eingegrenzt, und die Suche endet in der Regel frühzeitig in einem lokalen Optimum.

Dieser Evolutionäre Algorithmus ist gekennzeichnet durch eine hohe Konvergenzgeschwindigkeit und demzufolge eine geringe Rechenzeit.

Das erzielte Gewicht für das 10-Stäbe Fachwerk von 2627 kg weicht bis zu 5 % von den Ergebnissen ermittelt durch [BER96], [RAJ95] bzw. mit dem Evolutionären Algorithmus EA-I ab (Tab. 4.9).

EA-II

Durch die linear rangbasierte Fitnesszuweisung mit niedrigem Selektionsdruck werden die Individuen (= Entwurfslösungen) der Population nahezu gleichrangig behandelt. Daraus folgt eine umfassende Durchforschung des Suchraums (= exploration).

Unter Verwendung des Rekombinationsverfahrens uniform crossover mit einer Austauschwahrscheinlichkeit $p_{ux} = 0,6$ wird dieser Effekt verstärkt. Die intensive Durchforschung des Suchraums führt zu einer langsamen Konvergenzgeschwindigkeit und damit verbunden zu hohen Rechenzeiten.

Mit dem Evolutionären Algorithmus EA-II wird für das 10- Stäbe Fachwerk ein Gewicht von 2552 kg erzielt. Dieses Resultat hat die gleiche Größenordnung wie die vorliegenden Referenzlösungen in den Veröffentlichungen von Bernreuther [BER96] und Rajeev/Krishnamoorthy [RAJ95] (Tab. 4.9).

Tabelle 4.9: 10-Stäbe Fachwerk, Vergleich von Untersuchungsergebnissen mit Ergebnissen aus der Literatur

	Literatur		Untersuchungsergebnisse	
	[BER96]	[RAJ95]	EA-I	EA-II
Gewicht (kg)	2492	2548	2627	2552

B Tragkonstruktion: Gewalzter Zweifeldträger

B.1 Entwurfsaufgabe

Der Einfluss von Variablenanzahl auf die Populationsgröße wird am Zweifeldträger in Abbildung 4.17 mit unterschiedlicher Diskretisierung (10, 16 und 20 Trägerelemente) untersucht.

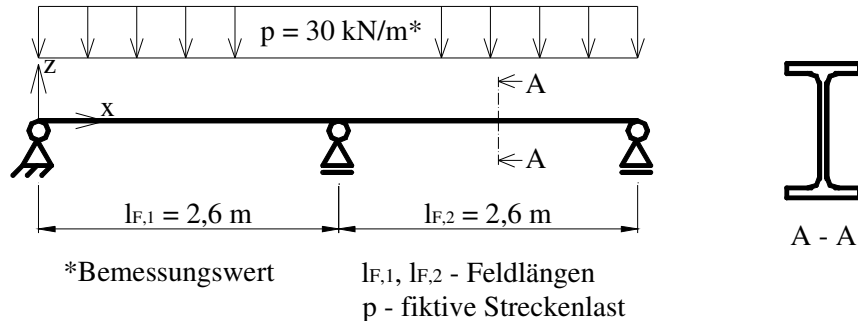


Abbildung 4.17: Gewalzter Zweifeldträger, System¹¹

Das Entwurfsziel ist die Minimierung des Trägergewichtes. Die Entwurfsbedingungen sind der Nachweis der Grenzspannungen und der Nachweis bezüglich zulässiger Verformungen. Die variablen Entwurfsgrößen sind die Querschnittsflächen der Trägerelemente. Ihre Anzahl wird durch die Diskretisierung definiert, d.h. 10, 16 bzw. 20 variable Entwurfsgrößen. In Tabelle 4.10 sind die möglichen Profile für die variablen Entwurfsgrößen aufgelistet.

Tabelle 4.10: Gewalzter Zweifeldträger, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen

IPE –Reihe nach DIN 1025-5 (3.65)					
IPE 80	IPE 140	IPE 200	IPE 270	IPE 360	IPE 500
IPE 100	IPE 160	IPE 220	IPE 300	IPE 400	IPE 550
IPE 120	IPE 180	IPE 240	IPE 330	IPE 450	IPE 600

- Entwurfsziel
 Ökonomie: Gewichtsminimum
- variable Entwurfsgrößen
 Geometrie: Querschnittsprofil der Trägerelemente
- konstante Entwurfsgrößen
 Nutzung: Der Bemessungswert einer fiktiven Streckenlast p ist Abbildung 4.17 zu entnehmen.
 Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
 (Knotenlagen, Elementzuordnungen)

¹¹ die gedrückten Bereiche des Zweifeldträgers sind seitlich gehalten

Material:	E	$= 210000 \text{ N/mm}^2$
	ρ_{Stahl}	$= 78,5 \text{ kN/m}^3$
	$\sigma_{R,d}$	$= 218 \text{ N/mm}^2$
	$u_{\text{grenz}(z)}$	$= 25 \text{ mm}$
Geometrie:	$l_{F,1}$	$= 2,6 \text{ m}$
	$l_{F,2}$	$= 2,6 \text{ m}$
	l_i	$= \text{Länge Element } i$
	$l_{F,1}; l_{F,2}$	$= \text{Feldlängen des Zweifeldträgers}$

- Entwurfsbedingungen

- | | |
|-------------|--|
| Bautechnik: | Nachweise der: |
| | – Tragsicherheit
(Grenzspannungsnachweis) |
| | – Gebrauchstauglichkeit
(Nachweis bezüglich der Verformungen) |

B.2 Optimierungsaufgabe

Optimierungsvariablenvektor \underline{x} , Optimierungskonstantenvektor \underline{y} ; Zielfunktion, Nebenbedingungen und Strafterm sind in den Gleichungen IV-1 bis IV-6 in Anlage IV formuliert.

B.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind Anlage IV zu entnehmen.

B.4 Ergebnisauswertung

- Zuverlässigkeit (Abb. IV-2 bis Abb. IV-5 in Anlage IV)

Die Ergebnisse der Mittelwerte (Abb. IV-2) und Standardabweichungen (Abb. IV-3 bis IV-5) durchgeführter Simulationsserien für die untersuchten Populationsgrößen zeigen, dass mit Anstieg der Populationsgröße zunehmend Individuen mit hoher Fitness für alle untersuchten Größenordnungen der Optimierungsvariablen erzielt werden.

Deutlich zu erkennen ist der geringe Einfluss der Populationsgröße auf die Qualität der Individuen bei einer geringen Anzahl von Optimierungsvariablen (Abb. IV-2 und Abb. IV-3). Im vorliegenden Fall ist der Suchraum bei 10 Optimierungsvariablen soweit eingeschränkt, dass mit größeren Populationen (30 bis 300 Individuen) keine Individuen mit höherer Fitness gefunden werden.

- Effizienz (Abb. IV-6 und Abb. IV-7 in Anlage IV)

Eigene Ergebnisse in Abbildung IV-6 führen zu der Schlussfolgerung, dass eine geringe Anzahl an Optimierungsvariablen zu einer Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit führt.

Entscheidender Bewertungsfaktor für die Effizienz Evolutionärer Algorithmen ist die Rechenzeit. Die Ergebnisse für 10, 16 und 20 Optimierungsvariable in Abbildung IV-7 zeigen einen starken Anstieg der Rechenzeit mit Zunahme der Populationsgröße.

Die Rechenzeit ist von der Größe des Suchraumes abhängig. Eine Beschränkung des Suchraumes wird erreicht durch:

- Reduzierung der Anzahl der Optimierungsvariablen;
- Eingrenzung des Variationsbereiches der Optimierungsvariablen.

In Abbildung 4.18 ist die Suchraumgröße in Abhängigkeit der Optimierungsvariablenanzahl mit unterschiedlichen Größenordnungen n für den Variationsbereich der Optimierungsvariablen dargestellt.

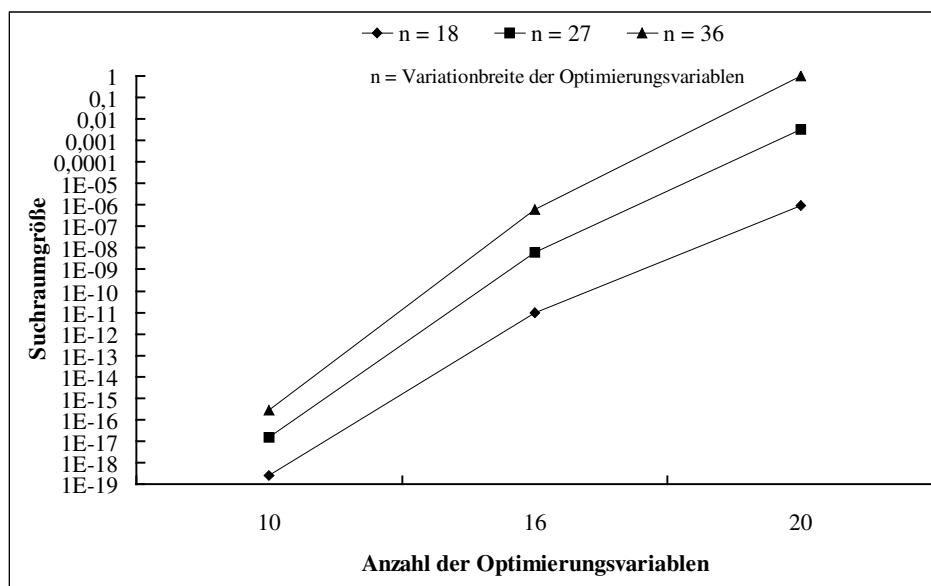


Abbildung 4.18: Gewaltter Zweifeldträger, Abhängigkeit der Suchraumgröße von Optimierungsvariablenanzahl und Variationsbereich der Optimierungsvariablen

Den wesentlichen Einfluss auf die Suchraumgröße liefert die Optimierungsvariablenanzahl. Die Aussage in [KRI02] über die Anzahl der Optimierungsvariablen und ihre Auswirkungen auf die Rechenzeit sowie die Populationsgröße und die evolutionären Operatoren Mutation und Rekombination wird bestätigt.

“It was observed that member grouping led to a substantial decrease in the run-time of the problem. This is attribute to the fact that, with reduced string length, genetic operators like crossover and mutation are performed much faster in each chromosome. In addition, population sizes could also be reduced, which brought down the analysis time for each generation.” [KRI02], S. 68

B.5 Schlussfolgerungen

Ein wesentlicher Entscheidungsfaktor für den Einsatz Evolutionärer Algorithmen im Entwurfsprozess ist in der Gegenwart die Rechenzeit. Eine sinnvolle Eingrenzung der variablen Entwurfsgrößen, die im Bereich optimierungsbasierter Entwurfsstrategien in Optimierungsvariablen überführt werden, ist erforderlich, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Es ist die Aufgabe des Ingenieurs, die variablen Entwurfsgrößen so zu wählen, dass in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung eine ausreichende Formulierung der Entwurfsaufgabe möglich ist. Hierbei sollten die Erfahrungen und die Intuition des Ingenieurs in den Entwurfsprozess einfließen. Als zweckmäßig zur Bestimmung relevanter Entwurfsgrößen für die jeweilige Fragestellung erweist sich die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse.

C Tragkonstruktion: Einschiffiger Rahmen

Die Zuverlässigkeit und die Effizienz der Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II werden überprüft, indem die tendenziellen Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Tragkonstruktionen 10-Stäbe Fachwerk (Beispiel A) und einschiffiger Rahmen verglichen und bewertet werden.

Als Bewertungskriterium der Zuverlässigkeit wird zusätzlich der Variationskoeffizient¹² von der Qualität der Individuen ermittelt.

C.1 Entwurfsaufgabe

Die geometrischen Abmessungen und die konstruktive Ausbildung des einschiffigen Rahmens basieren auf den Ergebnissen der Umfrageauswertung in Abschnitt 2.4. Die erforderlichen Entwurfskomponenten des einschiffigen Rahmens werden nachfolgend beschrieben.

- variable Entwurfsgrößen

In der Abbildung 4.19 ist der einschiffige Rahmen mit Bezeichnung der variablen Entwurfsgrößen dargestellt.

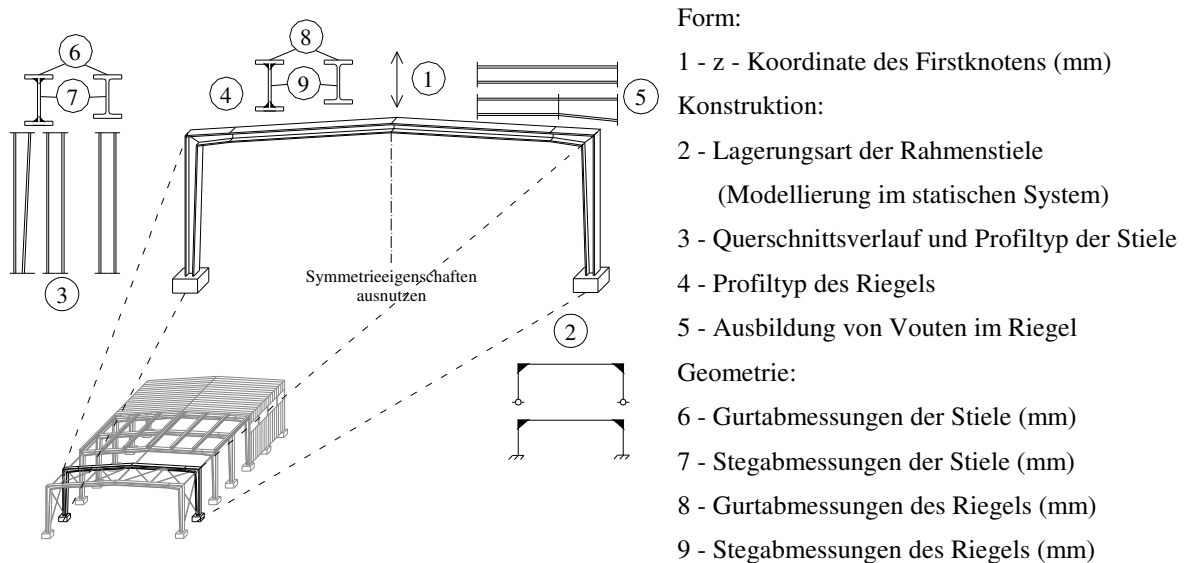


Abbildung 4.19: Einschiffiger Rahmen, System mit variablen Entwurfsgrößen

- Entwurfsziel

Ökonomie: Gewichtsminimum

- konstante Entwurfsgrößen

Standort: Die charakteristischen Werte infolge der standortbedingten Einwirkungen Wind und Schnee sind Abbildung 4.20 zu entnehmen.

¹² Standardabweichung dividiert durch Mittelwert

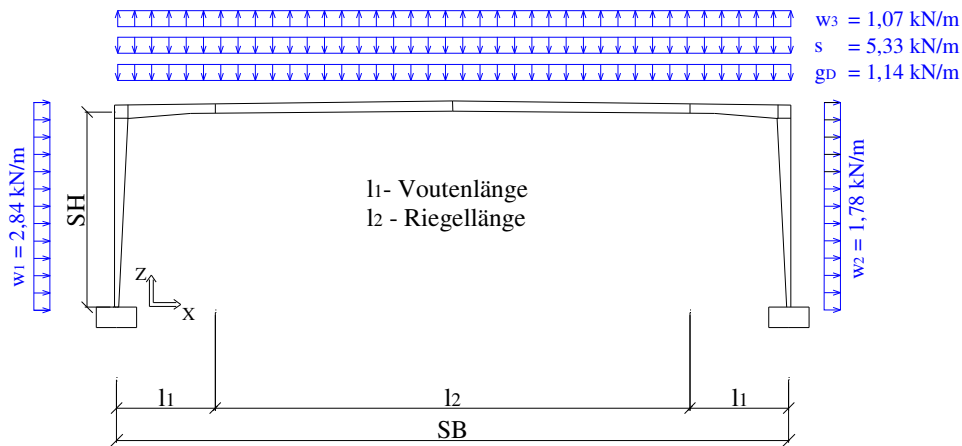


Abbildung 4.20: Einschiffiger Rahmen, Einwirkungen

Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
 (Knotenlagen, Elementzuordnungen)

Material:

- $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
- $\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$
- $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$
- $\sigma_{R,d} = 218 \text{ N/mm}^2$
- $\lambda_a = 92,9$
- $k_c = 1,0$
- $u_{\text{grenz}(x)} = 40 \text{ mm}$
- $u_{\text{grenz}(z)} = 60 \text{ mm}$

Konstruktion: $g_D = 1,14 \text{ kN/m}$ (Abb. 4.20)
 (Eigengewicht der Dachkonstruktion – charakteristischer Wert)

Geometrie:

- $SB = 18000 \text{ mm}$
- $SH_T = 6000 \text{ mm}$
- $l_1 = 2250 \text{ mm}$
- $l_2 = 13500 \text{ mm}$
- $h_{FP} = 250 \text{ mm}$
- $c = 2000 \text{ mm}$

- Entwurfsbedingungen

- Bautechnik: Nachweise der:
- Tragsicherheit
(Grenzspannungsnachweis, Stabilitätssicherheiten Biegeknicken, Biegedrillknicken und Beulen)
 - Gebrauchstauglichkeit
(Nachweis bezüglich der Verformungen)

Die Stabilitätssicherheiten Biegeknicken, Biegedrillknicken und Beulen werden als Entwurfsbedingung folgendermaßen erreicht:

- Biegeknicken in der Rahmenebene
Erfassung durch Berechnungsverfahren: Berechnung nach Theorie II.Ordnung [DIN1800T2]
- Biegeknicken senkrecht zur Rahmenebene
Formulierung als Nebenbedingung: Nachweis des Biegeknickens nach [DIN18800T2, Abschnitt 3, Element (320)]
- Biegedrillknicken
Formulierung als Nebenbedingung: Nachweis des Druckgurtes als Druckstab nach [DIN18800T2, Abschnitt 3, Element (310)]
- Beulen
Festlegung zulässiger Datenmengen: Vorgabe von Blechabmessungen, die Grenzwerte (b/t) einhalten

Die Rahmenecken sind rechtwinklig zur Momentenebene unverschieblich gehalten.

C.2 Optimierungsaufgabe

Die beschriebene Entwurfsaufgabe wird als eine allgemeine Optimierungsaufgabe in Anlage V formuliert. Der Optimierungsvariablenvektor \underline{x} (Gl. V-1) enthält 9 Optimierungsvariablen und der Optimierungskonstantenvektor \underline{y} (Gl. V-2) 19 Optimierungskonstanten. Zielfunktion, Nebenbedingungen und Strafterm C_{ges} sind in den Gleichungen V-3 bis V-13 formuliert.

C.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind Anlage V zu entnehmen.

C.4 Ergebnisauswertung

- Zuverlässigkeit (Abb. V-2 und Abb. V-3 in Anlage V)

Die Qualität der Individuen (Abb. V-2 a und c) sowie die Qualität zugehöriger Mittelwerte, Standardabweichungen (Abb. V-3 a und c) und Variationskoeffizienten (Abb. V-8 und V-9) für 10-Stäbe Fachwerk und einschiffigen Rahmen, erzielt mit den Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II, haben gleichwertige Trends.

Mit EA-II werden gegenüber EA-I für beide Tragkonstruktionen bessere Mittelwerte und Standardabweichungen der Qualität der Individuen, gemessen an der Fitness, erzielt.

- Effizienz (Abb. V-4 und Abb. V-5 in Anlage V)

Die Untersuchungsergebnisse zu Konvergenzgeschwindigkeit (Abb. V-4 a und c) und Rechenzeit (Abb. V-5 a und c) können ebenso als annähernd gleich eingestuft werden. Die Suche konvergiert mit EA-II langsamer als mit EA-I, d.h. die Suche ist unter Verwendung von EA-I kürzer.

C.5 Schlussfolgerungen

Folgende Qualitätsunterschiede treten bei den untersuchten Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II zur Ermittlung der Entwurfslösungen für 10-Stäbe Fachwerk und einschiffigen Rahmen auf:

- Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen gemessen am Eigengewicht (Tab. 4.11)

Tabelle 4.11: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen

Tragkonstruktion	EA-I	EA-II
10-Stäbe Fachwerk	2627 kg ± 695 kg	2552 kg ± 319 kg
einschiffiger Rahmen	1530 kg ± 530 kg	1370 kg ± 120 kg

- Mittelwert der Konvergenzgeschwindigkeit zur Bestimmung der Entwurfslösung (Tab. 4.12)

Tabelle 4.12: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert der Konvergenzgeschwindigkeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen

Tragkonstruktion	EA-I	EA-II
10-Stäbe Fachwerk	66 Gnr	73 Gnr
einschiffiger Rahmen	33 Gnr	75 Gnr

- Mittelwert der Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösung (Tab. 4.13).

Tabelle 4.13: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert der Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen

System	Evolutionärer Algorithmus	
	EA-I	EA-II
10-Stäbe Fachwerk	6 min	7 min
einschiffiger Rahmen	2 h 11 min	4 h 58 min

Anhand der erzielten Entwurfslösungen für 10-Stäbe Fachwerk und einschiffigen Rahmen können nachstehende Schlussfolgerungen über die Anwendung der Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II zur Lösung von Entwurfsaufgaben getroffen werden:

- Evolutionärer Algorithmus EA-I mit:
 - Verfahren der Fitnesszuweisung = linear rangbasierte Selektion mit $p_S = 2,0$
 - Rekombinationsverfahren = singlepoint crossover
 findet Entwurfslösungen mit unzureichender Erfüllung definierter Gütekriterien. Die benötigten Konvergenzgeschwindigkeiten sind geringer und demzufolge verkürzen sich die erforderlichen Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösungen.
- Evolutionärer Algorithmus EA-II mit:
 - Verfahren der Fitnesszuweisung = linear rangbasierte Selektion mit $p_S = 1,1$
 - Rekombinationsverfahren = uniform crossover mit $p_{ux} = 0,6$
 findet Entwurfslösungen mit ausreichender Erfüllung definierter Gütekriterien bei einer langsamen Konvergenzgeschwindigkeit und hieraus resultierender hoher Rechenzeit.

4.5 Entwicklung hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz

4.5.1 Übersicht

Zur Eingrenzung der Nachteile Evolutionärer Algorithmen (Abschnitt 4.2) werden oftmals Kombinationen mit anderen Verfahren, Algorithmen o.ä. gebildet. Diese Kombinationen werden als hybride Verfahren bzw. hybride Strategien bezeichnet. In [VDI3550] werden hybride Strategien als eine Kopplung von Evolutionären Algorithmen mit meist problemspezifischen Suchverfahren verstanden.

„..., wobei in der Regel das problemspezifische Suchverfahren die lokalen Optima bestimmt oder approximiert und der Evolutionäre Algorithmus auf der Menge der lokalen Optima operiert.

Weitere Varianten hybrider Evolutionärer Algorithmen sind charakterisiert durch die Verwendung problemspezifischer Verfahren zur Initialisierung der Startpopulation und/oder die Benutzung lokaler Suchverfahren zur Nachoptimierung der Evolutionären Algorithmen Ergebnisse.“ [VDI3550], S. 5

Durch hybride Evolutionäre Algorithmen wird eine Minderung besonders folgender Nachteile angestrebt:

- Steigerung der Sucheeffizienz Evolutionärer Algorithmen
- Zunahme einer exakten Lokalisierung vom globalen Optimum.

Verschiedene Varianten hybrider Evolutionärer Algorithmen sind in den Veröffentlichungen [HAM98, BAE00a, FAR02, NIS97, GEN97, ADI02] dokumentiert. Hierzu zählen unter anderem:

- Evolutionäre Algorithmen mit lokalen Suchverfahren
 - Gradientenverfahren
 - Greedy-Algorithmen
- Evolutionäre Algorithmen mit allgemeinen Heuristiken
 - Tabu-Search
 - Simulated Annealing
- Evolutionäre Algorithmen mit Computational Intelligence Verfahren (Softcomputing)
 - Fuzzy-Logik
 - künstlich neuronale Netze.

In der vorliegenden Arbeit werden Evolutionäre Algorithmen mit einem wachstumsorientierten Algorithmus, der adaptive Wachstumsvorgänge imitiert, gekoppelt. Die Leistungsfähigkeit dieser hybriden Evolutionären Algorithmen ist zu bewerten.

4.5.2 Wachstumsorientierte Algorithmen

A Prinzip

In wachstumsorientierten Algorithmen werden adaptive Wachstumsvorgänge in der Natur simuliert. Das Prinzip adaptiven Wachstums ist die Einhaltung von lokal festgelegten Auslastungskriterien durch Formanpassung:

- überbelastete Bereiche: Materialanbau;
- unterbelastete Bereiche: kein Materialanbau bzw. Materialabbau.

Wachstumsorientierte Algorithmen finden vor allem in der Strukturoptimierung Anwendung. In der Strukturoptimierung sind die Nebenbedingungen vorwiegend auf die Einhaltung wichtiger strukturmechanischer Kenngrößen, wie zulässige Spannungen bzw. Grenzspannungen, Knotenverschiebungen und Stabilitätsverluste begrenzt.

„Wird beim Optimieren das sichere Abtragen von Lasten ... als die wichtigste Forderung herausgegriffen, spricht man von baustatischer Optimierung von Tragwerken oder Strukturoptimierung,.... Es handelt sich also nicht um eine Auswahl besonderer Zielkriterien, ..., vielmehr um eine Auswahl der Nebenbedingungen, deren Einhaltung die Methoden der Baustatik nachweisen und bestätigen können, wie Stabilität, Nachweis der Materialfestigkeit und zulässige Verformungen.“ [BLE88], S. 149

Beschreibungen zur Strukturoptimierung liefern die Veröffentlichungen [BLE97, MAU98, HOE76, ZHO97, SEE90, GRI98, LAW87, SCH88b, PET97].

Folgende Optimierungsstufen werden in der Strukturoptimierung unterschieden [BLE97]:

- Bemessungsoptimierung (geometrische und materielle Größen);
- Formoptimierung;
- Topologieoptimierung.

Ramm [RAM98] und Bletzinger [BLE97] lösen die materiellen Größen aus der Bemessungsoptimierung heraus und formulieren die so genannte Materialoptimierung als eine weitere Optimierungsstufe.

Das Wirkungsprinzip von wachstumsorientierten Algorithmen eignet sich besonders zur Lösung von Aufgaben der Formoptimierung. Einige wachstumsorientierte Algorithmen, wie z.B. der CAO-Methode, sind in den Veröffentlichungen [MAT97, BAI94] beschrieben.

Die prinzipielle Vorgehensweise des verwendeten wachstumsorientierten Algorithmus ist in Abbildung 4.21 dargestellt.

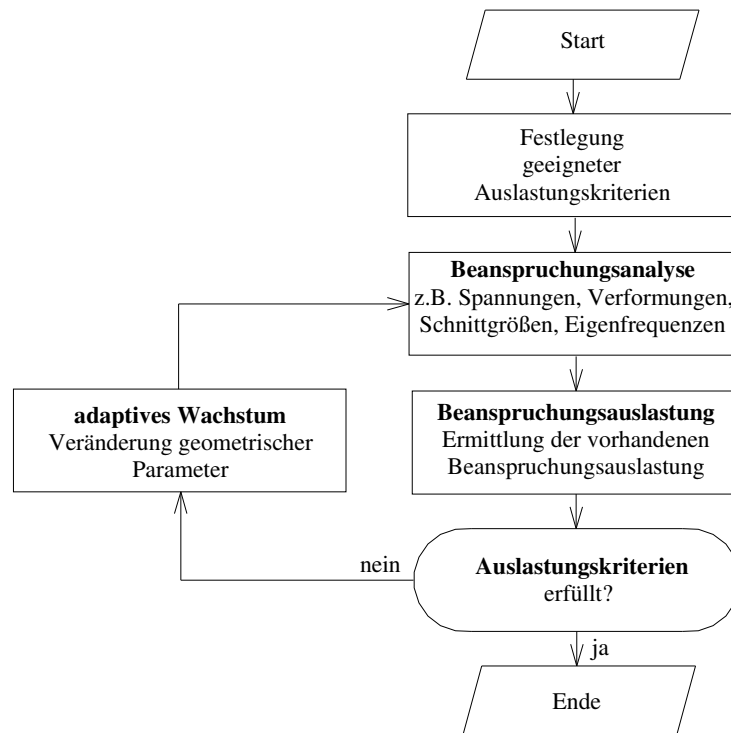


Abbildung 4.21: Prinzipielle Vorgehensweise eines wachstumsorientierten Algorithmus

Die Elemente des Flussbildes werden wie folgt beschrieben.

- **Beanspruchungsanalyse:** Berechnung vorhandener Beanspruchungen in Abhängigkeit ihrer materiellen sowie geometrischen Eigenschaften, vorhandenen Lagerungsbedingungen und Einwirkungen.
- **Beanspruchungsauslastung:** Ermittlung vorhandener Beanspruchungsauslastungen nach Gleichung 4-17.

$$\frac{S_{d,i}}{R_{d,i}} \quad (4-17)$$

$S_{d,i}$ = vorhandene Beanspruchung an der Stelle i ($i = 1, 2, \dots, n$)

$R_{d,i}$ = vorhandene Beanspruchbarkeit an der Stelle i ($i = 1, 2, \dots, n$)

- **Auslastungskriterien:** Kontrolle, inwieweit die ermittelten Beanspruchungsauslastungen die zuvor definierten Auslastungskriterien η_{\min} und η_{\max} erfüllen.
- **adaptives Wachstum:** Simulation adaptiven Wachstums durch Vergrößerung geometrischer Parameter, wenn das Auslastungskriterium η_{\min} unterschritten wird bzw. Verkleinerung geometrischer Parameter, wenn das Auslastungskriterium η_{\max} überschritten wird.

B Parameterstudien

B.1 Entwurfsaufgabe

Am Zweifeldträger in Abbildung 4.22 wird die Qualität des wachstumsorientierten Algorithmus nach Abbildung 4.21 untersucht.

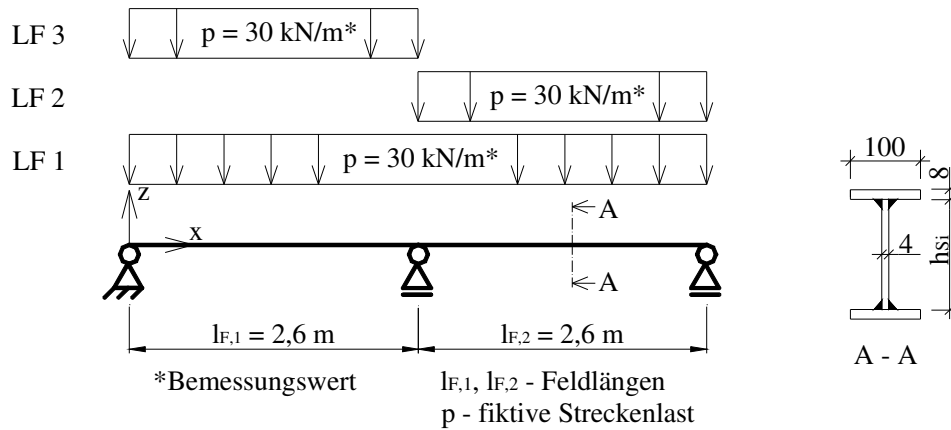


Abbildung 4.22: Geschweißter Zweifeldträger, System

Die variablen Entwurfsgrößen sind die Querschnittshöhen h_{Si} der einzelnen Trägerelemente. Die Anzahl der Trägerelemente wird durch die Diskretisierung des Zweifeldträgers, die analog zu Abschnitt 4.4.2 (Tragkonstruktion: Gewalzter Zweifeldträger) mit 10, 16 bzw. 20 Trägerelementen gewählt wird, festgelegt. In Tabelle 4.14 sind die Werte des Datenpools für die variablen Entwurfsgrößen aufgelistet. In der Praxis stehen oftmals nur Stegbleche mit festgelegten Abmessungen zur Verfügung. Aus diesem Grunde wird das adaptive Wachstum durch diskrete Erhöhung (h_{Si+1}) bzw. Erniedrigung (h_{Si-1}) der Stegbleche simuliert. Entwurfsziel ist die Minimierung des Konstruktionsgewichtes.

Tabelle 4.14: Geschweißter Zweifeldträger, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen

Steghöhen h_{Si} (mm)						
80	120	150	180	210	240	270
90	130	160	190	220	250	280
100	140	170	200	230	260	290

Es erfolgt die Variation folgender Parameter in Abhängigkeit der Startlösungen in Abbildung 4.23:

- Anzahl der Optimierungsvariablen
(10, 16 bzw. 20)
- Bereich des Auslastungskriteriums Vergleichsspannung $\eta_{\min}-\eta_{\max}$
(0,60-1,00; 0,80-1,00; 0,90-1,00; 0,95-1,00)

Der Einfluss variierter Parameter auf die Qualität der Entwurfslösungen wird anhand der Bewertungskriterien Zuverlässigkeit und Effizienz beurteilt.

- *Zuverlässigkeit* des Verfahrens bei der Bestimmung der Qualität der Entwurfslösungen:
 - Qualität der Entwurfslösungen gemessen durch den Zielfunktionswert
 - Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen
- *Effizienz* des Verfahrens zur Auffindung der Entwurfslösung
 - Konvergenzgeschwindigkeit (= Anzahl erforderlicher Generationen)
 - Rechenzeit.

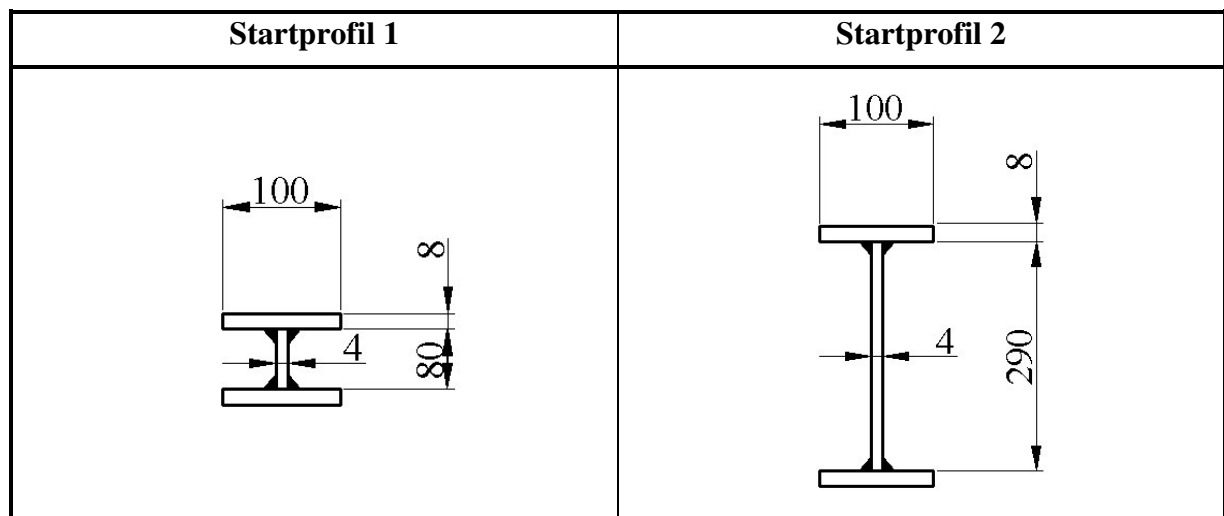


Abbildung 4.23: Geschweißter Zweifeldträger, Startprofile 1 und 2

- Entwurfsziel
 - Ökonomie: Gewichtsminimum
- variable Entwurfsgrößen
 - Geometrie: Querschnittshöhen h_{Si} der Trägerelemente n
- konstante Entwurfsgrößen
 - Nutzung: Der Bemessungswert einer fiktiven Streckenlast p für unterschiedliche Lastfälle ist Abbildung 4.22 zu entnehmen.
 - Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
(Knotenlagen, Elementzuordnungen)
 - Material: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$
 $\sigma_{R,d} = 218 \text{ N/mm}^2$

Geometrie:	$l_{F,1}$	= 2,6 m
	$l_{F,2}$	= 2,6 m
	l_i	= Länge Element i
	$l_{F,1}, l_{F,2}$	- Feldlängen des Zweifeldträgers

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: Als Entwurfsbedingungen sind die Auslastungskriterien, im vorliegenden Fall definierte Auslastungen η_{\min} und η_{\max} der Vergleichsspannungen für die vorhandenen Lastfälle, einzuhalten.

B.3 Optimierungsaufgabe

Variable Entwurfsgrößen, Entwurfsziel und Entwurfsbedingungen der Entwurfsaufgabe werden in Anlage VI als Zielfunktion (Gl. VI-3), Optimierungsvariablen (Gl. VI-1), Optimierungskonstanten (Gl. VI-2), und Nebenbedingungen (Gl. VI-4) formuliert. Die Variationsintervalle der Optimierungsvariablen basieren auf den Werten in Tabelle 4.14.

B.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind Anlage VI zu entnehmen.

B.4 Ergebnisauswertung

– Zuverlässigkeit (Abb. VI-2 und Abb. VI-3 in Anlage VI)

Aus den Ergebnissen in Abbildung VI-2 lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Anzahl von Optimierungsvariablen hat auf das Zielfunktionsergebnis bei beiden Startlösungen einen geringen Einfluss.
- Mit Startlösung 1 werden für die Bereiche des Auslastungskriteriums η_{\min} – η_{\max} von 0,60-1,00 und 0,80-1,00 bessere Zielfunktionswerte erzielt als mit Startlösung 2. Mit zunehmender Eingrenzung des Auslastungsbereiches wird dieser Effekt abgeschwächt.

Die Qualität der Entwurfslösungen, gemessen am Zielfunktionswert, hängt ab von:

- der Startlösung (Richtung aus der die Annäherung an den Bereich des Auslastungskriteriums erfolgt)
- Größe des Auslastungsbereichs.

Die zugehörigen Auslastungen der Vergleichsspannungen für den Zweifeldträger mit 16 Optimierungsvariablen sind in Abbildung VI-3 dargestellt. Eine Überschreitung der maximalen Auslastungsgrenze $\eta_{\max} = 1,0$ liegt bei fehlender Konvergenz (Auslastungsbereich 0,95 – 1,0 der Startprofile 1 und 2) vor.

– Effizienz (Abb. VI-4 in Anlage VI)

Die Anzahl der Optimierungsvariablen hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Konvergenzgeschwindigkeit und die Rechenzeit (Abb. VI-4). Die Aussage von Baier, Seeßelberg und Specht, dass die Zahl der Optimierungsvariablen keinen Einfluss auf die Effizienz wachstumsorientierter Algorithmen hat [BAI94], wird durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse in Abbildung VI-4, dass bei einer zu starken Einschränkung des Auslastungsbereichs oftmals keine Konvergenz erreicht wird. Folgende Sachverhalte sind hierfür maßgebend:

- Korrelationsverhalten zwischen den Optimierungsvariablen;
- Schrittweisenregelung der geometrischen Parameter;
- Größe des Auslastungsbereichs.

Um bei fehlender Konvergenz einen Abbruch des simulierten adaptiven Wachstums zu erreichen, wird als zusätzliches Abbruchkriterium eine maximale Anzahl von Iterationsschritten für den wachstumsorientierten Algorithmus in Abbildung 4.21 festgelegt (Abb. 4.24).

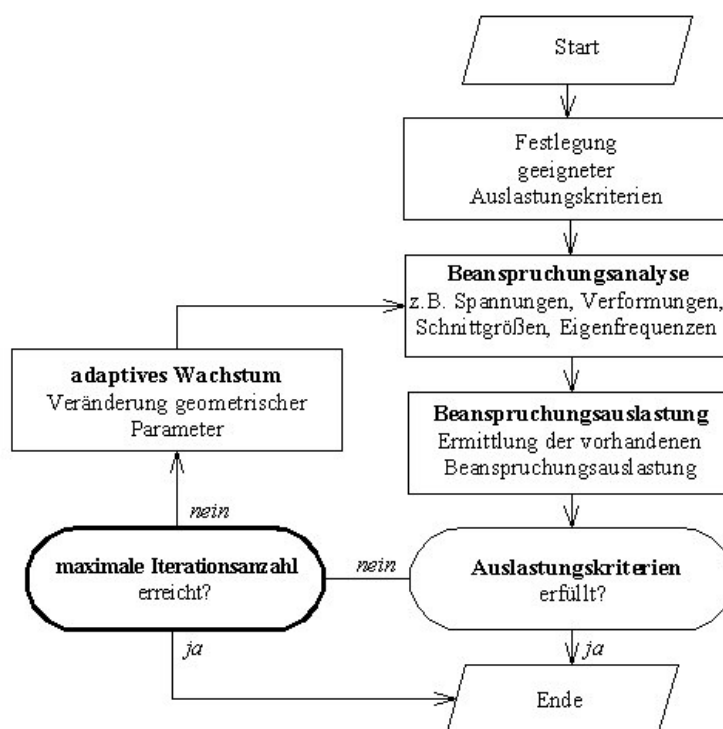


Abbildung 4.24: Wachstumsalgorithmus mit zusätzlichem Abbruchkriterium

4.5.3 Hybride Evolutionäre Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz

Evolutionäre Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz sind speziell für den Entwurf von Tragkonstruktionen entwickelt worden. Das adaptive Wachstum wird durch einen wachstumsorientierten Algorithmus umgesetzt und fungiert innerhalb Evolutionäre Algorithmen als so genanntes *Training*. Das Prinzip der hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz ist in Abbildung 4.25 veranschaulicht.

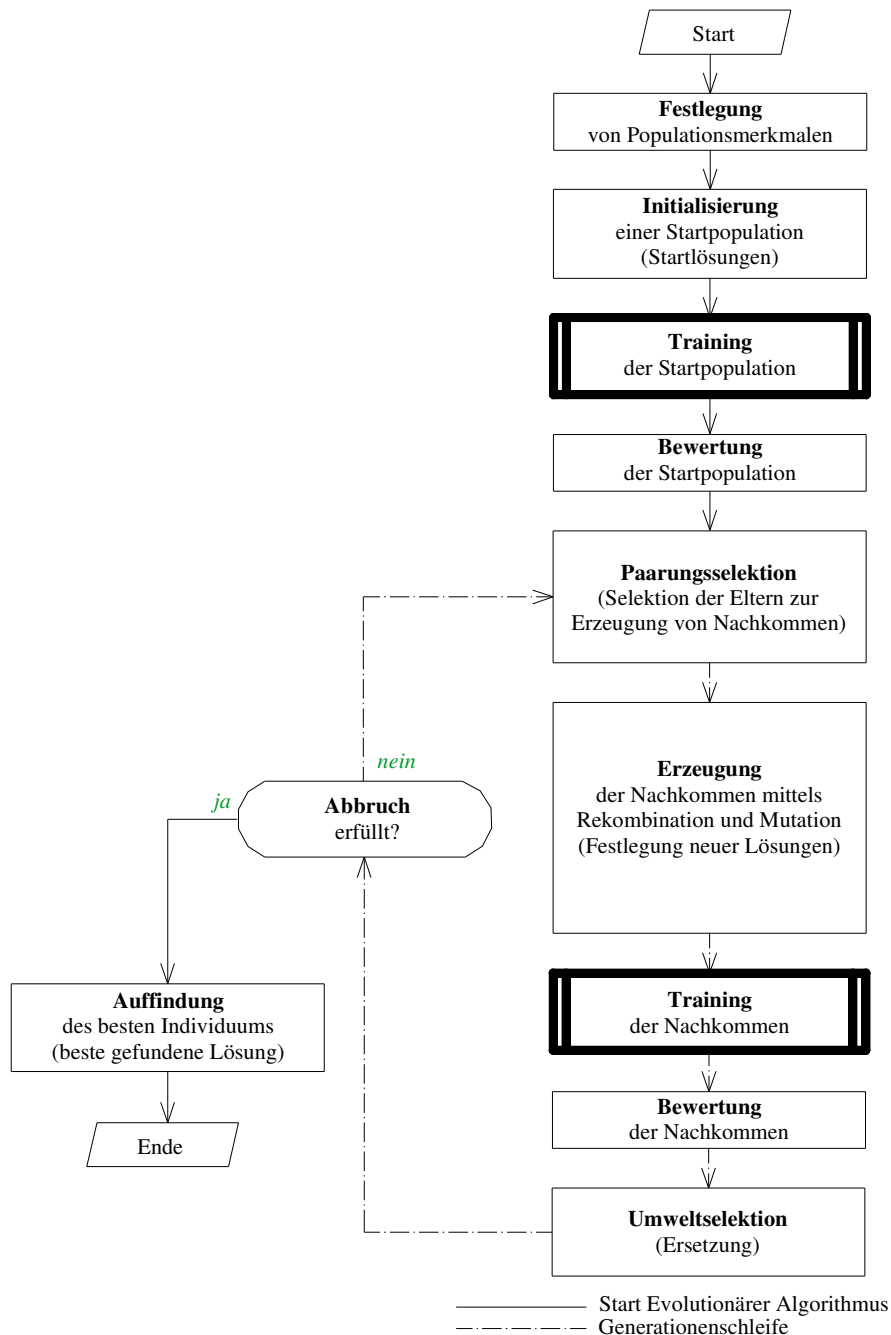


Abbildung 4.25: Prinzip hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz

Mit diesen hybriden Evolutionären Algorithmen werden Individuen einer Population unter folgenden Zielstellungen verändert:

- Verbesserung ihrer Fitness
- Verlagerung bzw. Annäherung an den zulässigen Bereich.

Das Training (Abb. 4.26) wird an ausgewählten Bereichen der Individuen, oftmals Bereiche hoher Beanspruchungen, durchgeführt, die im Weiteren als Trainingsstellen bezeichnet werden. Zur Festlegung der Trainingsstellen sind die Wechselwirkungen aller Entwurfsbedingungen untereinander zu beachten. Oftmals besteht zwischen den Entwurfsbedingungen keine Korrelation, so dass die Festlegung der Trainingsstellen eine ausreichende Erfahrung über das Tragverhalten voraussetzt. Häufig ist zur Auffindung der Trainingsstellen eine vorgeschaltete Analyse notwendig.

Für das Training (Abb. 4.26) sind folgende Festlegungen zu treffen:

- Festlegung von Trainingsstellen und den zugehörigen Auslastungskriterien
- Definition von Grenzen der Auslastungskriterien und einer maximalen Anzahl von Iterationsschritten adaptiven Wachstums (=Trainingseinheiten)

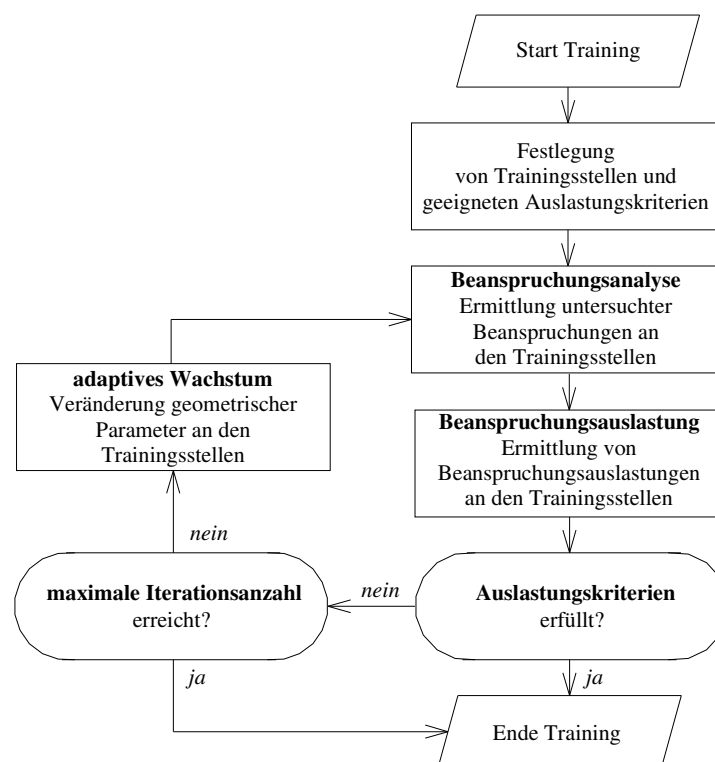


Abbildung 4.26: Prinzip des Trainings in hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz

Die Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II werden durch das Training erweitert. Die daraus resultierenden hybriden Evolutionären Algorithmen werden als hEA-I und hEA-II bezeichnet und im Abschnitt 4.6 auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht.

4.6 Vergleich von Evolutionären Algorithmen und hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz

4.6.1 Vorbemerkungen

Um die Wirkungsweisen der Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II sowie der hybriden Evolutionären Algorithmen hEA-I und hEA-II vergleichen und beurteilen zu können, erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten Entwurfsergebnisse von dem 10-Stäbe Fachwerk (Abb. 4.11) und einschiffigen Rahmen (Abb. 4.19). Die Entwurfsaufgabe und die Optimierungsaufgabe von 10-Stäbe Fachwerk und einschiffigem Rahmen sind in Abschnitt 4.4.2 bzw. in den Anlagen III und V formuliert.

Die Einstellungen der untersuchten Evolutionären Algorithmen bzw. hybriden Evolutionären Algorithmen sind Tabelle 4.15 zu entnehmen.

Tabelle 4.15: Einstellungen der Teilprozesse von EA-I, EA-II, hEA-I und hEA-II

Einstellungen der Teilprozesse	Evolutionäre Algorithmen		hybride Evolutionäre Algorithmen	
	EA-I	EA-II	hEA-I	hEA-II
– <i>Festlegungen von Populationsmerkmalen</i>				
Repräsentation der Individuen	dekadisch: ganzzahlig			
Populationsmodell	global			
Populationsgröße	50			
– <i>Initialisierung einer Startpopulation</i>				
Startpopulation	stochastisch			
– <i>Bewertung der Startpopulation bzw. der Nachkommen</i>				
Verfahren der Fitnesszuweisung	linear rangbasierte Fitnesszuweisung $p_S = 2,0$	linear rangbasierte Fitnesszuweisung $p_S = 1,1$	linear rangbasierte Fitnesszuweisung $p_S = 2,0$	linear rangbasierte Fitnesszuweisung $p_S = 1,1$
– <i>Paarungsselektion</i>				
Auswahlverfahren	Roulette Selektion			
– <i>Erzeugung der Nachkommen mittels Rekombination und Mutation</i>				
Rekombinationswahrscheinlichkeit	$p_R = 1,0$			
Rekombinationsverfahren	singlepoint crossover	uniform crossover $p_{ux} = 0,6$	singlepoint crossover	uniform crossover $p_{ux} = 0,6$
Mutationswahrscheinlichkeit	$p_M = 0,03$			
Mutationsschrittweiten	MutStddev1 = 0,5 MutStddev2 = 0,01			
– <i>Umweltselektion</i>				
Ersetzungsschema	elitest-Strategie ($n_{elit} = 1$)			
– <i>Abbruch</i>				
Mittelwert oder: max. Generationenanzahl	Gl. 4-14 600 Gnr			

Die Vergleichsgrundlage sind die Bewertungskriterien Zuverlässigkeit und Effizienz.

- *Zuverlässigkeit* der Evolutionären Algorithmen bei der Bestimmung der Qualität der Individuen:
 - Qualität der Individuen gemessen an der Fitness
 - Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Individuen
- *Effizienz* der Evolutionären Algorithmen zur Auffindung der Individuen
 - Konvergenzgeschwindigkeit (= Anzahl erforderlicher Generationen)
 - Rechenzeit.

Analog zu Abschnitt 4.4.2 werden pro analysierten Evolutionären Algorithmus (EA-I, EA-II, hEA-I bzw. hEA-II) Simulationsserien mit 15 Simulationen durchgeführt.

Die hybriden Evolutionären Algorithmen hEA-I und hEA-II erfordern die Festlegung von Trainingsstellen. In Abbildung 4.27 sind die definierten Trainingsstellen für 10-Stäbe Fachwerk und einschiffigen Rahmen dargestellt. Dies sind:

- 10-Stäbe Fachwerk: Querschnittsfläche von Element 5 und 6
- einschiffiger Rahmen: Stegabmessungen an den Rahmenecken und am Firstpunkt.

Als Auslastungskriterium der Trainingsstellen werden die Vergleichsspannungen mit den Auslastungsgrenzen $\eta_{\min} = 0,75$ und $\eta_{\max} = 0,95$ definiert. Die maximale Iterationsanzahl (= Trainingseinheiten) wird auf zwei begrenzt.

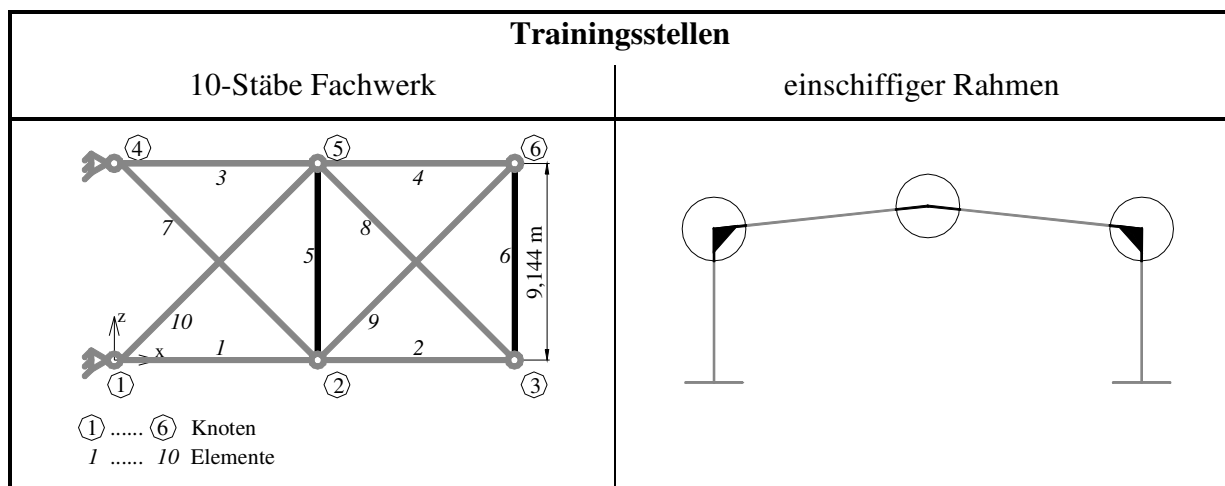


Abbildung 4.27: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Trainingsstellen

4.6.2 Ergebnisauswertung

- Zuverlässigkeit (Abb. V-6, V-8 und V-9 in Anlage V)

Die aus den Simulationsserien berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen zur Qualität der Individuen zeigen, dass mit hybriden Evolutionären Algorithmen qualitativ hochwertigere Individuen gefunden werden als mit Evolutionären Algorithmen (Abb. V-6).

Die Mittelwerte der Variationskoeffizienten (Abb. V-8 und V-9) ermittelt mit EA-I bzw. hEA-I haben dabei folgendes Verhältnis zu den Mittelwerten ermittelt mit EA-II bzw. hEA-II:

- Evolutionäre Algorithmen EA-I zu EA-II
 - 10-Stäbe Fachwerk: ~ 2,1 zu 1
 - einschiffiger Rahmen: ~ 3,8 zu 1
- hybride Evolutionäre Algorithmen hEA-I zu hEA-II
 - 10-Stäbe Fachwerk: ~ 1,6 zu 1
 - einschiffiger Rahmen: ~ 1,7 zu 1

Es zeigt sich, dass die Quotienten zwischen den Einstellungen I und II der Evolutionären Algorithmen größer sind als die Quotienten zwischen den Einstellungen I und II der hybriden Evolutionären Algorithmen. Das heißt, die systematische Verbesserung der Individuen mittels Training führt zu einer Homogenisierung der Population und schwächt die Wirkungsweise von Selektions- und Rekombinationsverfahren, die in den Sätzen I und II verschieden sind.

- Effizienz (Abb. V-7 in Anlage V)

Die Konvergenzgeschwindigkeiten zur Bestimmung der Individuen, dargestellt in Abbildung V-7 a) und c), sind unter Verwendung von EA-I bzw. hEA-I höher als unter der Verwendung von EA-II bzw. hEA-II.

Entscheidend für die Bewertung der untersuchten Evolutionären Algorithmen ist allerdings der Aspekt Rechenzeit (Abb. V-7 b) und V-7 d)). Unter Verwendung der hybriden Evolutionären Algorithmen werden im Vergleich zu den Evolutionären Algorithmen bis zu vierfache Rechenzeiten zur Bestimmung der Individuen benötigt. Als Ursache sind die zusätzlichen Beanspruchungsanalysen nach den durchgeführten Trainingseinheiten im hybriden Evolutionären Algorithmus zu nennen.

Die Bedeutung dieser Aussagen für die Anwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit unterschiedlichen Evolutionären Algorithmen bzw. hybriden Evolutionären Algorithmen wird nachfolgend erörtert.

Anhand der vorliegenden Entwurflösungen zu den untersuchten Tragkonstruktionen 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen können nachstehende Schlussfolgerungen über die Wirkungsweise und Qualität der betrachteten Evolutionären Algorithmen EA-I und EA-II sowie der hybriden Evolutionären Algorithmen hEA-I und hEA-II im Entwurfsprozess getroffen werden:

- Die unterschiedlichen Wirkungsweisen der Einstellungen für die Selektions- und Rekombinationsverfahren in den geprüften Algorithmen, umgesetzt in den Sätzen I und II, haben innerhalb der hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptiven Wachstumsansatz gegenüber den Evolutionären Algorithmen einen geringeren Einfluss auf die Qualität der Entwurfslösung (Tab. 4.16).
- Unter Verwendung der hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz werden Entwurfslösungen gefunden, die das definierte Entwurfsziel besser erfüllen als unter Verwendung der Evolutionären Algorithmen (Tab. 4.16).

Tabelle 4.16: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen

Tragkonstruktion	Evolutionärer Algorithmus		hybrider Evolutionärer Algorithmus	
	EA-I	EA-II	hEA-I	hEA-II
10-Stäbe Fachwerk	2730 kg ± 695 kg	2659 kg ± 319 kg	2661 kg ± 281 kg	2576 kg ± 165 kg
einschiffiger Rahmen	1530 kg ± 530 kg	1370 kg ± 120 kg	1325 kg ± 210 kg	1315 kg ± 120 kg

- Die Konvergenzgeschwindigkeiten (= Anzahl erforderlicher Generationen) zur Ermittlung der Entwurfslösungen sind bei den hybriden Evolutionären Algorithmen nur geringfügig höher als bei den Evolutionären Algorithmen. Dies zeigen die in Tabelle 4.17 gegenübergestellten berechneten Mittelwerte der Konvergenzgeschwindigkeiten der durchgeführten Simulationsserien.

Tabelle 4.17: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert der Konvergenzgeschwindigkeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen

Tragkonstruktion	Evolutionärer Algorithmus		hybrider Evolutionärer Algorithmus	
	EA-I	EA-II	hEA-I	hEA-II
10-Stäbe Fachwerk	66 Gnr	73 Gnr	50 Gnr	78 Gnr
einschiffiger Rahmen	33 Gnr	75 Gnr	41 Gnr	54 Gnr

- Im Gegensatz zu den Evolutionären Algorithmen verschlechtern sich die Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösung bei den hybriden Evolutionären Algorithmen erheblich (Tab. 4.18). Herbeigeführt werden diese hohen Rechenzeiten durch die erforderlichen Beanspruchungsanalysen nach jeder durchgeführten Trainingseinheit (= adaptives Wachstum).

Tabelle 4.18: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert der Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen

Tragkonstruktion	Evolutionärer Algorithmus		hybrider Evolutionärer Algorithmus	
	EA-I	EA-II	hEA-I	hEA-II
10-Stäbe Fachwerk	6 min	7 min	13 min	20 min
einschiffiger Rahmen	2 h 11 min	4 h 58 min	8 h 31 min	11 h 19 min

4.7 Schlussfolgerung

Auf Grundlage der betrachteten Entwurfsaufgaben in den Abschnitten 4.4.2 und 4.6 sowie der Einbeziehung von Erfahrungen anderer Forscher aus der Literatur können nachstehende Aussagen über die *Anwendung Evolutionärer Algorithmen innerhalb der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie* zur Lösung von Entwurfsaufgaben getroffen werden.

Die erzielten Entwurfslösungen erfüllen definierte Entwurfsziele mit unterschiedlicher Güte, da die Qualität der Entwurfslösungen von den Wirkungsweisen der Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen abhängt.

- Die Erkenntnisse aus den Abschnitten 4.4.2 zur Anwendung Evolutionärer Algorithmen für die Lösung von Entwurfsaufgaben mit optimierungsbasierter Entwurfsstrategie in der Praxis sind in den Abbildung XII-1 bis XII-5 (Anlage XII) anwenderfreundlich dargestellt. Neben den Teilprozessen der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie sind Hinweise zu den Wirkungsweisen ausgewählter Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen angegeben.
- Der Evolutionäre Algorithmus in Abbildung 4.28 kann hinsichtlich der Bewertungskriterien Zuverlässigkeit¹³ und Effizienz¹⁴ als ein robustes Optimierungsverfahren innerhalb der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie bezeichnet werden. Mit diesem Evolutionären Algorithmus steht dem planenden Ingenieur ein flexibles Optimierungsverfahren zur Verfügung. Diese Aussage wird anhand ausgewählter Entwurfsaufgaben, in Abschnitt fünf mit optimierungsbasierter Entwurfsstrategie gelöst, untermauert.

Hybride Evolutionäre Algorithmen werden zur Eingrenzung der Nachteile Evolutionärer Algorithmen gebildet und sind üblicherweise eine Kopplung von Evolutionären Algorithmen mit problemspezifischen Optimierungsverfahren.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten hybriden *Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz* verändern Individuen einer Population unter nachstehenden Zielstellungen:

- Verbesserung ihrer Fitness
- Verlagerung bzw. Annäherung an den zulässigen Bereich.

Anhand der ermittelten Entwurfslösung zu den Tragkonstruktionen 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen kann die Qualität der hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz wie folgt bewertet werden:

- Die erzielten Entwurfslösungen erfüllen definierte Entwurfsziele mit nahezu gleichwertiger Güte, unabhängig von den Einstellungen der Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen, da eine Abschwächung ihrer Wirkungsweise durch das Training erreicht wird.
- Die hohen Rechenzeiten zur Ermittlung der Entwurfslösungen werden durch erforderliche Beanspruchungsanalysen nach den Trainingseinheiten hervorgerufen.
- Abgesehen von den verhältnismäßig hohen Rechenzeiten zur Bestimmung einer Entwurfslösung unter Verwendung hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptivem

¹³ Qualität, mit der ein Problem gelöst werden kann

¹⁴ erforderliche Konvergenzgeschwindigkeit bzw. Rechenzeit zur Lösung des Problems

Wachstumsansatz ist die Qualität der Entwurfslösung dadurch gekennzeichnet, dass definierte Entwurfsziele mit hochwertiger Güte erfüllt werden.

Die derzeit verfügbare Hard- und Software in Ingenieurbüros kann Entwurfsaufgaben mit diesen hybriden Evolutionären Algorithmen aufgrund der hohen Rechenzeiten nicht effektiv lösen. Damit ist deren Anwendung in der Entwurfspraxis zum jetzigen Zeitpunkt noch begrenzt.

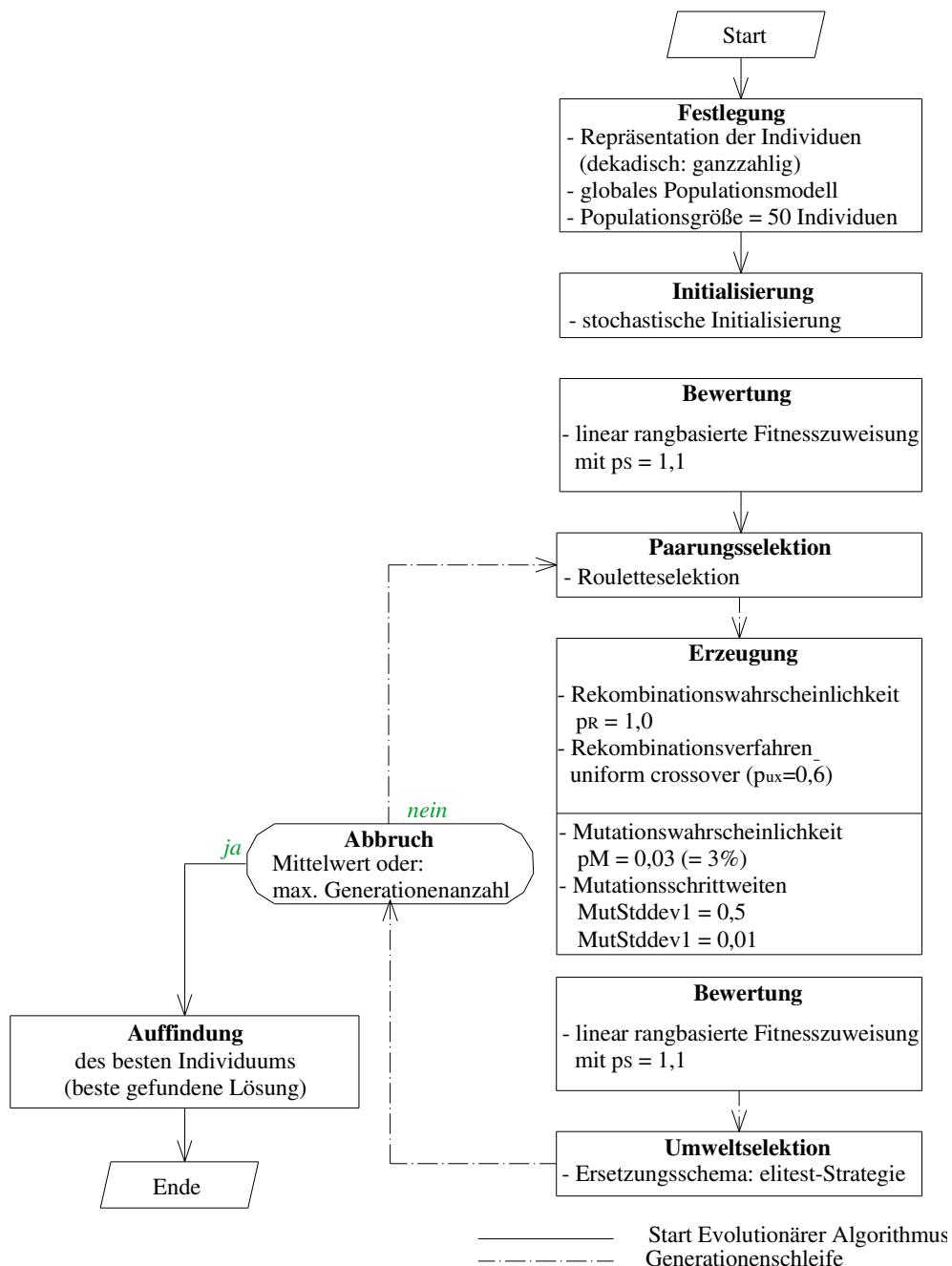


Abbildung 4.28: Robuster Evolutionärer Algorithmus (= EA-II)

5 Lösung ausgewählter Entwurfsaufgaben aus der Baupraxis

5.1 Allgemeines

Evolutionäre Algorithmen werden innerhalb optimierungsbasierter Entwurfsstrategien als Optimierungsverfahren zur Auffindung von Entwurfslösungen verwendet. Um die Leistungsfähigkeit Evolutionärer Algorithmen zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Bauwesen bewerten zu können, ist eine geeignete Vergleichsgrundlage zu wählen. Thierauf [THI89] schreibt hierzu:

„Die Frage, um wie viel eine optimierte Bemessung besser sein kann als eine konventionelle Bemessung, lässt sich nur mit Einschränkung auf solche Tragwerke beantworten, die entweder häufig und von verschiedenen Ingenieuren bemessen wurden oder die in einer standardisierten Form als Serienprodukte eingesetzt werden. In beiden Fällen kann man nämlich davon ausgehen, dass die Vergleichsgrundlage eine anerkannte und gute Bemessung darstellt.“ [THI89], S. 471

Die Leistungsfähigkeit des robusten Evolutionären Algorithmus EA-II in Abbildung 4.28 wird überprüft an:

- typischen Bauwerken des Industriebaus, für die langjährige Entwurfserfahrungen vorliegen (Abschnitt 5.2)
- Entwürfen ausgewählter Ingenieurbauwerke der Baupraxis (Abschnitt 5.3).

Das Ziel der Überprüfung ist die Qualitätsbewertung und der Qualitätsvergleich der bestimmten Entwurfslösungen gegenüber den mit einer traditionellen Entwurfsstrategie erreichten Entwurfslösungen.

Die Einstellungen der Teilprozesse des robusten Evolutionären Algorithmus sind Abbildung 4.28 zu entnehmen.

5.2 Entwurf ausgewählter Bauwerke des Stahlhochbaus

5.2.1 Vorbemerkungen zum Entwurfsobjekt Halle in Stahlbauweise

Die Anwendung Evolutionärer Algorithmen wird am Entwurfsobjekt Halle in Stahlbauweise demonstriert, weil:

- ausreichende Entwurfserfahrungen vorliegen
- umfangreiche Bauvolumina vorhanden sind.

Die untersuchten Entwurfsobjekte sind die einschiffige Halle in Abbildung 5.1 und die zweischiffige Halle in Abbildung 5.2.

Entwurfsobjekt 1 – einschiffige Halle

Die geometrische und konstruktive Ausbildung der einschiffigen Halle in Abbildung 5.1 entspricht der Form einer häufig in der Praxis realisierten Halle und basiert auf dem Umfrageergebnis in Abschnitt 2.4.2.2.1. An der Nordseite der Halle befindet sich ein Fensterband von 1,50 m Höhe und an den Stirnseiten der Halle jeweils ein Tor von 4 m Breite und 3 m Höhe.

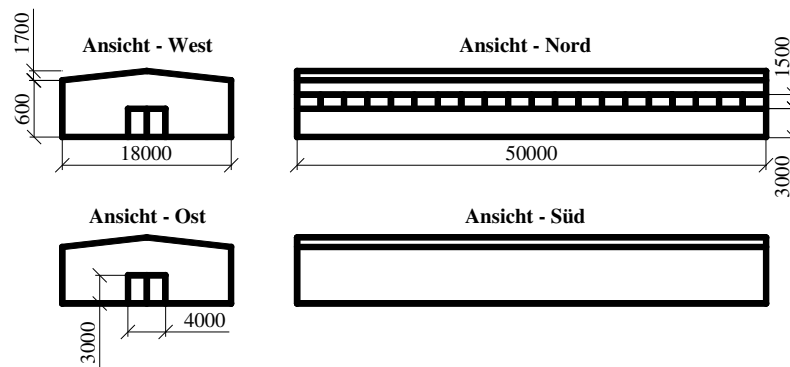


Abbildung 5.1: Entwurfsobjekt 1 - einschiffige Halle

Entwurfsobjekt 2 – zweischiffige Halle

Das Entwurfsobjekt 2 ist die zweischiffige Halle in Abbildung 5.2. Diese Entwurfsaufgabe ist ein konzipiertes und bereits realisiertes Objekt eines renommierten Stahlhallenherstellers, dessen Entwurfsergebnis im Weiteren als Referenzlösung dient.

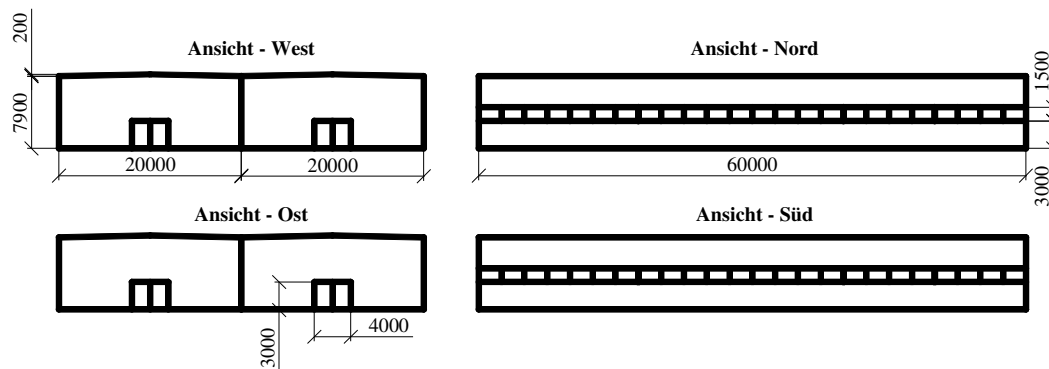


Abbildung 5.2: Entwurfsobjekt 2 - zweischiffige Halle

Die untersuchten Systemstufen der Entwurfsobjekte 1 und 2 sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Sie sind nach zunehmender Komplexität geordnet:

- Element *einschiffiger und zweischiffiger Rahmen* mit tragender Funktion
- Teilsystem *Tragwerk einschiffige Halle* (Rahmen-Pfetten-System) mit tragender Funktion
- Gesamtsystem *Bauwerk einschiffige Halle* (Tragwerk-Hülle-System) mit tragender und bauphysikalischer Funktion

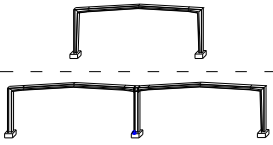
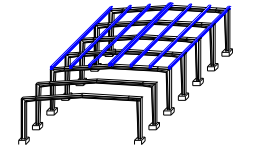
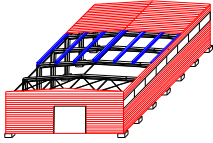
Funktionen System- stufen	tragende Funktion	tragende Funktion bauphysikalische Funktion
- Element - <i>ein- und</i> <i>zweischiffiger</i> <i>Rahmen</i>		
- Teilsystem - <i>Tragwerk</i> <i>einschiffige Halle</i>		
- Gesamtsystem - <i>Bauwerk</i> <i>einschiffige Halle</i>		

Abbildung 5.3: Entwurfsaufgaben, gegliedert nach Systemstufen und Funktionen

5.2.2 Element Rahmen mit tragender Funktion

5.2.2.1 Einschiffiger Rahmen

5.2.2.1.1 Untersuchungen zur konstruktiven Ausbildung

A Entwurfsaufgabe

Angaben über die Entwurfskomponenten sind Abschnitt 4.4.2 (Tragkonstruktion C) zu entnehmen. Für die weiteren Untersuchungen am Element einschiffiger Rahmen werden hier folgende variable Entwurfsgrößen in konstante Entwurfsgrößen umgewandelt:

- z-Koordinate des Firstknotens
- Fußpunktlagerung der Rahmenstiele (Modellierung im statischen System)
- konstruktive Ausbildung des Riegels (Profiltyp und Voutenausbildung) und der Stiele (Profiltyp und Querschnittsverlauf) durch Definition von Rahmentypen (Abb. 5.4)
- Stahlsorte.

Die systembezogenen Untersuchungen betreffen eine Variation von:

- I Fußpunktlagerung der Rahmenstiele (statische Systeme \Rightarrow Zweigelenrahmen bzw. eingespannter Rahmen)
- II konstruktiver Ausbildung der Rahmenstiele (parallelgurtig bzw. konisch)
- II Stahlsorte (S235 bzw. S355).

Aus den Untersuchungsergebnissen sind Aussagen über Einflüsse auf das Gesamtgewicht der definierten Rahmentypen abzuleiten.

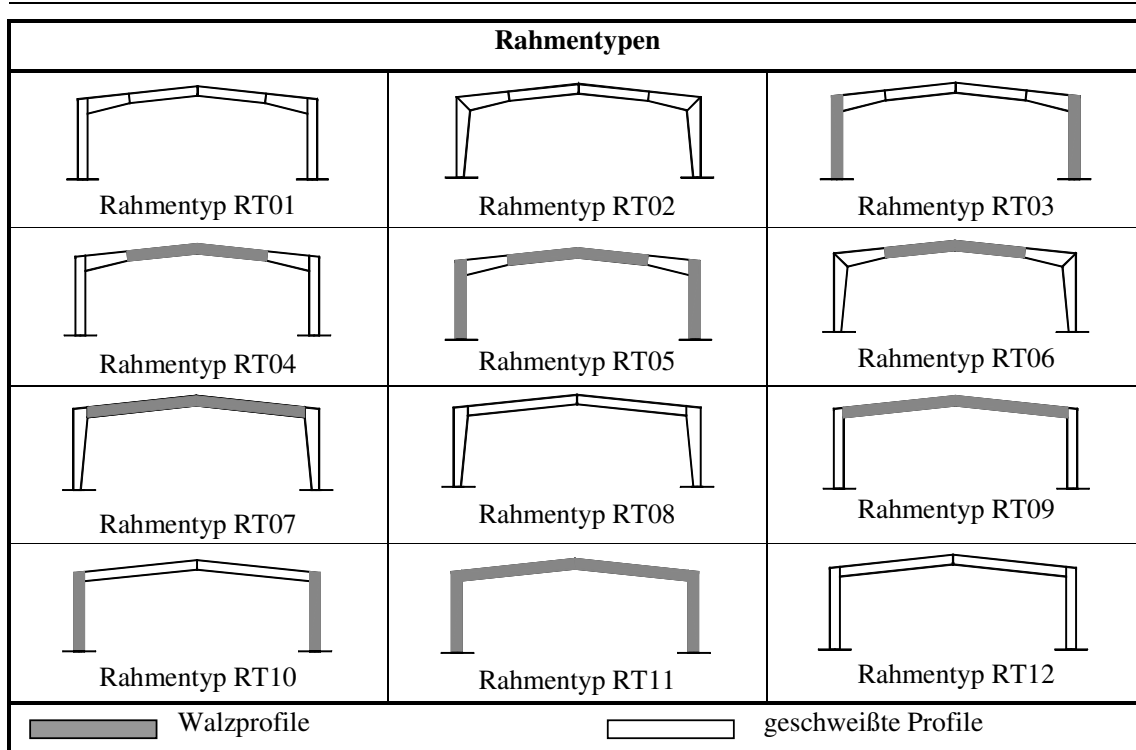


Abbildung 5.4: Einschiffiger Rahmen, Übersicht der untersuchten Rahmentypen

B Optimierungsaufgabe

Die Optimierungsaufgabe ist in Anlage V formuliert.

C Ergebnisauswertung

C.1 Fußpunktlagerung der Rahmenstiele

Die Gewichtsunterschiede zwischen Zweigelenrahmen (ZGR) und eingespannten Rahmen (EGR) der untersuchten Rahmentypen sind gering (Abb. 5.5). Ein Vergleich der zugehörigen Fundamentabmessungen zeigt, dass die erforderlichen Fundamentvolumina zur Aufnahme der Einspannmomente am Fußpunkt für die eingespannten Rahmen bis zu einem fünffachen der Zweigelenrahmen ansteigen können.

In der Praxis werden ca. 87 % der einschiffigen Rahmen als Zweigelenrahmen ausgeführt (Abb. 5.12). Diese Aussage beruht auf den Ergebnissen der durchgeführten Umfrage der Autorin [SCH00] bei führenden Stahlhallenherstellern in Deutschland und den Angaben in zahlreichen Veröffentlichungen (Abschnitt 2.4).

Die vorliegenden Entwurflösungen in Abbildung 5.5 untermauern diese Aussage, auch wenn der Zweigelenrahmen ein geringfügig höheres Gewicht aufweist. Jedoch sind die Fundamentabmessungen wesentlich geringer gegenüber einem eingespannten Rahmen.

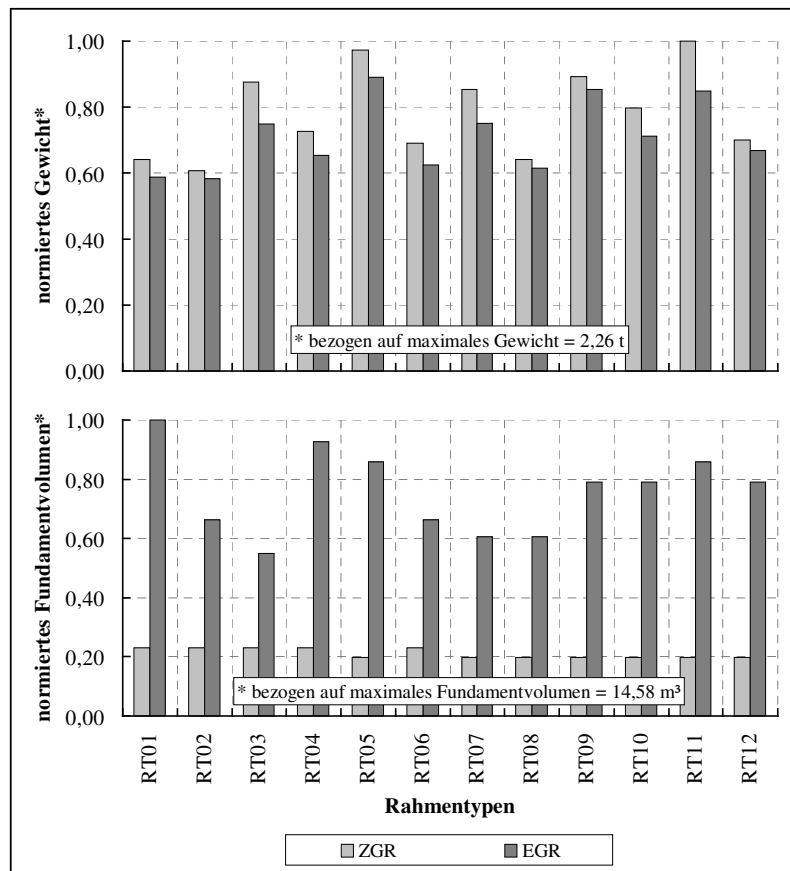


Abbildung 5.5: Einschiffiger Rahmen, Eigengewicht und Fundamentvolumen

Ein fiktiver Kostenvergleich (Abb. 5.6) zeigt, dass ab einem bestimmten Kostenverhältnis K' (Stahlpreis zu Preis für Fundamentbeton) der eingespannte Rahmen wirtschaftlicher wird. Für die Rahmentypen RT02 und RT05 sind dies nachstehende Kostenverhältnisse:

- RT02: $K_{\text{Stahl}}(\text{G}) / K_{\text{Beton}}(\text{G}) = 126 / 1$
- RT05: $K_{\text{Stahl}}(\text{G}) / K_{\text{Beton}}(\text{G}) = 50 / 1$.

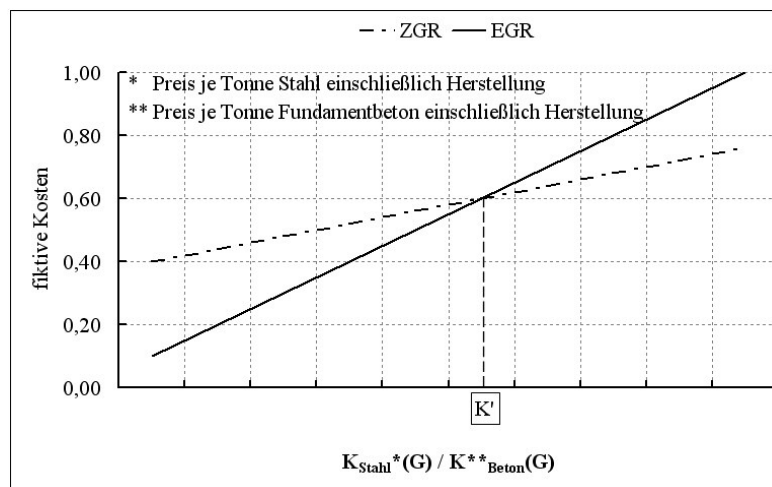


Abbildung 5.6: Einschiffiger Rahmen, Fiktiver Kostenvergleich f. unterschiedliche Fußpunktlagerung der Stiele

Der eingespannte Rahmen wird erst bei einem relativ hohem Kostenverhältnis $K_{\text{Stahl}} / K_{\text{Beton}}$ wirtschaftlicher als der Zweigelenrahmen. Dies ist zurückzuführen auf die überproportional hohen Gewichtsanteile für die Fundamente beim eingespannten Rahmen.

Daher kann der Zweigelenrahmen hinsichtlich des Materialverbrauchs für Rahmen und Fundament als wirtschaftlich im Hallenbau bezeichnet werden.

C.2 konstruktive Ausbildung der Rahmenstiele

Die typische Rahmenkonstruktion in der Praxis hat laut Umfrage [SCH00] gewalzte Stiele, einen gewalzten Riegel und Vouten im Riegel. Diese Entwurfslösung entspricht Rahmentyp RT05 und weist nach Abbildung 5.5 mit 2240 kg (260 kg Schweißprofil und 1980 kg Walzprofil) das zweithöchste Gewicht auf. Sie ist bezüglich Materialverbrauchs unwirtschaftlich. Die Entwurfslösung mit dem geringsten Gewicht (= 1370 kg) sind Rahmen aus geschweißten Profilen mit konischen Stielen und Vouten im Riegel (= RT02).

Zur Bewertung dieser Ergebnisse, die im Widerspruch zu den Resultaten der Umfrage stehen, wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse unter den Gesichtspunkten Materialverbrauch und Fertigungsaufwand vorgenommen. Hierzu wird ein fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich für die Rahmentypen RT02 und RT05 durchgeführt (Abb. 5.7). Die fiktiven Kosten für geschweißte Profile (K_S) und Walzprofile (K_W) enthalten:

K_S = Materialpreis Stahlblech + Fertigung (= Schneiden und Schweißen des Stahlblechs)

K_W = Materialpreis Walzprofil

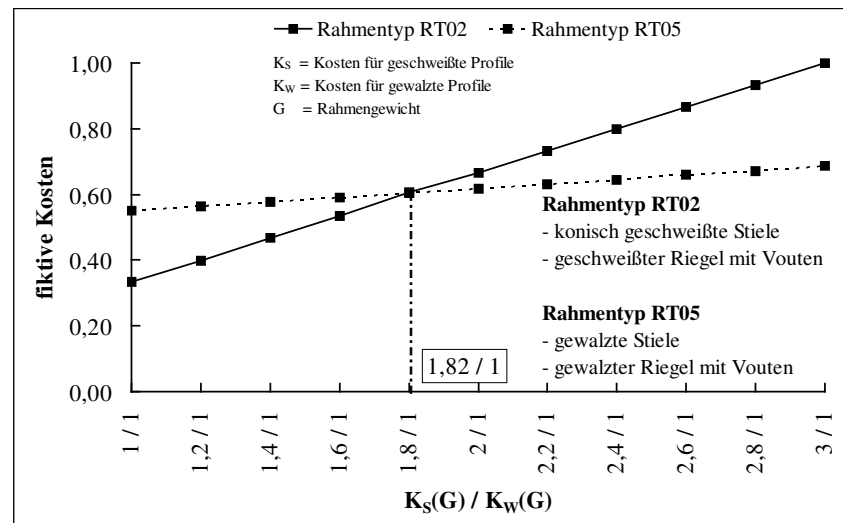


Abbildung 5.7: Einschiffiger Rahmen, Vergleich gewichtsabhängiger Kosten ausgewählter Rahmentypen

In Abbildung 5.7 sind die Verhältnisse der fiktiven Kosten $K_S(G)/K_W(G)$ für die Rahmentypen RT02 und RT05 dargestellt. Folgende Wirtschaftlichkeiten in Bezug auf die fiktiven Kosten können aus der Abbildung abgeleitet werden:

- $K_S(G)/K_W(G) < 1,82$ zu 1: Rahmentyp RT02 ist wirtschaftlich
- $K_S(G)/K_W(G) > 1,82$ zu 1: Rahmentyp RT05 ist wirtschaftlich

Oftmals entscheidet die vorhandene Fertigungstechnologie der Firma über die Wirtschaftlichkeit der Rahmentypen. Daher ist für viele Hallenhersteller der Rahmentyp RT05 mit höherem Materialverbrauch hinsichtlich der Herstellungskosten wirtschaftlicher als der Rahmentyp RT02 mit geringerem Materialverbrauch und dafür höheren Schneid- und Schweißkosten.

Bezug nehmend auf Abbildung 5.5 sind in der Abbildung 5.8 die normierten Gewichte für einen Zweigelenrahmen mit unterschiedlicher konstruktiver Ausbildung der Rahmenstiele und Riegel gegenübergestellt.

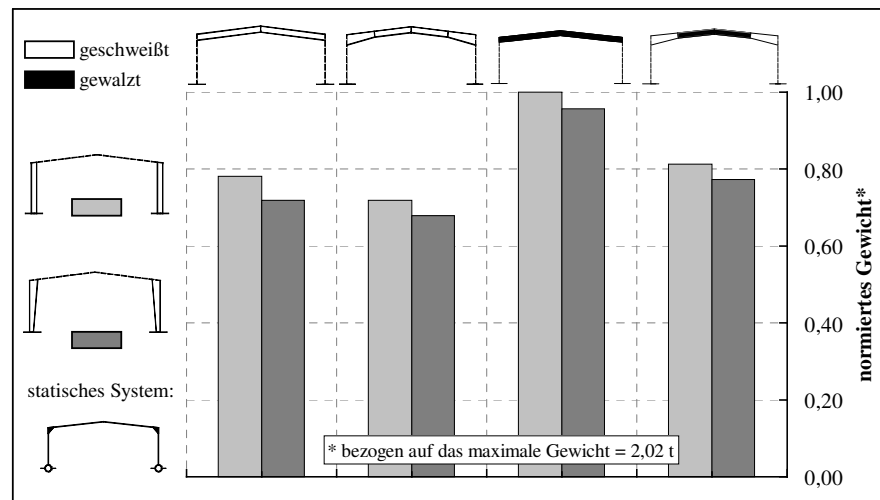


Abbildung 5.8: Einschiffiger Rahmen, Gewichtsvergleich von Rahmen mit unterschiedlicher Ausbildung der Rahmenstiele und Riegel

Unabhängig von der Verwendung von Walz- oder Schweißprofilen für den Riegel ist das Gewicht parallelgurtig geschweißter Rahmenstiele nur geringfügig höher als das Gewicht von Rahmen mit konisch geschweißten Stielen. Folglich kann auf die erfahrungsgemäß kostenintensive Herstellung konisch geschweißter Stiele verzichtet werden, da die erzielte Materialeinsparung nur gering ausfällt.

C.3 Stahlsorte

Für einschiffige Hallen bis zu einer Spannweite von 30 m verwendet eine Vielzahl der Stahllhallenhersteller in Deutschland die kostengünstigere Stahlsorte S235 (Umfrageergebnis in Abschnitt 2.4.2.2.1, Abb. 2.18).

Dabei liegen die Materialkosten des S235 nur ca. 10 % unter den Materialkosten des hochwertigen S355.

In Abbildung 5.9 sind die erforderlichen Stahlmengen für die analysierten Rahmentypen in Abhängigkeit der Stahlsorten S235 bzw. S355 dargestellt. Die Rahmen aus S235 haben bis zu 17 % mehr Gewicht als die Rahmen aus S355 (\Rightarrow RT11).

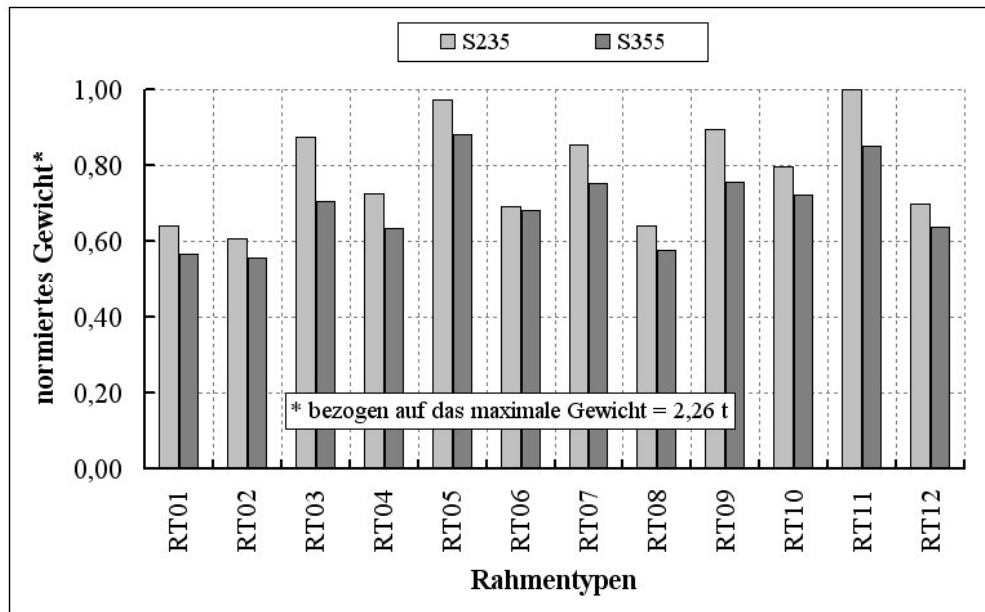


Abbildung 5.9: Einschiffiger Rahmen, Vergleich der Ergebnisse für die Stahlsorten S235 und S355

Für die Rahmentypen RT02 (1370 kg) und RT05 (2240 kg) wird ein fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich (Abb. 5.10 und 5.11) durchgeführt, um zu ermitteln, ab welchem Kostenverhältnis S355 zu S235 die Verwendung von S235 kostengünstiger ist als der Einsatz von S355.

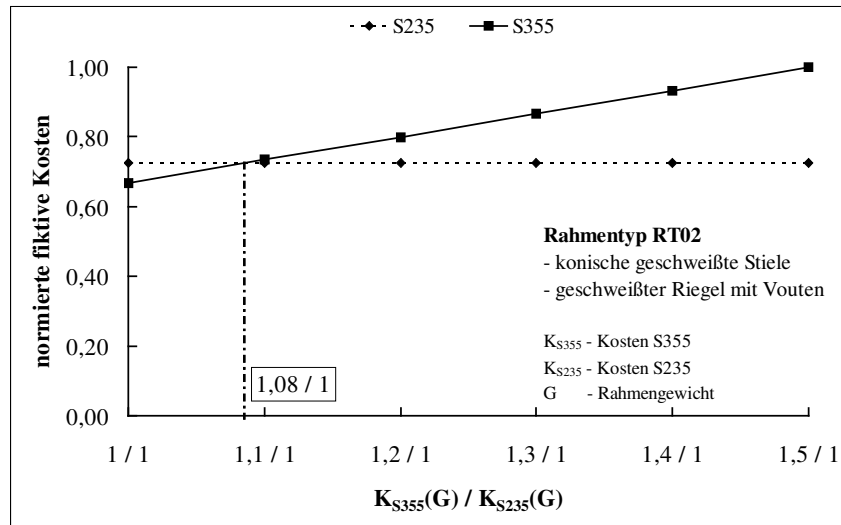


Abbildung 5.10: Einschiffiger Rahmen, fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich zwischen Stahlsorte S235 und S355 für Rahmentyp RT02

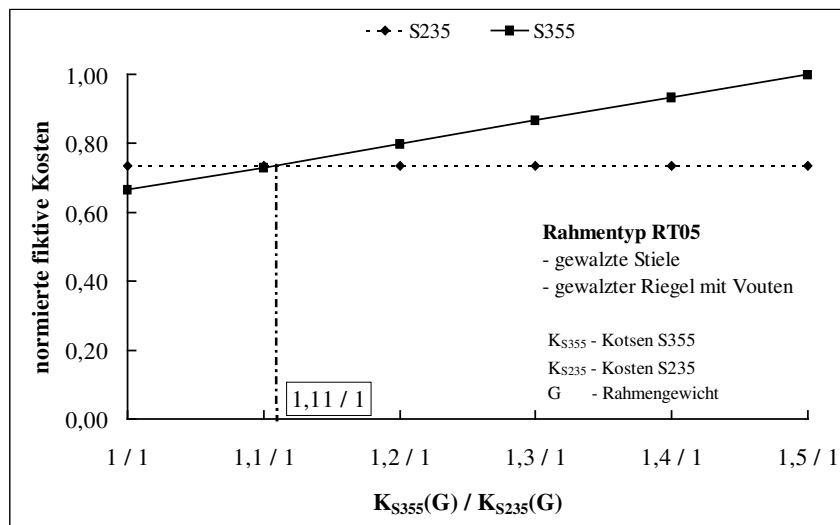


Abbildung 5.11: Einschiffiger Rahmen, fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich zwischen Stahlsorte S235 und S355 für Rahmentyp RT05

Der fiktive Kostenvergleich ergibt für die untersuchten Rahmentypen folgendes Resultat:

- Rahmentyp RT02 (Abb. 5.10)
 - $K_{S355}(G) / K_{S235}(G) < 1,08 / 1$ S355 kostengünstiger
 - $K_{S355}(G) / K_{S235}(G) > 1,08 / 1$ S235 kostengünstiger
- Rahmentyp RT05 (Abb. 5.11)
 - $K_{S355}(G) / K_{S235}(G) < 1,11 / 1$ S355 kostengünstiger
 - $K_{S355}(G) / K_{S235}(G) > 1,11 / 1$ S235 kostengünstiger

Die Entwurfslösungen der Rahmentypen RT02 und RT05 zeigen, dass bis zu einem Kostenverhältnis $K_{S355}(G)/K_{S235}(G)$ von ca. 1,1/1 Rahmen aus S355 hinsichtlich der Fertigungskosten wirtschaftlicher sind als Rahmen aus S235.

In der Entwurfspraxis hängt die Festlegung der Stahlsorte für die Rahmen in der Regel von den aktuellen Stahlpreisen ab.

D Schlussfolgerungen

In Abbildung 5.12 werden die Entwurfslösungen für die nachstehenden analysierten Entwurfsgößen verglichen:

- Fußpunktausbildung der Rahmenstiele
- konstruktive Ausbildung der Stiele
- Stahlsorte.



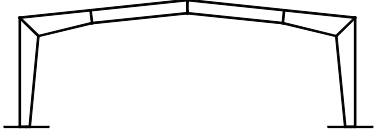
analysierte EntwurfsgroÙe	traditionelle Entwurfsstrategien ⇒ bevorzugte Entwurfslösungen nach Umfrageergebnis [SCH00]	optimierungsbasierte Entwurfsstrategie ⇒ bevorzugte Entwurfslösungen für einen einschiffigen Rahmen (SB = 18m) bestimmt mit dem robusten Evolutionärem Algorithmus EA-II (Abb. 4.28)
statisches System	 SB = 15 - 30 m (Abb. 2.13): ca. 87 %	RT02: bis $K_{\text{Stahl}} / K_{\text{Beton}} = 126 / 1 \Rightarrow \text{ZGR}$ RT05: bis $K_{\text{Stahl}} / K_{\text{Beton}} = 50 / 1 \Rightarrow \text{ZGR}$
konstruktive Ausbildung der Rahmenstiele	 Rahmen aus: <ul style="list-style-type: none"> - gewalzten Stielen (Abb. 2.14) und - gewalztem Riegel mit Vouten (Abb. 2.15) 	 Rahmen aus (Abb. 5.5): <ul style="list-style-type: none"> - konisch geschweißten Stielen und - geschweißten Riegel mit Vouten
Stahlsorte	SB = 15 - 30 m (Abb. 2.18) S235 - 78 % S355 - 22 %	RT02 (Abb. 5.10): bis $K_{S355} / K_{S235} = 1/1,11 \Rightarrow \text{S355}$ RT05 (Abb. 5.11): bis $K_{S355} / K_{S235} = 1/1,08 \Rightarrow \text{S355}$

Abbildung 5.12: Einschiffiger Rahmen, Gegenüberstellung der Entwurfslösungen erzielt mit traditioneller bzw. optimierungsbasierter Entwurfsstrategie

Anhand dieser Entwurfslösungen lassen sich folgende Aussagen über die Wirtschaftlichkeit (Materialverbrauch und fiktiver Kostenvergleich) typischer einschiffiger Rahmenkonstruktion in der Praxis ableiten:

- Die mit der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie (Evolutionärer Algorithmus EA-II als Optimierungsverfahren) bestimmten Entwurfslösungen bestätigen die Wirtschaftlichkeit von Zweigelenrahmen bezüglich Materialverbrauch und zugehörigen Fundamentabmessungen für einschiffige Rahmen.
- Der Rahmen aus konisch geschweißten Stielen und geschweißtem Riegel mit Vouten ist aus materialwirtschaftlicher Sicht die günstigste Entwurfslösung. Auf die Ausbildung der konisch geschweißten Stiele kann meist verzichtet werden, da die Materialeinsparung gegenüber parallelgurtig geschweißten Stielen nur gering ist.

Im Gegensatz zu dieser Entwurfslösung greifen viele Stahlhallenhersteller in der Baupraxis auf die materialintensive Rahmenvariante aus gewalzten Stielen und gewalztem Riegel mit Vouten zurück, da der Fertigungsaufwand zur Herstellung von Rahmen aus geschweißten Profilen von der zur Verfügung stehenden Fertigungstechnologie abhängig ist. Ein weiterer Grund dürfte in der Praxis die Einsparung an Bauzeit sein.

- Das Preisniveau zwischen S235 und S355 weicht in der Regel 10 % voneinander ab, so dass unter Verwendung der Stahlsorte S355, trotz des höheren Preises, kostengünstigere Rahmen aufgrund der möglichen Materialeinsparung hergestellt werden können.

Für Entwurfslösungen in der Baupraxis wird vorwiegend der kostengünstige S235 verwendet.

5.2.2.1.2 Vergleich von Evolutionären Algorithmus und hybriden Evolutionären Algorithmus mit adaptivem Wachstumsansatz

In der Tabelle 5.1 sind die mittels EA-II bzw. hEA-II erzielten Entwurfslösungen mit Angaben über ihr Eigengewicht und die erforderliche Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösung gegenübergestellt.

Unter Verwendung des hybriden Evolutionären Algorithmus mit adaptivem Wachstumsansatz und den definierten Teilprozesses (Satz II) in Tabelle 4.15 (= hEA-II) wird eine Materialeinsparung von ca. 5 % pro Rahmen erreicht. Zur Bestimmung dieser materialwirtschaftlichen Entwurfslösung verdoppelt sich nahezu die erforderliche Rechenzeit. Ungeachtet der hohen Rechenzeiten wird eine Materialeinsparung erreicht, die für die Herstellung einer großen Anzahl von Rahmen, z.B. für typisierte Hallen, lohnenswert ist.

Für die Anwendung des Evolutionären Algorithmus EA-II bzw. des hybriden Evolutionären Algorithmus hEA-II mit adaptivem Wachstumsansatz in der Entwurfspraxis bedeutet dieses Resultat abzuwägen und zu entscheiden, inwieweit sich die hohen Rechenzeiten lohnen mit der Perspektive, eine wirtschaftliche Entwurfslösung zu ermitteln.

Tabelle 5.1: Einschiffiger Rahmen, Entwurfslösungen ermittelt mit Evolutionären Algorithmus (EA-II) bzw. hybriden Evolutionären Algorithmus (hEA-II)

	optimierungsbasierte Entwurfsstrategie mit	
	Evolutionärer Algorithmus EA-II (Tab. 4.15)	hybrider Evolutionärer Algorithmus hEA-II (Tab. 4.15)
Gewicht	1,37 t	1,30 t
Rechenzeit	2 h 20 min	4 h 14 min

Die Rechenzeiten für Synthese- und Analyseprozess zur Bestimmung der Entwurfslösung des einschiffigen Rahmens aus geschweißten Profilen mit konischen Stielen und Vouten im Riegel (= RT02) sind in Abbildung 5.13 gegenübergestellt.

Im Syntheseprozess erfolgt die Festlegung von Entwurfslösungen durch Variation der variablen Entwurfsgrößen. Im Analyseprozess werden Größen bereitgestellt, die zur Bewertung der Entwurfslösungen erforderlich sind. Dies sind beispielsweise mittels Systemanalyse bestimmte Kenngrößen, wie Spannungen und Verformungen. Die Rechenzeit für den Analyseprozess beträgt nahezu das 2000- fache der Rechenzeit für den Syntheseprozess.

Aufgrund der hohen Rechenzeiten werden Untersuchungen zur Parallelisierung des Analyseprozesses durchgeführt.

Der Analyseprozess wird auf zwei, vier bzw. acht Prozessoren verteilt. Anhand der benötigten Rechenzeiten sind Aussagen möglich, inwieweit durch eine Parallelisierung die erforderlichen Rechenzeiten reduziert werden können.

Die Untersuchungen erfolgen am einschiffigen Rahmen aus geschweißten Profilen mit konischen Stielen und Vouten im Riegel.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.13 zeigen, dass durch die Parallelisierung, d.h. die Verteilung des Analyseprozesses auf mehrere Prozessoren, eine enorme Verkürzung der Rechenzeit erreicht wird.

Durch die Verteilung des Analyseprozesses auf acht Prozessoren (= Parallelisierung) reduziert sich die Rechenzeit auf ca. ein Drittel gegenüber der Ausführung des Analyseprozesses auf einem Prozessor (keine Parallelisierung):

- 1 Prozessor: 2 h 20 min (= 8334 s)
- 8 Prozessoren: 53 min (=3185 s).

Gegenwärtig können keine Angaben getroffen werden, welchen qualitativen Einfluss eine Parallelisierung des Analyseprozesses innerhalb hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptiven Wachstumsansatz auf die benötigte Rechenzeit ausübt, da zur Zeit, die Voraussetzungen zur Implementierung in Slang noch nicht gegeben sind. Es ist jedoch anzunehmen, dass auch hier durch eine Parallelisierung des Analyseprozesses enorme Zeiteinsparungen erreicht werden können.

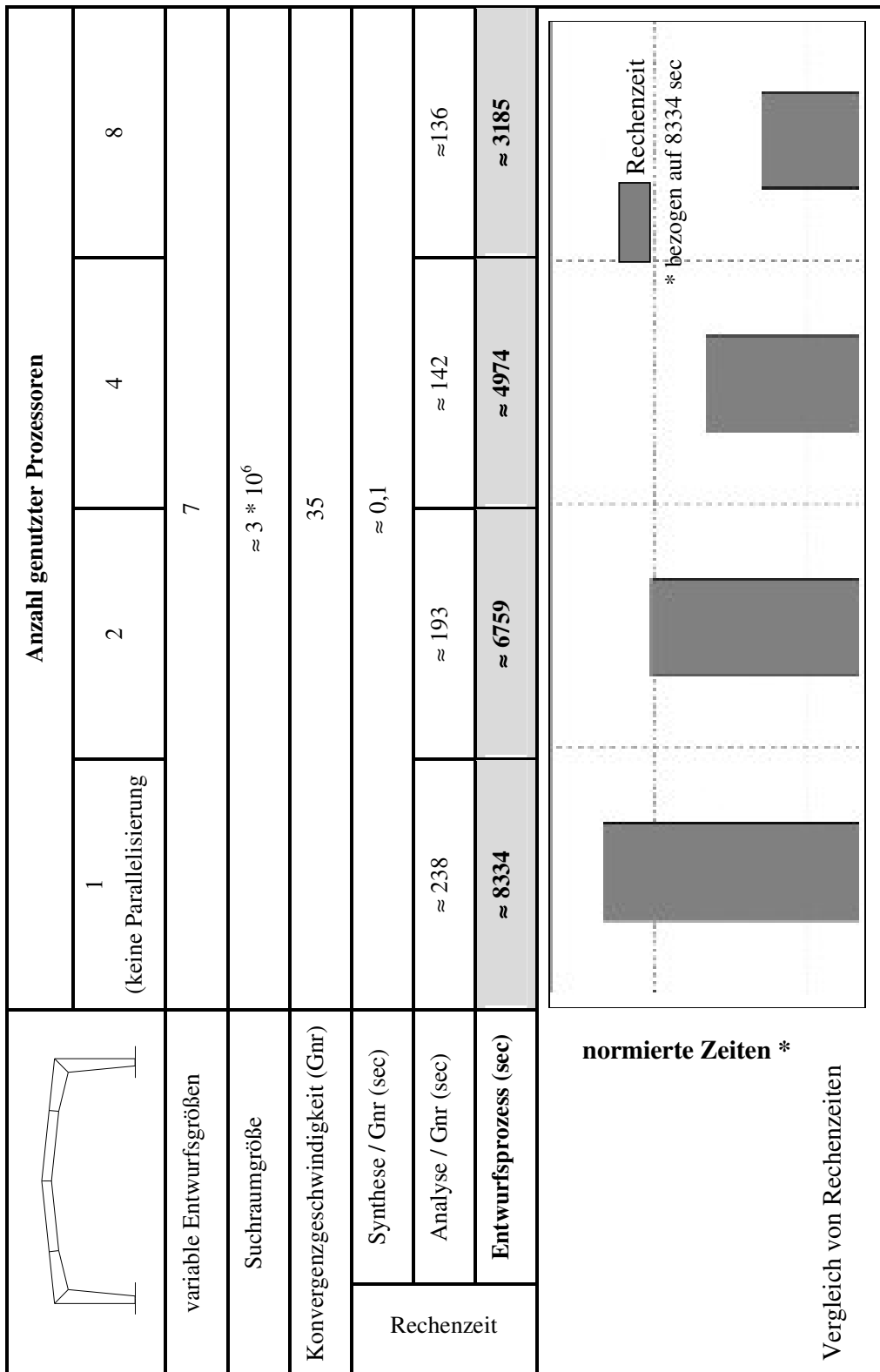


Abbildung 5.13: Einschiffiger Rahmen, Parallelisierung des Analyseprozesses

5.2.2.2 Zweischiffiger Rahmen

A Entwurfsaufgabe

Wesentlich komplexer ist der Entwurf des zweischiffigen Rahmens in Abbildung 5.14. Zu den Entwurfsvariablen des untersuchten einschiffigen Rahmens in Abschnitt 5.2.2.1 kommen weitere hinzu, wie zum Beispiel der Profiltyp der Innenstütze sowie deren Querschnittsabmessungen und die Lagerungs- und Kopplungsbedingungen.

Der untersuchte zweischiffige Rahmen basiert auf einem realisierten Projekt einer deutschen Stahlbaufirma. Das praktische Entwurfsergebnis, erlangt mit traditioneller Entwurfsstrategie durch Variantenuntersuchung, ist ein zweischiffiger Rahmen mit den Lagerungs- und Kopplungsbedingungen, die im statischen System S-I in Abbildung 5.14 umgesetzt sind. Der Rahmen besteht aus einem gewalzten Innenstiel und gewalzten Riegeln sowie konisch geschweißten Aussenstielen und geschweißten Vouten im Riegel. Das Eigengewicht dieser Rahmenkonstruktion beträgt 4065 kg und dient als Referenzlösung.

Mit dem Entwurf des zweischiffigen Rahmens sind Aussagen zu treffen über:

- Einfluss unterschiedlicher Lagerungs- und Kopplungsbedingungen auf das Entwurfsziel
- Vergleich der Entwurfsqualitäten von Rahmen mit parallelgurtigen und konischen Aussenstielen.

- Entwurfsziel

Ökonomie: Gewichtsminimum

- variable Entwurfsgrößen

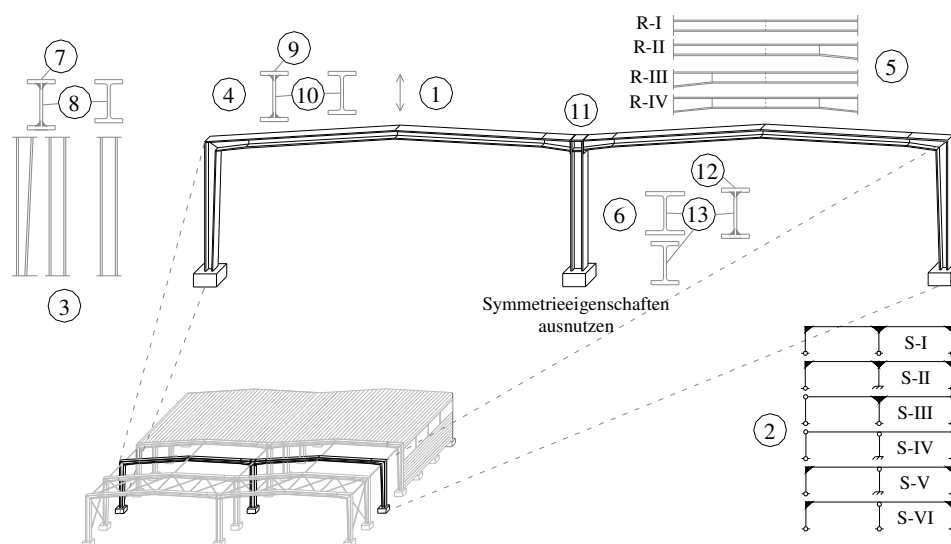


Abbildung 5.14: Zweischiffiger Rahmen, System

- Form: 1 - z - Koordinate des Firstknotens (mm)
- Konstruktion: 2 - Lagerungs- und Kopplungsbedingungen
(Modellierung in den statischen Systemen S-I bis S-VI)
3 - Querschnittsverlauf und Profiltyp der Aussenstiele
4 - Profiltyp der Riegel
5 - Ausbildung von Vouten in den Riegeln
6 - Profiltyp des Innenstiels
- Geometrie: 7 - Gurtabmessungen der Aussenstiele (mm)
8 - Stegabmessungen der Aussenstiele (mm)
9 - Gurtabmessungen der Riegel (mm)
10 - Stegabmessungen der Riegel (mm)
11 - Stegabmessungen über dem Innenstiel (mm)
12 - Gurtabmessungen des Innenstiels (mm)
13 - Stegabmessungen des Innenstiels (mm)

- konstante Entwurfsgrößen

Standort: Die charakteristischen Werte der standortbedingten Einwirkungen Wind und Schnee zeigt die Abbildung 5.15.

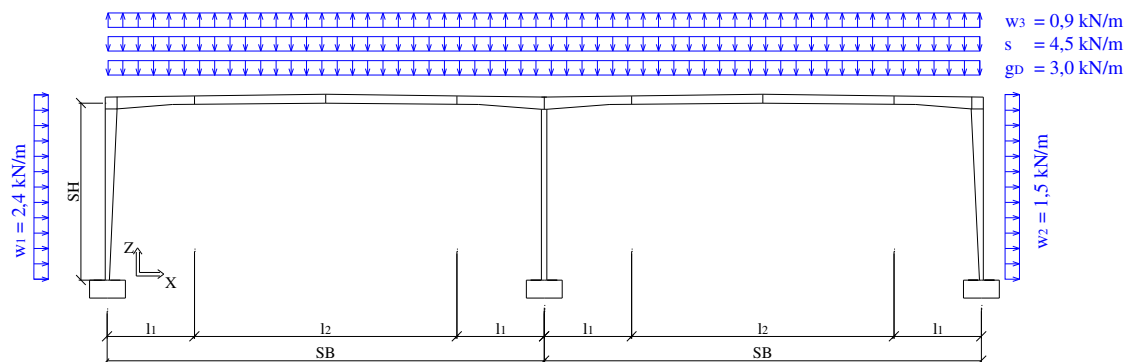


Abbildung 5.15: Zweischiffiger Rahmen, Einwirkungen

- Material: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$
 $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{R,d} = 218 \text{ N/mm}^2$
 $\lambda_a = 92,9$
 $k_c = 1,0$

$$u_{\text{grenz}(x)} = 53 \text{ mm}$$

$$u_{\text{grenz}(z)} = 67 \text{ mm}$$

Konstruktion: $g_D = 3,0 \text{ kN/m}$
(Eigengewicht der Dachkonstruktion – charakteristischer Wert)

Geometrie: $SB = 20000 \text{ mm}$
 $SH = 7900 \text{ mm}$
 $l_1 = 4000 \text{ mm}$
 $l_2 = 12000 \text{ mm}$
 $h_{FP} = 250 \text{ mm}$
 $c = 2000 \text{ mm}$

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: Nachweis der:

- Tragsicherheit
(Grenzspannungsnachweis, Stabilitätssicherheiten Biegeknicken, Biegedrillknicken und Beulen)
- Gebrauchstauglichkeit
(Nachweis bezüglich der Verformungen)

Die Stabilitätssicherheiten Biegeknicken, Biegedrillknicken und Beulen werden analog dem Entwurfsobjekt einschiffiger Rahmen in Abschnitt 5.2.2.1 erfasst.

B Optimierungsaufgabe

Aus der Entwurfsaufgabe wird eine Optimierungsaufgabe mit 13 Optimierungsvariablen (Gl. VII-1) und 19 Optimierungskonstanten formuliert (Gl. VII-2). Die Gleichungen VII-3 bis VII-15 umfassen Zielfunktion, modifizierte Zielfunktion, Nebenbedingungen und Fitnessfunktion (Anlage VII).

C Ergebnisse

Für den Entwurf des zweischiffigen Rahmens wird mit dem Evolutionären Algorithmus EA-II in Abbildung 4.28 bei gleicher konstruktiver Ausbildung des Rahmens gegenüber der Ausgangslösung der Praxis, ermittelt durch Variantenuntersuchung, eine Materialeinsparung von 17 % erreicht (Abb. 5.16).

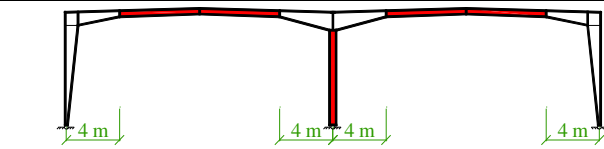
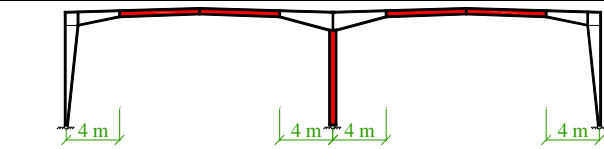


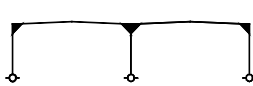
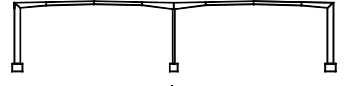
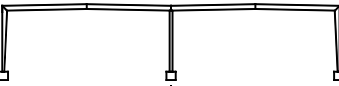
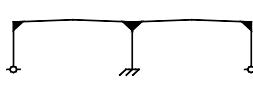
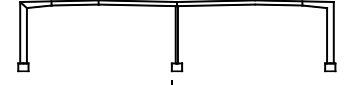
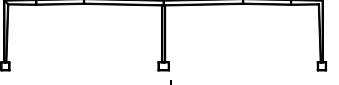
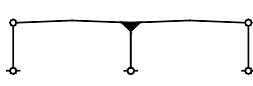
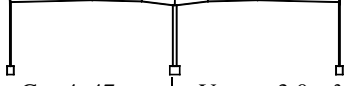
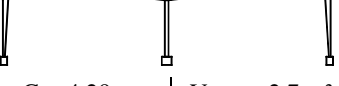
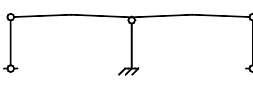
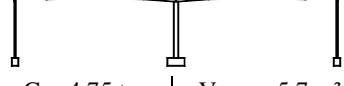
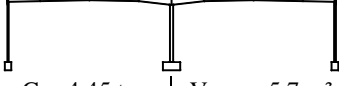
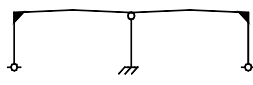
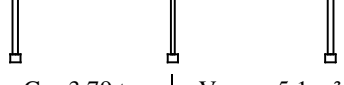
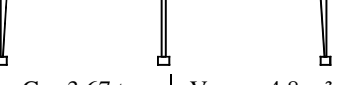
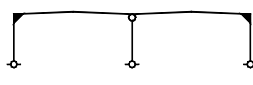
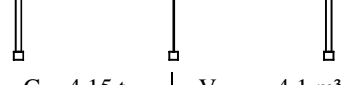
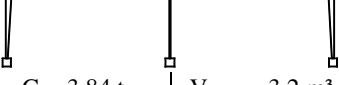
traditionelle Entwurfsstrategie ⇒ mittels Variantenuntersuchung konzipierte Entwurfslösung eines Stahlhallenherstellers	optimierungsbasierte Entwurfsstrategie ⇒ Entwurfslösung mit Evolutionärem Algorithmus EA-II (Abb. 4.28)
	
4065 kg	3470 kg
 geschweißte Profile	 gewalzte Profile

Abbildung 5.16: Zweischiffiger Rahmen, Vergleich von Ausgangslösung und erzielter Entwurfslösung

Analog zum einschiffigen Rahmen wird der Einfluss der konstruktiven Ausbildung geschweißter Aussenstiele (konisch bzw. parallelgurtig) auf das Eigengewicht der Entwurfslösung untersucht.

Hierzu werden vollständig geschweißte Rahmen mit unterschiedlichen Lagerungs- und Koppelungsbedingungen, die in den statischen Systemen S-I bis S-VI umgesetzt sind, durchgeführt. In der Tabelle 5.2 sind die ermittelten Entwurfslösungen mit den zugehörigen Ergebnissen für Rahmengewicht und Fundamentvolumen gegenübergestellt.

Tabelle 5.2: Zweischiffiger Rahmen, Vergleich von Entwurfslösungen mit parallelgurtigen bzw. konisch geschweißten Aussenstielen

statisches System		parallelgurtige Aussenstiele		konische Aussenstiele	
S-I			$G = 3,45 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 4,4 \text{ m}^3$		$G = 3,42 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 3,6 \text{ m}^3$
S-II			$G = 3,85 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 4,8 \text{ m}^3$		$G = 3,41 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 3,7 \text{ m}^3$
S-III			$G = 4,47 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 3,0 \text{ m}^3$		$G = 4,29 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 2,7 \text{ m}^3$
S-IV			$G = 4,75 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 5,7 \text{ m}^3$		$G = 4,45 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 5,7 \text{ m}^3$
S-V			$G = 3,79 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 5,1 \text{ m}^3$		$G = 3,67 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 4,8 \text{ m}^3$
S-VI			$G = 4,15 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 4,1 \text{ m}^3$		$G = 3,84 \text{ t}$ $V_{\text{Fund}} = 3,2 \text{ m}^3$

In Hinsicht auf den Stahlverbrauch hat der zweischiffige Rahmen mit den Lagerungs- und Kopplungsbedingungen im statischen System S-I das geringste Eigengewicht (Abb. 5.17). Diese Lagerungs- und Kopplungsbedingungen entsprechen dem statischen System der praktischen Entwurflösung.

Das geringste Fundamentvolumen haben die Rahmen mit den Lagerungs- und Kopplungsbedingungen im statischen System S-III.

Unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit dem Evolutionären Algorithmus in Abbildung 4.28 als Optimierungsverfahren wird für Rahmen mit konisch geschweißten Aussenstielen eine Materialeinsparung von maximal 6 % gegenüber Rahmen mit parallelgurtigen Aussenstielen erreicht, d.h. die Gewichtsunterschiede sind verhältnismäßig gering. Für den Ingenieur in der Praxis bedeutet dieses Resultat, analog zu Abschnitt 5.2.2.1, dass die Kosten für die oftmals aufwändige Herstellung konisch geschweißter Stiele entfallen können.

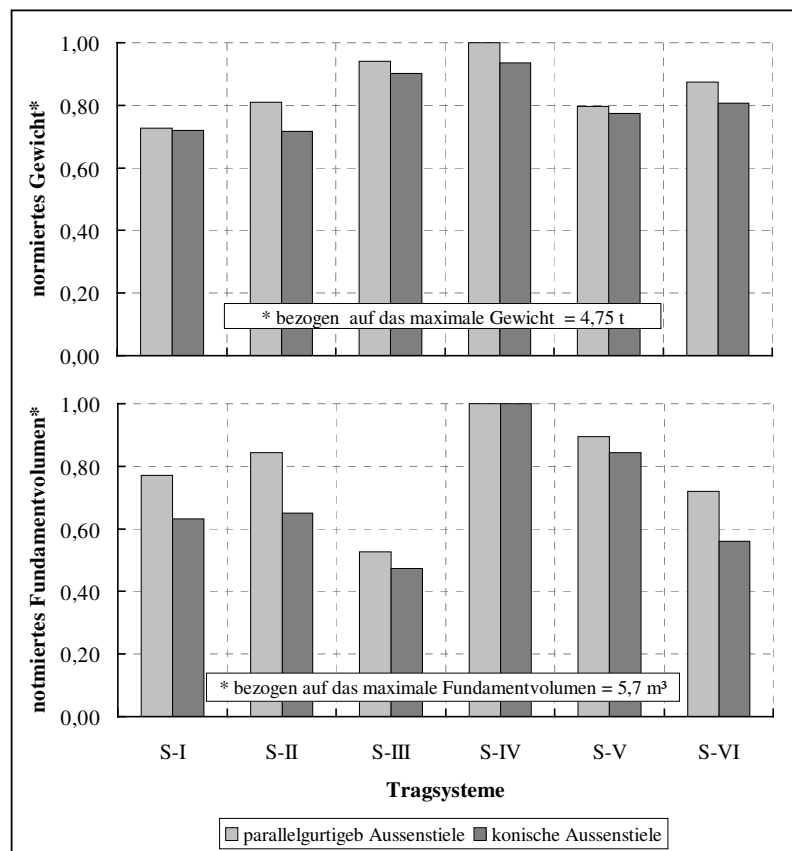


Abbildung 5.17: Zweischiffiger Rahmen, Rahmengewicht und Fundamentvolumen der Entwurflösungen

5.2.3 Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle mit tragender Funktion

A Entwurfsaufgabe

Anhand dieser Entwurfsaufgabe wird untersucht, welchen materialwirtschaftlichen Einfluss die konstruktive Ausbildung der Pfetten und das Eigengewicht der Dachkonstruktion auf den Achsabstand haben. Dabei sind gegenüber dem Entwurf des Elementes einschiffiger Rahmen in Abschnitt 5.2.2.1 als weitere variable Entwurfsgrößen zu berücksichtigen:

- Profiltyp der Pfetten
- Eigengewicht der Dachkonstruktion
- Querschnittsprofil der Pfetten
- Achsabstand der Rahmen.

Das Tragwerk der einschiffigen Halle in Abbildung 5.18 besteht aus Rahmen (= Bauteile mit primärer Tragfunktion) und Pfetten (= Bauteile mit sekundärer Tragfunktion). Für die Pfetten werden heutzutage in der Praxis vorzugsweise kaltgewalzte Profile (C-, Z- bzw. Σ -Profile) verwendet. Jedoch setzt die Bemessung von Pfetten aus kaltgewalzten Profilen die Berücksichtigung der Dachkonstruktion voraus. Daher werden zur Vereinfachung der Entwurfsaufgabe folgende warmgewalzte Profile für die konstruktive Ausbildung der Pfetten eingesetzt:

- IPE-Profil
- U-Profil.

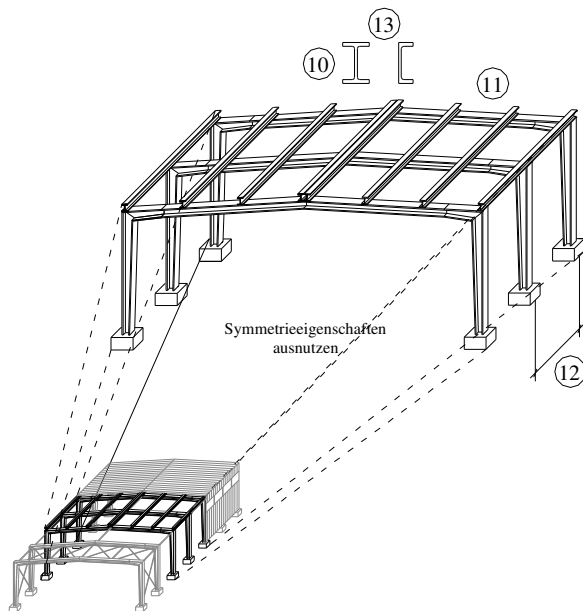
Zur Eingrenzung der Suchraumgröße werden folgende variable Entwurfsgrößen mit konstanten Festlegungen belegt:

- z-Koordinate des Firstknotens
- Lagerungsart der Rahmenstiele
- Querschnittsverlauf und Profiltyp der Stiele
- Profiltyp des Riegels
- Ausbildung von Vouten im Riegel.

Die konstruktive Eingrenzung für den Rahmen entspricht dem Rahmentyp RT02 in Abbildung 5.4 mit gelenkiger Lagerung der Rahmenstiele (statisches System - Zweigelenkrahmen) und einer Firsthöhe SH_F von 7700 mm. Die Dachkonstruktion hat ein Eigengewicht von 0,12 kN/m².

- Entwurfsziel
Ökonomie: Gewichtsminimum

- variable Entwurfsgrößen



1 bis 9 (Abb. 4.19)

Konstruktion:

10 - Profiltyp der Pfetten

11 - Eigengewicht der Dachkonstruktion

Geometrie:

12 - Achsabstand der Rahmen (mm)

13 - Profilgröße der Pfetten

Abbildung 5.18: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, System mit variablen Entwurfsgrößen

- konstante Entwurfsgrößen

Standort: Die charakteristischen Werte infolge der standortbedingten Einwirkungen Wind und Schnee sind:

$$s = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

$$w_1 = 0,4 \text{ kN/m}^2$$

$$w_2 = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

$$w_3 = 0,15 \text{ kN/m}^2$$

Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
(Knotenlagen, Elementzuordnungen)

Material: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

$$\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$$

$$f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{R,d} = 218 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_a = 92,9$$

$$k_c = 1,0$$

$$u_{\text{grenz}(x)} = 40 \text{ mm}$$

$$u_{\text{grenz}(z)} = 60 \text{ mm}$$

$$u_{\text{grenz}(z)}^p = AA / 250 \text{ mm}$$

Konstruktion: $g_D = 0,12 \text{ kN/m}^2$
(Eigengewicht der Dachkonstruktion – charakteristische Werte)

Geometrie: SB = 18000 mm
 SH_T = 6000 mm
 SL = 50000 mm
 l₁ = 2250 mm
 l₂ = 13500 mm
 h_{FP} = 250 mm
 x_{Pfette} = 1500 mm
 c = 2000 mm (Stiele)

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: Nachweis der:

- Tragsicherheit für Rahmen und Pfetten
(Grenzspannungsnachweis, Stabilitätssicherheiten Biegeknicken in der Ebene, Biegedrillknicken und Beulen für Rahmen und Pfetten sowie für die Rahmen Biegeknicken senkrecht zur Rahmenebene)
- Gebrauchstauglichkeit für Rahmen und Pfetten
(Nachweis bezüglich der Verformungen)

Zu den Stabilitätssicherheiten gelten die Annahmen zum Element einschiffiger Rahmen in Abschnitt 5.2.2.1.

B Optimierungsaufgabe

Die Entwurfsaufgabe wird in Anlage VIII als eine allgemeine Optimierungsaufgabe mit Optimierungsvariablenvektor (Gl. VIII-1), Optimierungskonstantenvektor (Gl. VIII-2), Zielfunktion (Gl. VIII-3 bis VIII-6) und den Nebenbedingungen (Gl. VIII-7 bis VIII-13) formuliert. Strafterm, modifizierte Zielfunktion und Fitness werden nach den Gleichungen VIII-14 bis VIII-16 ermittelt.

C Ergebnisse

In Abbildung 5.19 sind die Gewichtsanteile für Rahmen und Pfetten in Abhängigkeit der untersuchten Pfettenprofile (IPE- und U-Profil) für unterschiedliche Achsabstände dargestellt.

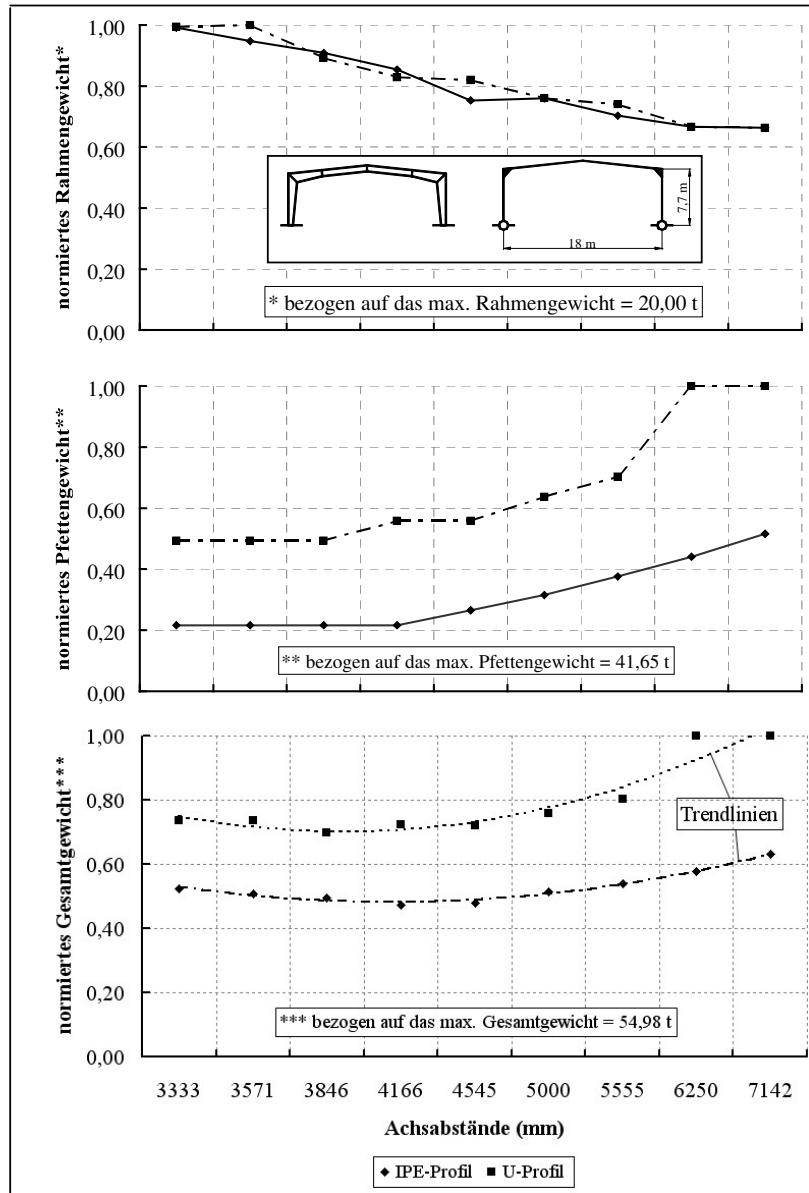


Abbildung 5.19: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, Gewichtsanteile des Tragwerkes in Abhängigkeit untersuchter Pfettenprofile für unterschiedliche Achsabstände

Mit Zunahme des Achsabstandes lassen sich folgende Tendenzen für Rahmen- bzw. Pfettengewicht ableiten:

- Gewichtsabnahme für Rahmen
- Gewichtszunahme für Pfetten.

Gegenüber dem gebräuchlichen Achsabstand in der Praxis, der laut Umfrageauswertung in Abschnitt 2.4 (Abb. 2.19) üblicherweise bei 5 bis 7 m liegt, betragen die wirtschaftlichen Achsabstände für die untersuchte einschiffige Halle mit Pfetten aus warmgewalzten U- bzw. IPE-Profilen 3,8 bzw. 4,1 m (Tab.5.3). Dabei werden die Achsabstände in der Entwurfspraxis üblicherweise durch technologische und firmenphilosophische Gründe festgelegt. Um diesen Unterschied zwischen den herkömmlichen Achsabständen in der Praxis und den ermittelten

Achsabständen bewerten zu können, werden im Weiteren die Kosten für die ermittelten Tragwerke (Rahmen Pfetten aus IPE-Profilen und Rahmen mit Pfetten aus U-Profilen) berechnet.

Tabelle 5.3: Teilsystem Tragwerk einschiffige, Halle Gegenüberstellung von Praxisausführung und ermittelten Untersuchungsergebnis

traditionelle Entwurfsstrategie	optimierungsbasierte Entwurfsstrategie	
⇒ Entwurfslösung nach Umfrageergebnis [SCH00]	⇒ Entwurfslösung mit Evolutionärem Algorithmus EA-II (Abb. 4.28)	
übliche Achsabstände in der Baupraxis:	wirtschaftliche Achsabstände für Pfetten aus:	
zwischen 5 m und 7 m	U - Profilen	IPE - Profilen
	3,8 m	4,1 m

Auf der Basis folgender Preise für Material, Montage und Fertigung des Tragwerkes wird der Einfluss auf den wirtschaftlichen Achsabstand untersucht:

- Material pro Tonne Stahl - 460 €
- Montage pro Tonne Stahl - 280 €
- Fertigung pro Rahmen - 1150 €

Diese Preise basieren auf den Angaben eines renommierten Stahlhallenherstellers. Die Fertigung der Rahmen enthält dabei Einheitspreise für:

- die Fertigung der konisch geschweißten Rahmenstiele
- die Fertigung der Vouten
- die Herstellung der gelenkigen Fußpunktlagerungen
- die Herstellung der biegesteifen Anschlüsse.

In Abbildung 5.20 sind die Kosten dargestellt.

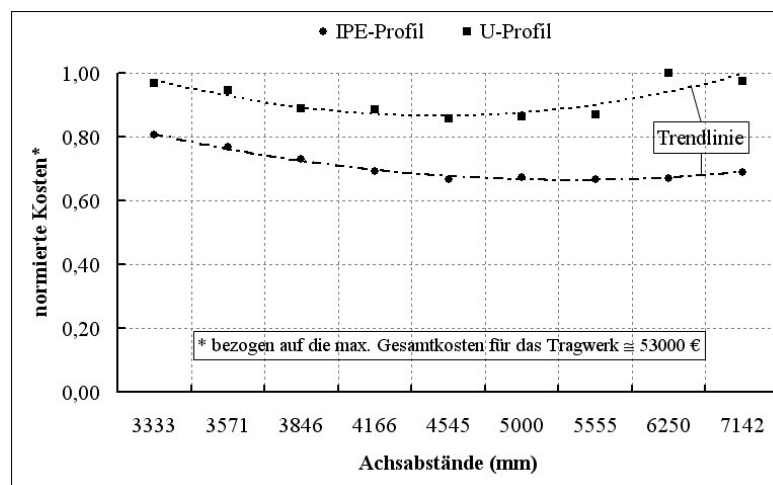


Abbildung 5.20: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, Fiktiver Kostenvergleich


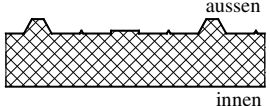
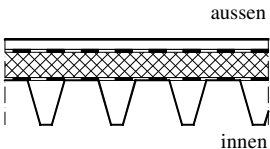
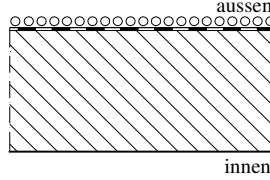
Der wirtschaftliche Achsabstand verändert sich abhängig von den Kosten (Abb. 5.20) bzw. dem Gesamtgewicht des Tragwerkes (Abb. 5.19) wie folgt:

- Tragwerk mit Pfetten aus IPE-Profil - von 4,1 m auf 5,6 m
- Tragwerk mit Pfetten aus U-Profil - von 3,8 m auf 4,5 m

Mit diesem Resultat wird die Aussage bestätigt, dass die Achsabstände in der Praxis vorwiegend durch technologische und firmenphilosophische Gründe bestimmt werden, die sich vor allem in den Fertigungskosten widerspiegeln.

Nachfolgend wird der Einfluss unterschiedlicher Dachsysteme auf das Eigengewicht des Tragwerkes (Rahmen bzw. Rahmen und Pfetten) analysiert. Die Dachsysteme sind unterteilt in leicht, mittelschwer und schwer. In Tabelle 5.4 sind die Dachsysteme mit Angaben zur Unterkonstruktion (Sekundärtragelement), zum Eigengewicht und zum Aufbau dargestellt.

Tabelle 5.4: Teilsystem Tragwerk einschiffiger Rahmen, Dachsysteme

	mit Pfetten	ohne Pfetten	Eigengewicht g_D (kN/m ²)	Dachaufbau		
				Schichten	s_i (m)	g_D (kN/m ²)
 <p>leichtes Dachsystem</p>	+	-	0,12	1 Stahlblech, verzinkt	0,0006	0,05
				2 PUR-Hartschaum	0,0600	0,018
				3 Stahlblech, verzinkt	0,0004 5	0,05
 <p>mittelschweres Dachsystem</p>	-	+	0,40	1 Dachaußenschale 35/207 (0,75)	0,035	0,073
				2 Polyethylen-Bahn	0,003	0,036
				3 PUR-Hartschaumplatten	0,10	0,03
				4 Dampfsperre (Folie)	0,003	0,02
				5 Stahltrapezprofile 160/250 (1,50)	0,158	0,24
 <p>schweres Dachsystem</p>	-	+	2,34	1 Schutzschicht (Kies)	0,05	0,9
				2 Polypropylenflies	0,0003	-
				3 Bitumendachbahnen (DIN52128)	0,01	0,04
				4 Porenbetondachplatten (GB 3,3/0,6)	0,2	1,40

Die wirtschaftlichen Achsabstände hinsichtlich des Materialverbrauchs für die Tragkonstruktion (Rahmen bzw. Rahmen und Pfetten) sind Abbildung 5.21 zu entnehmen.

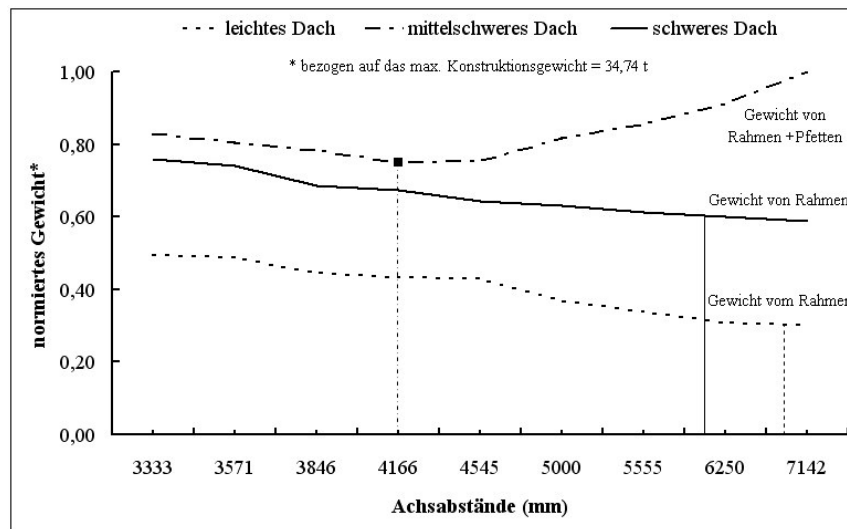


Abbildung 5.21: Teilsystem Tragwerk einschiffiger Rahmen, Achsabstände in Abhängigkeit unterschiedlicher Dachsysteme

Folgende optimale Achsabstände haben die untersuchten Dachsysteme:

- leichtes Dach: $\cong 6,9$ m
- mittelschweres Dach: $\cong 4,2$ m
- schweres Dach: $\cong 6,0$ m.

Der optimale Achsabstand für das mittelschwere und schwere Dachsystem (beide ohne Unterkonstruktion) wird in der Regel durch technologische bzw. firmenphilosophische Gründe eingegrenzt. Dagegen hängt der optimale Achsabstand vom leichten Dachsystem von der Unterkonstruktion (= Pfetten) ab.

5.2.4 Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle mit tragender und bauphysikalischer Funktion

A Entwurfsaufgabe

Der Entwurf des Gesamtsystems Bauwerk Halle (Abb. 5.24) erfolgt unter Berücksichtigung von tragender und bauphysikalischer Funktion:

- tragende Funktion - Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit
- bauphysikalische Funktion - Nachweis der Einhaltung der Wärmeschutzverordnung.

Anhand dieser Entwurfsaufgabe wird der Einfluss unterschiedlicher Dach- und Wandsysteme auf das Gewicht des Tragwerkes sowie das Fundamentvolumen analysiert. Unter folgenden Entwurfszielen, mit unterschiedlicher Wichtung, wird das Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle entworfen:

- Gewichtsminimum des Tragwerkes
- Fundamentvolumenminimum.

Zur Eingrenzung der variablen Entwurfsgrößen wird als weitere konstante Entwurfsgröße der Achsabstand AA mit 4545 mm festgelegt.

Die für den Entwurf relevanten Dach- und Wandsysteme sind in den Abbildungen 5.22 und 5.23 aufgelistet. Die Angaben über zugehörige Schichtdicken s_i , Wärmeleitfähigkeiten λ_i , Eigengewichte g_i und Wärmedurchgangskoeffizienten k sind Anlage IX (Abb. IX-1 und IX-2) zu entnehmen.

Die Wärmeübergangswiderstände nach DIN4108, Teil4, Tabelle 5 zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten k sind:

$$\text{innen: } \frac{1}{\alpha_{innen}} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W} \quad (5-1)$$

$$\text{ausen: } \frac{1}{\alpha_{ausen}} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{W} \quad (5-2)$$

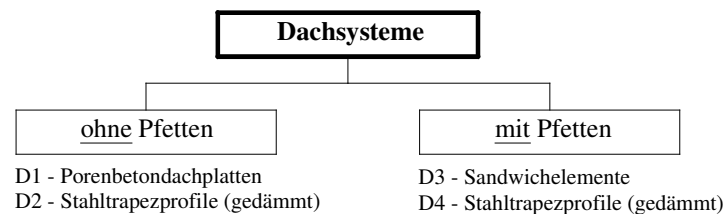


Abbildung 5.22: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Übersicht der Dachsysteme

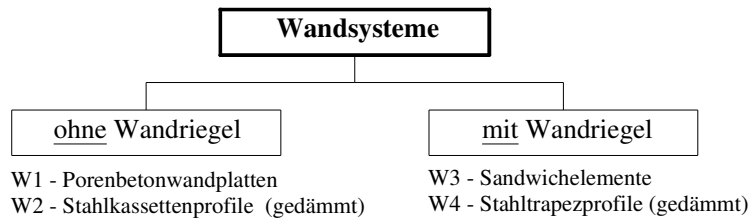


Abbildung 5.23: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Übersicht der Wandsysteme

- Entwurfsziel
 Ökonomie: Gewichtsminimum des Tragwerkes
 Fundamentvolumenminimum
- variable Entwurfsgrößen

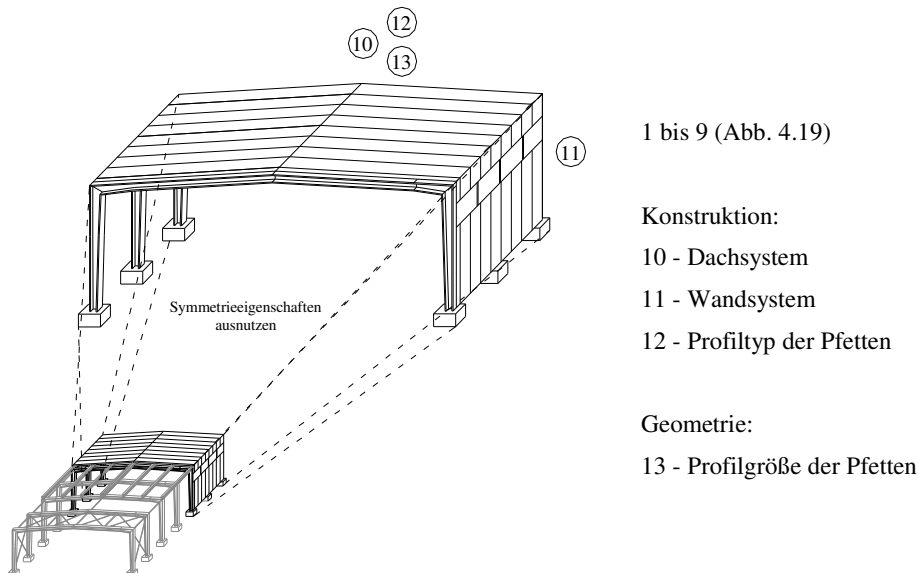


Abbildung 5.24: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, System mit variablen Entwurfsgrößen

- konstante Entwurfsgrößen
 Standort: Die charakteristischen Werte infolge der standortbedingten Einwirkungen Schnee und Wind sind Abschnitt 5.2.3 (Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle) zu entnehmen.
- Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
 (Knotenlagen, Elementzuordnungen)

Material:	E	= 210000 N/mm ²
	ρ_{Stahl}	= 78,5 kN/m ³
	$f_{y,k}$	= 240 N/mm ²
	$\sigma_{R,d}$	= 218 N/mm ²
	λ_a	= 92,9
	k_c	= 1,0
	$u_{\text{grenz}(x)}$	= 40 mm
	$u_{\text{grenz}(z)}$	= 60 mm
	$u_{\text{grenz}(z)}^P$	= AA / 250 mm

Konstruktion: Das Eigengewicht variiert in Abhängigkeit der untersuchten Dach- und Wandsysteme (Anlage IX).

In Tabelle 5.5 ist der Schichtenaufbau des vorhandenen Hallenfußbodens aufgelistet. Die Wärmedurchgangskoeffizienten k_{FB} für den Fußboden (Gl. 5-3) sowie k_F für die Fenster sind:

$$k_{FB} = \frac{1}{0,04 + \frac{0,18}{2,1} + \frac{0,04}{0,035} + \frac{0,04}{1,4} + 0,13} = 0,701 \frac{W}{m^2K} \quad (5-3)$$

$$k_F = 1,7 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (Aluminiumfenster, eloxiert, Isolierglas 4/16/4 U)}$$

Tabelle 5.5: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Schichtenaufbau des Hallenfußbodens

Schichten von aussen nach innen	s_i [m]	λ_i [W/mK]
Sauberkeitsschicht B5	0,10	-
Abdichtung	-	-
Stahlbeton B25	0,18	2,1
Dampfsperre	-	-
Wärmedämmschicht	0,04	0,035
Zementestrich	0,04	1,4

Geometrie:	SB	= 18000 mm
	SH _T	= 6000 mm
	SL	= 50000 mm
	AA	= 4545 mm
	l_1	= 2250 mm
	l_2	= 13500 mm

h_{FP}	= 250 mm
x_{Pfette}	= 1500 mm
c	= 2000 mm (Stiele)
A_F	= 99 m ²
A_{FB}	= 900 m ²
h_{Fund}	= 1000 mm

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: Nachweis der:

- Tragsicherheit
(Grenzspannungsnachweis für Rahmen und Pfetten¹, Stabilitätssicherheiten Biegeknicken in der Ebene, Biegedrillknicken und Beulen für Rahmen und Pfetten sowie Biegeknicken senkrecht zur Rahmenebene für die Rahmen, Nachweis der Außermitte und Nachweis der Sohlspannungen für die Fundamente)
- Gebrauchstauglichkeit
(Nachweis bezüglich der Verformungen für Rahmen und Pfetten)
- Einhaltung der Wärmeschutzverordnung
(Wärmeschutznachweis nach dem k_m -Verfahren [ACK95, USE95])

Zu den Stabilitätssicherheiten gelten die Annahmen zum Element einschiffiger Rahmen im Abschnitt 5.2.2.1.

B Optimierungsaufgabe

In den Gleichungen IX-1 bis IX-25 (Anlage IX) ist die Optimierungsaufgabe beschrieben.

C Ergebnisse

Der Einfluss unterschiedlicher Dach- und Wandsysteme auf das Entwurfsziel Gewichtsminimum des Tragwerkes (Wichtungsfaktor $\alpha = 1,0$) ist in Abbildung 5.25 dargestellt. Die Entwurfslösung mit dem geringsten Stahlverbrauch für das Tragwerk hat ein pfettenloses Dach mit gedämmten Stahltrapezprofilen (= Dachsystem D2). Keinen bzw. einen geringen Einfluss auf das Gewicht des Tragwerkes hat das Wandsystem.

In der Praxis werden Stahlhallen üblicherweise mit den Dachsystemen D2 oder D4 ausgebildet, wobei das Dachsystem D2 bei pfettenlosen Dächern und das Dachsystem D4 bei Pfetten-

¹ falls vorhanden

dächern eingesetzt wird. Es hängt allerdings von der Firmenphilosophie des Stahlhallenherstellers ab, welches dieser beiden Dachsysteme zum Einsatz kommt.

Weiterhin ist in Abbildung 5.25 das Fundamentvolumen der einzelnen Entwurfslösungen, ermittelt unter dem Entwurfsziel Gewichtsminimum des Tragwerkes, dargestellt. Es zeigt sich, dass für die Dachsysteme D3 bzw. D4 und das Wandsystem W1 das geringste Fundamentvolumen vorliegt.

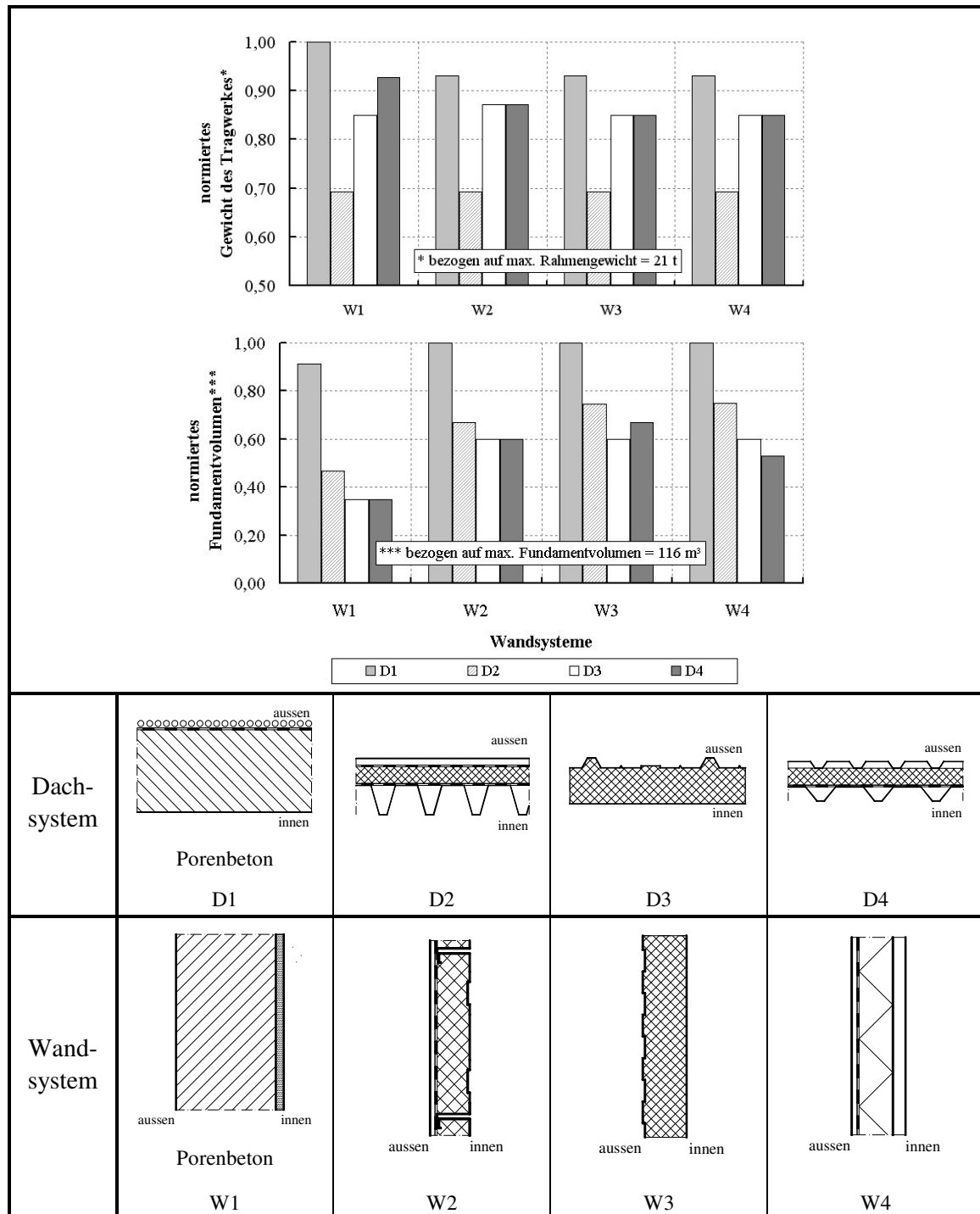


Abbildung 5.25: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Gewicht des Tragwerkes und Fundamentvolumen für unterschiedliche Dach- und Wandsysteme

Das Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle wird nachfolgend unter verschiedenen Zielstellungen, umgesetzt in den Grenzfällen 1 bis 3 (Abb. 5.26), entworfen.

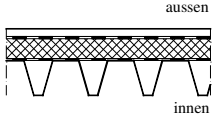
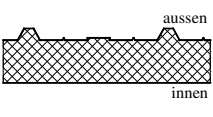
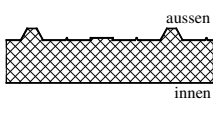
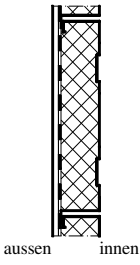
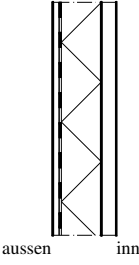
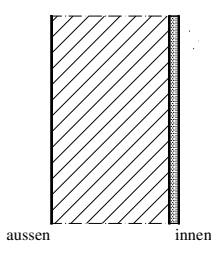
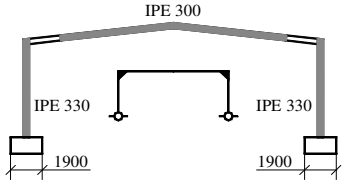
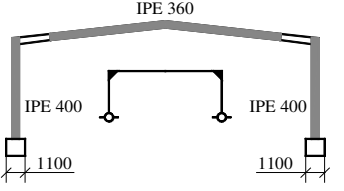
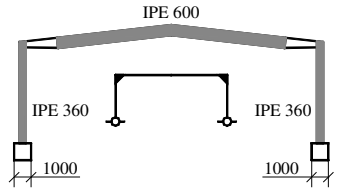

Grenzfall 1: $\alpha \Rightarrow 0$	Grenzfall 2: $\alpha = 0,5$	Grenzfall 3: $\alpha \Rightarrow 1,0$
Entwurfsziel <i>Gewichtsmilimum Tragwerk</i>	Entwurfsziel <i>Gewichtsmilimum Tragwerk und Fundamentvolumenmilimum</i>	Entwurfsziel <i>Fundamentvolumenmilimum</i>
 Dachsystem D2	 Dachsystem D3	 Dachsystem D3
 Wandsystem W2	 Wandsystem W4	 Wandsystem W1
$G_{\text{Rahmen}} = 15,43 \text{ t (75 \%)}$	$G_{\text{Rahmen}} = 20,65 \text{ t (100 \%)}$	$G_{\text{Rahmen}} = 32,01 \text{ t (155 \%)}$
$V_{\text{Fundament}} = 86,65 \text{ m}^3 \text{ (299 \%)}$	$V_{\text{Fundament}} = 29,00 \text{ m}^3 \text{ (100 \%)}$	$V_{\text{Fundament}} = 24,00 \text{ m}^3 \text{ (83 \%)}$
 IPE 300 IPE 330 1900	 IPE 360 IPE 400 1100	 IPE 600 IPE 360 1000
		

Abbildung 5.26: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Einfluss unterschiedlicher Entwurfsziele auf die Entwurfslösung

Als weitere konstante Entwurfsgröße wird hierzu die konstruktive Ausbildung des Rahmens festgelegt. Die Rahmen bestehen aus gewalzten Stielen, gewalztem Riegel und geschweißten Vouten im Riegel (= Rahmentyp RT05 in Abbildung 5.4).

Der Einfluss unterschiedlicher Entwurfsziele auf Qualität der Entwurfslösung wird anhand einer Bewertung der Entwurfsergebnisse analysiert. In der Abbildung 5.26 sind die Entwurfslösungen der Grenzfälle 1 bis 3 zusammengestellt mit Angaben über:

- Dach- und Wandsystem
- Querschnittsabmessungen für Stiele und Riegel
- Eigengewicht des Tragwerkes
- Fundamentvolumen.

Die Änderung der angestrebten Entwurfsziele Gewichtsminimum des Tragwerkes und Fundamentvolumenminimum, regulierbar durch den Wichtungsfaktor α (Gl. IX-9), führt zu unterschiedlichen Entwurfslösungen.

– *Grenzfall 1 ($\alpha \Rightarrow 0$: Entwurfsziel Gewichtsminimum des Tragwerkes)*

Die Entwurfslösung hat mit 86,65 m³ im Vergleich zu den Entwurfslösungen der Grenzfälle 2 und 3 ein verhältnismäßig hohes Fundamentvolumen. Dagegen ist das Eigengewicht dieser Entwurfslösung mit 15,43 t gering gegenüber den Eigengewichten der Entwurfslösungen der beiden anderen Grenzfälle.

– *Grenzfall 2 ($\alpha = 0,5$: Entwurfsziel Gewichtsminimum des Tragwerkes und Fundamentvolumenminimum)*

Aus der Abbildung 5.27 wird ersichtlich, dass bei dieser Entwurfslösung, entworfen unter den Zielen Gewichtsminimum des Tragwerkes und Fundamentvolumenminimum, die Ergebnisse für Gewicht und Fundamentvolumen ausgeglichener sind als bei den Grenzfällen 1 und 3 mit den Entwurfszielen Gewichtsminimum des Tragwerkes bzw. Fundamentvolumenminimum.

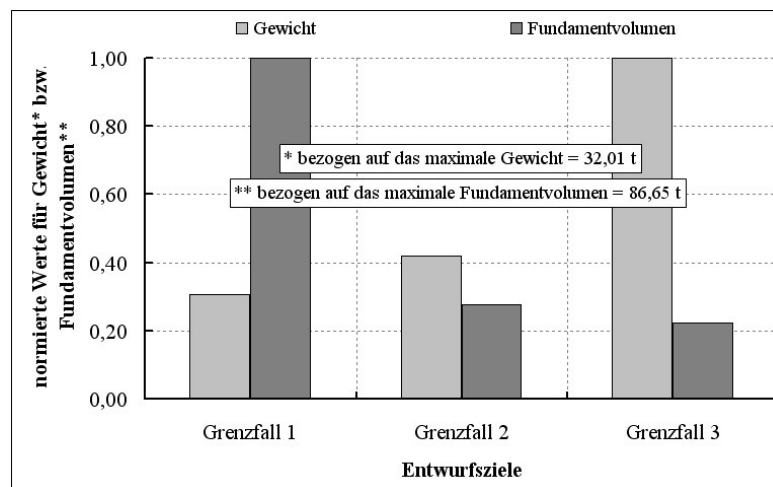


Abbildung 5.27: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Entwurfslösungen der Grenzfälle 1,2 und 3

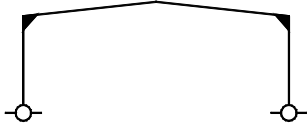
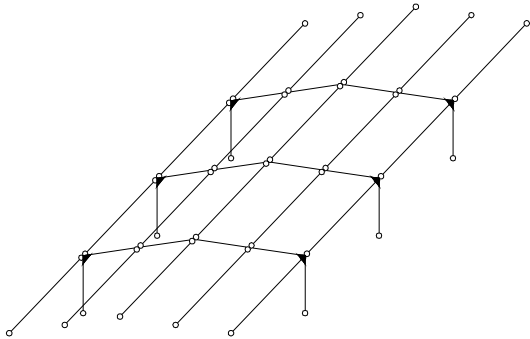
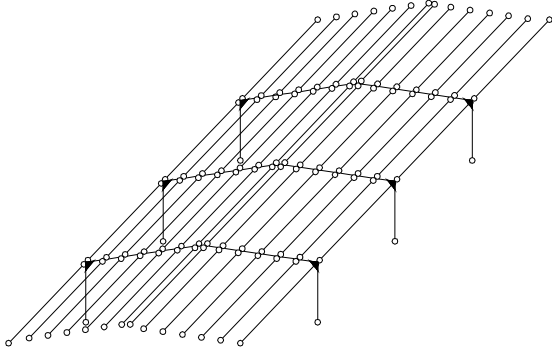
– *Grenzfall 3 ($\alpha \Rightarrow 1,0$: Entwurfsziel Fundamentvolumenminimum)*

Im Gegensatz zu den zuvor erläuterten Grenzfällen hat diese Entwurfslösung mit ca. 24,00 m³ das geringste Fundamentvolumen und mit ca. 32,01 t das höchste Eigengewicht. Die konstruktive Ausbildung des Rahmens weicht vom üblichen Ausführungsprinzip der Praxis ab, indem sich die Vouten im Riegel zum Anschluss an den Rahmenstiel verjüngen.

Mit dem Evolutionären Algorithmus in Abbildung 4.28 werden plausible Entwurfslösungen ermittelt. Dies zeigen die erzielten Entwurfsergebnisse für die untersuchten Grenzfälle in Abbildung 5.26.

Für ausgewählte Systemstufen der einschiffigen Halle (Tab. 5.6) sind in Abbildung 5.28 die erforderlichen Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösungen dargestellt.

Tabelle 5.6: Einschiffige Halle, Modelleigenschaften ausgewählter Systemstufen

Systemstufe	Modell		Anzahl der Freiheitsgrade
	Anzahl der Elemente	Anzahl der Knoten	
 Rahmen	$m = 40$	$n = 41$	1
 Rahmen mit Koppelträgern (KT)	$m = 320$	$n = 344$	25
 Rahmen mit Pfetten	$m = 680$	$n = 747$	38

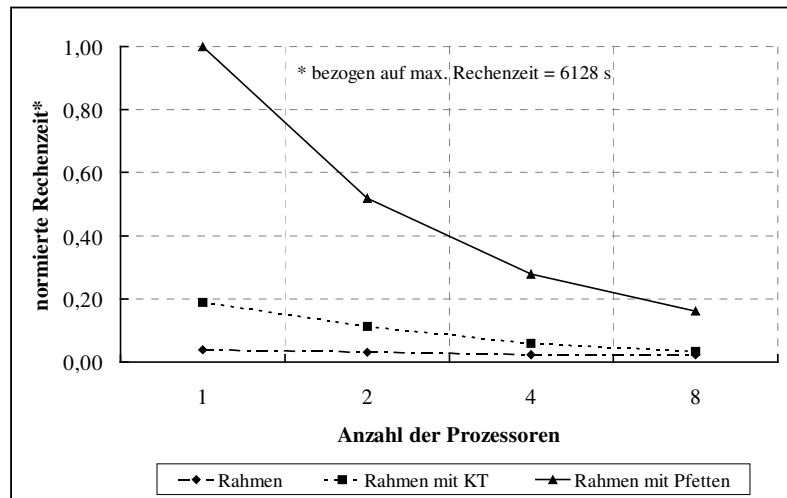


Abbildung 5.28: Einschiffige Halle, Rechenzeiten für ausgewählte Systemstufen

Mit zunehmender Komplexität der Systemstufe von Rahmen über Rahmen mit Koppelträger hin zu Rahmen mit Pfetten, charakterisiert durch die Anzahl der Elemente, die Anzahl der Knoten und die Anzahl der Freiheitsgrade, steigt die Rechenzeit ohne Parallelisierung auf das 5-fache an.

Durch die Parallelisierung des Analyseprozesses (Bezug nehmend auf die Auswertung im Abschnitt 5.2.2.1.2) ist eine Reduzierung der Rechenzeit bis zu 80% möglich.

5.3 Entwurf ausgewählter Ingenieurbauwerke der Baupraxis

Anhand der Entwurfslösungen von zwei Anwendungsbeispielen aus der Baupraxis, erzielt mit der traditionellen Entwurfsstrategie Variantenuntersuchung, soll die Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit Evolutionärer Algorithmen zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Bauwesen überprüft und beurteilt werden. Für die Untersuchungen wird der Evolutionäre Algorithmus EA-II in Abbildung 4.28 verwendet.

A Wassertank

A.1 Entwurfsaufgabe

Dieses baupraktische Beispiel ist unter den Zielstellungen Tankvolumenmaximum und Gewichtsminimum zu entwerfen. Die Abbildung 5.29 zeigt den Wassertank mit den geometrischen Abmessungen Länge $l = 8$ m, Breite $b = 4$ m und Höhe $h = 8$ m, die gleichzeitig die festgelegten Grenzen für den Entwurfsbereich (= Aussenkanten des Wassertanks) sind.

Der Wassertank besteht aus liegenden Rahmen, die in unterschiedlichen Abständen über die Höhe angeordnet sind. Zwangspunkte für die Rahmen sind:

- x- und y-Koordinaten der Knoten 1 und 4
- y-Koordinate des Knotens 2
- x-Koordinate des Knotens 3.

- Entwurfsziele

Ökonomie: Tankvolumenmaximum (Wichtungsfaktor $\alpha = 0,5$)
Gewichtsminimum (Wichtungsfaktor $\alpha = 0,5$)

- variable Entwurfsgrößen

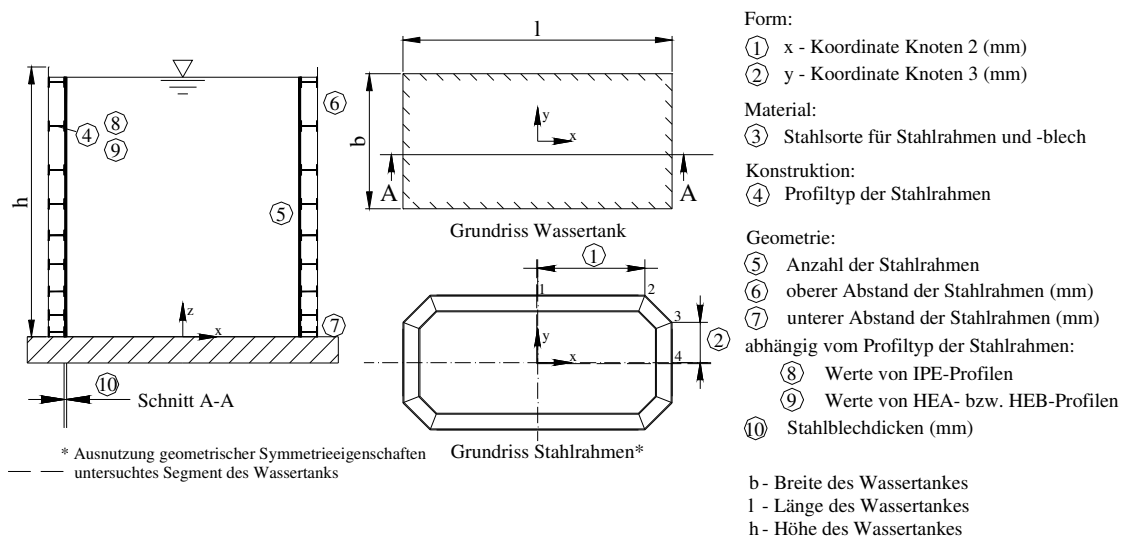


Abbildung 5.29: Wassertank, System mit variablen Entwurfsgrößen

- konstante Entwurfsgrößen

Nutzung: Als Last ist der hydrostatische Druck anzusetzen.

$$\rho_{\text{Wasser}} = 1 \text{ t/m}^3$$

Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
(Knotenlagen, Elementzuordnungen)

Material: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

$$\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$$

$$u_{\text{grenz}(x)} = 30 \text{ mm}$$

$$u_{\text{grenz}(y)} = 30 \text{ mm}$$

Geometrie: $l = 8000 \text{ mm}$

$$b = 4000 \text{ mm}$$

$$h = 8000 \text{ mm}$$

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: Für Rahmen und Stahlbleche sind folgende Nachweise zu erbringen:

- Tragsicherheit (Grenzspannungsnachweis)
- Gebrauchstauglichkeit (Nachweis bezüglich der Verformungen)

A.2 Optimierungsaufgabe

In den Gleichungen X-1 bis X-13 (Anlage X) ist die Optimierungsaufgabe beschrieben.

A.3 Ergebnisse

In Abbildung 5.30 sind die Ergebnisse für die Entwurfsziele Tankvolumenmaximum und Gewichtsminimum sowie die Werte der variablen Entwurfsgrößen des untersuchten Wassertanks, differenziert nach verwendeter Entwurfsstrategie, gegenübergestellt.

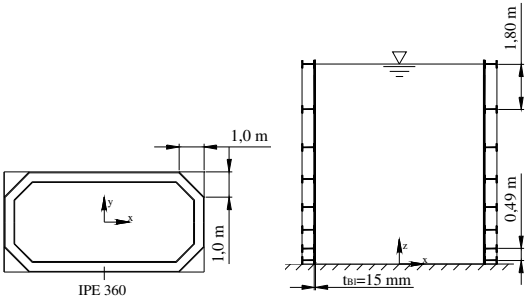
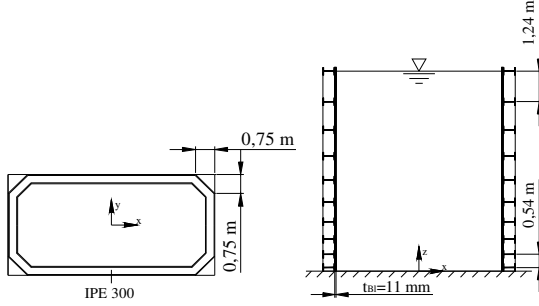
Entwurf Wassertank	
Entwurfslösung mit <i>traditioneller Entwurfsstrategie</i> (Variantenuntersuchung)	Entwurfslösung mit <i>optimierungsbasierter Entwurfsstrategie</i> (Evolutionärer Algorithmus EA-II (Abb. 4.28))
$G_{\text{gesamt}} = 28,4 \text{ t}$ $V_{\text{Tank}} = 175,0 \text{ m}^3$	$G_{\text{gesamt}} = 23,6 \text{ t}$ $V_{\text{Tank}} = 191,7 \text{ m}^3$
S355 	S355 

Abbildung 5.30: Wassertank, Entwurfslösungen

Die Ergebnisse für die Entwurfsziele und die konstruktive Ausbildung des untersuchten Wassertanks sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Wassertank, Ergebnisse variabler Entwurfsgrößen der Entwurfslösungen

variable Entwurfsgrößen	Ergebnis Wassertank	
	Entwurfslösung mit <i>traditioneller Entwurfsstrategie</i> (Variantenuntersuchung)	Entwurfslösung mit <i>optimierungsbasierter Entwurfsstrategie</i> (Evolutionärer Algorithmus EA-II (Abb. 4.28))
Gewicht G_{gesamt}	28,4 t	23,6 t
Tankvolumen V_{Tank}	175,0 m ³	191,7 m ³
x-Koordinate	3000 mm	3250 mm
y-Koordinate	1000 mm	1250 mm
Stahlsorte	S355	S355
Profiltyp des Rahmens	IPE 360	IPE 300
Anzahl der Rahmen	8	10
oberer Rahmenabstand	1,80 m	1,24 m
unterer Rahmenabstand	0,49 m	0,54 m
Stahlblechdicke	15 mm	11 mm

Die Ausgangslösung des Entwurfes in Abbildung 5.30 (= baupraktische Entwurfslösung) mit dem Gewicht von $\approx 28 \text{ t}$ und dem Tankvolumen $\approx 175 \text{ m}^3$ beruht auf einer durchgeführten Variantenuntersuchungen.

Ein Vergleich mit den erzielten Ergebnissen unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit dem Evolutionären Algorithmus EA-II in Abbildung 4.29 als Optimierungsverfahren zeigt Qualitätsverbesserungen von:

- Entwurfsziel Gewicht um ca. 20 %
- Entwurfsziel Tankvolumen um ca. 9 %.

In der Abbildung 5.31 sind die Entwicklungen für Gewicht, Tankvolumen und Fitness unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit dem Evolutionären Algorithmus dargestellt.

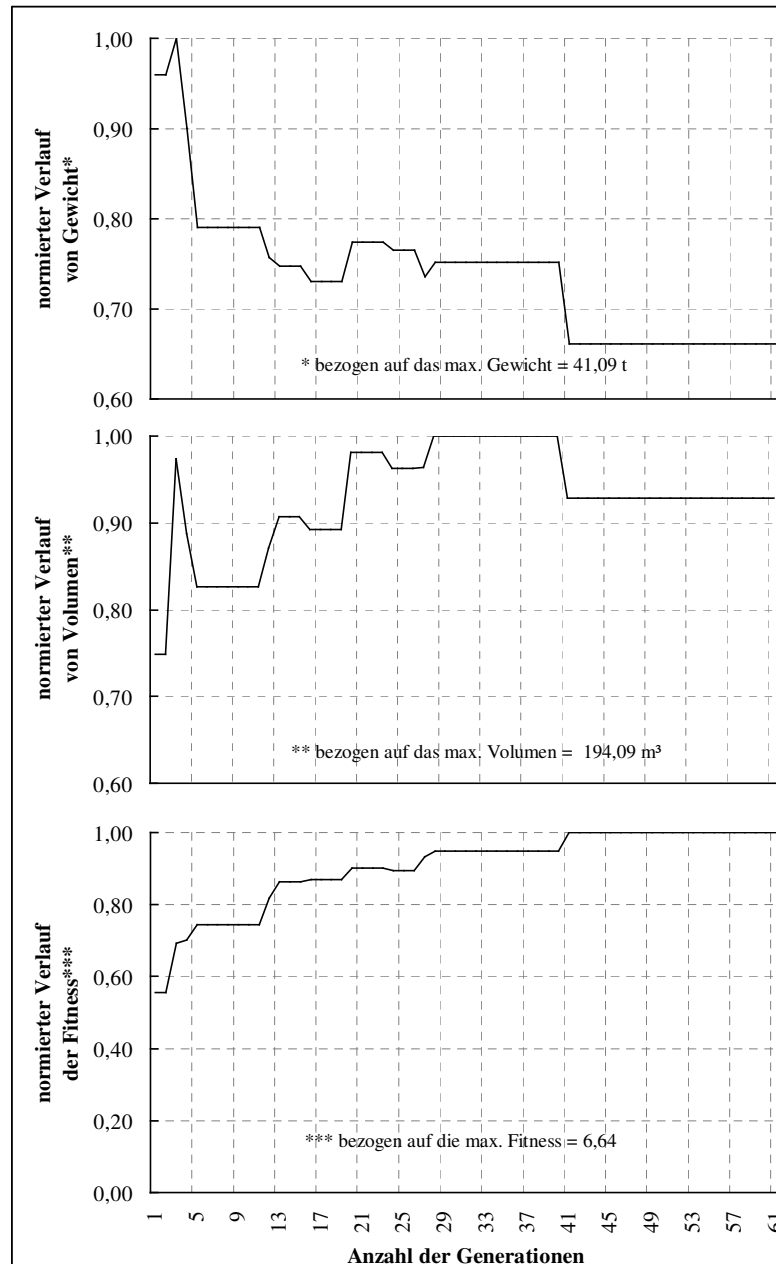


Abbildung 5.31: Wassertank, Entwicklung der Entwurfsziele Gewichtsminimum und Volumenmaximum sowie der Fitness

Bis zum Abbruch der Suche werden 61 Generationen durchlaufen. Die zugehörigen Zeiten pro Generation bzw. für alle Generationen sind in Tabelle 5.8 zusammengestellt.

Tabelle 5.8: Wassertank, Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurflösung

Zeit	pro Generation	alle Generationen
Rechenzeit	ca. 272 s	ca. 4 h 37 min

Um die Plausibilität der Entwurflösung in Abbildung 5.30 zu überprüfen, wird der Wassertank mit unterschiedlicher Wichtung der Entwurfsziele (Gl. 5-4) entworfen.

$$Z = f(\underline{x}) = \frac{\alpha \cdot Z_1}{(1 - \alpha) \cdot Z_2} \Rightarrow \text{Maximum}; \quad \alpha - \text{Wichtungsfaktor} \quad (5-4)$$

Aussagen über die Plausibilität der Ergebnisse können lediglich anhand der Lage von x - und z -Koordinaten, die die Form der Rahmen festlegen, getroffen werden. Die Profilart und –größe wird im Wesentlichen durch die Nachweise der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit beeinflusst. In Abbildung 5.32 sind die Ergebnisse der untersuchten Grenzfälle für den Wichtungsfaktor α dargestellt.

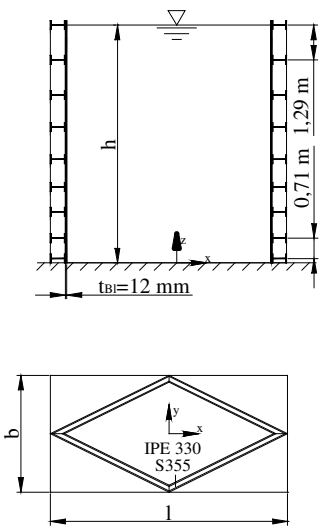
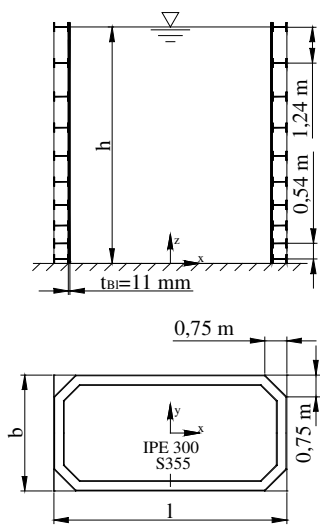
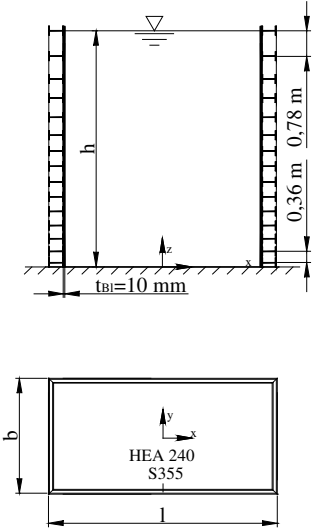
Grenzfall 1: $\alpha \Rightarrow 0$	Grenzfall 2: $\alpha = 0,5$	Grenzfall 3: $\alpha \Rightarrow 1$
Entwurfsziel: <i>Gewichtsminimum</i>	Entwurfsziel: <i>Volumenmaximum und Gewichtsminimum</i>	Entwurfsziel: <i>Volumenmaximum</i>
		
$G_{\text{gesamt}} = 20,1 \text{ t}$ $V_{\text{Tank}} = 83,5 \text{ m}^3$ 9 Stahlrahmen	$G_{\text{gesamt}} = 23,6 \text{ t}$ $V_{\text{Tank}} = 191,7 \text{ m}^3$ 10 Stahlrahmen	$G_{\text{gesamt}} = 35,9 \text{ t}$ $V_{\text{Tank}} = 202,9 \text{ m}^3$ 15 Stahlrahmen

Abbildung 5.32: Wassertank, Entwurflösungen mit unterschiedlicher Wichtung der Zielfunktionen Z_1 und Z_2

Die Ergebnisse der untersuchten Grenzfälle zeigen von Grenzfall 1 ($\alpha \Rightarrow 0$, Entwurfsziel Gewichtsmilimum) zu Grenzfall 3 ($\alpha \Rightarrow 1$, Entwurfsziel Volumenmaximum) folgende Tendenzen:

- Zunahme der Werte für die x-Koordinate von Knoten 2 und die y-Koordinate von Knoten 3 vom kleinsten (0 mm) zum größten Wert (4000 bzw. 2000 mm)
- Verwendung von qualitativ hochwertiger Stahlsorte S355 für alle untersuchten Grenzfälle
- Verwendung materialwirtschaftlicher IPE-Profile bei Vorliegen des Entwurfszieles Gewichtsmilimum und materialunwirtschaftlicher HEA-Profile bei Vorliegen des Entwurfszieles Volumenmaximum
- Zunahme der Anzahl liegender Stahlrahmen von 9 auf 15
- Zunahme des Wassertankgewichts von 20,1 t auf 35,9 t
- Zunahme des Wassertankvolumens von 83,5 m³ auf 202,9 m³

Aus den Tendenzen lassen sich folgende Schlussfolgerungen bezüglich der Plausibilität der erzielten Ergebnisse ableiten:

- *Grenzfall 1 ($\alpha \Rightarrow 0$; Entwurfsziel Gewichtsmilimum)*
 Durch die freien Koordinaten von Knoten 2 (x-Koordinate) und Knoten 3 (y-Koordinate) wird eine minimale Länge der Rahmenstäbe erreicht. Die Rahmen berühren die festgelegte Aussenkante des Wassertanks nur an den fixierten Punkten 1 und 4 (Abb. 5.29). Als Profil für die Rahmen wird das mittelbreite Walzprofil IPE 330 und für die Stahlbleche die Blechdicke $t = 12$ mm festgelegt.
 Die Form der Rahmen sowie die Querschnittsabmessungen von Profil und Stahlblech führen zu der Annahme, dass ein minimales Konstruktionsgewicht des Wassertanks vorliegt.
- *Grenzfall 2 ($\alpha = 0,5$; Entwurfsziel Gewichtsmilimum und Volumenmaximum)*
 Bei Gleichwertigkeit der Entwurfsziele Volumenmaximum und Gewichtsmilimum liegen folgende Differenzen zu den Entwurfszielen der Grenzfälle 1 und 3 ($\alpha \Rightarrow 0$ bzw. $\alpha \Rightarrow 1$) vor:
 - Grenzfall 1 (Gewichtsmilimum) - Gewichtsanstieg von 17 %
 - Grenzfall 3 (Volumenmaximum) - Volumenanstieg von 6 %.
- *Grenzfall 3 ($\alpha \Rightarrow 1$; Entwurfsziel Volumenmaximum)*
 Das Entwurfsziel Volumenmaximum führt zu einer Anpassung der Rahmen an die festgelegten Aussenkanten des Wassertanks ($l = 8$ m und $b = 4$ m). Für die Rahmen ergibt sich als Profil HEA 240 und für die Stahlbleche eine Blechdicke t von 10 mm. Eine maximale Ausnutzung des Raumvolumens wird somit erreicht.

Mit dieser Entwurfsaufgabe wird deutlich die Leistungsfähigkeit des robusten Evolutionären Algorithmus (Abb. 4.28) gezeigt. Mit dem üblichen Entwurfsaufwand in der Praxis kann diese Entwurfsaufgabe kaum gelöst werden.

B Überdachung Radrennbahn

B.1 Entwurfsaufgabe

Die Zielsetzung dieser Entwurfsaufgabe umfasst die Überprüfung des durch Variantenuntersuchung konzipierten Vorentwurfes der Überdachung einer Radrennbahn. Die Überprüfung der Entwurfslösung erfolgt unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit dem Evolutionären Algorithmus EA-II (Abb. 4.28) als Optimierungsverfahren.

In Abbildung 5.33 ist der prinzipielle Aufbau der Tragstruktur des Entwurfsobjektes mit Bezeichnung der Tragelemente dargestellt.

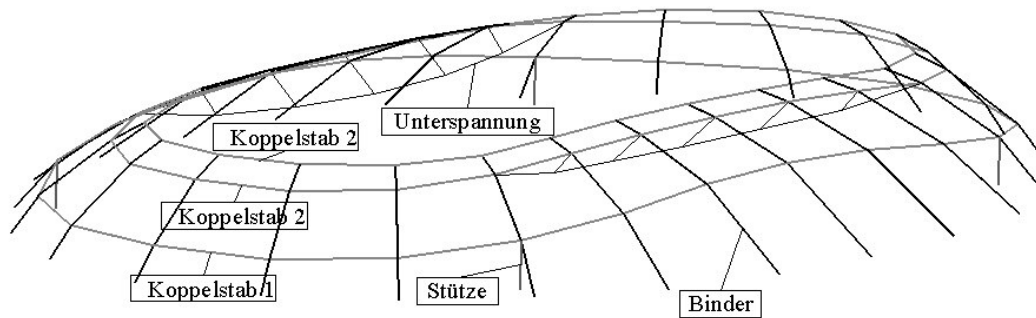


Abbildung 5.33: Überdachung einer Radrennbahn, Prinzipielle Tragstruktur

Zur Lösung dieser Entwurfsaufgabe werden nachstehende Vereinfachungen für die Modellierung verwendet:

- Für den Entwurf wird ein Viertelsegment der Überdachung betrachtet. In Abbildung 5.34 ist eine Ansicht und in Abbildung 5.35 der Grundriss des untersuchten Viertelsegmentes dargestellt. Zugehörige Binderbezeichnungen sind Abbildung 5.36 zu entnehmen.
- Als Einwirkung auf die Binder wird eine Einheitslast von 10 kN/m (Abb. 5.36) angenommen.
- Die Tragelemente werden folgendermaßen modelliert:
 - Binder: I-Profil (HEB-Reihe)
 - Stütze, Koppelstab 1, Koppelstab 2, Druckstab der Unterspannung: Hohlprofil mit kreisförmigem Querschnitt
 - Koppelstab 3, Zugstab der Unterspannung: Vollprofil mit kreisrundem Querschnitt.

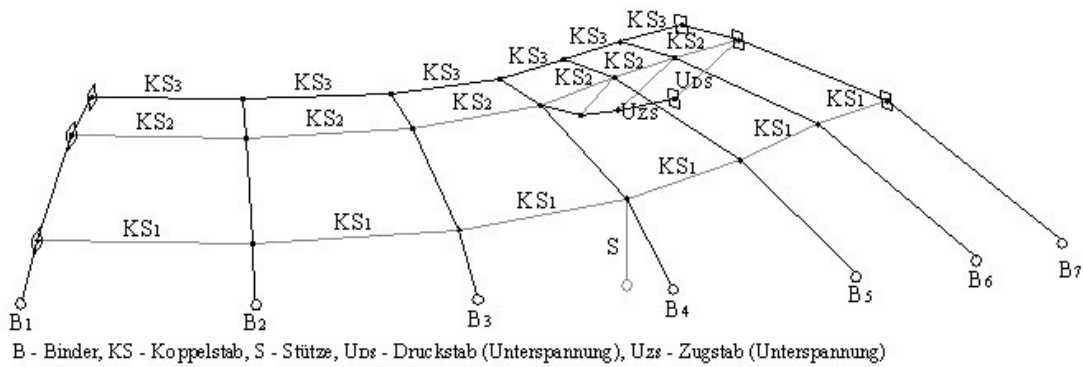


Abbildung 5.34: Überdachung einer Radrennbahn, Ansicht Viertelsegment

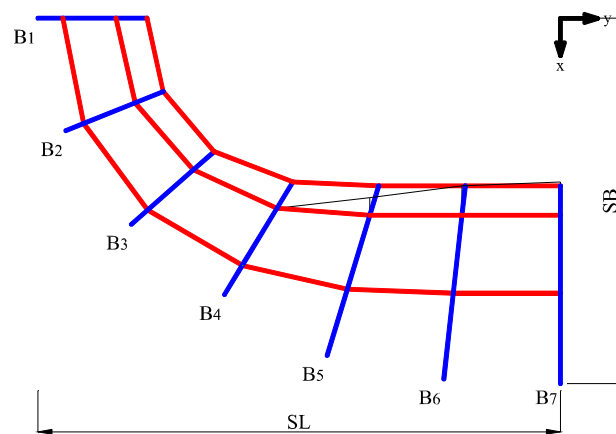


Abbildung 5.35: Überdachung einer Radrennbahn, Grundriss Viertelsegment

- Entwurfsziel

Ökonomie: Gewichtsminimum von:

- Binder B_i ($i = 1, 2, \dots, 7$)
- Koppelstab 1 und 2 (KS_1, KS_2)
- Koppelstab 3 (KS_3)

- variable Entwurfsgrößen

Form: z-Koordinate (mm) von:

- B_1P_2, B_1P_3, B_1P_4
- B_2P_2, B_2P_3, B_2P_4
- B_3P_2, B_3P_3, B_3P_4
- B_4P_2, B_4P_3, B_4P_4
- $B_5P_2, B_5P_3, B_5P_4, B_5P_5$
- $B_6P_2, B_6P_3, B_6P_4, B_6P_5$
- $B_7P_2, B_7P_3, B_7P_4, B_7P_5$

Winkel α ($^\circ$) - Neigung der Unterspannung

Geometrie: Querschnittsfläche der Binder - A_{HEB} (mm²)
 Querschnittsfläche der Rohre - A_{HP} (mm²)
 Querschnittsfläche des Vollstabes - A_{VP} (mm²)

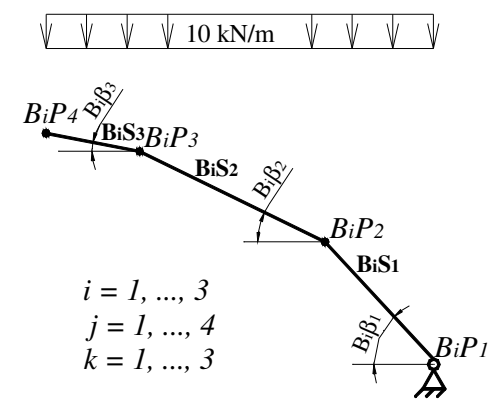
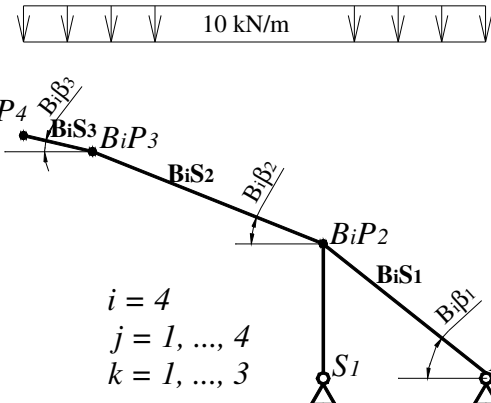
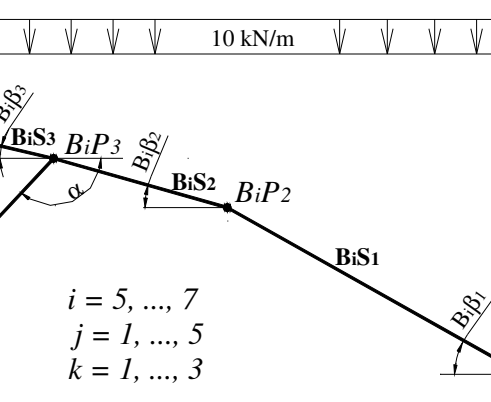
B_i	Darstellung und Bezeichnungen der Binder B_i
$B_1 - B_3$	 <p style="text-align: center;"> $i = 1, \dots, 3$ $j = 1, \dots, 4$ $k = 1, \dots, 3$ </p>
B_4	 <p style="text-align: center;"> $i = 4$ $j = 1, \dots, 4$ $k = 1, \dots, 3$ </p>
$B_5 - B_7$	 <p style="text-align: center;"> $i = 5, \dots, 7$ $j = 1, \dots, 5$ $k = 1, \dots, 3$ </p>
<p>B_iP_j – Knoten Binder i; B_iS_k – Stäbe Binder i $B_i\beta_k$ – Neigung der Stäbe von Binder i; α - Neigung der Unterspannung für Binder B_5 bis B_7</p>	

Abbildung 5.36: Überdachung einer Radrennbahn, Binderbezeichnungen und Einwirkungen

- konstante Entwurfsgrößen

Standort: Als standortbedingte Einwirkung wird eine Streckenlast von 10 kN/m pro Binder angesetzt. Die Abbildung 5.36 zeigt neben der Einwirkung auch die Besonderheiten der einzelnen Binder des untersuchten Viertelsegmentes.

Form: x- und y-Koordinaten (mm) von:

- B_1P_2, B_1P_3, B_1P_4
- B_2P_2, B_2P_3, B_2P_4
- B_3P_2, B_3P_3, B_3P_4
- B_4P_2, B_4P_3, B_4P_4
- B_5P_2, B_5P_3, B_5P_4
- B_6P_2, B_6P_3, B_6P_4
- B_7P_2, B_7P_3, B_7P_4

x-, y- und z- Koordinaten (mm) von:

- $B_1P_1, B_2P_1, B_3P_1, B_4P_1, B_5P_1, B_6P_1, B_7P_1$
- S_1

Die x-, y- und z-Koordinaten dieser Knoten sind Tabelle XI-1 in Anlage XI zu entnehmen.

Topologie: Systemaufbau der Tragkonstruktion
(Knotenlagen, Elementzuordnungen)

Material: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $\rho_{\text{Stahl}} = 78,5 \text{ kN/m}^3$
 $f_{y,k} = 360 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{R,d} = 327 \text{ N/mm}^2$
 $u_{\text{grenz}(x)} = 300 \text{ mm}$
 $u_{\text{grenz}(y)} = 300 \text{ mm}$
 $u_{\text{grenz}(z)} = 300 \text{ mm}$

- Entwurfsbedingungen

Bautechnik: I - Nachweise der:

- Tragsicherheit (Grenzspannungsnachweis)
- Gebrauchstauglichkeit (Nachweis bezüglich der Verformungen)

II - Beanspruchung der Rohre auf Druck

III – maximale Abweichung der vertikalen Stützkräfte der Binder B_i

($i = 1, \dots, 7$) beträgt 80 %

Geometrie: $B_i\beta_1 > B_i\beta_2 > B_i\beta_3$ (Neigung der Binderstäbe)

Zur Lösung der Entwurfsaufgabe sind zwei Entwurfsschritte vorgesehen.

Im *ersten Entwurfsschritt* wird die angenäherte Lage der z-Koordinaten aller freien Knoten B_iP_2 , B_iP_3 , B_iP_4 und B_iP_5 der Binder B_1 bis B_7 lokalisiert. Hierzu werden nur die variablen Entwurfsgrößen unter dem Aspekt Form (z-Koordinaten und Neigungswinkel α) verändert. Die Variationsintervalle sind wie folgt festgelegt:

- z-Koordinaten der freien Knoten
 - Knoten B_iP_2 und B_iP_3 - 2500, 3000, 35000, ..., 95000 (mm)
 - Knoten B_iP_4 - 9500, 10000, 10500, ..., 15000 (mm)
 - Knoten B_iP_5 - 500, 600, 700, ..., 2500 (mm)
- Neigungswinkel α der Unterspannung - 20, 21, 22, ..., 60 (°).

Im ersten Entwurfsschritt wird auf eine Variation der Querschnittsflächen A_B , A_R und A_{VS} verzichtet.

Nach Bestimmung der angenäherten z-Koordinaten der Knoten B_iP_2 , B_iP_3 , B_iP_4 und B_iP_5 wird im *zweiten Entwurfsschritt* deren genaue Lage ermittelt. Dafür sind neue Variationsbereiche für die z-Koordinaten der freien Knoten mit kleineren Schrittweiten festzulegen. Als Grundlage werden die ermittelten z-Koordinaten aus dem ersten Entwurfsschritt verwendet.

Eine Variation der Querschnittsflächen A_B , A_R und A_{VS} ist im zweiten Entwurfsschritt vorgesehen.

Gestalterische Qualitäten der Entwurfslösungen sind in der Regel durch Entwurfsbedingungen zu gewährleisten. Zur Lösung der vorliegenden Entwurfsaufgabe wird dieses Kriterium durch die Einhaltung der Entwurfsbedingung unter dem Aspekt Geometrie (Neigung der Binderstäbe) erfasst.

B.2 Optimierungsaufgabe

In den Gleichungen XI-1 bis XI-30 (Anlage XI) ist die Optimierungsaufgabe formuliert.

B.3 Ergebnisse

In Abbildung 5.37 sind die Entwurfslösungen der Überdachung gegenübergestellt. Die Abbildung 5.37 a) zeigt die Ausgangslösung des Entwurfes (= baupraktisches Entwurfsergebnis) ermittelt durch Variantenuntersuchungen. Die Entwurfslösungen 1 und 2, ermittelt mit dem Evolutionären Algorithmus EA-II in Abbildung 4.28, sind in den Abbildungen 5.37 b) und 5.37 c) zu sehen.

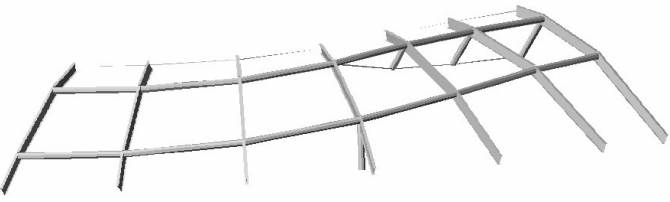
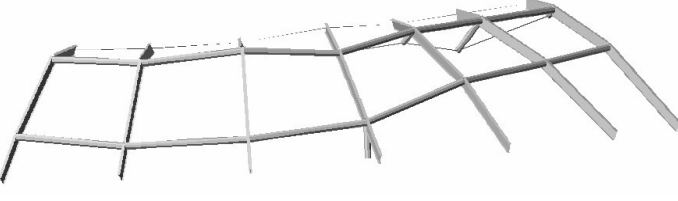
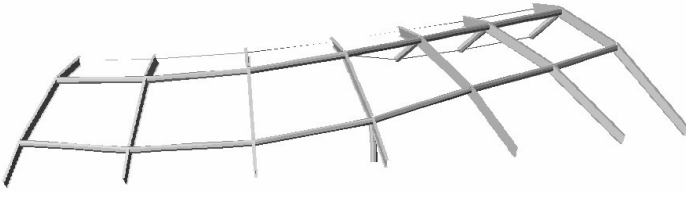
Ergebnisse	G (t)	A _{HEB} (mm ²)	A _{HP} (mm ²)	A _{VP} (mm ²)
<p align="center">- Entwurfslösung - mit traditioneller Entwurfsstrategie (Variantenuntersuchung)</p>  <p align="right">a)</p>	63,49	37100 (HEB 900)	23169	1963
<p align="center">- Entwurfslösung 1 - mit optimierungsbasierter Entwurfsstrategie (Evolutionärer Algorithmus EA-II)</p>  <p align="right">b)</p>	63,63	37100 (HEB 900)	23169	1963
<p align="center">- Entwurfslösung 2 - mit optimierungsbasierter Entwurfsstrategie (Evolutionärer Algorithmus EA-II)</p>  <p align="right">c)</p>	50,18	28600 (HEB 650)	20027	314
<p>A_{HEB} - Querschnittsfläche der Binder A_{HP} - Querschnittsfläche der Rohre A_{VP} - Querschnittsfläche der Vollstäbe</p>				

Abbildung 5.37: Überdachung einer Radrennbahn, Entwurfsergebnisse

B.3.1 Erster Entwurfsschritt

Die Querschnittsflächen der Binder A_{HEB} , der Rohre A_{HP} und der Vollstäbe A_{VP} werden im ersten Entwurfsschritt als konstante Entwurfsgrößen definiert. Als Vorgaben werden die vorliegenden Entwurfsergebnisse der Ausgangslösung verwendet.

Nach dem ersten Entwurfsschritt können folgende vergleichende Aussagen über die Qualitäten der Ausgangslösung und der Entwurfslösung 1 getroffen werden:

- tendenzielle Übereinstimmung zwischen den Verläufen der Druckrohre KS_1 , KS_2 und KS_3 mit geringfügigen Abweichungen einzelner Knotenlagen (= z-Koordinaten)
- ausgeprägte Abweichungen im Verlauf der Unterspannung (z-Koordinaten der freien Knoten B_iP_5)
- annähernd gleicher Neigungswinkel α
- annähernd gleiches Gewicht.

Die Schrittweiten der z-Koordinaten sind im ersten Entwurfsschritt sehr hoch gewählt, um annähernd die Lage der freien Knoten zu ermitteln.

B.3.2 Zweiter Entwurfsschritt

Im zweiten Entwurfsschritt werden die Variationsbereiche der freien z-Koordinaten mit kleineren Schrittweiten neu definiert. Dabei konzentrieren sich die neuen Suchbereiche in der Nähe der im ersten Entwurfsschritt lokalisierten z-Koordinaten der freien Knoten.

In Tabelle XI-2 (Anlage XI) sind die neuen Variationsbereiche für die z-Koordinaten der freien Knoten B_iP_2 , B_iP_3 , B_iP_4 und B_iP_5 für die Binder B_1 bis B_7 aufgelistet. Die Schrittweite beträgt für alle variablen z-Koordinaten 1 mm.

Die Entwurfslösung 2 (Abb. 5.37 c)) liefert gegenüber der mit einer traditionellen Entwurfsstrategie erzielten Lösung (Abb. 5.37 a)) folgende Ergebnisse:

- Übereinstimmung in den Verläufen der Druckrohre KS_1 , KS_2 und KS_3
- tendenzielle Übereinstimmung zwischen dem Verlauf der Unterspannung
- unterschiedliche Neigungswinkel α (Entwurfslösung 2 - 60° , Ausgangslösung - 42°)
- Gewichtseinsparung von ca. 27 %.

In Tabelle XI-1 (Anlage XI) sind die Werte der z-Koordinaten der freien Knoten für die Ausgangslösung sowie die Entwurfslösungen 1 und 2 gegenübergestellt.

Die Fitnessverläufe für die Entwurfsschritte 1 und 2 zeigen die Abbildung 5.38 und 5.39 und die zugehörigen CPU-Zeiten und Rechenzeiten sind in den Tabellen 5.8 und 5.9 aufgelistet.

Für den Entwurfsschritt 1 werden bis zum Auffinden der Entwurfslösung 36 Generationen und bis zum Abbruch des Evolutionären Algorithmus 70 Generationen durchlaufen (Abb. 5.38). Im zweiten Entwurfsschritt werden 70 Generationen bis zum Auffinden der Entwurfslösung und 103 Generationen bis zum Abbruch der Suche benötigt (Abb. 5.39).

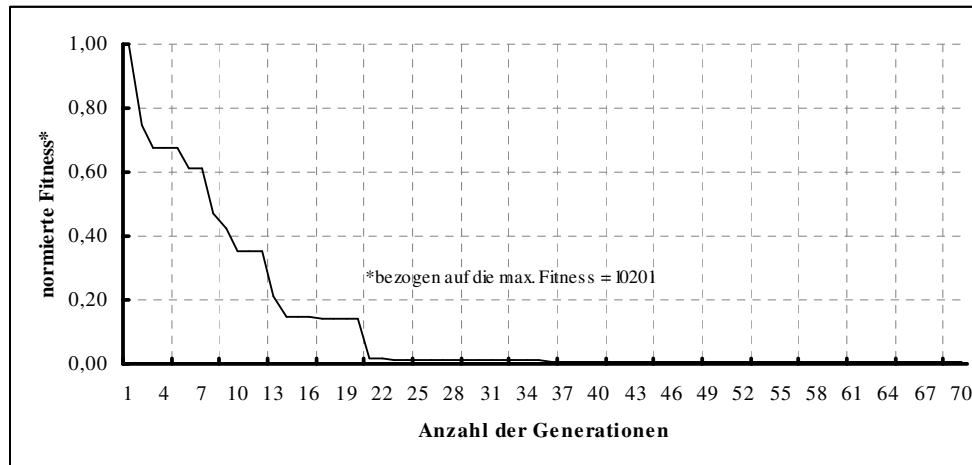


Abbildung 5.38: Überdachung einer Radrennbahn, Fitnessverlauf von Entwurfsschritt 1

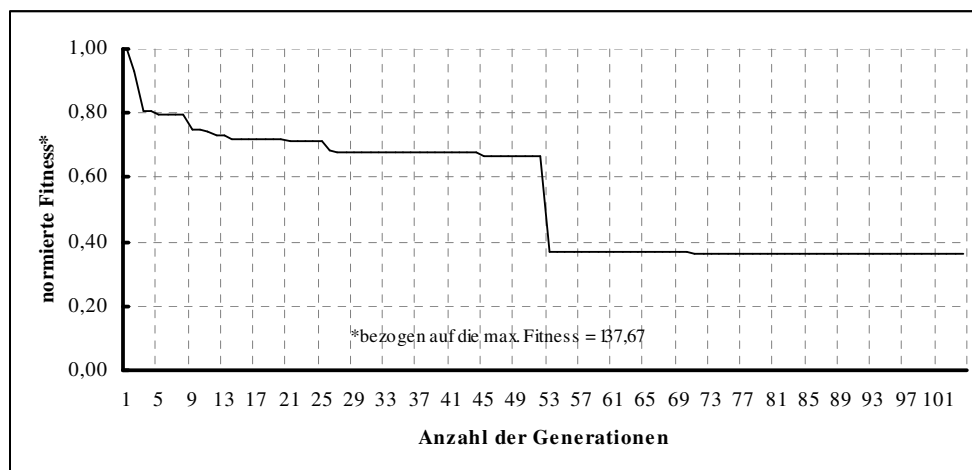


Abbildung 5.39: Überdachung einer Radrennbahn, Fitnessverlauf von Entwurfsschritt 2

Die benötigten Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösungen 1 und 2 sind in Tabelle 5.9 aufgelistet.

Tabelle 5.9: Überdachung einer Radrennbahn, Rechenzeiten

Rechenzeit	pro Generation	alle Generationen
Entwurfsschritt 1	ca. 399 s	ca. 7 h 46 min
Entwurfsschritt 2		ca. 11 h 32 min
gesamt	-	ca. 19 h 18 min

Die hohen Rechenzeiten für den zweiten Entwurfsschritt gegenüber dem ersten Entwurfsschritt lassen sich zurückführen auf den vergrößerten Suchraum im Entwurfsschritt 2, hervor-

gerufen durch die neu festgelegten Variationsbereiche der freien z-Koordinaten mit kleineren Schrittweiten.

Insgesamt werden ca. 20 Stunden zum Auffinden der endgültigen Entwurfslösung (= Entwurfslösung 2) benötigt.

5.4 Zusammenfassung

Die Zielstellung dieses Abschnittes umfasst die Überprüfung des in Abschnitt vier entwickelten Evolutionären Algorithmus (Abb. 4.28) hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zur Lösung praktischer Entwurfsaufgaben.

Hierzu werden Entwurfsaufgaben folgender Entwurfsobjekte gelöst:

- *einschiffige Stahlhalle* mit dem Entwurf vom
 - Element einschiffiger Rahmen
 - Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle
 - Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle
- *zweischiffige Stahlhalle* mit dem Entwurf vom Element zweischiffiger Rahmen
- *Wassertank* mit dem Entwurf vom Gesamtsystem
- *Überdachung einer Radrennbahn* mit dem Entwurf vom Gesamtsystem.

Gegenüber traditionellen Entwurfsstrategien wird unter Verwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit dem Evolutionären Algorithmus in Abbildung 4.28 als Optimierungsverfahren Entwurfslösungen erzielt, die definierte Entwurfsziele mit hochwertigerer Güte erfüllen. Die erforderlichen Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösungen liegen in annehmbaren Bereichen hinsichtlich üblicher Rechenzeiten in der Entwurfspraxis.

Der Evolutionäre Algorithmus in Abbildung 4.28 kann aufgrund der erzielten Entwurfsergebnisse im aktuellen Abschnitt (Abschnitt 5) hinsichtlich der Kriterien Qualität der Entwurfslösung und Effizienz zur Bestimmung der Entwurfslösung als ein leistungsstarkes Optimierungsverfahren für die optimierungsbasierte Entwurfsstrategie zur Lösung unterschiedlichster Entwurfsaufgaben bezeichnet werden.

Für den Planungsingenieur in der Praxis bedeutet dieses Resultat, dass eine Anwendung der optimierungsbasierten Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen als Optimierungsverfahren in der Entwurfspraxis angestrebt werden kann.

6 Schlussbemerkungen

Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit liefert durch die Bereitstellung von Evolutionären Algorithmen, die eine Automatisierung von Syntheseprozessen ermöglichen, einen Beitrag zur Rationalisierung des Entwurfsprozesses. Es werden Evolutionäre Algorithmen betrachtet, deren Wirkungsweise auf den Grundprinzipien Genetischer Algorithmen beruht.

In Evolutionären Algorithmen werden die Grundmechanismen der natürlichen biologischen Evolution in Form algorithmierter Teilprozesse abgebildet. Mit der Festlegung von Populationsmerkmalen, Verfahren und Parametern (= Einstellungen) für die Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen wird das Verhalten Evolutionärer Algorithmen beeinflusst.

An Entwurfsaufgaben wurde die Wirkungsweise verschiedener Einstellungen für ausgewählte Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen analysiert. Hieraus resultierende Erkenntnisse wurden in den nachstehenden Schwerpunkten umgesetzt:

- Festlegung von Evolutionären Algorithmen mit unterschiedlichen Wirkungsweisen
- Aufbereitung und anwenderfreundliche Darstellung von Prozessaktivitäten und Empfehlungen zur Anwendung Evolutionärer Algorithmen in der Entwurfspraxis in einem Flussbild.

Weiterhin ist es gelungen, einen robusten Evolutionären Algorithmus zu definieren. Mit diesem Evolutionären Algorithmus ist es möglich, für unterschiedliche Klassen von Entwurfsaufgaben im Stahlhochbau qualitativ zufrieden stellende Entwurfslösungen zu erarbeiten. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser Evolutionäre Algorithmus auch zur Lösung von Entwurfsaufgaben in anderen Bauweisen eignet.

Nachfolgend wurden hybride Evolutionäre Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz entwickelt. Hierzu sind Evolutionäre Algorithmen mit einem wachstumsorientierten Algorithmus erweitert worden, der adaptive Wachstumsvorgänge simuliert.

Mit diesen hybriden Evolutionären Algorithmen werden Individuen einer Population unter folgenden Zielstellungen verändert:

- Verbesserung ihrer Fitness
- Verlagerung bzw. Annäherung in bzw. an den zulässigen Bereich.

Nachstehende Eigenschaften charakterisieren diese hybriden Evolutionären Algorithmen:

- Die Entwurfslösungen erfüllen definierte Entwurfsziele im Allgemeinen mit besserer Qualität gegenüber Referenzlösungen, die durch eine traditionelle Entwurfsstrategie bzw. eine optimierungsbasierte Entwurfsstrategie unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen ermittelt wurden. Dies begründet sich mit der lokalen Verfeinerung des Suchraumes.
- Die derzeit verfügbare Hard- und Software in Ingenieurbüros kann Entwurfsaufgaben mit diesen hybriden Evolutionären Algorithmen aufgrund der hohen Rechenzeiten nicht effektiv lösen. Damit ist deren Anwendung in der Entwurfspraxis zum jetzigen Zeitpunkt noch begrenzt.

Damit gelingt es für den Entwurf von Baukonstruktionen, die gegebene Qualität des Suchvorgangs Evolutionärer Algorithmen deutlich zu verbessern.

Abschließend wird zur Lösung unterschiedlichster Typen von Entwurfsaufgaben für die Objekte einschiffige und zweischiffige Stahlhalle (Abschnitt 5.2) sowie Wassertank und Überdachung einer Radrennbahn (Abschnitt 5.3) der robuste Evolutionäre Algorithmus verwendet.

Gegenüber den mit traditionellen Entwurfsstrategien ermittelten Referenzlösungen werden nachstehende Ergebnisse erreicht:

- Materialeinsparungen
- effektivere Systemkonfigurationen.

Ein nicht zu unterschätzendes Nebenprodukt der Anwendung Evolutionärer Algorithmen im Entwurfsprozess ist der Erfahrungszuwachs für den Planer, da auch solche Parameterbereiche und –kombinationen untersucht werden, die aus der Entwurfsroutine üblicherweise nicht als relevant eingeschätzt werden.

Ausblick

Evolutionäre Algorithmen können in der Zukunft ein effektives Arbeitswerkzeug für die Behandlung von Syntheseprozessen im Entwurfsprozess darstellen. Das gilt sowohl für den Entwurf von relativ überschaubaren Baukonstruktionen, wie zum Beispiel der Entwurf von Rahmentragwerken, als auch für sehr individuelle, umfangreiche Bauwerke.

Für den Einsatz Evolutionärer Algorithmen in der Entwurfspraxis muss anwenderfreundliche Software entwickelt werden, insbesondere für die qualitativ hochwertigen hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz.

Bionik

Forschungsbereich, der naturanaloge Prinzipien bei der Gestaltung technischer Lösungen heranzieht

Chromosomen

siehe Individuum

Elitismus (= Elitism)

unveränderte Übernahme von Individuen mit der höchsten Fitness in die nächste Generation

Eltern [BRU96]

Individuen, die Nachkommen erzeugen

Entwurfsbedingungen

Bedingungen, die an die Lösungen einer Entwurfsaufgabe gestellt werden

Entwurfslösung / Entwurfsvariante

Lösung einer Entwurfsaufgabe, indem ein Satz variabler Entwurfsgrößen so bestimmt wird, dass eine oder mehrere Entwurfsziele bestmöglich erfüllt sind und gleichzeitig definierte Entwurfsbedingungen eingehalten werden

Entwurfsziele

angestrebte Ziele für Lösungsvarianten einer Entwurfsaufgabe

evolutionäre Operatoren

Suchoperatoren (Rekombination und Mutation) Evolutionärer Algorithmen, die Informationen der Individuen verändern

exploration

Erforschung neuer Regionen des Suchraumes

exploitation

Feinabstimmung des bereits durch die Suche eingegrenzten Gebietes

Fitness

ist eine Bewertungsfunktion, die die Aufgabe der Umwelt übernimmt und die Qualität der Individuen (= Lösungen) bestimmt

Generation

Population zu einem bestimmten Zeitraum

global orientierte Parameteroptimierung

Problemstellungen mit reellen und ganzzahligen Variablen, bei denen meist keine Korrelation zwischen den Variablen vorliegt. Es wird keine Annahme über die Art der Zielfunktion angenommen. Die Optimierungsvariablen verändern sich unabhängig voneinander.

Heuristik

erkenntnistheoretisches und methodisches Verfahren zur Gewinnung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und zur Problemlösung

Individuum

repräsentiert im Evolutionären Algorithmus eine Lösung

konstante Entwurfsgrößen

repräsentieren die unveränderten Größen einer Entwurfsaufgabe

Mutation

Suchoperator Evolutionärer Algorithmen, der Information in einem Individuum sprunghaft, zufällig verändert

Nachkommen

Individuen, die durch evolutionäre Operatoren erzeugt werden

Nebenbedingungen

definieren den zulässigen Bereich einer Optimierungsaufgabe durch Gleichungen bzw. Ungleichungen, die im speziellen Fall auch die Schranken von Optimierungsvariablen definieren

Optimum (global)

stellt innerhalb eines bestimmten Bereiches einen Extremwert dar, wobei es außerhalb dieses Bereiches keinen besseren Extremwert gibt

Optimum (lokal)

stellt innerhalb eines bestimmten Bereiches einen Extremwert dar, wobei es außerhalb dieses Bereiches bessere Extremwerte geben kann

Optimierungskonstanten

repräsentieren die unveränderten Größen einer Optimierungsaufgabe

Optimierungsvariablen

repräsentieren die zur Variation freigegebenen Größen einer Optimierungsaufgabe

Parameter

Hilfsgröße bzw. Hilfsveränderliche, z.B. innerhalb evolutionärer Teilprozesse

Population

mehrere Individuen bilden eine Population

Prämisse

Voraussetzung

Rekombination

Suchoperator Evolutionärer Algorithmen, der durch den strukturierten Austausch von Informationen zwischen zwei Individuen (= Eltern) Nachkommen bildet

Selektion

Auswahl von Individuen aus einem Selektionspool entsprechend ihrer Fitness (Paarungsselektion: Auswahl von Eltern zur Erzeugung von Nachkommen; Umweltselektion: Auswahl von Individuen für die Zusammensetzung der neuen Generation)

Selektionsdruck

Selektionswahrscheinlichkeit des besten Individuums, verglichen mit der durchschnittlichen Selektionswahrscheinlichkeit aller Individuen des Selektionspools der aktuellen Population

Selektionswahrscheinlichkeit

Verhältnis von der Fitness des jeweiligen Individuums zur Gesamtfitness aller Individuen der aktuellen Population

Sensitivitätsanalyse

Durchführung von Untersuchungen zum Einfluss einzelner Eingabewerte auf das Ergebnis

Startpopulation

initialisierte Lösungsmenge eines Evolutionären Algorithmus

traditionell

herkömmlich, üblich, gebräuchlich

variable Entwurfsgrößen

repräsentieren die zur Variation freigegebenen Größen einer Entwurfsaufgabe

Zielfunktion

- reellwertige Funktion der Optimierungsvariablen
- Verknüpfung der Optimierungsvariablen und -konstanten zu einem Wert (=Zielfunktionswert)

zulässiger Bereich einer Entwurfsaufgabe

- wird durch die Entwurfsbedingungen definiert
- im zulässigen Bereich liegen die Lösungen der Entwurfsaufgabe die alle Entwurfsbedingungen erfüllen

zulässiger Bereich einer Optimierungsaufgabe

- wird durch die Nebenbedingungen definiert
- im zulässigen Bereich liegen die Lösungen der Optimierungsaufgabe die alle Nebenbedingungen erfüllen

I Literatur

- [ACK83] Ackermann, Kurt: Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren. Stuttgart, Karl Krämer Verlag, 1983. – ISBN 3-7828-1108-9
- [ACK95] Ackermann, Thomas: Wärmeschutzverordnung 1995, Kommentar: Anforderungsnachweise – Berechnungsbeispiele – Sonderprobleme. Stuttgart, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1995. – ISBN 3-519-05075-7
- [ADI02] Adimurthy, V.; Selent, B.; Rudolph, S.; Weigand, B.: Qualitative and Quantitative Investigation of the Parameters of Genetic Algorithms for Optimum Cooling of Bodies by Internal Convection. In: WCCM V - Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, 2002
- [AND01] Andre, J.; Siarry, P.; Dognon, T.: An improvement of the standard genetic algorithm fighting premature convergence in continuous optimization. In: Advances in Engineering Software 32 (2001), S. 49-60
- [AST98] Astron – Hallen + Bausysteme: Produkt-Spezifikation. Firmenprospekt, Edition Nr. 5, Januar 1998
- [BAE00a] Bäck, T.; Fogel, D.B.; Michalewicz, T. (u.a.): Evolutionary Computation 1 – Basic Algorithms and Operators. Bristol/Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 2000. - ISBN 0 7503 0664 5
- [BAE00b] Bäck, T.; Fogel, D.B.; Michalewicz, T. (u.a.): Evolutionary Computation 2 – Advanced Algorithms and Operators. Bristol/Philadelphia: IOP Publishing Ltd, 2000. - ISBN 0 7503 0665 3
- [BAI94] Baier, Horst; Seeßelberg, Christoph; Specht, Bernhard: Optimierung in der Strukturmechanik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1994. - ISBN 3-528-08899-0
- [BAK85] Baker, J.E.: Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms. In: Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and their Application. Hilldale (New Jersey, USA), Lawrence Erlbaum Associates, 1985, S. 101 - 111
- [BEC97] Becker, Simon: Die Evolutionsstrategie. <http://ruppert.fh-worms.de/~evolag/diplomarbeiten9596/becker/node11.html>
- [BER96] Bernreuther, Martin: Diskrete Optimierung mit Evolutionsstrategien auf parallelen, verteilten Systemen. Stuttgart, Universität, Diplomarbeit, 1996
- [BIT99] Bitz, Michael: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre – Entscheidungstheoretische Grundlagen. Hagen, FernUniversität, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft, Kursbegleithefte, 1999
- [BLE88] Bletzinger, Kai-Uwe: Zur baustatischen Optimierung von Tragwerksformen. In: Natürliche Konstruktionen – Mitteilungen des SFB 230 Heft 1 – Aus den Teilprojekten / Sonderforschungsbereich 230. Stuttgart: Kurz & Co., Reprographie GmbH, 1988, S. 145 - 152. – ISBN 3-927078-00-X
- [BLE97] Bletzinger, Kai-Uwe: Neue Entwicklungen und Anwendungen der Tragwerksoptimierung. In: Wissenschaft und Praxis, 6. Massivbauseminar 1997, Band 85, Veröffentlichungen der Fachhochschule Biberach, S. 53-65
- [BMS91a] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, Hallenbau – 44.3 Hallenwände mit Stahlkassetten. Düsseldorf, (I) 1991
- [BMS91b] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, Hallenbau – 44.5 Hallenwände mit Gasbeton. Düsseldorf, (I) 1991

-
- [BMS99a] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, Hallenbau – 44 Außenwände für Hallen. Düsseldorf, (IV) 1999
- [BMS99b] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, Hallenbau – 44.2 Hallenwände aus Stahltrapezprofilen. Düsseldorf, (IV) 1999
- [BMS00a] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, Hallenbau – 44.1 Mauerwerk im Hallenbau. Düsseldorf, (III) 2000
- [BMS00b] Bauen mit Stahl: Stahlbau Arbeitshilfen, 46.0 Sandwichelemente. Düsseldorf, (I) 2000
- [BMS00c] Bauen mit Stahl: Dach- und Wandkonstruktionen im Hallenbau. Düsseldorf, Dokumentation 609, März 2000
- [BMVBW01] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bonn: Januar 2001
- [BRI96] Brinkmann, Jochen: Formoptimierung von Bauteilen auf der Basis von FEM-Berechnungen – die CAO-Methode. Clausthal, Technische Universität, Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, <http://www.imab.tu-clausthal.de/Nachrichten/CAO.htm>
- [BRU96] Bruns, Ralf: Wissensbasierte Genetische Algorithmen. Köln: Hundt Druck GmbH, 1996. - ISBN 3-89601-134-0
- [BUE77] Büttner, Oskar, Hampe, Erhard: Bauwerk Tragwerk Tragstruktur – Band 1. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1977
- [BUE86] Büttner, Oskar; Stenker, Horst: Stahlhallen – Entwurf und Konstruktion. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1986
- [CAI95] Cai, Jianbo: Diskrete Optimierung dynamisch belasteter Tragwerke mit sequentiellen und parallelen Evolutionsstrategien. Essen, Universität-Gesamthochschule, Dissertation, 1995
- [CAM96] Camp, C. V.; Pezeshk, S.; Cao, G.: Design of Framed Structures Using a Genetic Algorithm. In: Proceedings of 1st US Japan Seminar an Structural Optimization. Chicago: April 1996, S. 19 – 30
- [CAM97] Camp, C. V.; Pezeshk, S.; Cao, G.: Optimized Steel Frame Design Using a Genetic Algorithm. In: ASCE Structures Congress XV. Portland: 1996. S. 19 - 30
- [CAR89] Caruana, R. A.; Eshelmann, L. A.; Schaffer, J. D.: Representation and hidden bias II: Eliminating defining length bias in genetic search via shuffle crossover. In: Sridharan, N.S.(ed.): Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Mateo (California, USA), Morgan Kaufmann Publishers, Vol. 1, 1989, S. 750 - 755
- [CON98] Conrad, Klaus-Jörg: Grundlagen der Konstruktionslehre. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1998. – ISBN 3-446-19467-3
- [DAR89] Darwin, Charles: Die Entstehung der Arten. Stuttgart: Philipp Reclam jun. GmbH & Co., 1989. - ISBN 3-15-003071-4
- [DAS97] Dasgupta, D.; Michalewicz, Z.: Evolutionary Algorithms in Engineering Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1997. – ISBN 3-540-62021-4
- [DAV91] Davis, L.D.: Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, 1991
- [DAW96] Dawid, Herbert: Adaptive Learning by Genetic Algorithms. Berlin: Springer-Verlag, 1996. - ISBN 3-540-61513-x
- [DAW99] Dawid, Herbert: Adaptive Learning by Genetic Algorithms. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. - ISBN 3-540-65607-3

-
- [DEB90] Deb, Kalyanmoy: Optimal Design of Class of Welded Structures via Genetic Algorithms. In: Proceedings of the 31st AIAA/ASCE/ASME/AHS SDM Conference. Long Beach: 1990. S. 444 - 453
- [DEB91] Deb, Kalyanmoy: Optimal Design of a Welded Beam via Genetic Algorithms. In: AIAA Journal (1991) November, S. 2013 - 2015
- [DEJ75] De Jong, K.A.: An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. University of Michigan, Dissertation (Dissertation Abstracts International, 36(10), 5140B, University Microfilms No. 76-9381), 1975
- [DIM82] Dimitrov, Nikola S.; Hoyer, Hans Florian: Optimierung der Tragwerke. Stuttgart, Universität, Institut für Tragwerkskonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Forschungsberichte, 8, 1982. - ISBN 3-922302-08-4
- [DON] Donges Hallen. Firmenprospekt, Darmstadt, J. Förster
- [DSTV99] Deutscher Stahlbau-Verband DSTV: Wirtschaftsdaten – Der deutsche Stahlbau. Köln: Werbeagentur Birkhölzer, 1999
- [DSTV00a] Deutscher Stahlbau-Verband DSTV: Wirtschaftsdaten – Der deutsche Stahlbau. Köln: Werbeagentur Birkhölzer, 2000
- [DSTV00b] Deutscher Stahlbau-Verband (in Zsarb. mit dem Institut für Stahlbau Leipzig GmbH): Stahlohochbau - Richtlinien. Düsseldorf: Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, 2000
- [DUB98] Dubas, P.; Gehri, E.: Stahlohochbau. Berlin, Springer-Verlag, 1998
- [DUE77] Dück, Werner: Diskrete Optimierung. Berlin: Akademie-Verlag, 1977
- [DUE78] Dück, Werner: Optimierung unter mehreren Zielen. Berlin: Akademie-Verlag, 1978
- [ELP88] Elperin, T.: Monte Carlo Structural Optimization in Discrete Variables with Annealing Algorithm. In: International Journal of Numerical Methods in Engineering (1988) 26, S. 815 - 821
- [EST87] Ester, Jochen: Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1987. - ISBN 3-341-00242-1
- [FAR97] Farkas, József; Jármay, Károly: Analysis and Optimum Design of Metal Structures. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. – ISBN 90-5410-669-7
- [FAR02] Farmani, R.; Javadi, A.A.: An Intelligent Hybrid Genetic Algorithm. In: WCCM V - Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, 2002
- [FER87] Ferscha, F.: Querschnittsoptimierung biegesteifer, geschweißter Stahltragwerke. In: Stahlbau 10 (1987), S. 313 - 318
- [FER93] Ferguson, Eugene S.: Das innere Auge. Von der Kunst des Ingenieurs. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 1993. – ISBN 3-7643-2862-2
- [FIG88] Figel, Klaus: Optimieren beim Konstruieren – Einsatz von Optimierungsverfahren, CAD und Expertensystemen. München/Köln: Carl Hanser Verlag, 1988. – ISBN 3-446-15344-6
- [FIS90] Fischer, Manfred: Ingenieurentwurf und Architektenentwurf. In: Bauwerksplanung. Köln: Rudolf Müller GmbH, 1990. – ISBN 3-481-00264-5
- [FOG66] Fogel, L.J.; Owens, A.J.; Walsh, M.J.: Artificial Intelligence through Simulated Evolution. New York: John Wiley, 1966.
- [FOG92] Fogel, D. B.: Evolving Artificial Intelligence. San Diego, University of California, Dissertation, 1992
- [FUE89] Füg, Dieter (u.a.): Stahltragwerke im Industriebau – Berechnung und Konstruktion. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1989. – ISBN 3-345-00296-5

-
- [GEN97] Gen, Mitsuo; Cheng, Runwei: Genetic Algorithms and Engineering Design. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. - ISBN 0-471-12741-8
- [GEN00] Gen, Mitsuo; Cheng, Runwei: Genetic Algorithms & Engineering Optimization. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. - ISBN 0-471-31531-1
- [GER98] Gerhard, Edmund: Entwickeln und Konstruieren mit System. Renningen-Malmsheim, expert-Verlag, 1998. – ISBN 3-8169-1452-7
- [GOL83] Goldberg, David E.: Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning. Michigan, University of Michigan at Ann Arbor, Dissertation, 1983
- [GOL86] Goldberg, D.E.; Samtani, M.P.: Engineering Optimization Via Genetic Algorithm. In: Proceedings of 9th Conference on Electronic Computation ASCE. New York, 1986. S. 471-482
- [GOL87] Goldberg, D.E.: Computer-Aided Pipeline Operation Using Genetic Algorithms and Rule Learning. PART I: Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. In: Engineering with Computers (1987) 3, S. 35-45
- [GOL89] Goldberg, David E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, Mass. (u.a.): Addison Wesley Verlag, 1989. – ISBN 0-201-15767-5
- [GOL91] Goldberg, David E.; Deb K.: A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms. In: Foundations of Genetic Algorithms. San Mateo: Addison Wesley Verlag, 1991, S. 69 - 93. – ISBN 1-558-60170-8
- [GOT00] Gottlieb, Jens: Evolutionary Algorithms for Constrained Optimization Problems. Aachen: Shaker Verlag, 2000. – ISBN3-8265-7783-3
- [GRA88] Graefe, Rainer: Zwei baugeschichtliche Forschungsarbeiten zur Geschichte des Konstruierens. In: Natürliche Konstruktionen - Beiträge zum I. Int. Symposium des SFB 230 (Teil 2), TUB Hamburg. Stuttgart: Reprographie, Sprint-Druck GmbH, 1988. - ISSN 0934-0963
- [GRA97] Graefe, Rainer: Zur Geschichte des Konstruierens. Wiesbaden, Lizenzausgabe für den Fourier Verlag GmbH, 1997. - ISBN 3-952037-92-6
- [GRI98] Grill, Heiner: Ein objektorientiertes Programmsystem zur diskret-kontinuierlichen Strukturoptimierung mit verteilten Evolutionsstrategien. Düsseldorf: Fortschrittberichte VDI - VDI Verlag GmbH, 1998. - ISBN3-18-352010-9
- [GRI99] Grimm, Friedrich: Hallen aus Stahl, Dokumentation 534. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum, 1999. – ISSN 0175-2006
- [GUT85] Gutmann; Haring; Schwarz: Wirtschaftliches Bauen. Köln: Deutscher Stahlbau-Verband DSTV:, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, 1985
- [GUT97] Gutkowski, W. (ed.by): Discrete Structural Optimization. Wien, New York: Springer Verlag, 1997. – ISBN 3-211-82901-6
- [HAM77] Hampe, Erhard; Heller, Hanfried; Walther, Jochen; Wölfer, Roland: Zum Tragverhalten von Stabtragwerken. Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Sektion Bauingenieurwesen, 1977
- [HAM98] Hammel, Ulrich; Bäck, Thomas: Optimierung in der Simulation: Evolutionäre Algorithmen. Dortmund, Universität, Fachbereich Informatik, SFB 531: Computational Intelligence, 1998
- [HAR74] Hartmann, Dietrich: Optimierung balkenartiger Zylinderschalen aus Stahlbeton mit elastischem und elastischem Werkstoffverhalten. Dortmund, Universität, Abteilung für Bauwesen, Dissertation, 1974

-
- [HAR77] Hartmann, Dietrich: Zur Problematik der optimalen Projektierung von Tragsystemen dargestellt an einem Stahlskelettbau. In: Minimalkonstruktionen. Köln-Braunsfeld: Rudolf Müller GmbH, 1977. – ISBN 3-481-11131-2
- [HAR78] Hartmann, Dietrich: Zur Systematik und Methodik in der Tragwerksoptimierung. Dortmund, Universität, Abteilung Bauwesen, Habilitationsschrift, 1978
- [HAR90] Hartmann, Dietrich: Wissensverarbeitung mit Computern – Eine neue Dimension der Problemlösung im Bauwesen. In: Bauwerksplanung. Köln: Rudolf Müller GmbH, 1990. – ISBN 3-481-00264-5
- [HAU94] Hauser, Reiner: Parallele Genetische Algorithmen und die Optimierung von Field Programmable Gate Arrays. Heidelberg, Ruprechts-Karls-Universität, Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät, Dissertation, 1994
- [HAU98] Haupt, Randy L.; Haupt, Sue Ellen: Practical Genetic Algorithms. New York (u.a.): John Wiley & Sons, Inc., 1998. - ISBN 0-471-18873-5
- [HEI94] Heistermann, Jochen: Genetische Algorithmen. Stuttgart/Leipzig: B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1994. - ISBN 3-8154-2057-1
- [HEL89] Hellmich, K.: Evolutionsstrategie bei der Kostenminimierung von Schwergewichtsmauern. In: Bauingenieur (1989) 64, S. 85-89
- [HES03] Hess, R.: Konstruieren mit Glas unter Berücksichtigung spezieller Sicherheitsaspekte. In: 25. Stahlbauseminar 2003 - Wissenschaft und Praxis, Veröffentlichungen der Fachhochschule Biberach Band 121, 2003. – ISSN 1615-4266
- [HOE76] Höfler, Alfred: Formoptimierung von Leichtbaufachwerken durch Einsatz einer Evolutionsstrategie. Berlin: Universitätsbibliothek der Technischen Universität, Abteilung Publikationen, 1976. – ISBN 3-7983-0569-2
- [HOL75] Holland, J.H.: Adaption in natural and artificial systems. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975
- [HUP70] Hupfer, Peter: Optimierung von Baukonstruktionen. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1970
- [IMF] Optimierung von Bauteilen. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung (II), IMF-Institutsbroschüre, <http://hikwww9.fzk.de/imf/cd/33.htm>
- [INT01] <http://www.statistik-berlin.de/pms2000/sg15/2001/01-08-10.html>
- [JES96] Jesberg, Paulgerd: Die Geschichte der Ingenieurbaukunst aus dem Geist des Humanismus. Stuttgart: Dt. Verl.-Anst., 1996. – ISBN 3-421-03078-2
- [JOE70] Joedicke, Jürgen; Matthesius, Christian; Schulte, Hans-Otto: Merkmalsbestimmung als Teil des Planungsvorganges. In: Entwurfsmethoden in der Bauplanung (Arbeitsbericht zur Entwurfsmethodik 4). Stuttgart/Bern: Karl Krämer Verlag, 1970
- [KIN94a] Kinnear, Kenneth E.: Advances in Gentic Programming. Cambridge, Mass, (u.a.): The MIT Press, 1994. - ISBN 0-262-11188-8
- [KIN94b] Kinnebrock, Werner: Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1994. - ISBN 3-486-22697-5
- [KIN99] Kindmann, Rolf; Krahwinkel, Manuel: Stahl- und Verbundkonstruktionen. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 1999. - ISBN 3-519-05266-0
- [KOE92] Kölsch, Gregor: Diskrete Optimierungsverfahren zur Lösung konstruktiver Problemstellungen im Werkzeugmaschinenbau. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1992. – ISBN 3-18-141301-1
- [KOH99] Kohlmorgen, Udo: Feinkörnig parallele genetische Algorithmen. Karlsruhe, Universität Fridericiana, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, 1999

-
- [KOL90] Kollár, Lajos: Entwurf von Tragwerken: Wissenschaft oder Kunst?. In: Bauwerksplanung. Köln: Rudolf Müller GmbH, 1990. – ISBN 3-481-00264-5
- [KOU94] Koumousis, V.K.; Georgiou, P.G.: Genetic Algorithms in Discrete Optimization of Steel Truss Roofs. In: Journal of Computing in Civil Engineering (1994) July, S. 309-325
- [KOZ92] Koza, John R: Genetic programming. Cambridge, Mass. (u.a.): MIT Press, 1992. – ISBN 0-262-11189-6
- [KRI02] Krishnamoorthy, C.S.; Prasanna Venkatesh P.; Sudarshan, R.: Object-Oriented Framework for Genetic Algorithms with Application to Space Truss Optimization. In: Journal of Computing in Civil Engineering (2002) January, S. 66-75
- [KRU98] Krüger, Ulrich: Stahlbau – Teil 1. Grundlagen. Berlin, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, 1998. – ISBN 3-433-01765-4
- [KUL95] Kull, Ulrich; Ramm, Ekkehard; Reiner, Rolf: Evolution und Optimierung - Strategien in Natur und Technik. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1995
- [LAN] <http://www.langenscheidt.aol.de/>
- [LAW87] Lawo, Michael: Optimierung im konstruktiven Ingenieurbau. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1987. - ISBN 3-528-08832-X
- [LES70] Lesniak, Zdzislaw K.: Methoden der Optimierung von Konstruktionen unter Benutzung von Rechenautomaten. Berlin/München/Düsseldorf: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1970. - ISBN 3-433-00054-9
- [LIP76] Lipp, Wolfgang: Ein verfahren zur optimalen Dimensionierung allgemeiner Fachwerkkonstruktionen und ebener Rahmentragwerke. Bochum, Ruhr Universität, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Dissertation, 1976
- [MAA01] Maas, Michael: Computergestützte Methode für das Entwerfen von Tragkonstruktionen. Wuppertal, Bergische Universität Gesamthochschule, Fachbereich Bauingenieurwesen, Dissertation, 2001
- [MAT92] Mattheck, Claus. Die Baumgestalt als Autobiographie – Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache. Braunschweig, Bernhard Thalacker Verlag, 1992. – ISBN 3-87815-050-4
- [MAT94] Mattheck, Claus: Der Baum – Autobiograph und Designlehrmeister. In: Arch Plus (1994) 124/125, S. 64-68. – ISSN 0587-3452
- [MAT97] Mattheck, Claus: Design in der Natur - Der Baum als Lehrmeister. Freiburg im Breisgau: Rombach Verlag, 1997. - ISBN 3-7930-9150-3
- [MAT00] Mattheck, Claus: Der Baum als Vorbild für die Technik. In: Garten + Landschaft (2000) 4, S. 35-38. - - ISSN 0016-4720
- [MAU95] Maute, K.; Ramm, E.: Adaptive topology optimization. In: Structural Optimization, (1995) 10, S. 110-112
- [MAU98] Maute, Kurt: Topologie- und Formoptimierung von dünnwandigen Tragwerken. Stuttgart, Universität, Institut für Baustatik, Dissertation, 1998
- [MIC99] Michalewicz, Zbigniew: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Berlin: Springer-Verlag, 1995. - ISBN 3-540-60676-9
- [MIT96] Mitchell, Melanie: An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, Mass. (u.a.): The MIT Press, 1996. - ISBN 0-262-13316-4
- [MOR87] Mortensen, Manfred; Jänike, Johannes: Planen und Entwerfen im Bauwesen. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1987

-
- [MUE93] Mühlenbein, H.; Schlierkamp-Vossen, D.: Predictive Models for the Breeder genetic Algorithms: I. Continuous Parameter Optimization. In: Evolutionary Computation, 1(1993) 1, S. 25-49
- [NAC98] Nachtigall, Werner: Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. - ISBN 3-540-63403-7
- [NIS94] Nissen, Volker: Evolutionäre Algorithmen - Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, 1994. - ISBN 3-8244-0217-3
- [NIS97] Nissen, Volker: Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Braunschweig (u.a.): Vieweg Verlag, 1997. - ISBN 3-528-05499-9
- [OST97] Ostermeier, Andreas: Schrittweisenadaptation in der Evolutionsstrategie mit einem entstochastisierten Ansatz. Berlin, Technische Universität, Fachbereich 6 (Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften), Dissertation, 1997
- [PAH97] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. – ISBN 3-540-61974-7
- [PAS96] Pasternak, H.: Neue Entwicklungen im Stahlhallenbau. In: 15. Stahlbau – Seminar Steinfurt (1996)
- [PET93] Petersen, Christian: Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. Braunschweig (u.a.): Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1993. – ISBN 3-528-28837-X
- [PET98] Petzold; Thomas: Ein Beitrag zur Entwurfsoptimierung ebener Fachwerke mit Evolutionsstrategien. Stuttgart, Universität, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Dissertation, 1997. - ISBN 3-930683-30-X
- [PEZ00] Pezeshk, S.; Camp, C.V.; Chen, D.: Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization. In: Journal of Structural Engineering (2000) March, S. 382 - 388
- [PIT77] Pittioni, Gernot: Optimierung von Konstruktionsabmessungen unter Heranziehen eines math. Verfahrens (Gezeigt an Beispielen des Stahlbaues). München, Technische Universität, Fachbereich Architektur, Dissertation, 1977 (Gesamtherstellung: Bamberg, a Ku-Fotodruck)
- [POH96] Pohlheim, Hartmut: Anwendung Genetischer Algorithmen zur optimalen Steuerung des Gewächshausklimas. In: GMA Kongress `96, VDI-Berichte 1282. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996. 799-809
- [POH98] Pohlheim, Hartmut: Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen. Aachen: Shaker Verlag, 1998. - ISBN 3-8265-4097-2
- [POH00] Pohlheim, Hartmut: Evolutionäre Algorithmen - Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. - ISBN 3-540-66413-0
- [POL87] Polóny, Stefan:mit zaghafter Konsequenz. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1987. - ISBN 3-258-08781-1
- [QUA98] Quagliarella, D.; Périaux, J.; Poloni, C.; Winter, G. (u.a.): Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science. New York: John Wiley & Sons, 1998. - ISBN 0-471-97710-1
- [RAJ92] Rajeev, S.; Krishnamoorthy, C.S.: Discrete optimization of structures using genetic algorithms. In: Journal of Structural Engineering (1992) 5, S. 1233-1250

-
- [RAJ95] Rajan, S. D.: Sizing, Shape, and Topology Design Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm. In: Journal of Structural Engineering (1995) October, S. 1480-1486
- [RAJ97] Rajeev, S.; Krishnamoorthy, C.S.: Genetic Algorithms-Based Methodologies for Design Optimization of Trusses. In: Journal of Structural Engineering Vol. 123 (1997) No.3, March, S. 350-358
- [RAM98] Ramm, E.; Maute, K.; Schwarz, S.: Conceptual design by structural optimisation. In: Computational Modelling of Concrete Structures. Rotterdam, Balkema, 1998, S. 879-896. – ISBN 90 5410 946 7
- [REC73] Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie. Stuttgart-Bad Cannstatt: Friedrich Frommann Verlag, 1973. - ISBN 3-7728-0373-3
- [REC94] Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie '94. Stuttgart: frommann-holzboog-Verlag, 1994. - ISBN 3-7728-1642-8
- [REC98] Rechenberg, Ingo: EVOTECH - Einsatz der Evolutionsstrategie in Wissenschaft und Technik. Berlin, Technische Universität, Fachgebiet Bionik & Evolutionstechnik, Abschlußbericht zum Verbundprojekt, 1998
- [RIC89] Richardson, J. T.; Palmer, M. R.; Liepins, G.; Hillard, M.: Some guidelines for genetic algorithms with penalty functions. In: Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo (Californien), 1989, S. 191 - 197
- [RIC95] Richter, Gernot: Adaptive Systeme: Computer passen sich an. In: GMD Spiegel 2/95, S. 25-30
- [RIC98] Ricken, Herbert: Bauingenieure: zur Geschichte der Bauingenieurkunst- und Wissenschaft. Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1998
- [ROE88] Rösel, Wolfgang; Witte, Horst: Hallen aus Stahl – Planen und Bauen. Köln, Deutscher Stahlbau-Verband DSTV, 1988
- [ROT98] Rottke, Evelin: ExTraCAD – Computerunterstützung des architektonischen Tragwerkentwurfs. Aachen, RWTH, Fakultät Architektur, Dissertation, 1998
- [RUD95] Rudolph, Günter; Sprave, Joachim: A cellular genetic algorithm with self-adjusting acceptance threshold. In Proc. First IEE/IEEE International Conference Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications (GALESIA'95) IEE Press, London (1995), S. 365-372
- [SAS89] Sasmita, Lukita: Ganzheitliche Optimierungsstrategie zur Lösung technischer Entwurfsaufgaben am Beispiel von Stabtragwerken. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1989. – ISBN 3-18-149104-7
- [SBA02] Statistisches Bundesamt: Produktion im Produzierenden Gewerbe, Fachserie 4, Reihe 3.1, 2002. S. 94, 177, 193, 194, 195
- [SCH75] Schwefel, Hans-Paul: Evolutionstheorie und numerische Optimierung. Berlin, Technische Universität, Institut für Verfahrenstechnik, Dissertation, 1975
- [SCH88a] Schäfer, Hans-Günter: Eine Methode zur Wirtschaftlichkeitsanalyse dargestellt am Beispiel von Stahlhallen. Dortmund, Universität, Abteilung Bauwesen, Dissertation, 1988
- [SCH88b] Schmolz, Peter: Ein Beitrag zur ökonomischen, optimalen Dimensionierung und Formgebung allgemeiner Tragwerke mit Hilfe eines Entwurfsmodells. Stuttgart, Universität, Institut für Computer-Anwendungen, Dissertation, 1988

-
- [SCH88c] Schwefel, Hans-Paul: Technische versus biologische Optimierung – kann man aus der Analogie etwas lernen?. In: Natürliche Konstruktionen, Leichtbau in Architektur und Natur (Teil 2). Universität Stuttgart und Universität Tübingen, SFB 230, 1988, S. 156 – 159
- [SCH92] Schwefel, H.P.; Bäck, T.: Künstliche Evolution – eine intelligente Problemlösungsstrategie?. In: KI, 6(2), 1992. 20-27
- [SCH95a] Schwefel, Hans-Paul: Evolution and Optimum Seeking. New York (u.a.): John Wiley, 1995
- [SCH95b] Schöneburg, E., Heinzmann, F., Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: eine Einführung in die Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Bonn (u.a.): Addison-Wesley, 1995. – ISBN 3-89319-493-2
- [SCH95c] Scheer, J.: Zu Weiterentwicklungen im Stahlhallenbau. Hannover, Universität, Schriftenreihe , Institut für Stahlbau (1995) Heft 16
- [SCH98a] Schmidt, Holger: Diskrete und gemischt-diskrete Optimierung von Fachwerken mit genetischen Strategien. Weimar, Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Baumechanik Diplomarbeit, 1998
- [SCH98b] Schroeter, H.: Detailnachweise beim Zweigelenkrahmen. In: 17. Steinfurter Stahlbau-seminar, 1998
- [SCH00] Schilling, Steffi: Auswertung der durchgeführten Umfrage bei Stahlhallenherstellern in Deutschland (nicht veröffentlicht), Weimar, 2000
- [SCH01a] Schilling, S.; Werner, F.; Simbirkin, V.: Practical design of steel frame structures using different optimization algorithms and building codes. In: ECCM 2001 – European Conference on Computational Mechanics, Cracow (Poland), 2001
- [SCH01b] Schilling, S.; Werner, F.; Simbirkin, V.: The treatment of steel design codes and practical use of optimization methods. In: 7th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", Vilnius (Lithuania), 2001
- [SCH01c] Schopbach, Holger: Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden. Kassel, Universität Gesamthochschule, Fachbereich Bauingenieurwesen, Institut für Bauwirtschaft, Dissertation, 2001
- [SCH01d] Schlegel, Walter: Messen der Nachhaltigkeit. In: tec21 45 (2001), S. 7-12
- [SCH02] Schilling, S.; Trabert, J.; Werner, F.: Assessment of design methods using evolutionary algorithms demonstrated on steel hall constructions. In: WCCM V – Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna (Austria), 2002
- [SED86] Sedlacek; Stovernik, H.: Zum Biegedrillknicknachweis von Hallenrahmen mit voutenförmig ausgebildeten Stützen und Riegeln. In: Stahlbau 55 (1986), S. 225 – 232
- [SEE90] Seeßelberg, Christoph: Neue Elemente der Tragwerksoptimierung für frühe Entwurfsphasen am Beispiel von Leichtbaubrücken. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation, 1990
- [SIZ95] Stahl-Informationszentrum: Fassaden und Dächer - weltweit. Düsseldorf, Dokumentation 558, 1995. – ISSN 0715-2006
- [SIZ00] Stahl-Informationszentrum: Bausysteme aus Stahl für Dach und Fassade. Düsseldorf, Dokumentation 558, 2000. – ISSN 0715-2006
- [SLA03] Slang – Finite Elemente, Statik und Dynamik, Stochastik, Programmbeschreibung von SLang. <http://www.uni-weimar.de/Bauing/ism/Slang/slang.Allgem.htm>, 2003

-
- [SOH00] Soh, Chee Kiong; Yang, Yaowen: Genetic Programming-Based Approach for Structural Optimization. In: Journal of Computing in Civil Engineering, (2000) January, S. 31-37
- [SON95] Sonnemann, Helge: Computergestütztes Design als Methode zur optimierenden Auslegung von Baureihen und Variantenkonstruktionen im Stahlbau. Kassel, Universität Gesamthochschule, Fachbereich Bauingenieurwesen, Dissertation, 1995
- [SPE00] Spears, William M.: Evolutionary Algorithms - The Role of Mutation and Recombination. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 2000. - ISBN 3-540-66950-7
- [SYS89] Syswerda, G.: Uniform Crossover in Genetic Algorithms. In: Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo (Californien), 1989, S. 2 - 9
- [SZA80] Szabó, István: Einige Markensteine in der Entwicklung der theoretischen Bauingenieurkunst. In: Beiträge zur Bautechnik. Berlin, München: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1980. – ISBN 3-433-00873-6
- [TEI95] Teichmann, Klaus; Wilke, Joachim: Prozess und Form "Natürlicher Konstruktionen ". Berlin: Ernst und Sohn Verlag, 1996. - ISBN 3-433-02883-4
- [THA85] Thanh, Phan dinh: Optimierung von Stahlbetontragwerken – Ein Beitrag zur Anwendung der Optimierung im Bauwesen. Leipzig, technische Hochschule, Dissertation, 1985
- [THI89] Thierauf, G.: Optimale Bemessung und Optimierung im Konstruktiven Ingenieurbau. In: Bauingenieur (1989) 64, S. 463 – 472
- [THI97] Thiele, A.; Lohse, W.: Stahlbau - Teil 2. Stuttgart, B.G. Teubner Verlag, 1997. - ISBN 3-519-05255-5
- [USE95] Usemann, K.W.: Die Neue Wärmeschutzverordnung (WSVO) für Gebäude. München (u.a.): Oldenbourg Verlag, 1995. - ISBN 3-486-26144-4
- [VBI01] Nachhaltigkeit – Floskel oder Wertebegriff? VBI Nachrichten 7/2001, S. 2-3
- [VEN71] Venkayya, V.B.: Design of optimum structures. In: Computers & Structures (1971) Vol.1, S. 265-309
- [WAP02] Wapenhans, Wilfried: Nachhaltige Planung. In: Bautechnik 79 (2002) 4, S. 225-231
- [WAR99] Wardlaw, R.; Sharif, M.: Evaluation of Genetic Algorithm for Optimal Reservoir System Operation. In: Journal of water resources planning and management, (1999) January/February, S. 25-33
- [WEI02] Weicker, Karsten: Evolutionäre Algorithmen. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2002. – ISBN 3-519-00362-7
- [WER99] Werner, Frank: Rahmenkonstruktionen – geschweißte dünnwandige Querschnitte oder Walzprofile. In: 18. Steinfurter Stahlbauseminar, 1999
- [WHI89] Whitley, L.D.: The GENITOR Algorithm and Selection Pressure: Why Rank-Based Allocation of Reproductive Trials Is Best. In: Proceedings of 3rd International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo (Californien), 1989, S. 116 - 121
- [WUK88] Wuketits, Franz M.: Evolutionstheorien - Historische Voraussetzungen, Positionen, Kritik. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1988. - ISBN 3-534-02537-7
- [YAN97] Yang, Jiaping; Soh, Chee Kiong: Structural Optimization by Genetic Algorithms with Tournament Selection. In: Journal of Computing in Civil Engineering (1997) July, S. 195-200
- [ZHO97] Zhou, M.: Beiträge zur Tragwerksoptimierung. Essen, Universität-Gesamthochschule, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, 1997. – ISSN 0947-0921

-
- [DIN276] DIN 276
Kosten im Hochbau
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 1993
- [DIN4108T4] DIN4108 - Teil4
Wärmeschutz im Hochbau – Wärme- und Feuchteschutztechnische Kennwerte
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., November 1991
- [DIN4108T6] DIN4108 – Teil6
Wärmeschutz im Hochbau – Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs von Gebäuden
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Vornorm April 1995
- [DIN18800T1] DIN 18800 – Teil1
Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion.
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., November 1990
- [DIN18800T2] DIN 18800 – Teil2
Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Tragwerken.
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., November 1990
- [DIN18800T3] DIN 18800 – Teil3
Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Plattenbeulen.
Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., November 1990
- [VDI2221] VDI – Richtlinie 2221
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, Mai 1993
- [VDI2222] VDI – Richtlinie 2222
Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.
Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, Juni 1997
- [VDI3550] VDI/VDE 3550 Blatt 3 (Entwurf)
Computational Intelligence – Evolutionäre Algorithmen – Begriffe und Definitionen.
Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, November 2001

II Abbildungen

- Abbildung 2.1: Tätigkeitsfelder von Architekt und Bauingenieur (nach[WAP02, BUE77])
- Abbildung 2.2: Entwurfsstrategien
- Abbildung 2.3: Anforderungsprofil für Entwurfsaufgaben im Bauwesen
- Abbildung 2.4: Entwurfsprozess mit Stell-, Bewertungsgrößen und Entwurfsbedingungen
- Abbildung 2.5: Ausgewählte Stellgrößen von Entwurfsaufgaben
- Abbildung 2.6: Ausgewählte Entwurfsziele und Entwurfsbedingungen von Entwurfsaufgaben
- Abbildung 2.7: Systemstufen in Entwurfsobjekten
- Abbildung 2.8: Strukturierung von Entwurfsaufgaben nach Systemstufen und Funktionen
- Abbildung 2.9: Anteile von Stahlhochbau und sonstigen Erzeugnissen [SBA02]
- Abbildung 2.10: Anteile der Produktgruppen des Stahlhochbaus [SBA02]
- Abbildung 2.11: Typische Konstruktion einer einschiffigen Halle mit rechteckigem Grundriss [DON]
- Abbildung 2.12: Primärtragelemente von Stahlhallen [FUE89]
- Abbildung 2.13: Ergebnisse der Umfrage zu Rahmensystemen [SCH00]
- Abbildung 2.14: Ergebnisse der Umfrage zu Form und Profil der Stiele [SCH00]
- Abbildung 2.15: Ergebnisse der Umfrage zu Form und Profil der Riegel [SCH00]
- Abbildung 2.16: Ausbildungsmerkmale mehrschiffiger Hallen
- Abbildung 2.17: Ergebnisse der Umfrage zur Dachneigung [SCH00]
- Abbildung 2.18: Ergebnisse der Umfrage zu verwendeten Stahlsorten [SCH00]
- Abbildung 2.19: Ergebnisse der Umfrage zum Achsabstand [SCH00]
- Abbildung 2.20: Ergebnisse der Umfrage zur Dachausbildung [SCH00]
- Abbildung 2.21: Ergebnisse der Umfrage zur Wandausbildung [SCH00]
- Abbildung 2.22: Ergebnisse der Umfrage zur Stabilisierung von Stahlhallen [SCH00]
- Abbildung 2.23: Ergebnisse der Umfrage zu Entwurfszielen der Tragkonstruktion [SCH00]
- Abbildung 3.1: Prinzip traditioneller und optimierungsbasierter Entwurfsstrategien
- Abbildung 3.2: Eingespannter Balken aus Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze (Leyden 1638) [SZA80]
- Abbildung 3.3: Vereinfachter Entwicklungspfad der Hauptformen Evolutionärer Algorithmen
- Abbildung 3.4: Schema Optimierungsaufgabe (Darstellung nach [SCH01c, FIG88])
- Abbildung 3.5: Klassifizierungsmöglichkeiten von Optimierungsaufgaben
- Abbildung 3.6: Klassifizierungsmöglichkeiten von Optimierungsverfahren
- Abbildung 3.7: Zuordnung von Optimierungsverfahren
- Abbildung 4.1: Prinzip Evolutionärer Algorithmen mit Darstellung der Teilprozesse
- Abbildung 4.2: Prinzip von Rouletteselektion und stochastic universal sampling
- Abbildung 4.3: Prinzip von multipoint crossover
- Abbildung 4.4: Prinzip von singlepoint crossover
- Abbildung 4.5: Prinzip von shuffle crossover (Darstellung nach [NIS97])

-
- Abbildung 4.6: Prinzip von uniform crossover und diskreter Rekombination (Darstellung nach [NIS97])
- Abbildung 4.7: Prinzip von intermediärer Rekombination (Darstellung nach [NIS94])
- Abbildung 4.8: Sensitivität der Mutationswahrscheinlichkeit [WAR99]
- Abbildung 4.9: Mutation an einem binär codierten Individuum
- Abbildung 4.10: Optimierungsbasierte Entwurfsstrategie mit Evolutionären Algorithmen zur Lösung von Entwurfsaufgaben im Bauwesen
- Abbildung 4.11: 10-Stäbe Fachwerk, System
- Abbildung 4.12: Fitnessvergleich für verschiedene Populationsgrößen [WAR99]
- Abbildung 4.13: 10-Stäbe Fachwerk, Einflusstendenzen von Selektionsverfahren
- Abbildung 4.14: 10-Stäbe Fachwerk, Einfluss von Selektionsverfahren innerhalb Evolutionärer Algorithmen
- Abbildung 4.15: 10-Stäbe Fachwerk, Einfluss von Rekombinationsverfahren innerhalb Evolutionärer Algorithmen
- Abbildung 4.16: Evolutionäre Algorithmen EA-I und EA-II
- Abbildung 4.17: Gewalzter Zweifeldträger, System
- Abbildung 4.18: Gewalzter Zweifeldträger, Abhängigkeit der Suchraumgröße von Optimierungsvariablenanzahl und Variationsbereich der Optimierungsvariablen
- Abbildung 4.19: Einschiffiger Rahmen, System mit variablen Entwurfsgrößen
- Abbildung 4.20: Einschiffiger Rahmen, Einwirkungen
- Abbildung 4.21: Prinzipielle Vorgehensweise eines wachstumsorientierten Algorithmus
- Abbildung 4.22: Geschweißter Zweifeldträger, System
- Abbildung 4.23: Geschweißter Zweifeldträger, Startprofile 1 und 2
- Abbildung 4.24: Wachstumsorientierter Algorithmus mit zusätzlichem Abbruchkriterium
- Abbildung 4.25: Prinzip hybrider Evolutionärer Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz
- Abbildung 4.26: Prinzip des Trainings in hybriden Evolutionären Algorithmen mit adaptivem Wachstumsansatz
- Abbildung 4.27: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Trainingsstellen
- Abbildung 4.28: Robuster Evolutionärer Algorithmus (= EA-II)
-
- Abbildung 5.1: Entwurfsobjekt 1 - einschiffige Halle
- Abbildung 5.2: Entwurfsobjekt 2 - zweischiffige Halle
- Abbildung 5.3: Entwurfsaufgaben, gegliedert nach Systemstufen und Funktionen
- Abbildung 5.4: Einschiffiger Rahmen, Übersicht der untersuchten Rahmentypen
- Abbildung 5.5: Einschiffiger Rahmen, Eigengewicht und Fundamentvolumen
- Abbildung 5.6: Einschiffiger Rahmen, Fiktiver Kostenvergleich f. unterschiedliche Fußpunktlagerung der Stiele
- Abbildung 5.7: Einschiffiger Rahmen, Vergleich gewichtsabhängiger Kosten ausgewählter Rahmentypen
- Abbildung 5.8: Einschiffiger Rahmen, Gewichtsvergleich von Rahmen mit unterschiedlicher Ausbildung der Rahmenstiele und Riegel

-
- Abbildung 5.9: Einschiffiger Rahmen, Vergleich der Ergebnisse für die Stahlsorten S235 und S355
- Abbildung 5.10: Einschiffiger Rahmen, fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich zwischen Stahlsorte S235 und S355 für Rahmentyp RT02
- Abbildung 5.11: Einschiffiger Rahmen, fiktiver gewichtsabhängiger Kostenvergleich zwischen Stahlsorte S235 und S355 für Rahmentyp RT05
- Abbildung 5.12: Einschiffiger Rahmen, Gegenüberstellung der Entwurfslösungen erzielt mit traditioneller bzw. optimierungsbasierter Entwurfsstrategie
- Abbildung 5.13: Einschiffiger Rahmen, Parallelisierung des Analyseprozesses
- Abbildung 5.14: Zweischiffiger Rahmen, System
- Abbildung 5.15: Zweischiffiger Rahmen, Einwirkungen
- Abbildung 5.16: Zweischiffiger Rahmen, Vergleich von Ausgangslösung und erzielter Entwurfslösung.
- Abbildung 5.17: Zweischiffiger Rahmen, Rahmengewicht und Fundamentvolumen der Entwurfslösungen
- Abbildung 5.18: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, System mit variablen Entwurfsgrößen
- Abbildung 5.19: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, Gewichtsanteile des Tragwerkes in Abhängigkeit untersuchter Pfettenprofile für unterschiedliche Achsabstände
- Abbildung 5.20: Teilsystem Tragwerk einschiffiger Rahmen, Fiktiver Kostenvergleich
- Abbildung 5.21: Teilsystem Tragwerk einschiffiger Rahmen, Achsabstände in Abhängigkeit unterschiedlicher Dachsysteme
- Abbildung 5.22: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Übersicht der Dachsysteme
- Abbildung 5.23: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Übersicht der Wandsysteme
- Abbildung 5.24: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, System mit variablen Entwurfsgrößen
- Abbildung 5.25: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Gewicht des Tragwerkes und Fundamentvolumen für unterschiedliche Dach- und Wandsysteme
- Abbildung 5.26: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Einfluss unterschiedlicher Entwurfsziele auf die Entwurfslösung
- Abbildung 5.27: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Entwurfslösungen der Grenzfälle 1,2 und 3
- Abbildung 5.28: Einschiffige Halle, Rechenzeiten für ausgewählte Systemstufen
- Abbildung 5.29: Wassertank, System mit variablen Entwurfsgrößen
- Abbildung 5.30: Wassertank, Entwurfslösungen
- Abbildung 5.31: Wassertank, Entwicklung der Entwurfsziele Gewichtsminimum und Volumenmaximum sowie der Fitness
- Abbildung 5.32: Wassertank, Entwurfslösungen mit unterschiedlicher Wichtung der Zielfunktionen Z_1 und Z_2
- Abbildung 5.33: Überdachung einer Radrennbahn, Prinzipielle Tragstruktur
- Abbildung 5.34: Überdachung einer Radrennbahn, Ansicht Viertelsegment
- Abbildung 5.35: Überdachung einer Radrennbahn, Grundriss Viertelsegment
- Abbildung 5.36: Überdachung einer Radrennbahn, Binderbezeichnungen und Einwirkungen
- Abbildung 5.37: Überdachung einer Radrennbahn, Entwurfsergebnisse

-
- Abbildung 5.38: Überdachung einer Radrennbahn, Fitnessverlauf von Entwurfsschritt 1
- Abbildung 5.39: Überdachung einer Radrennbahn, Fitnessverlauf von Entwurfsschritt 2
- Abbildung III-1: 10-Stäbe Fachwerk, Analyse
- Abbildung III-2: 10-Stäbe Fachwerk, Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen
- Abbildung III-3: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert mit Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen
- Abbildung III-4: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen
- Abbildung III-5: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen
- Abbildung III-6: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwerte der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren
- Abbildung III-7: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren
- Abbildung III-8: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren
- Abbildung III-9: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren
- Abbildung III-10: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren
- Abbildung III-11: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren
- Abbildung III-12: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren
- Abbildung III-13: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren
- Abbildung III-14: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen
- Abbildung III-15: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 30 Individuen
- Abbildung III-16: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 50 Individuen
- Abbildung III-17: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 100 Individuen
- Abbildung III-18: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen
- Abbildung III-19: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen

-
- Abbildung IV-1: Gewalzter Zweifeldträger, Analyse
- Abbildung IV-2: Gewalzter Zweifeldträger, Mittelwerte der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen
- Abbildung IV-3: Gewalzter Zweifeldträger, Mittelwerte und Standardabweichungen der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 10 Optimierungsvariablen
- Abbildung IV-4: Gewalzter Zweifeldträger, Mittelwerte und Standardabweichungen der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 16 Optimierungsvariablen
- Abbildung IV-5: Gewalzter Zweifeldträger, Mittelwerte und Standardabweichungen der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 20 Optimierungsvariablen
- Abbildung IV-6: Gewalzter Zweifeldträger, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen
- Abbildung IV-7: Gewalzter Zweifeldträger, Rechenzeiten in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen
- Abbildung V-1: Einschiffiger Rahmen, Analyse
- Abbildung V-2: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Qualität der Fitness gemessen an der Fitness
- Abbildung V-3: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Qualitätsvergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen der Individuen gemessen an der Fitness
- Abbildung V-4: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Konvergenzgeschwindigkeiten
- Abbildung V-5: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Rechenzeiten
- Abbildung V-6: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Tendenzieller Verlauf der Ergebnisse für die Zuverlässigkeit
- Abbildung V-7: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Tendenzieller Verlauf der Ergebnisse für die Effizienz
- Abbildung V-8: 10-Stäbe Fachwerk, Variationskoeffizient der Fitness
- Abbildung V-9: Einschiffiger Rahmen, Variationskoeffizient der Fitness
- Abbildung VI-1: Geschweißter Zweifeldträger, Analyse
- Abbildung VI-2: Gewalzter Zweifeldträger, Gegenüberstellung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit unterschiedlicher Startlösungen
- Abbildung VI-3: Gewalzter Zweifeldträger, Auslastungen der Vergleichsspannungen
- Abbildung VI-4: Gewalzter Zweifeldträger, Effizienz in Abhängigkeit unterschiedlicher Startlösungen
- Abbildung VII-1: Zweischiiffiger Rahmen, Analyse
- Abbildung VIII-1: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, Analyse
- Abbildung IX-1: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Dachsysteme
- Abbildung IX-2: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Wandsysteme
- Abbildung IX-3: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Analyse

Abbildung X-1: Wassertank, Analyse

Abbildung XI-1: Überdachung einer Radrennbahn, Analyse

III Tabellen

- Tabelle 2.1: Verwendung der Stahl- und Leichtbaurzeugnisse (nach [DSTV00a])
- Tabelle 2.2: Auswahl von Stellgrößen für Stahlhallen des Industriebaus
- Tabelle 2.3: Auswahl von Entwurfszielen und –bedingungen für Stahlhallen des Industriebaus
- Tabelle 3.1: Klassifizierung von linearen und nichtlinearen Optimierungsaufgaben
- Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile Evolutionärer Algorithmen
- Tabelle 4.2: Rekombinationsverfahren
- Tabelle 4.3: Klassifizierung der Abbruchkriterien nach [POH00]
- Tabelle 4.4: Variierte Einstellungen ausgewählter Teilprozesse Evolutionärer Algorithmen
- Tabelle 4.5: 10-Stäbe Fachwerk, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen
- Tabelle 4.6: Selektionsdrücke in Abhängigkeit verschiedener Verfahren der Fitnesszuweisung
- Tabelle 4.7: Selektionsdrücke in Abhängigkeit verschiedener Auswahlverfahren
- Tabelle 4.8: Vermischungsintensitäten verschiedener Rekombinationsverfahren
- Tabelle 4.9: 10-Stäbe Fachwerk, Vergleich von Untersuchungsergebnissen mit Ergebnissen der Literatur
- Tabelle 4.10: Gewalzter Zweifeldträger, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen
- Tabelle 4.11: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen
- Tabelle 4.12: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert der Konvergenzgeschwindigkeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen
- Tabelle 4.13: Einschiffiger Rahmen, Vergleich von Mittelwert der Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen
- Tabelle 4.14: Geschweißter Zweifeldträger, Datenpool der variablen Entwurfsgrößen
- Tabelle 4.15: Einstellungen der Teilprozesse von EA-I, EA-II, hEA-I und hEA-II
- Tabelle 4.16: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert und Standardabweichung der Qualität der Entwurfslösungen
- Tabelle 4.17: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert der Konvergenzgeschwindigkeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen
- Tabelle 4.18: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Mittelwert der Rechenzeit zur Bestimmung der Entwurfslösungen

Tabelle 5.1:	Einschiffiger Rahmen, Entwurfslösungen ermittelt mit Evolutionären Algorithmus (EA-II) bzw. hybriden Evolutionären Algorithmus (hEA-II)
Tabelle 5.2:	Zweischiffiger Rahmen, Vergleich von Entwurfslösungen mit parallelgurtigen bzw. konisch geschweißten Aussenstielen
Tabelle 5.3:	Teilsystem Tragwerk einschiffige, Halle Gegenüberstellung von Praxisausführung und ermittelten Untersuchungsergebnis
Tabelle 5.4:	Teilsystem Tragwerk einschiffiger Rahmen, Dachsysteme
Tabelle 5.5:	Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Schichtenaufbau des Hallenfußbodens
Tabelle 5.6:	Einschiffige Halle, Modelleigenschaften ausgewählter Systemstufen
Tabelle 5.7:	Wassertank, Ergebnisse variabler Entwurfsgrößen der Entwurfslösungen
Tabelle 5.8:	Wassertank, Rechenzeiten zur Bestimmung der Entwurfslösung
Tabelle 5.9:	Überdachung einer Radrennbahn, Rechenzeiten
Tabelle XI-1:	Überdachung einer Radrennbahn, Koordinaten für die Überdachungskonstruktion
Tabelle XI-2:	Überdachung einer Radrennbahn, Variationsbereiche variabler z-Koordinaten für zweiten Entwurfsschritt

IV Anlagen

Ablage I:	Fragebogen
Ablage II:	Slang
Ablage III:	10-Stäbe Fachwerk
Ablage IV:	Gewalzter Zweifeldträger
Ablage V:	Element einschiffiger Rahmen
Ablage VI:	Geschweißter Zweifeldträger
Ablage VII:	Element zweischiffiger Rahmen
Ablage VIII:	Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle
Ablage IX:	Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle
Ablage X:	Wassertank
Ablage XI:	Überdachung einer Radrennbahn
Ablage XII:	Flussbild

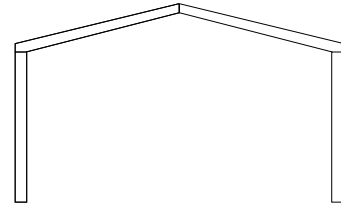
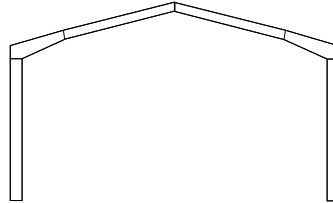
Anlage I
- Fragebogen -

Einschätzung der Wichtigkeit von Entwurfszielen

Gewichtsminimierung (Rahmen) hoch mittel gering

Flexible Tragkonstruktion hoch mittel gering

Formoptimierung (Rahmen) - niedriges Gewicht durch:



Rahmen mit Vouten

parallelgurtige Rahmen

1 Hauptrahmen - Angaben für unterschiedliche Spannweiten

Spannweiten:	<input type="checkbox"/> 15 m - 30 m	<input type="checkbox"/> 30 m - 60 m	<input type="checkbox"/> > 60 m
---------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------

Stahlgüte: S235 (St 37) S235 (St 37) S235 (St 37)
 S355 (St 52) S355 (St 52) S355 (St 52)

Rahmenform: Zweigelenrahmen Zweigelenrahmen Zweigelenrahmen
 Dreigelenrahmen Dreigelenrahmen Dreigelenrahmen
 eingesp. Rahmen eingesp. Rahmen eingesp. Rahmen

Dachneigung (°): vonbis..... von.....bis..... von.....bis.....

Traufhöhen (m): vonbis..... von.....bis..... von.....bis.....

Achsabstände (m): vonbis..... von.....bis..... von.....bis.....

Querschnitte

Riegel: geschweißte Profile geschweißte Profile geschweißte Profile
 gevoutet gevoutet gevoutet
 parallelgurtig parallelgurtig parallelgurtig
 gewalzte Profile gewalzte Profile gewalzte Profile
 mit Voute mit Voute mit Voute
 parallelgurtig parallelgurtig parallelgurtig
 andere Ausführung andere Ausführung andere Ausführung

Spannweiten:	<input type="checkbox"/> 15 m - 30 m	<input type="checkbox"/> 30 m - 60 m	<input type="checkbox"/> > 60 m
---------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------

Stützen:

<input type="checkbox"/> geschweißte Profile	<input type="checkbox"/> geschweißte Profile	<input type="checkbox"/> geschweißte Profile
<input type="checkbox"/> gevoutet	<input type="checkbox"/> gevoutet	<input type="checkbox"/> gevoutet
<input type="checkbox"/> parallelgurtig	<input type="checkbox"/> parallelgurtig	<input type="checkbox"/> parallelgurtig
<input type="checkbox"/> gewalzte Profile	<input type="checkbox"/> gewalzte Profile	<input type="checkbox"/> gewalzte Profile
<input type="checkbox"/> mit Voute	<input type="checkbox"/> mit Voute	<input type="checkbox"/> mit Voute
<input type="checkbox"/> parallelgurtig	<input type="checkbox"/> parallelgurtig	<input type="checkbox"/> parallelgurtig
<input type="checkbox"/> andere Ausführung	<input type="checkbox"/> andere Ausführung	<input type="checkbox"/> andere Ausführung
.....

Sonstiges

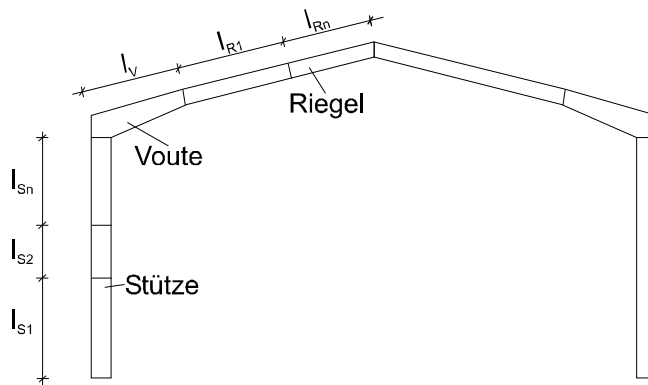
Pfetten:

<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja
<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> nein
<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden	<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden	<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden

Wandriegel:

<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> ja
<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> nein
<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden	<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden	<input type="checkbox"/> Wunsch d. Kunden

minimale / maximale Bauelementlängen



Stützen l_s :

<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m
<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m

Vouten l_v :

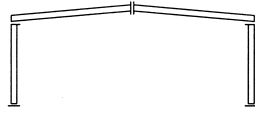
<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m
<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m

Riegel l_R :

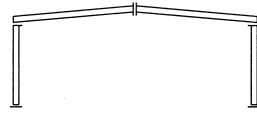
<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m	<input type="checkbox"/> min.....m
<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m	<input type="checkbox"/> max.....m

Spannweiten:	<input type="checkbox"/> 15 m - 30 m	<input type="checkbox"/> 30 m - 60 m	<input type="checkbox"/> > 60 m
---------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------

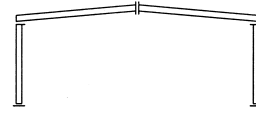
Stöße
Anordnung:



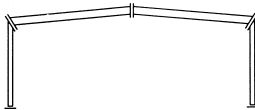
Variante 1



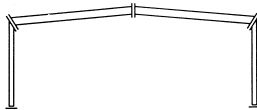
Variante 1



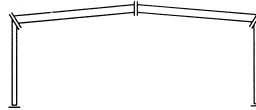
Variante 1



Variante 2



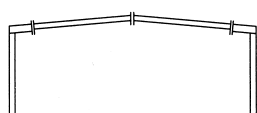
Variante 2



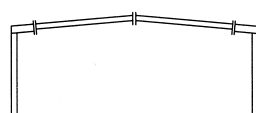
Variante 2



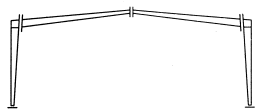
Variante 3



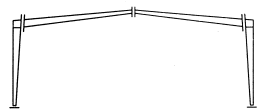
Variante 3



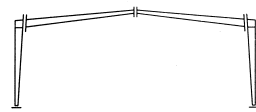
Variante 3



Variante 4



Variante 4



Variante 4

sonstige Variante(n) sonstige Variante(n) sonstige Variante(n)

Ausbildung:

geschweißt

geschweißt

geschweißt

geschraubt

geschraubt

geschraubt

4.6, 5.6

4.6, 5.6

4.6, 5.6

8.8, 10.9

8.8, 10.9

8.8, 10.9

2 Dach - Allgemeine Angaben

Dachhüllelemente: gedämmt
 ungedämmt

Pfetten: I - Profile
 Z-Profile
 U-Profile
 sonstige Profile
.....
 Wunsch d. Kunden

Einfeldträger
 Mehrfeldträger
 Wunsch d. Kunden

3 Wand - Allgemeine Angaben

Wandhüllelemente: gedämmt
 ungedämmt

Wandriegel: I - Profile
 Z-Profile
 U-Profile
 sonstige Profile
.....
 Wunsch d. Kunden

Einfeldträger
 Mehrfeldträger
 Wunsch d. Kunden

4 Stabilisierung - Allgemeine Angaben

Dach: Verbände
 K-Verband
 Diagonal-Verband
 Schubfelder

Wand: Verbände
 K-Verband
 Diagonal-Verband
 Schubfelder

Anlage II

- Slang -

Auszüge aus [SLA03]:

„Kurze Programmbeschreibung

Slang kombiniert stochastische Methoden mit der Finiten Elemente Methode. Dies erfolgt auf einem Niveau, das ausreichend ist, die meisten Ingenieurprobleme zu lösen. Die Berechnungsabläufe werden dabei in einzelnen übersichtlichen Arbeitsschritten dargestellt und ausgeführt. Zusätzlich erlauben interaktive Werkzeuge zur Ablaufsteuerung und umfangreiche Grafikerunterstützung die Programmbedienung und Ablaufkontrolle.“

„Benutzeroberfläche von SLang

Anwender haben die Möglichkeit, eine unbegrenzte Anzahl von Fenstern zu erzeugen, in denen die Berechnungsergebnisse sichtbar gemacht werden können. Der Fortgang der Berechnung kann interaktiv über die Slang-Bar kontrolliert werden. Dies ist ein Dialogfeld mit verschiedenen Buttons, das mit dem Berechnungsstatus verbunden ist.

Die meisten Befehle werden aus vorher editierten Textfiles eingelesen. Zusätzlich können auch jederzeit interaktiv Kommandos über die Slang-Bar eingegeben werden. Dies ist für den Debugging-Prozess, z.B. in der nichtlinearen stochastischen Analyse nützlich.“

Anlage III
- 10-Stäbe Fachwerk -

• Optimierungsvariablen

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \\ A_9 \\ A_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Querschnittsfläche FW - Stab 1} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 2} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 3} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 4} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 5} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 6} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 7} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 8} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 9} \\ \text{Querschnittsfläche FW - Stab 10} \end{pmatrix} \quad \text{(III-1)}$$

Als Variationsintervall für alle Optimierungsvariablen gelten die Datenpoolwerte der variablen Entwurfsgrößen (Tab. 4.5).

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ E \\ \rho_{Alu} \\ \sigma_{grenz} \\ u_{grenz(z)} \\ l_{SA} \\ l_i \end{pmatrix} \quad \text{(III-2)}$$

• Zielfunktion

$$Z = f(\underline{A}) = \sum_{i=1}^{10} y_8 * A_i * y_4 \Rightarrow \text{Minimum} \quad \text{(III-3)}$$

• Nebenbedingungen

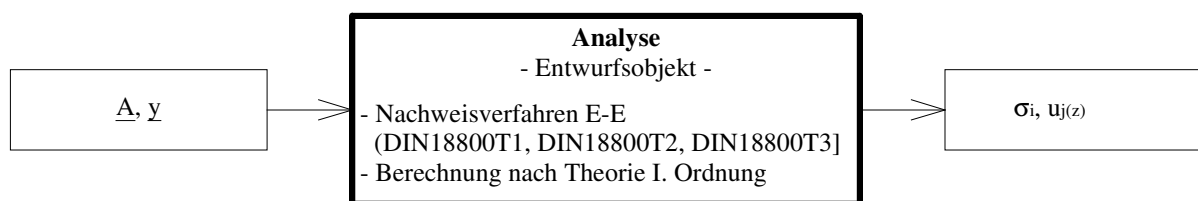


Abbildung III-1: 10-Stäbe Fachwerk, Analyse

$$g_{\sigma, i} = \frac{\sigma_i}{y_5} - 1 \leq 0 \quad \text{(III-4)}$$

$$g_{u, j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_6} - 1 \leq 0 \quad \text{(III-5)}$$

σ_i = Spannung im Stab i

$u_{j(z)}$ = vorhandene Knotenverschiebung in z-Richtung, (j = 1, 2, ..., 11)

- Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^{10} g_{\sigma, i} + \sum_{j=1}^{11} g_{u, j(z)} \quad (\text{III-6})$$

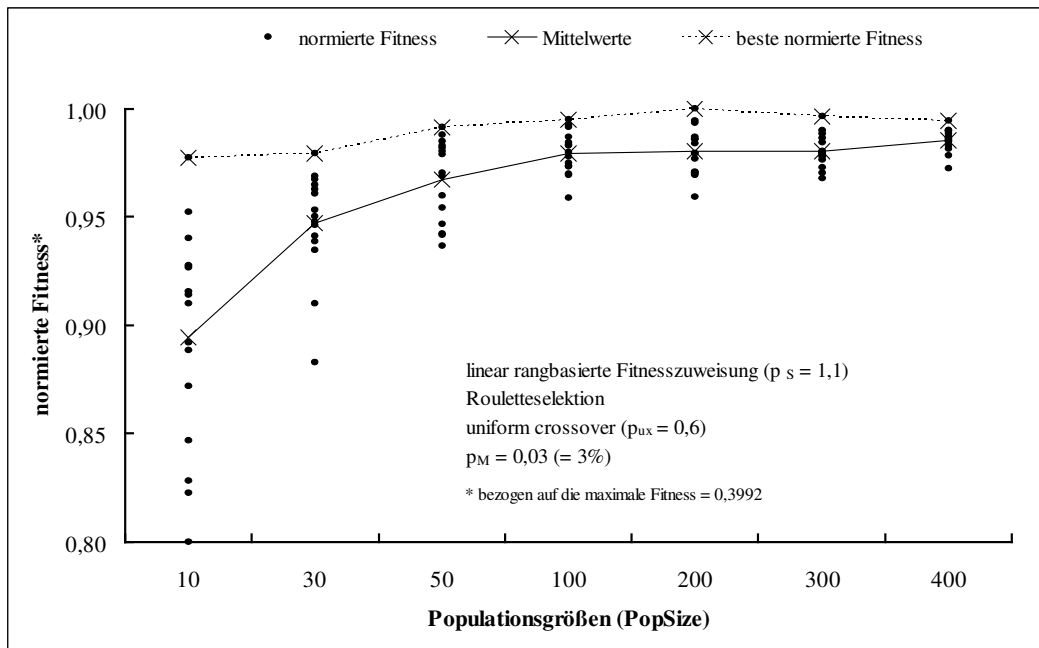


Abbildung III-2: 10-Stäbe Fachwerk, Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen

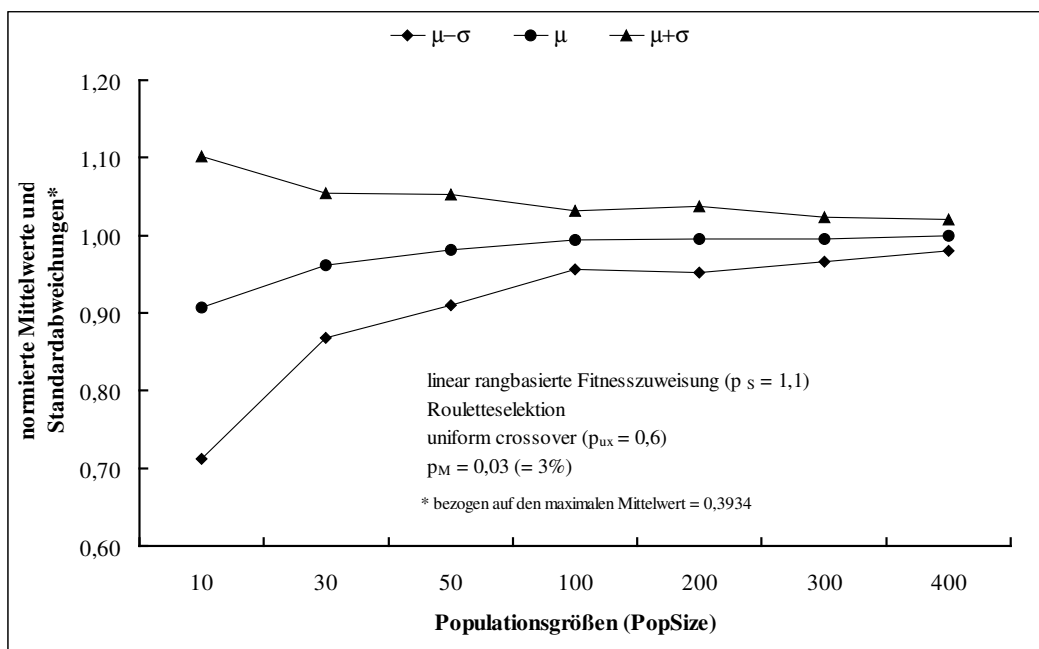


Abbildung III-3: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen

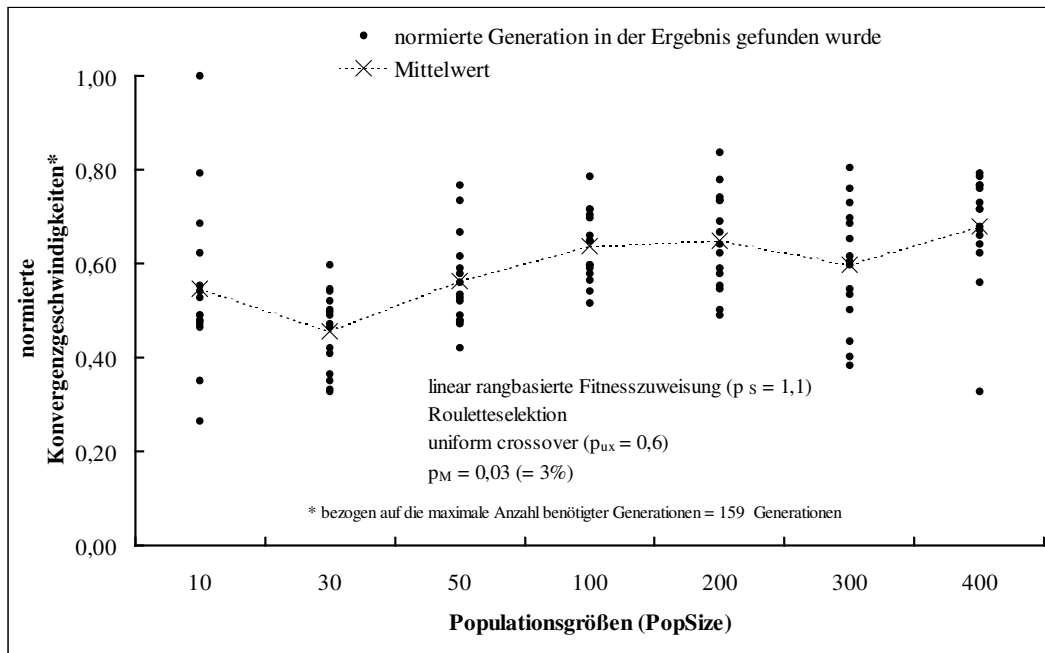


Abbildung III-4: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen

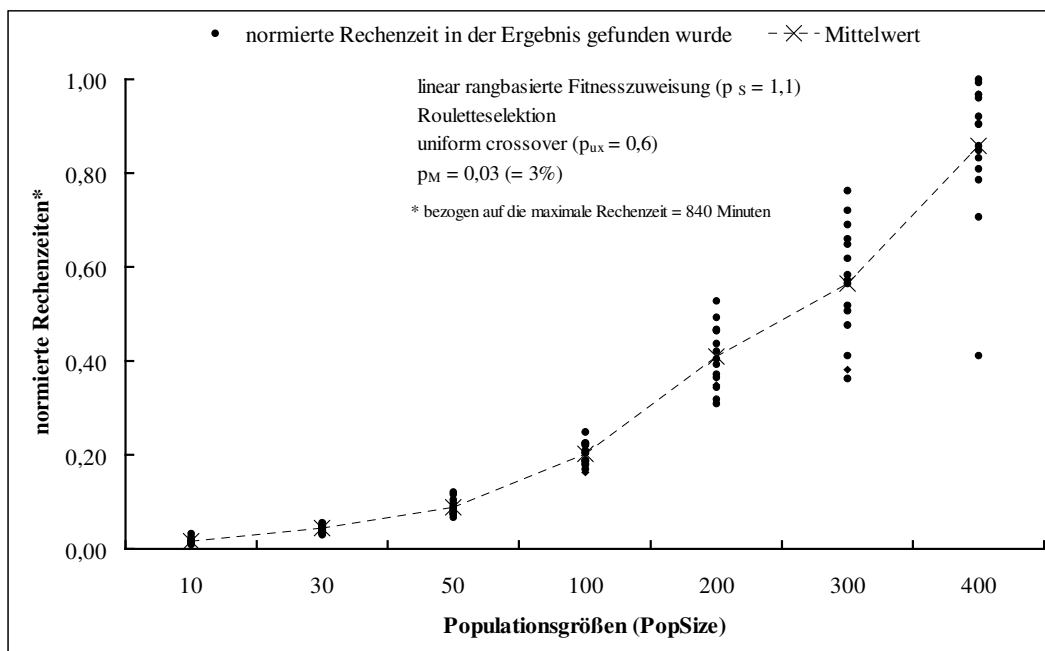


Abbildung III-5: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen

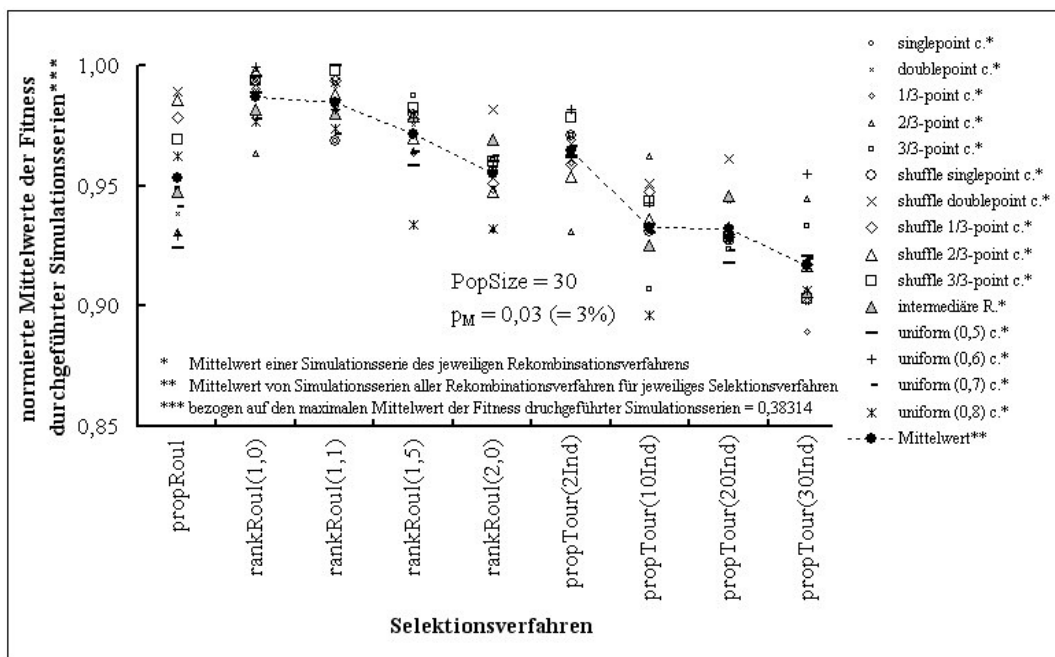


Abbildung III-6: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwerte der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren

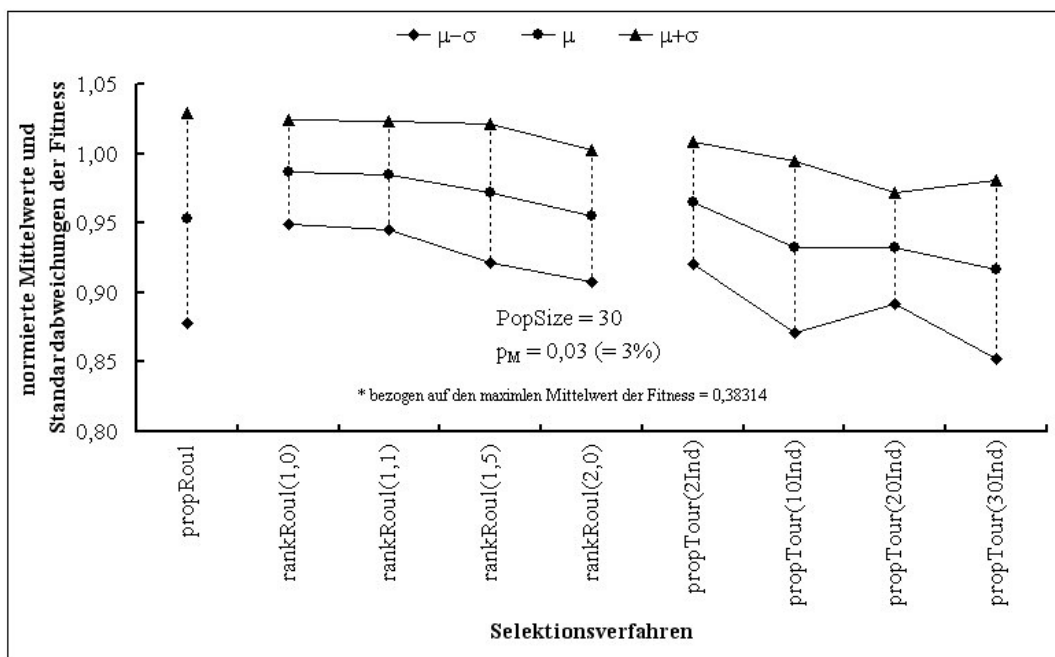


Abbildung III-7: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren

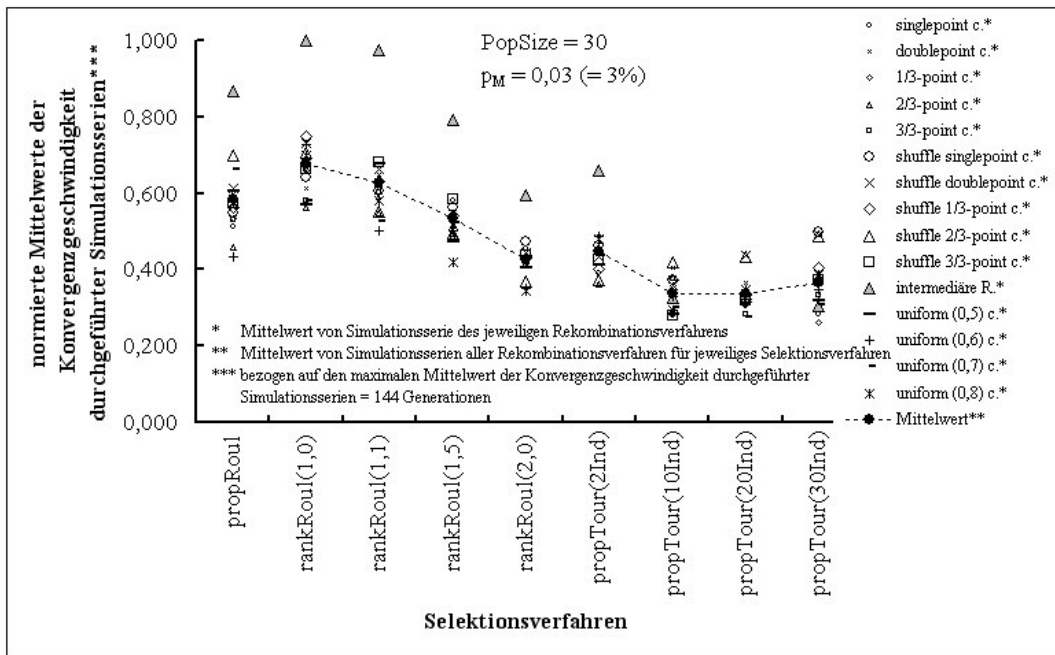


Abbildung III-8: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren

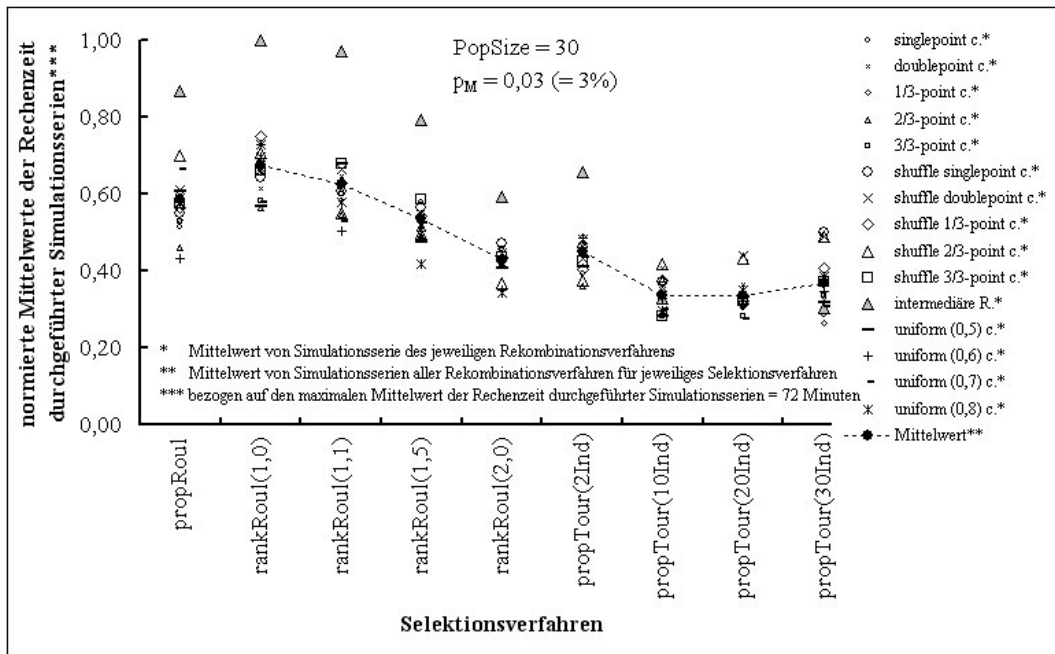


Abbildung III-9: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Selektionsverfahren für unterschiedliche Rekombinationsverfahren

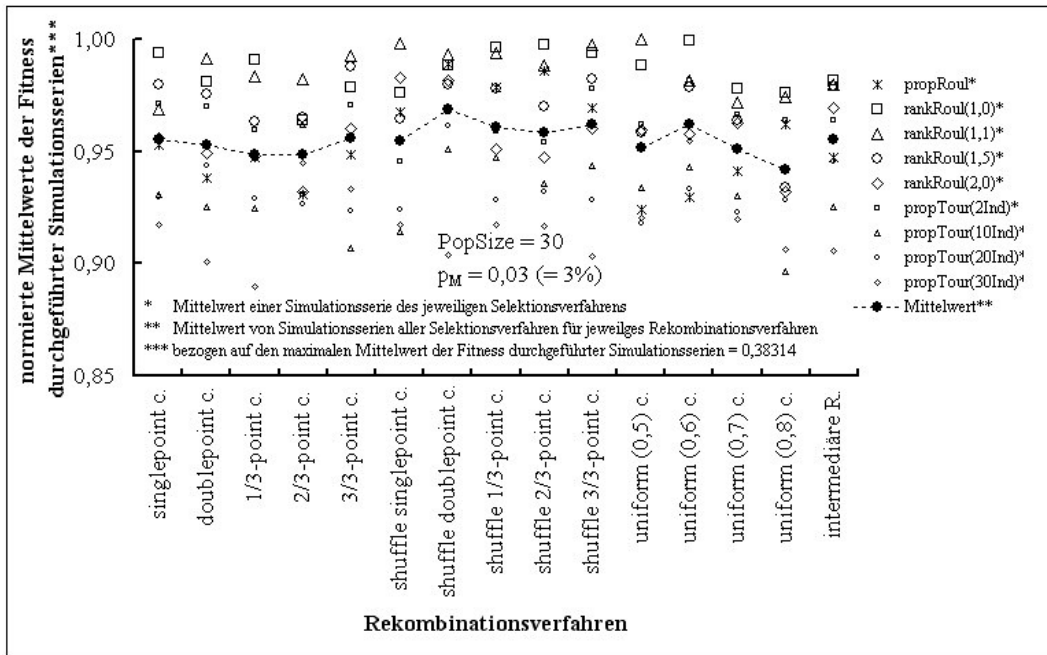


Abbildung III-10: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren

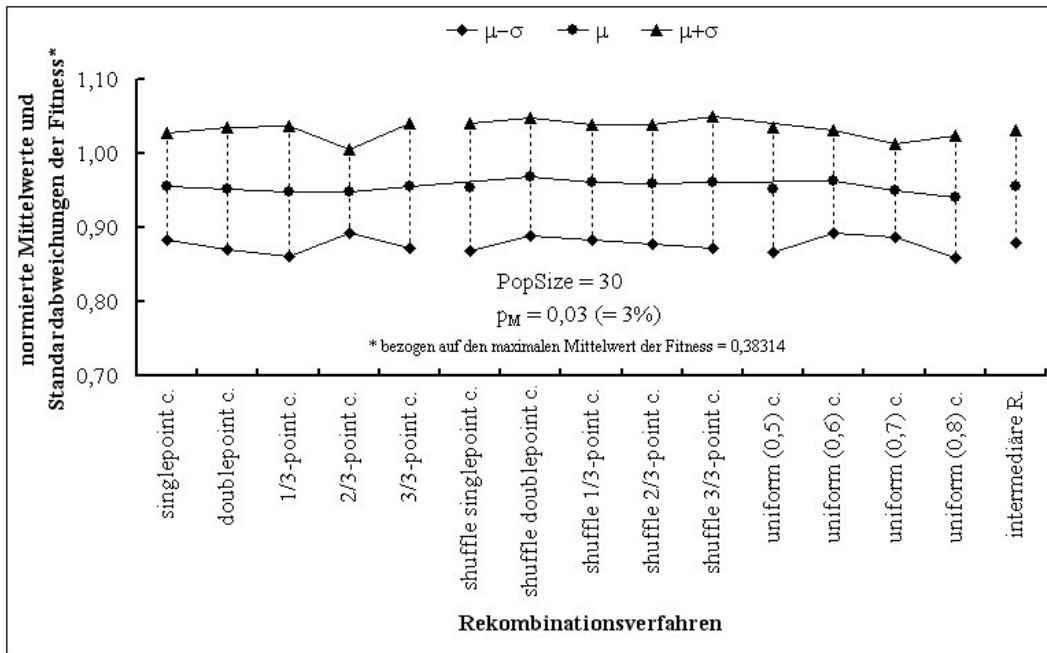


Abbildung III-11: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren

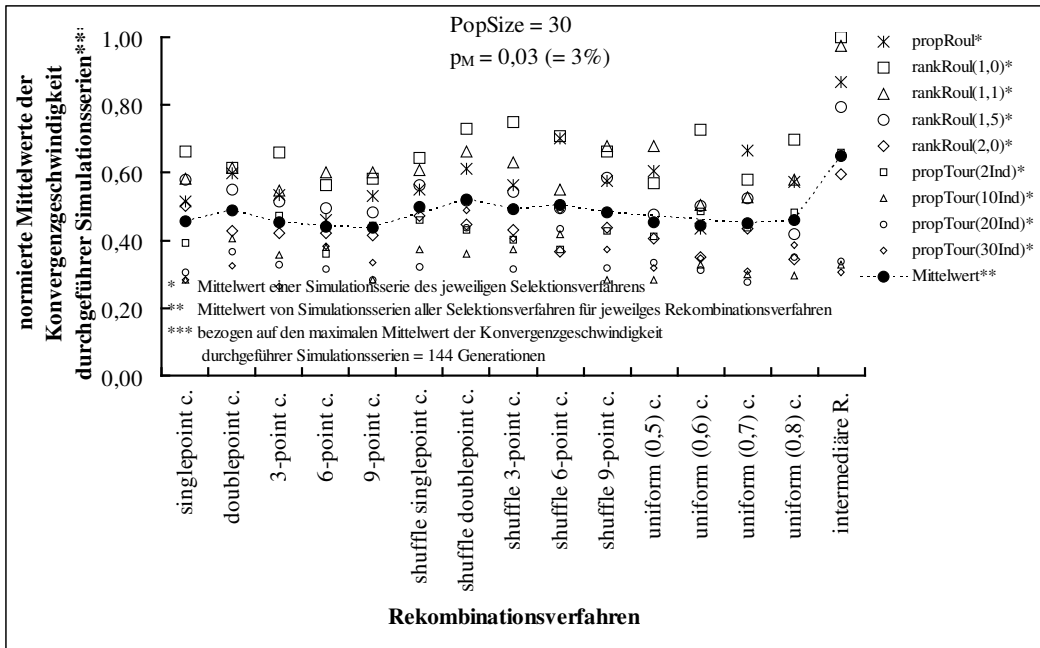


Abbildung III-12: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren

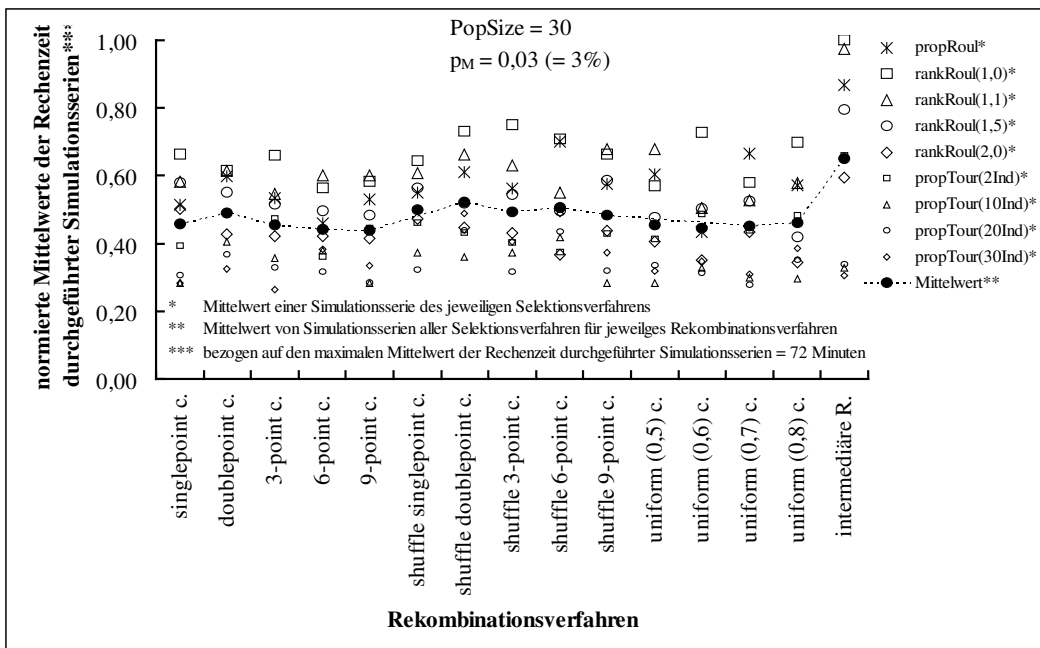


Abbildung III-13: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Rekombinationsverfahren für unterschiedliche Selektionsverfahren

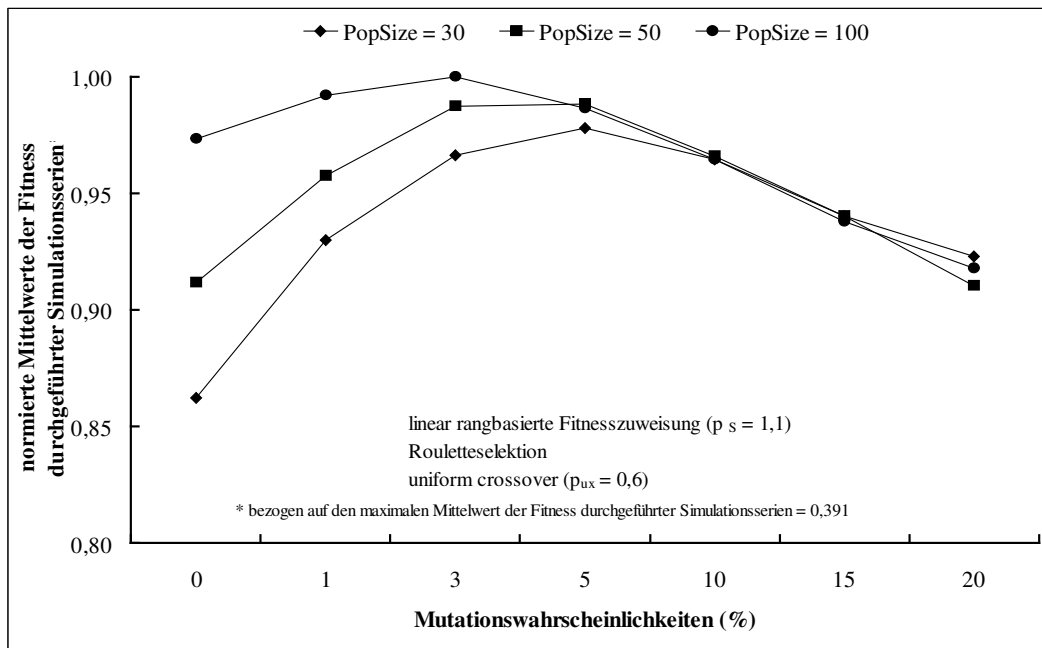


Abbildung III-14: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen

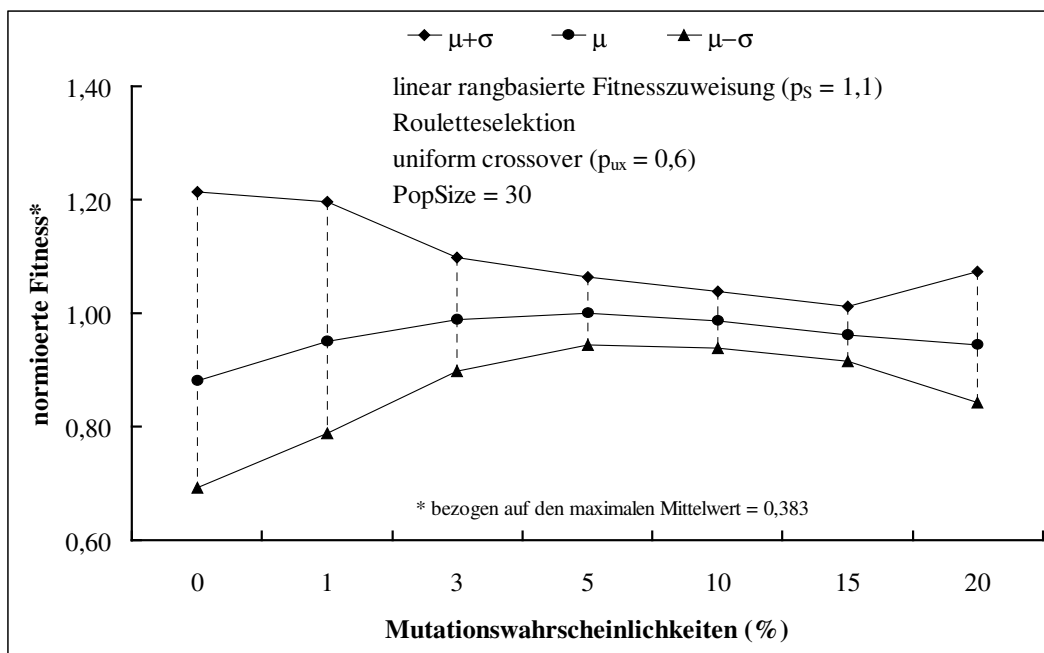


Abbildung III-15: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 30 Individuen

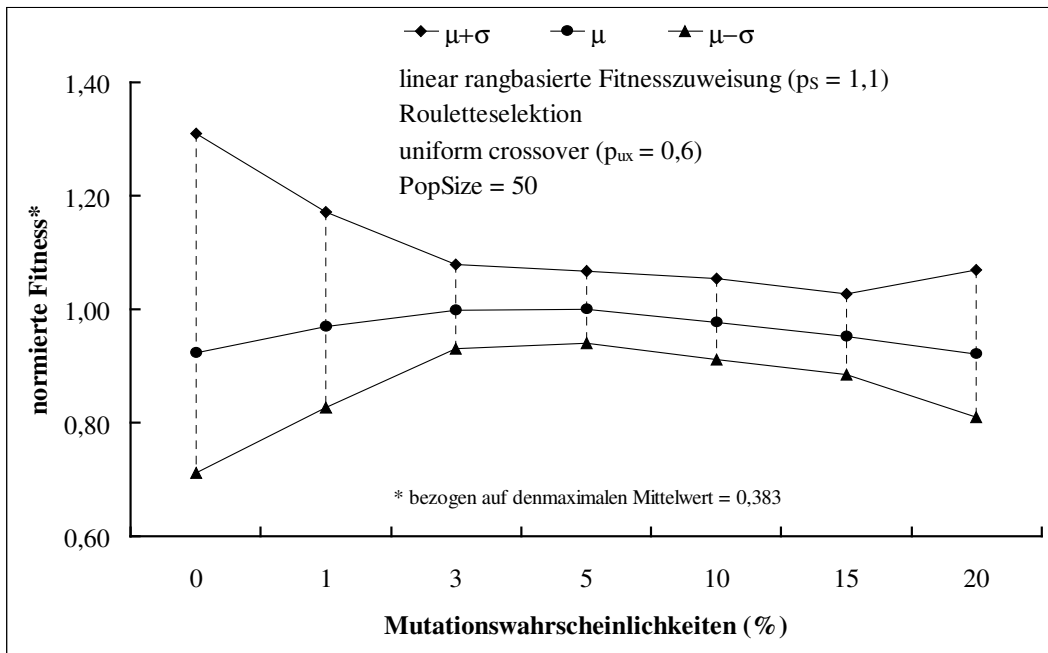


Abbildung III-16: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 50 Individuen

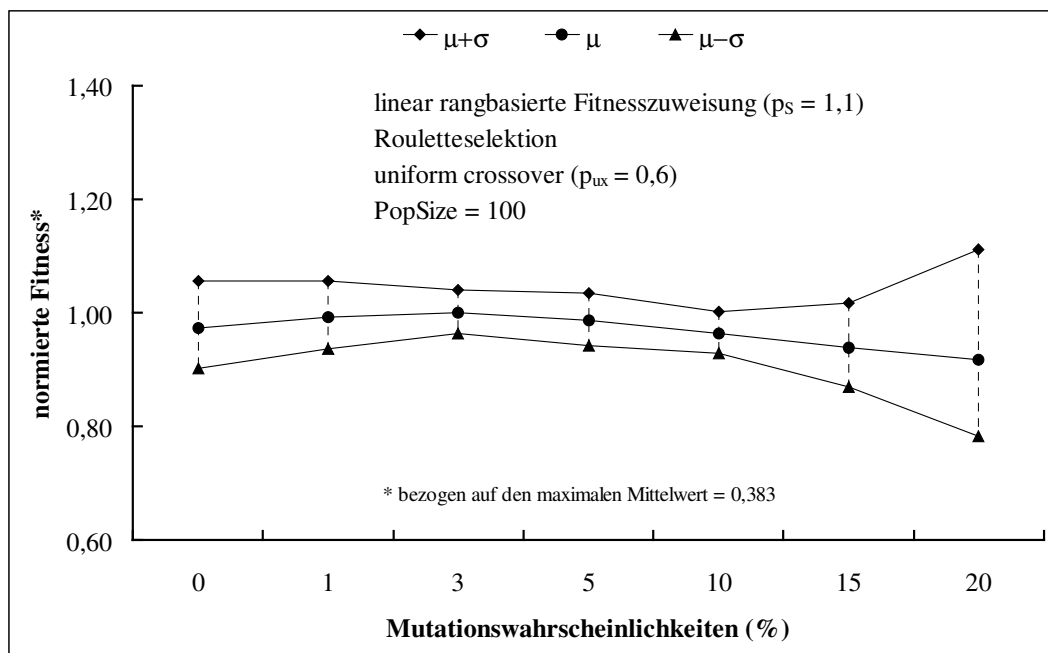


Abbildung III-17: 10-Stäbe Fachwerk, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für eine Populationsgröße von 100 Individuen

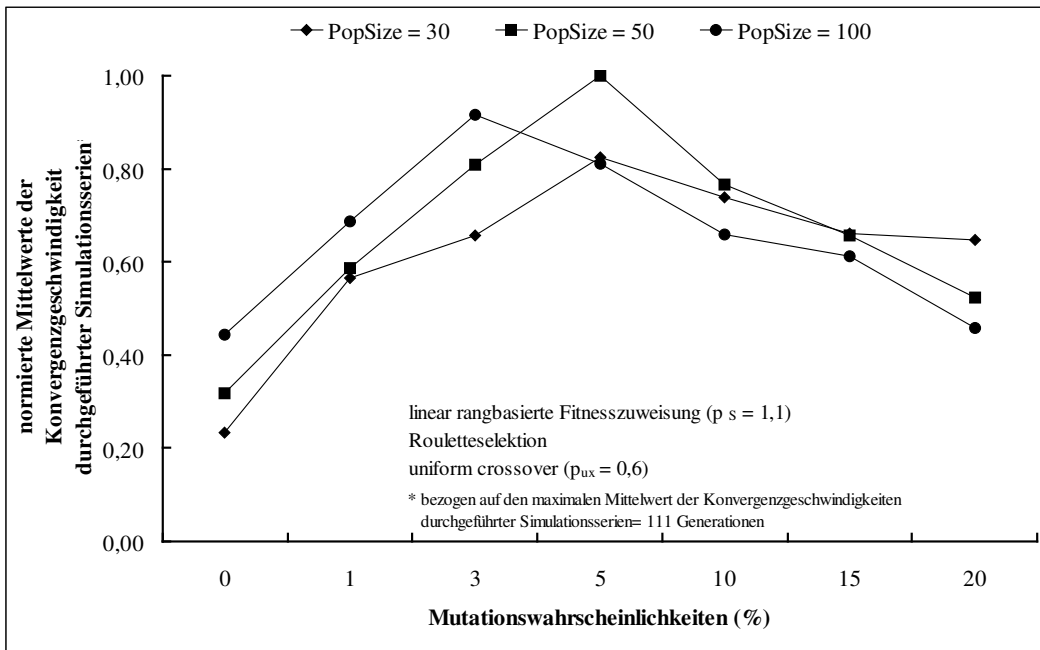


Abbildung III-18: 10-Stäbe Fachwerk, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen

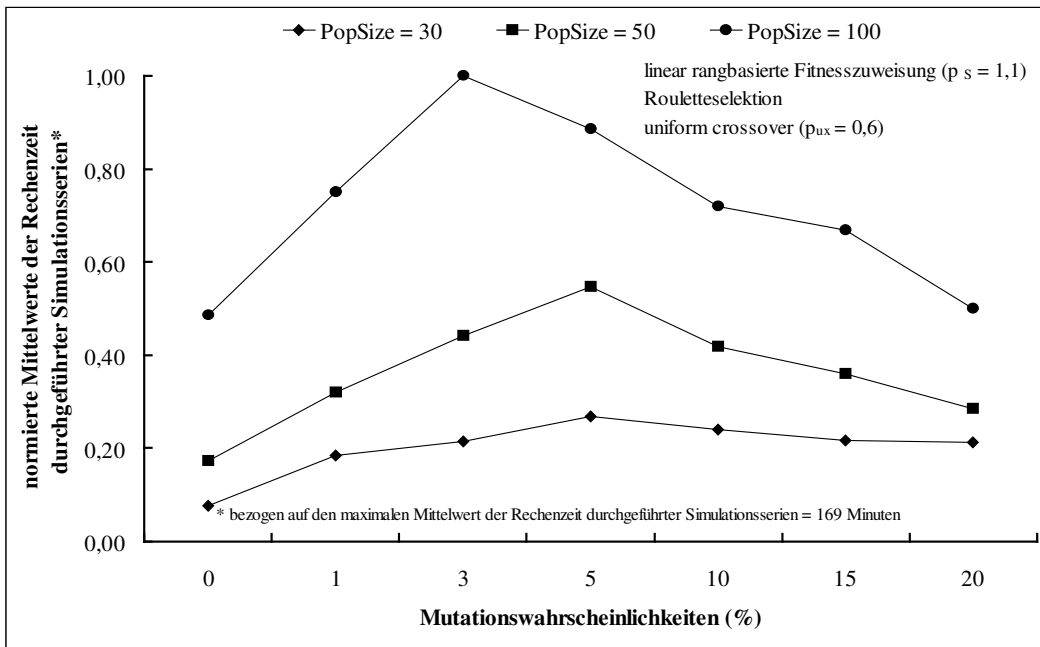


Abbildung III-19: 10-Stäbe Fachwerk, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Mutationswahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Populationsgrößen

Anlage IV
- Gewalzter Zweifeldträger -

• Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Querschnittsprofil - Element 1} \\ \text{Querschnittsprofil - Element 2} \\ \text{Querschnittsprofil - Element 3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{Querschnittsprofil - Element } n-1 \\ \text{Querschnittsprofil - Element } n \end{pmatrix}; n = 10, 16 \text{ bzw. } 20 \quad (\text{IV-1})$$

Als Variationsintervall für alle Optimierungsvariablen gelten die Datenpoolwerte der variablen Entwurfsgrößen in Tabelle 4.10.

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \\ E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ \sigma_{R,d} \\ u_{\text{grenz}(z)} \\ l_{F,1} \\ l_{F,2} \\ l_i \end{pmatrix} \quad (\text{IV-2})$$

• Zielfunktion

$$Z = f(\underline{x}) = \sum_{i=1}^n y_8 * A(x_i) * y_3 \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{IV-3})$$

• Nebenbedingungen

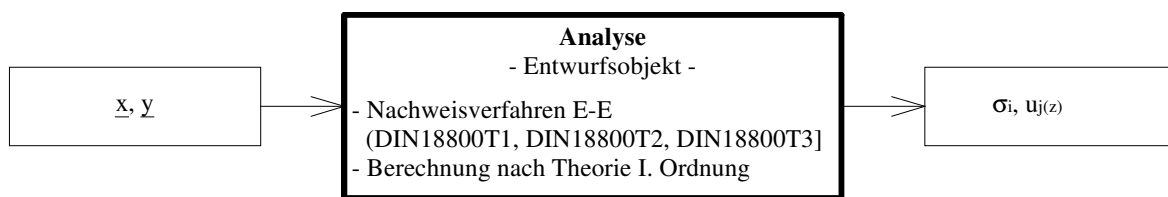


Abbildung IV-1: Gewalzter Zweifeldträger, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_4} - 1 \leq 0 \quad (\text{IV-4})$$

$$g_{u,j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_5} - 1 \leq 0 \quad (\text{IV-5})$$

σ_i = Spannung im Element i

$u_{j(z)}$ = vorhandene Knotenverschiebung in z-Richtung

- Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^n g_{\sigma, i} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(z)} \quad (\text{IV-6})$$

n = Anzahl der Elemente, m = Anzahl der Knoten

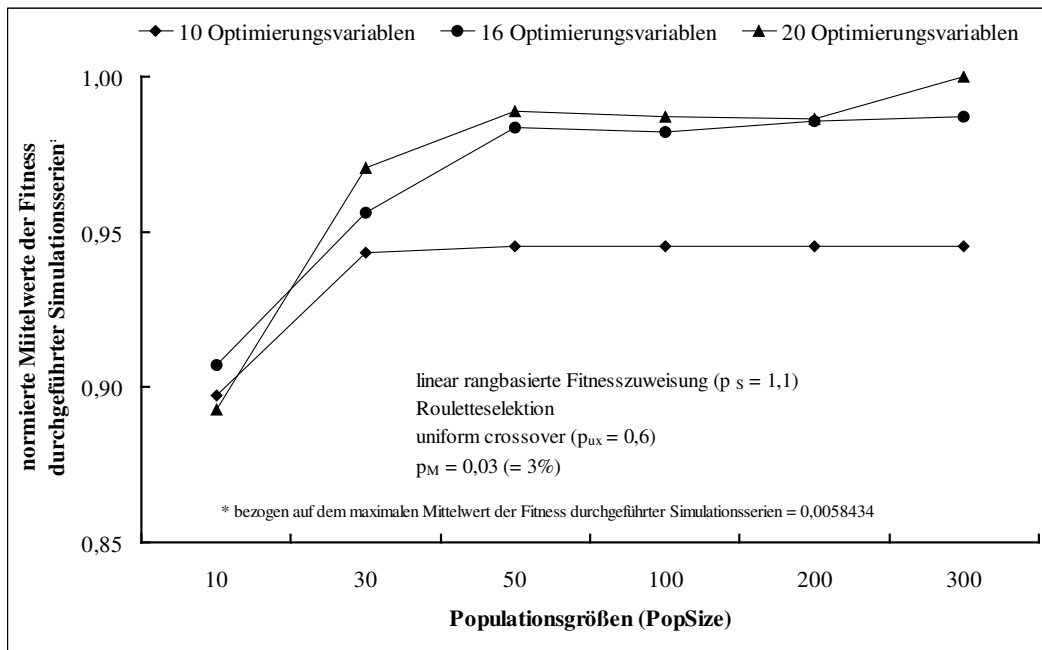


Abbildung IV-2: Gewaltter Zweifeldträger, Mittelwerte der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen

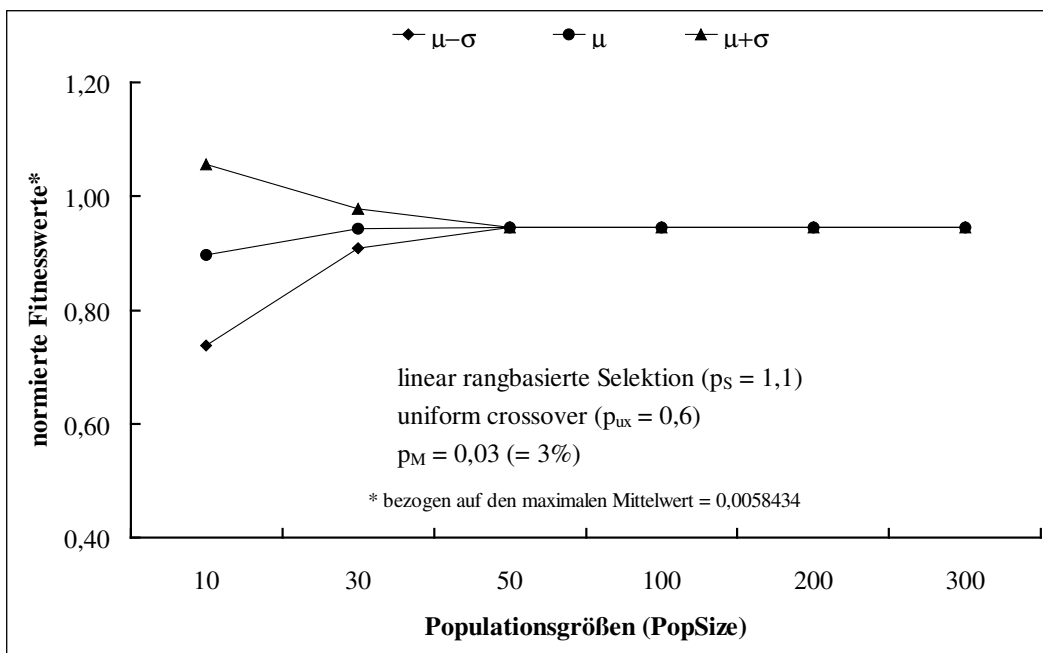


Abbildung IV-3: Gewaltter Zweifeldträger, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 10 Optimierungsvariablen

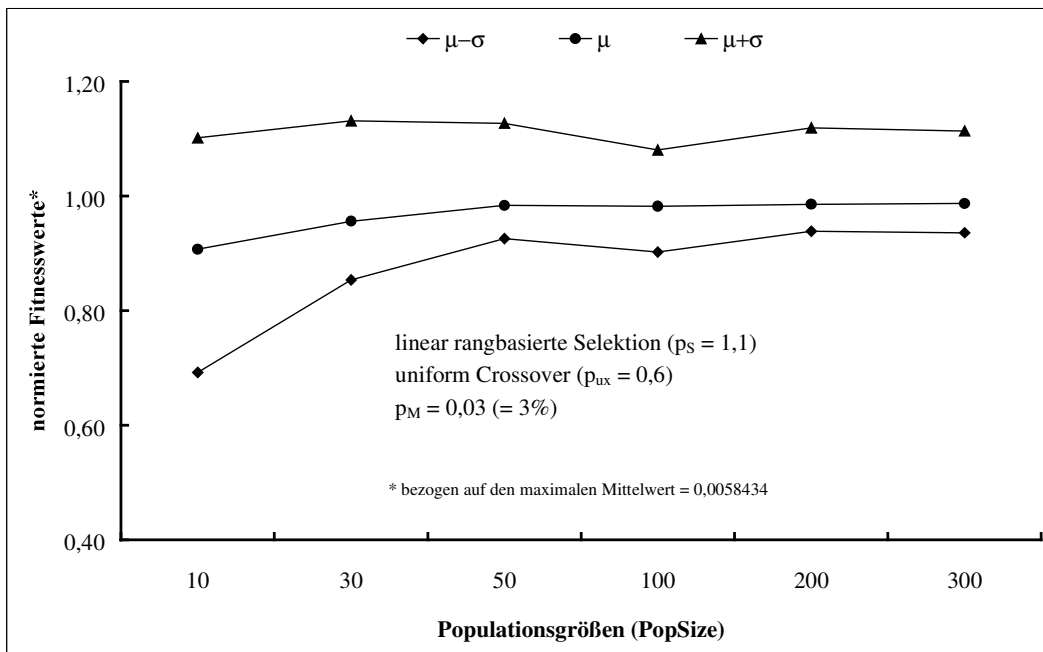


Abbildung IV-4: Gewaltter Zweifeldträger, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 16 Optimierungsvariablen

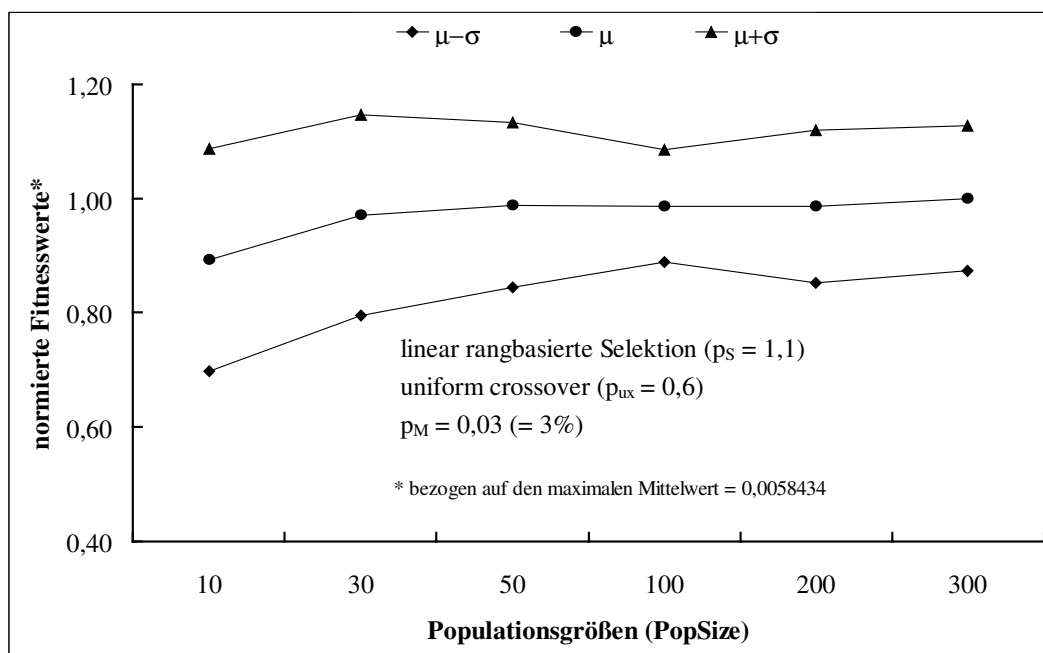


Abbildung IV-5: Gewaltter Zweifeldträger, Mittelwert und Standardabweichung der Fitness in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für 20 Optimierungsvariablen

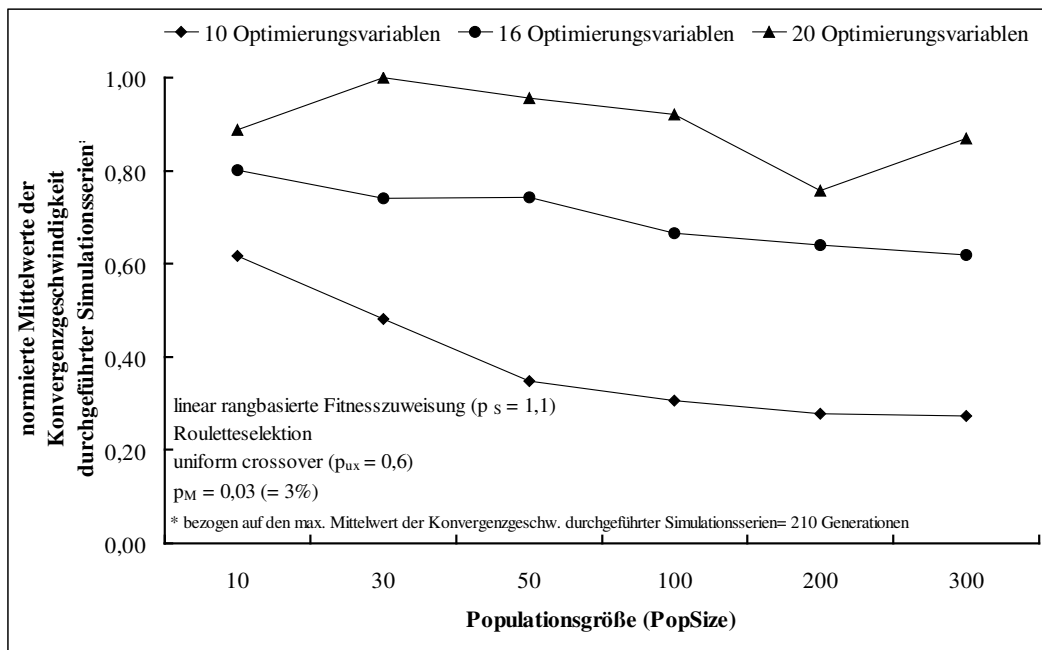


Abbildung IV-6: Gewaltter Zweifeldträger, Konvergenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen

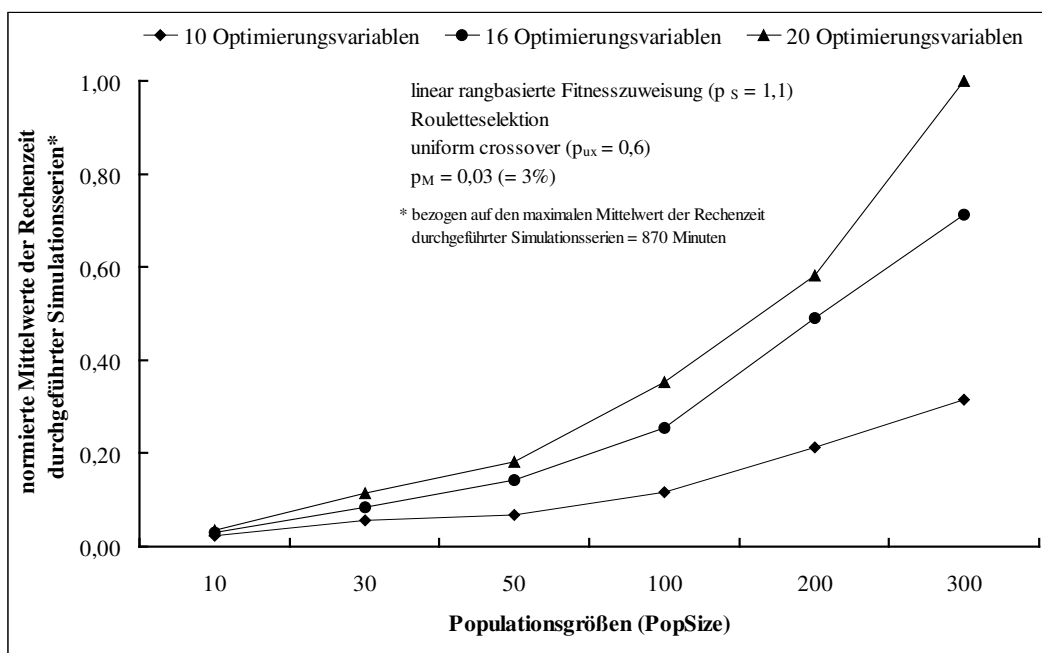


Abbildung IV-7: Gewaltter Zweifeldträger, Rechenzeit in Abhängigkeit untersuchter Populationsgrößen für unterschiedliche Anzahl von Optimierungsvariablen

Anlage V

- Element einschiffiger Rahmen -

- Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z - \text{Koordinate des Firstknotens} \\ \text{Lagerungsart der Rahmenstiele} \\ \text{Querschnittsverlauf und Profiltyp der Stiele} \\ \text{Profiltyp des Riegels} \\ \text{Ausbildung von Vouten im Riegel} \\ \text{Gurtabmessungen der Stiele} \\ \text{Stegabmessungen der Stiele} \\ \text{Gurtabmessungen des Riegels} \\ \text{Stegabmessungen des Riegels} \end{pmatrix} \quad (\text{V-1})$$

$$x_1 \in \mathbb{D}_1 \quad \mathbb{D}_1 \{6100, 6300, 6500, 6700, \dots, 9300\}$$

$$x_2 \in \mathbb{D}_2 \quad \mathbb{D}_2 \{1 \text{ (gelenkig = ZGR)}, 2 \text{ (eingespannt = EGR)}\}$$

$$x_3 \in \mathbb{D}_3 \quad \mathbb{D}_3 \{1 \text{ (konisch/geschweißt)}, 2 \text{ (parallelgurtig/geschweißt)}, 3 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_4 \in \mathbb{D}_4 \quad \mathbb{D}_4 \{1 \text{ (geschweißt)}, 2 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_5 \in \mathbb{D}_5 \quad \mathbb{D}_5 \{1 \text{ (mit Voute im Riegel)}, 2 \text{ (ohne Voute im Riegel)}\}$$

$$x_6 \in \mathbb{D}_6 \quad \mathbb{D}_6 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, \\ 360/17, \text{ IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{ IPE600}\}$$

$$x_7 \in \mathbb{D}_7 \quad \mathbb{D}_7 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, 300/4, \\ 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, \\ 1000/9, \text{ IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{ IPE600}\}$$

$$x_8 \in \mathbb{D}_8 \quad \mathbb{D}_8 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, \\ 360/17, \text{ IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{ IPE600}\}$$

$$x_9 \in \mathbb{D}_9 \quad \mathbb{D}_9 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 270/4, 300/4, 330/4, 360/4, \\ 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, 1000/9, \text{ IPE100,} \\ \text{ IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{ IPE600}\}$$

- Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ E \\ \rho^{\text{Stahl}} \\ f_{y,k} \\ \sigma_{R,d} \\ \lambda_a \\ k_c \\ u_{\text{grenz}(x)} \\ u_{\text{grenz}(z)} \\ g^D \\ SB \\ SH_T \\ l_1 \\ l_2 \\ h_{FP} \\ c \end{pmatrix} \quad (\text{V-2})$$

• Zielfunktion

$$Z = f(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{V-3})$$

$$Z = f(\underline{x}) = y_6 \cdot ((4 \cdot y_{15} \cdot b(x_6) \cdot t(x_6) + V_{S,i}(x_3, x_7)) + (4 \cdot y_{16} \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + V_{V,i}(x_5, x_7, x_9)) + y_{17} \cdot (2 \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + h(x_9) \cdot s(x_9))) \quad (\text{V-4})$$

$$V_{S,i}(x_3, x_7) \begin{cases} 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_7) \cdot \frac{y_{18} + h(x_7)}{2} & \text{wenn } x_3 = 1 \\ 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 2 \\ 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 3 \end{cases} \quad (\text{V-5})$$

$$V_{V,i}(x_5, x_7, x_9) \begin{cases} 2 \cdot y_{16} \cdot \max(s(x_7); s(x_9)) \cdot \frac{h(x_7) + h(x_9)}{2} & \text{wenn } x_5 = 1 \\ (2 \cdot y_{16} \cdot s(x_9) \cdot h(x_9)) & \text{wenn } x_5 = 2 \end{cases} \quad (\text{V-6})$$

• Nebenbedingungen

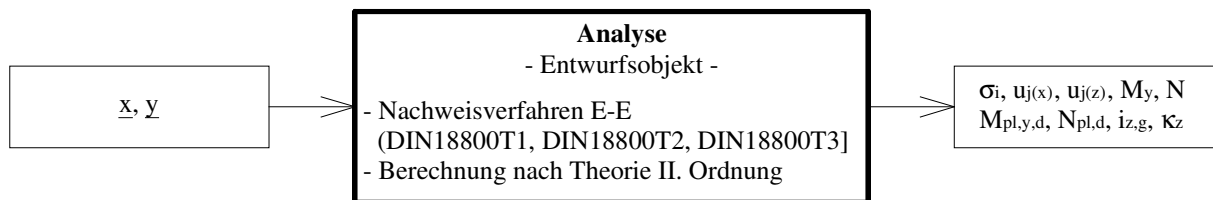


Abbildung V-1: Einschiffiger Rahmen, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_8} - 1 \leq 0 \quad (\text{V-7})$$

$$g_{u,j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_{11}} - 1 \leq 0 \quad (\text{V-8})$$

$$g_{u,j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_{12}} - 1 \leq 0 \quad (\text{V-9})$$

$$g_{s(1),i} = \frac{\bar{\lambda} \cdot M_y}{0,5 \cdot M_{pl,y,d}} - 1 \leq 0 \quad (\text{V-10})$$

$$g_{s(2),i} = \frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} - 1 \leq 0 \quad (\text{V-11})$$

$$\bar{\lambda} = \frac{y_{19} \cdot y_{10}}{i_{z,g} \cdot y_9} \quad (\text{V-12})$$

▪ Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^p g_{\sigma,i} + \sum_{j=1}^q g_{u,j(x)} + \sum_{j=1}^r g_{u,j(z)} + \sum_{i=1}^s g_{s(1),i} + \sum_{i=1}^t g_{s(2),i} \quad (\text{V-13})$$

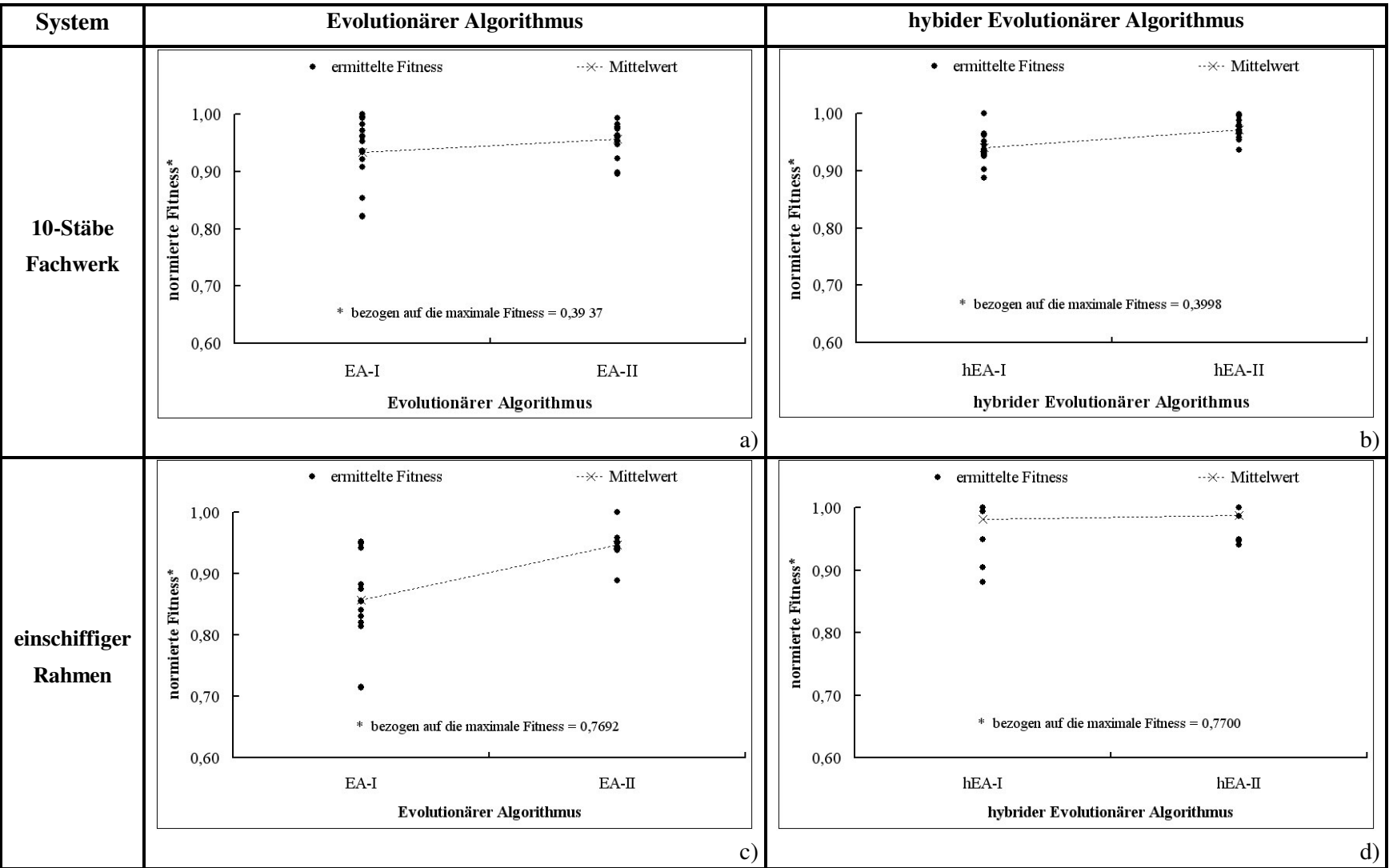
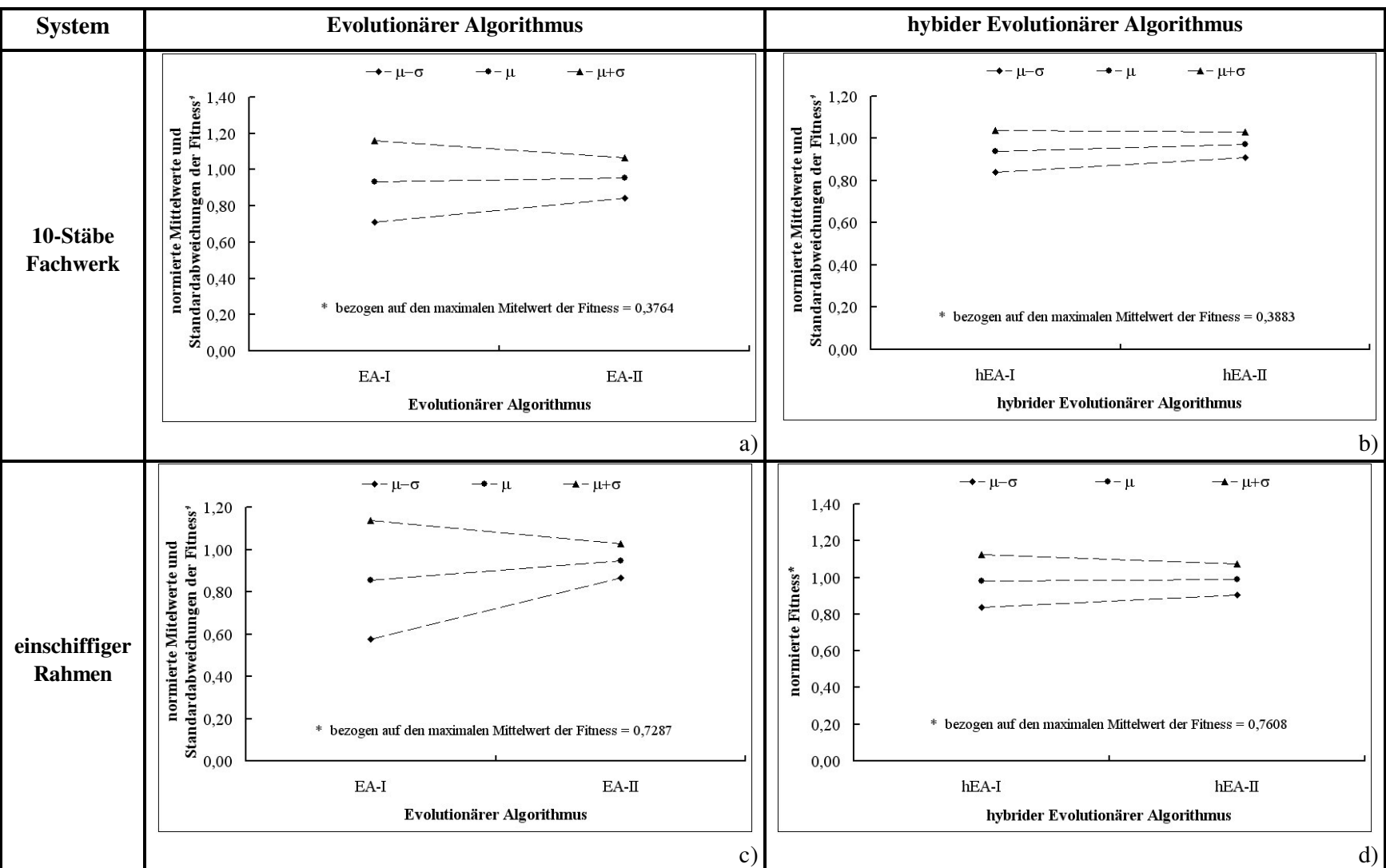


Abbildung V-2: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Qualität der Individuen gemessen an der Fitness V-4



a)

b)

c)

d)

Abbildung V-3: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Qualitätsvergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen der Individuen gemessen an der Fitness

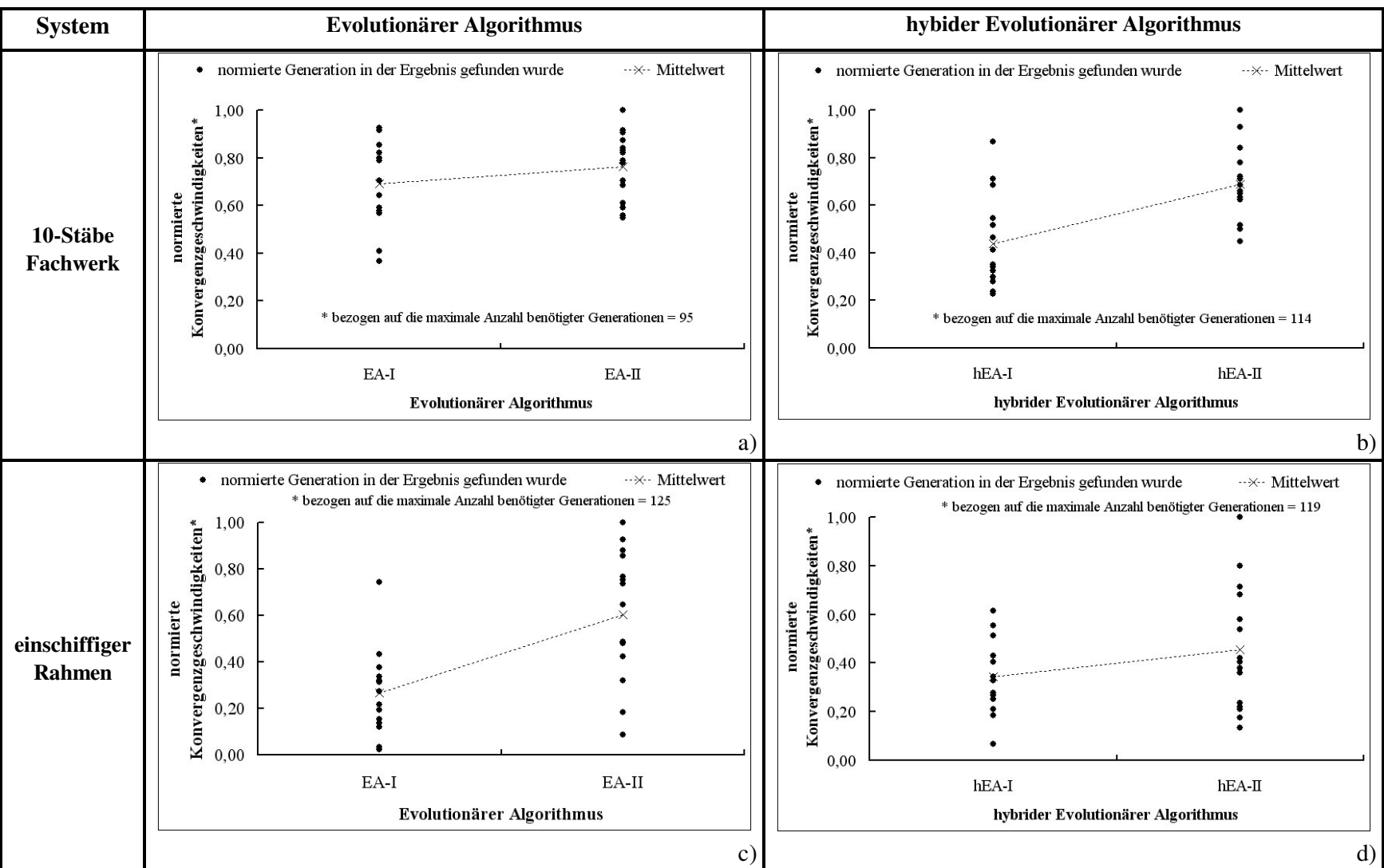


Abbildung V-4: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Konvergenzgeschwindigkeiten

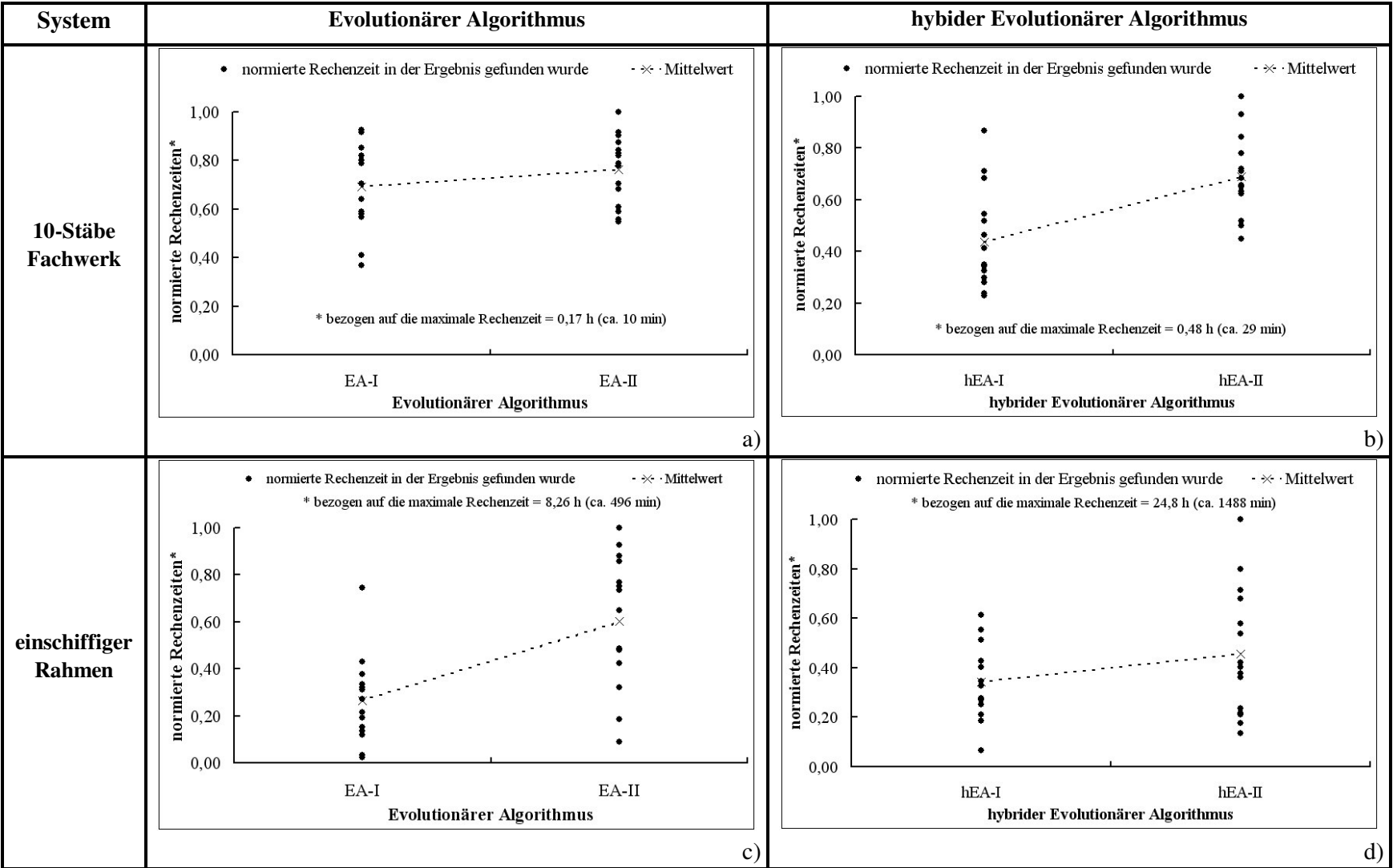


Abbildung V-5: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Vergleich der Rechenzeiten V-7

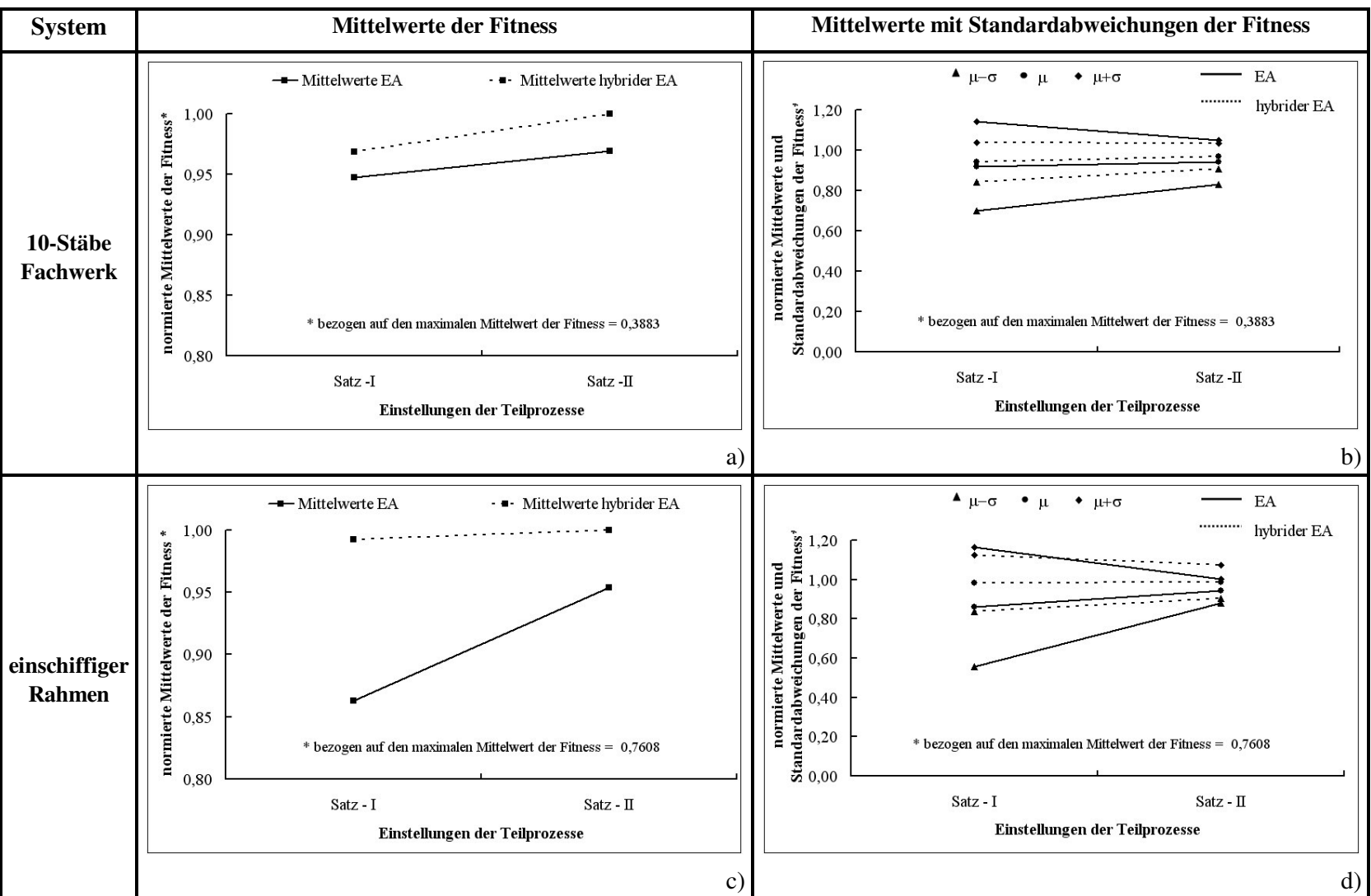


Abbildung V-6: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Tendenzieller Verlauf der Ergebnisse für die Zuverlässigkeit

System	Konvergenzgeschwindigkeiten	Rechenzeiten
<p>10-Stäbe Fachwerk</p>	<p>a)</p>	<p>b)</p>
<p>einschiffiger Rahmen</p>	<p>c)</p>	<p>d)</p>

Abbildung V-7: 10-Stäbe Fachwerk und einschiffiger Rahmen, Tendenzeller Verlauf der Ergebnisse für die Effizienz

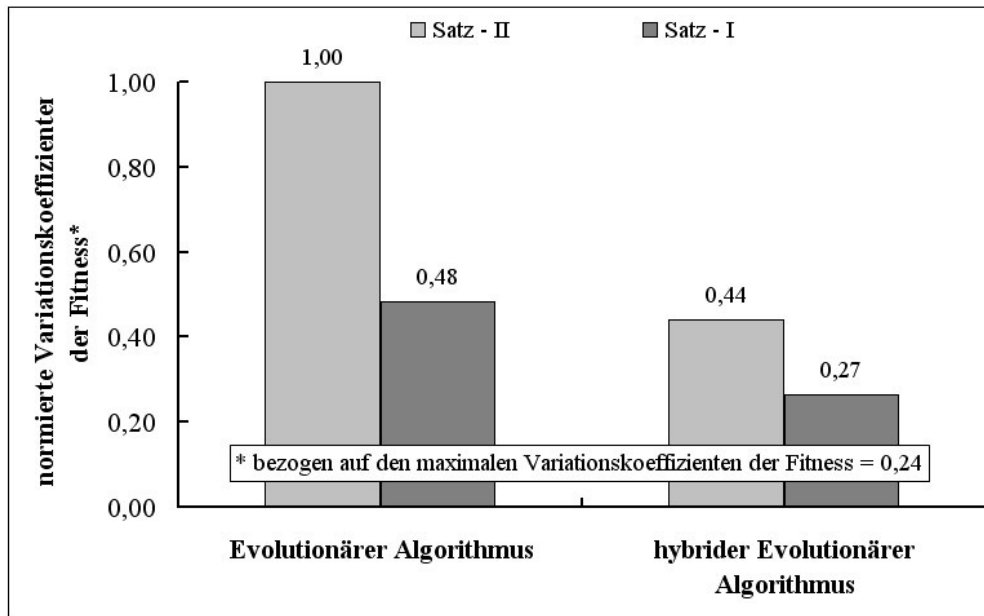


Abbildung V-8: 10-Stäbe Fachwerk, Variationskoeffizienten der Fitness

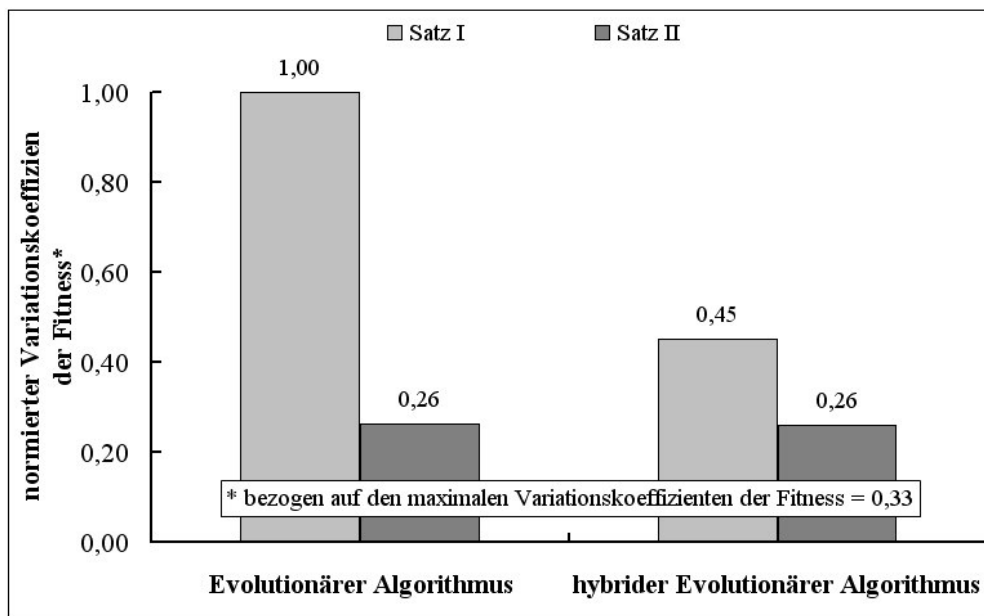


Abbildung V-9: Einschiffiger Rahmen, Variationskoeffizienten der Fitness

Anlage VI
- Geschweißter Zweifeldträger -

- Optimierungsvariablen

$$\underline{h}_S = \begin{pmatrix} h_{S1} \\ h_{S2} \\ h_{S3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{Sn-1} \\ h_{Sn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Querschnittshöhe - Element 1} \\ \text{Querschnittshöhe - Element 2} \\ \text{Querschnittshöhe - Element 3} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{Querschnittshöhe - Element n-1} \\ \text{Querschnittshöhe - Element n} \end{pmatrix}; n = 10, 16 \text{ bzw. } 20 \quad (\text{VI-1})$$

Als Variationsintervall für alle Optimierungsvariablen gelten die Datenpoolwerte der variablen Entwurfsgrößen in Tabelle 4.14.

- Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \\ E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ f_{y,k} \\ \sigma_{R,d} \\ l_{F,1} \\ l_{F,2} \\ l_i \\ \eta_{\min} \\ \eta_{\max} \end{pmatrix} \quad (\text{VI-2})$$

- Zielfunktion

$$Z = f(\underline{h}_S) = \sum_{i=1}^n y_8 * (1600 + 4 + h_{Si}) * y_3 \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{VI-3})$$

- Nebenbedingung

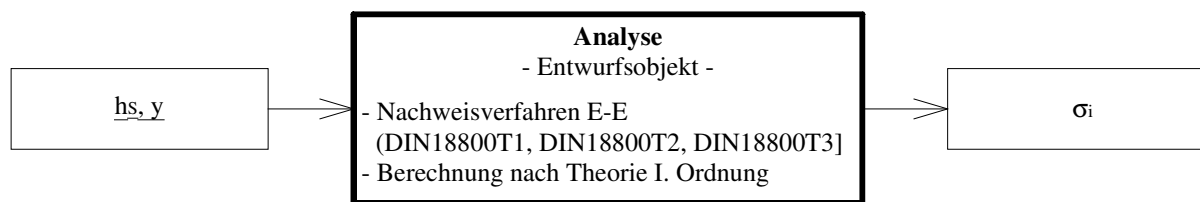


Abbildung VI-1: Geschweißter Zweifeldträger, Analyse

$$y_9 \leq \frac{\sigma_i}{y_5} \leq y_{10} \leq 1,0 \quad (\text{VI-4})$$

η_{\min} – minimale Auslastung

η_{\max} – maximale Auslastung

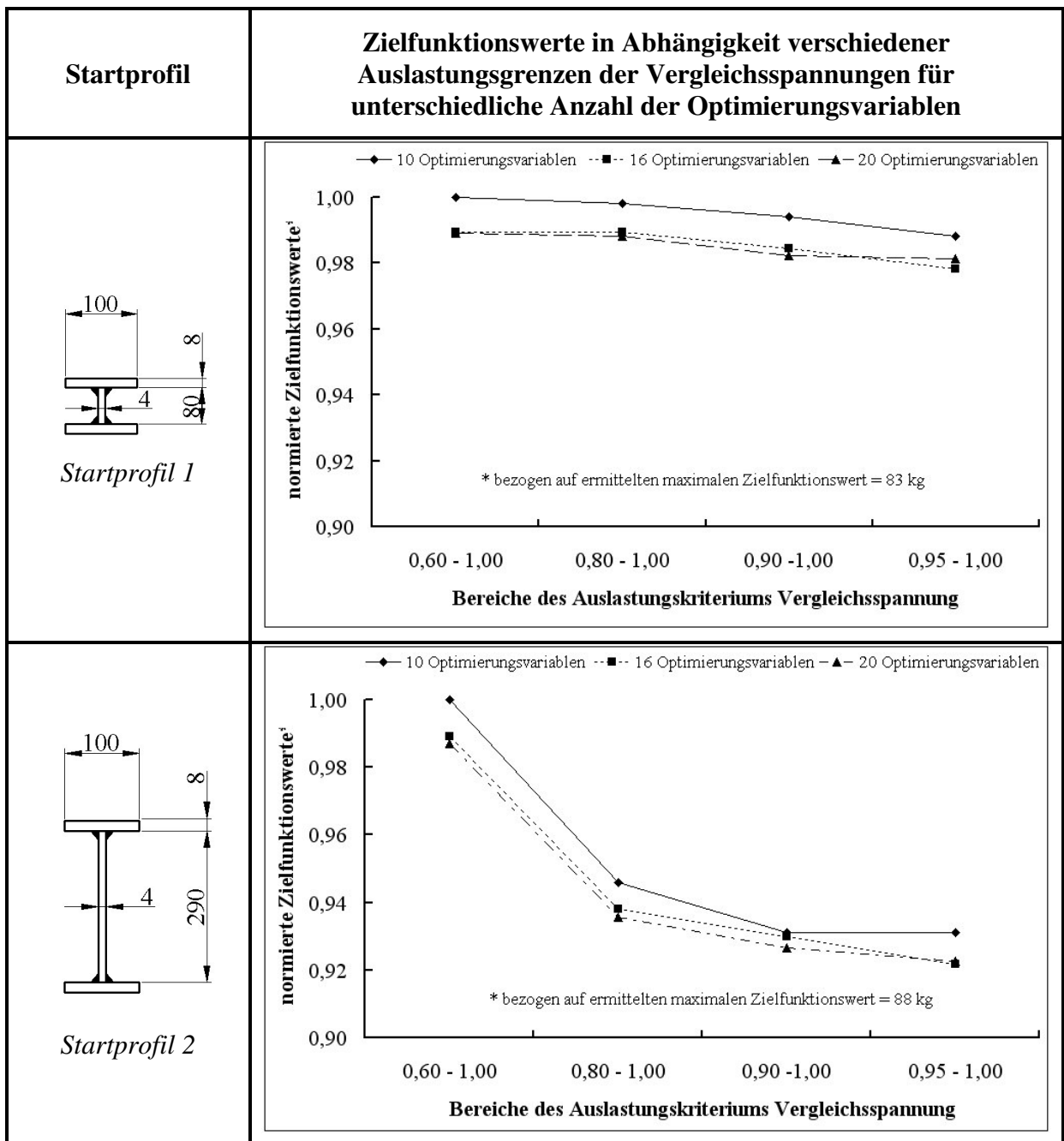


Abbildung VI-2: Geschweißter Zweifeldträger, Gegenüberstellung der Zielfunktionswerte in Abhängigkeit unterschiedlicher Startlösungen

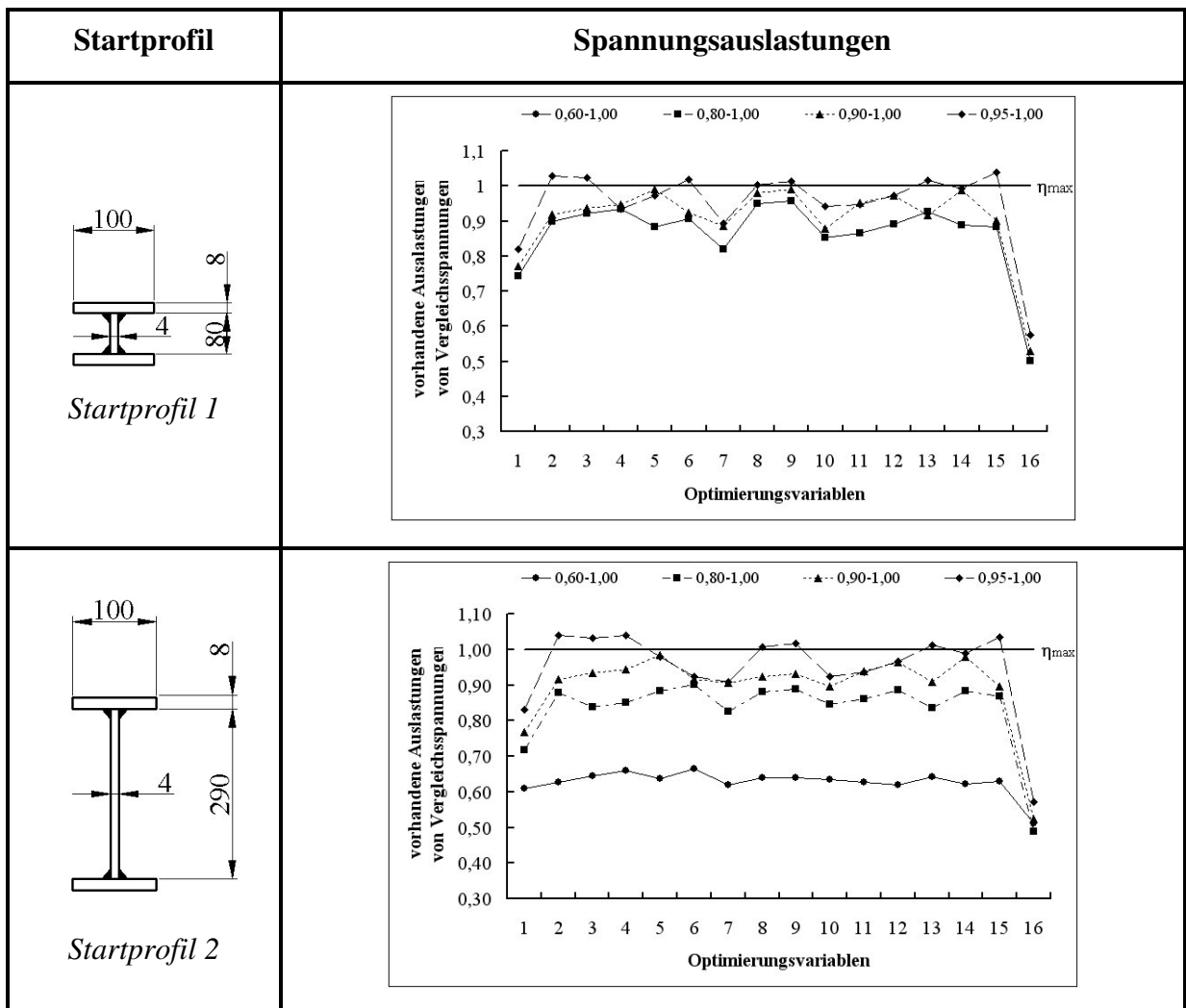


Abbildung VI-3: Geschweißter Zweifeldträger, Auslastungen der Vergleichsspannungen

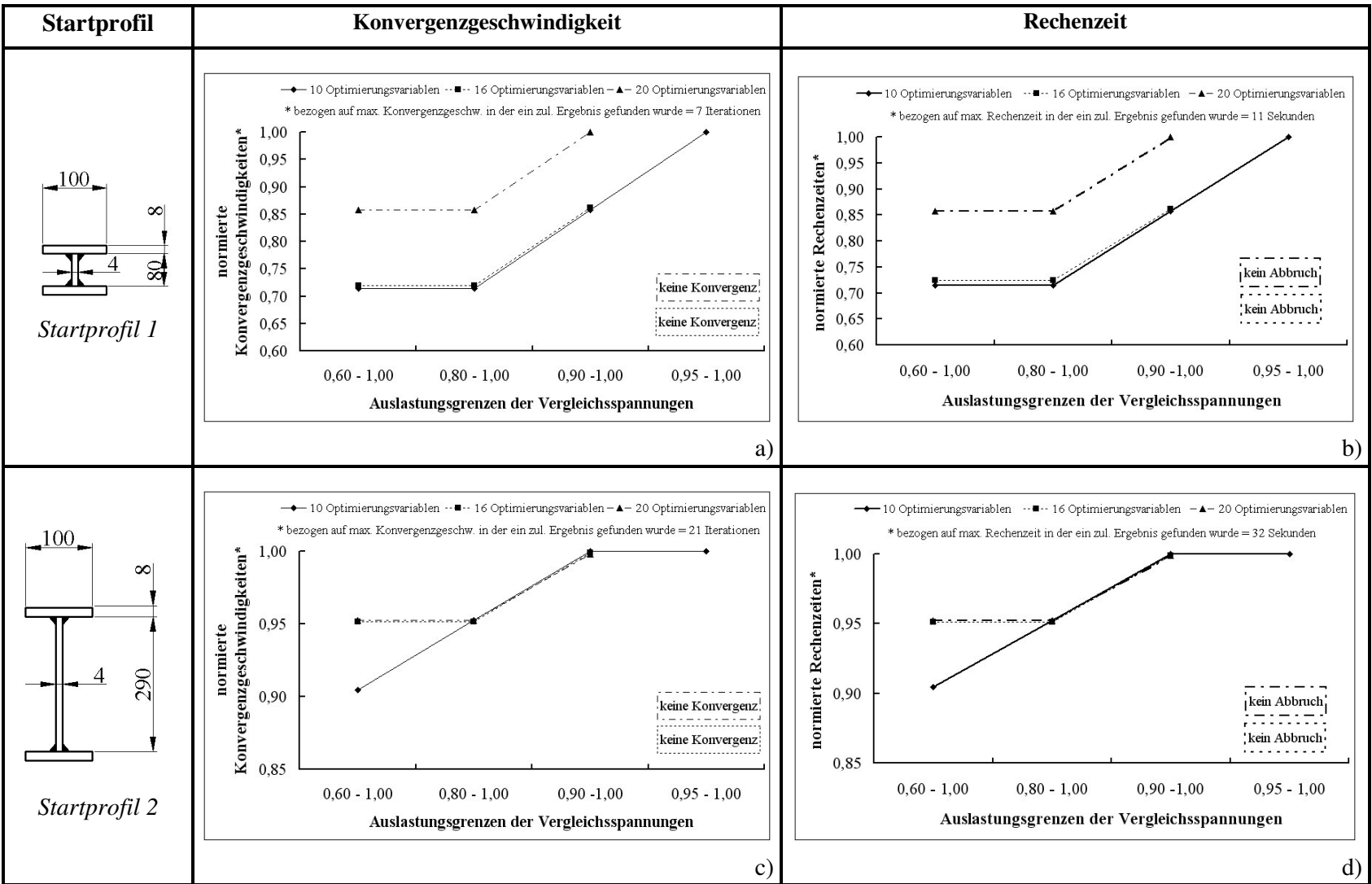


Abbildung VI-4: Geschweißter Zweifeldträger, Effizienz in Abhängigkeit unterschiedlicher Startlösungen
VI-5

Anlage VII

- Element zweischiffiger Rahmen -

- Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z - \text{Koordinate des Firstknotens} \\ \text{Lagerungs- und Kopplungsbedingungen} \\ \text{Querschnittsverlauf und Profiltyp der Aussenstiele} \\ \text{Profiltyp der Riegel} \\ \text{Vouten in den Riegeln} \\ \text{Profiltyp des Innenstiels} \\ \text{Gurtabmessungen der Aussenstiele} \\ \text{Stegabmessungen der Aussenstiele} \\ \text{Gurtabmessungen der Riegel} \\ \text{Stegabmessungen der Riegel} \\ \text{Stegabmessungen über dem Innenstiel} \\ \text{Gurtabmessungen des Innenstiels} \\ \text{Stegabmessungen des Innenstiels} \end{pmatrix} \quad (\text{VII-1})$$

- $x_1 \in \mathbb{D}_1 \quad \mathbb{D}_1 \{8000, 8100, 8200, 8300, \dots, 9600\}$
 $x_2 \in \mathbb{D}_2 \quad \mathbb{D}_2 \{1 \text{ (S-I)}, 2 \text{ (S-II)}, 3 \text{ (S-III)}, 4 \text{ (S-IV)}, 5 \text{ (S-V)}, 6 \text{ (S-VI)}\}$
 $x_3 \in \mathbb{D}_3 \quad \mathbb{D}_3 \{1 \text{ (konisch/geschweißt)}, 2 \text{ (parallelgurtig/geschweißt)}, 3 \text{ (gewalzt)}\}$
 $x_4 \in \mathbb{D}_4 \quad \mathbb{D}_4 \{1 \text{ (geschweißt)}, 2 \text{ (gewalzt)}\}$
 $x_5 \in \mathbb{D}_5 \quad \mathbb{D}_5 \{1 \text{ (R-I)}, 2 \text{ (R-II)}, 3 \text{ (R-III)}, 4 \text{ (R-IV)}\}$
 $x_6 \in \mathbb{D}_6 \quad \mathbb{D}_6 \{1 \text{ (IPE)}, 2 \text{ (HEA)}, 3 \text{ (geschweißt)}\}$
 $x_7 \in \mathbb{D}_7 \quad \mathbb{D}_7 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 280/13, 320/15, 340/16, 360/17, \\ \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_8 \in \mathbb{D}_8 \quad \mathbb{D}_8 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, \\ 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 650/6, \\ 700/6, 750/7, 800/7, 850/7, \text{IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_9 \in \mathbb{D}_9 \quad \mathbb{D}_9 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 280/13, 320/15, 340/16, 360/17, \\ \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_{10} \in \mathbb{D}_{10} \quad \mathbb{D}_{10} \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, \\ 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 650/6, \\ 700/6, 750/7, 800/7, 850/7, \text{IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_{11} \in \mathbb{D}_{11} \quad \mathbb{D}_{11} \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, \\ 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 650/6, \\ 700/6, 750/7, 800/7, 850/7, \text{IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_{12} \in \mathbb{D}_{12} \quad \mathbb{D}_{12} \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 280/13, 320/15, 340/16, 360/17, \\ \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
 $x_{13} \in \mathbb{D}_{13} \quad \mathbb{D}_{13} \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, \\ 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 650/6, \\ 700/6, 750/7, 800/7, 850/7, \text{IPE120, .IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ E \\ \rho_{Stahl} \\ f_{y,k} \\ \sigma_{R,d} \\ \lambda_a \\ k_c \\ u_{grenz(x)} \\ u_{grenz(z)} \\ g^D \\ SB \\ SH_T \\ l_1 \\ l_2 \\ h_{FP} \\ c \end{pmatrix} \quad (VII-2)$$

• Zielfunktion

$$Z = f(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (VII-3)$$

$$Z = f(\underline{x}) = y_6 \cdot ((4 \cdot y_{15} \cdot b(x_7) \cdot t(x_7) + V_{S,i}(x_3, x_8)) \\ + (4 \cdot y_{16} \cdot b(x_9) \cdot t(x_9) + V_{V,i}(x_5, x_8, x_{10}, x_{11})) \\ + y_{17} \cdot (4 \cdot b(x_9) \cdot t(x_9) + 2 \cdot h(x_{10}) \cdot s(x_{10})) \\ + y_{15} \cdot (2 \cdot b(x_{12}) \cdot t(x_{12}) + h(x_{13}) \cdot s(x_{13}))) \quad (VII-4)$$

$$V_{S,i}(x_3, x_8) = \begin{cases} 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_8) \cdot \frac{y_{18} + h(x_8)}{2} & \text{wenn } x_3 = 1 \\ 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_8) \cdot h(x_8) & \text{wenn } x_3 = 2 \\ 2 \cdot y_{15} \cdot s(x_8) \cdot h(x_8) & \text{wenn } x_3 = 3 \end{cases} \quad (VII-5)$$

$$V_{V,i}(x_5, x_8, x_{10}, x_{11}) = \begin{cases} 4 \cdot y_{16} \cdot h(x_{10}) \cdot s(x_{10}) & \text{wenn } x_5 = 1 \\ 2 \cdot y_{16} \cdot (s(x_{10}) \cdot h(x_{10}) \\ + \max(s(x_{10}); s(x_{11})) \cdot \frac{h(x_{10}) + h(x_{11})}{2}) & \text{wenn } x_5 = 2 \\ (2 \cdot y_{16} \cdot (\max(s(x_8); s(x_{10})) \cdot \frac{h(x_8) + h(x_{10})}{2} \\ + h(x_{10}) \cdot s(x_{10})) & \text{wenn } x_5 = 3 \\ (2 \cdot y_{16} \cdot (\max(s(x_8); s(x_{10})) \cdot \frac{h(x_8) + h(x_{10})}{2} \\ + \max(s(x_{10}); s(x_{11})) \cdot \frac{h(x_{10}) + h(x_{11})}{2}) & \text{wenn } x_5 = 4 \end{cases} \quad (VII-6)$$

- Nebenbedingungen

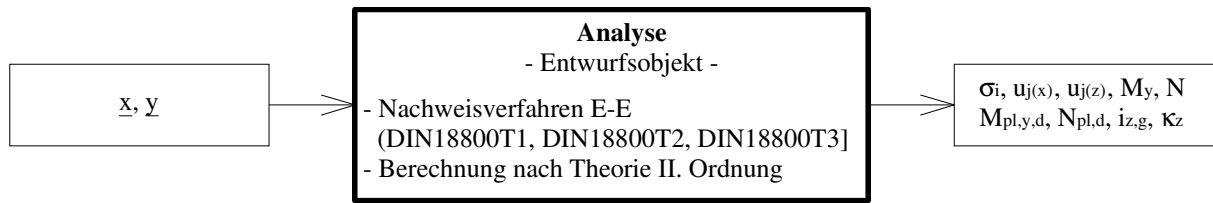


Abbildung VII-1: Zweischiffiger Rahmen, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_8} - 1 \leq 0 \quad (\text{VII-7})$$

$$g_{u,j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_{11}} - 1 \leq 0 \quad (\text{VII-8})$$

$$g_{u,j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_{12}} - 1 \leq 0 \quad (\text{VII-9})$$

$$g_{s(1),i} = \frac{\bar{\lambda} \cdot M_y}{0,5 \cdot M_{pl,y,d}} - 1 \leq 0 \quad (\text{VII-10})$$

$$g_{s(2),i} = \frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} - 1 \leq 0 \quad (\text{VII-11})$$

$$\bar{\lambda} = \frac{y_{19} \cdot y_{10}}{i_{z,g} \cdot y_9} \quad (\text{VII-12})$$

- Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^p g_{\sigma,i} + \sum_{j=1}^q g_{u,j(x)} + \sum_{j=1}^r g_{u,j(z)} + \sum_{i=1}^s g_{s(1),i} + \sum_{i=1}^t g_{s(2),i} \quad (\text{VII-13})$$

- modifizierte Zielfunktion

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad (\text{VII-14})$$

- Fitnessfunktion

$$Fitness(Ind) = \frac{1}{Z'} \quad (\text{VII-15})$$

Anlage VIII

- Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle -

• Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z - \text{Koordinate des Firstknotens} \\ \text{Lagerungsart der Rahmenstiele} \\ \text{Querschnittsverlauf und Profiltyp der Stiele} \\ \text{Profiltyp des Riegels} \\ \text{Vouten im Riegel} \\ \text{Gurtabmessungen der Stiele} \\ \text{Stegabmessungen der Stiele} \\ \text{Gurtabmessungen des Riegels} \\ \text{Stegabmessungen des Riegels} \\ \text{Profiltyp der Pfetten} \\ \text{Achsabstand der Rahmen} \\ \text{Profilgröße der Pfetten} \end{pmatrix} \quad (\text{VIII-1})$$

$$x_1 \in \mathbb{D}_1 \quad \mathbb{D}_1 \{6100, 6300, 6500, 6700, \dots, 9300\}$$

$$x_2 \in \mathbb{D}_2 \quad \mathbb{D}_2 \{1 \text{ (ZGR)}, 2 \text{ (EGR)}\}$$

$$x_3 \in \mathbb{D}_3 \quad \mathbb{D}_3 \{1 \text{ (konisch/geschweißt)}, 2 \text{ (parallelgurtig/geschweißt)}, 3 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_4 \in \mathbb{D}_4 \quad \mathbb{D}_4 \{1 \text{ (geschweißt)}, 2 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_5 \in \mathbb{D}_5 \quad \mathbb{D}_5 \{1 \text{ (mit Voute im Riegel)}, 2 \text{ (ohne Voute im Riegel)}\}$$

$$x_6 \in \mathbb{D}_6 \quad \mathbb{D}_6 \{180/9, 200,10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, \\ 360/17, \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_7 \in \mathbb{D}_7 \quad \mathbb{D}_7 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, 300/4, \\ 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, \\ 1000/9, \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_8 \in \mathbb{D}_8 \quad \mathbb{D}_8 \{180/9, 200,10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, \\ 360/17, \text{IPE100, IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_9 \in \mathbb{D}_9 \quad \mathbb{D}_9 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 270/4, 300/4, 330/4, 360/4, \\ 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, 1000/9, \text{IPE100,} \\ \text{IPE120, .IPE140, IPE160, } \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_{10} \in \mathbb{D}_{10} \quad \mathbb{D}_{10} \{1 \text{ (IPE-Profil)}, 2 \text{ (U-Profil)}\}$$

$$x_{11} \in \mathbb{D}_{11} \quad \mathbb{D}_{11} \{1 \text{ (0,159)}, 2 \text{ (0,470)}, 3 \text{ (2,500)}\}$$

$$x_{12} \in \mathbb{D}_{12} \quad \mathbb{D}_{12} \{3333, 3571, 3846, 4166, 4545, 5000, 5555, 6250, 7142\}$$

$$x_{13} \in \mathbb{D}_{13} \quad \mathbb{D}_{13} \{\text{IPE100, IPE120, .IPE140, } \dots, \text{IPE300, U100, U120, U140, } \dots, \text{U300}\}$$

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \\ y_{20} \\ y_{21} \\ y_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ f_{y,k} \\ \sigma_{R,d} \\ \lambda_a \\ k_c \\ u_{\text{grenz}(x)} \\ u_{\text{grenz}(z)} \\ u_{\text{grenz}(z)} \\ g_D \\ SB \\ SL \\ SH_T \\ l_1 \\ l_2 \\ h_{FP} \\ c \\ x_{\text{Pfette}} \end{pmatrix} \quad (\text{VIII-2})$$

• Zielfunktion

$$Z = f(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{VIII-3})$$

$$Z = f(\underline{x}) = y_6 \cdot \left(\frac{y_{16}}{x_{11}} + 1 \right) \cdot \left((4 \cdot y_{17} \cdot b(x_6) \cdot t(x_6) + V_{S,i}(x_3, x_7)) \right. \\ \left. + (4 \cdot y_{17} \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + V_{V,i}(x_5, x_7, x_9)) \right. \\ \left. + y_{19} \cdot (2 \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + h(x_9) \cdot s(x_9)) \right) \\ \left. + y_6 \cdot \left(\left(\frac{y_{15}}{y_{22}} + 2 \right) \cdot y_{16} \cdot A(x_{12}) \right) \quad (\text{VIII-4})$$

$$V_{S,i}(x_3, x_7) = \begin{cases} 2 \cdot y_{17} \cdot s(x_7) \cdot \frac{y_{20} + h(x_7)}{2} & \text{wenn } x_3 = 1 \\ 2 \cdot y_{17} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 2 \\ 2 \cdot y_{17} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 3 \end{cases} \quad (\text{VIII-5})$$

$$V_{V,i}(x_5, x_7, x_9) = \begin{cases} 2 \cdot y_{18} \cdot \max(s(x_7); s(x_9)) \cdot \frac{h(x_7) + h(x_9)}{2} & \text{wenn } x_5 = 1 \\ (2 \cdot y_{18} \cdot s(x_9) \cdot h(x_9)) & \text{wenn } x_5 = 2 \end{cases} \quad (\text{VIII-6})$$

- Nebenbedingungen

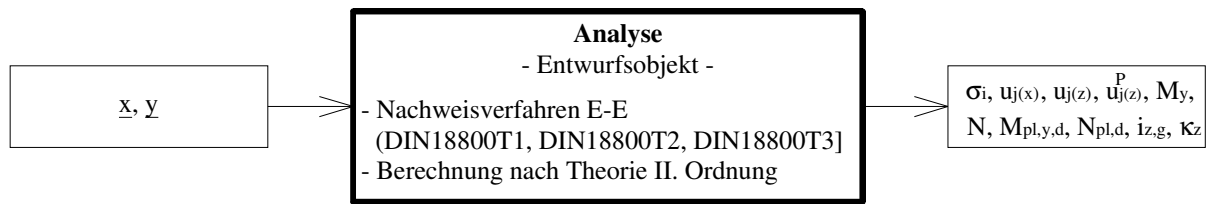


Abbildung VIII-1: Teilsystem Tragwerk einschiffige Halle, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_8} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-7)}$$

$$g_{u,j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_{11}} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-8)}$$

$$g_{u,j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_{12}} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-9)}$$

$$g_{u,j(z)}^P = \frac{u_{j(z)}^P}{y_{13}} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-10)}$$

$$g_{s(1),i} = \frac{\bar{\lambda} \cdot M_y}{0,5 \cdot M_{pl,y,d}} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-11)}$$

$$g_{s(2),i} = \frac{N}{\kappa \cdot N_{pl,d}} - 1 \leq 0 \quad \text{(VIII-12)}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{y_{21} \cdot y_{10}}{i_{z,g} \cdot y_9} \quad \text{(VIII-13)}$$

- Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^p g_{\sigma,i} + \sum_{j=1}^q g_{u,j(x)} + \sum_{j=1}^r g_{u,j(z)} + \sum_{j=1}^v g_{u,j(z)}^P + \sum_{i=1}^s g_{s(1),i} + \sum_{i=1}^t g_{s(2),i} \quad \text{(VIII-14)}$$

- modifizierte Zielfunktion

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad \text{(VIII-15)}$$

- Fitnessfunktion

$$Fitness(Ind) = \frac{1}{Z'} \quad \text{(VIII-16)}$$

Anlage IX

- Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle -

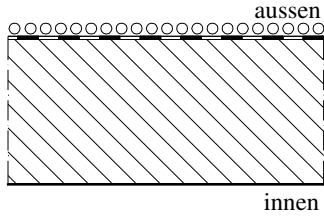
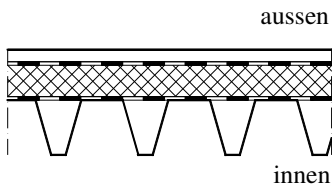
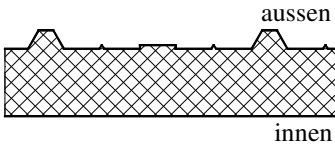
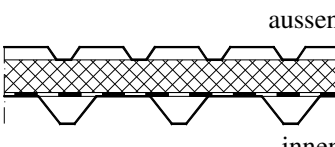
	Schichten von aussen nach innen			s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Schutzschicht (Kies)	0,05	-	0,9	
	2	Polypropylenflies	0,0003	-	-	
	3	Bitumendachbahnen (DIN52128)	0,01	0,17	0,04	
	4	Porenbetondachplatten (GB 3,3/0,6)	0,2	0,19	1,40	
	Σ =		0,2603	-	2,34	
Wärmedurchgangskoeffizient k_D =			0,78 [W/(m²K)]			
D1 Porenbetondachplatten						
	Schichten von aussen nach innen			s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Dachaussenschale 35/207 (0,75)	0,035	58,00	0,073	
	2	Polyethylen-Bahn	0,003	-	0,036	
	3	PUR-Hartschaumplatten	0,10	0,025	0,03	
	4	Dampfsperre (Folie)	0,003	-	0,02	
	5	Stahltrapezprofile 160/250 (1,50)	0,158	58,00	0,24	
Σ =		0,30	-	0,40		
Wärmedurchgangskoeffizient k_D=			0,24 [W/(m²K)]			
D2 Stahltrapezprofil (gedämmt)						
	Schichten von aussen nach innen			s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Stahlblech, verzinkt	0,0006	58,00	0,05	
	2	PUR-Hartschaum	0,0600	0,025	0,018	
	3	Stahlblech, verzinkt	0,00045	58,00	0,05	
	Σ =		0,06105	-	0,12	
Wärmedurchgangskoeffizient k_D =			0,39 [W/(m²K)]			
D3 Sandwichelement						
	Schichten von aussen nach innen			s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Dachaussenschale 35/207 (0,75)	0,035	58,00	0,073	
	3	PUR-Hartschaumplatten	0,10	0,025	0,03	
	3	Dampfsperre (Folie)	0,003	-	0,02	
	4	Stahltrapezprofile 75/305 (0,88)	0,075	58,00	0,0912	
Σ =		0,2130	-	0,2142		
Wärmedurchgangskoeffizient k_D =			0,24 [W/(m²K)]			
D4 Stahltrapezprofil (gedämmt)						

Abbildung IX-1: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Dachsysteme

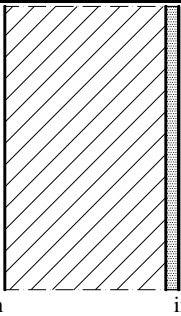
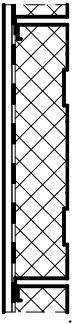
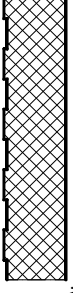
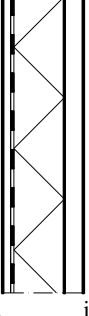
 <p>aussen innen</p>	Schichten von aussen nach innen		s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Porenbetonwandplatten (GB 3,3/0,6)	0,20	0,19	1,44
	2	Kalkgipsputz	0,01	0,70	0,18
	Σ =		0,21	-	1,62
W1 Porenbetonwandplatten		Wärmedurchgangskoeffizient k_w =		0,81 [W/(m²K)]	
 <p>aussen innen</p>	Schichten von aussen nach innen		s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Wandaussenschale 35/207 (0,75)	0,035	58,00	0,073
	2	Dampfsperre (Folie)	0,003	-	0,02
	3	PUR-Hartschaumplatten	0,10	0,025	0,03
	4	Stahlkassettenprofile 100/600 L	0,00088	58,00	0,105
Σ =		0,1658	-	0,228	
W2 Stahlkassettenprofile (gedämmt)		Wärmedurchgangskoeffizient k_w =		0,24 [W/(m²K)]	
 <p>aussen innen</p>	Schichten von aussen nach innen		s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Stahlblech, verzinkt	0,0006	58,00	0,05
	2	PUR-Hartschaum	0,0800	0,025	0,024
	3	Stahlblech, verzinkt	0,0006	58,00	0,05
Σ =		0,0812	-	0,124	
W3 Sandwichelemente		Wärmedurchgangskoeffizient k_w =		0,30 [W/(m²K)]	
 <p>aussen innen</p>	Schichten von aussen nach innen		s_i [m]	λ_i [W/mK]	g_i [kN/m ²]
	1	Wandaussenschale 35/207 (0,75)	0,035	58,00	0,073
	2	Folie	-	-	0,02
	3	PUR-Hartschaumplatten	0,10	0,025	0,03
	4	Stahltrapezprofile 59/210 (0,75)	0,059	58,00	0,0871
Σ =		0,1940	-	0,2101	
W4 Stahltrapezprofile (gedämmt)		Wärmedurchgangskoeffizient k_w =		0,24 [W/(m²K)]	

Abbildung IX-2: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Wandsysteme

• Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z - \text{Koordinate des Firstknotens} \\ \text{Lagerungs- und Kopplungsbedingungen} \\ \text{Querschnittsverlauf und Profiltyp der Stiele} \\ \text{Profiltyp des Riegels} \\ \text{Vouten im Riegel} \\ \text{Gurtabmessungen der Stiele} \\ \text{Stegabmessungen der Stiele} \\ \text{Gurtabmessungen des Riegels} \\ \text{Stegabmessungen des Riegels} \\ \text{Dachsystem} \\ \text{Wandsystem} \\ \text{Profiltyp der Pfetten} \\ \text{Profilgröße der Pfetten} \end{pmatrix} \quad (\text{IX-1})$$

$$x_1 \in \mathbb{D}_1 \quad \mathbb{D}_1 \{6100, 6300, 6500, 6700, \dots, 9300\}$$

$$x_2 \in \mathbb{D}_2 \quad \mathbb{D}_2 \{1 \text{ (ZGR)}, 2 \text{ (EGR)}\}$$

$$x_3 \in \mathbb{D}_3 \quad \mathbb{D}_3 \{1 \text{ (konisch/geschweißt)}, 2 \text{ (parallelgurtig/geschweißt)}, 3 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_4 \in \mathbb{D}_4 \quad \mathbb{D}_4 \{1 \text{ (geschweißt)}, 2 \text{ (gewalzt)}\}$$

$$x_5 \in \mathbb{D}_5 \quad \mathbb{D}_5 \{1 \text{ (mit Voute im Riegel)}, 2 \text{ (ohne Voute im Riegel)}\}$$

$$x_6 \in \mathbb{D}_6 \quad \mathbb{D}_6 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, 360/17, \text{IPE100}, \text{IPE120}, \text{.IPE140}, \text{IPE160}, \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_7 \in \mathbb{D}_7 \quad \mathbb{D}_7 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 220/4, 240/4, 270/4, 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, 1000/9, \text{IPE100}, \text{IPE120}, \text{.IPE140}, \text{IPE160}, \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_8 \in \mathbb{D}_8 \quad \mathbb{D}_8 \{180/9, 200/10, 220/10, 240/11, 260/12, 280/13, 300/14, 320/15, 340/16, 360/17, \text{IPE100}, \text{IPE120}, \text{.IPE140}, \text{IPE160}, \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_9 \in \mathbb{D}_9 \quad \mathbb{D}_9 \{100/4, 120/4, 140/4, 160/4, 180/4, 200/4, 270/4, 300/4, 330/4, 360/4, 400/4, 450/5, 500/5, 550/5, 600/5, 700/6, 800/7, 900/8, 1000/9, \text{IPE100}, \text{IPE120}, \text{.IPE140}, \text{IPE160}, \dots, \text{IPE600}\}$$

$$x_{10} \in \mathbb{D}_{10} \quad \mathbb{D}_{10} \{1 \text{ (Porenbetondachplatten)}, 2 \text{ (Stahltrapezprofile gedämmt)}, 3 \text{ (Pfetten mit Sandwichelementen)}, 4 \text{ (Pfetten mit Stahltrapezprofile gedämmt)}\}$$

$$x_{11} \in \mathbb{D}_{11} \quad \mathbb{D}_{11} \{1 \text{ (Porenbetonwandplatten)}, 2 \text{ (Stahlkassettenprofile gedämmt)}, 3 \text{ (Wandriegel mit Sandwichelementen)}, 4 \text{ (Wandriegel mit Stahltrapezprofilen gedämmt)}\}$$

$$x_{12} \in \mathbb{D}_{12} \quad \mathbb{D}_{12} \{1 \text{ (IPE-Profil)}, 2 \text{ (U-Profil)}\}$$

$$x_{13} \in \mathbb{D}_{15} \quad \mathbb{D}_{13} \{\text{IPE100}, \text{IPE120}, \text{.IPE140}, \dots, \text{IPE300}, \text{U100}, \text{U120}, \text{U140}, \dots, \text{U300}\}$$

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \\ y_{20} \\ y_{21} \\ y_{22} \\ y_{23} \\ y_{24} \\ y_{25} \\ y_{26} \\ y_{27} \\ y_{28} \\ y_{29} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ \rho_{\text{FundBeton}} \\ f_{y,k} \\ \sigma_{R,d} \\ \lambda_a \\ k_c \\ u_{\text{grenz}(x)} \\ u_{\text{grenz}(z)} \\ u_{\text{grenz}(z)}^p \\ g_D \\ k_{FB} \\ k_F \\ SB \\ SL \\ SH_T \\ AA \\ l_1 \\ l_2 \\ h_{FP} \\ c \\ x_{\text{Pfette}} \\ A_{FB} \\ A_F \\ h_{\text{Fund}} \end{pmatrix} \quad (\text{IX-2})$$

• Zielfunktion

$$Z_1 = f_1(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{IX-3})$$

$$Z_2 = f_2(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{IX-4})$$

$$Z_1 = f_1(\underline{x}) = y_6 \cdot \left(\frac{y_{19}}{y_{21}} + 1 \right) \cdot \left((4 \cdot y_{19} \cdot b(x_6) \cdot t(x_6) + V_{s,i}(x_3, x_7)) \right. \\ \left. + (4 \cdot y_{22} \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + V_{v,i}(x_5, x_7, x_9)) \right. \\ \left. + y_{23} \cdot (2 \cdot b(x_8) \cdot t(x_8) + h(x_9) \cdot s(x_9)) \right) \\ \left. + y_6 \cdot \left(\left(\frac{y_{18}}{y_{26}} + 2 \right) \cdot y_{19} \cdot A(x_{13}) \right) \quad (\text{IX-5})$$

$$V_{s,i}(x_3, x_7) = \begin{cases} 2 \cdot y_{20} \cdot s(x_7) \cdot \frac{y_{24} + h(x_7)}{2} & \text{wenn } x_3 = 1 \\ 2 \cdot y_{20} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 2 \\ 2 \cdot y_{20} \cdot s(x_7) \cdot h(x_7) & \text{wenn } x_3 = 3 \end{cases} \quad (\text{IX-6})$$

$$V_{v,i}(x_5, x_7, x_9) = \begin{cases} 2 \cdot y_{22} \cdot \max(s(x_7); s(x_9)) \cdot \frac{h(x_7) + h(x_9)}{2} & \text{wenn } x_5 = 1 \\ (2 \cdot y_{22} \cdot s(x_9) \cdot h(x_9)) & \text{wenn } x_5 = 2 \end{cases} \quad (\text{IX-7})$$

$$Z_2 = f_2(\underline{x}) = 2 \cdot y_7 \cdot \left(\frac{y_{19}}{y_{21}}\right) \cdot (2 \cdot l_{Fund} \cdot y_{29}) \quad (IX-8)$$

l_{Fund} - Fundamentabmessungen (Breite und Länge) \Rightarrow Analyse (Abb. IX-1)

$$Z = f(\underline{x}) = \frac{1}{\alpha \cdot Z_1 + (1 - \alpha) \cdot Z_2} \Rightarrow \text{Maximum} \quad (IX-9)$$

α - Wichtungsfaktor

- Nebenbedingungen

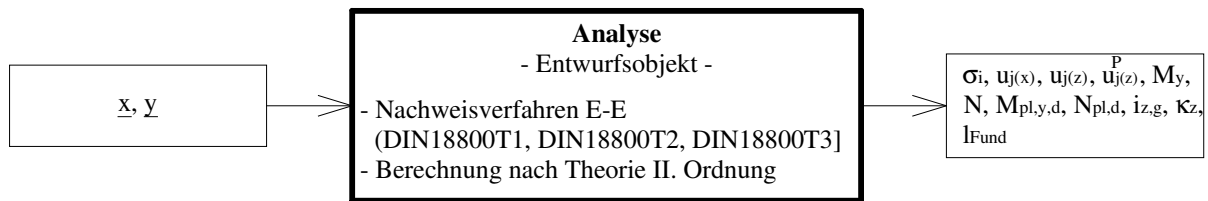


Abbildung IX-3: Gesamtsystem Bauwerk einschiffige Halle, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_9} - 1 \leq 0 \quad (IX-10)$$

$$g_{u,j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_{12}} - 1 \leq 0 \quad (IX-11)$$

$$g_{u,j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_{13}} - 1 \leq 0 \quad (IX-12)$$

$$g_{u,j(z)}^P = \frac{u_{j(z)}^P}{y_{14}} - 1 \leq 0 \quad (IX-13)$$

$$g_{s(1),i} = \frac{\bar{\lambda} \cdot M_y}{0,5 \cdot M_{pl,y,d}} - 1 \leq 0 \quad (IX-14)$$

$$g_{s(2),i} = \frac{N}{\kappa_z \cdot N_{pl,d}} - 1 \leq 0 \quad (IX-15)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{y_{25} \cdot y_{11}}{i_{z,g} \cdot y_{10}} \quad (IX-16)$$

$$g_k = \frac{k_{m,W,D}}{k_{m,max}} - 1 \leq 0 \quad (IX-17)$$

$$k_{m,W,D} = \frac{k_W(x_{11}) \cdot A_W + y_{16} \cdot y_{27} + 0,8 \cdot k_D(x_{10}) \cdot A_D + 0,5 \cdot y_{15} \cdot y_{26}}{A_{ges}} \quad (IX-18)$$

$$k_{m,max} = 0,45 + 0,165 * \frac{1}{\frac{A_{ges}}{V_{ges}}} \quad (IX-19)$$

$$A_D = 2 \cdot y_{19} \cdot \sqrt{\left(\frac{y_{18}}{2}\right)^2 + (x_1 - y_{20})^2} \quad (\text{IX-20})$$

$$A_W = 2 \cdot y_{19} \cdot y_{20} + 2 \cdot y_{18} \cdot y_{20} + 2 \cdot y_{18} \cdot (y_{21} - y_{20}) \quad (\text{IX-21})$$

$$A_{ges} = y_{27} + A_W + y_{28} + A_D \quad (\text{IX-22})$$

$$V_{ges} = y_{18} \cdot y_{19} \cdot y_{20} + (y_{21} - y_{20}) \cdot y_{19} \cdot \frac{y_{18}}{2} \quad (\text{IX-23})$$

A_{ges} - Summe aller Einzelflächen der Halle

V_{ges} - Raumvolumen der Halle

g_K - Strafterm infolge unzulässigen Nachweises der Wärmeschutzverordnung

$k_{m,max}$ - maximale mittlere Wärmedurchgangskoeffizient

$k_{mW,D}$ - mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient des Bauwerkes

A_F - Fensterfläche, A_W - Wandfläche, A_{FB} - Fussbodenfläche, A_D - Dachdecke

- Strafterm

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^p g_{\sigma,i} + \sum_{j=1}^q g_{u,j(x)} + \sum_{j=1}^r g_{u,j(z)} + \sum_{j=1}^v g_{u,j(z)}^P + \sum_{i=1}^s g_{s(1),i} + \sum_{i=1}^t g_{s(2),i} + g_k \quad (\text{IX-24})$$

- modifizierte Zielfunktion

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad (\text{IX-25})$$

- Fitnessfunktion

$$Fitness(Ind) = \frac{1}{Z'} \quad (\text{IX-25})$$

Anlage X
- Wassertank -

• Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - \text{Koordinate Knoten 2} \\ y - \text{Koordinate Knoten 3} \\ \text{Stahlsorte für Stahlrahmen und -bleche} \\ \text{Profiltyp des Stahlrahmens} \\ \text{Anzahl der Stahlrahmen} \\ \text{oberer Abstand der Stahlrahmen} \\ \text{unterer Abstand der Stahlrahmen} \\ \text{Werte von IPE - Profilen} \\ \text{Werte von HEA - bzw. HEB - Profilen} \\ \text{Stahlblechdicken} \end{pmatrix} \quad (\text{X-1})$$

- $x_1 \in \mathbb{D}_1 \quad \mathbb{D}_1 \{0, 250, 500, 750, 1000, \dots, 4000\}$
- $x_2 \in \mathbb{D}_2 \quad \mathbb{D}_2 \{0, 250, 500, 750, 1000, \dots, 2000\}$
- $x_3 \in \mathbb{D}_3 \quad \mathbb{D}_3 \{1 \text{ (S235)}, 2 \text{ (S355)}\}$
- $x_4 \in \mathbb{D}_4 \quad \mathbb{D}_4 \{1 \text{ (IPE-Profil)}, 2 \text{ (HEA-Profil)}, 3 \text{ (HEB-Profil)}\}$
- $x_5 \in \mathbb{D}_5 \quad \mathbb{D}_5 \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$
- $x_6 \in \mathbb{D}_6 \quad \mathbb{D}_6 \{500, 705, 1000, 1250, \dots, 2750\}$
- $x_7 \in \mathbb{D}_7 \quad \mathbb{D}_7 \{500, 705, 1000, 1250, \dots, 2750\}$
- $x_8 \in \mathbb{D}_8 \quad \mathbb{D}_8 \{\text{IPE100, IPE120, IPE140, IPE160, \dots, IPE600}\}$
- $x_9 \in \mathbb{D}_9 \quad \mathbb{D}_9 \{\text{HEA100, HEA120, HEA140, HEA160, \dots, HEA1000, HEB100, HEB120, HEB140, HEB160, \dots, HEB1000}\}$
- $x_{10} \in \mathbb{D}_{10} \quad \mathbb{D}_{10} \{10, 11, 12, 13, 14, \dots, 29, 30\}$

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{\text{Wasser}} \\ E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ u_{\text{grenz}(x)} \\ u_{\text{grenz}(y)} \\ l \\ b \\ h \end{pmatrix} \quad (\text{X-2})$$

• Zielfunktion

$$Z_1 = f_1(\underline{x}) \Rightarrow \text{Maximum} \quad (\text{X-3})$$

$$Z_2 = f_2(\underline{x}) \Rightarrow \text{Minimum} \quad (\text{X-4})$$

$$f_1(\underline{x}) = 4 \cdot y_8 \left(\left(\frac{y_7}{2} \cdot \frac{y_6}{2} \right) - x_1 \cdot \left(\frac{y_7}{2} - h(x_8; x_9) - x_{10} \right) - x_2 \cdot \left(\frac{y_6}{2} - x_1 - h(x_8; x_9) - x_{10} \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{y_7}{2} - x_2 - h(x_8; x_9) - x_{10} \right)^2 + \left(\frac{y_6}{2} - x_1 - h(x_8; x_9) - x_{10} \right)^2 \right)} \right) \quad (\text{X-5})$$

$$f_2(\underline{x}) = A(x_8; x_9) \cdot x_5 \cdot y_3 \cdot \left(4 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2 + 4 \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{y_5}{2} - x_2\right)^2 + \left(\frac{y_4}{2} - x_1\right)^2\right)} \right) + x_{10} \cdot y_3 \cdot y_6 \left(4 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2 + 4 \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{y_5}{2} - x_2 - h(x_8; x_9)\right)^2 + \left(\frac{y_4}{2} - x_1 - h(x_8; x_9)\right)^2\right)} \right) \quad (\text{X-6})$$

$$Z = f(\underline{x}) = \frac{Z_1}{Z_2} \Rightarrow \text{Maximum} \quad (\text{X-7})$$

- Nebenbedingungen

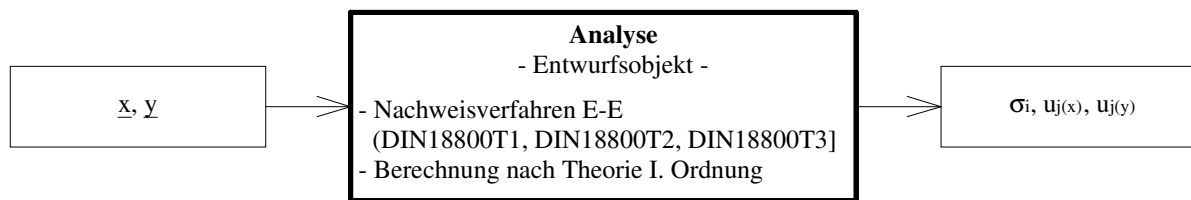


Abbildung X-1: Wassertank, Analyse

$$g_{\sigma, i} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{R, d}(x_3)} - 1 \leq 0 \quad (\text{X-8})$$

$$g_{u, j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_4} - 1 \leq 0 \quad (\text{X-9})$$

$$g_{u, j(y)} = \frac{u_{j(y)}}{y_5} - 1 \leq 0 \quad (\text{X-10})$$

- modifizierte Zielfunktion

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad (\text{X-11})$$

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^n g_{\sigma, i} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(x)} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(y)} \quad (\text{X-12})$$

- Fitnessfunktion

$$Fitness(Ind) = Z' \quad (\text{X-13})$$

Anlage XI

- Überdachung einer Radrennbahn -

Tabelle XI-1: Überdachung einer Radrennbahn, Koordinaten für die Überdachungskonstruktion

Knoten	x-Koordinate (mm)	y-Koordinate (mm)	z-Koordinate (mm)		
			- Ausgangslösung -	- Entwurfslösung 1 -	- Entwurfslösung 2 -
B ₁ P ₁	0	-56000	0	0	0
B ₁ P ₂	0	-53320	2870	3500	3305
B ₁ P ₃	0	-47630	8050	9500	8117
B ₁ P ₄	0	-44320	9845	10000	9537
B ₂ P ₁	12000	-53000	0	0	0
B ₂ P ₂	11240	-51090	2870	2500	2512
B ₂ P ₃	9030	-45570	8000	9000	8004
B ₂ P ₄	7830	-42570	9840	10000	9523
B ₃ P ₁	22000	-46000	0	0	0
B ₃ P ₂	20470	-44250	3300	2500	2537
B ₃ P ₃	16180	-39340	8220	9500	8235
B ₃ P ₄	14240	-37110	9840	10000	9601
B ₄ P ₁	29000	-36000	0	0	0
B ₄ P ₂	26380	-34100	4350	3000	3542
B ₄ P ₃	20290	-30380	8890	8500	8797
B ₄ P ₄	17470	-28660	10050	10500	9767
B ₅ P ₁	36000	-25000	0	0	0
B ₅ P ₂	28920	-22840	5600	5500	5194
B ₅ P ₃	21050	-20430	10440	9500	9198
B ₅ P ₄	17900	-19470	9640	10000	9870
B ₅ P ₅	19150	-20430	7600	9000	8233
B ₆ P ₁	38500	-12500	0	0	0
B ₆ P ₂	29350	-11480	6700	6000	6026
B ₆ P ₃	21050	-10550	9970	9500	9463
B ₆ P ₄	17900	-10200	10690	10000	9902
B ₆ P ₅	17900	-10550	7110	7500	8063
B ₇ P ₁	39000	-4000	0	0	0
B ₇ P ₂	29353	-2000	7090	6500	6971
B ₇ P ₃	21050	0	10100	9500	9810
B ₇ P ₄	17900	0	10840	10000	10064
B ₇ P ₅	17500	0	6900	9500	7784

Tabelle XI-2: Überdachung einer Radrennbahn, Variationsbereiche variabler z-Koordinaten für zweiten Entwurfsschritt

variable Entwurfsgröße	Optimierungsvariable	Variationsbereich
B ₁ P ₂	x ₁ , (x ₁ ∈ D ₁)	D ₁ {3000, 3001, 3002, ..., 3500}
B ₁ P ₃	x ₂ , (x ₂ ∈ D ₂)	D ₂ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₁ P ₄	x ₃ , (x ₃ ∈ D ₃)	D ₃ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₂ P ₂	x ₄ , (x ₄ ∈ D ₄)	D ₄ {2500, 2501, 2502, ..., 3000}
B ₂ P ₃	x ₅ , (x ₅ ∈ D ₅)	D ₅ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₂ P ₄	x ₆ , (x ₆ ∈ D ₆)	D ₆ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₃ P ₂	x ₇ , (x ₇ ∈ D ₇)	D ₇ {2500, 2501, 2502, ..., 3000}
B ₃ P ₃	x ₈ , (x ₈ ∈ D ₈)	D ₈ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₃ P ₄	x ₉ , (x ₉ ∈ D ₉)	D ₉ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₄ P ₂	x ₁₀ , (x ₁₀ ∈ D ₁₀)	D ₁₀ {3000, 3001, 3002, ..., 3500}
B ₅ P ₃	x ₁₁ , (x ₁₁ ∈ D ₁₁)	D ₁₁ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₅ P ₄	x ₁₂ , (x ₁₂ ∈ D ₁₂)	D ₁₂ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₅ P ₂	x ₁₃ , (x ₁₃ ∈ D ₁₃)	D ₁₃ {5000, 5001, 5002, ..., 5500}
B ₆ P ₃	x ₁₄ , (x ₁₄ ∈ D ₁₄)	D ₁₄ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₆ P ₄	x ₁₃ , (x ₁₃ ∈ D ₁₃)	D ₁₃ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₆ P ₂	x ₁₆ , (x ₁₆ ∈ D ₁₆)	D ₁₆ {5500, 5501, 5502, ..., 6000}
B ₆ P ₃	x ₁₇ , (x ₁₇ ∈ D ₁₇)	D ₁₇ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₆ P ₄	x ₁₈ , (x ₁₈ ∈ D ₁₈)	D ₁₈ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₇ P ₂	x ₁₉ , (x ₁₉ ∈ D ₁₉)	D ₁₉ {6000, 6001, 6002, ..., 6500}
B ₇ P ₃	x ₂₀ , (x ₂₀ ∈ D ₂₀)	D ₂₀ {8500, 8501, 8502, ..., 9500}
B ₇ P ₄	x ₂₁ , (x ₂₁ ∈ D ₂₁)	D ₂₁ {9000, 9001, 9002, ..., 10000}
B ₅ P ₅	x ₂₂ , (x ₂₂ ∈ D ₂₂)	D ₂₂ {1500, 1501, 1502, ..., 2500}
B ₆ P ₅	x ₂₃ , (x ₂₃ ∈ D ₂₃)	D ₂₃ {1500, 1501, 1502, ..., 2500}
B ₇ P ₅	x ₂₄ , (x ₂₄ ∈ D ₂₄)	D ₂₄ {1500, 1501, 1502, ..., 2500}

• Optimierungsvariablen

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \\ x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_2 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_3 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_4 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_5 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_5 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_5 \\ \text{Neigungswinkel } \alpha \text{ der Unterspannung} \\ A_B \\ A_R \\ A_{vs} \end{pmatrix} \quad (\text{XI-1})$$

$$x_1, x_2, x_4, x_5, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{13}, x_{14}, x_{16}, x_{17}, x_{19}, x_{20} \in \mathbb{D}_1$$

$$x_3, x_6, x_9, x_{12}, x_{15}, x_{18}, x_{21} \in \mathbb{D}_2$$

$$x_{22}, x_{23}, x_{24} \in \mathbb{D}_3$$

$$x_{25} \in \mathbb{D}_4$$

$$x_{26} \in \mathbb{D}_5$$

$$x_{27} \in \mathbb{D}_6$$

$$x_{28} \in \mathbb{D}_7$$

$$\mathbb{D}_1 \{2500; 3000, 3500, 4000, \dots, 9500\}$$

$$\mathbb{D}_2 \{9500; 10000, 10500, 11000, \dots, 15000\}$$

$$\mathbb{D}_3 \{1500, 1600, 1700, 1800, \dots, 2500\}$$

$$\mathbb{D}_4 \{20, 21, 22, 23, 24, \dots, 60\}$$

$$\mathbb{D}_5 \{1 \text{ (HEB 650)}, 2 \text{ (HEB 700)}, 3 \text{ (HEB 800)}, 3 \text{ (HEB 900)}\}$$

$$\mathbb{D}_6 \{1 \text{ (20027)}, 2 \text{ (21598)}, 3 \text{ (23169)}\}$$

$$\mathbb{D}_7 \{1 \text{ (314)}, 2 \text{ (707)}, 3 \text{ (1257)}, 4 \text{ (1963)}\}$$

• Optimierungskonstanten

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \quad (\text{XI-2})$$

$$\underline{y}_1 = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \\ y_{20} \\ y_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_4 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_2 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_3 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_4 \end{pmatrix} \quad (\text{XI-3})$$

$$\underline{y}_2 = \begin{pmatrix} y_{22} \\ y_{23} \\ y_{24} \\ y_{25} \\ y_{26} \\ y_{27} \\ y_{28} \\ y_{29} \\ y_{30} \\ y_{31} \\ y_{32} \\ y_{33} \\ y_{34} \\ y_{35} \\ y_{36} \\ y_{37} \\ y_{38} \\ y_{39} \\ y_{40} \\ y_{41} \\ y_{42} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_4 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_2 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_3 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_4 \end{pmatrix} \quad (\text{XI-4})$$

$$\underline{y^3} = \begin{pmatrix} y_{44} \\ y_{45} \\ y_{46} \\ y_{47} \\ y_{48} \\ y_{49} \\ y_{50} \\ y_{51} \\ y_{52} \\ y_{53} \\ y_{54} \\ y_{55} \\ y_{56} \\ y_{57} \\ y_{58} \\ y_{59} \\ y_{60} \\ y_{61} \\ y_{62} \\ y_{63} \\ y_{64} \\ y_{65} \\ y_{66} \\ y_{67} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_1P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_2P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_3P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_4P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_5P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_6P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_1 \\ y - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_1 \\ z - \text{Koordinate von Knoten } B_7P_1 \\ x - \text{Koordinate von Knoten } S \\ y - \text{Koordinate von Knoten } S \\ z - \text{Koordinate von Knoten } S \end{pmatrix} \quad (\text{XI-5})$$

$$\underline{y^4} = \begin{pmatrix} y_{68} \\ y_{69} \\ y_{70} \\ y_{71} \\ y_{72} \\ y_{73} \\ y_{74} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ \rho_{\text{Stahl}} \\ f_{y,k} \\ \sigma_R, d \\ u_{\text{grenz}(x)} \\ u_{\text{grenz}(y)} \\ u_{\text{grenz}(z)} \end{pmatrix} \quad (\text{XI-6})$$

• Zielfunktion

$$Z = f(x) \Rightarrow \text{Maximum} \quad (\text{XI-7})$$

$$Z = f(x) = y_{69} \cdot (x_{26} \cdot (l_{B1} + l_{B2} + l_{B3} + l_{B4} + l_{B5} + l_{B6} + l_{B7}) + x_{27} \cdot (l_{R1} + l_{R2} + l_S) + x_{28} \cdot l_{VS1}) \quad (\text{XI-8})$$

$$l_{B1} = \sqrt{(y_1 - y_{44})^2 + (y_{22} - y_{45})^2 + (x_1 - y_{46})^2} + \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (y_{23} - y_{22})^2 + (x_2 - x_1)^2} + \sqrt{(y_3 - y_2)^2 + (y_{24} - y_{23})^2 + (x_3 - x_2)^2} \quad (\text{XI-9})$$

$$l_{B2} = \sqrt{(y_4 - y_{47})^2 + (y_{25} - y_{48})^2 + (x_4 - y_{49})^2} + \sqrt{(y_5 - y_4)^2 + (y_{26} - y_{25})^2 + (x_5 - x_4)^2} + \sqrt{(y_6 - y_5)^2 + (y_{27} - y_{26})^2 + (x_6 - x_5)^2} \quad (\text{XI-10})$$

$$l_{B3} = \sqrt{(y_7 - y_{50})^2 + (y_{28} - y_{51})^2 + (x_7 - y_{52})^2} + \sqrt{(y_8 - y_7)^2 + (y_{29} - y_{28})^2 + (x_8 - x_7)^2} + \sqrt{(y_9 - y_8)^2 + (y_{30} - y_{29})^2 + (x_9 - x_8)^2} \quad (\text{XI-11})$$

$$l_{B4} = \sqrt{(y_{10} - y_{53})^2 + (y_{31} - y_{54})^2 + (x_{10} - y_{55})^2} + \sqrt{(y_{11} - y_{10})^2 + (y_{32} - y_{31})^2 + (x_{11} - x_{10})^2} + \sqrt{(y_{12} - y_{11})^2 + (y_{33} - y_{32})^2 + (x_{12} - x_{11})^2} \quad (\text{XI-12})$$

$$l_{B5} = \sqrt{(y_{13} - y_{56})^2 + (y_{34} - y_{57})^2 + (x_{13} - y_{58})^2} + \sqrt{(y_{14} - y_{13})^2 + (y_{35} - y_{34})^2 + (x_{14} - x_{13})^2} + \sqrt{(y_{15} - y_{14})^2 + (y_{36} - y_{35})^2 + (x_{15} - x_{14})^2} \quad (\text{XI-13})$$

$$l_{B6} = \sqrt{(y_{16} - y_{59})^2 + (y_{37} - y_{60})^2 + (x_{16} - y_{61})^2} + \sqrt{(y_{17} - y_{16})^2 + (y_{38} - y_{37})^2 + (x_{17} - x_{16})^2} + \sqrt{(y_{18} - y_{17})^2 + (y_{39} - y_{38})^2 + (x_{18} - x_{17})^2} \quad (\text{XI-14})$$

$$l_{B7} = \sqrt{(y_{19} - y_{62})^2 + (y_{40} - y_{63})^2 + (x_{19} - y_{64})^2} + \sqrt{(y_{20} - y_{19})^2 + (y_{41} - y_{40})^2 + (x_{20} - x_{19})^2} + \sqrt{(y_{21} - y_{20})^2 + (y_{42} - y_{41})^2 + (x_{21} - x_{20})^2} \quad (\text{XI-15})$$

$$l_{R1} = \sqrt{(y_4 - y_1)^2 + (y_{25} - y_{22})^2 + (x_4 - x_1)^2} + \sqrt{(y_7 - y_4)^2 + (y_{28} - y_{25})^2 + (x_7 - x_4)^2} + \sqrt{(y_{10} - y_7)^2 + (y_{31} - y_{28})^2 + (x_{10} - x_7)^2} + \sqrt{(y_{13} - y_{10})^2 + (y_{34} - y_{31})^2 + (x_{13} - x_{10})^2} + \sqrt{(y_{16} - y_{13})^2 + (y_{37} - y_{34})^2 + (x_{16} - x_{13})^2} + \sqrt{(y_{19} - y_{16})^2 + (y_{40} - y_{37})^2 + (x_{19} - x_{16})^2} \quad (\text{XI-16})$$

$$l_{R2} = \sqrt{(y_5 - y_2)^2 + (y_{26} - y_{23})^2 + (x_5 - x_2)^2} + \sqrt{(y_8 - y_5)^2 + (y_{29} - y_{26})^2 + (x_8 - x_5)^2} + \sqrt{(y_{11} - y_8)^2 + (y_{32} - y_{29})^2 + (x_{11} - x_8)^2} + \sqrt{(y_{14} - y_{11})^2 + (y_{35} - y_{32})^2 + (x_{14} - x_{11})^2} + \sqrt{(y_{17} - y_{14})^2 + (y_{38} - y_{35})^2 + (x_{17} - x_{14})^2} + \sqrt{(y_{20} - y_{17})^2 + (y_{41} - y_{38})^2 + (x_{20} - x_{17})^2} \quad (\text{XI-17})$$

$$l_S = \sqrt{(y_{10} - y_{65})^2 + (y_{32} - y_{66})^2 + (x_{10} - y_{67})^2} \quad (\text{XI-18})$$

$$l_{VS1} = \sqrt{(y_6 - y_3)^2 + (y_{27} - y_{24})^2 + (x_6 - x_3)^2} + \sqrt{(y_9 - y_6)^2 + (y_{30} - y_{27})^2 + (x_9 - x_6)^2} + \sqrt{(y_{12} - y_9)^2 + (y_{33} - y_{30})^2 + (x_{12} - x_9)^2} + \sqrt{(y_{15} - y_{12})^2 + (y_{36} - y_{33})^2 + (x_{15} - x_{12})^2} + \sqrt{(y_{18} - y_{15})^2 + (y_{39} - y_{36})^2 + (x_{18} - x_{15})^2} + \sqrt{(y_{21} - y_{18})^2 + (y_{42} - y_{39})^2 + (x_{21} - x_{18})^2} \quad (\text{XI-19})$$

• Nebenbedingungen

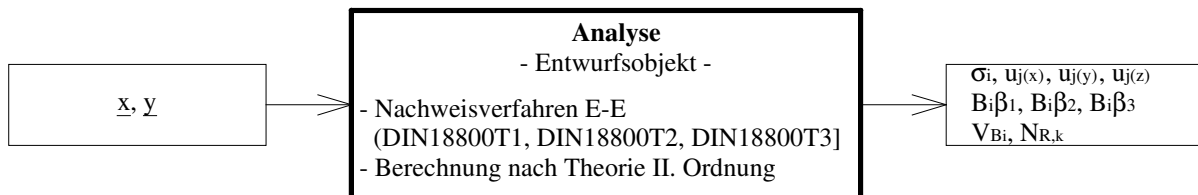


Abbildung XI-1: Überdachung einer Radrennbahn, Analyse

$$g_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{y_{71}} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-20})$$

$$g_{u, j(x)} = \frac{u_{j(x)}}{y_{72}} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-21})$$

$$g_{u, j(y)} = \frac{u_{j(y)}}{y_{73}} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-22})$$

$$g_{u, j(z)} = \frac{u_{j(z)}}{y_{73}} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-23})$$

$$g_{V, i} = \frac{\min V_{B_i}}{\max V_{B_i}} - 0,2 \leq 0 \quad (\text{XI-24})$$

$$g_{\beta(1), i} = \frac{B_i \beta_2}{B_i \beta_1} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-25})$$

$$g_{\beta(2), i} = \frac{B_i \beta_3}{B_i \beta_2} - 1 \leq 0 \quad (\text{XI-26})$$

$$g_{N, k} = N_{R, k} \leq 0 \quad (\text{XI-27})$$

$g_{V, i}$ - Strafterm unzulässiger Abweichungen der vertikalen Stützkkräfte der Binder B_i

$g_{\beta(1), i}$ - Strafterm unzulässiger Neigungen der Binderstäbe ($B_i \beta_1, B_i \beta_2$)

$g_{\beta(2), i}$ - Strafterm unzulässiger Neigungen der Binderstäbe ($B_i \beta_2, B_i \beta_3$)

$g_{N, k}$ - Strafterm unzulässiger Zugspannungen in den Rohren

- modifizierte Zielfunktion

$$Z' = Z(1 + C_{ges}) \quad (\text{XI-28})$$

$$C_{ges} = \sum_{i=1}^n g_{\sigma, i} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(x)} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(y)} + \sum_{j=1}^m g_{u, j(z)} + \sum_{i=1}^n g_{V, i} \quad (\text{XI-29})$$

$$+ \sum_{i=1}^n g_{\beta(1), i} + \sum_{i=1}^n g_{\beta(2), i} + \sum_{k=1}^p g_{N, k}$$

- Fitnessfunktion

$$Fitness(Ind) = \frac{1}{Z'} \quad (\text{XI-30})$$

Anlage XII

- Flussbild -

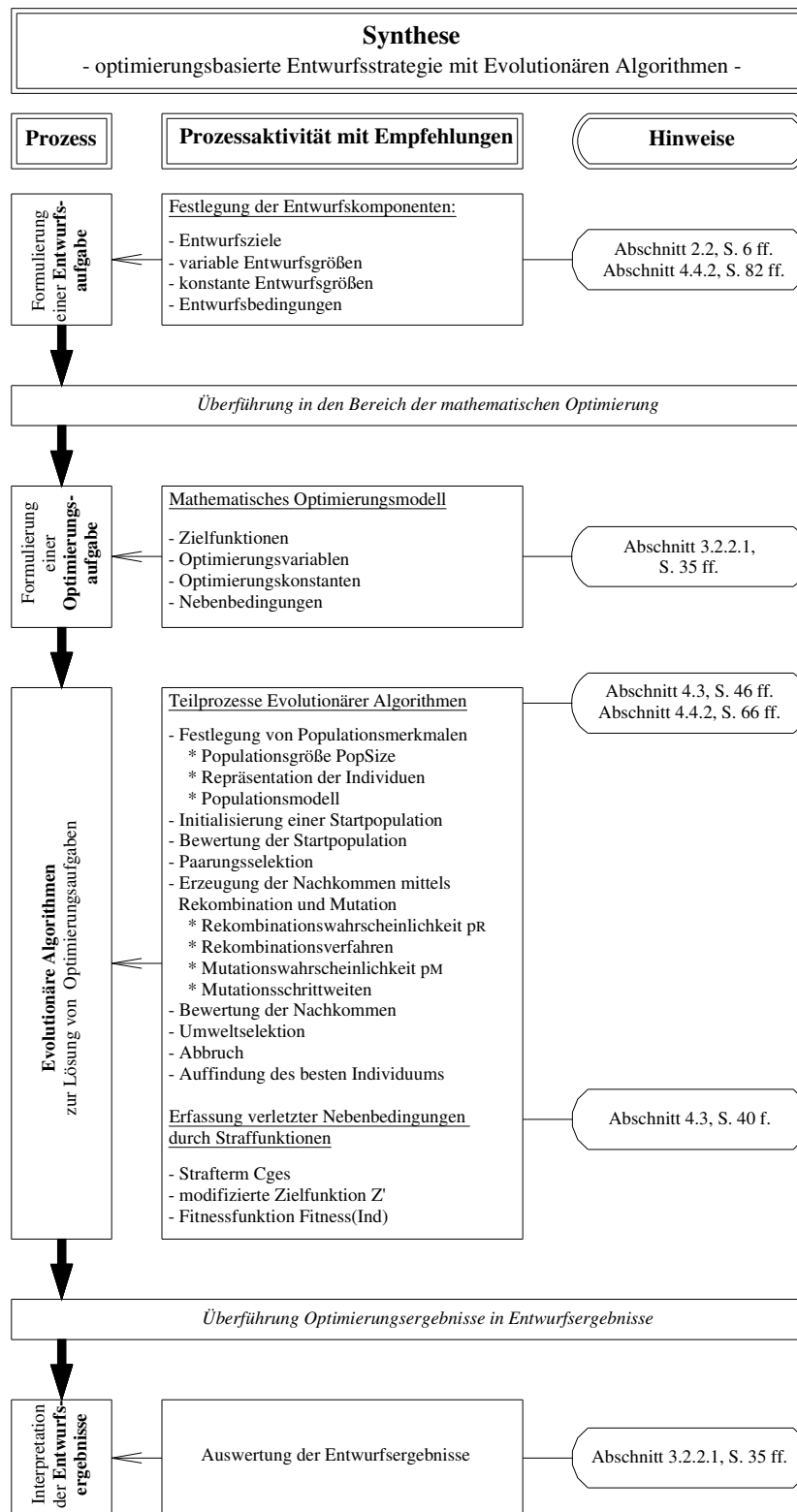


Abbildung XII-I: Flussbild, Übersicht

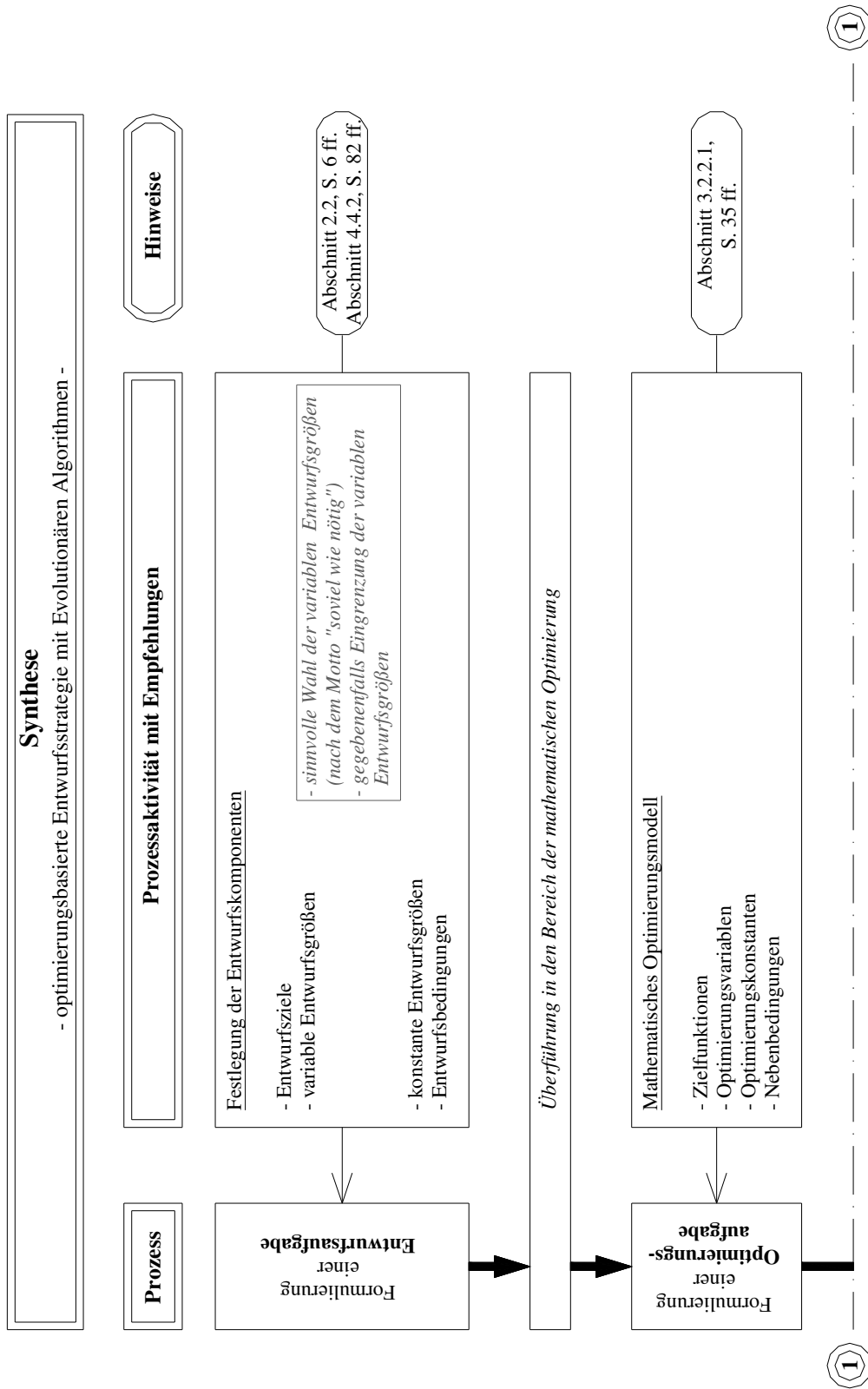


Abbildung XII-2: Flussbild, Teil 1

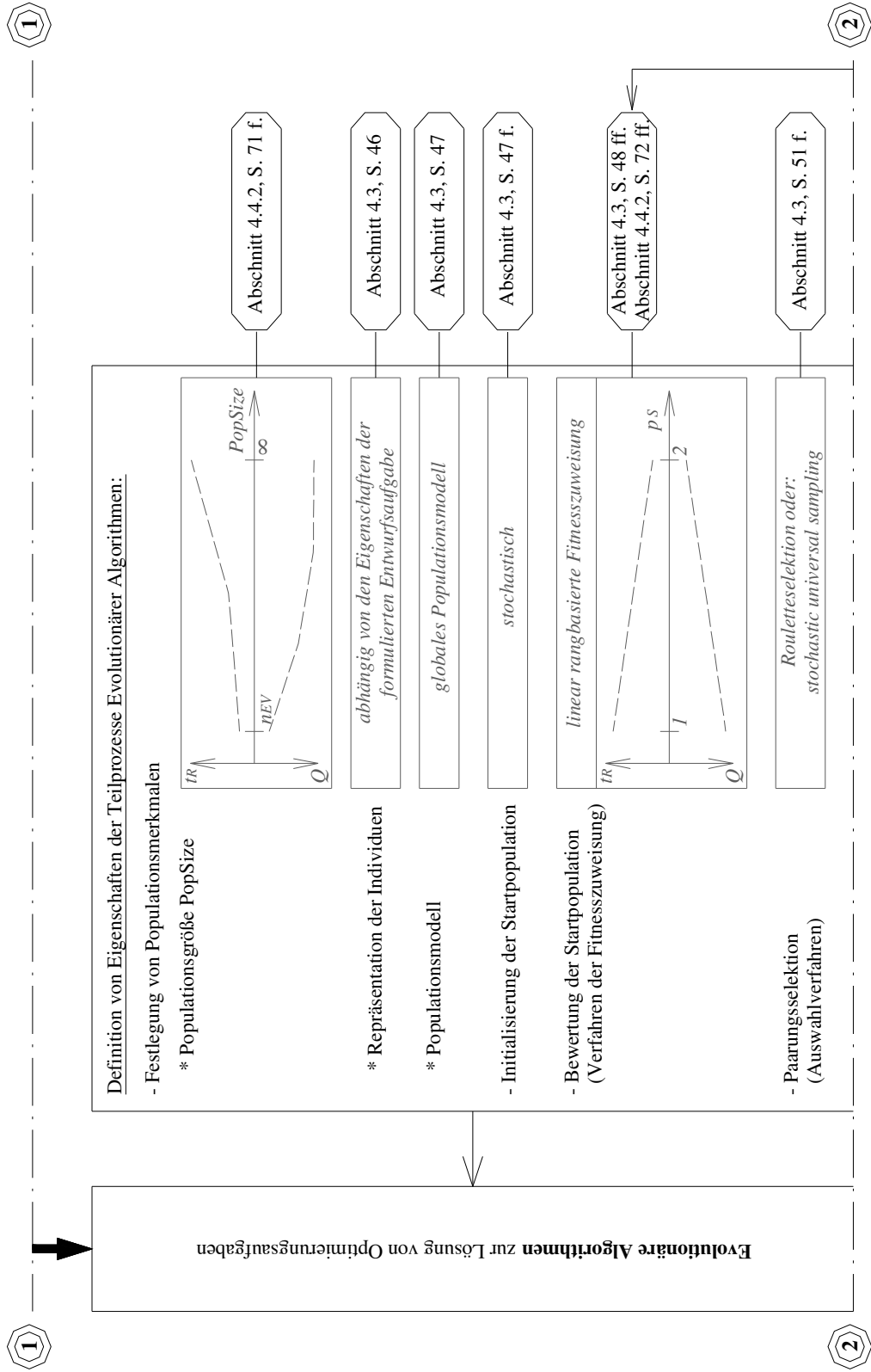


Abbildung XII-3: Flussbild, Teil 2

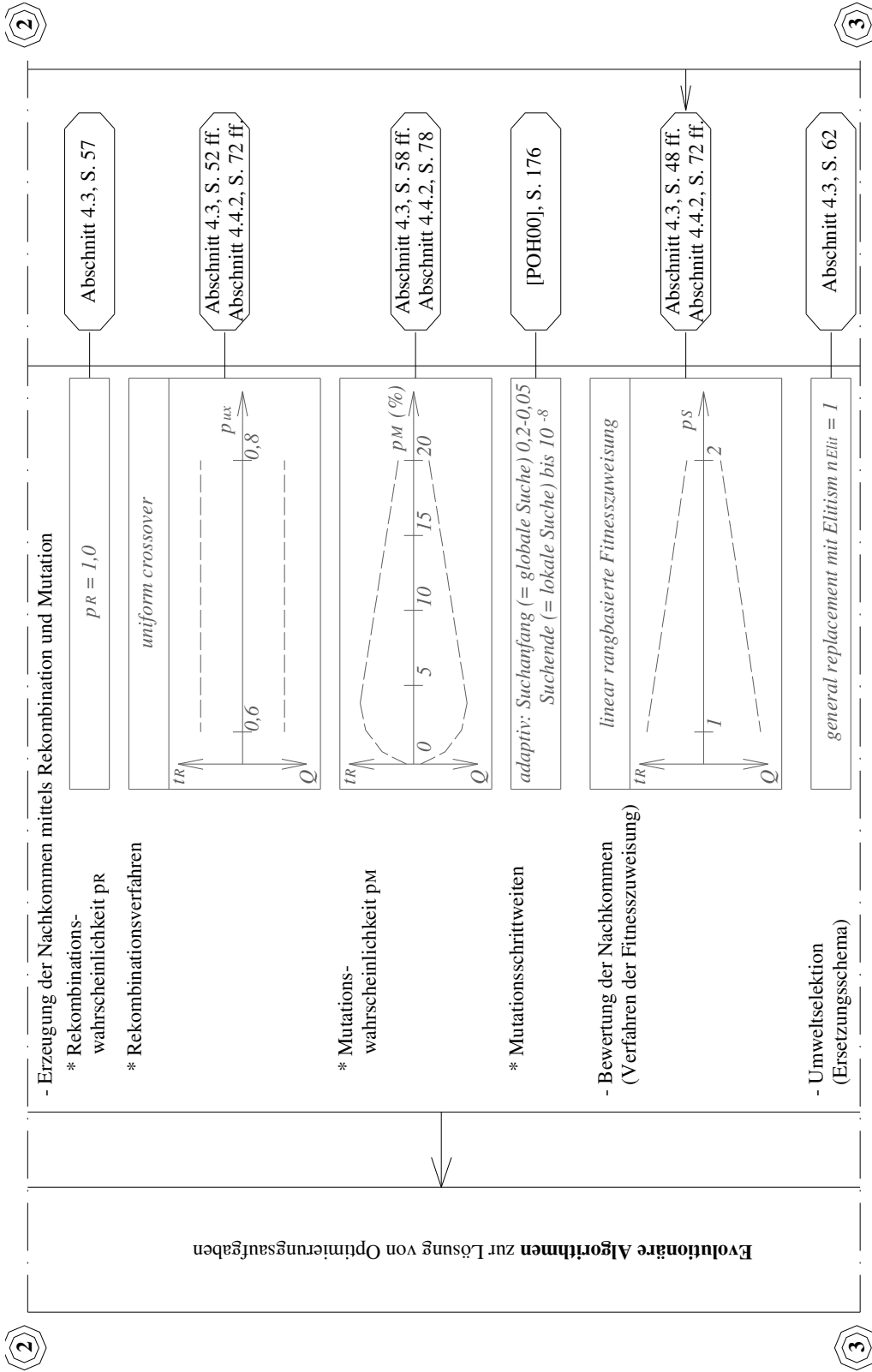


Abbildung XII-4: Flussbild, Teil 3

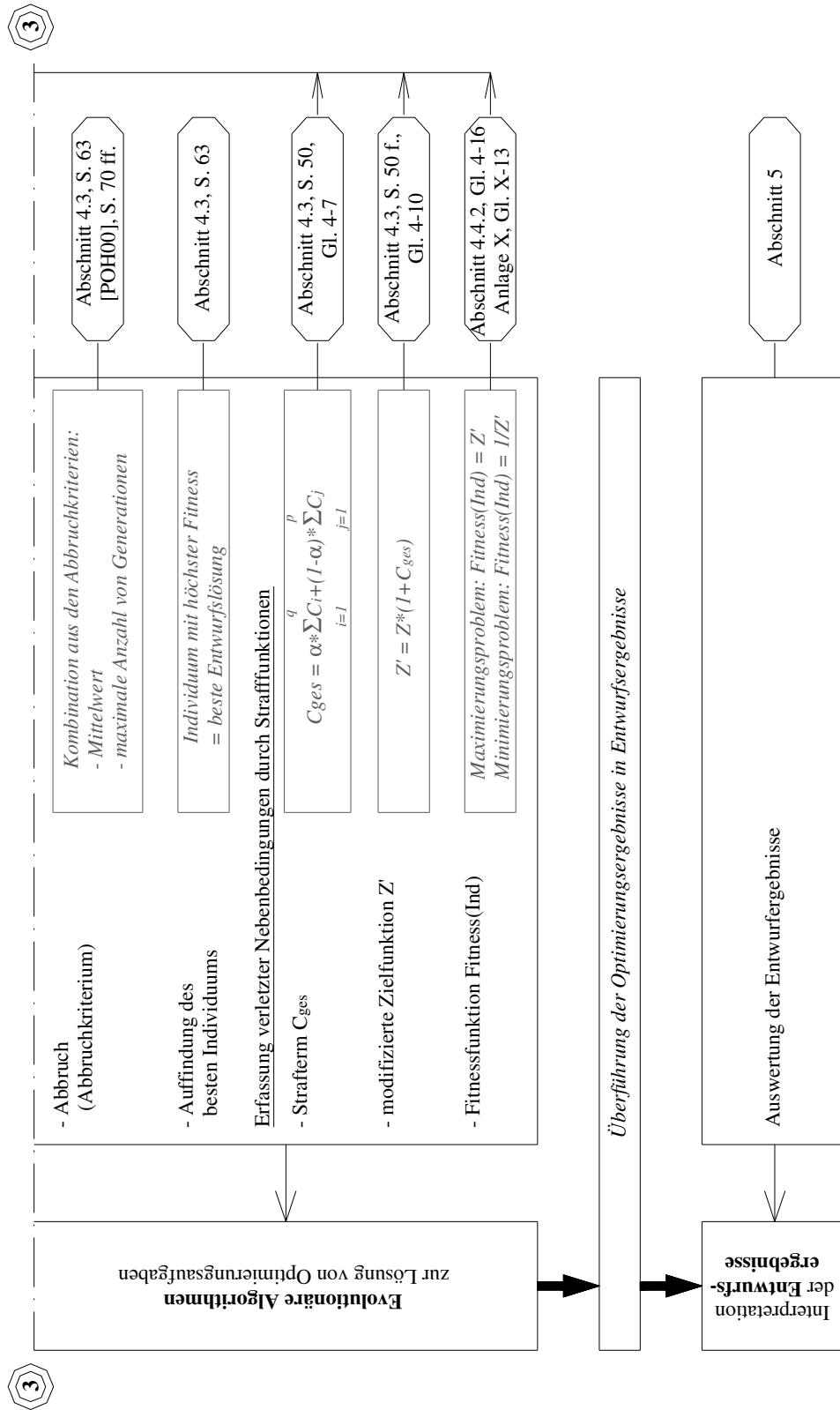


Abbildung XII-5: Flussbild, Teil 4

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne zulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere ehrenwörtlich, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Oepfershausen, 07.08.2004

Tabellarischer Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Steffi Schilling
Anschrift	Silberbergstraße 143 98634 Oepfershausen
Geburtsdatum	22.12.1972
Geburtsort	Meiningen
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

Ausbildung

1979 – 1989	Polytechnische Oberschule Oepfershausen
1989 – 1992	Berufsausbildung (Baufacharbeiter) mit Abitur an der Gewerblichen Berufsschule Bauwesen Suhl mit Beruflichem Gymnasium Abschluss: Baufacharbeiter mit Abitur
1992 – 1997	Bauingenieurstudium an der Bauhaus-Universität Weimar Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau Abschluss: Diplom-Ingenieur für Bauwesen

Berufsweg

1997 – 2003	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Planung von Ingenieurbauten
-------------	---