

DER OPTIMIERTE ENTWURF UND SEINE BERECHNUNG

Strategien zur computergestützten Entwurfsoptimierung
von Gebäuden im Rahmen der ganzheitlichen Architek-
turgenerierung am Beispiel von Einfamilienhäusern

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Ab-
handlung

Vorgelegt von

Uwe Lehmkuhler

aus Marktheidenfeld

Hauptberichter:

Prof. Arno Lederer

Mitberichter:

Prof. Achim Menges

Tag der mündlichen Prüfung:

1. Dezember 2009

Institut für öffentliche Bauten und Entwerfen der Universität Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	3
ZUSAMMENFASSUNG UND ABSTRACT	6
ZUSAMMENFASSUNG IN DEUTSCHER SPRACHE.....	6
ZUSAMMENFASSUNG IN ENGLISCHER SPRACHE (ABSTRACT)	9
1 EINLEITUNG	12
1.1 DIE MANGELNDE ARCHITEKTONISCHE QUALITÄT	13
1.2 DIE AUSGANGSLAGE / STAND DER TECHNIK	15
1.3 DIE FORSCHUNG AM EINSATZ DES COMPUTERS IN DER ARCHITEKTUR	18
1.3.1 <i>Simulationen und „Agents“</i>	18
1.3.2 <i>Generative Software</i>	20
1.4 DIE EVOLUTION ALS VORBILD FÜR DIE INFORMATIK	23
1.5 KLÄRUNG VON BEGRIFFEN.....	24
1.5.1 <i>Optimierung</i>	24
1.5.2 <i>Ganzheitlichkeit</i>	25
1.5.3 <i>Generierung</i>	26
1.6 DER COMPUTER ALS ENTWERFER?.....	26
1.6.1 <i>Der Computer als objektiver Entwerfer?</i>	27
1.6.2 <i>Der Computer als kreativer Entwerfer?</i>	29
1.7 ZIELE DER ARBEIT.....	34
1.7.1 <i>Struktur der Arbeit</i>	36
1.8 EINSCHRÄNKENDE PARAMETER DES ANSATZES	37
2 DER OPTIMALE ENTWURF UND SEINE BERECHENBARKEIT	41
2.1 DER ALGORITHMUS ALS HANDLUNGSANWEISUNG.....	42
2.2 DIE KOMPLEXITÄT EINES PROBLEMS	44
2.2.1 <i>Die Komplexitätsklassen</i>	45
2.2.2 <i>Beispiel P: Der Vergleich von Werten</i>	46
2.2.3 <i>Beispiel NP 1: Das TSP</i>	46
2.2.4 <i>Beispiel NP 2: Das Rucksack-Problem</i>	47
2.3 DIE KOMPLEXITÄT EINES ARCHITEKTONISCHEN ENTWURFES	48
2.4 DIE MEHRKRITERIENOPTIMIERUNG	50
2.5 PARAMETER GUTER ARCHITEKTUR.....	53
2.6 „MENSCHLICHE PARAMETER“	54
2.6.1 <i>Die Nutzerbedürfnisse</i>	54

2.6.2	<i>Der Baustil</i>	56
2.7	DER ARCHITEKT ALS ABWEICHUNG VOM OPTIMUM.....	57
3	DER INPUT	60
3.1	DIE RANDBEDINGUNGEN.....	60
3.2	DIE MATHEMATISCHE QUANTIFIZIERBARKEIT DER RANDBEDINGUNGEN	62
3.2.1	<i>Die geographische Lage</i>	62
3.2.2	<i>Die Grundstücksgeometrie</i>	62
3.2.3	<i>Die Ausrichtung</i>	63
3.2.4	<i>Die Nachbarn</i>	63
3.2.5	<i>Umweltfaktoren</i>	64
3.2.6	<i>Bauvorschriften</i>	64
3.3	DAS SOFTWAREMODELL ZUR ERFASSUNG ARCHITEKTONISCHER ENTWÜRFE	65
3.3.1	<i>Klassen und Objektorientierung</i>	65
3.3.2	<i>Die Klassen zur Repräsentation des Gebäudes</i>	66
3.3.3	<i>Die Geometrie</i>	69
3.3.4	<i>Der Raum</i>	70
3.3.5	<i>Die Außenform: Gebäude, Geschoss, Raum</i>	71
3.4	DIE BAUTEILBIBLIOTHEK	71
3.5	DIE ERSTERSTELLUNG EINES ARCHITEKTONISCHEN ENTWURFS (INITIALISIERUNG).....	73
3.5.1	<i>Gültigkeit</i>	73
3.5.2	<i>Differenziertheit</i>	75
3.5.3	<i>Nachverfolgbarkeit</i>	76
3.5.4	<i>Methoden der Initialisierung</i>	77
4	DIE OPTIMIERUNG	93
4.1	DER OPTIMIERUNGSGRUNDLAGEN	93
4.1.1	<i>Verwendete Begriffe</i>	98
4.1.2	<i>Die Zielfunktion</i>	100
4.1.3	<i>Die Fitness</i>	101
4.1.4	<i>Die Selektion</i>	104
4.1.5	<i>Die Rekombination</i>	111
4.1.6	<i>Die Mutation</i>	117
4.1.7	<i>Das Wiedereinfügen</i>	120
4.1.8	<i>Die Migration</i>	124
4.1.9	<i>Die Konkurrenz von Unterpopulationen</i>	127
4.2	DIE FESTLEGUNG VON EINFLUSSKATEGORIEN UND PARAMETERN	130
4.3	MATHEMATISCHE QUANTIFIZIERBARKEIT DER PARAMETER.....	147
4.4	VERARBEITUNG VON PARAMETERN	156
4.4.1	<i>Verarbeitung bei der Zielfunktionswertberechnung</i>	156

4.4.2	<i>Verarbeitung bei der Rekombination</i>	173
4.4.3	<i>Verarbeitung bei der Mutation</i>	197
4.5	UMSETZUNG DES OPTIMIERUNGSLGORITHMUS.....	203
4.6	DIE ABRUCHKRITERIEN	207
4.7	STEUERUNG DER OPTIMIERUNG UND RÜCKFLUSS IN DIE INITIALISIERUNG.....	209
4.7.1	<i>Die Initialisierung als Graph</i>	210
4.7.2	<i>Die Gewichtung der Einflussfaktoren</i>	214
5	OUTPUT	218
5.1	AUSGABE DER ERGEBNISSE	218
5.1.1	<i>Ausgabe von Planmaterial</i>	218
5.1.2	<i>Ausgabe als CAD-Datei</i>	219
5.1.3	<i>Ausgabe von „Rohdaten“</i>	220
5.1.4	<i>Ausgabe im Browser</i>	220
5.2	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE UND RÜCKFLUSS IN DIE OPTIMIERUNG	220
6	FAZIT UND AUSBLICK	223
6.1	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	223
6.2	PROBLEME DER SOFTWARE.....	224
6.3	WEITERE SCHRITTE	226
6.4	SCHLUSS	227
A	ANHANG: ERGEBNISSE	229
I.	BERECHNETE GEBÄUDE	229
II.	ENERGIEBILANZ	235
	LITERATURVERZEICHNIS	240
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	247

Zusammenfassung und Abstract

Zusammenfassung in deutscher Sprache

Der Architekt als Baukünstler steht in seinem Schaffen stets im Spannungsfeld zwischen künstlerischem Anspruch und ökonomischen Zwängen. Dies gilt zum Einen für die Auseinandersetzung mit Baukosten – also dem Abwägen zwischen Entwurfsidee und zu minimierenden Kosten für den Bauherrn – zum Anderen aber auch schon während der Entwurfsplanung für die Balance zwischen sorgfältigem und schnellem Entwerfen. Durch gesetzliche Vorgaben und ein standardisiertes Vorgehen während der Planung hat der Architekt wenig Spielraum zur übermäßigen zeitlichen Ausdehnung der Entwurfsphase. Dies hat vor allem im Einfamilienhausbau dazu geführt, dass hier anonyme oder Fertighausarchitektur marktdominierend ist, was unter anderem auf die mangelnde Entlohnung des Planungsaufwandes bei solch einer kleinen Aufgabe zurückzuführen ist und was dazu führt, dass große Bauflächen mit qualitativ minderwertiger Architektur bebaut werden.

Um diesen Mangel beheben zu helfen, wird hier das Konzept der ganzheitlichen Architekturgenerierung vorgeschlagen. Dieses soll helfen, den zeitlichen und damit wirtschaftlichen Planungsaufwand eines Architekten bei derlei Bauaufgaben drastisch zu verringern und damit Zeit für seine baukünstlerische Verantwortung freizumachen. Das Konzept der ganzheitlichen Architekturgenerierung entwirft hierzu ein automatisiertes Vorgehen, das es ermöglichen soll, gute computergestützte Architektur zu entwerfen.

Das Konzept der Ganzheitlichkeit ist dabei unter anderem als Synthese vieler bestehender Ansätze der Architekturgenerierung oder anderer computergestützter Optimierungsansätze in den Bauwissenschaften zu sehen. Es sieht vor, zumindest theoretisch, alle Einflüsse auf einen architektonischen Entwurf zu berücksichtigen und parallel zu verarbeiten. Dieser Ansatz ist zunächst natürlich theoretischer Natur, da keine noch so umfassende Lösung behaupten kann, wirklich alle Einflüsse auf einen architektonischen Entwurf berücksichtigen zu können. Es wird jedoch der Anspruch formuliert, weitere oder neue Faktoren integrieren zu können, da das Entwurfssystem derart gestaltet wird, dass es eine nachträgliche Einarbeitung neuer Faktoren problemlos zulässt. Hierzu wird zunächst gezeigt, dass es sich beim Problem der Erstellung eines architektonischen Entwurfes um ein komplexes Problem der Mehrkriterienoptimierung handelt, das aus Sicht der Informatik als NP-vollständig charakte-

riert wird und somit nicht in polynomieller Zeit vollständig gelöst werden kann. Es existieren jedoch Wege, ein solches Problem in überschaubarer Zeit zumindest ausreichend gut zu lösen. In diesem Sinne ist auch der hier formulierte Anspruch an ein automatisiert entstehendes optimiertes Gebäude zu sehen, wobei die Optimierung als solche als mathematische Funktion zu sehen ist, die durch die Formulierung von Optimierungszielen entsteht.

Des Weiteren wird gezeigt, dass das hier formulierte System zur Architekturgenerierung über Züge eines komplexen Systems im Sinne der Systemtheorie verfügt, so dass prinzipiell auch mit emergentem Verhalten gerechnet werden kann, was bedeutet, dass es durchaus möglich ist, mit einem System computergestützter Architekturgenerierung kreativ tätig zu werden. Gleichzeitig wird aber festgestellt, dass eine vom Computer generierte Architektur niemals rein objektiv optimal sein kann, sondern dass die Ergebnisse vielmehr die subjektiven Entscheidungen des Softwareentwerfers reflektieren. Eine Optimierung findet immer nur auf Ziele statt, die vom Entwerfer der Software formuliert wurden. Es findet somit ein Übergang vom subjektiven Gebäudeentwerfer zum subjektiven Softwareentwerfer statt. Es handelt sich also in diesem Sinne nicht um einen global gesehen optimalen, sondern vielmehr um einen auf zahlreiche Faktoren optimierten Entwurf.

Das vorgeschlagene System zum computergestützten Entwerfen von Gebäuden wird detailliert entworfen. Hierzu werden nötige Randbedingungen und Parameter festgelegt und es wird gezeigt, dass diese mathematisch quantifizierbar sind, was für eine rechnergestützte Verarbeitung unabdingbar ist. Des Weiteren wird ein Softwaremodell charakterisiert, das geeignet ist, die nötigen Parameter und Variablen eines architektonischen Entwurfs wiederzugeben.

Zur eigentlichen Optimierung des Entwurfes wird ein modifizierter evolutionärer Algorithmus verwendet. Ein evolutionärer Algorithmus imitiert, wie der Name schon sagt, in weiten Teilen die natürliche Evolution. Um diesen verwenden zu können, müssen die Methoden des Algorithmus auf den architektonischen Entwurf angewandt werden. Hierzu muss zunächst eine „Population“ von Entwürfen geschaffen oder initialisiert werden, die im Allgemeinen möglichst heterogen sein sollte. Im Verlaufe des Algorithmus werden diese Entwürfe oder auch „Individuen“ immer wieder einer Bewertung unterworfen, um ihre Fitness bezogen auf das Optimierungsziel zu bewerten. Hierauf werden einzelne Entwürfe zur Rekombination ihrer „Gene“ beziehungsweise Variablen selektiert. Mit einer bestimmten Wahrscheinlich-

keit werden diese dann auch einer Mutation unterworfen. Mit einer erneuten Selektion der wieder in die Population einzufügenden Entwürfe beginnt der Kreislauf von Neuem. Der Algorithmus wird fortgesetzt, bis ein Abbruchkriterium, in der Regel eine bestimmte Qualität eines Entwurfes, erreicht wird. Alle Schritte des evolutionären Algorithmus werden genau beschrieben und ihre Anwendung auf den architektonischen Entwurf wird gezeigt.

Des Weiteren wird ein System zur optimierten Initialisierung der Population mithilfe eines gerichteten Graphen entwickelt und es wird gezeigt, dass im Mittel der Gewichtung von einzelnen Entwurf Faktoren oder -parametern ein mächtiges Instrument zur Steuerung des Algorithmus und damit der Ergebnisse liegt. Es wird auch kurz zusammengefasst, in welcher Form eine Ausgabe der Ergebnisse erfolgen kann. Schließlich wird ein Weg aufgezeigt, die Ergebnisse des Algorithmus zu bewerten und diese Bewertung als Faktoren einer erneuten Optimierung zu verwenden.

Aufgrund der Komplexität des Themas wird einer der schwierigsten Punkte der Architekturgenerierung, der des Baustils, in einer separaten Arbeit behandelt, deren Ergebnisse noch ausstehen, so dass die hier erzielten Resultate diesbezüglich noch nicht vollständig sind, wobei darauf hinzuweisen ist, dass es sich beim Baustil nicht um einen einzelnen Faktor handelt. Da kein entworfenes Gebäude ohne Stil sein kann, entsteht natürlich schon hier eine ästhetische Aussage, die allerdings ausschließlich „durch sich selbst“ entsteht, wobei weitere Untersuchungen die Qualität dieser Ästhetik beurteilen sollten. Abgesehen davon zeigen die Ergebnisse jedoch, dass der hier formulierte Ansatz es zulässt, einen bezogen auf die berücksichtigten Parameter sehr guten Entwurf zu liefern. Die prinzipielle Durchführbarkeit des Ansatzes wird gezeigt und lässt sich auch in Bezug auf die Forderung nach zeitlicher Optimierung des Planungsprozesses aufrecht erhalten. Je nach Komplexität des Entwurfes kann mithilfe der ganzheitlichen Architekturgenerierung schon innerhalb weniger Stunden ein vollständiger, durchgearbeiteter, dreidimensional verfügbarer Entwurf entstehen, was die Zeitplanung des Architekten radikal ändern kann. Um die Qualität der Ergebnisse und die Komplexität des gelieferten Materials weiter zu erhöhen, wird unter anderem vorgeschlagen, in der zukünftigen Forschung weitere Parameter zu berücksichtigen, nicht zuletzt den Baustil, und vor allem die Arbeit von Fachingenieuren in die ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware zu integrieren. Sollte dies gelingen, steht einem Wandel in der Arbeit des Architek-

ten prinzipiell nichts mehr im Wege. Er kann die freigewordene Zeit nutzen, seiner baukünstlerischen Verantwortung in vollem Maße nachzukommen.

Zusammenfassung in englischer Sprache (Abstract)

The architect as an artist always has to consider the conflicting demands of his claim for producing a piece of art and economic constraints. This applies both to his preoccupation with construction costs – which always means weighing up his architectural design and costs for his client – and to the balance between accurate and fast planning right from the design stage. By legal requirements and standardised proceedings during the design stage the architect has little scope for expanding the design stage in terms of time. Primarily for single-family housing this resulted in the spread of anonymous architecture and prefabricated houses. This can be traced back to the deficient payment compared to the efforts when coping with such a small task. As a result, huge building sites are covered with qualitatively inferior architecture.

To resolve this deficiency the concept of holistic architectural generation is hereby introduced. This concept can help decreasing the time and economic efforts of an architect who can thus take his responsibility for an artistic architecture. The concept of holistic architectural generation is a concept of an automated proceeding which enables the design of good computer-assisted architecture.

Among others the concept of holism must be seen as a synthesis of many existent approaches to architectural generation or other computer-based optimization efforts in the fields of design and construction. It allows for all impacts on the architectural design being considered and processed in parallel, at least theoretically. At first this approach must be considered theoretically as not even the broadest approach can account for really including every impact on an architectural design. But the requirement for integrating further or new factors on the design is expressed. Thus, the design system will be formulated in a manner that allows for later incorporation of new parameters without difficulty. To accomplish this, it will be shown that the problem of architectural design is a complex problem of multi-criteria optimisation which can be categorised NP-complete in terms of computer sciences. Those problems can't be solved completely in polynomial time. Nevertheless there are approaches that can solve those problems adequately in manageable time. On this note, the

claim for an automatically designed building can here be expressed whereas the optimization must be regarded as a mathematical function that evolves from the formulation of goals of optimization.

Furthermore it will be shown that the system of architectural generation can be considered a complex system in terms of the systems theory. This potentially enables emergent behaviour which means that a system of computer-assisted architectural generation can be a creative designer. Concurrently it is assessed that computer-generated architecture can never be objectively optimal but that it is always reflecting the subjective decisions of the software designer. An optimization is always an optimization on goals that were formulated by the software designer. By this, a transition from the subjective building designer to the subjective software designer can be observed. Thus it is not a question of a globally optimal but an optimized design.

The proposed system for the computer-assisted design of buildings will be explicitly described. For this, the necessary prerequisites and parameters will be appointed and the mathematical quantifiability will be proved which is inalienable for the computer-assisted processing. Furthermore a software model will be designed which is applicable to express the necessary parameters and variables of an architectural design.

A modified evolutionary algorithm will be used for the optimisation of the design. As suggested by the name, an evolutionary algorithm copies many parts of the biological evolution. To be able to use this algorithm, a "population" of designs must be created or initialised which should generally be as heterogeneous as possible. In the course of the algorithm these designs will be evaluated consistently to determine their fitness relating to the goals of the optimisation. After that, the designs will be selected for the recombination of their "genes" or variables respectively. With a certain probability those designs will be mutated. With a new selection of those designs which will be reinserted into the population the circular flow starts again. The algorithm will be executed until a stop criterion is met. Normally this is the case if a design reaches a certain level of quality. All steps of the evolutionary algorithms will be explicitly depicted and the application to the architectural design will be shown.

Additionally a system for the optimised initialisation of the population by means of a directed graph will be introduced. It will be demonstrated that the weight function of the pa-

rameters is a powerful instrument to control the algorithm and the results. The possibilities of the output of the results will be discussed shortly. Finally, a way to evaluate the results of the algorithm and to use this evaluation as parameters of a new optimisation will be pointed out.

Because of the outline of the system one of the most important aspects of architectural generation will be coped with in a separate paper: The architectural style. The results of that paper could not be incorporated into this thesis until now so that the results of the generation are incomplete in this regard whereas it must be indicated that the architectural style is not only a single factor. As no designed building can be without style, an aesthetical statement is already made. But this statement only emerges "out of itself" whereas further research should evaluate this aesthetical proposition. Apart from that, the results reveal that this approach is able to deliver a very good architectural design referring to the considered parameters. The feasibility of the approach as a matter of principle is proved and the claim for time optimisation of an architectural design can be adhered to. As a matter of complexity a complete, accurate and three-dimensional architectural design can be created within hours. Of course, this can radically change the architect's time management. To increase the quality and the complexity of the results it is proposed to account for more parameters in further research. Amongst these should be the architectural style and above all the work of the civil engineers which should be integrated into the holistic architectural generation software. If one succeeds with this, nothing is in the way of a change of the work of an architect. He can use the obtained time to take his responsibility for an artistic architecture.

1 Einleitung

"Der Beruf des Architekten ist eine abenteuerliche Tätigkeit: Ein Grenzberuf in der Schwebelage zwischen Kunst und Wissenschaft, auf dem Grat zwischen Erfindung und Gedächtnis, zwischen dem Mut zur Modernität und echter Achtung der Tradition." (Renzo Piano, zitiert nach [Süß04])

Wie Renzo Piano in seinem Zitat anlässlich seiner Ansprache zur Eröffnungsausstellung der *Fondation Beyeler* andeutet, ist der Beruf des Architekten insofern besonders, als er eben zwischen Kunst und Wissenschaft anzusiedeln ist. Der Architekt ist einerseits Künstler, der ein Gebäude erschafft, andererseits auch Wissenschaftler beziehungsweise Ingenieur, der Sorge zu tragen hat, die alltäglichen Anforderungen an ein Gebäude zu erfüllen, was sich nicht zuletzt darin niederschlägt, dass sein Beruf zu den Ingenieurwissenschaften gezählt wird. Gleichzeitig ist der Handlungsablauf eines Architekten sehr strukturiert, unter anderem durch gesetzliche Vorgaben wie der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), die den Entwurfsvorgang des Architekten, zumindest in Deutschland, in einzelne Phasen unterteilt, für die er auch einzeln entlohnt wird.

Der Architekt befindet sich insofern nicht nur in einem Spannungsfeld zwischen Kunst und Wissenschaft, sondern auch zwischen Kunst und ökonomischen Zwängen, zwischen seinem künstlerischen Gestaltungswillen und notwendigen ökonomischen Abwägungen, die er zur Sicherung seiner Existenz treffen muss. In diesem Sinne wird es evident, dass der Architekt, um seiner künstlerischen Aufgabe in möglichst hohem Maße nachkommen zu können, die ökonomischen Aspekte seines Schaffens optimieren sollte. Ein Weg zur zeitlichen – und damit ökonomischen – Optimierung seiner Leistungen liegt im Einsatz von Computern, die planerische Abläufe im Büro beschleunigen und vereinfachen können. In der vorliegenden Arbeit wird ein sehr weit gehender Weg aufgezeigt, den Computer zu nutzen, um die Planung des Architekten zu vereinfachen und zu beschleunigen, seine Kosten zu reduzieren und damit Freiraum für die künstlerische Seite seines Schaffens zu erlangen. Hier soll der Ansatz der computergestützten ganzheitlichen Architekturgenerierung greifen.

Ausgangspunkt ist der Bau von Einfamilienhäusern. Dieses Feld ist besonders geeignet, das Prinzip des Ansatzes zu zeigen, nicht zuletzt weil die gebaute Qualität in diesem Bereich besonders schlecht ist. Dies liegt unter anderem an politischen Maßgaben und daraus entste-

henden ökonomischen Zwängen, die dazu führen, dass der Einfamilienhausbau in Deutschland zu großen Teilen nicht mehr in der Hand eines Architekten liegt. Hier besteht also ein Handlungsbedarf, ein Mangelzustand, den zu beheben eine optimierte computergestützte architektonische Planung helfen kann.

Die vorliegende Arbeit ist im Bereich zwischen Architektur und Informatik angesiedelt. In erster Linie handelt es sich aber um eine Arbeit zur Architektur, die Erkenntnisse aus dem Bereich der Informatik in den Handlungsablauf eines Architekten integrieren will. So werden Grundbegriffe der Informatik sehr viel ausführlicher beschrieben, als dies bei einer Arbeit aus dem Fachbereich Informatik nötig oder sinnvoll wäre. Hierbei werden die Begriffe in der Regel an den Stellen der Arbeit definiert und erläutert, an denen dies nötig ist. Schon im Vorfeld sollten aber einige Begrifflichkeiten für diese Arbeit geklärt werden, um das Verständnis im Folgenden zu vereinfachen.

1.1 Die mangelnde architektonische Qualität

Zunächst soll aber der Ausgangspunkt, der vorhandene Mangelzustand, im Bereich der architektonischen Planung beim Bau von Einfamilienhäusern verdeutlicht werden, den zu beheben diese Arbeit beitragen soll. Dieser Bereich ist zum Einen geeignet, da die Komplexität des Entwurfes so überschaubar ist, dass sich die Konzepte der ganzheitlichen Architekturgenerierung deutlich zeigen lassen. Zum Anderen findet sich hier aber auch eine besonders schlechte architektonische Qualität des Gebauten. Diese schlechte Qualität lässt sich im Wesentlichen auf gesetzliche Vorgaben, aber auch auf ökonomische Zwänge zurückführen, die aber auch wieder politischen Weichenstellungen unterworfen sind.

Einer der Hauptgründe für die schlechte Qualität im Eigenheimbau ist die Tatsache, dass in vielen Bundesländern, so etwa in Baden-Württemberg, für kleine Einfamilienhäuser bis zu 150m² die sogenannte „kleine Bauvorlageberechtigung“ ausreicht, um Genehmigungsplannungen unterzeichnen zu dürfen, wie dies beispielsweise in § 43 Abs. 4 der Landesbauordnung für Baden-Württemberg (siehe [Kup05]) festgelegt ist. Dies führt dazu, dass viele Einfamilienhäuser, die die rechtlichen Bedingungen erfüllen, nicht von einem Architekten zur Genehmigung vorgelegt – und damit geplant – werden müssen, sondern dass dies durch andere Personen, etwa Absolventen eines Studienganges der Architektur oder des Bauingenieurwesens oder aber auch durch Handwerksmeister erfolgen kann. Auf diese Weise ent-

steht eine „Architektur ohne Architekten“, die sich zwar inhaltlich von der von RUDOFISKY in [Rud89] beschriebenen „Architektur ohne Architekten“ absetzt, aber ähnliche Ausgangspunkte aufweist. Diese Art der Architektur entsteht ohne Zutun eines baukünstlerisch ausgebildeten Architekten, also durch Personen, die höchstens eine bautechnische Ausbildung haben. Wie RUDOFISKY darlegt, sind diese Bauten häufig von Improvisation oder Pragmatismus, auch von handwerklicher Präzision und Anpassung an Umweltbedingungen geprägt, nicht jedoch von einer Baukunst im akademischen Sinne. RUDOFISKY sieht in der Architektur ohne Architekten eine der wertvollsten Inspirationen für heutige Architekten und lobt die Zweckmäßigkeit, Natürlichkeit und Menschlichkeit dieser Architektur, die häufig einem Schutzbedürfnis vor Feinden oder der Natur entspringt. Im Gegensatz dazu kennzeichnet die heutige Architektur der Wohngebiete jedoch oftmals nicht eine jahrhundertlang evolutionär gewachsene Anpassung an die Umwelt oder eine bauliche Tradition, sondern vielmehr eine Ausrichtung an modischen Trends und möglichst günstiger Schaffung des „Traums vom Eigenheim“.

Hier wird durch den Gesetzgeber also die Möglichkeit geschaffen, große Flächen mit Bauten zu versehen, die im eigentlichen Sinne nicht der Baukunst zugerechnet werden können. Unterstützt wird dieser Ansatz durch ein zweites Regelwerk, die oben erwähnte HOAI. Diese legt den Honorarsatz fest, den ein Architekt für die Leistungen beim Bau eines Gebäudes anrechnen darf. Dabei wird in unterschiedliche, insgesamt neun, Leistungsphasen unterteilt, wobei die ersten fünf Leistungsphasen die Vor- und Entwurfsplanung sowie die Ausführungsplanung, also die „klassischen“ Dienstleistungen eines Architekten enthalten. Diese Phasen machen 52 Prozent des Honorars aus. Bei einem konkreten Beispiel, einem Einfamilienhaus mit einer Bausumme von 200.000 Euro wird nach HOAI ein Honorar von 21.586 bis 26.792 Euro für die gesamte Leistung beziehungsweise von etwa 12.000 Euro für die ersten fünf Leistungsphasen angegeben [Hon01]. Berechnet man nur die ersten vier Leistungsphasen, lässt also die Ausführungsplanung, die bereits das Einarbeiten von Fachplanungen beinhaltet heraus, so ergibt sich ein Honorar von 27 Prozent des vollen Honorars oder etwa 6.000 Euro im konkreten Beispiel. Aus dieser Zahl kann man nun zweierlei herauslesen: Erstens handelt es sich um so viel Geld, dass der Bauherr bestrebt sein wird, dieses Geld zu sparen, wenn ihm gesetzlich die Möglichkeit gegeben wird. Zweitens handelt es sich aber wiederum um so wenig Geld, dass der Architekt Mühe haben wird, seine Kosten, die bei einer gründlichen Planung entstehen, zu decken. Eine weitere Folge ist also die, dass der Architekt

sich auch selbst aus dem Bereich des Einfamilienhausbaus zurückzieht, da das Honorar verglichen mit dem Aufwand zu gering ist. Dies führt zu einer weit verbreiteten Planung von Einfamilienhäusern durch – zumindest baukünstlerisch gesehen – Laien, wobei natürlich nicht versäumt werden sollte, auf den großen Markt der Fertighäuser hinzuweisen. Diesen Anbietern mangelt es zwar nicht immer an Professionalität, dafür aber ebenfalls an Baukunst und sie können keinesfalls die individuellen Bedürfnisse eines Nutzers bedienen, wie dies ein guter Architekt kann.

1.2 Die Ausgangslage / Stand der Technik

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit um eine Arbeit an der Schnittstelle von Architektur und Informatik handelt, muss auch die Ausgangslage beziehungsweise der Stand der Technik von beiden Seiten beleuchtet werden. Dies soll zunächst von der Seite der Architektur aus geschehen.

Wie in 1.1 bereits festgestellt wurde, ist der für Planungen im Bereich des Einfamilienhausbaus festgelegte Honorarsatz knapp bemessen, wenn man sich vor Augen führt, welcher Aufwand mit einer grundlegenden und individuellen Planung verbunden ist und auch welche Zeit – und damit Geld – eingesetzt werden muss. Der Planungsablauf an sich ist dabei recht festgelegt, zum Einen durch die oben erwähnte HOAI, die nicht nur das Honorar festlegt, sondern auch für welche Leistungen es in welcher Phase der Planung abgerechnet werden kann. Die HOAI unterscheidet dabei die Phasen Grundlagenermittlung, Vorplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung, Ausführungsplanung, die Vorbereitung der Vergabe, die Mitwirkung bei der Vergabe, die Objektüberwachung sowie die Objektbetreuung und Dokumentation [Hon01]. Die Leistungen, die in den einzelnen Phasen als Grundleistungen oder besondere Leistungen erbracht werden müssen, sind genau aufgeführt, so dass das Vorgehen des Architekten nicht frei ist.

An dieser Stelle sei auch kurz darauf eingegangen, dass das Vorgehen eines Architekten vielleicht auch nicht frei sein sollte, da es scheinbar ein „Grundproblem des Vergessens“, also des Auslassens der Planung bestimmter Aspekte gibt. Die erwähnten modernen Werke wie die HOAI sind in diesem Sinne nicht nur als einengendes Gerüst, sondern auch als Stütze zu sehen, die als Anleitung zur vollständigen Planung interpretiert werden können. In diesem Sinne kann man natürlich auch frühere Werke sehen, neben Vitruv, Palladio und zahlreichen

anderen sei hier vor allem auf Leon Battista ALBERTI verwiesen, der in seinem Lehrwerk der Renaissance „Zehn Bücher über die Baukunst“ [Alb88] ebenfalls einen vollständigen Überblick über das Bauen gibt und eine Art Anleitung zu diesem erstellt hat. So gesehen, ergeben sich rein technisch gesehen heute wesentlich größere Möglichkeiten, das „Vergessen“ zu verhindern, da hier natürlich vor allem die quantitativen Aspekte zu nennen sind, die sich durch den Einsatz von nicht vergessenden Maschinen eröffnen.

Doch zunächst zurück in die Gegenwart: Auch die „Bauentwurfslehre“ von NEUFERT [Neu00] fasst den Arbeitsvorgang des Architekten recht eng. So wird hier gefordert, dass zunächst grundlegende Fragen, wie die nach Grundstück oder vorhandenem Geld geklärt werden. „Dann beginnt die schematische Aufzeichnung der Räume [...] mit dem geforderten Flächeninhalt [...] und die Festlegung der erwünschten Beziehungen [...] zueinander [...].“ Es folgt die Klärung der Lage des Gebäudes auf dem Grundstück, Fragen der Umweltbedingungen werden geklärt. Alle diese Fragen werden immer wieder in Besprechungen erörtert und entschieden. „Und nun beginnen die Geburtswehen des ersten Hausentwurfs, vorerst im Geiste aus tiefer Versenkung in die [...] Zusammenhänge der Bauaufgabe und ihrer geistigen Hintergründe.“ Hieraus erwächst nun nach und nach der konkrete Entwurf, nicht ohne die Warnung: „Durch ungeschickte Hilfskräfte geht oft der Schwung der ersten Skizze wieder verloren.“ Nach einer empfohlenen Ruhezeit von drei bis 14 Tagen beginnen schließlich die Ausarbeitung des Entwurfs sowie die Besprechung mit Fachplanern. Oft schon parallel dazu wird die Planung an die Bauaufsichtsbehörde weitergereicht, es folgen Ausschreibung und – nach Genehmigung – der Baubeginn. NEUFERT veranschlagt für die all diese vorgeschriebenen Arbeiten für größere Einfamilienhäuser von Auftragserteilung bis Baubeginn etwa zwei bis drei Monate, was die oben genannte knappe Honorarbemessung für Einfamilienhäuser weiter belegt.

Die Leistungen, die ein Architekt erbringen muss, sind also festgelegt, eine Verringerung des Aufwandes und damit der Kosten, die einem Architekten bei der Planung entstehen, ist somit nicht durch ein Auslassen von Planungsschritten möglich, sondern höchstens durch eine Verbesserung der Methoden und Abläufe, die bei der Planung zum Einsatz kommen. Hierbei kann natürlich zunächst auf die Möglichkeiten, die eine gute Büroorganisation und gute Mitarbeiter oder eine gute Kommunikation mit dem Bauherrn mit sich bringen, verwiesen werden. Eine weitere Verbesserung ist hauptsächlich durch die automatisierte computergestütz-

te Arbeit oder sogar durch das Entwerfen durch eine Software möglich, die sich den großen Vorteil des Computers, das Ausführen sehr vieler Rechenoperationen in kürzester Zeit, zu Nutzen macht.

Dieser Schluss führt somit zur Betrachtung des bisherigen Einsatzes des Computers im Alltag des Architekten, also zum Stand der Technik bezogen auf den Einsatz des Computers in der Arbeit des Architekten. Hier ist natürlich zunächst *Computer Aided Design* (CAD) zu benennen, die rechnerunterstützte Konstruktionssoftware, die das Zeichnen von zweidimensionalen Plänen oder auch dreidimensionalen Gebäuden erleichtert. Sie basiert auf einer Klassifizierung, Parametrisierung und Objektorientierung von Zeichenelementen. Die meisten Architekturbüros verwenden heute CAD-Software. Diese erleichtert den Ablauf der oben beschriebenen Planung aber erst ab einem gewissen Punkt beziehungsweise nur in bestimmter Hinsicht. So sind die Grundlagenermittlung, die Vorplanung und auch zu einem gewissen Teil die Entwurfsplanung wohl ähnlich schnell, wenn nicht sogar schneller, per Hand zu erledigen. Viele Architekten lehnen einen zu frühen Einsatz von CAD-Software auch ab. In der späteren Planung kann die Software natürlich sehr wohl helfen, da Änderungen an vielfach verplanten Bauteilen natürlich sehr viel einfacher zu bewerkstelligen sind. In Bezug auf die oben aufgeworfene, aktuelle Problematik in der Planung im Bereich der Einfamilienhäuser ist die Analyse von CAD-Software allerdings nur bedingt interessant, da diese Software bereits seit vielen Jahren, teilweise Jahrzehnten, eingesetzt wird und somit an einer Verbesserung der momentanen Situation nicht mitgewirkt hat. Trotzdem darf CAD-Software hier nicht unerwähnt bleiben, da sie in vielen Fällen den Hauptberührungspunkt von Architekt und Computer darstellt.

Es muss noch auf einen weiteren Aspekt eingegangen werden, der die Arbeit des Architekten kennzeichnet und durch den Einsatz des Computers schon erleichtert wird: die Einarbeitung der Planungen von Fachingenieuren wie Statikern, Bauphysikern oder Elektroplanern. Auch hier ist aber Raum für Verbesserungen. Wie oben gezeigt, zählt die Einarbeitung und Koordination von Ingenieursleistungen zur Leistungsphase 5 der HOAI, der Ausführungsplanung. Einerseits gehört es ja geradezu zum Leistungsbild eines Architekten, grundlegende Kenntnisse in vielen Bereichen, auch beispielsweise der Statik, zu haben, um die hier geforderte Arbeit gut absolvieren zu können. Andererseits ist es natürlich so, dass ein Architekt niemals das Wissen eines Ingenieurs in dessen Fachbereich haben kann. Er ist somit in den meisten

Fällen dem Urteil des Fachmannes „ausgeliefert“. Natürlich wird in zahlreichen Überplanungen und Besprechungen versucht, eine Integration der Anforderungen, die vom Fachplaner gestellt werden, zu erlangen und oftmals gelingt dies sicher auch. Trotzdem bleibt festzuhalten, dass die Planungen der Fachplaner in gewisser Weise isoliert sind. Sie können zumindest bei komplexeren Planungen nicht vollständig von vornherein berücksichtigt werden, so dass hier ein wesentlicher Bereich für Verbesserungen durch eine ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware besteht.

1.3 Die Forschung am Einsatz des Computers in der Architektur

In diesem Kontext relevanter als die oben kurz angerissene CAD-Software sind die Ansätze, die darauf abzielen, einzelne Parameter eines Entwurfs zu optimieren oder aber zumindest dem Architekten helfen sollen, selbst in optimaler Weise zu handeln. Natürlich ist im weiteren Verlauf zunächst zu klären, was eine Optimierung eigentlich ist, hier kann dieser Begriff aber zunächst intuitiv verwendet werden.

Der „Arbeitskreis Architekturinformatik“, ein Zusammenschluss von CAD-Instituten, unter anderem der Universitäten Aachen, Darmstadt, Karlsruhe, München, Weimar, Wien und Zürich geht in seinem Positionspapier [Akai08] von einer grundsätzlichen Unterteilung in die vier Bereiche Technik, Methoden, Modelle und Prozesse aus. Diese Einteilung ist nachvollziehbar, kann hier jedoch nicht eingehalten werden, da die ganzheitliche Architekturgenerierung sich nicht vollständig in einen dieser Bereiche einpassen lässt.

Die Auflistung des bisher erreichten erfolgt, um den hier formulierten Ansatz einzuordnen. Wie später gezeigt wird, widerspricht eine Nutzung bisheriger Ergebnisse keineswegs dem Ansatz der ganzheitlichen Architekturgenerierung. Es handelt sich bei der vorliegenden Arbeit nicht um eine Antithese zu bestehenden Arbeiten, sondern um eine Synthese.

1.3.1 Simulationen und „Agents“

Alle Simulationen haben gemeinsam, dass sie einen bestimmten Planungsstand im Rahmen einer Virtualisierung auf die praktische Nutzbarkeit testen. Dies kann im sehr technischen Bereich wie der Tragwerksplanung oder Energieplanung geschehen, aber auch abstraktere Analysen beinhalten. Es kann sein, dass komplette Gebäude simuliert werden oder dass das Gebäude selbst abstrahiert wird. Eine übliche Simulation, zumindest bei komplexeren Gebäuden, ist die Simulation des Tragwerksverhaltens mittels entsprechender Fachsoftware.

Dabei wird das geplante Tragwerk auf Festigkeit, auch unter Extrembedingungen und beispielsweise Schneelast getestet. Ähnliches ist für andere Bereiche wie die Elektro- oder Lichtplanung möglich.

Bei einer Sonderform der Simulationen werden simulierte „Individuen“, so genannte *Agents*, benutzt, um ein Gebäude zu bewerten. Durch die Überprüfung von Gebautem mittels Simulationen ist es bei gutem Simulationsmodell möglich, qualifizierte Aussagen über die spätere Verwendbarkeit eines Gebäudes zu treffen. Ein Beispiel für solche Lösungen unter zahlreichen anderen ist der sogenannte Navigationsagent, der an der ETH Zürich entwickelt wurde (siehe [Sch96a], S. 111).

Die Bewertung des Gebäudes erfolgt bei diesem Ansatz jedoch inhaltlich oft eindimensional. So kann der Planer in diesem Falle zwar Rückschlüsse über die spätere Orientierung im Raum erwarten, er muss diese Erkenntnisse aber von Hand einplanen. Es erfolgt also, wie bei allen Simulationen, nur eine Bewertung des bereits geplanten. Die Ergebnisse können nicht schon während der Planung verwendet werden, auch wenn leistungsstarke Rechner einen unmittelbaren Einsatz bei der Planung erleichtern.

Dieses Prinzip gilt für alle Simulationen, auch durch *Agents*. Sie können bei konkreten Aufgaben oder Schwierigkeiten durchaus von großem Nutzen sein. So kann man hier als Beispiel die Paniksimulation nennen, die zur Optimierung der Fluchtwege beim Neubau der Gelsenkirchener „Arena Auf Schalke“ eingesetzt wurde (siehe [Hos01], für eine Übersicht über Evakuierungssimulation siehe [Sch02]). Es wurden so Erkenntnisse gewonnen, die dazu beitragen, eine schnelle Evakuierung des Stadions zu gewährleisten. Erkenntnisse, die im Gesamtzusammenhang des architektonischen Entwurfs wichtig sind, weil sie darauf natürlich Einfluss haben, aber erst zu einem Zeitpunkt Eingang in den Entwurf finden, zu dem der eigentliche Entwurf bereits „fertig“ ist. Dies liegt in der Natur der Sache, da nicht simuliert werden kann, was noch nicht entworfen wurde.

In durchaus ähnlichem Zusammenhang, wenn auch differenzierter zu sehen, ist ein „Cost-Agent“, der an der ETH Zürich entwickelt wurde (siehe [Sch96a], S. 111). Es handelt sich dabei um eine Live-Berechnung von Baukosten während des Arbeitens in CAD-Software. Dieser Ansatz geht durchaus weiter, da er durch die unmittelbare Verfügbarkeit der Ergebnisse schon in der Entwurfsphase Einfluss auf den Entwurf nehmen kann.

Simulationen sind ein wichtiger Bereich der Computeroptimierung von Architektur. Sie stehen in keiner Weise dem hier vorgeschlagenen Optimierungsalgorithmus im Wege. Es wird vielmehr möglich sein, Ergebnisse von Simulationen unmittelbar in die Optimierung einfließen zu lassen. Dabei gibt es keine theoretische Grenze der Einbindung von Simulationen, lediglich in praktischer Hinsicht wird es je nach Simulation rechnerzeitbedingte Einschränkungen geben, die jedoch lediglich linearer Natur sind und somit, wie später gezeigt werden wird, kein prinzipielles Hindernis darstellen.

1.3.2 Generative Software

Unter generativer Software kann man all jene Ansätze zusammenfassen, die versuchen, einen architektonischen Entwurf oder Teile davon automatisch erzeugen zu lassen. Sie folgen dabei einem individuellen Generierungsalgorithmus. Die in dieser Arbeit vorgestellte ganzheitliche Architekturgenerierung ist ebenfalls eine generative Software, die jedoch auch Elemente anderer Klassen in sich vereint.



Abbildung 1: Das Projekt Kaisersrot (Quelle: Internetseite des Projekts)

Beispiel Kaisersrot

Kaisersrot ist eine auf den Städtebau bezogene Optimierungsstudie [ETH04]. Sie ermöglicht die optimale Verteilung von Grundstücken im städtebaulichen Kontext. Alle künftigen Grundstücksbesitzer können Präferenzen angeben, danach erfolgt eine Berechnung der optimalen Verteilung der Grundstücke. Der Ansatz ist zwar

nur auf den Städtebau bezogen, ist jedoch sehr breit gefasst und bezieht sich vor allem auf die Erfordernisse und Bedürfnisse der Nutzer. Es handelt sich hierbei um eine der weitgehendsten Lösungen im Bereich der generativen Software, auch wenn sich die Lösung lediglich auf den in diesem Falle wesentlich weniger komplexen Städtebau bezieht.

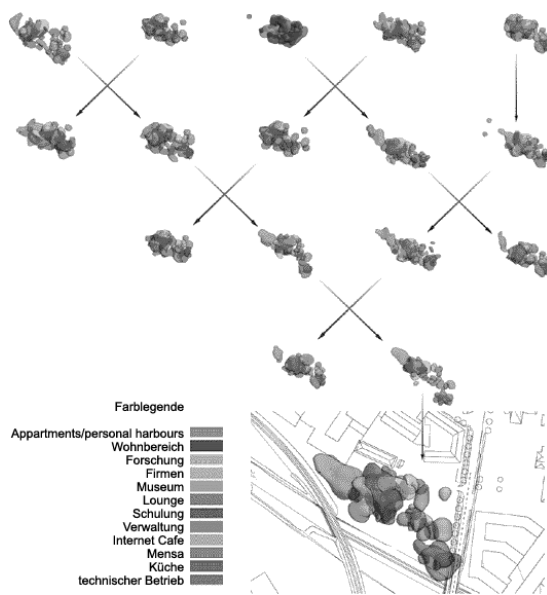


Abbildung 2: Der Entwurfsgenerator (Quelle: www.entwurforschung.de)

Beispiel Entwurfsgenerator

Der Entwurfsgenerator ist ein Ansatz, den KÖNIG und BAURIEDEL entwickelt haben (siehe [Ent09]). Es handelt sich um einen weitgehenden Ansatz zum Entwurf architektonischer Situationen. Dabei wird eine Gewichtung von Beziehungen unter den Räumen sowie zur Freiraumbindung vorgenommen. Diese Werte führen zusammen mit einer Gewichtung von Formstabilität zu Entwürfen, die dann durch eine evolutionäre Entwicklungsstrategie mutiert und gekreuzt werden. Die Ergebnisse sind freige-

formte Umhüllungen, die einen Vorschlag zu grundsätzlichen Anordnungen von Raumzusammenhängen darstellen. Von einem konkreten Entwurf kann jedoch in diesem Zusammenhang nicht geredet werden.

Der Ansatz der evolutionären Optimierung wird auch in dieser Arbeit verwendet. Der wichtigste Punkt einer evolutionären Strategie, die Selektion, erfolgt bei KÖNIG und BAURIEDEL jedoch durch den Menschen, also einen Planer oder ein Planungsteam. Deshalb kann man hier nicht von ganzheitlicher Architekturgenerierung sprechen. Die Selektion, also die Auswahl aus einer Menge von Entwürfen, ist sicher der schwierigste Punkt eines evolutionären Ansatzes. In der vorliegenden Arbeit soll jedoch gezeigt werden, dass eine automatisierte Lösung hier durchaus möglich ist. Auch wird eine Beschränkung auf Hüllformen und vage Situationen nicht bestehen.

Die Form

Generell ist die Verwendung von evolutionären Algorithmen in Verbindung mit der Generierung von Formen nicht neu. So ist hier beispielsweise die Arbeit von FRAZER zu nennen [Fra95]. Schon er formulierte einen Algorithmus zur Generierung architektonischer Formen. Doch auch dieser Ansatz kann nicht ganzheitlich genannt werden, da er sich eben fast ausschließlich mit Formen beschäftigt. Dieses Phänomen kann in vielen Bereichen der Anwendung des Computers in der Architektur beobachtet werden: Die hauptsächliche Betrachtung der Form im Rahmen generativer Ansätze. Diese Beschränkung ist einer der Auslöser für die

Entwicklung der ganzheitlichen Architekturgenerierung, da hier die Form relativ unwichtig ist. Sie ist lediglich ein einzelner Parameter unter vielen. Die Beschäftigung mit der Form liegt wahrscheinlich in der Tatsache begründet, dass sich diese mathematisch einfach fassen lässt und das Ergebnis solcher Arbeiten (siehe beispielsweise auch Greg Lynn in [Lyn99] und in [Lyn02] oder auch NOX, zum Beispiel in [Spu04]) oftmals spektakulär ist, was dazu führt, dass die Nutzung des Computers zur Berechnung komplexer Figuren mit Kreativität verwechselt wird. Natürlich ist die Beschäftigung mit der Form auch eine Domäne des Architekten, was diesen Schwerpunkt ebenfalls erklärt. Für eine Übersicht über zahlreiche Beispiele „digitaler Architektur“ sind unter anderem [Ste01] und [Ima01] zu empfehlen.

Eine Beschäftigung mit Freiformen, was ja meist Inhalt dieser Arbeiten ist, kann zwar durchaus nachvollzogen werden, da der Computer in diesem Bereich durch seine Rechenleistung Formen zulässt, die früher nicht entstehen konnten oder die zwar gedanklich entstehen konnten, die aber unmöglich hätten gebaut werden können, so etwa das Guggenheim Museum in Bilbao (siehe [vBr99], besonders S. 135ff). In anderer Hinsicht kann die Beschäftigung mit Freiformen jedoch sogar als irreführend bezeichnet werden, da auf diese Art und Weise der Eindruck entsteht, „Computerarchitektur“ sei „Freiformarchitektur“, ein Ansatz der dieser Arbeit völlig entgegensteht. Es soll dabei natürlich nicht behauptet werden, jedwede mit oder ohne Computer entstandene Freiformarchitektur sei nur „Effekthascherei“ oder per se schlecht. Auch in diesem Bereich gibt es natürlich fundierte und qualitativ hochwertige Arbeiten. Es soll lediglich festgehalten werden, dass diese Art der Architektur nicht Inhalt dieser Arbeit ist.

Zum Abschluss der Betrachtungen über den bisherigen Einsatz des Computers in der Architektur sei auch noch auf das sogenannte *Building Information Modeling* (BIM) hingewiesen. Hierbei handelt es sich um eine Methode, Gebäudedaten mittels einer Software zu speichern, wobei im Unterschied zur klassischen CAD-Software weitreichende Informationen zu allen relevanten Gebäudeteilen vorliegen und vernetzt werden können. So ist es etwa möglich, dass Fachingenieure ihre Planungen direkt im Gebäudemodell vornehmen und diese Änderungen sofort allen Planern zur Verfügung stehen. Beispiele für kommerzielle Softwarelösungen sind *Revit* von *Autodesk* oder *Bentley Architecture*. Durch das Vorliegen als Gebäudemodell und nicht als klassische Zeichnung bieten sich solche Produkte auch besonders dafür an, sie als Rahmen für die Entwicklung von Plug-Ins oder Erweiterungen zu nutzen.

Hier soll dies jedoch nicht geschehen, da die ganzheitliche Architekturgenerierung nicht von Modellen und Schnittstellen kommerzieller Produkte abhängen sollte, sondern in der Entwicklung und Erweiterung frei sein soll.

Es kann hier natürlich nur ein Eindruck davon vermittelt werden, welche prinzipiellen Ansätze vorhanden sind. Diese sollen aber vor allem den Hintergrund dazu liefern, den Ansatz der ganzheitlichen Architekturgenerierung einzuordnen und abzugrenzen. Zunächst sollen grundsätzliche Erwägungen und Voraussetzungen bezogen auf die Informatik vorgestellt werden, soweit sie das Thema der vorliegenden Arbeit tangieren.

1.4 Die Evolution als Vorbild für die Informatik

Für den Ansatz der ganzheitlichen Architekturgenerierung soll ein sogenannter evolutionärer Algorithmus als Hauptbestandteil eingesetzt werden. Ein evolutionärer Algorithmus nutzt das Vorbild der biologischen Evolution, um Probleme allgemein zu lösen. Wie GERDES et al. in [Ger04] (S. 1f) darlegen, sind evolutionäre Algorithmen als Gegenentwurf zur klassischen Lösung von Problemen durch das Anhäufen möglichst genauen Wissens über die Struktur eines Problems und die folgende Ausarbeitung eines genau auf dieses Problem zutreffenden Lösungsansatzes zu sehen, da evolutionäre Algorithmen, die zum Bereich der *Computational Intelligence* gezählt werden, darauf ausgerichtet sind, universelle Strategien zur Lösung eines Problems zu entwickeln. Dies geschieht zwar zu Lasten eines höheren Rechenaufwandes, dieser wird jedoch durch den geringeren Aufwand bei der Modellierung eines Lösungsansatzes wettgemacht. Insofern besteht ein großer Vorteil von evolutionären Algorithmen darin, dass diese relativ einfach an unterschiedlichste Problemstellungen, wie sie beim Entwurf eines Gebäudes zu erwarten sind, anzupassen sind.

Die genaue Funktion des evolutionären Algorithmus im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung wird später natürlich detailliert erläutert werden, an dieser Stelle sei aber festgehalten, dass evolutionäre Algorithmen im Bereich der Informatik in zahlreichen Anwendungen unterschiedlichster Natur angewendet wurden, so etwa bei der Optimierung von Flugrouten (siehe [Ger04], S. 110ff), bei der betriebswirtschaftlichen Suche nach Standorten (siehe [Nis94]), der Platzierung von Mobilfunkantennen, der Motorenkalibrierung oder der Stundenplanerstellung (alle drei Beispiele siehe [Wei07]). Die Anwendung evolutionärer Algorithmen ist auch für den Bereich der Architektur nicht neu, wie etwa die Arbeit

von FRAZER (siehe [Fra95]) zeigt. Allerdings war bei allen bisherigen Versuchen der Anwendung solcher Algorithmen in der Architektur der Ansatz keinesfalls ganzheitlich, sondern auf bestimmte Aspekte, wie etwa die Formgebung, beschränkt. Festzuhalten bleibt insofern, dass in der vorliegenden Arbeit aus einem dem Stand der Technik in der Informatik entsprechenden Algorithmus ein Ansatz zum ganzheitlichen Entwerfen von (Wohn-)Gebäuden entwickelt werden soll, wobei im Folgenden unter anderem geklärt werden muss, was die Hauptmerkmale eines ganzheitlichen Ansatzes in diesem Kontext sind.

1.5 Klärung von Begriffen

Nachdem die Ausgangslage der vorliegenden Arbeit umrissen wurde, sollen nun zunächst einige Begriffe geklärt werden, die inhaltlich von großer Wichtigkeit sind und immer wieder in Erscheinung treten werden. Einige Begriffe werden an den Stellen erläutert, an denen dies notwendig ist. Um die Ziele und Ausgangspunkte der Arbeit voll erfassen zu können, werden die Begriffe der Optimierung, der Ganzheitlichkeit und der Generierung, die für das weitere Vorgehen essentiell sind, hier erläutert.

1.5.1 Optimierung

„Optimierung“ ist ein Wort, das heutzutage fast inflationär verwendet wird und generell einfach für eine Verbesserung eines bestehenden Zustandes steht. In diesem Sinne wird es auch hier verwendet, dennoch soll es nicht undefiniert bleiben. Wenn in der vorliegenden Arbeit vom optimalen Entwurf die Rede ist, so ist damit der im wahren Sinne des Wortes optimale Entwurf gemeint, das Ergebnis einer Optimierung als das „Aufsuchen des kleinsten (Minimierung) [...] Wertes einer Funktion in einem bestehenden, durch Nebenbedingungen, oft in Form von Gleichungen [...] beschriebenen [...] Bereich“ [dtv99]. Es wird also nicht von einem umgangssprachlich gemeinten und damit subjektiven Optimum geredet, sondern vom echten Optimum einer Funktion im mathematischen Sinne. Die Einschränkungen bezüglich einer Optimierung mittels eines evolutionären Algorithmus werden unten diskutiert. Es bleibt aber festzuhalten, dass der Begriff der Optimierung hier keinesfalls als eine undefinierte Verbesserung verstanden werden soll, sondern im wahren Sinne des Wortes als das Minimum einer zu definierenden mathematischen Funktion zu sehen ist, selbst wenn das Auffinden dieser Stelle unter praktischen Gesichtspunkten nicht zu bewerkstelligen sein sollte.

Auch die Definition, die SEDGEWICK in seinem Standardwerk „Algorithmen“ ([Sed02], S. 687) für den Begriff der mathematischen Programmierung beziehungsweise Optimierung angibt, ist geeignet, den Begriff im vorliegenden Kontext weiter zu beleuchten: „Dieser Prozeß der Gewinnung einer Menge mathematischer Gleichungen, deren Lösung die Lösung eines gegebenen praktischen Problems nach sich zieht, wird *mathematische Programmierung (Optimierung)* genannt.“ Er erläutert dabei weiter, dass der Begriff der Programmierung hierbei den Prozess der Auswahl der Variablen und der Aufstellung von Gleichungen beschreibt, so dass eine Lösung der Gleichungen einer Lösung eines Problems entspricht. SEDGEWICK bezieht sich im zitierten Kapitel zwar auf lineare Programmierungsmethoden, seine Definition ist aber trotzdem auch hier gültig. Der Begriff der Optimierung ist als mathematischer Begriff zu sehen, der das Aufsuchen des Minimums einer Gleichung beschreibt, die vorher definiert wird, um das Problem eines architektonischen Entwurfes zu lösen.

Eine noch weiter gehende Definition des Begriffes im Kontext dieser Arbeit, vor allem hinsichtlich Erwägungen der prinzipiellen Natur eines evolutionären Algorithmus auch unter Berücksichtigung der noch vorzustellenden Systemtheorie erfolgt unten. Die hier getroffenen prinzipiellen Feststellungen bleiben aber bestehen.

1.5.2 Ganzheitlichkeit

Der Begriff der Ganzheitlichkeit, der hier im Zusammenhang mit der ganzheitlichen Architekturgenerierung verwendet wird, ist ein schwer zu definierender, da er in vielen, teils unterschiedlichen, Zusammenhängen Verwendung findet. Die lexikalische Definition des Begriffes der Ganzheit, der hier synonym zur Ganzheitlichkeit verwendet werden kann, nennt sie ein „strukturiertes, geschlossenes [...] System, dessen Teile in wechselseitiger Beziehung zueinander und zur Gesamtheit stehen und dessen qualitative Einheit über die quantitative Summe der Teile hinausgeht (‘Übersummativität’).“ [dtv99]. Der Begriff der Ganzheit ist auch ein philosophischer, wie Platons dahingehende Aussage „Der Wagen ist nicht seine hundert Teile“ (zitiert nach [San90], Artikel Ganzes/Teil, S. 226) zeigt.

Ähnlich wird der Begriff auch von SEIFFERT (in [Sei92]) mit der Systemtheorie in Zusammenhang gebracht. Die Auswirkungen der Systemtheorie auf die vorliegende Arbeit werden gesondert betrachtet, an dieser Stelle sei zur Definition des Begriffes der Ganzheitlichkeit im vorliegenden Kontext darauf verwiesen, dass die Ganzheit beziehungsweise Ganzheitlichkeit bezogen auf die Architektur so zu verstehen ist, den Entwurfsprozess nicht in einem Einzel-

aspekt zu betrachten, wie es in vielen Beispielen der Fall ist. Der kreative Prozess ist eben als Ganzheit zu betrachten, als eine Einheit, die, wie Platons Wagen, aus einer Summe von einzelnen Elementen besteht, deren Eigenschaften sich aber nicht vollständig aus den Eigenschaften der einzelnen Elemente erklären lassen.

Außerdem ist darauf hinzuweisen, dass der architektonische Entwurf theoretisch völlig, mindestens aber umfassend, erfasst wird und sich somit von Ansätzen abgrenzt, die versuchen, einzelne Aspekte eines architektonischen Entwurfes zu optimieren.

1.5.3 Generierung

Auf den ersten Blick mag der Begriff der Generierung sehr einfach zu definieren sein, ist er doch auch im alltäglichen Sprachgebrauch zumindest nicht unüblich. Im Wort steckt natürlich der griechische Ursprung der *Genesis*, also der Schöpfung, Entstehung oder auch Geburt. Das deutsche Fremdwort der Generierung entstammt wiederum dem lateinischen *generare*, was „erzeugen“ bedeutet [Wah91]. Als Bedeutung wird aber weiterhin das automatische Erzeugen geführt. Darin mag der Grund liegen, weshalb der Begriff der Entwurfsgenerierung als Bezeichnung für den klassischen Entwurf eines Architekten in der Regel nicht verwendet wird, da dieser eben nicht automatisch entwirft.

Generierung, beziehungsweise hier die Architekturgenerierung, bezeichnet also den Vorgang der automatischen Erzeugung von Architektur, in diesem Falle mittels eines Computers. Dabei ist natürlich zu beachten, dass der Computer dies nur aufgrund der Regeln kann, die vordefiniert werden. Um das Wort für diese Arbeit also genau zu definieren, müsste man den Vorgang der Architekturgenerierung als automatische Erzeugung eines Gebäudes (architektonischen Entwurfes) durch einen Computer mittels vorher definierter Regeln und Randbedingungen beschreiben.

1.6 Der Computer als Entwerfer?

Inwieweit ist ein Computer prinzipiell geeignet, in der Architektur eingesetzt zu werden und wo liegen seine (momentanen) Grenzen? Diese fast schon grundsätzliche Frage im Sinne einer Gegenüberstellung von Mensch und Maschine, also von subjektivem Mensch und objektiver Maschine soll vor allem bezüglich folgender Fragen besprochen werden:

- Inwiefern kann ein Computer „objektiv“ entwerfen?

- Kann ein Computer „Neues“ entwerfen?

1.6.1 Der Computer als objektiver Entwerfer?

Eine Frage, die sich in der Arbeit mit dem Computer als Entwurfswerkzeug prinzipiell stellt, ist, ob ein Computer als objektiver Entwerfer eingesetzt werden kann. Beim händischen Entwerfen spielen immer subjektive Empfindungen eine Rolle und Wertungen finden ständig implizit statt. Neben den persönlichen Vorlieben des Entwerfers spielt natürlich beispielsweise auch der kulturelle Hintergrund des Entwerfers eine Rolle. Bei gleicher Entwurfsaufgabe werden die Ergebnisse eines europäischen, amerikanischen oder asiatischen Architekten völlig unterschiedlich sein. Aber auch die Ergebnisse eines französischen und deutschen Architekten unterscheiden sich signifikant.

Nun könnte man meinen, dass für einen Computer diese Zwänge nicht gelten, da der Computer per se natürlich absolut objektiv ist. Er hat keine Empfindungen, seine Entscheidungen sind nicht subjektiv. Obwohl dies für sich genommen natürlich richtig ist, kann bei keiner Software die Rede davon sein, dass sie objektiv ist. Jede Software ist das Produkt ihres Entwicklers und Programmierers. Dies betrifft keineswegs nur das Aussehen einer Software wie beispielsweise eines Betriebssystems, wo der kulturelle Einfluss der Softwaredesigner besonders augenfällig ist (man denke nur an die Oberfläche eines *Apple*-Computers). Auch die Bedienung einer Software funktioniert immer so, wie sie der Designer unter Berücksichtigung seiner Erfahrungen entwirft. Gleiches gilt natürlich in noch viel stärkerem Maße für die Entwicklung einer so komplexen Software wie einer Architekturgenerierungssoftware.

Es wäre naiv zu glauben, man könne bei der Entwicklung einer solchen Software objektiv sein. Man kann höchstens versuchen, so objektiv wie möglich zu sein, aber selbst dies wird nur in einem geringen Maße möglich sein. Schon bei der Auswahl der Parameter findet eine subjektive Auswahl statt, die von auf den Entwickler einwirkenden Umwelteinflüssen nicht frei sein kann. Die Auswahl ist mit Sicherheit das Ergebnis seiner Eigenschaften als Europäer, als Deutscher, als Absolvent der Universität Stuttgart und noch vieler anderer Einflüsse, die sein Leben bestimmen. Gleiches gilt natürlich in noch viel höherem Maße für die Verarbeitung der Parameter. Durch deren Bestimmung wird letztendlich auch bestimmt, wie ein Entwurf verarbeitet wird und wie er aussehen wird. Auch hier spielen natürlich kulturelle Erwägungen eine Rolle. Ein einfaches Beispiel hierfür ist schon alleine die Bereitstellung eines Parameters für Energiekosten. Dies geschieht vor dem Hintergrund des Bewusstseins der

Endlichkeit von Energiequellen und der Tatsache, dass Energie teuer ist. Für einen anderen Entwickler könnte dieser Parameter aber vielleicht völlig unerheblich sein, weil er nicht in diesem Bewusstsein lebt. Eine ähnliche kulturelle Prägung wird sich bei fast jedem Parameter finden. Selbst bei „objektiven“ Parametern wie Lärm, wo man davon ausgehen kann, dass man Lärm als schlecht für seine Schlafstätte definiert, da es sich beim Ruhebedürfnis um ein physisches Bedürfnis handelt, mag man sich zwar generell auf die Relevanz dieses Parameters einigen können, aber schon bei der Frage danach, wie hierauf reagiert werden kann und wo die Grenze zur Unerträglichkeit von Lärm liegt, sind sicher unterschiedliche Ansätze und Ansichten denkbar.

Es wird nicht möglich sein, diese Umstände zu umgehen. Es muss daher versucht werden, die Software so offen zu halten, dass unterschiedliche Benutzer die einzelnen Parameter auch unterschiedlich behandeln und somit ihren subjektiven Bedürfnissen anpassen können. Ein Ansatz hierzu ist die Gewichtung von Parametern. So ist es, um bei obigem Beispiel zu bleiben, möglich, die Gewichtung der Energiekosten auf 0 zu setzen, diesen Parameter also völlig außer Acht zu lassen. Auch bei allen anderen Parametern ist eine Individualisierung der Parameter durch den Nutzer möglich. Doch auch durch diese Möglichkeiten wird die Software natürlich nicht objektiv entworfen. Sie wird wiederum im kulturellen Kontext des neuen Benutzers entworfen, so dass die Anwendbarkeit der Software für jeden Benutzer gewährleistet ist. Mit einer Objektivität des Entwerfens hat dies jedoch nichts zu tun. In diesem Sinne darf also nicht der Fehler gemacht werden, die Ergebnisse einer Software als objektives und unumstößliches Optimum einer naturgegebenen Funktion zu sehen. Das Ergebnis der Software ist vielmehr immer das interpretierte Optimum, das durch den Entwickler vorgegeben wird.

Oder um es anders und an den Erwägungen zu einer Optimierung im Allgemeinen orientiert zu formulieren: Es bleibt natürlich die Tatsache bestehen, dass die hier vorgeschlagene Optimierung eine Optimierung im Sinne der in 1.5.1 beschriebenen Voraussetzungen ist, also die Lösung eines Problems, das durch mathematische Gleichungen beschreib- und lösbar ist. Die Auswahl beziehungsweise Formulierung dieser mathematischen Gleichungen, die zu lösen das Ziel ist, kann aber in oben beschriebenem Kontext nur subjektiv erfolgen. Somit kann auch die Lösung dieser Gleichungen nur subjektiv sein, da sie stets im Kontext der formulierten Anforderungen zu sehen ist.

1.6.2 Der Computer als kreativer Entwerfer?

Eine weitere Frage, die bei der Benutzung einer generativen Software auftritt, ist die nach der Kreativität des Computers. Dazu müsste man natürlich zunächst einmal definieren, was Kreativität überhaupt bedeutet und wie Kreativität erkannt werden kann. Dies alleine ist eine Aufgabe, an der viele gescheitert sind und die hier zu erörtern den Rahmen sprengen würde. Für eine Übersicht der bisherigen Versuche sei die Abhandlung „Über das Erkennen von Kreativität“ von Christiane SPIEL in [Ber03] empfohlen.

Daher soll zunächst diskutiert werden, ob das, was ein Computer entwirft, neu sein kann. Aber was bedeutet „neu“ eigentlich? Dies kann aus verschiedenen Blickwinkeln geschehen. Sollte man „neu“ einfach als in dieser Form noch nicht gesehen definieren, so kann natürlich bei der Verwendung einer generativen Software auf einfache Art und Weise etwas Neues entstehen, da es durchaus denkbar ist, dass geometrische oder andere Parameter auf eine Art und Weise verbunden werden, die genau so noch nie dagewesen sind. Aber vor dem strengen Auge des Menschen als Meister der Abstraktion wird beispielsweise ein Entwurf dessen Außenform ein Rechteck ist, das aber noch nie in genau dieser Seitenlänge gebaut wurde (was nicht sehr wahrscheinlich ist, aber es handelt sich schließlich um ein Beispiel) nicht als „neu“ oder „kreativ“ erkannt wird, obwohl es im Sinne von „noch nie dagewesen“ durchaus so zu definieren wäre.

Um diese schwierige Frage also etwas genauer einzugrenzen, soll sie von zwei Standpunkten aus betrachtet werden. Zunächst kann hierzu die Arbeit Peter WEIBELS betrachtet werden. In seinem Beitrag „Algorithmus und Kreativität“ (in [Ber03]) geht er das Thema von genau dem Punkt an, der auch hier von Interesse ist. Nach der Definition eines Algorithmus als Handlungsanweisung, die nicht auf Computer beschränkt ist, zeigt er, dass beispielsweise Edgar Allen Poe bei der Erschaffung seiner Gedichte ebenfalls einem Algorithmus gefolgt ist. Neben Beispielen aus verschiedenen Kunstrichtungen fordert WEIBEL auch für die Architektur ein „Algorithmendesign als Architektur“, das in seinen Forderungen noch wesentlich weiter geht, als dies hier geschehen soll. Als Beispiel für die Richtung der Entwicklung führt er unter anderem die Arbeit von FRAZER an [Fra95]. Er formuliert jedoch fünf Theoreme zum Thema Innovation und Kreativität, die belegen sollen, dass auch ein Algorithmus Kreatives erzeugen kann. Diese Theoreme sind:

- Innovation entsteht als Folge von Zustandsänderungen.

- Diese Zustandsveränderungen werden durch Algorithmen bewirkt.
- Ein Algorithmus ist nicht nur ein Generator, sondern auch ein Interpretator.
- Auch der Schöpfer selber (z. B. ein Architekt), der die Produkte der Algorithmen interpretiert, ist ein zulässiger Algorithmus.
- Der Determinismus des Algorithmus führt zu einem Indeterminismus.

In diesem Lichte kann auch der Prozess beziehungsweise das Ergebnis der ganzheitlichen Architekturgenerierung als kreativ bezeichnet werden. Zustandsänderungen werden ganz sicher vorliegen, die durch Algorithmen bewirkt werden. Das dritte Theorem trifft in besonderem Maße zu, da die ganzheitliche Architekturgenerierung – und im Allgemeinen Evolutionsalgorithmen – nicht nur Generierung, sondern, vor allem durch Selektion, auch Interpretation bedeutet, wie unten gezeigt wird. Das vierte Theorem ist sicher das entscheidende: Hier gelingt der Sprung vom Mensch zur Maschine, indem auch der Schöpfer des Algorithmus als Algorithmus definiert ist, der auch im Sinne der unter 1.6.1 beschriebenen Sachverhalte subjektiv agiert. Auch das fünfte Theorem trifft zu. Hier formuliert WEIBEL, dass der Determinismus des Algorithmus in Variablen und Vorgehensweise zu einem Indeterminismus des Ergebnisses führen kann, was auch im Falle der ganzheitlichen Architekturgenerierung der Fall ist, da von den Ausgangspunkten und Vorgehensweisen aus nicht auf das Ergebnis einer Generierung geschlossen werden kann. Der Determinismus des hier formulierten Algorithmus führt also zu einem Indeterminismus des Resultats (vgl. dazu auch 2.1). Die Anforderungen WEIBELS an einen kreativen Algorithmus werden also erfüllt.

Der zweite Standpunkt, von dem aus die Frage nach Computer und Kreativität betrachtet werden soll, ist die Systemtheorie. Wenngleich die Systemtheorie äußerst umfangreich und auch nicht einfach zu überblicken ist, sollen hier einige Überlegungen diesbezüglich angestellt werden. Die erste Schwierigkeit in der Betrachtung ergibt sich schon beim Begriff der Systemtheorie, da es *die* Systemtheorie nicht gibt, worauf beispielsweise BAECKER in [Bae05] (S. 17) hinweist. Es gibt vielmehr Systemtheorien beispielsweise der Biologie, der Informatik, der Mathematik, der Pädagogik, der Soziologie oder der Wirtschaftswissenschaften. Schon dies zeigt, dass es den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, alle Implikationen der Systemtheorie zu beachten, es soll aber ein Überblick über die wichtigsten Einflüsse dieser Arbeit betreffend gegeben werden.

Die moderne Systemtheorie geht unter anderem auf Ludwig von BERTALANFFY zurück und ist mehr als ein halbes Jahrhundert alt. Die Systemtheorie ist dabei als Gegenentwurf zur klassischen Physik zu sehen, die darauf basierte, Einzelphänomene isoliert zu betrachten und von den Erkenntnissen, die so gewonnen wurden, auf größere Zusammenhänge oder Systeme zu schließen (vgl. [Bae05], S. 150f). Dieser Weg, auch Reduktionismus genannt, war lange Jahrhunderte der normale Weg wissenschaftlicher Arbeit (siehe [Ric04], S. 6 und S. 25f). BERTALANFFY fand diese Methode für die Biologie jedoch nicht adäquat, da er die Isolierung einzelner Phänomene als unzureichende Vereinfachung der Realität sah, weil diese in ihrer Vernetzung miteinander zu beschreiben seien. Er spricht in diesem Zusammenhang auch von „organisierter Komplexität“, die gegeben ist, wenn Einzelphänomene nicht linear logisch miteinander verknüpft sind (siehe [Sch01], S. 104). Man ist an dieser Stelle also bei einer ganz ähnlichen Betrachtung wie sie bereits in 1.5.2 bezüglich Platons Wagen angestellt wurde.

Die Eigenschaft der Komplexität steht auch in der relativ neuen, aber auf der Systemtheorie beruhenden Theorie komplexer Systeme im Mittelpunkt. Inhaltlich ist sie der ursprünglichen Systemtheorie sehr ähnlich, so formulieren etwa RICHTER und ROST in [Ric04] die Eigenschaften eines komplexen Systems so: „Gerade die Vernetzung vermeintlicher Einzelteile prägt wesentliche Eigenschaften des Gesamtsystems, die mit Hilfe der getrennten Teile entweder nicht erfasst werden oder gar nicht existieren.“ Sie reden hierbei auch von Emergenz, einem Phänomen, das beschreibt, dass das Gesamtsystem Eigenschaften aufweist, die sich nicht offensichtlich auf Eigenschaften der einzelnen Elemente zurückführen lassen.

Ein weiteres wichtiges Merkmal von Systemen ist die Kennzeichnung als geschlossenes oder offenes System. Hierzu wird die Systemgrenze betrachtet, die die Grenze zwischen System und Umwelt definiert. Wird etwas (z. B. Energie oder Signale) über die Systemgrenzen hinweg transportiert, so spricht man von einem offenen System, ansonsten von einem geschlossenen (vgl. [Sch01], S. 102f). Die Systemgrenze ist allerdings nicht immer leicht zu definieren.

Um nun den Bogen zur Architektur zu schlagen, muss zunächst festgestellt werden, dass auch ein Gebäude, also „ein Stück Architektur“, ein System darstellt. Doch ist ein Gebäude an sich bereits ein komplexes System, oder nur ein kompliziertes? RICHTER und ROST unterscheiden in [Ric04] zwischen kompliziert und komplex dahingehend, dass ein kompliziertes

System lediglich schwierig zu überblicken ist, dessen Analyse aber eine Zerlegung in Unter-einheiten erlaubt, ein komplexes jedoch die oben aufgeführten Eigenschaften zeigt. In diesem Sinne ist ein „normales“ Gebäude wohl eher ein – mehr oder weniger – kompliziertes System. Auch RICHTERS Argumentation in seiner Abhandlung „Architektur-Algorithmen und Urbanismus“ in [DeP07] geht in die Richtung, bisherige Architektur im Wesentlichen nicht als komplexes System aufzufassen, sondern maximal als Maschinen, die die Funktion von Sinnesorganen nachbilden, wie etwa durch automatische Steuerung von Jalousien. Dem entgegenhalten kann man vielleicht, dass sich, zumindest auf psychologischer Ebene, die Eigenschaften eines Gebäudes (z. B. erhebend, beeindruckend, behütend) nicht unbedingt auf die Eigenschaften einzelner Elemente wie einer Wand reduzieren lassen, was auf ein emergentes Verhalten hinweist. Im Allgemeinen sollte hier aber eher davon ausgegangen werden, dass ein „normales“ Gebäude kein komplexes System darstellt.

RICHTER fordert aber auch Gebäude als dynamische, komplexe und adaptive Systeme, also als Gebilde, die im systemischen Sinne auf ihre Umwelt reagieren. Abgesehen davon, dass die Notwendigkeit eines solchen Gebäudes zumindest diskutiert werden kann, soll diese Frage hier nicht Schwerpunkt sein. Hier interessiert vielmehr das Entwerfen eines Gebäudes, also der kreative Prozess, der zu einem Gebäude führt. Dieser Entwurfsvorgang kann sehr wohl ein komplexes System sein. Auch beim Entwurfsprozess gilt es, zahlreiche Parameter, die sowohl Elemente des Systems als auch Umweltbedingungen sein können, zu berücksichtigen. In diesem Sinne ist auch wiederum der Einsatz eines evolutionären Algorithmus zu sehen, der in seiner Anlage geeignet ist, die Regeln für ein solches System zu beinhalten. Es kann also festgehalten werden, dass das hier vorgeschlagene System der ganzheitlichen Architekturgenerierung zumindest potenziell Kreativität in dem Sinne hervorbringt, dass das Ergebnis des Entwurfsprozesses „neu“ ist, das also dergestalt ist, dass es in seinen Eigenschaften über die Summe seiner Einzelteile hinausgeht. Ob dies in der Praxis zum jetzigen Zeitpunkt bereits möglich beziehungsweise analysierbar ist, kann hier nicht weiterverfolgt werden, zumal die Analyse von Gesetzmäßigkeiten in komplexen Systemen äußerst schwierig ist und bisher nur für sehr einfache Systeme gelungen ist. So kann aber trotzdem festgehalten werden, dass sich der Einsatz eines Computers im Entwurfsprozess und Kreativität an sich nicht widersprechen oder gegenseitig ausschließen.

Ein Kennzeichen von Systemen im Rahmen der Systemtheorie ist die Tatsache, dass die Elemente ein sogenanntes „Fließgleichgewicht“ erlangen (siehe [Sch05], S. 72ff). Das bedeutet, dass ein System unter bestimmten Parametern einen ausgeglichenen Zustand erlangt, der sich erst durch Veränderung von zum Beispiel Umweltfaktoren ändert. Ein System kann also ein Gleichgewicht erlangen, nicht jedoch im oben erläuterten Sinne optimiert werden. Hier ergibt sich also zunächst ein Widerspruch zum Ziel eines optimierten Entwerfens und zum Einsatz eines evolutionären Algorithmus als Optimierungsalgorithmus.

Hinzu kommt, dass es zumindest umstritten ist, die Evolution als Optimierung zu bezeichnen. Sie wird häufig, vor allem in der Biologie, nicht als solche verstanden. WILLKE weist etwa darauf hin, dass die Evolution sich eher als „ein wechselseitiger Steigerungsprozeß von Systemen-in-Umwelten verstehen“ lässt und damit vor allem emergentes Verhalten zeigt, das nicht zwangsläufig als Optimierung zu verstehen ist (siehe [Wil91], S. 98f und [Kri96], S. 31f).

In der Informatik werden evolutionäre Algorithmen jedoch als Ansatz zur Lösung von Optimierungsproblemen bezeichnet (siehe beispielsweise [Ger04] und [Sch92]). Evolution und auch ein evolutionärer Algorithmus bedeutet hier eine Anpassung an gegebene Umweltfaktoren. Diese sind hier bestimmte zu definierende Parameter. Durch den Fortschritt des Algorithmus findet also eine Anpassung an diese Parameter statt, die einer oder mehreren mathematischen Gleichungen entsprechen. In diesem Sinne findet dann auch eine Optimierung bezogen auf diese Gleichungen statt, wenngleich es Zufall wäre, wenn eine Optimierung im Sinne des Aufsuchens des *kleinsten* Wertes der Funktion stattfinden würde. In der Regel findet ein Aufsuchen eines *kleinen* Wertes statt, so dass die oben formulierte Definition der Optimierung für diese Arbeit dahingehend korrigiert werden muss. Auch die Evolution kann als System betrachtet werden, das ein Fließgleichgewicht bezogen auf die Umweltfaktoren erlangt. Es ist eine Frage der Auswahl und Gestaltung dieser Umweltfaktoren, wie dieses Fließgleichgewicht aussieht. Der Unterschied zwischen Evolution und evolutionärem Algorithmus besteht darin, dass für den Algorithmus zu einem bestimmten Punkt ein Abbruchkriterium erreicht wird, etwa dann, wenn die Elemente des Systems einen Punkt erreicht haben, der bezogen auf die formulierten Parameter in der Praxis gut genug ist. Schon das Finden eines kleinen beziehungsweise guten Wertes ist aber ein Erfolg bezogen auf das Problem und ein guter Wert wird sich im Praxisvergleich bewähren und bezogen auf die definier-

ten Parameter wahrscheinlich sogar bessere Ergebnisse liefern, als dies ein herkömmlicher Entwurf könnte.

1.7 Ziele der Arbeit

Nachdem nun die oben aufgeführten Rahmenbedingungen abgesteckt sind, sollen die Ziele der Arbeit, die größtenteils schon angedeutet wurden, formuliert werden. Ausgangspunkt ist dabei der unter 1.1 definierte Mangelzustand, der vor allem im Sektor des Einfamilienhausbaus darin besteht, dass eine insgesamt schlechte Qualität des Gebauten vorzufinden ist. Große Flächen werden von mehr oder weniger schlechten Neubaugebieten verzehrt.

Wie in 1.2 gezeigt wurde, ist der Architekt, der an dieser Stelle eigentlich gefordert wäre, nicht in der Lage, diesen Mangel zu beseitigen. Dies liegt vor allem daran, dass er in der Planung vieler Eigenheime keine Rolle mehr spielt. Dies wiederum ist vor allem auf die oben gezeigten politischen und daraus resultierenden wirtschaftlichen Gründe zurückzuführen. Durch das strukturierte Vorgehen eines Architekten entstehen Planungskosten, die im Bereich des Baus von Einfamilienhäusern nur schwer zu decken sind, die für eine gute und fundierte Planung nötig sind. Durch die ablaufbedingten und gesetzlichen Rahmenbedingungen, vor allem der HOAI, ist es momentan nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich, die Planung des Architekten kosteneffizienter zu gestalten. Eine Änderung der Lage ist nicht in Sicht.

Ein weiterer wichtiger Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass der umfassende und hilfreiche Einsatz des Computers in der Planung, abgesehen von schlichten CAD-Programmen, wie in 1.2 und 1.3 gezeigt, quasi nicht stattfindet. Auch viele Forschungsansätze beschränken sich auf einzelne Aspekte der Planungsverbesserung, was im Sinne einer vollständigen Durcharbeitung natürlich nachvollziehbar ist. Es erfolgt ebenso im realen Einsatz des Computers in der Architektur oft eine Einschränkung auf einfach quantifizierbare Aspekte. Eine Annäherung an subjektivere Parameter, wie Form oder Grundriss erfolgt zumeist über Baukastenprinzipien, direkte Verarbeitung von Umweltfaktoren auf die Form (siehe z. B. Greg Lynn in [Lyn99], S. 102ff.) oder über Symmetrien. Allen bisherigen Systemen ist gemein, dass, wenn überhaupt, ein Gesamtentwurf nur durch die Addition vieler Einzelschritte zustande kommt.

Die ganzheitliche Architekturgenerierung positioniert sich hier anders, nämlich als Synthese der bestehenden Ansätze und hat es zum Ziel, möglichst den gesamten Planungsprozess einer optimierten rechnergestützten Planung zuzuführen. Im Rahmen der oben formulierten

Umstände und Einschränkungen ist es das Ziel, einen fundierten und optimierten Entwurf automatisch entstehen zu lassen, ohne dass der Architekt beim eigentlichen Optimierungsprozess eingreifen müsste. Auf diese Weise kann nicht nur das entstehende Gebäude, sondern auch der Entwurfsprozess an sich optimiert werden. Dabei ist es nicht das Ziel, den Architekten zu ersetzen. Es werden ihm vielmehr Zwänge und Beschränkungen genommen, denen er bisher unterliegt. Es entsteht dabei keine „Computerarchitektur“, es soll vielmehr die Handschrift des Architekten in den automatisierten Planungsprozess überführt werden. Durch eine so geartete Optimierung kann er kosteneffizient planen und versuchen, durch eine Verkürzung des „Planungsweges“ bereits verlorene Aufgabenfelder zurückzugewinnen. Dabei wird auch berücksichtigt, dass es möglich sein soll, die bisher relativ isoliert vonstattengehende Arbeit von Fachplanern und -ingenieuren weiter in den Arbeitsprozess zu integrieren.

Die ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware soll aber auch eine Software für den Endnutzer sein. Das Hintergrundwissen der Software muss dabei so groß sein, dass ein völlig ahnungsloser Endnutzer zu guten Ergebnissen kommt. Ein Ziel ist es, auch so eine minimale architektonische Qualität zu erzielen, die, wie gezeigt, in der momentanen architektonischen Realität nicht unbedingt vorhanden ist.

Bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung handelt es sich im Prinzip um eine wie unter 2.4 beschriebene Mehrkriterienoptimierung hoher Komplexität. Sie bietet eine Strategie, die in der Lage ist, möglichst alle bei einem Entwurf auftretenden Parameter zu vereinheitlichen und parallel zu verarbeiten. Oder zusammenfassend: **Die ganzheitliche Architekturgenerierung beschreibt den Vorgang, einen architektonischen Entwurf zu erstellen, alle einflussenden Faktoren durch Kategorisierung, Parametrisierung und mathematische Quantifizierbarkeit zu erfassen, zu verarbeiten, den Entwurf zu optimieren und die Ergebnisse auszugeben.**¹

Eine solch breit angelegte Arbeit kann manches entstehende Aufgabenfeld nur tangieren, es wird aber gezeigt, dass die ganzheitliche Architekturgenerierung befähigt ist, die gestellte

¹ Der erste Entwurf zu einer ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware entstand 2003 in dem Hauptstudiumsentwurf „paperless“ am Institut für Darstellen und Gestalten der Universität Stuttgart durch mich und weitere Kommilitonen. Der damalige Entwurf würde aber den heutigen Kriterien einer ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware nicht mehr genügen, da dort beispielsweise seriell und nicht parallel gearbeitet wurde und keine Mehrkriterienoptimierung im eigentlichen Sinne verwendet wurde.

Aufgabe zu bewältigen. Der Computer ist dabei in Wirklichkeit kein Entwerfer, sondern Ausdruck des Entwerfenden (des Entwicklers und des Nutzers). Dass Computer unter den gegebenen Umständen zumindest prinzipiell in der Lage sind, unter den in 1.6 genannten Rahmenbedingungen Kreatives und Neuartiges hervorzubringen, erhöht das Potential des vorliegenden Ansatzes und rechtfertigt den Einsatz des Computers weiter.

1.7.1 Struktur der Arbeit

Die ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware hat die klassischen Grundzüge von Software im Allgemeinen: Es erfolgt zunächst als Input eine Eingabe von Bedingungen (z. B. Grundstücksgeometrie), danach eine Verarbeitung der Daten und schließlich ergibt sich daraus ein Output in Form verschiedener Möglichkeiten der Ausgabe und Darstellung der Ergebnisse und auch des Rückflusses in den Optimierungsvorgang. Diese Struktur ist in Abbildung 3 zu sehen.

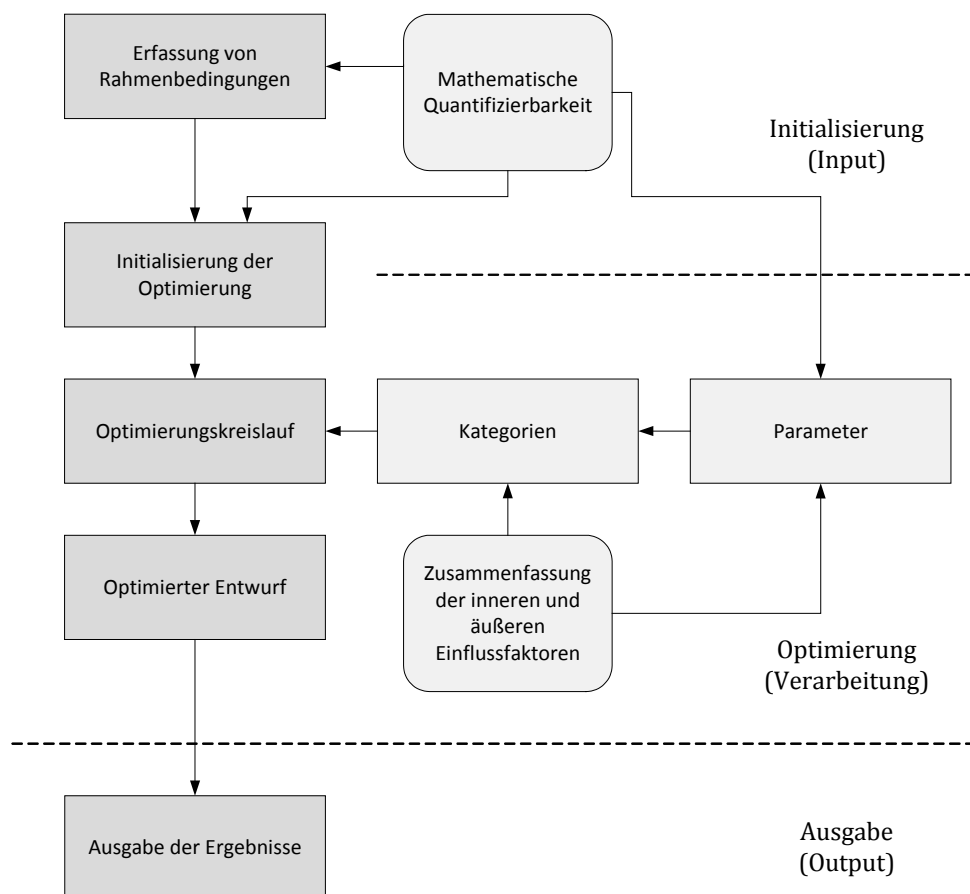


Abbildung 3: Strukturdiagramm der ganzheitlichen Architekturgenerierung

Die vorliegende Arbeit wird sich dabei hauptsächlich mit dem zweiten Teil des Prozesses, also der Datenverarbeitung in Form einer Optimierung beschäftigen. Es ergeben sich also folgende Teilbereiche:

- Input
 - Erfassung von Rahmenbedingungen
 - Mathematische Quantifizierbarkeit der Rahmenbedingung
 - Entwurf eines Softwaremodells zur Erfassung architektonischer Entwürfe
 - Die Erstellung eines architektonischen Entwurfs (Initialisierung)
- Verarbeitung (Optimierung)
 - Festlegung von Einflusskategorien
 - Erfassung von Parametern
 - Mathematische Quantifizierbarkeit der Parameter
 - Verarbeitung von Parametern
 - Entwurf und Umsetzung eines Optimierungsalgorithmus
 - Steuerung der Optimierung
 - Rückfluss der Erkenntnisse in die Initialisierung
- Output
 - Ausgabe und Weiterverarbeitung der Ergebnisse
 - Bewertung der Ergebnisse
 - Eventueller Rückfluss in die Optimierung

Die vorliegende Struktur ist der Rahmen für die Kapitel 3, 4 und 5. Dort werden die entsprechenden Unterpunkte, die Steuerungsmöglichkeiten der Optimierung und in welcher Form diese einer erneuten Optimierung zugeführt werden können, gezeigt. Schließlich wird unter anderem anhand der Ergebnisse der Optimierung reflektiert, was die ganzheitliche Architekturgenerierung leisten kann und was momentan noch nicht möglich ist. Ansatzpunkte für eine weitere Forschung und Bearbeitung werden aufgezeigt.

1.8 Einschränkende Parameter des Ansatzes

Eine potentielle Einschränkung in der Praxis ist mangelnde Kreativität der Ergebnisse der Software. Da für den völlig unerfahrenen Benutzer, der ja auch zur potentiellen Zielgruppe gehört, erfahrungsgemäß gute Ausgangskonfigurationen gewählt werden müssen, von de-

nen man weiß, dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem befriedigenden Ergebnis führen, besteht die Gefahr einer ähnlichen Tendenz wie sie bei Fertighäusern zu beobachten ist, nämlich die Wiederholung der immer gleichen Elemente, sozusagen eine Festigung dessen, was sich der Durchschnittsbenutzer unter einem Einfamilienhaus vorstellt. Man könnte auch sagen, eine immerwährende Wiederholung architektonischer Klischees eines Einfamilienhauses. Gestützt wird diese Tendenz unter Umständen noch dadurch, dass der Benutzer am Ende der Optimierung die Möglichkeit erhält, das Geplante zu bewerten und einer erneuten Optimierung zuzuführen. Dies kann natürlich dazu führen, dass genau dieser Trend der Wiederholung von Bekanntem gefestigt wird. Um dieser Gefahr zu begegnen, können aber verschiedene Strategien ins Feld geführt werden.

Zum Ersten führt die Benutzung von guten „Architektenprofilen“, wie später gezeigt wird, dazu, dass nur solche Entwürfe als gut befunden und somit dem Endnutzer angeboten werden, die einer Mindestqualität entsprechen. Dies bedeutet, dass der Endnutzer potentiell viel mehr als früher die Möglichkeit erhält, am Entwurf zu partizipieren, ohne deshalb auf architektonische Qualität verzichten zu müssen. Zum Zweiten kann festgestellt werden, dass der spätere Benutzer eines Hauses immer die Dinge besetzt, die der Architekt nicht bedacht hat. Ein kleines Beispiel hierfür wäre die Tatsache, dass es nicht überraschen kann, beim Einfamilienhaus einen „Jägerzaun“ anzutreffen, wenn der Architekt keine Lösung für die Grundstücksabgrenzung angeboten hat. Der spätere Nutzer wird sich also oft am Durchschnitt, vielleicht am Nachbarn, orientieren. Dies gilt für viele andere Details eines Entwurfes, nicht nur beim Einfamilienhaus, analog. Hier bietet die ganzheitliche Architekturgenerierung auch neue Chancen, da sie befähigt ist, möglichst alle diese Faktoren zu berücksichtigen, die ein Architekt, wohl auch aus Zeitmangel, nicht berücksichtigen kann oder will. So kann im Ergebnis ein „vollständigerer“ Entwurf entstehen, als dies allgemein üblich ist. Es besteht somit keine Gefahr eines „Vergessens“ von Aspekten. Dies betrifft natürlich nicht nur den Entwurfsprozess, sondern auch die Verfügbarkeit des Gebäudes in Zukunft. Der Entwurf von heute wird auch in Jahrzehnten noch als Bestand von morgen digital vorliegen, was nicht nur Vorteile bei der technischen Verwaltung oder dem Umbau von Gebäuden mit sich bringt, sondern auch ein zukünftiges „digitales Zurückgehen“ zu den Entwurfsausgangspunkten erlaubt. Hier kann durchaus Potential im zukünftigen Umgang mit Bestandsbauaufgaben liegen.

Das Thema der Ganzheitlichkeit als solche muss in diesem Zusammenhang auch betrachtet werden. Natürlich kann man über keine Software sagen, sie berücksichtige alle Faktoren, die auf einen architektonischen Entwurf einwirken können. Der Ansatz der Ganzheitlichkeit versteht sich jedoch vor allem in Abgrenzung zu den meisten bisherigen Ansätzen, wie oben gezeigt wurde. Es gibt viele Ansätze, die einzelne Aspekte eines architektonischen Entwurfes optimieren oder vereinfachen. Die ganzheitliche Architekturgenerierung steht hierzu nicht im Widerspruch, da es sich vielmehr um einen Ansatz handelt, diese Ansätze zu vereinen.

Im Zeitalter der Spezialisierung des Wissens und der Fachkräfte ist dies natürlich zunächst ein gewagter Ansatz, der sich aber auf den zweiten Blick erschließt: Das Ziel ganzheitlicher Architekturgenerierung ist es nicht, dass alle Aspekte eines Entwurfes durch einen einzelnen Entwickler gelöst werden, sondern vielmehr, Fachkräften die Möglichkeit zu geben, ihre Erkenntnisse auf ganzheitliche Art und Weise in den Entwurf einfließen zu lassen. In diesem Sinne sind die hier vorgeschlagenen Lösungen für Teilaspekte eines Entwurfes zu verstehen. Sie sind erste Lösungen zum Aufzeigen der Möglichkeiten eines solchen Ansatzes, der durch weitere Forschung vertieft werden sollte.

Ein Beispiel hierfür ist der Umgang mit dem Thema Energieverbrauch. Wie später gezeigt werden wird, wird in diesem Rahmen vorgeschlagen, den Energieverbrauch auf Basis der Energieeinsparverordnung (EnEV) zu ermitteln und diese Ergebnisse in die Optimierung einfließen zu lassen. Dies ist aus zweierlei Grund ein legitimer Ansatz: Zum Einen wird auf diese Weise sichergestellt, dass der Entwurf den gesetzlichen Vorgaben bezüglich des Energieverbrauchs entspricht, zum Anderen ist die Regelung der EnEV nicht aus der Luft gegriffen, sondern sie ist die Quintessenz jahrzehntelanger Arbeit von Fachleuten (siehe [Heg02], S. 17ff). Nun kann natürlich behauptet werden, dass ein Gesetz immer ein Kompromiss ist, der alle Eventualitäten pauschal abhandelt und man wird damit sicher nicht immer unrecht haben. Es wäre aber genauso verkürzend, zu behaupten, dass die EnEV ungeeignet sei, hier eingesetzt zu werden. Im Rahmen dieser Arbeit – aus architektonischer Sicht und nicht aus Sicht eines Bauphysikers – ist es also völlig legitim, die Anhaltspunkte, die die EnEV dem Architekten an die Hand gibt, auch zu nutzen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Berechnung des Energieverbrauchs im Kontext der ganzheitlichen Architekturgenerierung einzig auf diese Art und Weise erfolgen muss oder sollte. Im Gegenteil: Die EnEV hat sicher auch enorme Nachteile, da sie eine Pauschalierung verschiedenster Faktoren darstellt, die sich auf die Energie-

bilanz eines Gebäudes auswirken. Die ganzheitliche Architekturgenerierung lässt es vielmehr explizit offen, diesen Teilbereich durch eine kompetentere Arbeit eines Bauphysikers zu ersetzen, egal ob es sich hierbei um eine Berechnung im klassischen Sinne oder aber um eine Simulation handelt. Analoges gilt für alle Teilbereiche: Die ganzheitliche Architekturgenerierung ist der Rahmen zur Einarbeitung hochspezialisierter Fachkompetenz und hierin liegt auch der grundsätzliche Unterschied zu Vorhandenem, nämlich die Offenheit für alle Erkenntnisse und nicht die Beschränkung auf einzelne Teilbereiche.

Ein ganz ähnlicher, momentan einschränkender Faktor der ganzheitlichen Architekturgenerierung ist der prinzipielle Umgang mit gesetzlichen Vorschriften. Neben der EnEV gibt es natürlich zahlreiche Bauvorschriften, die durch die Software eingehalten werden müssen. Diese Stärke ist aber natürlich auch eine Schwäche. In der Praxis ergeben sich oftmals Umstände, die in Verhandlungen zum Beispiel mit Bauaufsichtsbehörden dazu führen, dass solche Vorgaben für ein spezielles Bauvorhaben gelockert werden können. Diese Möglichkeit bietet die Software (noch) nicht. Hier sind gesetzliche Vorgaben momentan mathematische Randbedingungen, die eingehalten werden müssen. Eine intelligente Hinterfragung dieser Vorschriften, wie sie einem Architekten möglich ist, findet nicht statt. Schon im Vorfeld kann man in diesem Sinne feststellen, dass hier noch Optimierungspotential ist. Momentan wird es bei der Deutung von Vorschriften zu keinem kreativen Verhalten kommen, die Vorschriften werden vielmehr einfach eingehalten, was in einem gewissen Grade natürlich einer Pauschalisierung von Faktoren gleichkommt.

2 Der optimale Entwurf und seine Berechenbarkeit

Die Frage, was ein guter Entwurf ist, wurde oft diskutiert und soll hier keinesfalls nachvollzogen werden. Dennoch kann man sich auf bestimmte Grundvoraussetzungen einigen, die erfüllt sein müssen, damit man von guter Architektur sprechen kann. Doch objektive Parameter zu finden ist nicht leicht und oft auch gesellschaftlichen Strömungen unterworfen. Ein Beispiel hierfür ist die Frage nach den Nutzerbedürfnissen. Die meisten zeitgenössischen Architekten werden auf Nachfrage mit Sicherheit einräumen, dass es Teil guter Architektur ist, diese zu erfüllen. Doch schon bei der Ermittlung der Nutzerbedürfnisse tun sich Schwierigkeiten auf. Kann man sicher sein, dass jeder Nutzer, vor allem als Laie, weiß, was er braucht?

Le Corbusier spricht beispielsweise noch davon, dass es die Aufgabe von Architekten sei, „die pulsierenden Kräfte breiter Massen zusammenzufassen und ihnen eine Richtung zu geben. Diese Richtung heißt einmal Stil unserer Zeit.“ [Rot27] Das Nutzerbedürfnis ist hier eher als ein kollektives Bedürfnis zu verstehen, das natürlich den Anforderungen der jeweiligen Zeit entspricht, damals die Verbesserung der Wohnsituation breiter Massen oder das grundsätzliche Schaffen ausreichenden Wohnraums, was sich beispielsweise an seiner *Unité d'habitation* ablesen lässt.

Unsere heutige, in hohem Maße individualisierte Gesellschaft stellt andere Ansprüche. Durch die Deckung des Grundbedarfs, nicht nur beim Wohnraum, entstand ein Streben nach Abgrenzung und Individualität, das sich auch im Bauen zeigt, wenngleich diese Tendenzen sicher vor einigen Jahren ihren Höhepunkt überschritten haben. Obwohl der oftmals durch wirtschaftliche Zwänge oktroyierte Uniformismus des Bauens nach wie vor vorhanden ist – man schaue sich nur ein durchschnittliches Neubaugebiet an – ist doch auch der Bedarf nach Abgrenzung groß. Eine Strömung, die jedoch nicht in allen Gesellschaften auszumachen ist. Diese Betrachtung soll am Beispiel der Ermittlung von Nutzerbedürfnissen zeigen, dass Gebautes nicht nur „für sich“ beurteilt werden kann, sondern stets im Kontext gesehen werden muss. Welche Schlüsse müssen daraus für die vorliegende Arbeit gezogen werden?

Wenn in der vorliegenden Arbeit vom optimalen Entwurf die Rede ist, so ist damit wie in 1.5.1 der im wahren Sinne des Wortes optimale Entwurf in mathematischem Sinn gemeint. Es müssen also eine Gleichung beziehungsweise ein Algorithmus und ein Datenmodell ent-

stehen, die befähigt sind, alle Faktoren eines Entwurfs zu parametrisieren und sie in Form von Bedingungen und Nebenbedingungen in die Berechnung einfließen zu lassen. Bevor auf die genaue Umsetzung einer ganzheitlichen Architekturgenerierung eingegangen werden kann, müssen daher zunächst einige weitere vorauszusetzende Grundbegriffe der Informatik erklärt und für diese Arbeit definiert werden.

2.1 Der Algorithmus als Handlungsanweisung

Wie beschrieben, soll diese Arbeit einen Ansatz aufzeigen, architektonische Entwürfe durch Computer erstellen zu lassen. Die Vorgehensweise hierzu ist es, den Rechner mit Handlungsanweisungen zur Lösung des Problems zu versorgen. Dies ist ein Algorithmus. Für die Informatik beschrieben, spricht SEDGEWICK von einem „Verfahren zur Lösung eines Problems, das zuvor entwickelt worden ist“ [Sed02]. Ein Algorithmus ist dabei zunächst keineswegs auf die Informatik oder sogar auf den Einsatz mit Computern beschränkt. Es handelt sich dabei lediglich um eine Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems in endlich vielen Schritten. So ist zum Beispiel das Zubereiten einer Mahlzeit nach einem Kochbuch, also die Befolgung der Handlungsvorschriften des Rezeptes eindeutig ein Algorithmus.

Da es sich hierbei um keine mathematisch genaue Beschreibung des Begriffes eines Algorithmus handelt, haben sich einige Mathematiker mit einer theoretischen Beschreibung des Begriffes des Algorithmus befasst, so zum Beispiel MARKOV, CHOMSKY oder TURING. Diese sehr formale Definitionen eines Algorithmus würden den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen (für eine Übersicht über die Belange der theoretischen Informatik siehe [Erk00]). Es wurden dort jedoch auch zahlreiche Eigenschaften eines Algorithmus formuliert, die auch auf den hier zu entwickelnden Algorithmus zutreffen müssen. Einige davon sind:

- **Finitheit:** Das Verfahren muss in einem endlichen Text eindeutig beschreibbar sein.
- **Ausführbarkeit:** Jeder Schritt des Verfahrens muss tatsächlich ausführbar sein.
- **Dynamische Finitheit:** Das Verfahren darf zu jedem Zeitpunkt nur endlich viel Speicherplatz benötigen.
- **Terminierung:** Das Verfahren darf nur endlich viele Schritte benötigen.

In praktischer Hinsicht wird die Definition eines Algorithmus meist auf zwei Eigenschaften beschränkt:

- **Determiniertheit:** Der Algorithmus muss bei denselben Voraussetzungen das gleiche Ergebnis liefern.
- **Determinismus:** Die nächste anzuwendende Regel im Verfahren ist zu jedem Zeitpunkt eindeutig definiert.

Für eine genaue Übersicht der Begriffe seien beispielsweise HORN et al. oder POMBERGER (in [Hor03], S. 183f und [Pom08], S. 32ff) empfohlen.

MENZEL beschreibt die gemeinsamen Eigenschaften eines Algorithmus etwas pragmatischer, geht jedoch prinzipiell von den gleichen Voraussetzungen aus: „Als Algorithmus lässt sich jede praktische Möglichkeit auffassen, ein allgemeines Problem für jeden Einzelfall durch die schrittweise Anwendung einer Lösungsvorschrift mit einem konkreten Ergebnis zu lösen.“ [Men05] Er weist darauf hin, dass dieser sehr intuitive Begriff des Algorithmus für die Lösung praktischer Probleme ausreichend ist und eine genauere mathematische Definition erst vonnöten ist, um zu zeigen, dass bestimmte Probleme *nicht* durch einen Algorithmus zu lösen sind, wie dies beispielsweise GÖDEL getan hat (siehe zum Beispiel [Hof91]).

Die Annahme von MENZEL gilt sicher auch für die hier beschriebene Handlungsanweisung zur Erstellung von architektonischen Entwürfen. Trotzdem soll kurz auf die Eigenschaften des hier zu beschreibenden Algorithmus im Hinblick auf die oben formulierten Definitionen eingegangen werden, da der Lösungsvorschlag zwar alle Forderungen prinzipiell erfüllt, dies aber unter spezifischen Umständen tut und daher als besonderer Algorithmus klassifiziert werden muss.

In Bezug auf die Forderungen nach Finitheit, Ausführbarkeit, dynamischer Finitheit und Terminierung ist der Algorithmus sicher nicht besonders, da die praktische Umsetzung an sich zeigen wird, dass alle diese Forderungen erfüllt werden können.

In Bezug auf die Determiniertheit ergibt sich jedoch die erste Pseudobesonderheit: Der Algorithmus wird mit denselben äußeren Voraussetzungen nicht immer die gleiche Lösung ergeben. Wie später gezeigt werden wird, gehört das Problem eines architektonischen Entwurfes zur Klasse der NP-vollständigen Probleme, die sich nicht in polynomieller Zeit lösen lassen. Daher wird ein Algorithmus verwendet werden, der nicht unbedingt das wirkliche globale Optimum einer Funktion findet, dafür aber in kurzer Zeit eine Lösung, die knapp unter dem Optimum liegt. Die Menge der knapp unter dem Optimum liegenden Lösungen geht theore-

tisch gegen unendlich, daher kann die bei gleichen äußeren Parametern errechnete Lösung bei zwei Läufen des Programms unterschiedlich ausfallen.

Es handelt sich hierbei jedoch um eine *Pseudobesonderheit*, da lediglich die äußeren Parameter gleich sind. Die Varianz der Lösungen wird unter anderem durch zufällige Entscheidungen an vielen Stellen des Algorithmus geschaffen. Dieser Zufall sorgt für eine phänotypische Undeterminiertheit des Algorithmus. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle zufälligen Entscheidungen während eines Programmablaufes in einem zweiten Programmablauf wieder genauso getroffen werden, geht gegen Null. Sollte dieser Fall aber eintreten und damit alle inneren und äußeren Parameter gleich sein, so ergibt der Algorithmus auch die gleiche Lösung. Die formale Bedingung der Determiniertheit ist also gegeben, auch wenn dies offenbar zunächst nicht der Fall zu sein scheint.

Eine ähnliche Pseudobesonderheit ergibt sich in der Forderung nach Determinismus: An jedem Punkt des Verfahrens soll der nächste Schritt eindeutig sein. Auch hier ergibt sich eine Differenz zwischen Erscheinungsbild und inneren Zusammenhängen. Der konkrete Weg des Programmablaufs ist nicht determiniert, er wird an zahlreichen Weichen durch eine zufällige Entscheidung gewählt. Daher scheint es zunächst so zu sein, als könne man nicht an jeder Stelle des Algorithmus sagen, welches der nächste Schritt ist. Die Menge der Wahlmöglichkeiten ist jedoch begrenzt und durch eine vom Rechner bestimmte Zufallszahl abhängig. In diesem Sinne ist die Forderung nach Determinismus erfüllt, da der Rechner an jeder Stelle x des Verfahrens eindeutig weiß, welches der nächste Schritt ist, auch wenn dies für den bedienenden Menschen im Voraus nicht möglich ist. Diese Algorithmen werden auch als stochastische Algorithmen bezeichnet (siehe [Hor03], S. 184).

2.2 Die Komplexität eines Problems

Zum Verständnis des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Lösungsweges zur Erstellung architektonischer Entwürfe muss noch eine weitere Eigenschaft des Problems geklärt werden: die Komplexität. Die Komplexitätstheorie ist ein Bereich der theoretischen Informatik, der sich zum Beispiel mit der benötigten Rechenzeit eines Algorithmus befasst und Probleme in Komplexitätsklassen unterteilt. Obwohl dieser Bereich der Informatik sehr theoretisch und formal ist und hier keineswegs erschöpfend dargelegt werden kann, sollen hier einige Grundannahmen dargelegt werden, die sich auf die Komplexitätstheorie stützen und geeig-

net sind, auch für das vorliegende Problem einen Komplexitätsgrad zu bestimmen (für eine Übersicht über Komplexität siehe [Erk00], S. 387ff).

Obwohl natürlich auch Betrachtungen zum benötigten Speicherbedarf zur Lösung eines Problems interessant sind, soll hier ausschließlich die benötigte Rechenzeit betrachtet werden. Dabei wird keinesfalls ein absoluter Wert ermittelt, da dieser von der benutzten Hardware und der konkreten Größe der Datenmenge abhängt. Es wird vielmehr eine Abschätzung der Rechenzeit durch die Menge der benötigten Rechenschritte als *Worst-Case-Szenario* unter Annahme einer sehr großen Datenmenge erfolgen. Die tatsächliche Rechenleistung ist in diesem Zusammenhang eher uninteressant, da es, wie gleich gezeigt wird, Probleme gibt, deren erschöpfende Lösung selbst mit Rechnern, die eine milliardenfache Rechenleistung im Vergleich zu heutigen Modellen haben, nicht in vernünftiger Zeit möglich wäre. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen wird die *O*-Notation verwendet (siehe [Erk00], S. 387). *O* ist dabei ein sogenanntes Landau-Symbol, das verwendet wird, um das asymptotische Verhalten – also das Verhalten für Werte n , die gegen unendlich gehen – einer Funktion zu beschreiben. So bedeutet beispielsweise $f \in O(n)$, dass f höchstens so schnell wächst, wie die Anzahl n der betrachteten Werte. Es handelt sich also um ein lineares Wachstum.

2.2.1 Die Komplexitätsklassen

Die, zumindest für diese Betrachtung, wichtigsten Komplexitätsklassen sind *P* und *NP*. Hier werden Probleme entsprechend ihrer Komplexität zusammengefasst. Diese Klassen beschreiben den maximalen Aufwand der Lösung eines Problems mit der variablen Größe n .

Die Klasse P

Die Klasse *P* bezeichnet alle Probleme, deren Lösungsalgorithmus höchstens polynomial mit der Größe der Eingabe wächst, so dass ein Polynom $p(n)$ existiert, das garantiert, dass das Problem höchstens einen Rechenaufwand von $O(p(n))$ hat [Ger04]. Die Probleme der Klasse *P* werden allgemein als praktisch handhabbar angesehen, da sich polynomiales Wachstum im Vergleich zum exponentiellen Wachstum sehr moderat verhält.

Die Klasse NP

Die Klasse *NP* bezeichnet die Probleme, für die es einen nicht-deterministischen Algorithmus gibt, der das Problem in polynomialer Zeit lösen kann. Es handelt sich dabei um eine theore-

tische Betrachtung, da ein nicht-deterministischer Algorithmus in der Lage sein müsste, an Verzweigungen automatisch den besten Weg zu wählen. Der Algorithmus bzw. die Maschine müsste also intelligent sein. Da dies (noch) nicht möglich ist, müssten also alle Wege begangen werden, um danach den besten auszuwählen. Unter Berücksichtigung der Möglichkeit rekursiver Aufrufe ergibt sich für deterministische Algorithmen ein mit der Problemgröße n exponentiell wachsender Rechenaufwand.

Obwohl diese Betrachtung natürlich sehr theoretischer Natur ist, hat sie einige Implikationen auf die Lösung des Problems eines architektonischen Entwurfes, da gezeigt werden soll, dass es sich bei diesem Problem ebenfalls um ein Problem der Klasse NP handelt. Diese Probleme werden NP-vollständig genannt. Im Allgemeinen wird ein Problem als NP-vollständig anerkannt, wenn es sich auf ein bekanntes NP-vollständiges Problem zurückführen lässt [Sed02]. Da es sich bei dieser Arbeit um keinen Beitrag zur theoretischen Informatik handelt, soll dieser Beweis sehr einfach und anschaulich gehalten werden. Hierzu werden zunächst klassische Probleme der Klassen P bzw. NP vorgestellt, danach soll gezeigt werden, dass sich Teilprobleme des architektonischen Entwurfs auf diese Probleme zurückführen lassen.

2.2.2 Beispiel P: Der Vergleich von Werten

Zur Klasse P gehört beispielsweise das Problem des Vergleichs von Werten aus einer Liste. Neben der Suche nach gleichen Werten wie in GERDES et al. gehört dazu auch die Suche nach beispielsweise dem kleinsten Wert. Wenn man alle Werte paarweise vergleicht, so hat man einen Algorithmus, der das Problem in $\frac{n(n-1)}{2}$ Schritten löst. Für sehr große Datenmengen werden lineare Elemente vernachlässigt, so dass sich ein Aufwand von höchstens $O(n^2)$ ergibt. Es existieren zwar bessere Algorithmen, um dieses konkrete Problem zu lösen, es wird allgemein jedoch vom *Worst-Case*-Szenario ausgegangen. Insgesamt handelt es sich also um ein praktisch durchaus handhabbares Problem, da zum Vergleich von beispielsweise 1.000 Werten nur 1.000.000 Rechenschritte nötig wären, was relativ wenig ist.

2.2.3 Beispiel NP 1: Das TSP

Ein immer wieder zitiertes, sehr anschauliches Problem der Klasse NP ist das sogenannte *Travelling Salesman Problem* (TSP) (siehe zum Beispiel [Obe07]) oder auch Problem des Handlungsreisenden. Es handelt sich hierbei um ein in der Praxis sehr wichtiges Problem, das

zahlreiche Anwendungsbereiche hat. Das Grundproblem besteht darin, dass ein Handlungsreisender n Orte jeweils einmal besuchen möchte.

Gesucht wird nun die kürzeste Route, die alle Orte genau einmal miteinander verbindet. Für dieses Problem wurde die NP-Vollständigkeit nachgewiesen (siehe beispielsweise [Ger04], S. 13 oder [Obe07], S. 1). Obwohl auch hier praktische Algorithmen existieren, die das Problem genügend gut lösen, sieht das *Worst-Case*-Szenario eine Berechnung aller theoretisch möglichen Routen vor. Die Menge der Lösungen liegt also bei $\frac{(n-1)!}{2}$. Betrachtet man also beispielsweise 18 Städte, so beträgt die Menge der möglichen Lösungen bereits mehr als 177 Billionen. Da es sich um ein exponentielles Wachstum handelt, ist also auch die lineare Vergrößerung der Rechenleistung, etwa durch bessere Hardware, vernachlässigbar. Ein Rechner mit einer Taktfrequenz von 100 Gigahertz, der mit jeder Rechenoperation eine Lösung berechnen kann (was er nicht kann), bräuchte so fast fünf Millionen Jahre, um die optimale Lösung zu berechnen [Ger04].

2.2.4 Beispiel NP 2: Das Rucksack-Problem

Es soll hier ein weiteres, zu den klassischen NP-vollständigen Problemen zu zählendes Beispiel (siehe [vRi08], S.70) erläutert werden, da auch dieses relativ einfach auf das Problem des architektonischen Entwurfs übertragen werden kann.

Es handelt sich um das so genannte Rucksack-Problem, welches darin besteht, dass ein Rucksack gegeben ist, der nur ein bestimmtes Gewicht tragen kann. Man hat nun n Gegenstände, die jeweils ein Gewicht und einen Wert haben. Es soll nun die Kombination an Gegenständen gefunden werden, die eine optimale Ausnutzung des Rucksacks im Hinblick auf den zu transportierenden Wert erlaubt. Es handelt sich also um ein kombinatorisches Problem, das in der Komplexität dem TSP ähnelt. Auch hier steigt der Rechenaufwand zur Berechnung einer optimalen Lösung exponentiell, es gelten ähnlich astronomische Rechenzeiten wie beim TSP bei nur wenigen Gegenständen (vgl. [vRi08], S. 71).

Auch das Rucksackproblem ist sehr praxisrelevant, da es beispielsweise im Bereich der Logistik eine große Rolle spielt. Auch hier sollen möglichst „wertvolle“ Gegenstände in möglichst effizienter Weise, beispielsweise in einem Lkw, transportiert werden.

2.3 Die Komplexität eines architektonischen Entwurfes

Die Betrachtung der Komplexität eines architektonischen Entwurfes geschieht hier ausschließlich unter mathematischen Randbedingungen. Die Komplexität der Umsetzung „menschlicher“ Faktoren, wie Nutzerbedürfnisse oder subjektives Empfinden sollen hier zunächst nicht betrachtet werden.

Wie oben beschrieben, soll hier auf einfachem Wege eine Abschätzung der Komplexität des Problems erfolgen. Hierzu sollen zwei der zahlreichen Faktoren eines architektonischen Entwurfes näher betrachtet werden.

Zunächst soll das Problem der Platzierung eines Gebäudes auf einem Grundstück vereinfacht betrachtet werden. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass es sich um ein quadratisches Grundstück handelt. Auf diesem Grundstück mit der Seitenlänge a werden nun Rasterpunkte mit einem Abstand von einem Meter betrachtet. Geht man von einem Einfamilienhaus aus, so sollte eine Betrachtung bis zu einer Höhe von 12 Metern ausreichen. Die Anzahl der Rasterpunkte beträgt somit $12 * n^2$. Um nun das Gebäude mit einer Seitenlänge $b < a$ auf dem Grundstück in Bezug auf beispielsweise Lärmquellen optimal zu platzieren, ist es nötig, alle möglichen Platzierungen zu untersuchen. Es wird davon ausgegangen, dass das zuvor beschriebene Raster für jeden Rasterpunkt P einen definierten Wert für den Lärm hat. Der Rechenaufwand beträgt also mehr als $12 * n^2$, da davon ausgegangen werden muss, dass jeder Punkt P mehr als einmal untersucht werden muss, da sich Überschneidungen durch die Gebäudekantenlänge $b < a$ ergeben. Zur asymptotischen Betrachtung ist es also durchaus legitim, den Aufwand mit $O(n^2)$ zu bewerten. Es handelt sich also um ein handhabbares Problem, auch wenn natürlich die Berechnung der „Lärmwerte“ für das Raster auch schon einen Aufwand von $O(n^2)$ nach sich zieht. Des Weiteren sollen natürlich nicht nur die Werte für den Lärm untersucht werden, so dass sich der tatsächliche Aufwand bei m Faktoren im Bereich von $(m + 1) * n^2$ bewegt.

Wesentlich dramatischer wird die benötigte Rechenzeit jedoch, wenn man die Erstellung eines Grundrisses betrachtet. Hier werden die Ähnlichkeiten zum TSP sowie zum Rucksackproblem offensichtlich.

Es soll davon ausgegangen werden, dass n Räume verteilt werden sollen. Der Einfachheit halber soll zunächst davon ausgegangen werden, dass die Räume keine räumliche Ausdeh-

nung haben, sondern nur aus Knotenpunkten bestehen. Nun soll versucht werden, eine optimale Anordnung der Räume unter dem Gesichtspunkt der benötigten Verbindungen, also beispielsweise zwischen Flur und Wohnzimmer, zu finden. Im schlechtesten Falle, der hier betrachtet werden soll, sind die nötigen Verbindungen derart, dass sich wie beim TSP eine Menge der möglichen Anordnungen von $O(10^{n-1})$ ergibt. Es handelt sich also um ein Problem aus der Menge NP.

Als weiteres Indiz soll hier die Verwandtschaft des Problems zum oben beschriebenen Rucksackproblem gelten. Man kann sich die Erstellung eines architektonischen Entwurfes in Bezug auf die Raumverteilung leicht als Abwandlung des Rucksack-Problems vorstellen: Wird davon ausgegangen, dass es beispielsweise eine vorgegebene Außenform gibt, wie es bei Entwürfen im Bestand oder bei kleineren Stadtgrundstücken leicht der Fall sein kann, so kann man diese zu füllende Außenform als Analogie zum Rucksack betrachten. An Stelle eines Gewichtes gilt es nun aber, Flächen zu verteilen. Die festgelegte Außenform hat eine vorgegebene Fläche, die es möglichst wertig mit einzelnen Räumen oder Flächen zu füllen gilt.

Bisher wurden nur zwei von dutzenden oder hunderten von Parametern betrachtet. Es kann also sicher festgehalten werden, ohne dies formal beweisen zu müssen, dass das Problem des architektonischen Entwurfes Teil der Klasse NP ist, was bedeutet, dass es sich mit einem deterministischen Algorithmus nicht in polynomialer Zeit lösen lässt. Wie oben gezeigt, existiert natürlich auch für das TSP ein Weg, ein gutes Ergebnis zu erlangen (siehe beispielsweise [Obe07]). Es ist jedoch in vernünftiger Zeit nicht möglich, unbedingt das beste, also mathematisch optimale Ergebnis, zu erhalten. Alternativ gibt es Algorithmen, die darauf basieren, nicht das optimale, sondern ein gutes Ergebnis zu finden. Ein solcher Algorithmus wird auch zur Lösung des vorliegenden Problems vorgeschlagen.

Die theoretische Einschränkung der Lösbarkeit des Problems sollte jedoch für die Praxis nicht allzu viel Relevanz haben, da ein herkömmlicher architektonischer Entwurf natürlich ebenfalls weit vom mathematischen Optimum entfernt ist. Er ist in jedem Falle wesentlich weiter vom Optimum entfernt, als theoretisch ein geeigneter Computeralgorithmus.

2.4 Die Mehrkriterienoptimierung

Wie oben beschrieben, wird in dieser Arbeit vom Optimum immer als dem mathematisch kleinsten Wert einer Optimierungsfunktion geredet. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, ist dies bei einer einfachen Optimierung auf einen Wert eine einfache, zweidimensional abbildbare Funktion, die ein oder mehrere lokale und ein oder mehrere globale Optima besitzt. Eine Optimierung ist also das Auffinden des globalen Optimums. Die Methoden zum Auffinden dieses Optimums werden unten betrachtet.

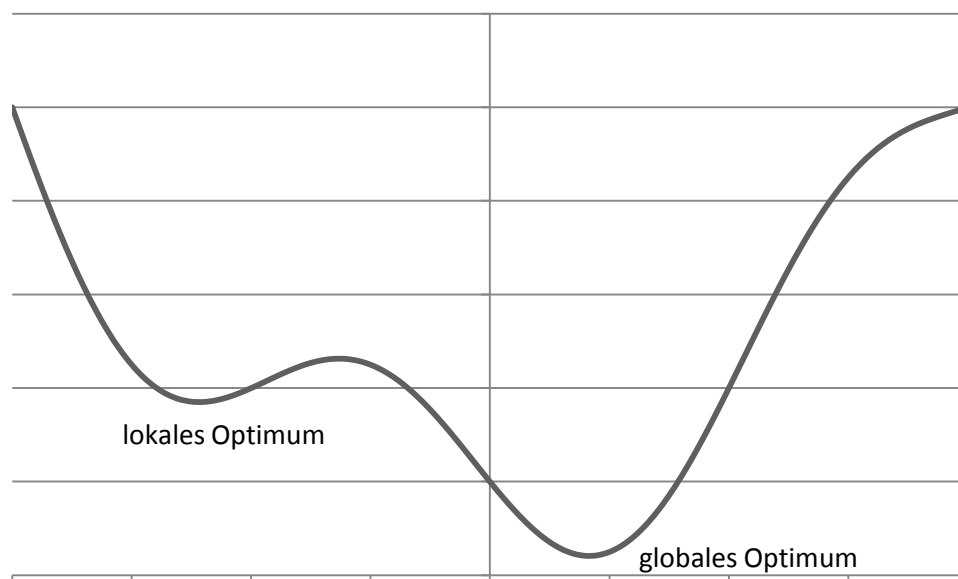


Abbildung 4: Beispiel einer Optimierungsfunktion mit einem Parameter

An dieser Stelle interessieren vor allem die Probleme und Eigenschaften einer mehrkriteriellen Optimierung. Zunächst ist dabei natürlich auf die steigende Komplexität auch im Hinblick auf Darstellbarkeit und Vorstellungsvermögen hinzuweisen. Der Graph einer Optimierungsfunktion hat immer $n+1$ Dimensionen, wobei n die Anzahl der Parameter ist (siehe [Ger04], S. 11). Problemlos dar- und vorstellbar ist somit lediglich eine Optimierung auf zwei Parameter, die also einen dreidimensionalen Graphen benötigt. Bei mehr Parametern, wie im vorliegenden Fall, ist die Funktion nicht mehr darstellbar. Trotzdem soll das Optimierungsproblem bildlich als Hügellandschaft verstanden werden, die über mehr oder weniger ausgeprägte Täler verfügt. Das Auffinden eines möglichst tiefen Tales ist somit das Ziel der Optimierung.

Ein weiteres Problem der mehrkriteriellen Optimierung ist der Umgang mit den verschiedenen Parametern. Im täglichen Leben lösen wir ständig Probleme der Mehrkriterienoptimierung. Bei jedem Einkauf möchte man möglichst gute Ware zu einem möglichst geringen Preis erwerben. Hierbei handelt es sich um ein klassisches Problem der Mehrkriterienoptimierung mit den beiden Parametern Qualität und Preis. Wir lösen dieses Problem zumeist intuitiv, doch es ist ohne Randdefinitionen unmöglich, ein Produkt mit einem geringeren Preis und geringerer Qualität mit einem Produkt höherer Qualität aber auch höherem Preis zu vergleichen, da es sich um sich widersprechende Einzelziele handelt. Das bedeutet, dass eine „Bewegung“ auf dem Funktionsgraphen des einen Zieles zwar zu einem besseren Ergebnis in Bezug auf diese Funktion führt, gleichzeitig aber zu einem schlechteren Ergebnis bezogen auf die andere Funktion.

Es gibt dabei zwei prinzipielle Ansätze, diesem Problem zu begegnen (Zusammenfassung nach [Ger04]):

- Das Bilden einer gewichteten Summe
- Die Suche nach pareto-optimalen Lösungen

Beim Bilden einer gewichteten Summe werden die einzelnen Funktionen zu einer Gesamtfunktion zusammengefasst. Dabei werden die Einzelfunktionen mit einer Gewichtung versehen. Man könnte also festlegen, dass einem beim Einkauf der Preis zu 60% wichtig ist, die Qualität zu 40%. Geht man davon aus, dass sich die Qualität einfach messen lässt, so lässt sich auf diese Weise ein eindeutiges Ergebnis erzielen.

Formal gesprochen handelt es sich bei der gewichteten Summe um eine Funktion der Form

$$f(s) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(s)$$

wobei k die Anzahl der Optimierungskriterien, f_i die einzelnen Zielfunktionen und w_i die Gewichtung angibt.

Die zweite Möglichkeit, die Suche der pareto-optimalen Lösungen, bildet aus den einzelnen Funktionen keine Gesamtfunktion. Eine Lösung wird vielmehr in Bezug auf die Einzelfunktionen betrachtet. Eine Lösung $s_0 \in S$ ist bezüglich der Zielfunktionen f_i ($i = 1, \dots, k$) dann

pareto-optimal, wenn es keine andere Lösung gibt, die für alle Zielfunktionen mindestens gleich gute Werte wie s_0 liefert (siehe ebenfalls [Ger04]). In dem obigen einfachen Beispiel würde das bedeuten, dass, wenn es ein Produkt A mit dem gleichen Preis wie Produkt B gäbe, gleichzeitig aber Produkt A höhere Qualität hat, Produkt A pareto-optimal wäre, da es Produkt B dominiert. Das heißt, dass Produkt A in allen Kategorien mindestens so gut ist wie Produkt B (Preis) und in mindestens einer Kategorie (Qualität) besser ist als Produkt B.

Je nach Optimierungsproblem können beide Wege gute Ergebnisse liefern. Beim Ansatz der pareto-optimalen Lösung ergeben sich jedoch verschiedene Probleme in Bezug auf das Problem der Erstellung eines architektonischen Entwurfes:

- Zum Einen ist es möglich, dass es keine pareto-optimale Lösung gibt, die alle anderen Lösungen dominiert. In vorliegendem Beispiel wäre dies der Fall, wenn das Produkt A billiger aber schlechter als Produkt B wäre. Dies würde bedeuten, dass keine Lösung die andere dominiert, da beide Lösungen in jeweils einer Kategorie am besten abschneiden würden. Mittels des Ansatzes der Pareto-Optimalität ist keine unmittelbare Lösung möglich.
- Im entgegengesetzten Fall ist es möglich, dass es sehr viele pareto-optimale Lösungen gibt. Es ist denkbar, dass sehr viele Entwürfe in den unterschiedlichen Kategorien dergestalt sind, dass sie alle pareto-optimal sind. Eine direkte Aussage über die Güte der pareto-optimalen Lösungen zueinander ist ohne weiteres nicht möglich. Es ist hierbei vielmehr ein Hilfskonstrukt nötig, um nicht gewünschte Lösungen von Einzelkriterien aus der Menge der pareto-optimalen Ergebnisse auszuschließen, dies wird auch MOI (*method of inequalities*) genannt. [Poh00]
- Für das Problem des Entwurfs ist der Ansatz der pareto-optimalen Lösungen zu statisch. Eine Veränderung der Wichtigkeit der verschiedenen Faktoren ist deutlich schwieriger als beim Ansatz der gewichteten Summe. In der Realität des Problems kann es aber sehr wichtig sein, die Gewichtung verschiedener Faktoren zu verändern, da beispielsweise einem Bauherrn die Energiekosten wichtiger sind, einem anderen aber die Baukosten. Dieser Punkt ist, wie noch gezeigt wird, besonders wichtig.

Pareto-optimale Lösungen sind für das Optimierungsverfahren daher auszuschließen. Der Ansatz der gewichteten Summe erlaubt größtmögliche Flexibilität, weshalb er vorzuziehen

ist. Außerdem erlaubt dieser, stets eine Aussage über die Güte eines Entwurfes in Bezug auf einen anderen zu treffen.

2.5 Parameter guter Architektur

Es gibt zahlreiche Faktoren oder Parameter, die sich auf einen Entwurf niederschlagen. So viele, dass ein einzelner Mensch im mathematischen Sinne nicht geeignet ist, einen optimalen Entwurf zu kreieren. Neben den klassischen Kategorien, wie der Grundrissgestaltung oder Raumgestaltung kommen heute noch zahlreiche weitere Faktoren hinzu. Selbst die Festigkeit kann in den meisten Fällen der Architekt heute nicht mehr garantieren, er benötigt hierzu einen Bauingenieur. Dabei soll von Faktoren wie bauphysikalischen Eigenschaften, Bodenklassen oder akustischen Eigenschaften nicht die Rede sein. Trotzdem gehören diese Faktoren zu guter Architektur, da sie die Nutzbarkeit eines Gebäudes entscheidend beeinflussen.

Um eine qualifizierte Aussage zum Optimierungsgrad einer Lösung machen zu können, ist es nicht nur sinnvoll, sondern auch nötig, die vielen Parameter zu kategorisieren. Diese Kategorisierung ist nicht nur geeignet, die Anforderungen an den zu entwickelnden Algorithmus zu formulieren, sondern er erlaubt auch, bisherige Lösungen systematisch zu betrachten, einzuordnen und Ergebnisse in die vorliegende Arbeit einfließen zu lassen.

Es werden dabei folgende Kategorien vorgeschlagen, die im Alltag die wichtigsten sind: Grundriss, Umwelt, Baukosten, Energie(kosten), Nachhaltigkeit, Form, Stil, Nutzerbedürfnisse. Diese Kategorisierung erlaubt es, alle hier auftretenden Faktoren einzuordnen. Es sind

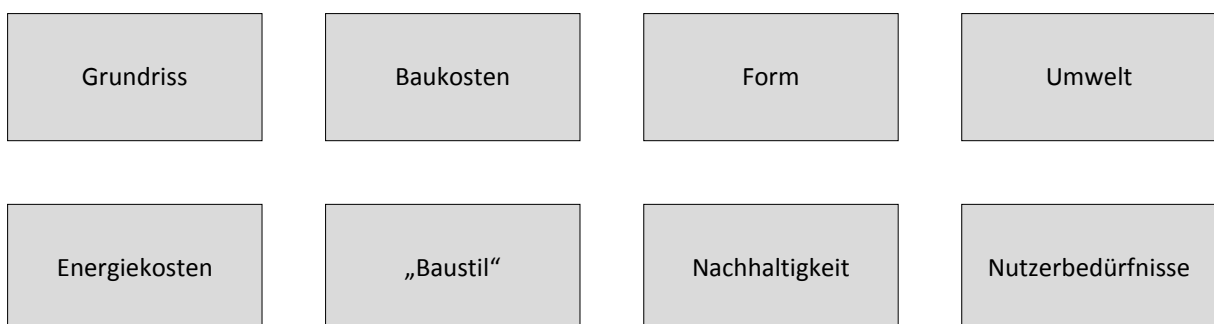


Abbildung 5: Vorgeschlagene Kategorien

aber auch Parameter aus allen Kategorien nötig, um gute Architektur zu erschaffen. Alle Parameter müssen eindeutig mathematisch quantifizierbar sein. Auf die genaue mathemati-

sche Abbildung der Faktoren auf ein algorithmisches System wird in 4.3 noch ausführlich eingegangen.

Des Weiteren sind natürlich zahlreiche Parameter aus den „klassischen“ Ingenieurwissenschaften, wie etwa die Leitungsführung oder die Statik, wichtig. An dieser Stelle kann über die genaue Ausgestaltung dieser Kategorien keine Aussage getroffen werden. Es wird aber gezeigt, dass sich Ergebnisse aus diesen Fachbereichen nahtlos und problemlos in das vorgeschlagene Optimierungsmodell einbinden lassen.

2.6 „Menschliche Parameter“

Eine besondere Untergruppe der Parameter sind die sogenannten menschlichen Faktoren. Von den oben vorgeschlagenen Kategorien gehören die Nutzerbedürfnisse und der Stil zu den menschlichen Faktoren, da sich diese nicht unmittelbar mathematisch erfassen lassen und insgesamt „weicher“ erscheinen. Hier soll nur kurz erläutert werden, wie diese Parameter in einen automatisierten Entwurf eingehen können. Die genaue Einbindung wird bei der Beschreibung des eigentlichen Optimierungsalgorithmus gezeigt werden. Ein großer Teil der menschlichen Parameter, besonders jene, die auf den Stil Einfluss haben, werden nicht in dieser Arbeit, sondern in der mit dieser Arbeit verbundenen Abhandlung zum Thema des Baustils erörtert (siehe [Sch07]). Doch die menschlichen Parameter sind auch als Vorgaben für zahlreiche Parameter der Optimierung zu verstehen und werden als solche hier behandelt.

2.6.1 Die Nutzerbedürfnisse

Die Kategorie der Nutzerbedürfnisse soll in zwei Gruppen unterteilt werden: Es gibt offene und verdeckte Bedürfnisse. Zur ersten Gruppe gehören alle Faktoren, die der Nutzer kennt und die er sowohl inhaltlich als auch fachlich formulieren kann. Zur zweiten Gruppe gehören die Faktoren, die der Nutzer nicht kennt, die aber trotzdem gedeckt werden müssen.

Als Beispiel der offenen Bedürfnisse kann, zumindest teilweise, das Raumprogramm eines Einfamilienhauses oder die zu erzielende Nutzfläche eines Bürogebäudes gelten. Es kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass der künftige Nutzer eines Einfamilienhauses weiß, welche Räume er benötigt oder wie viele Kinderzimmer er brauchen wird. Nicht unbedingt kann aber davon ausgegangen werden, dass er sinnvolle Raumgrößen angeben kann oder dass er weiß, welche Anforderungen an seinen Heizungsraum bestehen.

Als Beispiel für verdeckte Bedürfnisse kann die Nutzbarkeit eines Gebäudes genannt werden. So sollte ein Grundriss in seiner Organisation dem Lebens- oder Arbeitsablauf des Nutzers entsprechen. Dies ist eine Forderung, die besteht, die der Nutzer als Laie aber nicht unbedingt formulieren kann, sondern die vom Architekten im Zusammenwirken mit dem Bauherrn oder Nutzer herausgearbeitet werden muss beziehungsweise die der Architekt aufgrund seiner Erfahrung direkt einbringen kann.

Es besteht nun an einen Algorithmus zur Erstellung architektonischer Entwürfe die oben beschriebene Anforderung der mathematischen Quantifizierbarkeit der Anforderungen. Um diese auch im Hinblick auf die Nutzerbedürfnisse zu erlangen, sollen hier drei mögliche Wege aufgezeigt werden, diese zu ermitteln. Die unterschiedlichen Wege sind einzeln oder in beliebiger Kombination miteinander verwendbar, so dass eine weitgehend lückenlose Dokumentation der Bedürfnisse möglich wird. Der später vorgeschlagene Algorithmus ist befähigt, Ergebnisse aller drei Methoden zu verarbeiten.

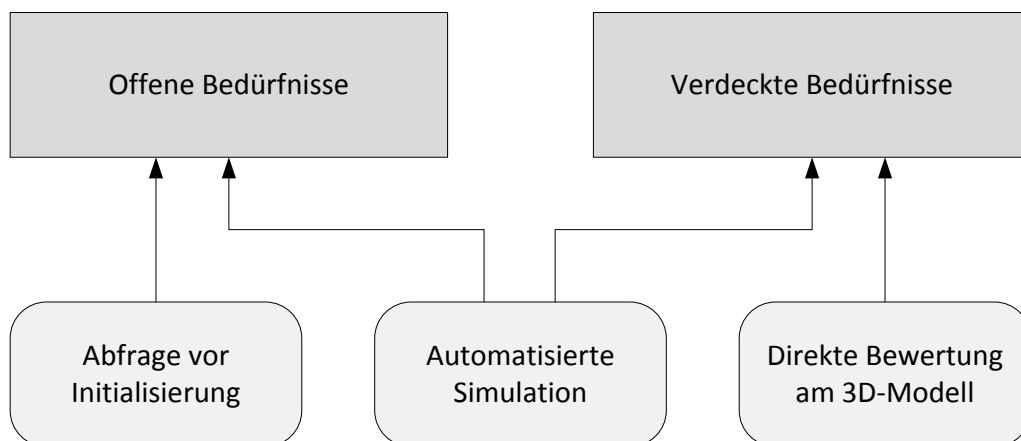


Abbildung 6: Nutzerbedürfnisse

Als erste Methode der Ermittlung von Nutzerbedürfnissen wird eine einfache, aber geleitete Abfrage vorgeschlagen. Diese Methode entspricht dem Vorgespräch eines Bauherrn mit dem Architekten. Hier können offene Bedürfnisse, wie das Raumprogramm, abgefragt werden. Dies geschieht mit Unterstützung von vorhandenem Basiswissen, das in der Eingabemaske zur Verfügung steht. So sind etwa sinnvolle Kombinationen oder gute Raumgrößen gespeichert, um den Nutzer zu unterstützen. Dies entspricht ebenfalls dem „normalen“ Weg, da auch hier der Architekt sinnvolle Konfigurationen vorschlägt. Die so gewonnenen Informationen können als Initialisierung des Entwurfsprozesses gelten. Auf Basis der so gewonnenen

Daten ist ein Vorentwurf möglich. Auch hier entspricht das automatisierte Vorgehen dem des menschlichen Entwerfers.

Um die verdeckten oder aber nicht erfassten offenen Bedürfnisse herauszufinden, werden zwei weitere Methoden vorgeschlagen: Zum einen wird vorgeschlagen, die vom Computer erstellten Entwürfe durch eine automatische Simulationsumgebung zu testen. Es ist denkbar, einen durchschnittlichen Nutzer als sogenannten *Agent* in einer Simulationsumgebung einzusetzen. Dieser „benutzt“ das Gebäude wie der echte Bewohner. Aus den so gewonnenen Daten lassen sich Rückschlüsse ziehen, die wiederum in den automatisierten Entwurfsprozess eingehen. Auf welche Weise sie dies tun, wird in 5.2 erläutert.

Als „letztes Mittel“ der Gewinnung von Informationen über den oder die Nutzer wird die virtuelle Begehung durch den menschlichen Nutzer vorgeschlagen. Das Gebäude wird automatisch dreidimensional virtualisiert. Hierzu wird eine Umsetzung im Format X3D (*Extensible 3D*) vorgeschlagen. X3D ist eine dreidimensionale Beschreibungssprache, die es erlaubt, das Gebäude komplett abzubilden. Des Weiteren ist X3D in höchstem Maße interaktiv. Auf diese Weise können bewegliche Teile, wie beispielsweise Türöffnungen umgesetzt werden. Zusammen mit einer Möblierung ergibt sich so ein relativ exaktes Bild der künftigen Realität. Der Nutzer wird nun angehalten, das Gebäude so zu „bewohnen“, wie er es künftig tun möchte. Er hat dabei ständig die Möglichkeit, jedes einzelne Bauteil zu bewerten. Diese Rückschlüsse können wiederum in einen neuen, weiter optimierten Entwurf eingehen.

2.6.2 Der Baustil

Eines der größten Probleme bei der automatischen Erstellung von architektonischen Entwürfen ist der sogenannte Baustil. Der Stil soll aber hier nicht als Summe epochaler Merkmale eines Gebäudes definiert werden, sondern als die Ausprägung, die ein bestimmter Architekt einem Gebäude gibt. Ein Computer ist per se zunächst nicht dazu geeignet, subjektive Entscheidungen eines Menschen nachzubilden. Es müssen andere Wege gefunden werden, dieser Komponente Rechnung zu tragen.

Daher wird im vorliegenden Falle darauf verzichtet, explizit einen Stil zu „generieren“. Es soll vielmehr der Grad der Übereinstimmung eines Entwurfes mit dem Entwurstil eines Architekten bestimmt werden. Dieses sehr komplexe Thema ist Bestandteil der Arbeit von SCHWARZ (siehe [Sch07]). Hier kann daher nur festgehalten werden, dass ein automatisch

generierter Entwurf auf eine Ähnlichkeit mit einem Entwurstil hin untersucht wird. Dieser Grad der Ähnlichkeit geht wiederum als Information zur weiteren Optimierung in den Kreislauf ein.

Des Weiteren wird festgelegt, dass der Baustil ausschließlich das Gebäude als solches behandelt. Für die Analyse des Baustils sind nur solche Faktoren in Betracht zu ziehen, die nicht von außen beeinflusst sind. Das heißt, dass man kann bildlich davon ausgehen kann, dass der Entwurf auf der „grünen Wiese“ entsteht. Diese Vereinfachung ist nötig, aber auch sinnvoll, um einen Entwurf stilistisch beurteilen zu können. Äußere Faktoren, wie die Lage auf dem Grundstück, Ausrichtung oder Straßenanbindung fallen dabei nicht weg. Sie werden lediglich unter anderen Gesichtspunkten, also in anderen Kategorien berücksichtigt.

Grundlage dieser Festlegung ist, dass der Stil eines Architekten die Quintessenz eines Gebäudes unter Vernachlässigung der äußeren Faktoren ist, also das, was ein Gebäude einmalig macht. Ein banales, aber anschauliches Beispiel: Wenn ein Gebäude auf einer Seite, die großem Lärm ausgesetzt ist, möglichst untergeordnete Nutzungen hat, so ist dies eine Auswirkung der Umweltfaktoren, nicht des Stils. Gleiches gilt, wenn die Fassade auf dieser Seite möglichst geschlossen ist. Eine Frage des Stils ist es hingegen, ob die kleinen Fenster quadratisch, hochformatig oder quer liegend sind, ob die Fassade Symmetrien aufweist oder ob die Öffnungen in Bändern angeordnet sind. Es findet also keinesfalls eine Vernachlässigung der äußeren Faktoren statt, diese fließen lediglich an anderer Stelle in die Untersuchung ein.

2.7 Der Architekt als Abweichung vom Optimum

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass es unter bestimmten Randbedingungen eine im mathematischen Sinne optimale Lösung für einen architektonischen Entwurf gibt, von dem lediglich der Mensch abweicht (siehe 1.5.1).

Wenn man davon ausgeht, dass man innerhalb der Kategorien, die eindeutig mathematisch quantifizierbar sind, alle notwendigen Informationen zur Verfügung hat – ein Zustand von dem hier ausgegangen wird – so ist ein architektonisches Problem mit den oben beschriebenen algorithmischen Einschränkungen eindeutig lösbar.

Unter diesen Umständen kann man durchaus davon sprechen, dass der Architekt die größte Abweichung vom Optimum darstellt. Auch wenn in der Realität unter den Bedingungen einer

größtenteils „menschlichen“ Optimierung nie das mathematische Optimum gefunden werden kann, so ist doch trotzdem festzuhalten, dass unter Zusammenwirken von Fachingenieuren und unter Berücksichtigung auch manuell berücksichtigbarer Faktoren, wie Grundrissorganisation, Ausrichtung oder Energieoptimierung ein Ergebnis möglich ist, das nahe am mathematischen Optimum liegt. Trotzdem kann festgehalten werden, dass unter Berücksichtigung der Komplexität architektonischer Entwürfe in heutiger Zeit der Architekt eigentlich „überfordert“ ist. Er kann in vielen wesentlichen Bereichen der Architektur, vor allem in den Bereichen der Fachingenieure, keine fachliche Aussage treffen und somit auch keinen „integrierten“ Entwurf liefern, der alle Parameter berücksichtigt. In der Regel ist es vielmehr so, dass der Architekt ausgehend von seiner „Domäne“, der Gestaltung von Grundriss und Form, einen Vorentwurf liefert. An dieser Stelle ist meistens der kreative Prozess des Architekten in dem Sinne, in dem die Arbeit des Architekten oftmals verstanden wird, beendet. Alle weiteren Entscheidungen sind in der Regel Reaktionen auf äußere Umstände, seien es Bauvorschriften oder Zwänge, die sich durch die Arbeit der Fachingenieure ergeben. Häufig ist nicht einmal die Formgebung ein kreativer Prozess, da sich die Form fast automatisch aus Vorschriften ergibt. Der Architekt ist also oftmals eher ein „Problemlöser“ von Problemen, die im Verlaufe eines Entwurfes entstehen.

Erst unter Berücksichtigung des Stils handelt der Architekt potenziell optimal: Denn unumstritten ist, dass das Ergebnis, das ein guter Architekt liefert, zwar nicht unbedingt am mathematischen Optimum der „harten“ Faktoren angesiedelt ist, dafür aber am Optimum ästhetischer Gesichtspunkte. Dieser Tatsache soll durch die Kategorie Stil, die in die automatisierte Optimierung einfließt, Rechnung getragen werden. Wie beschrieben, wird dabei auf einen Abgleich mit vorhandenen Architektenprofilen optimiert, da es bisher nicht gelungen ist, den Computer zur direkten Generierung eines Stiles einzusetzen, der nicht Züge von „Computerarchitektur“ trägt, die oben beschrieben wurde.

Als Steuerelement ist die unter 2.4 beschriebene gewichtete Summe vorgesehen. Hierüber lässt sich auch im Optimierungsprozess der Einfluss des Architekten steuern. Die Gewichtung der einzelnen Faktoren ist sehr realitätsnah, da eine ganz ähnliche, wenn auch oft unbewusste Gewichtung beim wirklichen Bauen beobachtet werden kann: So sind beispielweise Fertighäuser oftmals das Ergebnis einer Übergewichtung des Faktors Kosten. Durch eine Übersteuerung in diese Richtung werden ästhetische oder grundrissbezogene Faktoren ver-

nachlässigt. Das Ergebnis ist ein zwar sehr billiges, aber nicht unbedingt „gutes“ Haus unter Berücksichtigung aller Faktoren.

Ähnliches ist auch bei anderen Beispielen zu beobachten: So sind viele Verwaltungsbauten das Ergebnis einer Übersteuerung des Faktors Grundrissorganisation, Niedrigenergiehäuser eine analoge Übersteuerung des Faktors Energiekosten.

Durch die Anwendung des Prinzips der gewichteten Summe ist es möglich, diesen Faktoren in der Optimierung Rechnung zu tragen. Auf diese Weise ist es möglich, entweder ein ausgewogenes Gebäude zu planen oder ein übersteuertes, welches in der Praxis ja oftmals mehr gefragt ist.

3 Der Input

Der erste Schritt zum Entwurf einer ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware ist die Erfassung der nötigen Daten, sowie die Vorbereitung eines Datenmodells, das geeignet ist, die Informationen zu halten und zu verarbeiten.

Eine Besonderheit der entworfenen Software ist die fast ausschließliche Funktion über das Internet. Die Software wird so entworfen, dass eine Eingabe von Randbedingungen ausschließlich über das Internet möglich ist. Die Optimierung kann ebenfalls auf einem Server geschehen, der dann auch die Ergebnisse übers Internet verfügbar macht. Diese Besonderheit ist natürlich nicht von entscheidender theoretischer Bedeutung, wird die Bedienung bestimmter Elemente aber vereinfachen.

3.1 Die Randbedingungen

Das hier beschriebene Webinterface zur Erfassung von Randbedingungen wurde von mir in Zusammenarbeit mit SCHWARZ entworfen (siehe auch [Sch06]). Das Erfassungsmodell geht dabei von drei Informationsebenen aus, die alle Teil der in 2.6.1 beschriebenen offenen Faktoren sind.

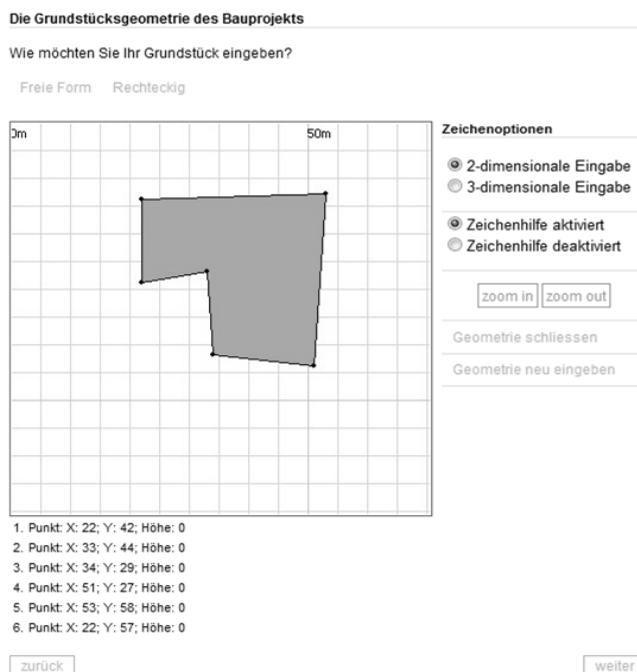


Abbildung 7: Webinterface zur Erfassung von Randbedingungen

Die erste Ebene bildet ein Projekt. Ein Projekt ist ein Containerobjekt zur Erfassung von einem oder mehreren Grundstücken. Das Projekt hat dabei als wesentlichen Parameter die geographische Lage, die später verschiedene Parameter wie Baukostenindex, Bodenklasse oder zu berücksichtigende maximale Schneelast bestimmen kann.

Die zweite Ebene sind Daten, die das einzelne Grundstück betreffen. Dieses ist per definitionem vorzusetzen

und somit kein variabler Parameter. Hierbei wird natürlich die Geometrie dreidimensional

erfasst, aber auch Werte, wie die Nordrichtung, das zu bebauende Baufenster und Umweltfaktoren, wie Lärmquellen oder Punkte besonders guter Aussicht. Des Weiteren können hier das Grundstück betreffende rechtliche Voraussetzungen, wie maximale Geschosshöhe oder vorgeschriebene Dachform erfasst werden. Es handelt sich hierbei ausschließlich um Parameter, die als gegeben zu sehen sind, sie haben natürlich Einfluss auf den Entwurf, können aber umgekehrt nicht von diesem beeinflusst werden.

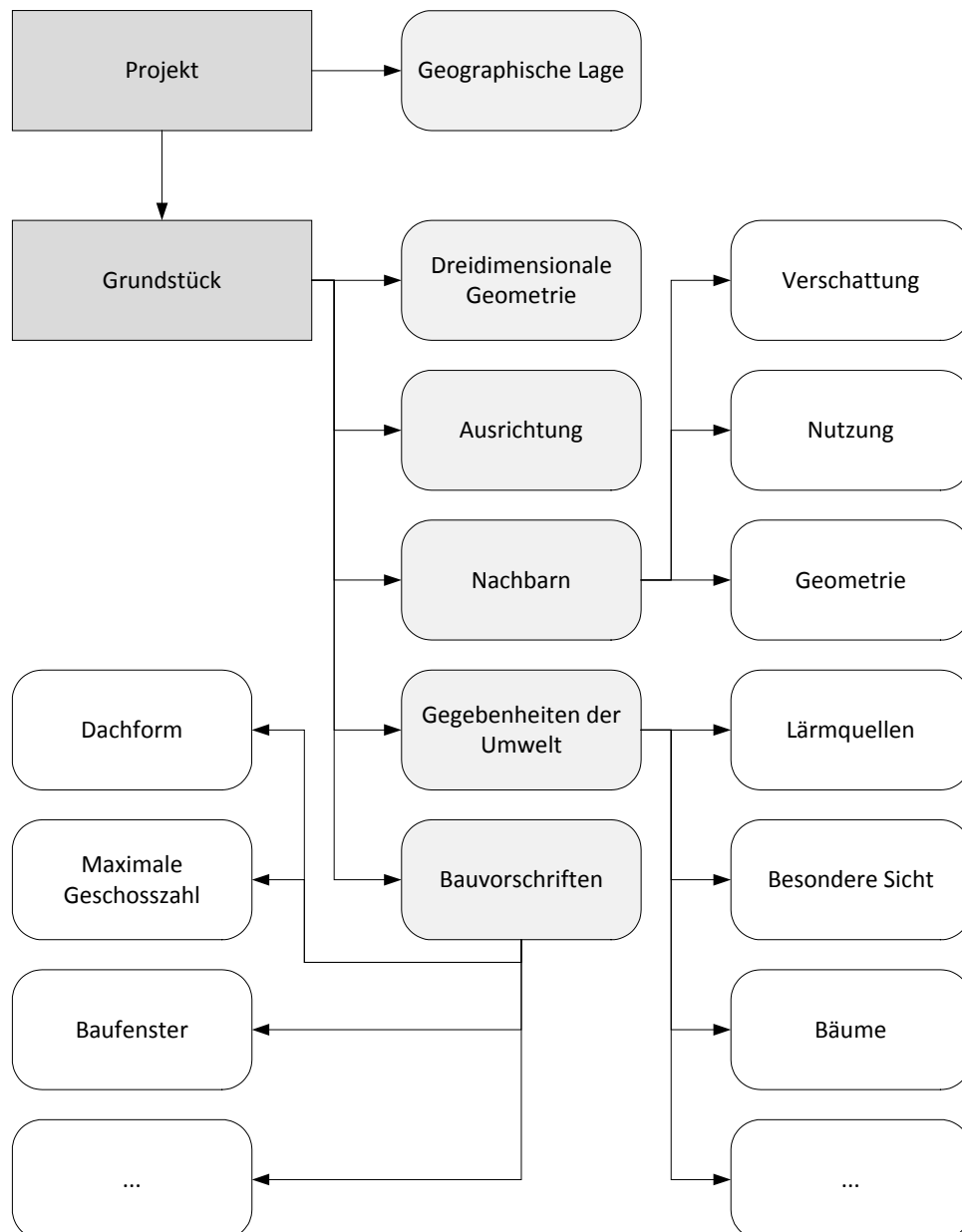


Abbildung 8: Randbedingungen auf Projekt- und Grundstücksebene

Ein sehr wichtiger Punkt, der immer wieder zu betonen ist, ist, dass die hier vorgeschlagenen Parameter eine Auswahl sind. Natürlich wurden sie mit Bedacht gewählt und können die Gegebenheiten sehr gut reflektieren, sie sind jedoch keinesfalls als ausschließlich anzusehen.

Eine Erweiterung um zusätzliche Parameter ist jederzeit möglich, wie der später beschriebene Optimierungsvorgang zeigen wird.

3.2 Die mathematische Quantifizierbarkeit der Randbedingungen

Die mathematische Quantifizierung der bisher beschriebenen Faktoren ist relativ einfach möglich. Trotzdem soll kurz erläutert werden, wie dies für die einzelnen Faktoren möglich ist.

3.2.1 Die geographische Lage

Die geographische Lage wird als absolute Geokoordinate gespeichert. Dies erlaubt den späteren Rückgriff auf unterschiedlichste Datenbanken, wie beispielsweise Baukostenfaktoren. Über geografische Koordinaten ist eine genaue Verortung und Zuordnung zu Verwaltungseinheiten, wie Gemeinden (Bebauungsplan), Landkreise (Referenz auf Baukostenfaktoren) und Bundesländer (Bauordnungen) möglich. Eine Verknüpfung mit Kartenmaterial (z. B. Schneelastzonen) ist ebenfalls problemlos.

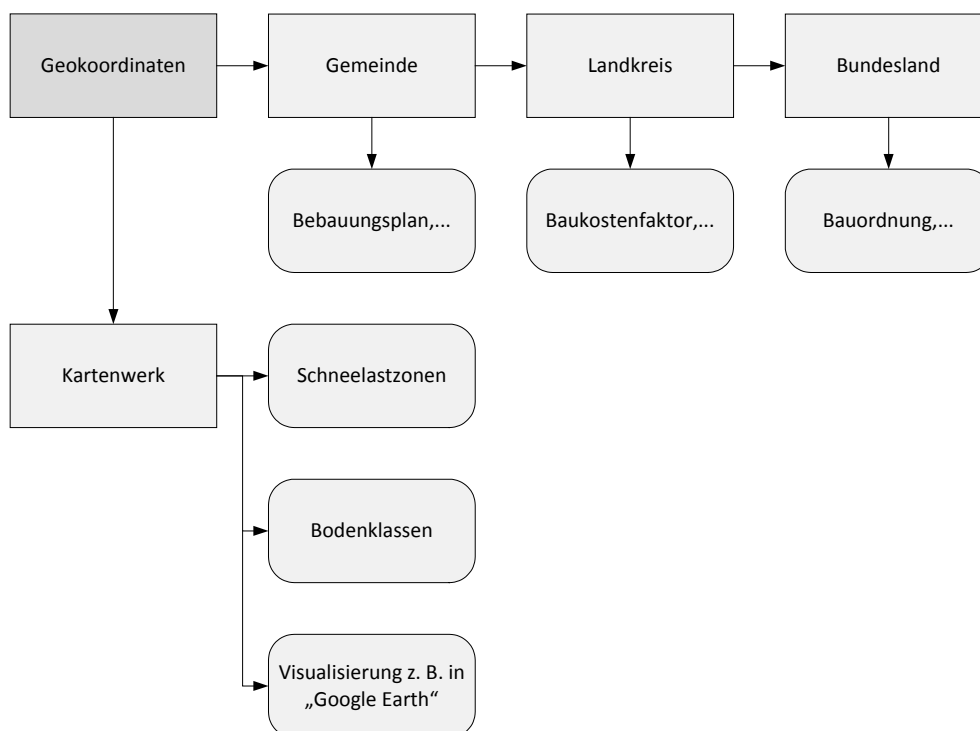


Abbildung 9: Randbedingungen der geographischen Lage

3.2.2 Die Grundstücksgeometrie

Das genaue objektorientierte Gebäudemodell wird später noch erläutert werden. Im Vorgriff darauf soll hier allerdings schon die Speicherung einer beliebigen Geometrie, also auch der

des Grundstücks aufgezeigt werden. Alle Geometrien werden als geschlossene Menge von Punkten und Vektoren gespeichert. Das heißt, dass beginnend bei Punkt 0 der Punkt 0 und der Vektor 0 gespeichert werden. Aus der Addition der x-, y- und z-Koordinaten des Punktes 0 mit dem Vektor 0 ergibt sich somit Punkt 1 und in der Folge Punkt n. Der Vektor n ergibt in Addition mit Punkt n wieder den Punkt 0:

$$P_0 + V_0 = P_1$$

$$P_1 + V_1 = P_n$$

$$P_n + V_n = P_0$$

Mit diesem Grundmodell können jegliche Geometrien vektorisiert gespeichert werden. Später wird gezeigt werden, wie aus diesem Modell eine Objektklasse geschaffen werden kann, die erweiterte Funktionalität und geometrische Operationen zulässt. Natürlich ist das Modell auch befähigt, nicht gerade Kanten zu speichern. Dies ist jedoch systemisch nicht bedeutsam und kann hier vereinfacht vernachlässigt werden.

3.2.3 Die Ausrichtung

Die Ausrichtung des oder der Grundstücke erfolgt über die Speicherung der Nordrichtung relativ zum zugrunde liegenden Koordinatensystem. Es wird dabei definiert, dass positive Koordinaten im ersten Quadranten abgetragen werden, das heißt, dass der Nullpunkt von positiven Koordinaten in x- und y-Richtung unten links ist. Die Nordrichtung wird dabei so definiert, dass 0° bedeuten, dass sich Norden in Richtung der positiven x-Achse befindet. Die Drehrichtung wird mathematisch negativ festgelegt, so dass Osten der positiven y-Richtung entspricht.

3.2.4 Die Nachbarn

Alle Nachbarn werden ebenfalls als Geometrie analog zum eigentlichen Grundstück gespeichert. Prinzipiell ist es mit diesem System möglich, ganze Städte als Geometrien zu speichern und den jeweiligen Einfluss auf den Entwurf zu berücksichtigen. Zusätzlich zu den Grundstücksgeometrien kann eine Nutzung sowie eventuelle Bebauung gespeichert werden. Die Bebauung wird dabei analog zu dem für den eigentlichen Entwurf vorgesehenen Objektmodell, das später beschrieben wird, gespeichert.

So ist eine Berechnung der Verschattung etc. ohne weiteres möglich. Auch hier gilt: es ist prinzipiell möglich, ganze Städte als Gebäudemodell zu erfassen. Eine Importfunktion zu bestehenden GIS-Modellen ist problemlos realisierbar.

3.2.5 Umweltfaktoren

Umweltfaktoren werden im kleinen Maßstab als Koordinaten relativ zum Grundstück, das bei (0,0,0) seinen Ursprung hat, gespeichert. Alternativ ist auch eine Speicherung über Geokoordinaten möglich, um größere räumliche Gegebenheiten zu repräsentieren. So können beispielsweise bestehende Daten über Überflutungsflächen etc. gespeichert werden. Umweltfaktoren können prinzipiell ebenfalls als Geometrien (z. B. Überflutungsflächen) oder aber als Punkte mit einer dazugehörigen Ausbreitungsfunktion gespeichert werden. So wird beispielsweise eine punktförmige Lärmquelle als Koordinate mit Schallausbreitungsfunktion gespeichert. So ergibt sich eine beliebig skalierbare Punktwolke, die eine qualifizierte Aussage zum Lärmzustand an einem beliebigen Punkt auf dem Grundstück zulässt. Diese Werte gehen später in den Entwurf ein.

Als weitere Beispiele hierfür seien Punkte besonderer Sicht oder physische Hindernisse, wie Bäume genannt. Eine besondere Sicht lässt sich beispielsweise als gerichteter Vektor speichern, ein Baum lässt sich entweder als Geometrie der konvexen Hülle oder aber als Punkt mit einer radialen Funktion speichern.

3.2.6 Bauvorschriften

Die Speicherung von Bauvorschriften ist sehr einfach. So können zum Beispiel Baulinien im Baufenster gespeichert werden. Das Baufenster ist ein hierarchisch dem Grundstück untergeordnetes Geometrieobjekt, das analog zum Grundstück selbst gespeichert wird.

Vorgeschriebene Dachformen lassen sich als Dachtyp speichern. Wie später gezeigt wird, gibt es neben einem frei definierbaren Dach auch bestimmte vordefinierte und häufig vorkommende Dachformen, wie Flachdach, Satteldach, Pultdach oder Walmdach. Eventuelle Vorschriften lassen sich somit als Referenz auf eine Vorgabe speichern.

Ebenso einfach lassen sich natürlich numerische Faktoren, wie maximale Geschosshöhen speichern. Aus diesem Wert berechnet sich später auch die maximale Nutzfläche, die aus Baufenster, maximaler Überbauungsfläche und maximaler Geschosshöhe leicht errechnet werden kann.

3.3 Das Softwaremodell zur Erfassung architektonischer Entwürfe

Das hier vorgeschlagene Softwaremodell ist nicht das erste seiner Art (siehe beispielsweise die *Industry Foundation Classes* (IFC) in [bui09]). Auch beispielsweise CAD-Software liegt ein objektorientiertes Modell zugrunde, um ein Gebäude abbilden zu können. Hier liegt der Schwerpunkt aber auf der Darstellung und der Definition eigener Zeichnungsklassen. Im hier beschriebenen Modell handelt es sich jedoch um ein Modell, das ein Gebäude hierarchisch wiedergeben soll. Es handelt sich um ein beliebig erweiterbares Modell, das alle Funktionalität zur Speicherung und Optimierung eines Gebäudes enthält. Bevor diese im Detail erklärt wird, sollen aber zunächst einige angewandte Grundsätze der Informatik erklärt werden.

3.3.1 Klassen und Objektorientierung

Die Klasse ist ein Grundkonzept der objektorientierten Programmierung. Eine Klasse ist dabei ein abstrakter Begriff für eine gemeinsame Struktur und ein gemeinsames Verhalten von Objekten (siehe [Bal99], S. 21).

Prinzipiell kann man eine Klasse als Bauplan für ein bestimmtes Objekt sehen. Jede Klasse kann Attribute (Eigenschaften) und Methoden (Funktionen und Prozeduren) haben. Des Weiteren hat jede Klasse einen Konstruktor und Destruktor, die beschreiben, wie ein Objekt einer Klasse erstellt (gebaut) bzw. zerstört wird. Wesentliches Merkmal von Klassen ist die Möglichkeit der Vererbung, das heißt, dass weitere Klassen von einer Basisklasse abgeleitet werden und dabei die Eigenschaften der Basisklasse erben. Das Substitutionsprinzip beschreibt die Möglichkeit der Verwendung einer abgeleiteten Klasse überall dort, wo die Basisklasse erwartet wird (siehe [Sta07], S. 166).

Objektorientierte Programmierung beschreibt somit eine Programmierung mithilfe von Klassen. In der objektorientierten Softwareentwicklung besitzt ein Objekt einen bestimmten Zustand und reagiert mit einem definierten Verhalten auf seine Umgebung. Außerdem besitzt jedes Objekt eine Identität, die es von allen anderen Objekten unterscheidet [Bal99].

Ein simples Beispiel soll dies demonstrieren: Es kann eine Klasse „Fahrzeug“ erzeugt werden. Diese hat einige einfache Attribute oder Eigenschaften, wie beispielsweise eine eindeutige Fahrgestellnummer, eine Farbe und einen Typ. Die Klasse hat zwei einfache Methoden oder Prozeduren, nämlich das Fahren und das Bremsen. Dies beschreibt einen einfachen Bauplan für ein neues Fahrzeug. Die Klasse an sich ist kein Objekt im Sinne der objektorientierten

Programmierung. Ein Objekt entsteht erst durch Erstellung einer Instanz einer Klasse, also sozusagen in der konkreten Umsetzung eines Bauplans, der in der Klasse beschrieben wird.

Erzeugen wir nun eine Instanz unserer Beispielklasse Fahrzeug, so entsteht ein Objekt der Klasse Fahrzeug. Es wird der Konstruktor aufgerufen, der das Fahrzeug mit Basiseigenschaften ausstattet, die dem Konstruktor angegeben werden können. So können wir beispielsweise ein Fahrzeug vom Typ „Pkw“ erzeugen. Dieses hat z. B. die Attribute Fahrgestellnummer 1, Farbe Rot, Typ „Pkw“ und vier Räder. Durch das Erzeugen unseres Pkws hat das neue Objekt automatisch die Methoden Fahren und Bremsen, die allen Objekten der Klasse gemeinsam sind. Die Identität des neuen Pkws ist 1, also die Fahrgestellnummer, die einmalig ist. Man könnte jetzt beliebig viele Pkws erzeugen, indem man immer weiter Instanzen der Klasse Fahrzeug bildet.

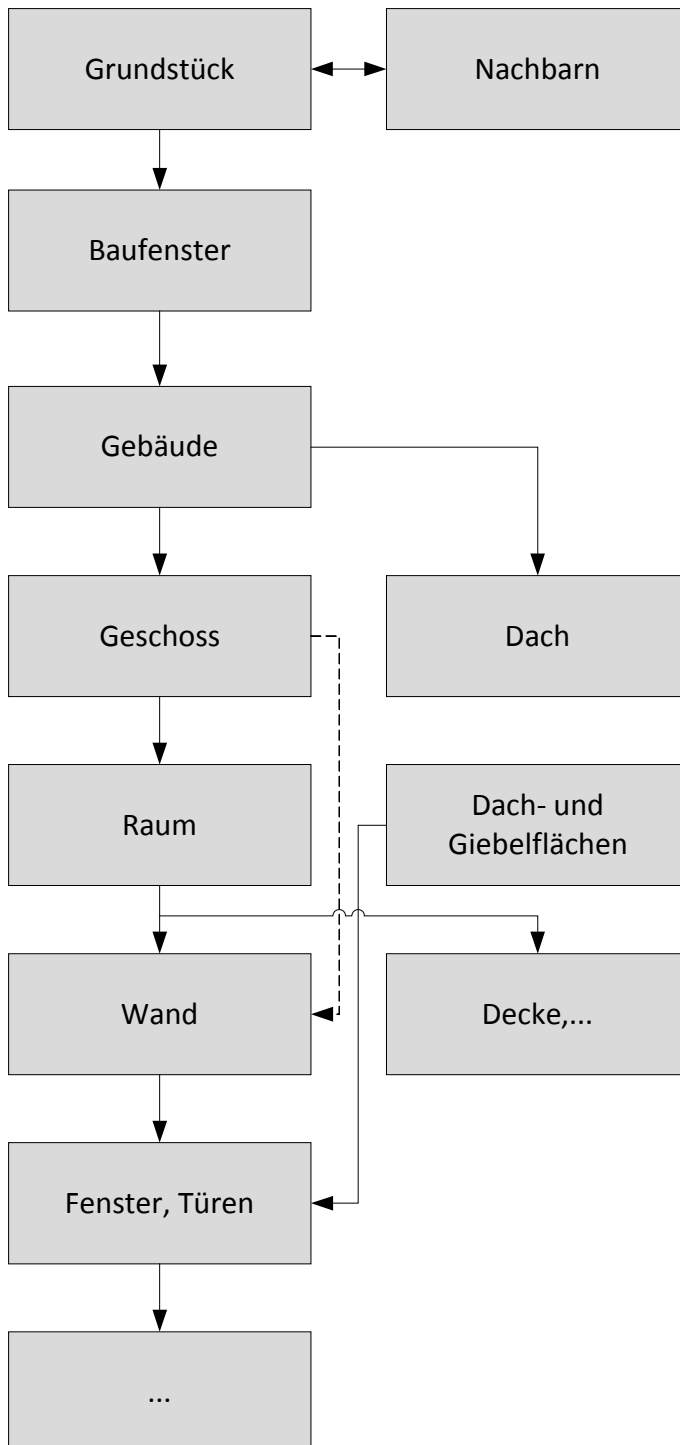
Um das Grundprinzip der Vererbung zu verdeutlichen soll jetzt aber noch eine weitere Klasse Nutzfahrzeug gebildet werden. Diese hat alle Eigenschaften, die auch ein normales Fahrzeug hat, verfügt aber noch über weitere Attribute und Methoden. Daher kann die neue Klasse von der Klasse Fahrzeug abgeleitet werden. Unsere neue Klasse hat zusätzlich das Attribut Nutzlast und die Methoden Beladen und Entladen. Erzeugen wir nun ein Objekt der Klasse Nutzfahrzeug, so hat diese also die Attribute Fahrgestellnummer, Farbe, Typ (von der Klasse Fahrzeug geerbt) und die Nutzlast. Unser Nutzfahrzeug kann außerdem schon Fahren und Bremsen, da es diese Fähigkeiten geerbt hat, kann darüber hinaus aber noch Beladen und Entladen.

Die Vorteile einer objektorientierten Programmierung liegen somit auf der Hand: Durch die Definition von einfachen Grundklassen und die Erweiterung um darauf aufbauende Klassen kann ein sehr komplexes und interaktives Modell entstehen, das geeignet ist, komplexe Zusammenhänge abzubilden.

3.3.2 Die Klassen zur Repräsentation des Gebäudes

Um ein Gebäude abbilden zu können, wird ein hierarchisches System von aufeinander aufbauenden Klassen vorgeschlagen. Oben wurden schon mehrere Klassen vorgestellt: Das Grundstück, die Nachbarn und das Baufenster sind Klassen, die von der Basisklasse Geometrie abgeleitet werden. Die Geometrie ist eine der wichtigsten Klassen, da sie die Basisklasse für viele weitere Klassen bildet. Im Folgenden sollen die verwendeten Klassen hierarchisch

von oben nach unten erläutert werden. Das Grundstück und die Nachbarn sind eigentlich gleichwertige Klassen des Typs Grundstück, da sie hierarchisch das gleiche abbilden. Wie oben erwähnt, ist es so möglich, ganze Städte oder noch mehr im objektorientierten System abzubilden. Die Grenze wird hier nur durch Rechnerleistung und Sinnfälligkeit gesetzt. Es soll aber festgehalten werden, dass theoretisch riesige zusammenhängende Gebiete durch die



Speicherung von Grundstücken abgebildet werden können.

Unterhalb des Grundstücks liegt hierarchisch zunächst das Baufenster, das den wirklich zu bebauenden Raum abbildet. Dieses kann theoretisch natürlich mit dem Grundstück deckungsgleich sein. Genauso ist es möglich, auf einem Grundstück beliebig viele Baufenster zu definieren. Auch das Baufenster ist von der Klasse Geometrie abgeleitet.

Als nächstes gibt es die Klasse Gebäude. Auch hiervon sind natürlich mehrere pro Baufenster möglich. Das Gebäude ist ebenfalls von der Geometrie abgeleitet, hat jedoch noch einige weitere Eigenschaften, die unten beschrieben werden. Die Geometrie des Gebäudes repräsentiert dabei die Hüllform des Gebäudes. Es wird noch beschrieben werden, wie Vor- und Rücksprünge der Geometrie zu behandeln sind.

Abbildung 10: Hierarchische Ebenen des Klassenmodells

Hierarchisch direkt unterhalb des Ge-

bäudes folgt das Dach. Das Dach ist eine eigene Klasse, die wiederum aus Dach- und Giebelflächen besteht. Die Dachflächen werden jeweils als Projektion auf den Grundriss mit einer Basislinie und einer Neigung gespeichert. Auf diese Weise ist es möglich, auch komplexe Dachformen zu speichern. Darüber hinaus gibt es aber bereits Methoden zur Erstellung häufig auftretender Dachformen, wie Flachdach, Satteldach, Pultdach oder Walmdach. Die Giebelflächen definieren den Übergang von oberstem Geschoss zum Dach. Sowohl Dach- als auch Giebelflächen können wiederum Fenster und Türen besitzen. Eine Sonderform ist die Dachgaube, die über eine Öffnung im Dach und zugehöriger Gaubenkonstruktion gespeichert wird.

Die nächste logische Klasse des Gebäudes ist das Geschoss. Dieses ist nicht von der Geometrie abgeleitet, da es im hier beschriebenen Modell keine eigenen geometrischen Eigenschaften hat, sondern vielmehr aus der Summe der darin befindlichen Räume definiert wird. So sind auch komplexere Konstruktionen wie Split- oder Halbgeschosse möglich. Die Summe der Geschosse bildet das Gebäude.

Die Klasse Raum ist wiederum von der Klasse Geometrie abgeleitet und hat seine Grundeigenschaften geerbt. Die Geometrie beschreibt dabei die logische Form eines Raumes, was nicht unbedingt gleichbedeutend mit einer Wand sein muss. Auch offene Grundrisse sind in Räume mit eigenen Geometrien unterteilt und auch „Außenräume“, wie Terrassen sind Räume, die nur teilweise Wände haben.

Im Raum sind schließlich die ersten konkreten Bauteile verankert. So hat ein Raum Wände, Stützen, Decken und abgehängte Decken. Diese Bauteile sind eigene Klassen, die nicht von der Geometrie abgeleitet werden. Auch wenn die Wände logisch innerhalb der Räume verankert sind, so werden sie doch tatsächlich im Geschoss gespeichert. Die Räume haben lediglich eine Referenz auf diese Wände gespeichert, so dass zwar ein Zugriff auf Wände über Räume möglich ist, diese jedoch bei zwei angrenzenden Räumen nicht doppelt gespeichert werden müssen. Die Trennwand zwischen zwei Räumen ist so im Geschoss gespeichert, die Räume haben eine Referenz auf die entsprechende, gleiche Wand gespeichert.

Auch die Bauteile können als Sammelobjekt für weitere Unterobjekte verwendet werden. So kann eine Wand zum Beispiel mehrere Türen oder Fenster haben. Diese sind als Klasse Öffnungen implementiert, da sie einige gemeinsame Eigenschaften und Methoden haben.

Jedes einzelne Bauteil kann wiederum aus weiteren Unterklassen bestehen, die Unterelemente repräsentieren. So kann ein Fenster beispielsweise mehrere Flügel haben, einen Griff, eine bestimmte Scheibe. Wie dies gelöst ist, wird weiter unten bei der Erläuterung der Bauteilstile erklärt. Es sollen zunächst noch einige der Attribute und Methoden der einzelnen Klassen erläutert werden.

3.3.3 Die Geometrie

Wie schon beschrieben, ist die Geometrie eine der wichtigsten Basisklassen zur Repräsentation eines Gebäudes. Auf ihr basieren:

- Grundstück
- Baufenster
- Gebäude
- Raum
- Dach- und Giebelflächen

Attribute (Eigenschaften)

Es sollen hier nicht alle Attribute der Geometrie aufgelistet werden. Zu den wichtigsten Eigenschaften gehört aber die bereits oben beschriebene Speicherung in Form von Punkten und Vektoren, wobei ein Punkt und ein Vektor immer den nächsten Punkt ergeben. Es gilt:

$$P_0 + V_0 = P_1$$

$$P_1 + V_1 = P_n$$

$$P_n + V_n = P_0$$

Dabei ist die Aktualisierung von Punkten in der Klasse implementiert, das heißt, dass bei Änderung eines Punktes automatisch alle Vektoren aktualisiert werden. Natürlich hat die Geometrie auch eine Funktion zur Berechnung ihrer Fläche integriert. Neben vielen weiteren nützlichen Eigenschaften, wie der automatischen Rückgabe von kürzesten und längsten Seiten, besteht auch die Möglichkeit die gesamte Geometrie oder aber einzelne Kanten mit sogenannten *Sperrtags* zu belegen. Ein *Tag*, das englische Wort für ein Etikett oder einen Auszeichner, versieht die Geometrie mit weiteren, frei wählbaren Informationen. Die Sperrtags können dafür sorgen, dass einzelne Teile oder die gesamte Geometrie nicht verändert

werden dürfen, was, wie später zu zeigen sein wird, sehr wichtig für die Optimierung ist. Des Weiteren ist die Möglichkeit des Sperrens einzelner Objekte eine wichtige Eigenschaft zur Optimierung von importierten Entwürfen, die, wie noch gezeigt wird, ebenfalls möglich ist.

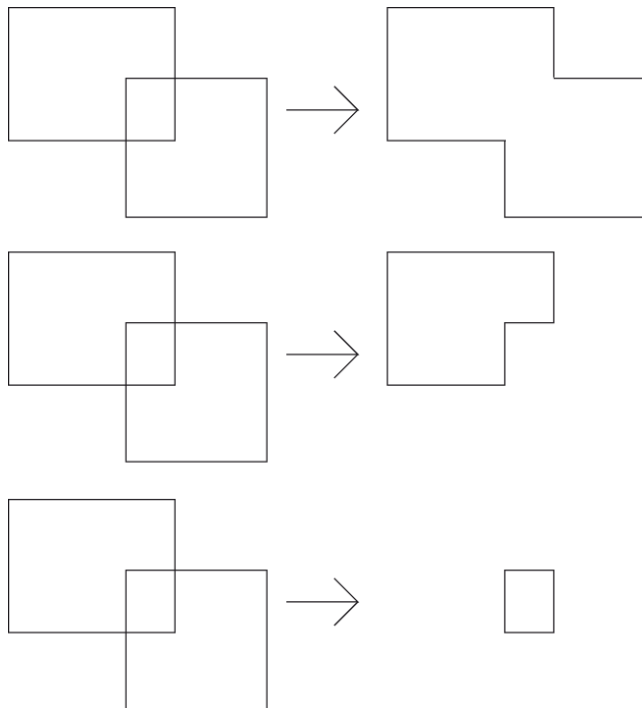


Abbildung 11: Boolesche Operationen

Diese Eigenschaften sind bei geometrischer Initialisierung und Optimierung von hoher Bedeutung (Beispiele für Algorithmen zu Booleschen Operationen beispielsweise in [Pen05], [Riv00] oder [Yon07]).

Des Weiteren sind natürlich Methoden zur weiteren Modifikation von Geometrien vorhanden, so wie das Bewegen von einzelnen Kanten oder der ganzen Geometrie oder die Überprüfung, ob ein beliebiger Punkt innerhalb einer Geometrie liegt (siehe beispielsweise in [Sch03]).

3.3.4 Der Raum

Wie schon gesagt, basiert der Raum ebenfalls auf einer Geometrie und hat somit alle Attribute und Methoden von dieser geerbt. Des Weiteren hat er auch eigene Attribute und Methoden. Dazu gehört beispielsweise eine eigene Energiebilanz. Diese kann separat für einen Raum berechnet werden, um diesen zu optimieren. Um dies zu können, muss der Raum natürlich konkret definiert sein. Dies geschieht dadurch, dass der Raum auch als Containerobjekt für verschiedene Bauteile fungiert. Dies sind Wände, Stützen, Decken, Deckenverklei-

Somit steht auch einer Optimierung von Umplanungen im Bestand nichts im Wege.

Methoden

Die Geometrie verfügt über zahlreiche geometrische Methoden wie etwa das Herausfinden von Schnittpunkten mit anderen Geometrien. Zu den wichtigsten implementierten Methoden gehören jedoch die Booleschen Operationen. Diese ermöglichen die Vereinigung (*join*), das Abziehen (*subtract*) und das Finden von Überschneidungsflächen (*intersect*) mit anderen Objekten der Klasse Geometrie.

dungen und Installationen. Mittels dieser Bauteile kann der Raum vollständig definiert und separat betrachtet werden.

Durch genau diese Informationen ist es natürlich auch möglich, die Baukosten separat für einen Raum zu berechnen. Dies ermöglicht eine sehr tiefgehende Analyse der zu erwartenden Kosten und eine wertvolle Planungshilfe für den Bauherren, der sehr differenziert entscheiden kann, was er sich leisten kann und was nicht.

Wie angedeutet, ist der Raum auch das Containerobjekt für Installationen. Dies ermöglicht die Optimierung von Räumen auf ihre Lage, so dass beispielsweise eventuelle Wasserinstallationen möglichst ökonomisch geplant werden können. Durch die Verortung von Wänden und Stützen als Tragwerkselemente ist auch eine dahingehende Optimierung kein Problem.

3.3.5 Die Außenform: Gebäude, Geschoss, Raum

Sowohl das Gebäude als auch der Raum basieren auf einer Geometrie. Das Geschoss ist jedoch eine separate Klasse, die aus der Addition von zusammenhängenden Räumen entsteht. Dies erhöht die Flexibilität des Systems, da Geschosse aus beliebigen räumlichen Objekten „zusammengesetzt“ werden können.

Die Geometrie des Gebäudes repräsentiert dabei immer die äußerste Hüllform des Gebäudes inklusive aller eventuellen Rücksprünge. Es ist sozusagen die Hüllform des Gebäudes. Die konkrete räumliche Ausbildung des Gebäudes entsteht durch die Formulierung von Räumen, sowie deren Zusammenfassung zu Geschossen. Außenflächen, die sich innerhalb der Hüllform des Gebäudes befinden, beispielsweise Dachterrassen, sind ebenfalls als Räume definiert, nämlich als Außenräume, die eben zu einer oder mehreren Seiten keine Wand haben. So ist es möglich, sehr genau zwischen geometrischer Ausformulierung und konkreter räumlicher Definition durch Bauteile zu unterscheiden, was der Software zusätzliche Möglichkeiten bei der Analyse und Optimierung lässt. Das konkrete, physisch repräsentierte Gebäude entsteht erst durch die Addition von konkreten Bauteilen.

3.4 Die Bauteilbibliothek

Es entsteht natürlich die Frage, wie die konkreten Bauteile wiederum repräsentiert werden können und wie die Vielzahl an Daten gespeichert werden kann. Es ist nicht praktikabel, die Daten über Stil, Material und technische Daten eines Bauteils direkt im Gebäudemodell zu

speichern. Die Datenmenge wäre sehr groß, die Aktualisierung von geänderten Daten wäre sehr aufwendig.

Die Speicherung sämtlicher Bauteildaten erfolgt mithilfe einer relationalen Datenbank. Im Gebäudemodell wird nur eine Referenz auf einen bestimmten Datenbankeintrag gespeichert. Dies hat den enormen Vorteil, dass die Bauteildaten völlig unabhängig vom Entwurf gehalten und aktualisiert werden können. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die einzelnen Bauteile beliebige Komplexität haben können, ohne das Gebäudemodell selbst zu beeinflussen. So kann beispielsweise ein Fenster entweder relativ einfach mit Höhe und Breite gespeichert werden, es können aber auch durch weitere Verweise auf Unterbauteile aller Teile, wie Griff, Rahmen und Scheibe einzeln gespeichert werden.

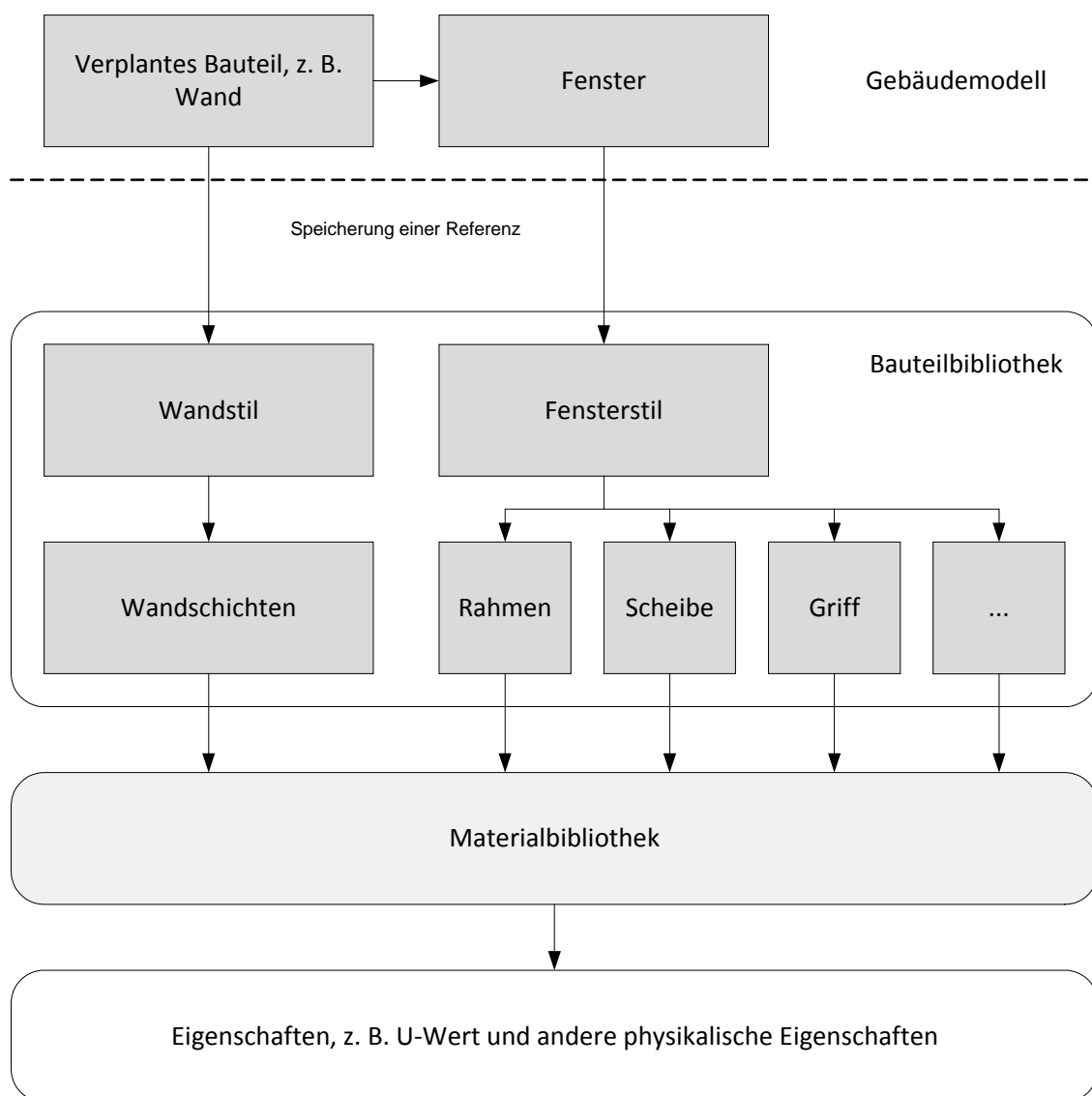


Abbildung 12: Struktur der Material- und Bauteildatenbank

Die Bauteilbibliothek wiederum baut auf einer Materialbibliothek auf. Diese stellt sozusagen die atomaren Informationen zur Verfügung. Jedes Bauteil oder Unterbauteil besteht aus einem oder mehreren Materialien. Dies garantiert die ständige Verfügbarkeit von Materialdaten, wie U-Wert, kann aber auch der Nachverfolgung von Materialien im Bestand dienen. Wurde beispielsweise ein bestimmtes Material in einem mit ganzheitlicher Architekturgenerierungssoftware geplanten Gebäude verbaut, so wird diese Information gespeichert. Sollte jetzt zu irgendeinem Zeitpunkt bekannt werden, dass zum Beispiel bestimmte Probleme oder Gesundheitsrisiken auftreten, so ist sofort bestimmbar, in welchen Gebäuden entsprechende Maßnahmen getroffen werden müssen.

Somit ist gewährleistet, dass das System so gestaltet ist, dass sich theoretisch jedes einzelne Bauteil oder Unterbauteil, theoretisch jede Schraube, eindeutig einem Bauteil in der Bauteilbibliothek und damit auch einem Material zuordnen lässt. Ein enormer Vorteil gegenüber der herkömmlichen Planung.

3.5 Die Ersterstellung eines architektonischen Entwurfs (Initialisierung)

Wie unter 1.7.1 beschrieben, ist der erste Schritt der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware die Initialisierung von Entwürfen. Die Initialisierung steht dabei für die Erstellung von Rohentwürfen. Wie in Kapitel 4 gezeigt werden wird, ist zur Durchführung des hier beschriebenen Algorithmus eine Vielzahl von Rohentwürfen nötig. Diese werden dann im Rahmen des Optimierungsalgorithmus kontinuierlich verbessert und führen schließlich zur Auswahl eines oder mehrerer optimierter Ergebnisse.

Das Ziel der Initialisierung ist somit die Erstellung von gültigen, möglichst differenzierten und nachverfolgbaren Entwürfen, die in die Optimierung eingehen können. Hier soll beschrieben werden, wie dieser Vorgang abläuft.

3.5.1 Gültigkeit

Mathematisch gesehen handelt es sich bei der Forderung nach Gültigkeit eines Entwurfes um eine Rand- oder Nebenbedingung, die eingehalten werden muss. Ist ein Entwurf ungültig, so wird er im Optimierungsverfahren sehr hart „bestraft“, was zur Aussortierung dieses Entwurfes führt.

Zu beachten ist, dass die hier formulierten Kriterien der Gültigkeit nicht unbedingt allgemeingültig sind. Es handelt sich teilweise um Kriterien, die speziell für den hier vorgeschlagenen Ansatz zur ganzheitlichen Architekturgenerierung entwickelt wurden. Diese sind jedoch nicht für alle denkbaren Softwarelösungen unbedingt in gleicher Weise vonnöten.

Damit ein Entwurf gültig ist, muss er verschiedene, hier definierte Eigenschaften aufweisen:

- Er muss Instanzen aller oben definierten nötigen Klassen beinhalten. Dies heißt konkret, dass ein Entwurf mindestens eine oder mehrere Instanzen der Klassen Gebäude, Geschoss, Dach, Raum, Wand, Fenster, Tür und Decke haben muss. Objekte wie zum Beispiel abgehängte Decken sind jedoch optional, da sie nicht unbedingt nötig sind, um einen gültigen Entwurf zu haben.
- Alle in einem Entwurf vorkommenden Geometrien, also zum Beispiel Gebäude oder Räume müssen geschlossen und entsprechend der definierten Regeln gegen den Uhrzeigersinn umlaufend gespeichert sein.
- Alle Objekte müssen einem in der Hierarchie übergeordneten Objekt zugeteilt sein. Das heißt, dass jedes Geschoss zu einem Gebäude gehört, genauso jedes Dach. Jeder Raum muss zu einem Geschoss gehören, jede Wand zu einem Raum, jede Öffnung (Fenster, Türen) zu einer Wand. Auf diese Weise ist eine eindeutige Bestimmung der Qualität eines Objektes im Kontext möglich. Es wird also beispielsweise möglich, die Qualität eines Raumes hinsichtlich der Belichtung zu überprüfen, da alle Öffnungen im jeweiligen Raum gespeichert sein müssen.
- Der Entwurf muss „lückenlos“ vorliegen. So ergibt beispielsweise die Summe aller Räume eines Geschosses das Geschoss, die Summe aller Geschosse ergibt das Gebäude. Diese geometrischen Gebilde müssen eine lückenlose Struktur ergeben. Auch eventuelle Außenräume oder Innenhöfe, die subjektiv als „Lücke“ im Gebäude erfahren werden, müssen als Geometrie vorliegen und sind als Außenraum definiert. Im Sinne der geometrischen Speicherung handelt es sich dabei aber um Räume wie jeder andere Raum auch.
- Alle Geometrien müssen kleiner oder gleich groß wie ihr hierarchisch übergeordnetes Objekt sein. Die Gebäude müssen beispielsweise als äußere geometrische Definition kleiner oder gleich groß sein wie das Baufenster. Größere Gebäude als Baufenster sind ungültig, da sie nicht baubar sind.

- Die baurechtlichen, in der Eingabe erfassten Nebenbedingungen müssen eingehalten werden. So darf ein Entwurf beispielsweise nur so viele Hochgeschosse haben, wie in der Bauordnung zugelassen. Ist durch die Kombination von geforderten Räumen, Baufenstergröße und maximaler Geschosshöhe keine Lösung erreichbar, so kann kein gültiger Entwurf entstehen.

Sind alle diese Randbedingungen erfüllt, so handelt es sich um einen gültigen Entwurf, der dem Optimierungsvorgang zugeführt werden kann. Es ist zu beachten, dass die Forderung nach Gültigkeit keine Aussage über die Qualität eines Entwurfes zulässt. Sie ist vielmehr die absolute Grundvoraussetzung zur Optimierung und Verbesserung des architektonischen Entwurfes. Dieser Vorgang ist durchaus als dem manuellen Entwurfsvorgang ähnlich anzusehen und entspricht einem ersten Vorentwurf. Auch wenn im manuellen Vorentwurf die Randbedingungen teilweise intuitiv und subjektiv eingehalten werden, so findet doch auch hier eine erste Vorauswahl möglicher Konfigurationen statt.

3.5.2 Differenziertheit

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, kann man sich die Suche eines Optimums im Rahmen einer Optimierungsfunktion ähnlich einer Hügellandschaft vorstellen, in der die höchsten Berge oder in unserem Falle die tiefsten Täler gesucht werden. Um diese Suche möglichst effizient zu gestalten, ist es von Vorteil, die initialisierten Entwürfe möglichst weit zu streuen.

Um es bildlich zu formulieren: Die Forderung nach Gültigkeit der Vorentwürfe gibt sozusagen die Grenzen der Landschaft und damit den Suchbereich vor. Entwürfe, die ungültig sind, liegen nicht im Suchbereich und damit nicht in unserer zu untersuchenden Landschaft.

Die Forderung nach Differenziertheit der Erstentwürfe entspricht somit der Streuung von Startpunkten. Wenn man sich die einzelnen Entwürfe als suchende „Wanderer“ durch die Landschaft vorstellt, die nach dem tiefsten Tal suchen, so kann man sich leicht vorstellen, dass eine Streuung der Startpositionen von Vorteil ist. Es ist ein riesiges Gebiet abzusuchen. Würde man nun alle Sucher an einem Punkt absetzen, so wäre die Effizienz der Suche, auch wenn sich alle Sucher in unterschiedliche Richtungen bewegen, sehr eingeschränkt. Es wäre zwar möglich, dass der Startpunkt zufällig gut gewählt wäre, aber dies kann nicht garantiert werden. Es ist zwar auch nicht auszuschließen, dass die Sucher einen sehr guten Punkt fin-

den, der sehr weit vom Startpunkt entfernt liegt, es ist jedoch klar, dass diese Suche wesentlich länger dauert, als wenn man schon einen guten Startpunkt hatte.

Entsprechend sollten unsere Entwürfe möglichst unterschiedlich sein, um die Startpunkte möglichst weit zu streuen. Um wieder in den architektonischen Bereich zu kommen: Es ist nicht sinnvoll, die Suche mit hundert gleichen Entwürfen zu beginnen. Es sollte vielmehr Entwürfe mit unterschiedlichsten Außenformen, Raumkonfigurationen und Bauteilprägungen geben. Nur so ist eine effiziente Suche möglich.

Diese Vorgehensweise ist bei allen Optimierungsproblemen üblich, bei denen man die ungefähre Position der guten Lösungen nicht kennt. Ist eine ungefähre gute Position schon bekannt, so verhält es sich natürlich anders (vgl. [Poh00], S. 60ff). Dies ist im vorliegenden Falle jedoch nicht unbedingt gegeben, abgesehen von der Strategie, die in 4.7.1 beschrieben wird. Hier kann es natürlich sein, dass schon einige Eigenschaften des Entwurfes bekannt sind: So kann es durch Bauvorschriften oder Nutzerwünsche ja sein, dass beispielsweise nur Entwürfe in Frage kommen, die eine rechteckige Außenform, Satteldach, zwei Hochgeschosse und eine Lochfassade haben. Dies führt aber im vorliegenden Falle lediglich zu einer Einschränkung des Suchraumes, was bedeutet, dass die Landschaft kleiner wird. Im Rahmen der gegebenen Grenzen sollten die Startpunkte aber trotzdem möglichst weit auseinanderliegen.

3.5.3 Nachverfolgbarkeit

Bei der Initialisierung der Entwürfe wird hier eine weitere Forderung formuliert, die später noch eine größere Rolle spielt: die Nachverfolgbarkeit. Dies bedeutet, dass das Zustandekommen eines bestimmten Entwurfes gekennzeichnet wird. Wie zu sehen sein wird, gibt es eine große Varianz möglicher Methoden der Erstinitialisierung, die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Vorgehensweisen ist riesig. Wenn man nun das Zustandekommen eines bestimmten Entwurfes speichert, so kann man nach vielen Durchläufen des Optimierungsalgorithmus Rückschlüsse auf den besten Weg ziehen.

Hierzu ist es nötig, die Rahmenbedingungen, die Initialisierung, den Optimierungsvorgang und die Bewertung eines Entwurfes zu speichern. Nach vielen Durchläufen kann somit eine Vorhersage über viel versprechende Methoden im Kontext bestimmter Randbedingungen gemacht werden.

Auch hier wieder ein Beispiel: Es ist vorstellbar, dass sich aus vielen Testläufen des Algorithmus ergibt, dass in Wohngebieten in kleinen Gemeinden sehr oft ein Entwurf mit rechteckiger Außenform, geschlossenen Räumen, Treppe neben dem Eingang und Lochfassade positiv beurteilt wird, sei es durch Vorschriften oder durch den Nutzer, so ist es sinnvoll, bei zukünftigen Generierungsaufgaben diese Erkenntnisse bereits in die Initialisierung einfließen zu lassen. Um wieder auf das verwendete Bild zurückzukommen: Es ist sinnvoll, viele Sucher im Bereich der bisher als gut bewerteten Lösungen „auszusetzen“. Dies heißt natürlich nicht, dass eine Beschränkung auf einen bestimmten Raum gefordert wird, da es immer möglich ist, dass das optimale Ergebnis woanders liegt, es ist aber durchaus sinnvoll, die Zahl der Sucher in einem bestimmten Bereich zu erhöhen, da man mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit sagen kann, wo gute Entwürfe zu finden sein werden.

Dieser Vorgang hat gewisse Ähnlichkeiten mit der sogenannten *Backpropagation* in neuronalen Netzen. Neuronale Netze liegen der Funktion unseres Gehirns zugrunde. Auch in unserem Gehirn ist das Feedback, also der Vergleich von erwarteten Ergebnissen mit den tatsächlichen von höchster Bedeutung (siehe [Haw06]) und führt zu besseren Ergebnissen. Dieser Vorgang soll hier auf einfache Weise nachgebildet werden, da so eine kontinuierliche Verbesserung der Optimierung zu erwarten ist. Die hier vorgeschlagene ganzheitliche Architekturgenerierung verfügt also über eine gewisse Lernfähigkeit in Bezug auf erwartete gute Ergebnisse.

3.5.4 Methoden der Initialisierung

Etwas überspitzt formuliert könnte man sagen, dass die Art und Weise des Zustandekommens eines Erstentwurfes egal ist. Wichtig ist, dass ein Entwurf, der der Initialisierung entstammt, die oben beschriebenen Regeln der Gültigkeit einhält. In diesem Rahmen wäre es natürlich sogar möglich, von Hand entworfene Gebäude einzugeben und einer Optimierung zuzuführen. Im Sinne einer ganzheitlichen Architekturgenerierung ist dies natürlich nicht unbedingt sinnvoll, da es das erklärte Ziel ist, das Gebäude komplett im Rechner zu entwerfen.

Trotzdem illustriert es zum Einen die Mächtigkeit des hier vorgeschlagenen Systems: Im Prinzip ist jeder Einzelschritt in gewisser Weise „ersetzbar“, das heißt er könnte beispielsweise auch von einem Menschen durchgeführt werden. Dies zeigt, in welchem Maße der Ansatz

der ganzheitlichen Architekturgenerierung sich, trotz der offensichtlichen Unterschiede, in den „normalen“ Entwurfsprozess eines Architekten integrieren lässt.

Zum Anderen sind natürlich auch Anwendungsmöglichkeiten für diesen Ansatz vorhanden: So könnte ein bereits bestehender, von Hand entstandener Entwurf im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung auf Faktoren optimiert werden, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Es kann aber auch von einem Startpunkt aus eine Varianz erzeugt werden, die dem Architekten wiederum hilft, seinen Entwurf zu verbessern.

Obwohl also die Art und Weise des Zustandekommens eines Erstentwurfes weitgehend egal ist, sollen hier verschiedene Möglichkeiten vorgestellt werden, einen Entwurf zu generieren. Es sollen auch Hinweise gegeben werden, welche Methoden sich als besonders robust im Hinblick auf Varianz und spätere Optimierbarkeit erwiesen haben. Die meisten der hier vorgeschlagenen Methoden sind natürlich keinesfalls auf den Einsatz im Einfamilienhausbau beschränkt, es kann aber durchaus sein, dass es Methoden gibt, die in anderen Bereichen zu besseren Ergebnissen führen werden. Es wird auch kein Anspruch im Hinblick auf Vollständigkeit der vorgeschlagenen Methoden erhoben, es soll lediglich ein Überblick über vielversprechende Ansätze gegeben werden. Außerdem soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie die oben formulierte Forderung nach Nachverfolgbarkeit realisiert werden kann.

Im Mittelpunkt der Initialisierung von Entwürfen steht natürlich die geometrische Initialisierung der Grundrisse, da diese mit Sicherheit am kompliziertesten ist. So ist beispielsweise die Erstinitialisierung im Hinblick auf konkret verwendete Bauteile wie beispielsweise Wandstile relativ banal: Im Hinblick auf das hier verwendete Modell der Bauteilbibliotheken ist eine Erstinitialisierung beispielsweise schon durch einen gleichgestreuten Zufallsgenerator möglich, der willkürlich alle zur Wahl stehenden Wandstile potentiell berücksichtigt. Auf diese Weise ist gegeben, dass alle Wandstile statistisch gesehen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit gewählt werden.

Im Hinblick auf die grundrissbezogene Erstinitialisierung sind zunächst zwei grundsätzliche Methoden zu betrachten: Die *Top-Down*-Methoden und die *Bottom-Up*-Methoden. Bei der ersten Methode wird der Grundriss hierarchisch von oben nach unten erzeugt. Das heißt, dass zunächst eine Außenform erzeugt wird und diese danach mit Räumen gefüllt wird. Diese Methode eignet sich natürlich besonders, wenn aus irgendeinem Grunde eine bestimmte

Außenform gegeben ist, beispielsweise durch eine bestimmte Bauvorschrift, oder, was mit vorliegendem Konzept auch möglich ist, die Planung im Bestand, wo natürlich schon ein mehr oder weniger bestimmter Rahmen zur weiteren Planung vorgegeben ist.

Bei den *Bottom-Up*-Methoden wird der Entwurf andersherum aufgezogen: Man plant zunächst die Räume, aus denen sich dann automatisch eine Außenform ergibt. Wie man sich leicht vorstellen kann, ist es mit diesen Methoden natürlich wesentlich einfacher, zum Beispiel Vorgaben hinsichtlich bestimmter fixer Raumgrößen einzuhalten. Auch die Raumkonfiguration im Hinblick auf nötige Verbindungen und Nachbarschaften von Räumen lässt sich so einfacher entwerfen, da man durch keine bestimmte Außenform „behindert“ wird. Das Ergebnis ist natürlich zunächst einmal in seiner Außenform beliebig und undefiniert, was in der Praxis häufig nicht von Vorteil ist. Man kann durch bestimmte Verfahren, wie das Übereinanderlagern ähnlicher Kanten eine nachträgliche Ordnung erzielen, doch hiermit macht man häufig die Vorteile dieser Methoden wieder rückgängig. Diese Methoden eignen sich also eher für Planungen, die auf keine bestimmte Außenform oder Ordnung zielen.

An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass hier keine der beiden Methoden im Sinne einer Allgemeingültigkeit bevorzugt oder vorgeschlagen werden soll. Beide Ansätze sind mit dem Konzept der ganzheitlichen Architekturgenerierung ohne weiteres vereinbar und können in unterschiedlichen Situationen zu guten Ergebnissen führen. Auch bestehende Lösungen beider Ansätze können zur Initialisierung verwendet werden.

Im Rahmen der hier in erster Linie behandelten Einfamilienhäuser und speziell im Kontext der Zielvorgabe einer Tauglichkeit für einen Massenmarkt soll hier jedoch in erster Linie auf Methoden der ersten Gruppe eingegangen werden, da es aus Kosten- und Rechtsgründen meistens vorteilhaft ist, sich im Rahmen bestimmter Außenformen zu bewegen, die häufig vorkommen. Wie beschrieben, ist in diesem Kontext den Methoden der ersten Gruppe der Vorzug zu geben. Im Folgenden soll also beispielhaft das Vorgehen zu einem Erstentwurf der ersten Gruppe skizziert werden, was jedoch nicht ausschließt, auch andere Methoden anzuwenden.

Die hier vorgeschlagene Methode ist auch im Hinblick auf das oben formulierte Ziel der Nachverfolgbarkeit zu bewerten. Die Vorgehensweise erlaubt es, das Zustandekommen eines Entwurfes sehr genau zu verfolgen und Schlüsse daraus in kommende Initialisierungen

einfließen zu lassen. Hierzu wird der Entwurf des Gebäudes in Einzelschritte zerlegt, indem zunächst die Außenform entworfen wird, danach, von außen beginnend, zunächst der Eingang/Flur, dann, falls vorhanden, die Treppe und sonstige Verkehrsflächen und schließlich die Nutzflächen verteilt werden. An jedem dieser Schritte stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, aus denen der Computer eine auswählt. Diese Wahl wird dokumentiert und lässt eine nachträgliche Analyse zu. Außerdem ergeben sich auf diese Weise zahlreiche Möglichkeiten eines Entwurfes, so dass die oben geforderte Streuung der Entwürfe im Suchraum gegeben ist. Es werden hier nur einzelne Wahlmöglichkeiten an jeder Stelle des Entwurfes aufgezeigt werden. Es lässt sich jedoch leicht erkennen, dass die Möglichkeiten breitgestreut sind und eine Erweiterung ohne weiteres möglich ist. Jede Wahlmöglichkeit wird durch einen Buchstaben dokumentiert, so dass sich am Ende ein „Wort“ ergibt, das den Entstehungsprozess eines Entwurfes dokumentiert.

Bei allen Initialisierungsmethoden ist zu berücksichtigen, dass prinzipiell jede gültige Lösung der Optimierung zugeführt werden kann, es ist jedoch ressourcen- und zeitsparend, wenn man Ansätze bereits bekannter guter Lösungen verwendet. Ein Beispiel: Wenn bereits bekannt ist, dass rechteckige Außenformen in 70% der Fälle zu einem guten Ergebnis im Sinne der Bauordnung oder der Nutzerwünsche führt, so ist es auch sinnvoll, schon eine gewisse Anzahl an Erstlösungen zu generieren, die diese Anforderung erfüllt. Man kann sich leicht vorstellen, dass es aufwendiger ist, ein nicht rechteckiges Gebäude durch spätere Optimierung in ein rechteckiges umzuwandeln, als ein bereits rechteckiges Gebäude nur noch auf andere Faktoren optimieren zu müssen. Hierbei muss natürlich auch eine gewisse Vorsicht angewandt werden. Wie beschrieben, ist es von großer Wichtigkeit, den Suchbereich von möglichst vielen Positionen aus anzugehen. So muss also in der Praxis eine Balance zwischen vielen bereits als gut bewerteten Ansätzen sowie neuen und explorativen Ansätzen gefunden werden, da eine zu starke Beschränkung auf bestimmte Lösungsansätze dazu führt, dass die „Kreativität“ der gefunden optimierten Lösungen eingeschränkt ist. Auch hier ist eine Analogie zum händischen Entwerfen des Architekten zu sehen: Auch dieser muss die Balance zwischen bekannten, guten Lösungen und potentiell guten neuen Lösungen finden, um stets das Optimum zu erreichen.

Bei der vorgeschlagenen Methode wird davon ausgegangen, dass bekannt ist, welche Räume in welcher Größe und mit welchen Verbindungen zu verplanen sind.

Die Außenform

Zunächst wird die Außenform entworfen. Bei dieser ist zu berücksichtigen, dass sie schon in etwa der Summe der Fläche der zu verteilenden Räume entspricht. Es wird außerdem aus Kosten- und Praktikabilitätsgründen davon ausgegangen, dass ein bestimmtes Konstruktionsraster vorliegt. Dieses ist natürlich nicht unbedingt nötig, führt aber zu praktischeren Lösungen und sorgt „automatisch“ für eine gewisse Ordnung.

Aus der Vielzahl der möglichen Außenformen sollen hier nur einige beispielhaft gezeigt werden:

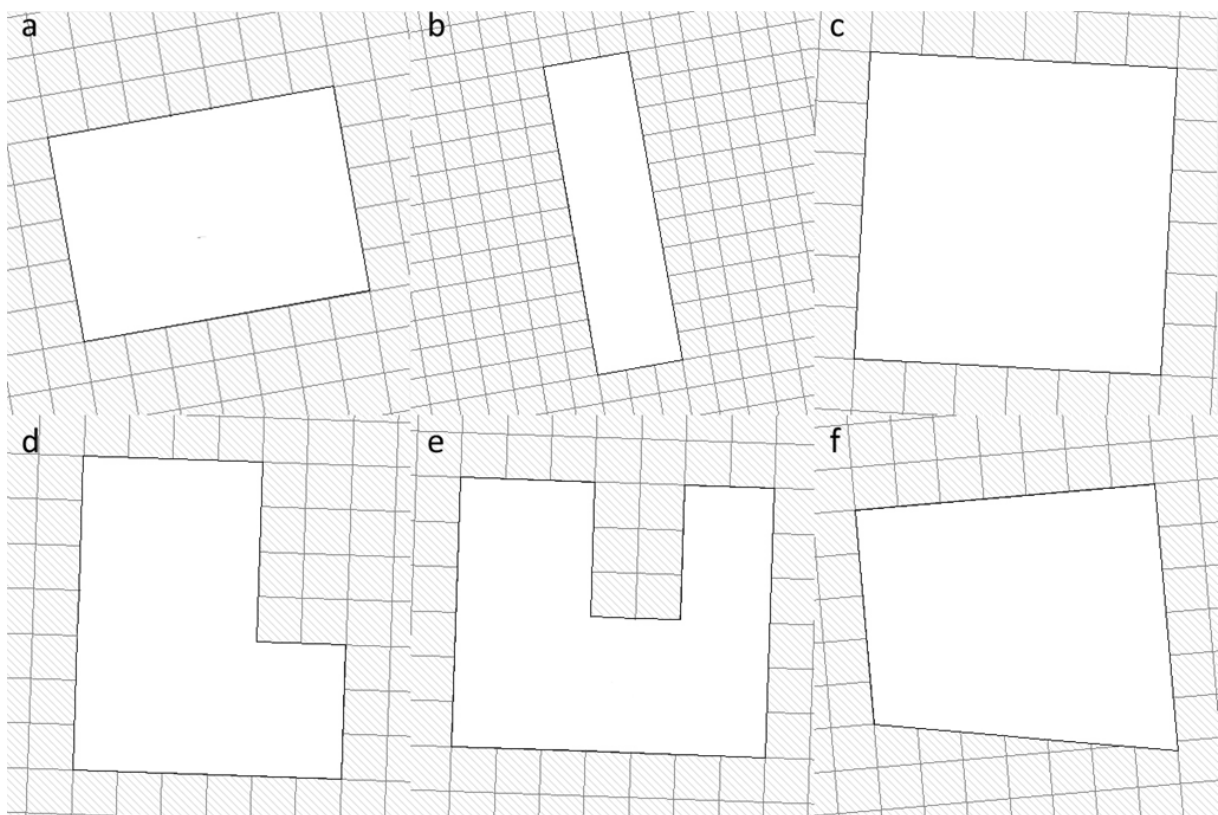


Abbildung 13: Beispiele generierter Außenformen

Abbildung 13 zeigt sechs Beispiele von häufigen Außenformen, die im Einfamilienhausbau verwendet werden und hier als Beispiele von Hüllformen zum Einsatz kommen. Dies sind in der abgebildeten Reihenfolge: Ein wohlgeformtes Rechteck, ein längliches Rechteck, ein Quadrat, eine L-Form, eine U-Form und ein Rechteck mit abgeschrägter Kante. Diese Liste ist natürlich beliebig verlängerbar, es soll aber gezeigt werden, dass aus den Kombinationen eine riesige Anzahl möglicher „Startentwürfe“ entstehen kann. Mit der Außenform steht auch schon der erste Buchstabe des „Generierungswortes“ zur Verfügung. Wie in der Abbildung zu sehen, ist jede Außenform mit einem Buchstaben gekennzeichnet. In diesem Bei-

spiel stehen für den ersten Initialisierungsschritt also sechs Anfangsbuchstaben zur Auswahl. Diese Buchstaben kennzeichnen aber nur Kategorien von Lösungen: So hat eine L-Form natürlich nicht immer die gleichen Kantenlängen und Proportionen, sondern diese unterliegen einem gewissen Zufall, so dass die tatsächliche Varianz noch viel höher ist.

Der Eingang/Flur (horizontale Erschließung)

Als nächster Schritt wird bei diesem Beispiel der Eingangsbereich beziehungsweise der Flur erzeugt. Dies hat sich als geschickt herausgestellt, da der Flur stets eine Verbindung nach außen haben muss. Auch hier gilt das oben beschriebene Prinzip der bekannten guten Lösung. Es ist eine logische Voraussetzung, dass der Eingangs- und Flurbereich eine Verbindung zur Außenwand hat. Mit diesem Wissen ist es einfacher, diesen Raum schon bei der Erstinitialisierung an der Außenkante zu platzieren, als dies dem Zufall zu überlassen und durch spätere Optimierung dafür zu sorgen, dass der Raum dort liegt. Es handelt sich somit zwar in gewissem Sinne um eine kreative Einschränkung, im mathematischen Sinne handelt es sich jedoch um eine einzuhaltende Nebenbedingung, die erfüllt sein muss, um die Optimierungsfunktion zu minimieren. In diesem Sinne handelt es sich bei diesem Vorgehen also um eine Vereinfachung des Optimierungsvorgangs.

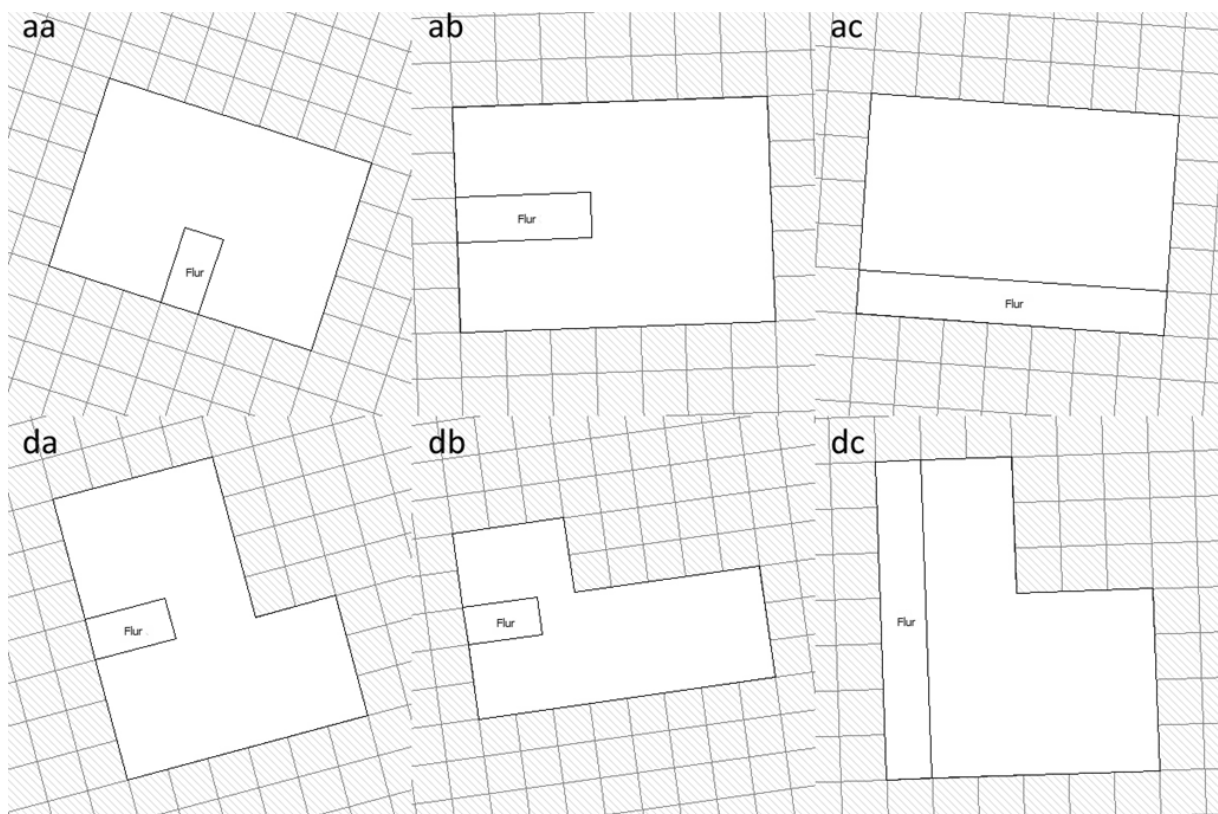


Abbildung 14: Beispiele generierter Flure in Kombination mit Außenformen

Abbildung 14 zeigt die beispielhafte Verwendung von drei verschiedenen Flurbereichen in Kombination mit zwei Außenformen. Flur „a“ ist ein zentral an der langen Seite der Außenform angeordneter Flur, „b“ ist ein zentral an der kurzen Seite angeordneter Flur, „c“ zeigt einen Langflur an der langen Seite der Außenform. Auch hier gilt, dass dies nur Beispiele möglicher Anordnungen sind. Die Auswahl kann beliebig erweitert werden, es seien nur quadratische, längliche oder in einer Ecke angeordnete Flure genannt.

Wie ebenfalls in der Abbildung zu sehen ist, wurde unser „Generierungswort“ um einen Buchstaben erweitert. Auch hier gilt, dass die Buchstaben natürlich nur Kategorien bestimmter Flure bezeichnen, die konkrete Ausprägung variiert von Fall zu Fall. Geht man an dieser Stelle von nur sechs möglichen Außenformen und sechs möglichen Fluren aus, so hat man bereits 36 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten.

Die Treppe (vertikale Erschließung)

Der nächste logische Schritt der Initialisierung ist die Treppe bzw. die vertikale Erschließung, die auch zum Beispiel einen Aufzug beinhalten kann. Auch dieser Schritt ist im oben beschriebenen Kontext der Erleichterung des Optimierungsverfahrens zu sehen. Auch hier ist es eine logische innere Voraussetzung, dass sich horizontale Erschließung, also Flur, und vertikale Erschließung, also Treppe, berühren und eine Verbindung zueinander haben. In diesem Sinne ist es also von Vorteil, im nächsten Schritt die Treppe mit einer Verbindung zum Flur zu erzeugen, um dieser Notwendigkeit Rechnung zu tragen. An dieser Stelle sei auch nochmals darauf hingewiesen, dass die hier als abgeschlossene Räume bezeichneten und dargestellten Einheiten keinesfalls in ihrer baulichen Ausprägung auch durch umgebende Wände repräsentiert sein müssen. Es sind natürlich auch offene Grundrisse möglich, in denen der Flur kein abgeschlossener Raum ist und die Treppe freistehend ist. Trotzdem sind diese Flächen als logische Bereiche abgrenzbar und müssen als solche in den Entwurf eingehen.

Auch hier sollen einige Beispiele gezeigt werden:

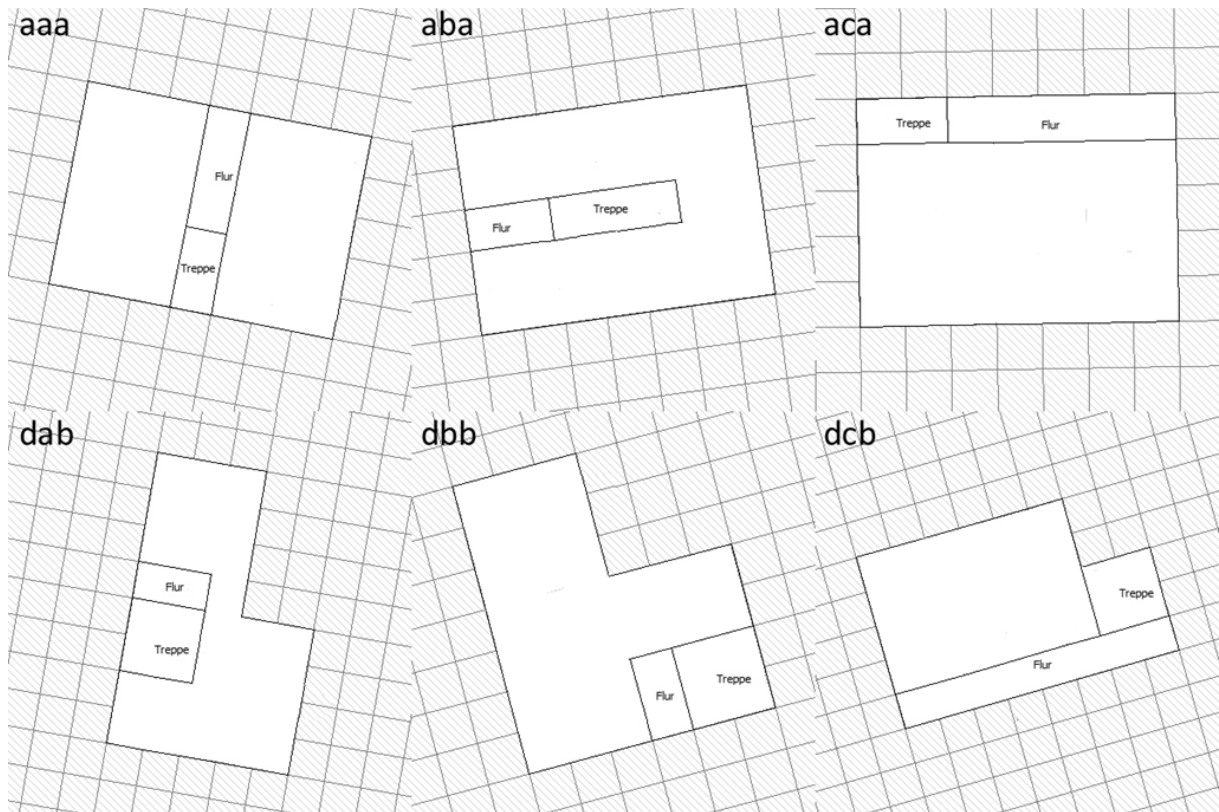


Abbildung 15: Beispiele generierter Treppen

Abbildung 15 zeigt analog zu den vorherigen Abbildungen Beispiele, wie die Treppen mit verschiedenen Methoden angeordnet werden können. Die obigen Beispiele zeigen den Treppentyp „a“, der in der Flucht des Flurs angeordnet wird. Es wird hier bereits ersichtlich, wie ein einziger Treppentyp in Kombination mit unterschiedlichen Flurtypen zu sehr unterschiedlichen Ausprägungen kommen kann, obwohl die Art der Treppengenerierung immer dieselbe ist. Auch hier ist wieder zu berücksichtigen, dass die konkrete Ausprägung, also die Maße der Treppe natürlich unterschiedlich sein können.

Auch die Beispiele im unteren Bereich der Abbildung zeigen alle denselben Treppentyp „b“. Auch hier ist zu sehen, wie ein einziger Treppentyp in Kombination mit immer derselben Außenform, aber mit unterschiedlichen Treppentypen wieder zu sehr unterschiedlichen Ausprägungen gelangen kann. Das Spektrum der Möglichkeiten erweitert sich mit jedem einzelnen Schritt und das obwohl hier aus Platzgründen lediglich zwei unterschiedliche Treppentypen gezeigt werden. Auch hier sind natürlich unzählige weitere Möglichkeiten vorhanden, eine Treppe anzuordnen und auszuprägen, es sei nur darauf verwiesen, dass in den hier dargestellten Beispielen lediglich gerade ein- und zweiläufige Treppen verwendet wurden. Es

sind natürlich noch viele andere Treppenarten realisierbar. Auch durch diesen Schritt wurde unser „Initialisierungswort“ natürlich wieder um einen Buchstaben ergänzt.

Die Varianz kann auch mathematisch belegt werden. Wenn man auch an dieser Stelle von wieder nur sechs verschiedenen Treppentypen ausgeht, was sicherlich unrealistisch ist, da die tatsächliche Varianz viel höher ist, so hat man an dieser Stelle schon 216 Kombinationsmöglichkeiten, und dies ohne die tatsächliche Varianz durch unterschiedliche Maße und konkrete Ausprägungen. Geht man von jeweils zehn verschiedenen Methoden aus, was einfach möglich ist, so hat man bereits 1000 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten.

Die restlichen Räume und grundrissbezogene Komplexitätsebenen

An diesem Punkt der Initialisierung steht also ein Gebäude zur Verfügung, das über eine Außenform sowie, mit Flur und Treppe, über horizontale und vertikale Erschließung verfügt. Um die nun folgenden restlichen Räume zu verteilen, soll zunächst der Begriff der grundrissbezogenen Komplexitätsebenen eingeführt werden. Mit diesem Begriff soll der Grad der Verschachtelung im Rahmen nötiger Verbindungen zwischen Räumen erfasst werden. Konkret bedeutet dies, dass vorgeschlagen wird, Raumprogramme im Zusammenhang mit der

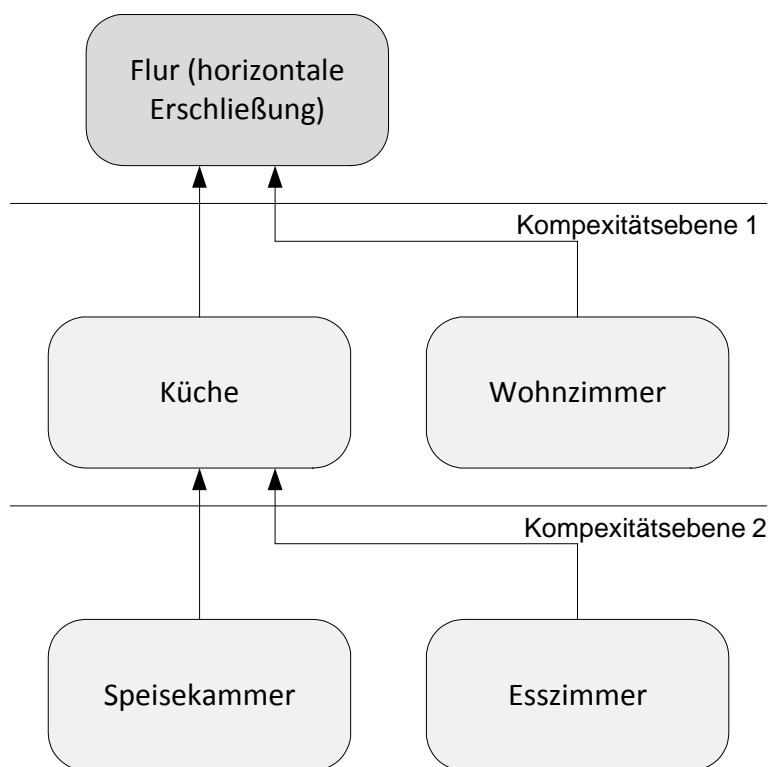


Abbildung 16: Grundrissbezogene Komplexitätsebenen

Generierung von Grundrissen anhand des logischen Abstands zwischen horizontaler Erschließung und Räumen zu klassifizieren, das heißt, dass ein Entwurf eine umso höhere Komplexitätsebene hat, je weiter ein Raum logisch von der horizontalen Erschließung entfernt ist. Ein konkretes Beispiel aus dem Bereich der Einfamilienhäuser kann dies deutlich machen: Beispielsweise gehört eine Küche, die eine direkte Verbindung zum Flur benötigt zur Komplexitätsebene 1, da sie eine direkte

Verbindung hat. Wird jetzt beispielsweise eine Speisekammer gefordert, die keine nötige Verbindung zum Flur, wohl aber zur Küche hat, so gehört die Speisekammer zur Komplexitätsebene 2.

Abbildung 16 zeigt ein einfaches Beispiel aus dem Bereich des Wohnbaus grafisch. Diese Komplexitätsebenen sind wichtig, da vorgeschlagen wird, dass anhand dieser Komplexitätsebenen das weitere Vorgehen entschieden wird. Im Einfamilienhausbau sind zumeist nur Räume von einer maximalen Komplexitätsebene von zwei zu finden, anders als im Bau komplexerer Gebäude, wie Krankenhäusern oder auch Verwaltungsbauten mit hochspezialisierten Nutzungsbereichen, die auch wesentlich höhere Komplexitätsebenen aufweisen. Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass es sich bei Komplexitätsebenen lediglich um logische Objekte handelt, diese sagen jedoch nichts über tatsächliche Entfernungen in einem Gebäude aus, ja es ist sogar möglich, dass ein Raum der Komplexitätsebene 2 baulich nicht von der horizontalen Erschließung getrennt ist, man denke nur an einen offenen Grundriss, in dem Küche, Esszimmer und Wohnzimmer baulich nicht voneinander getrennt sind. Obwohl es sich hierbei um ein Objekt der Komplexitätsebene 2 handelt, wird das gesamte Gebilde baulich als ein Raum erlebt.

Bei der konkreten weiteren Initialisierung wird aufgrund der relativ niedrigen Komplexität eines Einfamilienhauses vorgeschlagen, den Grundriss aus Nutzungsbereichen heraus weiterzuentwickeln. Dies heißt, dass alle Objekte, die eine Komplexitätsebene von 2 oder höher haben, zunächst mit dem logisch verbundenen Raum der Komplexitätsebene 1 zusammengefasst werden. Wenn wir also in diesem einfachen Beispiel von einem noch verbleibenden Raumprogramm von Küche, Speisekammer, Esszimmer und Wohnzimmer haben, wie in obiger Abbildung dargestellt ist, so werden diese Räume zunächst in zwei Nutzungsbereiche zusammengefasst: Einen Bereich bildet das Wohnzimmer, den anderen Bereich bilden Küche, Speisekammer und Esszimmer, da diese logisch zusammenhängen. Nun soll also vom Flur ausgehend die verbleibende Fläche des Erdgeschosses in zwei Teile geteilt werden. Dabei ist es im Rahmen der einfacheren Optimierung von Vorteil, wenn die jeweiligen Gebilde bereits in etwa über die Fläche verfügen, die später zur Verfügung stehen soll.

Nach diesem Schritt könnte das Gebäude so aussehen:

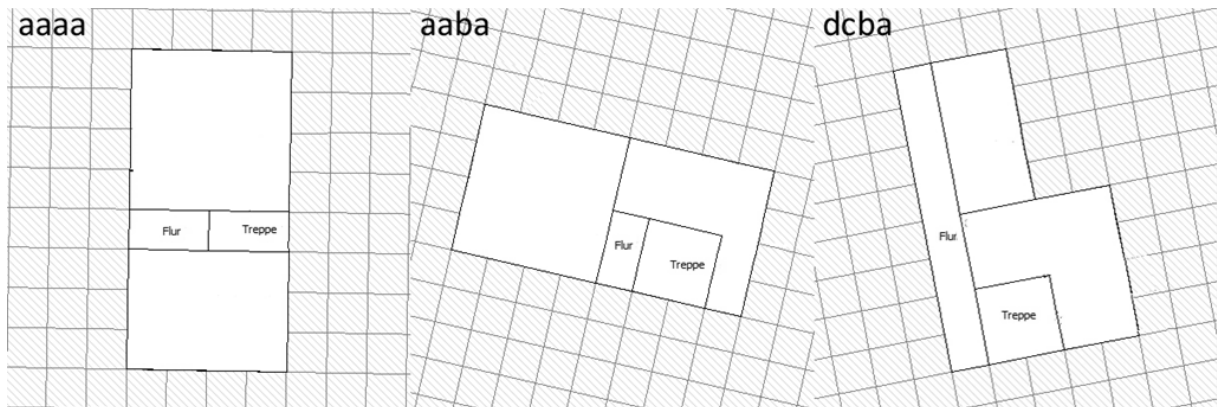


Abbildung 17: Das Gebäude nach dem vierten Schritt

Nach diesem Zwischenschritt werden die so entstandenen zwei Teilbereiche des Gebäudes weiter unterteilt. Auch hier gilt oberes Prinzip der gerichteten Initialisierung zur Erleichterung der Optimierung. Es kann bereits an dieser Stelle auf Faktoren geachtet werden, die später noch von Bedeutung sein werden, etwa Raumgrößen, Ausrichtung oder Belichtung beziehungsweise Ausrichtung zu den Außenwänden. Auch hier gilt, dass eine Berücksichtigung dieser Faktoren an dieser Stelle zu einer Erleichterung der Optimierung führt, gleichzeitig aber die Varianz der Entwürfe nicht eingeschränkt werden soll. Nach dem nächsten Zwischenschritt, also der endgültigen Vergabe der Räume und Zuweisung der Nutzung kann das Gebäude also folgendermaßen aussehen:

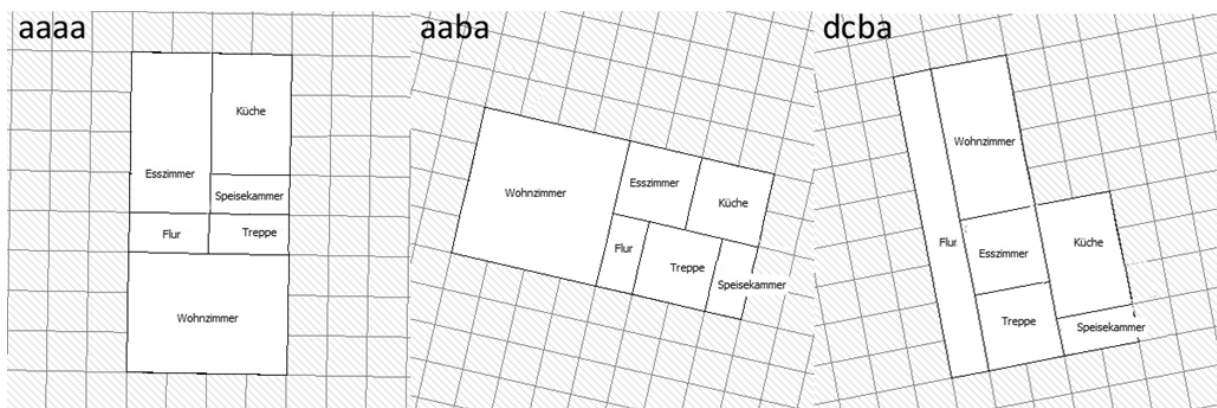


Abbildung 18: Der fertige "Rohentwurf"

Nach diesem Schritt, der natürlich auch wieder mit unterschiedlichen Methoden erfolgen kann, ist der Vorentwurf, zumindest des Erdgeschosses, fertig. An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei lediglich um Vor- oder auch „Rohentwürfe“ handelt. Es geht lediglich darum, möglichst gute Startpositionen für die anschließende Opti-

mierung zu finden. Daher sind natürlich auch noch offensichtliche Mängel in den Entwürfen vorhanden. Diese lassen sich mit den relativ einfachen Mitteln der Initialisierung nicht ausmerzen, dazu ist dann die Optimierung da.

Natürlich lassen sich auch an dieser Stelle zahlreiche andere Methoden verwenden, um die restlichen Räume zu verteilen. So ist es auch denkbar, nicht in zwei Schritten vorzugehen, sondern die Räume direkt zu verteilen, oder aber ausschließlich nach Orientierung vorzugehen und so weiter. Es hat sich in der Praxis jedoch herausgestellt, dass die Verteilung der Verbindungen unter den Räumen zu den schwierigsten Faktoren gehört, auch was die Optimierung anbelangt, so dass es unbedingt von Vorteil ist, bei der Initialisierung, die ein weiteres Mal als Suche guter Startpositionen zu verstehen ist, auf diesen Faktor großen Wert zu legen und vor allem im Hinblick auf diese Faktoren ein gutes Ergebnis zu liefern.

Zur Illustration der vorgeschlagenen Vorgehensweise wurde bewusst ein sehr einfaches Raumprogramm gewählt, trotzdem erscheint dieses geeignet, die Prinzipien der Initialisierung aufzuzeigen. An diesem einfachen Beispiel kann auch schon recht gut aufgezeigt werden, inwiefern die Nachverfolgbarkeit der Initialisierung von Vorteil ist. Beim beschriebenen Vorgehen werden im vierten Schritt die Nutzungsbereiche entsprechend ihrer Verbindung zum Flur verteilt. In unserem einfachen Beispiel gibt es neben der Treppe nur zwei Räume, die eine Verbindung zum Flur haben müssen, was bedeutet, dass es relativ einfach ist, diese Bereiche am Flur anzuordnen. Wenn man nun aber davon ausgeht, dass man vielleicht mehrere Bereiche, zum Beispiel vier Stück am Flur anordnen muss, so sieht man bei einem Blick auf Abbildung 18 sehr leicht, dass diese beim linken Gebäude sehr schwierig wäre, da der Flur hier so klein ist, dass es zu schlauchförmigen Räumen führen würde, wenn man nun zwei weitere Räume mit einer entsprechenden Verbindung einfügen wollte. Man sieht aber ebenso, dass dies beim rechten Gebäude sehr viel einfacher wäre. Bereits an dieser Stelle könnte man also den schnellen Schluss ziehen, dass die Flurmethode „c“ besser geeignet ist als Flurmethode „a“, um viele am Flur angeordnete Räume unterzubringen.

Hätte man also ein Raumprogramm, das erforderte, vier Räume am Flur unterzubringen, so könnte man nach Betrachtung von sehr vielen initialisierten Gebäuden und der Bewertung der Zwischenergebnisse bereits zu dem Schluss kommen, dass bei einem entsprechenden Raumprogramm mehr Gebäude mit Flurtyp „c“ initialisiert werden, um dieser Tatsache Rechnung zu tragen. Gleichzeitig muss aber hier schon darauf hingewiesen werden, dass

natürlich auch bei Flurtyp „a“ die Möglichkeit besteht, dass dieses Gebäude durch Veränderungen später noch zu einem guten Ergebnis führt und dieses nicht völlig ausgeklammert werden sollte. Da aber natürlich nicht alle Zusammenhänge so einfach zu entdecken sind, wird die genaue Vorgehensweise bei der Nutzung des Feedbacks im Rahmen der Initialisierung an späterer Stelle genauer erläutert werden.

Die weiteren Geschosse

Auf die genaue Initialisierung der weiteren Geschosse soll nicht so ausführlich eingegangen werden, wie auf das Erdgeschoss, da das hier vorgeschlagene Prinzip der Initialisierung ausreichend ausführlich beschrieben wurde. Es sollen aber einige Grundprinzipien der weiteren Vorgehensweise erläutert werden. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, bei der Initialisierung vom Erdgeschoss auszugehen und von hier aus die weiteren Geschosse, so vorhanden, zu entwickeln. Durch die zwangsläufige Anordnung des Eingangs beziehungsweise des Flurs im Erdgeschoss hat man hier einen sehr guten Ausgangspunkt für die weitere innere Entwicklung des Grundrisses.

Daher wird vorgeschlagen, bei den folgenden Geschossen, seien es Keller- oder Obergeschosse, ebenso logisch vorzugehen und von der Erschließung auszugehen. Daher sollte zunächst die vertikale Erschließung in die folgenden Geschosse kopiert werden, da diese in der Regel unverrückbar ist und stets übereinander liegen sollte. Von Ausnahmen, wie einer einläufigen Treppe, die im folgenden Geschoss am oberen Ende der vorherigen Treppe fortgesetzt wird, kann an dieser Stelle Einfachheit halber abgesehen werden.

Nachdem die vertikale Erschließung kopiert wurde, sollte als nächstes die horizontale Erschließung, also der Flur, kopiert oder verteilt werden. Dieser Vorgang ist natürlich je nach Art der verwendeten Treppe anzupassen. Sollte es sich um eine zweiläufige Treppe handeln, so kann zunächst die Erschließung aus dem Erdgeschoss einfach kopiert werden. Sollte es sich jedoch um eine einläufige Treppe handeln, so muss die horizontale Erschließung natürlich entsprechend verändert werden, um zu gewährleisten, dass eine Verbindung besteht und der Entwurf im Sinne der oben beschriebenen Regeln gültig bleibt. Bei dieser Anpassung der horizontalen Erschließung können natürlich analog zu den oben vorgestellten Methoden auch wieder zahlreiche unterschiedliche Methoden zur Anwendung kommen. Auch in den weiteren Geschossen wird danach ein analoges Vorgehen zum Erdgeschoss, nämlich eine schrittweise Verteilung unter Berücksichtigung der Komplexitätsebenen, vorgeschlagen. Hier

müssen natürlich nicht zwangsläufig die gleichen Methoden wie im Erdgeschoss zum Tragen kommen, so dass sich eine weitere Varianz der Möglichkeiten der Generierung ergibt.

Konkret bedeutet dies, dass man mit der hier vorgestellten Methode über fünf Schritte im Erdgeschoss und drei bis vier Schritte in jedem weiteren Geschoss verfügt. Geht man nun von einem einfachen Haus mit einem Kellergeschoss, einem Erdgeschoss und einem Obergeschoss aus, so erlaubt dies bei nur jeweils sechs unterschiedlichen zur Verfügung gestellten Methoden pro Schritt eine Varianz von sechs hoch 13, also einem Wert von über 13 Milliarden. Wenn man nur von fünf wirklich unterschiedlichen Schritten ausgeht, so hat man trotzdem immerhin knapp 8000 Möglichkeiten der Kombination.

Die Bauteile

Um einen gültigen Entwurf zu erhalten, ist es natürlich auch nötig, die Bauteile einer Erstinitalisierung zuzuführen. Hier sind natürlich zunächst die Wände zu nennen, die durch die Initialisierung der Geometrie sozusagen automatisch entstanden sind. Wie oben beschrieben, ist es hier natürlich möglich, durch eine gleich verteilte Zufallsfunktion eine gleichmäßige Auswahl aller vorhandenen Wandstile zu wählen. Eine bessere Option ist es natürlich, auch hier zunächst eine Vorauswahl zu treffen. So ist es beispielsweise sinnvoll, für Außenwände nur die Stile zu nehmen, die auch für Außenwände in Frage kommen und gleiches für die Innenwände zu tun. Abgesehen von solchen, zwar banalen, aber wichtigen Entscheidungen, wird tatsächlich vorgeschlagen, eine Zufallsfunktion zur Auswahl eines Wandstiles zu verwenden. Auch hier wird der gewählte Wandstil gespeichert und so der Nachverfolgbarkeit zugeführt. So ist es, analog zur Initialisierung der Geometrie, ebenso möglich, bei zukünftigen Initialisierungen eine Vorauswahl der bisher besten Ergebnisse zu treffen.

Auch für die Auswahl der Fensterstile wird prinzipiell eine ähnliche Vorgehensweise vorgeschlagen. Allerdings ist die erste Auswahl von Fenstern natürlich etwas komplexer als die Auswahl von Wandstilen. Neben der reinen Auswahl eines Stiles, ist hier natürlich auch die Anordnung der Fenster von Bedeutung. Über die Wahl der Fenstergröße, -formate und der Anordnung der Fenster im Gebäude lässt sich eine klare stilistische Aussage treffen. Die Behandlung des Baustils eines Gebäudes wird später genauer gesprochen werden. Insofern hat es sich als nicht zweckmäßig herausgestellt, die Auswahl von Fensterstilen basierend auf stilistischen Erwägungen zu treffen. Trotzdem können auch hier verschiedene Methoden zum Einsatz kommen, die gespeichert werden, und die später analysiert werden können. So

ist es beispielsweise für viele Stile sinnvoll, auch bei der Verteilung von Fenstern von einem festen Konstruktionsraster auszugehen. Eine einfache, aber bei der Erstinitialisierung durchaus sinnvolle Methode, ist es, ein gängiges Fensterformat zufällig auszuwählen und überall, wo es geht, ein Fenster in die entsprechende Wand einzufügen. Weitere Methoden beinhalten beispielsweise die Anordnung von Fenstern in Bandrastern oder eine völlig freie Verteilung. An dieser Stelle muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei an dieser Stelle nicht um eine Anordnung im Sinne einer Aussage zu einem Baustil handelt, sondern dass auch hier ein guter Startpunkt gesucht wird, um spätere stilistische Aussagen möglichst einfach zu erreichen.

Die Verteilung von Türen ist natürlich recht einfach. Hier wird bei der Erstinitialisierung in der Regel für jede geforderte Verbindung zwischen Räumen eine Tür gesetzt. Ähnlich zu den Wandstilen wird auch hier eine zufällige Auswahl unter Berücksichtigung der Verwendung, innen oder außen, vorgeschlagen. Des Weiteren ist es an dieser Stelle möglich, Türen durch Öffnungen zu ersetzen, oder aber ganze Wände zu löschen, um einem offenen Grundriss Rechnung zu tragen. Auch hier wird von einer Speicherung der Vorgehensweise ausgegangen, um später Rückschlüsse auf ein gutes Verfahren ziehen zu können.

Des Weiteren werden an dieser Stelle, ebenfalls zufällig, Stile für Boden beziehungsweise Decke ausgewählt. Auch hier findet eine zufällige Auswahl unter Speicherung der Vorgehensweise statt.

Mit der konkreten Auswahl von Stilen für die nötigen Bauteile ist die Erstinitialisierung abgeschlossen. Es ist ein gültiger Entwurf vorhanden. Durch die hier zuletzt beschriebene Auswahl von konkreten Bauteilen erhöht sich die Menge der potentiellen Kombinationen natürlich weiter. Es wird also evident, dass schon mit relativ wenigen Methoden pro Initialisierungsschritt eine riesige Varianz von Entwürfen realisierbar ist.

Weitere Möglichkeiten der Initialisierung

Wie oben beschrieben, ist die hier genauer beschriebene, schrittweise Methode natürlich nicht die einzig mögliche. Es ist auch möglich, völlig anders vorzugehen, sei es durch ein „Zusammensetzen“ von Räumen mit daraus entstehender Außenform, oder durch eine Kombination von Generierung einer Außenform und Füllen durch wachsende Räume. Es sei hier nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Methoden völlig verlustfrei auch im

Rahmen der hier beschriebenen ganzheitlichen Architekturgenerierung einsetzbar sind. Wie gesagt, ist es letztlich inhaltlich ohne Bedeutung, wie ein gültiger Entwurf zustande kommt.

Der hier vorgeschlagene Weg hat jedoch, besonders unter Berücksichtigung der einfachen Nachverfolgbarkeit, die noch genauer zu beschreiben sein wird, zu guten Ergebnissen geführt. Da die Initialisierung der „Rohentwürfe“ letztlich nur ein Zwischenschritt auf dem Weg zum optimalen Gebäude ist, soll auf die verschiedenen anderen Möglichkeiten nicht mehr genauer eingegangen werden, sondern nur auf die Existenz dieser Möglichkeiten verwiesen werden. Für die weitere Funktion der ganzheitlichen Architekturgenerierung ist es jedoch nur von Bedeutung, dass am Ende der Initialisierung ein Entwurf vorliegt, der die oben geforderten Eigenschaften der Gültigkeit, der Differenziertheit und der Nachverfolgbarkeit erfüllt. Die hier genau beschriebene Methode erfüllt diese Eigenschaften und ist somit geeignet, zum nächsten Schritt der ganzheitlichen Architekturgenerierung zu führen.

4 Die Optimierung

Nachdem die im vorherigen Kapitel beschriebene Initialisierung abgeschlossen ist, soll nun der wichtigste Schritt der ganzheitlichen Architekturgenerierung erörtert werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt ein wie in 3.5.1 beschriebener gültiger Entwurf vorliegt. Wie zu zeigen sein wird, ist in der Praxis der hier vorgeschlagenen Optimierung nicht nur ein Entwurf nötig, sondern Dutzende oder sogar hunderte.

Dabei soll in diesem Kapitel zunächst die grundlegende Struktur des Algorithmus beschrieben werden. Daraufhin werden die auf den Entwurf Einfluss nehmenden Kategorien festgelegt und vorgestellt. Danach werden die den einzelnen Kategorien zugeordneten Parameter beschrieben und die mathematische Quantifizierbarkeit dieser Parameter bewiesen werden. Es wird genau auf die Verarbeitung der Parameter im Rahmen des Optimierungsalgorithmus sowie auf die Umsetzung des Algorithmus eingegangen werden.

Am Ende des Kapitels wird die Steuerung der Optimierung, sowie der Rückfluss der durch die Nachverfolgbarkeit gewonnenen Erkenntnisse beschrieben werden.

4.1 Der Optimierungsalgorithmus

Bei dem hier vorgeschlagenen Optimierungsalgorithmus handelt es sich um einen modifizierten evolutionären Algorithmus. Bei evolutionären Algorithmen, oder wie sie, vor allem früher, auch genannt wurden, genetischen Algorithmen, handelt es sich, wie der Name schon sagt, um einen Algorithmus der Mehrkriterienoptimierung, der auf der biologischen Evolution basiert.

Darwin stellte das Prinzip der Evolution erstmals in seinem 1859 erschienen Buch „On the origin of species by natural selection“ vor [Dar59]. Die von DARWIN und anderen entworfene Selektionstheorie geht von wenigen einfachen Tatsachen aus (siehe beispielsweise [Lin89], S. 424):

- Lebewesen stehen untereinander in ständigem Wettbewerb um günstige Lebensbedingungen
- die Nachkommen eines Elternpaares sind nicht alle untereinander gleich
- die Lebewesen erzeugen viel mehr Nachkommen als zur Erhaltung der Art notwendig wären. Trotzdem bleibt die Individuenzahl einer Art konstant.

Die biologische Evolutionstheorie geht, kurz gesagt, davon aus, dass im Wettbewerb innerhalb einer Art und auch zwischen Arten stets die am besten an ihre Umwelt angepassten Individuen überleben. Dabei wird in der Biologie die Tauglichkeit eines Lebewesens zum Überleben an der individuellen Fitness gemessen. In der Biologie ist vor allem die Zahl der überlebenden Nachkommen eines Individuums geeignet, die Fitness zu messen ([Lin89], S. 424).

Es wird also davon ausgegangen, dass sich Arten durch die Anpassung an einen natürlichen Lebensraum oder eine ökologische Nische weiterentwickeln. Es erfolgt so eine immer stärkere Spezialisierung auf erfolgreiche Muster. Dabei wird die Ausprägung eines Individuums durch seine Gene bestimmt. Hierbei wird zwischen Genotyp und Phänotyp unterschieden. Der Genotyp beschreibt die Ausprägung des Genoms eines Individuums, also den Zustand seiner Gene, während der Phänotyp das daraus resultierende Ergebnis, also beispielsweise das Aussehen, beschreibt. So kann es beispielsweise durch inaktive Gene dazu kommen, dass zwei Lebewesen unterschiedlichen Genotyps den gleichen Phänotyp haben.

Alle Gene einer Population nennt man den Gen-Pool. Der Gen-Pool einer Population wird durch verschiedene evolutionäre Faktoren geändert. Dies sind vor allem Mutation, Selektion und Zufall. Der Zufall wird in der Biologie auch als Gendrift bezeichnet. Für die Wirksamkeit von Mutation und Selektion sind vor allem Rekombination der Gene sowie Separation des Gen-Pools wichtig. Dies führt dazu, dass bestimmte Eigenschaften verstärkt werden oder auftauchen, während andere verschwinden.

Einfach gesagt ist ein evolutionärer Algorithmus eine Abbildung des biologischen Vorgangs der Evolution auf eine Maschine. Wie bei allen Vorgängen der Bionik wird hierbei jedoch keine vollwertige Kopie der natürlichen Vorgänge angestrebt, sondern eine Übernahme des Prinzips. Dies kann dazu führen, dass bestimmte natürliche Vorbilder sehr genau kopiert werden, während andere nur prinzipiell übernommen werden.

Ein einfacher evolutionärer Algorithmus entsteht durch die Generierung beziehungsweise Initialisierung einer Anfangspopulation von Lösungen, der Berechnung einer Zielfunktion für die zu optimierenden Werte, aus einer Selektion von Lösungen, der Rekombination der Lösungen, sowie der Mutation. Der Kreislauf aus Zielfunktionsberechnung, Selektion, Rekombination, sowie der Mutation.

mination und Mutation wird solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Nach Durchlauf der Optimierung stehen eine oder mehrere beste Lösungen fest.

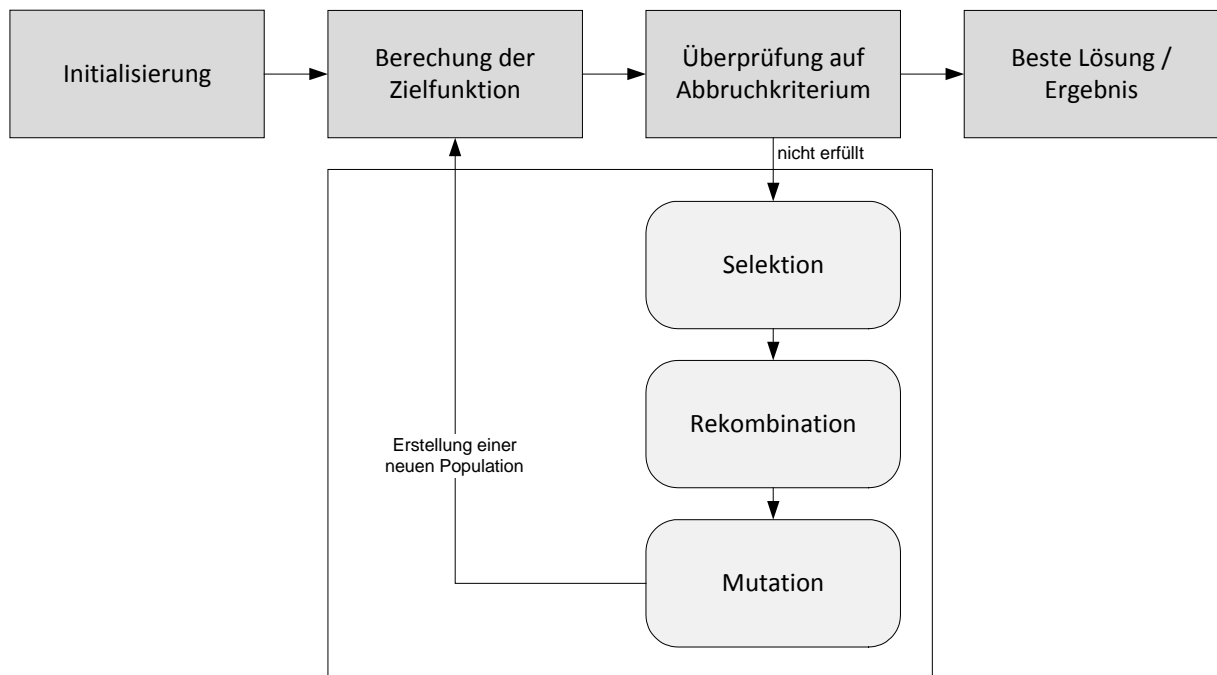


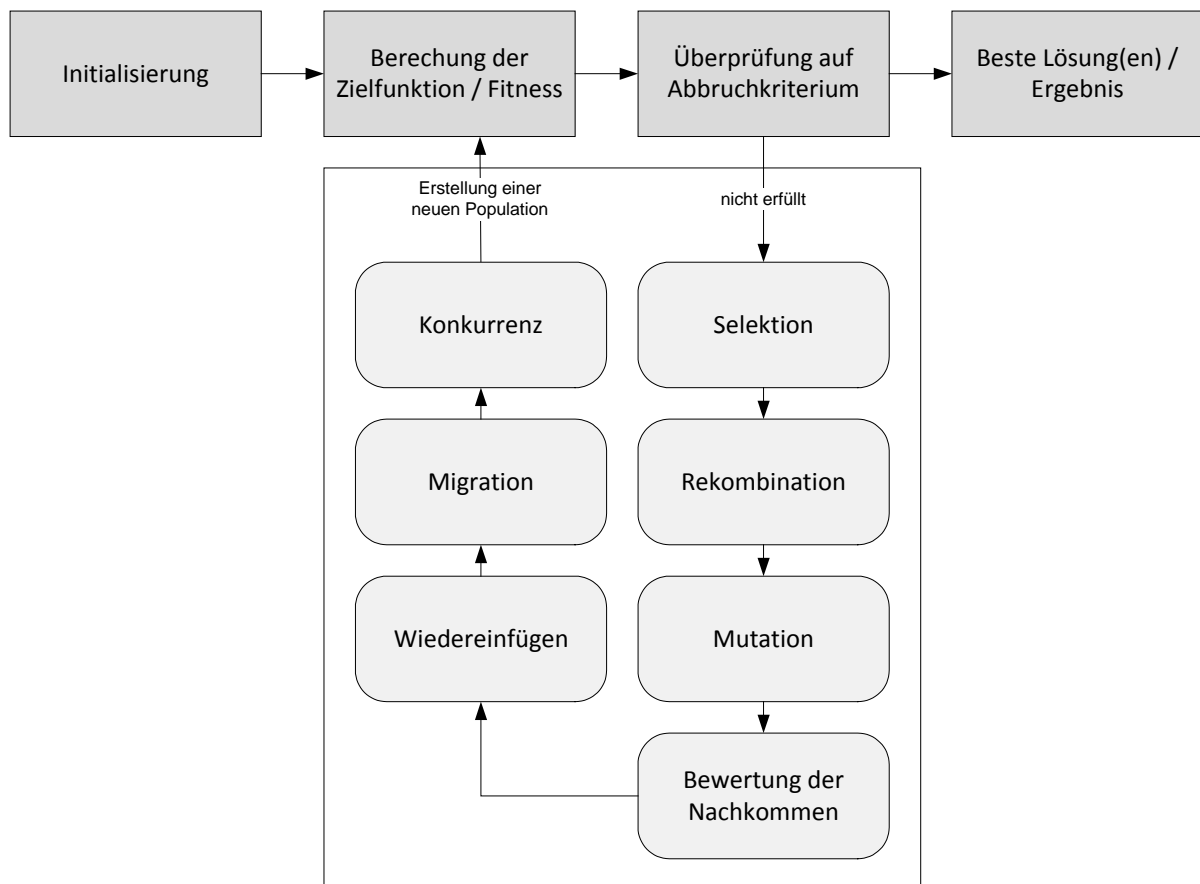
Abbildung 19: Struktur eines einfachen evolutionären Algorithmus

Dieser einfache evolutionäre Algorithmus kann durch verschiedene Maßnahmen an bestimmte Problemstellungen angepasst und erweitert werden. Besonders interessant, auch für die ganzheitliche Architekturgenerierung, ist die Erweiterung um Unterpopulationen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es nicht nur eine Population von Lösungen, in unserem Falle also architektonischen Entwürfen, gibt, sondern dass es mehrere Populationen mit unterschiedlichen Eigenschaften oder Strategien gibt. Auf die verschiedenen Möglichkeiten eines Modells mit mehreren Populationen wird später noch genauer eingegangen werden, es soll aber hier schon der prinzipielle Ablauf eines solchen Algorithmus vorgestellt werden.

Wie beim einfachen Modell wird zunächst eine Initialisierung der Populationen vorgenommen. Die Populationen können hierbei zum Beispiel aus unterschiedlichen Entwurfsansätzen bestehen. Auch bei diesem Modell wird zunächst eine Zielfunktion berechnet, dann wird den Individuen eine Fitness zugewiesen. Auf Basis dieser Fitness wird eine Selektion, Rekombination und Mutation durchgeführt. Zusätzlich können die Nachkommen noch bewertet werden und werden selektiv wieder eingefügt. Zusätzlich zum einfachen Modell findet unter bestimmten Umständen eine Migration zwischen den Unterpopulationen statt. Je nach Erfolg

einer Unterpopulation werden dieser Ressourcen zugewiesen. Im Falle eines evolutionären Algorithmus bedeutet dies die Zurverfügungstellung von mehr oder weniger Rechenleistung. Auch hier wird der Kreislauf der evolutionären Optimierung fortgeführt, bis ein zu definierendes Abbruchkriterium erfüllt ist.

Abbildung 20: Struktur eines erweiterten evolutionären Algorithmus



Evolutionäre Algorithmen sind stochastische Suchverfahren. Dadurch ergeben sich Unterschiede zu traditionellen deterministischen Algorithmen [Poh00]. Die für unser Problem wichtigsten Unterschiede sind:

- evolutionäre Algorithmen suchen durch das Vorhandensein vieler möglicher Lösungen parallel und nicht nur an einem Punkt
- evolutionäre Algorithmen verwenden Wahrscheinlichkeitsregeln, keine deterministischen Regeln
- evolutionäre Algorithmen führen potentiell zu einer Vielzahl von Lösungen, nicht nur zu einer

Durch die Eigenschaften von evolutionären Algorithmen sind diese vor allem bei nichtlinearen Zielfunktionen, sowie bei Problemen mit Variablen unterschiedlicher Repräsentation, das heißt bei Problemen, bei denen die Variablen durch unterschiedliche Datentypen (binär, ganzzahlig, reell) repräsentiert sind, von Vorteil [Poh00].

An dieser Stelle soll auch kurz auf den Unterschied zwischen genetischen und evolutionären Algorithmen hingewiesen werden. Die Bezeichnung der hier beschriebenen Algorithmen ist in der Literatur nicht durchgängig, häufig wird jedoch der Unterschied zwischen genetischen und evolutionären Algorithmen gemacht, der auch hier verwendet werden soll. Genetische Algorithmen sind einfachere evolutionäre Algorithmen, deren Variablen durchweg binär repräsentiert sind. Das heißt, dass das Genom einer Lösung aus einer Sequenz von entweder sowieso binär vorliegenden oder in binäre Repräsentationen umgewandelten Variablen besteht (vgl. auch [Sch92]). Eine binäre Variable hat, wie der Name es sagt, nur zwei mögliche Werte, üblicherweise 0 oder 1. Man kann sich das Genom einer Lösung eines genetischen Algorithmus also als eine Kette von Genen vorstellen, die entweder den Wert 0 oder den Wert 1 haben. Durch diese Festlegung ist beispielsweise eine Mutation sehr einfach zu bewerkstelligen: eine einfache Mutation sieht einfach den Wechsel eines Gens von 0 nach 1 oder umgekehrt vor.

Evolutionäre Algorithmen haben diese Beschränkung nicht: Die einzelnen Gene können auch aus komplexeren Variablen bestehen, also beispielsweise aus Gleitkommazahlen, was dazu führt, dass Mutationsstrategien schwieriger umzusetzen sind, und einer genaueren Analyse wirksamer Mutationen bedarf. Wie später zu zeigen sein wird, handelt es sich im vorliegenden Fall um noch wesentlich komplexere „Variablen“, deren Mutationen auch komplexere Vorgehensweisen erfordern.

In der Literatur zu evolutionären Algorithmen werden die aus der Biologie entlehnten Begriffe der Evolution bzw. der Genetik teilweise unterschiedlich besetzt. Daher sollen die hier verwendeten Begriffe zunächst definiert werden, um Verwechslungen auszuschließen. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit in erster Linie um eine Arbeit des Fachbereichs Architektur handelt, wo man nicht davon ausgehen kann, dass der prinzipielle Ablauf eines evolutionären Algorithmus klar ist, soll in diesem Kapitel relativ ausführlich auf die verwendeten Begriffe, sowie allgemeine Eigenschaften und Methoden eines evolutionären Algorithmus eingegangen werden. Die konkret gewählten Methoden und Vorgehensweisen im Rahmen der

ganzheitlichen Architekturgenerierung, sowie deren Herleitung werden in den folgenden Abschnitten, vor allem in 4.5, detailliert beschrieben. Die allgemeine Beschreibung der evolutionären Algorithmen in 4.1 orientiert sich dabei im Wesentlichen an der sehr guten Übersicht von POHLHEIM in [Poh00] soweit dies nicht anders gekennzeichnet wird.

4.1.1 Verwendete Begriffe

Die im Rahmen von evolutionären Algorithmen verwendeten Begriffe sind denen aus der Biologie natürlich sehr ähnlich, trotzdem sollen diese für die vorliegende Arbeit nochmals zusammengefasst und auf die Anwendung im Algorithmus bezogen werden, um die weitere Verwendung zu klären.

Population

Eine Population beschreibt die Gesamtheit aller im Rahmen eines evolutionären Optimierungsverfahrens zu einem bestimmten Zeitpunkt „lebenden“ Individuen. Konkret bedeutet dies, dass mit der Population alle in einer Runde des Optimierungsverfahrens existenten architektonischen Entwürfe bezeichnet werden. Werden Entwürfe beispielsweise durch Selektion aussortiert, so fallen sie auch aus der Population und werden dem Optimierungskreislauf entnommen.

Unter- bzw. Subpopulation

Eine Unter- bzw. Subpopulation bezeichnet eine Menge von Individuen, die sich den gleichen „Lebensraum“ teilen und somit in unmittelbarer Konkurrenz zueinander stehen.

Bei evolutionären Algorithmen wird zwischen verschiedenen Populationsmodellen unterschieden. Verschiedene Populationsmodelle werden z. B. in [Chi94], [Can95] und [Sch96] vorgestellt. POHLHEIM zeigt, dass SCHWEHM eine zutreffende und verständliche Unterteilung vorschlägt, die auch hier verwendet werden soll. Hier wird zwischen globalem, regionalem und lokalem Modell unterschieden. Das Grundmodell der frühen genetischen Algorithmen ist dabei das globale Modell. Dies bedeutet, dass es nur eine Population gibt und somit alle Individuen in Konkurrenz zueinander stehen.

Ausgehend vom Streben nach höherer Leistung genetischer Algorithmen wurden Wege gesucht, die Berechnung zu parallelisieren, das heißt auf mehrere Prozessoren oder Rechner zu verteilen. Das Ergebnis dieser Bemühungen waren verschiedene Modelle, die nicht nur eine

Verteilung von Berechnungen ermöglichte, sondern auch im seriellen Einsatz zu besseren Ergebnissen führte [Poh00].

Von den verschiedenen so entwickelten Modellen sollen zwei prinzipielle Systeme vorgestellt werden: Zunächst das lokale Modell. Dieses Modell geht davon aus, dass sich jedes Individuum in einer lokalen Nachbarschaft befindet. Die „Nähe“ zu einem anderen Individuum wird dabei durch die Distanz auf einem Gitternetz aus Knoten, wobei jeder Knoten von einem Individuum besetzt wird, ermittelt. Eine Interaktion, also eine Selektion und Rekombination, findet dabei nur in einer zu definierenden Nachbarschaft statt. Diese Nachbarschaft wird durch verschiedene geometrische Strukturen, die um ein Individuum gelegt werden, definiert, so etwa Kreuz, Stern oder Kreis [Poh00].

Wie später noch detailliert gezeigt wird, ist jedoch für den Einsatz im Rahmen einer ganzheitlichen Architekturgenerierung der Einsatz eines regionalen Modells von besonderem Vorteil. Das regionale Modell geht von verschiedenen Unterpopulationen aus. Eine Unterpopulation bildet sich dabei aus einer Menge von Individuen, die in unmittelbarer Interaktion miteinander stehen, innerhalb derer also Fitnesszuweisung, Selektion und Rekombination durchgeführt wird. In bestimmten Abständen erfolgt dabei eine Migration zwischen den Unterpopulationen, das heißt, dass Individuen der Unterpopulationen ausgetauscht werden. Des Weiteren stehen die Unterpopulationen in Konkurrenz um Rechnerleistung, das heißt, dass erfolgreichere Unterpopulationen mehr Individuen zugewiesen bekommen und somit einen prozentual höheren Anteil an der zur Verfügung stehenden Rechnerleistung erhalten.

Genom

Das Genom bezeichnet die Gesamtheit aller Gene bzw. aller Chromosomen eines Individuums. Im konkreten Falle bezeichnet das Genom also die Ausprägung aller Variablen eines architektonischen Entwurfs, oder anders gesagt bezeichnet das Genom einen architektonischen Entwurf in seiner Gänze.

Chromosom

Ein Chromosom ist in der Biologie eine Struktur, die Gene enthält. Der Mensch besitzt beispielsweise 46 Chromosomen, auf denen sich Gene befinden. Der Begriff wird im Rahmen der Literatur zu evolutionären Algorithmen nicht einheitlich verwendet, oftmals wird er auch synonym zum Genom verwendet, da die meisten evolutionären Algorithmen nur aus einer

Verkettung von Variablen, also Genen bestehen und keine zusätzliche Strukturebene benötigt wird. Hier soll das Chromosom jedoch nicht synonym zum Genom verwendet werden. Es ist vielmehr als „Sammelstruktur“ mehrerer Gene zu verstehen.

Gen

Ein einzelnes Gen bezeichnet eine Variable eines Individuums, also die Stelle des Genoms, die eine bestimmte Eigenschaft des Individuums bezeichnet und die entsprechenden Informationen enthält. Im einfachsten Falle handelt es sich hierbei um eine binäre Variable, die die Ausprägungen 0 oder 1 haben kann. Im vorliegenden Falle bezeichnet ein Gen meist jedoch eine wesentlich komplexere Datenstruktur. Ein einfaches Beispiel für ein Gen im architektonischen Entwurf wäre zum Beispiel ein Dach, wenn man davon ausgeht, dass man ein bestimmtes Arsenal an Dachtypen zur Verfügung hätte. Somit gäbe es also ein „Dachgen“, das die konkrete Ausprägung des Dachtyps eines Individuums enthält.

Allel

Ein Allel bezeichnet eine konkrete Ausprägung eines Gens. Ein Gen kann, abhängig vom vorliegenden Datentyp, verschiedene Ausprägungen haben. Diese Ausprägungen werden Allele genannt. Im Falle einer binären Variablen eines Gens gibt es also die Allele mit den konkreten Ausprägungen 0 und 1. Beim Beispiel des Dachs, das verschiedene Dachtypen annehmen kann, gibt es für jede Ausprägung, also beispielsweise ein Flachdach oder ein Satteldach ein Allel.

Generation

Eine Generation bezeichnet alle Individuen einer Population oder Subpopulation, die eine Runde des Optimierungsalgorithmus ausmachen. Durch Selektion und Rekombination werden Individuen aussortiert. Die danach durch Wiedereinfügen entstehende Population bzw. Subpopulation bildet dann die nächste Generation.

4.1.2 Die Zielfunktion

Die Zielfunktion beschreibt die unter mathematischen Gesichtspunkten zu minimierende Funktion, die den gesamten Optimierungsprozess abbildet. Das heißt, dass die Zielfunktion so definiert sein muss, dass alle Faktoren, die optimiert werden sollen, darin Berücksichtigung finden. Diese Berücksichtigung muss derart sein, dass sie den tatsächlichen Zustand repräsentiert, das heißt, dass ein Entwurf, der beispielsweise die Vorgaben bezüglich der nö-

tigen Verbindungen zwischen Räumen besser einhält als ein anderer bei ansonsten gleichem Zustand zu einem geringeren Wert für die Zielfunktion führen muss, als bei dem Entwurf der objektiv schlechter ist. Die hier vorliegende Zielfunktion muss die Eigenschaft haben, dass ein unter allen zu optimierenden Aspekten optimaler Entwurf den Zielfunktionswert 0 annimmt.

Dies kann an einem einfachen Beispiel demonstriert werden: Wollte man einen Entwurf ausschließlich auf die nötigen Verbindungen zwischen Räumen hin optimieren, so würde auch nur dieser Faktor in der Zielfunktion Niederschlag finden. Eine einfache Zielfunktion für diesen Fall wäre beispielsweise die simple Addition einer „Strafe“ für fehlende Verbindungen. Dies bedeutet, dass sich die Zielfunktion aus der Summe der fehlenden Verbindungen multipliziert mit einem Straffaktor errechnet. Für eine „Strafe“ von 10 und zwei fehlende Verbindungen ergäbe sich also ein Zielfunktionswert von $2 * 10 = 20$. Anhand der Zielfunktion lassen sich also alle Individuen in ihrer Güte bezogen auf das Optimierungsziel, nämlich 0, bewerten und in eine Reihenfolge bringen. Auch die Eigenschaft, dass ein optimaler Entwurf einen Zielfunktionswert von 0 annimmt, ist gegeben: Hat ein Entwurf alle geforderten Verbindungen, so ergibt sich ein Zielfunktionswert von $0 * 10 = 0$.

4.1.3 Die Fitness

Die Fitness eines Individuums bestimmt seine Chance, zur Rekombination ausgewählt zu werden und sich somit als „Elternteil“ eines Rekombinanten zu vermehren. Analog zur Biologie bestimmt die Fitness eines Individuums seine Reproduktionsrate. Im Rahmen der evolutionären Optimierung bedeutet dies, dass ein Individuum, das einen besseren, also kleineren Zielfunktionswert annimmt und somit also die geforderten Eigenschaften besser abbildet, eine höhere Chance bei der Selektion der zur Rekombination heranzuziehenden Individuen erhält. Die Fitness ist immer ein relativer Wert, der sich aus dem eigenen Zielfunktionswert und den Zielfunktionswerten der anderen Individuen in seiner Unterpopulation ergibt.

Grundsätzlich kann bei den Methoden der Fitnesszuweisung zwischen der proportionalen und der reihenfolgebasierten Fitnesszuweisung unterschieden werden. Zusätzlich muss bei einer Mehrkriterienoptimierung wie im vorliegenden Falle auf die entsprechenden in 2.4 beschriebenen Möglichkeiten einer Gewichtung hingewiesen werden.

Bei der proportionalen Fitnesszuweisung erfolgt die Berechnung der Fitness proportional zum Zielfunktionswert. In der Praxis wird die Fitness zusätzlich linear, linear dynamisch, logarithmisch oder exponentiell skaliert. Ein Beispiel für eine linear skalierte Fitnesszuweisung wäre

$$Fitness(Ind) = a \cdot ZFW(Ind) + b$$

wobei a und b problemabhängige Faktoren sind und ZFW den Zielfunktionswert eines Individuums (Ind) bezeichnet. In der Praxis ergeben sich dabei jedoch Probleme bei stark ungleichmäßigen Verteilungen der Zielfunktionswerte.

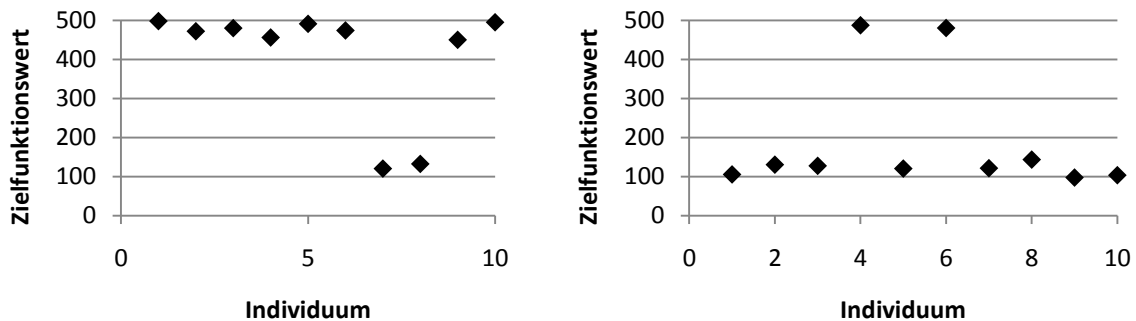


Abbildung 21: Probleme bei proportionaler Fitnesszuweisung

Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, ergeben sich Probleme, wenn es entweder sehr viele schlechte Individuen und wenige gute, oder sehr viele gute Individuen gibt. Da die Fitness in diesem Falle proportional zu den Zielfunktionswerten vergeben wird, bedeutet dies in einem Falle, dass die wenigen guten Ergebnisse sehr stark bevorteilt werden. Was sich im ersten Moment gut anhört, wird aber im Verlaufe der evolutionären Optimierung zu einer vorzeitigen Konvergenz führen. Dies bedeutet, dass die wenigen guten Ergebnisse so stark bevorteilt werden, dass sie sich überproportional stark vermehren und der Suchraum schon zu einem frühen Zeitpunkt sehr stark eingengt werden kann. Die Vielfalt der Lösungen würde verloren gehen und die Optimierung wird wahrscheinlich in einem lokalen Minimum der Funktion steckenbleiben.

Im anderen Falle führt die Tatsache, dass man über viele gute Individuen verfügt, die aber nur geringe Unterschiede aufweisen, dazu, dass jedes der guten Ergebnisse mit mehr oder weniger der gleichen Wahrscheinlichkeit ausgewählt wird. Eine Differenzierung zwischen

den guten Ergebnissen findet quasi nicht statt. Die Optimierung bleibt stecken, da alle guten Individuen fast gleichberechtigt sind und keine Selektion mehr stattfindet.

Beide Fälle sind bei einer proportionalen Fitnesszuweisung recht wahrscheinlich und sind auf zu niedrigen oder zu hohen Selektionsdruck zurückzuführen. Es wurde in verschiedenen Studien gezeigt, dass eine proportionale Fitnesszuweisung für die meisten Probleme nicht das Mittel der Wahl ist (siehe [Bli97], S. 65).

Daher kommt meistens, und so auch hier, eine reihenfolgebasierte Fitnesszuweisung zum Tragen. Die reihenfolgebasierte Fitnesszuweisung geht nicht von den absoluten Werten der Zielfunktionen aus, sondern die Fitness wird ausschließlich auf Basis der Reihenfolge der Individuen vergeben. Es wird also ein Ranking basierend auf den Zielfunktionswerten der Individuen in der Unterpopulation gebildet, wobei das schlechteste Individuum die Position 1 hat und das beste die Position gleich der Anzahl der Individuen. Abhängig vom gewählten Selektionsdruck kommt dabei ein lineares oder nichtlineares Ranking zum Einsatz.

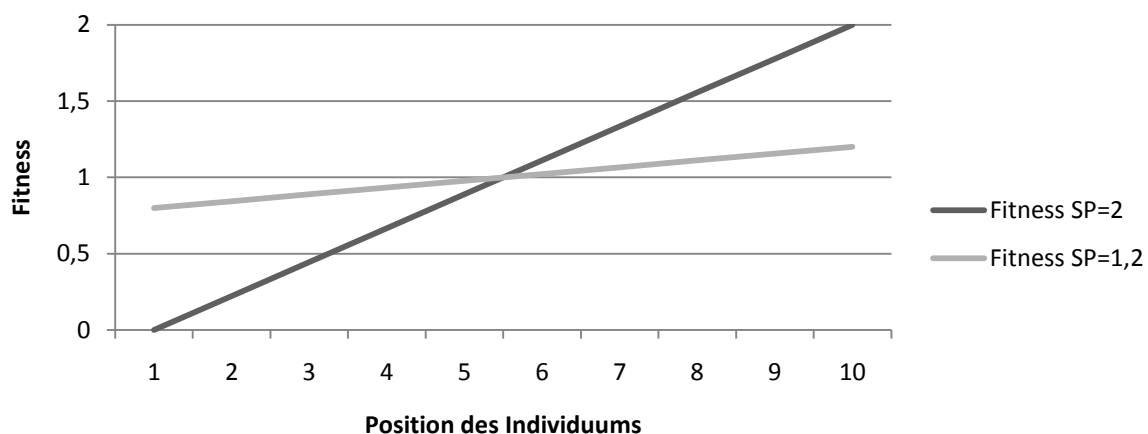


Abbildung 22: Lineares Ranking mit unterschiedlichem Selektionsdruck (SP)

In Abbildung 22 ist ein Beispiel für ein lineares Ranking mit zwei unterschiedlichen Werten für den Selektionsdruck (SP) zu sehen. Man sieht, dass die Fitness der einzelnen Individuen abhängig zur Position in der jeweiligen Unterpopulation steigt. Der Selektionsdruck bestimmt, in welchem Maße bessere Individuen gegenüber schlechteren Individuen bevorzugt werden. So führt ein hoher Selektionsdruck zu einer stärkeren Aussortierung schlechter Individuen, was im frühen Stadium einer Optimierung zu einer frühzeitigen Konvergenz führen kann. Ein zu geringer Selektionsdruck führt dazu, dass die Auswahl mehr oder weniger gleichverteilt und somit nicht mehr optimiert erfolgt. Bei einem Selektionsdruck von 1 ergibt

sich für den Graphen eine Linie, die parallel zur x-Achse ist und somit zu einer absoluten Gleichverteilung der Selektionswahrscheinlichkeit führt.

Der absolute Wert für die Fitness, der sich aus dieser Berechnung ergibt, ist stets relativ zu den anderen Individuen zu sehen. Hat also beispielsweise ein Individuum eine Fitness von 2 und ein anderes eine Fitness von 0,2, so heißt das vereinfacht und abhängig vom Selektionsverfahren, dass das erste Individuum eine zehnmal höhere Wahrscheinlichkeit hat, als „Elternteil“ zur Rekombination ausgewählt zu werden.

Wie später gezeigt werden wird, kommt bei der hier vorgeschlagenen ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware eine reihenfolgebasierte Fitnesszuweisung mit adaptivem Selektionsdruck zum Einsatz.

4.1.4 Die Selektion

Nachdem allen Individuen einer Population bzw. Subpopulation eine Fitness zugewiesen wurde, wird als nächstes eine Selektion durchgeführt. In diesem Schritt werden die Individuen ausgewählt, die für eine Rekombination und somit für eine „Vermehrung“ als Elternteile in Frage kommen.

Im Folgenden sollen die gebräuchlichsten Selektionsverfahren und ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf die ganzheitliche Architekturgenerierung vorgestellt werden. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Verfahren findet später statt. Hier soll aber ein Bild von den Möglichkeiten gemacht werden, um die Auswahl der benutzten Verfahren darzulegen. Obwohl es zahlreiche Selektionsmethoden gibt, sollen hier vier gebräuchliche Verfahren dargestellt werden. Viele der weiteren Verfahren sind Variationen der hier beschriebenen. Diese vier Verfahren bestehen aus der Rouletteselektion, dem *stochastic universal sampling*, der Turnierselektion und der *Truncation*-Selektion.

Die Rouletteselektion ist ein Zufallsverfahren, das, wie der Name schon sagt, gewisse Ähnlichkeiten mit dem Roulette aufweist. Hierbei werden die Individuen entsprechend ihrer Fitness bei einem gedachten Roulettewurf ausgewählt. Jedes Individuum erhält dabei einen Abschnitt des Rouletterades entsprechend der Fitness zugewiesen. Die Länge der entsprechenden Abschnitte entspricht dabei der Fitness. Bei gleichverteilter Fitness, also bei einem Selektionsdruck von 1, haben alle Individuen einen gleich langen Abschnitt auf dem Rad und die Rouletteselektion entspricht damit genau einem Roulettespiel mit so vielen Zahlen, wie

es Individuen gibt. Danach wird das Rad so oft gedreht, wie Individuen gewählt werden sollen. Zur vereinfachten Darstellung kann man sich hierzu auch eine Linie anstatt eines Rades vorstellen. Die Abschnitte der Linie werden dann entsprechend der Fitness vergeben.

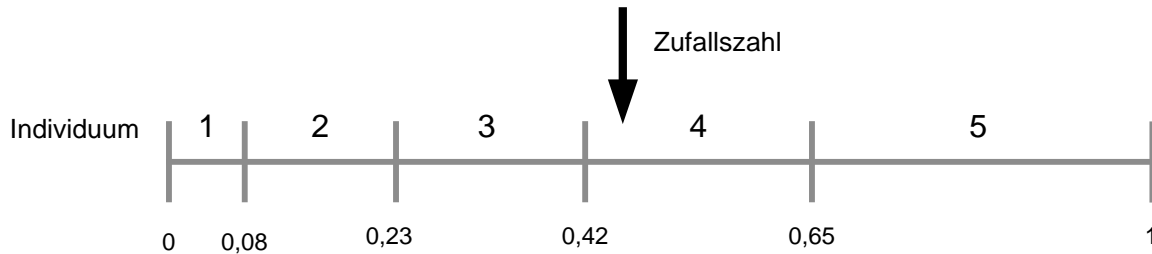


Abbildung 23: Schematische Darstellung einer Rouletteselektion

Wie in Abbildung 23 zu sehen, wird dabei aus praktischen Gründen meist eine Projektion der Abschnitte auf einen Bereich von 0 bis 1 vorgenommen. Die Selektionswahrscheinlichkeit liegt somit genau bei dem Abschnittanteil, den ein Individuum auf der Linie einnimmt. Sollen im abgebildeten Beispiel drei Individuen zur Rekombination ausgewählt werden, so wird dreimal hintereinander eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gezogen. Das Individuum, in dessen Abschnitt die Zufallszahl fällt, wird selektiert.

Dabei kann man sich leicht einen Nachteil der Rouletteselektion vorstellen: Es ist theoretisch möglich, dass dabei ausschließlich schlechte Individuen gezogen werden. Obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass gute Individuen gezogen werden, natürlich viel größer ist, kann es doch nicht garantiert werden, dass mindestens ein gutes Individuum ausgewählt wird.

Diese Eigenschaft hat sich auch bei Testläufen im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware gezeigt. Da bei einer Optimierung teilweise sehr viele Durchläufe stattfinden, ist es immer wieder vorgekommen, dass die besten Individuen überhaupt keine Berücksichtigung gefunden haben. Obwohl sich diese Methode sehr robust im Hinblick auf die Erhaltung von Varianz gezeigt hat, wurde im Gesamtvergleich mit anderen Methoden ein gutes Ergebnis erst später gefunden. Von der Nutzung der Rouletteselektion wurde deshalb Abstand genommen.

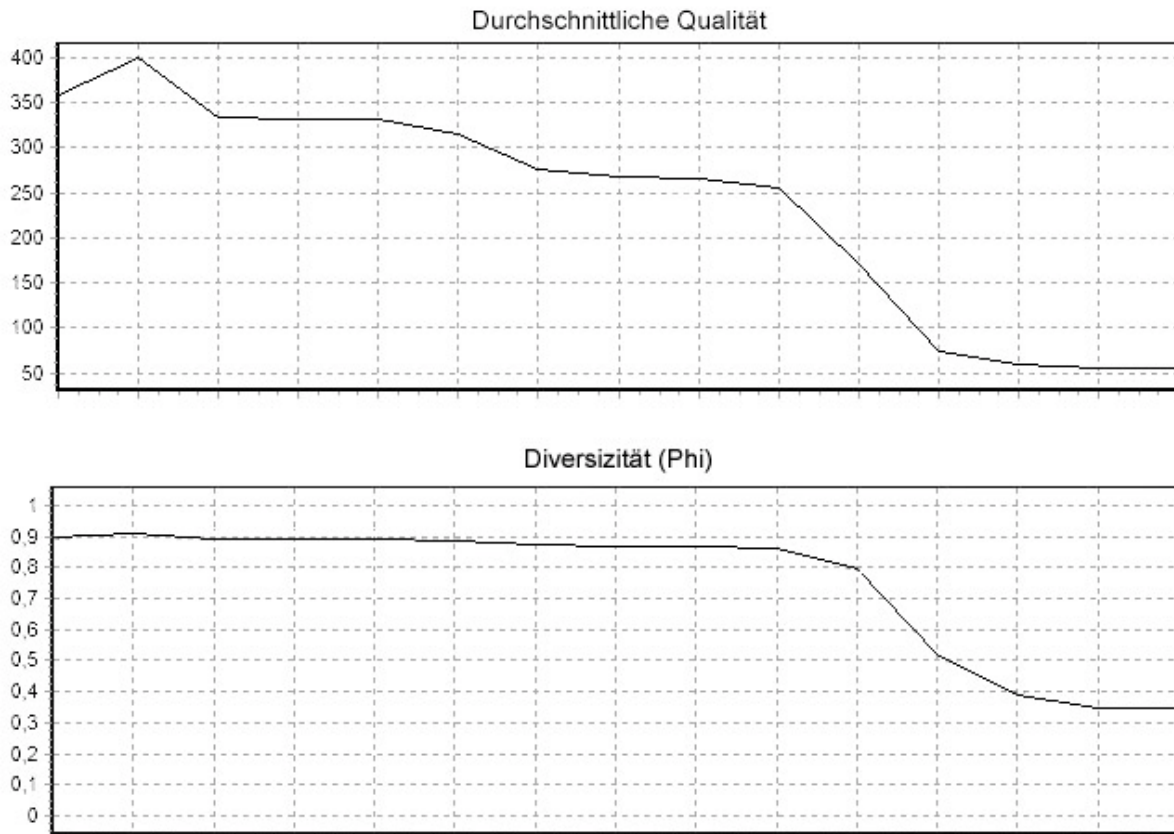


Abbildung 24: Qualität und Diversizität bei der Rouletteselection

Bei allen hier gezeigten Grafiken wie etwa Abbildung 24 handelt es sich um vergleichbare Werte. Das heißt, dass alle Ausgangswerte gleich waren, inklusive aller Parameter des evolutionären Algorithmus. Auch Skalierung und Ausschnitt sind gleich, so dass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Bei der durchschnittlichen Qualität ist zu beachten, dass ein niedrigerer Wert besser ist, da es sich um eine Minimierung handelt.

Die nächste hier vorzustellende Selektionsmethode ist das *stochastic universal sampling* (SUS). Der Ablauf eines SUS ist dem einer Rouletteselection ähnlich. Auch hier werden die Individuen entsprechend ihrer Fitness auf einem Rouletterad bzw. vereinfacht einer Linie verteilt. Anders als bei der Rouletteselection werden hierbei jedoch nicht einzelne Zufallszahlen und damit Individuen gezogen, sondern es wird eine Linie erzeugt, auf der Zeiger im Abstand von eins geteilt durch die Anzahl der zu ziehenden Individuen angeordnet werden. Die Anzahl der Zeiger entspricht ebenfalls der Anzahl der zu ziehenden Individuen. Nun wird die Linie um eine Zufallszahl im Bereich von 0 bis 1 geteilt durch die Anzahl der zu ziehenden Individuen verschoben.

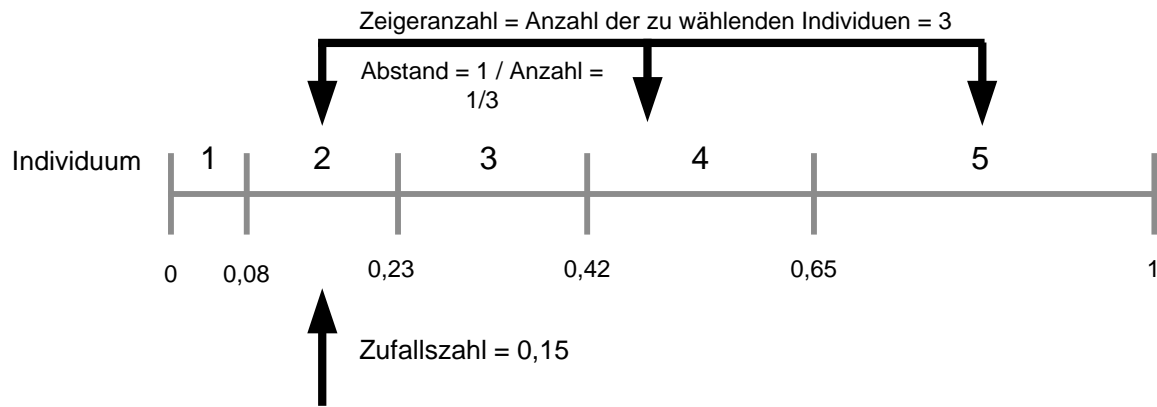


Abbildung 25: Schematische Darstellung einer SUS-Selektion

Beim Beispiel in Abbildung 25 werden aus fünf Individuen drei ausgewählt. Es wird also eine Linie erzeugt, die 3 Zeiger hat. Der Abstand dieser Zeiger beträgt $1/3$. Nun wird der Zeiger um eine Zufallszahl im Bereich von 0 und $1/3$ vom Ursprung verschoben, in diesem Beispiel um 0,15. Selektiert werden nun die Individuen, in deren Bereich die Zeiger liegen, in diesem Falle die Individuen 2, 4 und 5.

Dieses Verfahren bietet verschiedene Vorteile. Zum Einen ist die Streuung der Ergebnisse und damit die Varianz der überlebenden Individuen sehr hoch, was eine frühzeitige Konvergenz der Optimierung unwahrscheinlicher macht, zum Anderen ist mit dieser Methode garantiert, dass sich unter den selektierten Individuen auch gute Individuen befinden. Das SUS gilt als das beste und schnellste Verfahren der fitnessproportionalen Selektion [Poh00].

Auch die Testreihen in Bezug auf die hier beschriebene Architekturgenerierungssoftware belegen, dass das SUS sehr robuste Ergebnisse im Hinblick auf Varianz und Güte der Ergebnisse liefert. Durch die hohe Streuungsrate der gewählten Individuen ist die Wahrscheinlichkeit einer vorzeitigen Konvergenz der Ergebnisse minimiert worden. Gleichzeitig führt das SUS schnell zu guten Ergebnissen.

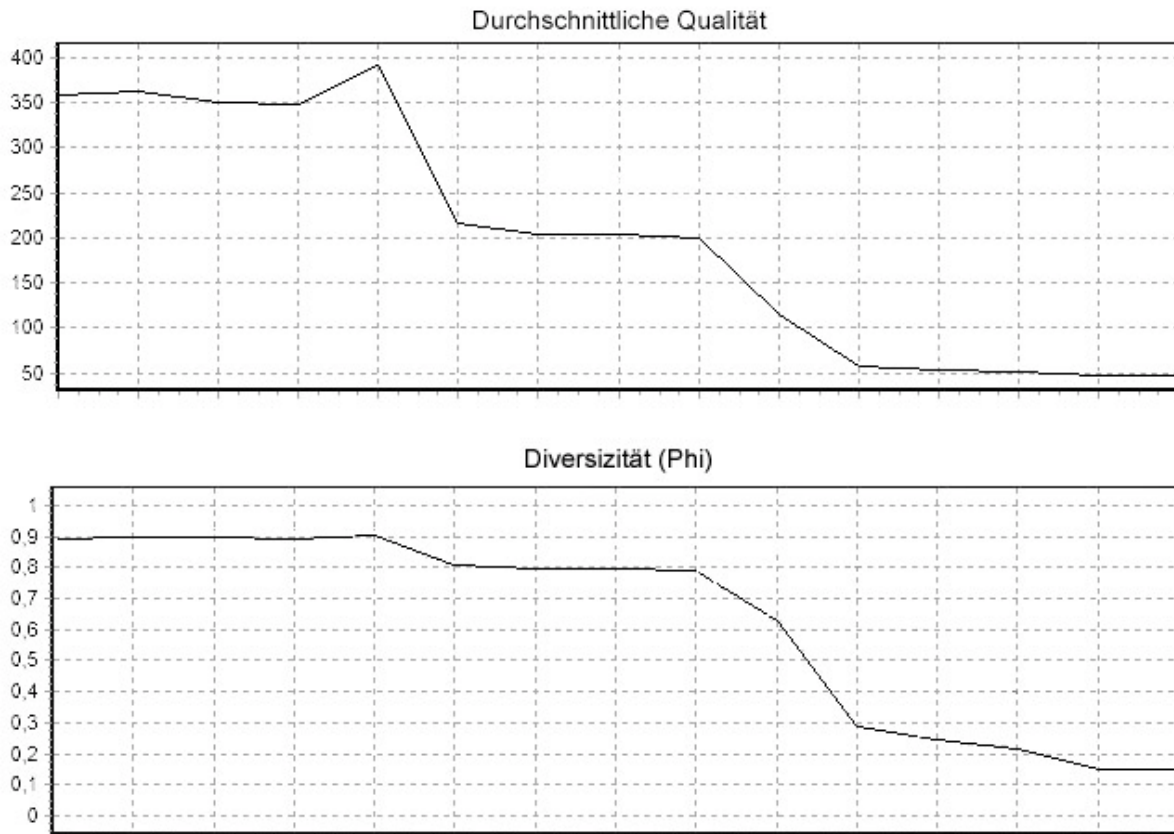


Abbildung 26: Qualität und Diversizität bei der SUS-Selektion

Die bisher beschriebenen Verfahren der Roulette- bzw. SUS-Selektion sind Verfahren der fitnessproportionalen Selektion. Die Turnierselektion gehört jedoch nicht zu dieser Gruppe. Bei der Turnierselektion werden Gruppen aus „Wettkämpfern“ gebildet. Die Wettkämpfer werden dabei gleichverteilt zufällig aus der Population bzw. Subpopulation gewählt. Das jeweils beste Individuum, bezogen auf seine Fitness, geht als Sieger aus dem Turnier hervor. Dabei wird der Selektionsdruck, der natürlich in umgekehrtem Verhältnis zur verbleibenden Varianz steht, durch die Turniergröße gesteuert. Wird ein Turnier nur mit jeweils einem Individuum ausgetragen, so beträgt der Selektionsdruck 0, da dieses Individuum ja stets „gewinnt“. Im anderen Extremfall würde die Turniergröße gleich der Anzahl der Individuen sein, was dazu führt, dass stets das absolut beste Individuum gewinnen würde. Die Varianz wäre hierbei 0. In der Praxis liegt der Wert der Turniergröße also irgendwo in der Mitte der beiden Extreme. Das Turnier wird so oft ausgeführt, wie Individuen zu wählen sind.

Die Turnierselektion wird häufig angewandt, hat jedoch auch den Nachteil, dass hier, wie bei der Rouletteselection keine Garantie besteht, dass gute Individuen in die nächste Runde gelangen. Es ist zwar sehr unwahrscheinlich, aber doch, vor allem bei kleinen Turniergrößen,

möglich, dass nur Turniere zwischen schlechten Individuen ausgetragen werden und somit auch nur schlechte Individuen gewinnen können. Andererseits ist die Steuerung über die Turniergröße sehr einfach möglich und kann im Verlaufe des Optimierungsprozesses auch angepasst werden. Im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung hat es sich gezeigt, dass es sehr wichtig ist, das Überleben von guten Individuen zu garantieren, da das Wiedererlangen einer guten Lösung in einem ähnlichen Bereich recht schwierig ist. Die Testreihen zeigen zwar überwiegend, dass sich die Turnirselektion bezogen auf Qualität, Geschwindigkeit und Diversizität in einem ähnlichen Bereich wie bei der SUS-Selektion befinden (siehe Abbildung 27), aufgrund der beschriebenen Möglichkeit einer massiven Verschlechterung wird jedoch die SUS-Selektion bevorzugt.

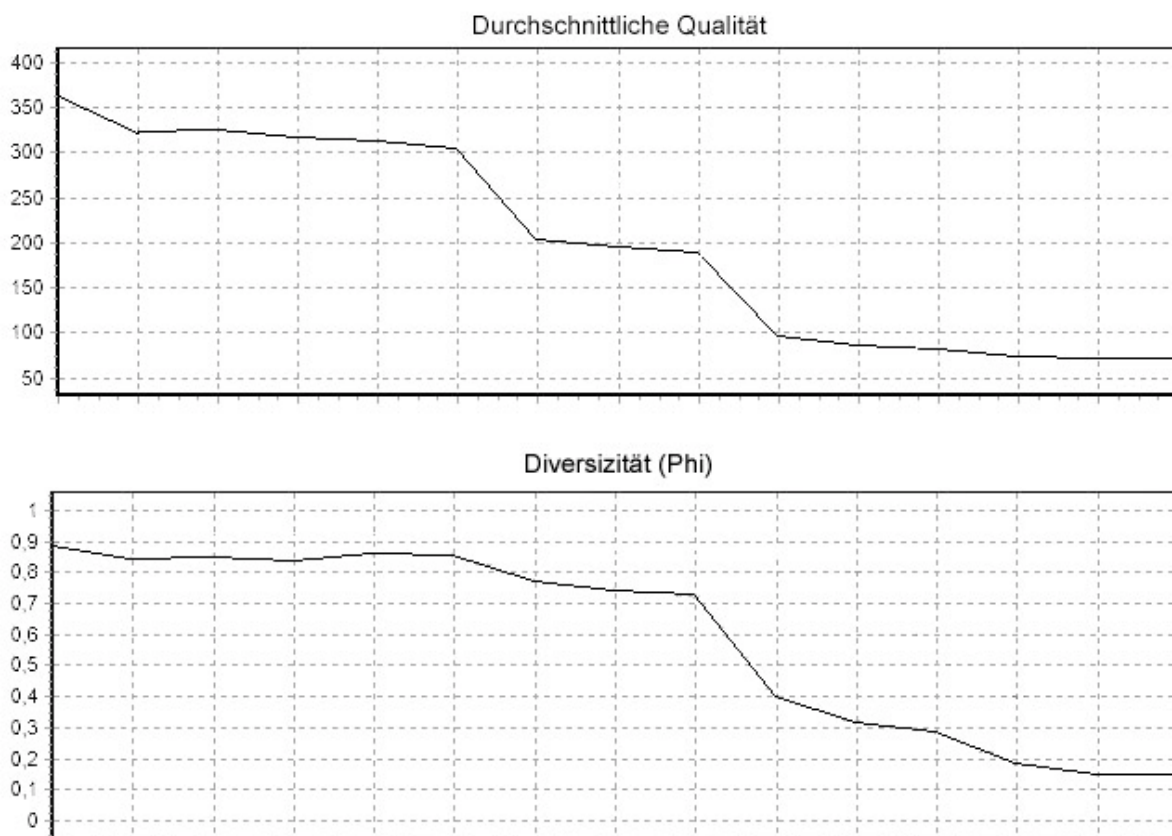


Abbildung 27: Qualität und Diversizität bei der Turnirselektion (25 Individuen, Turniergröße 4)

Als letzte grundsätzliche Methode der Selektion soll hier noch die Truncation-Selektion vorgestellt werden. Diese Methode ist sicherlich die einfachste: Die Individuen werden entsprechend ihrer Fitness in eine Reihenfolge gebracht (Ranking). Danach werden alle Individuen, die sich jenseits einer festzulegenden, anteiligen Schwelle befinden, aussortiert. Befindet

sich die Schwelle beispielsweise bei 50%, so wird die bessere Hälfte der Individuen selektiert, die andere Hälfte verworfen.

Wie man sich leicht vorstellen kann, ist der Selektionsdruck dieser Methode, der natürlich von der Truncation-Schwelle abhängig ist, tendenziell sehr hoch und die Varianz der Ergebnisse entsprechend niedrig. Diese Methode wird hauptsächlich bei sehr großen Populationen angewendet, um eine strenge Auswahl zu treffen. Der Vorteil der Methode ist natürlich die sehr große Schnelligkeit. Dieser Vorteil wiegt aber die Nachteile, die sich durch den Verlust von Varianz ergeben, nicht auf. Im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung, wo sich die Populationsgröße schon wegen der Komplexität der Berechnungen in einem normalen Rahmen halten muss, ist die Truncation-Selektion keinesfalls als Mittel der Wahl zu sehen. Testläufe haben gezeigt, dass die Population bei einer Selektion mittels Truncation-Selektion schon innerhalb weniger Generationen zu einer vorzeitigen Konvergenz neigt und somit ebenfalls nicht geeignet erscheint (siehe Abbildung 28).

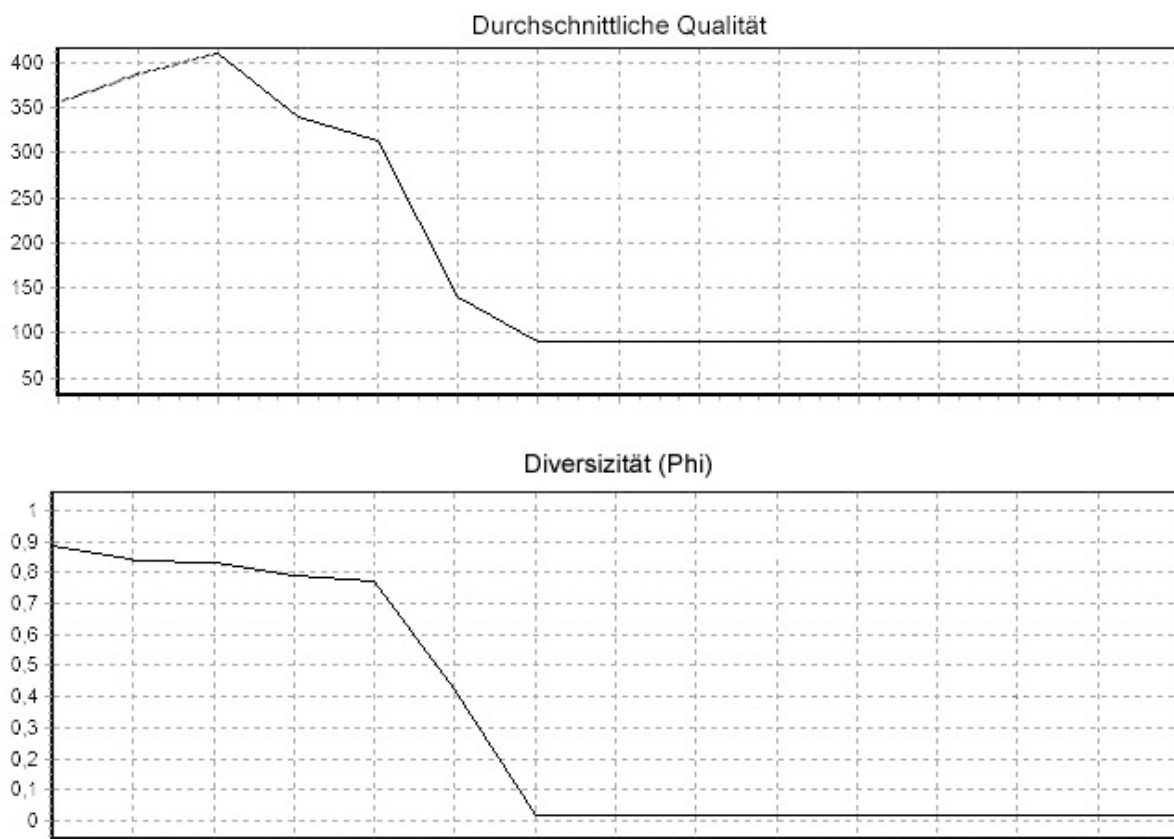


Abbildung 28: Qualität und Diversität bei der Truncation-Selektion

In der abschließenden Gegenüberstellung der verschiedenen Möglichkeiten der Selektion im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung ist nochmals komprimiert zu sehen, dass SUS- und Turnierselektion am geeignetsten erscheinen. Die Roulette-Selektion sorgt zwar für eine höhere Diversizität der Ergebnisse, ist gleichzeitig aber deutlich langsamer als SUS- und Turnierselektion. Die Truncation-Selektion fällt wegen der großen Wahrscheinlichkeit einer vorzeitigen Konvergenz aus. Aufgrund der beschriebenen Nachteile der Turnierselektion wird deshalb vorrangig die SUS-Selektion verwendet werden.

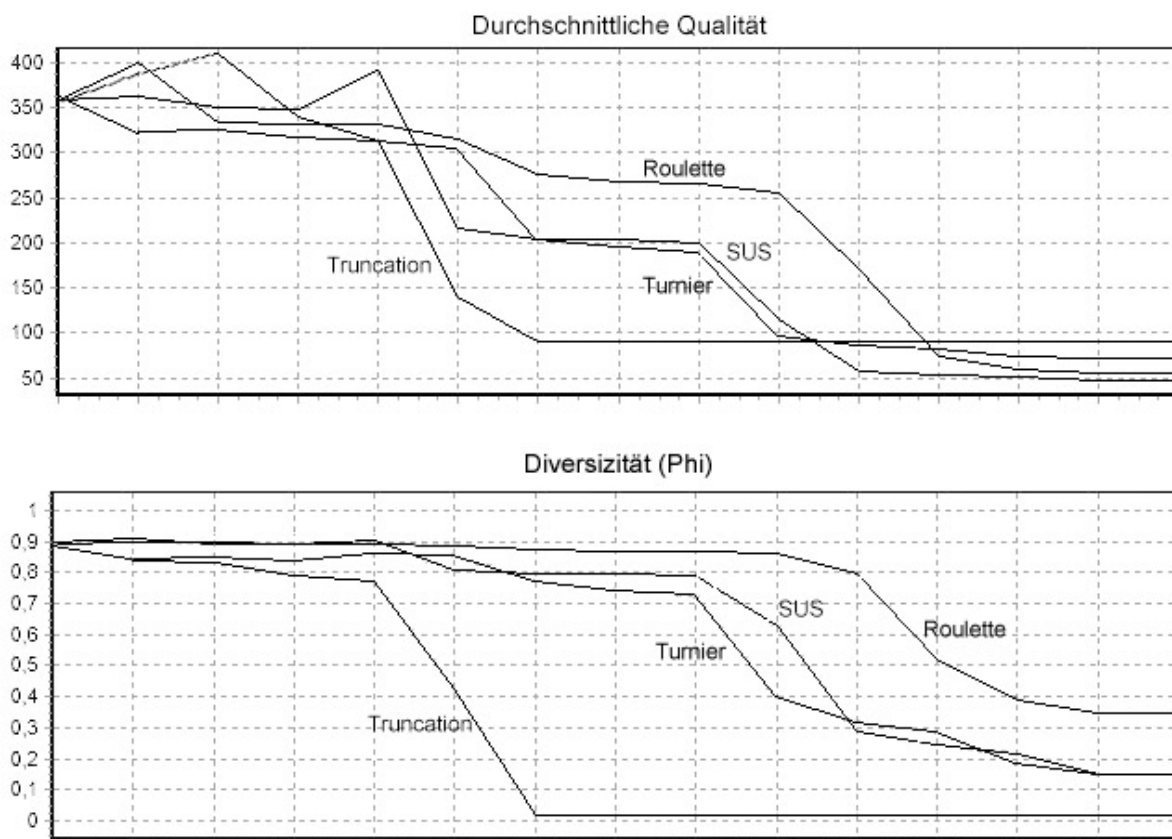


Abbildung 29: Qualität und Diversizität der Selektionsmethoden in der Übersicht

4.1.5 Die Rekombination

Nachdem entsprechend der oben beschriebenen Selektionsmethoden die Eltern der nächsten Generation ausgewählt wurden, werden nun zwei oder mehr Individuen rekombiniert, um die Nachkommen für die nächste Generation zu erzeugen. Auch in diesem Fall soll an dieser Stelle zum allgemeinen Verständnis zunächst eine Übersicht über gängige Methoden der Rekombination gegeben werden. Die detaillierten Methoden der Rekombination im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung werden dann in 4.5 erklärt werden. Die Rekombination als Methode eines evolutionären Algorithmus bildet prinzipiell den Vorgang

der geschlechtlichen Vermehrung in der Natur ab. Die unterschiedlichen Rekombinationsmethoden versuchen dabei, die durch die Regeln der Genetik und Vererbungslehre entstehenden Kombinationen von natürlichen Nachkommen auf den Algorithmus zu übertragen.

[Poh00] unterscheidet drei bzw. vier prinzipielle Rekombinationsmethoden. Auch hier soll diese Klassifizierung verwendet werden, da sie sehr sinnvoll erscheint, obwohl oftmals ein Hauptaugenmerk auf den Crossover-Methoden der Rekombination liegt (siehe z. B. [Ger04]). Es ist im Rahmen dieser Arbeit wichtig, die prinzipiellen Möglichkeiten der Rekombination zu erläutern, da bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung unterschiedliche Rekombinationsansätze, auch in Kombination untereinander, zur Anwendung kommen werden.

Die ersten drei Methodenkategorien behandeln die Rekombination verschiedener Variablentypen, die als Zahl vorliegen. Die vierte Methodenkategorie beschreibt Sonderfälle bestimmter Probleme. Auch bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung wird es sich bei einem guten Teil der „Variablen“ nicht um einfache durch eine einzelne Zahl repräsentierte Variablen handeln, sondern es werden vielmehr besondere Rekombinationsmethoden entwickelt werden müssen, um der Komplexität beispielsweise eines architektonischen Grundrisses gerecht zu werden.

Die erste Methode ist die diskrete Rekombination. Die diskrete Rekombination lässt sich auf alle Variablentypen anwenden. Dabei wird für jede Variable entschieden, ob der Nachkomme die Variable des einen oder des anderen Elternteils erhält. Die Entscheidung fällt gleichmäßig zufällig. Es kommt also hierbei keine „Mischung“ von Werten in diesem Sinne zustande, sondern es wird eine der Variablen der Eltern übernommen. Die Werte der Nachkommen liegen dabei auf den Eckpunkten eines um die Variablenwerte der Eltern aufgespannten Hyperwürfels. POHLHEIM schlägt daher die deutsche Bezeichnung der Eckrekombination vor.

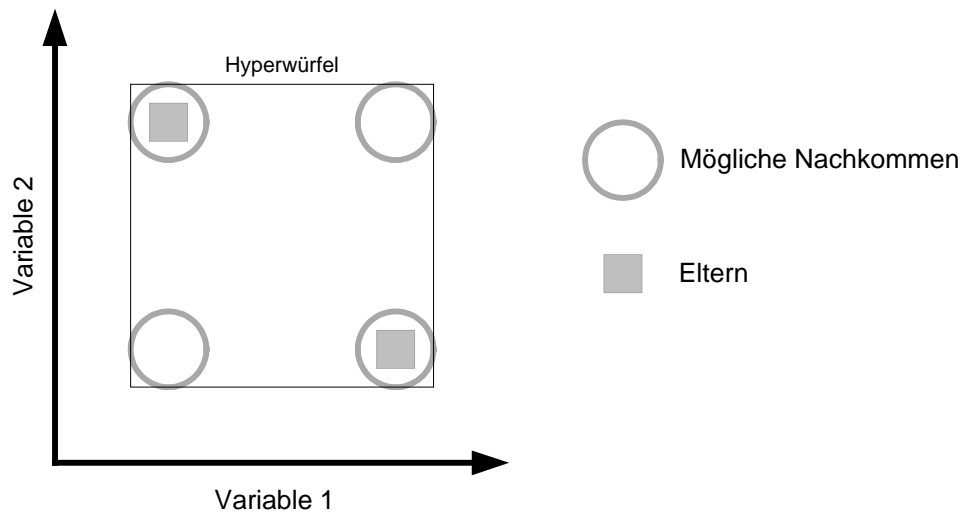


Abbildung 30: Hyperwürfel um zwei Variablen bei diskreter Rekombination

Abbildung 30 zeigt ein Beispiel einer diskreten Rekombination mit zwei Variablen. Die Position der Nachkommen bezüglich der Variablen der Eltern liegt immer auf den Eckpunkten eines Hyperwürfels, auch bei mehr als zwei Variablen bzw. Dimensionen.

Die zweite Kategorie der Rekombinationsmethoden beschreibt Methoden zur Rekombination von ganzzahligen und reellen Variablen. Bei Variablen der ganzheitlichen Architekturgenerierung, die als Zahlenwert vorliegen, wird es sich zumeist um Variablen aus diesen Bereichen handeln. Eine Anwendung dieser Methoden ist also in Betracht zu ziehen.

POHLHEIM schlägt dabei wiederum zwei grundsätzliche Methoden vor: Die intermediäre und die Linien-Rekombination. Die intermediäre Rekombination ist dabei der diskreten Rekombination nicht unähnlich. Auch hier wird ein Hyperwürfel aufgespannt, in dem sich die Variablen der möglichen Nachkommen befinden. Allerdings beschränken sich hierbei die Variablen nicht auf die Eckpunkte des aufgespannten Hyperwürfels, sondern sie werden gleichverteilt im gesamten Hyperwürfel verteilt. Durch einen zusätzlichen Faktor ist es außerdem möglich, die Größe des Hyperwürfels zu steuern. Damit können die Variablen der Nachkommen auch Werte annehmen, die außerhalb des Bereichs zwischen den Variablen der Eltern liegen. Es findet somit keine Beschränkung des Suchraumes auf die durch die Variablen der Eltern gegebenen Extremwerte statt, sondern es ist durch die Steuerung dieses Faktors möglich, den Suchraum zu vergrößern.

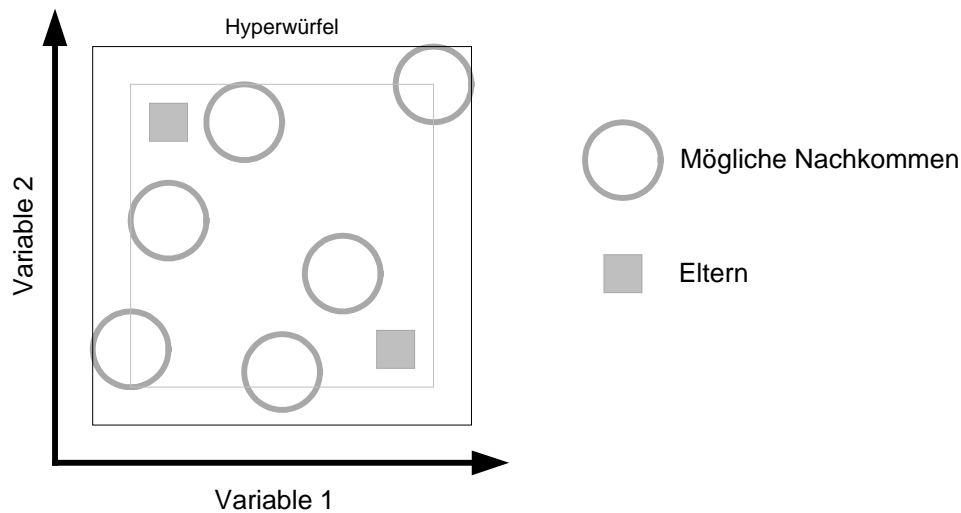


Abbildung 31: Mögliche Nachkommen bei der intermediären Rekombination

Abbildung 31 zeigt dieses Vorgehen. Die Nachkommen können auch in Bereichen außerhalb der eigentlich durch die Eltern vorgegeben Variablenwerte liegen. Die Differenzierung der Werte und damit die Größe des Suchraumes kann durch einen großen Hyperwürfel gesteuert werden.

Die Linien-Rekombination ist wiederum der intermediären Rekombination ähnlich. Allerdings werden die Variablen der Nachkommen ausschließlich auf einer Linie zwischen den Variablen der Eltern verteilt. Wie bei der intermediären Rekombination ist jedoch auch hier eine Ausdehnung der Linie über die Werte der Eltern möglich, so dass auch hier eine Suchraumvergrößerung machbar ist. Als Sonderfall einer Linien-Rekombination ist die Festlegung eines festen Skalierungsfaktors möglich. Wird dieser beispielsweise bei 0,5 festgesetzt, so bilden alle Nachkommen den Mittelwert der Variablen der Eltern ab.

Des Weiteren gibt es Erweiterungen der Linien-Rekombination, so ist es etwa möglich, die neuen Variablen nicht gleichverteilt zufällig auf der Linie zu verteilen, sondern vielmehr die neuen Variablen mit hoher Wahrscheinlichkeit um die Werte eines Elternteils herum zu verteilen. Mit bekannter Fitness der Eltern ist es so beispielsweise möglich, die Werte rund um das Elternteil, das bessere Fitnesswerte hat, zu verteilen.

Als dritte Kategorie von Rekombinationsmethoden sollen die Crossover-Methoden vorgestellt werden. Diese sind primär für binäre Variablen anwendbar, lassen sich jedoch auch auf die Anwendung bei anderen Variablen erweitern. Die Crossover-Methoden sind die am meisten verbreiteten Methoden der Rekombination und sind auch der natürlichen Verer-

bung am ähnlichsten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Variablen der Individuen als Kette von binären Variablen mit dem Wert 0 oder 1 vorliegen. Da sich ganzzahlige oder reelle Variablen auch binär darstellen lassen, ist eine direkte Adaption hierfür also problemlos möglich.

Bei allen Crossover-Methoden werden die „Genstränge“ der Eltern zerschnitten und neu zusammengesetzt. Die einfachste Form des Crossover ist das *single-point crossover*. Hier wird, wie in Abbildung 32 zu sehen, eine Schnittkante gewählt. Anschließend werden die Nachkommen aus den einzelnen Teilen der Elterngene wieder zusammengesetzt.

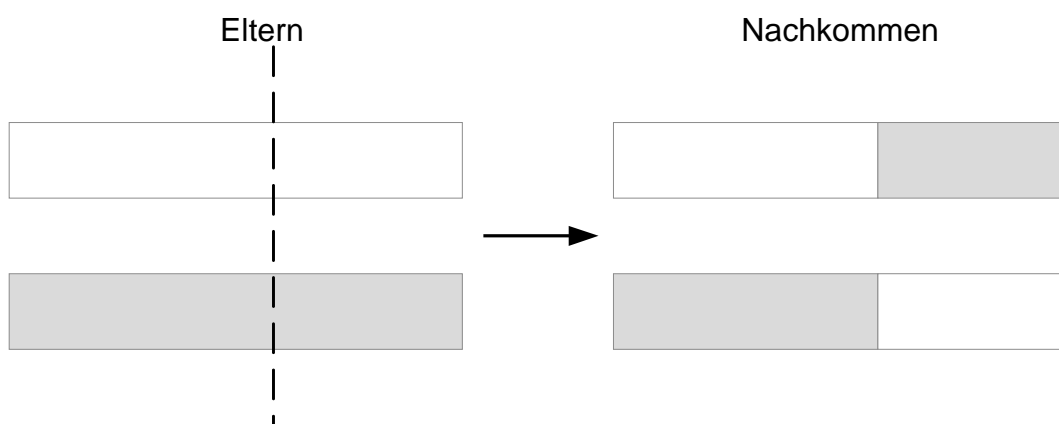


Abbildung 32: Schema des *single-point crossover*

Eine Erweiterung dieser einfachen Form des Crossover ist das *multi-point crossover* bzw. *k-point-crossover*. Hierbei wird statt einer mehrere oder beispielsweise beim *two-point-crossover* zwei Schnittlinien bestimmt, an denen die Elterngene auseinandergeschnitten werden.

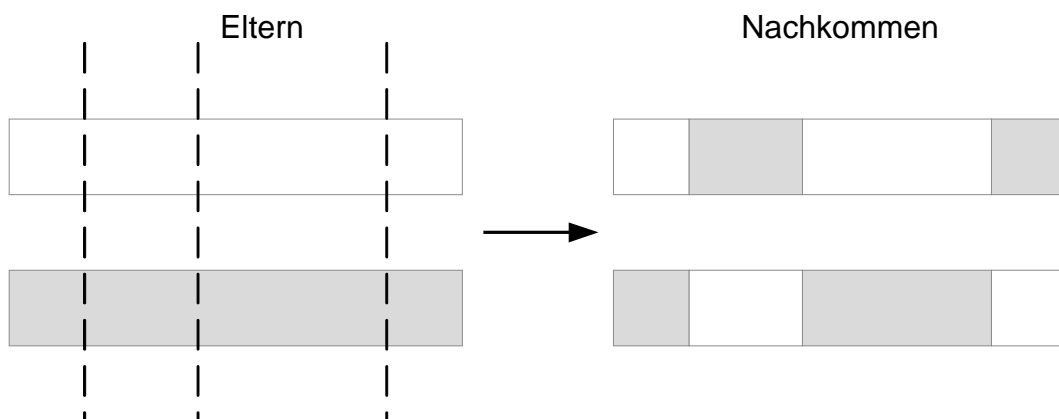


Abbildung 33: Schema eines *multi-point-crossover*

Von diesem Schema ausgehend gibt es noch zahlreiche Sonderfälle des Crossover, so etwa das *uniform crossover*, das an jeder Position entscheidet, welches Elternteil für den Nachkommen maßgeblich ist. Für eine detaillierte Übersicht sind [Poh00] und [Ger04] zu empfehlen. Es sollen hier jedoch nicht alle Möglichkeiten des Crossover erläutert werden, da dies zu weit führen würde und lediglich das Prinzip eines Crossover gezeigt werden soll.

Als vierte Kategorie von Rekombinationsmethoden wird bei [Poh00] die Rekombination bei kombinatorischen Problemen eingeführt. Dies sind spezielle Rekombinationsmethoden, die sich auf kombinatorische oder Reihenfolgeprobleme, wie etwa das in 2.2.3 vorgestellte *Travelling Salesman Problem* (TSP) beziehen. In solchen Fällen ist es sinnvoll, spezielle Methoden zu entwickeln, die sich der Lösung eines bestimmten Problems besser anpassen lassen. Ein Problem ist hierbei etwa, dass Informationen, die die Eltern haben, durch zufällige Rekombinationen zerstört werden. Es sind also bestimmte Methoden notwendig, die zwei Eltern kombinieren können, ohne dabei gute Lösungen zu zerstören.

Da an dieser Stelle natürlich nicht das TSP gelöst werden soll, ist es nicht sinnvoll, die einzelnen hierfür entwickelten Methoden genauer vorzustellen. Es soll jedoch festgestellt werden, dass für spezifische Probleme auch spezifische Rekombinationsmethoden nötig sein können, um wichtige Eigenschaften der Eltern zu bewahren. Diese Tatsache wird im weiteren Verlauf noch wichtig sein, da auch bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung „Variablen“ vorliegen werden, die eine einfache Rekombination ausschließen. Dies wird noch genau behandelt werden, es soll aber hier schon als Beispiel auf die Problematik der Rekombination von Grundrissen hingewiesen werden. Anders als bei einfachen Werten, wie etwa einem bestimmten Wandstil, der durch eine Ganzzahl repräsentiert ist, macht es bei geometrischen Informationen, wie einem Grundriss keinen Sinn, beispielsweise eine intermediäre Rekombination auf die einzelnen Punkte anzuwenden. Eine solche Anwendung würde bedeuten, dass man etwa für jede Koordinate eines Raumes bei Elternteil 1 und 2 einen Zwischenwert der beiden Koordinaten bilden würde. Bei einem einzelnen Raum könnte dies noch zu einem sinnvollen Ergebnis führen, in der Kombination von vielen Räumen wird dies jedoch nicht zielführend sein. Zusätzlich sei noch darauf hingewiesen, dass eine bestimmte geometrische Ausformulierung eines Grundrisses nicht nur eine Geometrie als solche beschreibt, sondern implizit auch Werte über Nachbarschaftsbeziehungen der Räume, Wandlängen, Seitenver-

hältnisse etc. bereitstellt. Hier wird also eine spezielle Rekombinationsmethode vonnöten sein, die diesen Anforderungen gerecht werden wird.

4.1.6 Die Mutation

Der nächste Schritt eines klassischen evolutionären Algorithmus ist die Mutation. Auch in der Natur treten Mutationen als zufällige Veränderungen des Erbguts bzw. von Genen auf (siehe [Hic08], S. 136). Dies bedeutet, dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit der Zustand eines Gens geändert wird, auch ohne dass diese Eigenschaft bei einem Elternteil vorhanden ist.

Im Rahmen einer evolutionären Optimierung wird dieses Verfahren ebenfalls angewendet. Hierbei können Mutationsoperatoren zwei Hauptziele verfolgen [Ger04]: Zum einen die Optimierung im Rahmen eines *Hill-Climbings* oder als Streuungsmethode zur Bewahrung der Vielfältigkeit einer Population.

Das *Hill-Climbing* beschreibt eine klassische Methode der Optimierung (vgl. [Ger04], S. 25). Es gibt zahlreiche Erweiterungen und Verfeinerungen von *Hill-Climbing*-Methoden, prinzipiell beschreibt dieses Verfahren jedoch den Vorgang einer gerichteten Optimierung. Dies bedeutet, dass ein zu optimierender Faktor in jeder Runde eines Optimierungsprozesses einer zu maximierenden Funktion einen Schritt „bergauf“ (*Climbing*) geht, das heißt, dass die Werte für einen Schritt nach links und nach rechts auf einem Funktionsgraphen verglichen werden und der Schritt nach „oben“ gewählt wird. Natürlich ist dies auch für zu minimierende Funktionen durchführbar, klassischerweise geht man hierbei jedoch von einer zu maximierenden Funktion aus. Dieser Vorgang des *Hill-Climbing* wird so lange ausgeführt, bis ein Maximum erreicht wird. In der einfachsten Form kann somit nicht garantiert werden, dass durch *Hill-Climbing* ein globales Maximum erreicht wird, da der Algorithmus an jedem lokalen Maximum hängenbleibt. Natürlich gibt es Methoden, dieses Risiko zu umgehen oder zumindest zu minimieren, das Prinzip des *Hill-Climbing* bleibt aber das gleiche.

Eine Mutation in einem evolutionären Algorithmus kann nun also genau diese Funktion einnehmen, das heißt, dass eine Variable im Sinne des *Hill-Climbing* einen Schritt nach „oben“ macht und damit einen besseren Wert einnimmt (im vorliegenden Falle müsste es, da es sich um eine Minimierungsoptimierung handelt, natürlich um einen Schritt nach „unten“ handeln). Auf diese Weise kann ein Element eines klassischen Optimierungsvorgangs in den evo-

lutionären Algorithmus Einzug halten. Dieses Vorgehen kann durchaus im Sinne der Optimierung sinnvoll sein. Im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung kann eine Mutation in diesem Sinne jedoch nur begrenzt und auf einfache Faktoren beschränkt Anwendung finden. Bei komplexeren Variablen, wie der Geometrie des Grundrisses, ist ein solches Verfahren, zumindest in einfacher Form, nicht so einfach anwendbar, da es sich hierbei nicht um eine einfache Variable eines Standardtyps handelt und ein „*Climbing*“, also eine Verbesserung, nicht so einfach feststellbar ist. Es möge nur bedacht werden, dass es sich hierbei um einen hohen Grad von Abhängigkeiten verschiedener Variablen handelt, so dass eine Verbesserung im Sinne eines Parameters durchaus zu einer Verschlechterung im Sinne eines anderen Parameters führen kann. Trotzdem wird eine Variante der Mutation im Sinne eines erweiterten *Hill-Climbings* auch hier Anwendung finden, wie später zu zeigen sein wird. Die Anwendbarkeit auf einfache Faktoren wiederum lässt sich relativ einfach zeigen: Als Beispiel kann hierbei wiederum ein Wandstil dienen, der durch eine Ganzzahl repräsentiert ist und dadurch alle Informationen zum Aufbau einer Wand und damit beispielsweise zu Kosten oder energetischen Werten hält. Eine einfache Mutation eines Wandstils wäre die zufällige Wahl eines anderen Stils. Nun könnte auf einfache Art und Weise geprüft werden, ob dies beispielsweise die bessere Wahl in Bezug auf die zu erwartenden Kosten sein würde. Wäre sie dies, so wird der neue Wandstil gewählt, ein Schritt des *Hill-Climbing* ist getan.

Der andere, mindestens ebenso wichtige Ansatz einer Mutationsmethode ist die Garantie einer Varianz einer Population. Wie schon beschrieben, ist eine der größten Gefahren eines (evolutionären) Optimierungsvorgangs die vorzeitige Konvergenz, das heißt, das zu frühe Erreichen eines lokalen Optimums, das aber weit vom globalen Optimum entfernt ist. Diese Gefahr ist natürlich umso größer, je geringer die Varianz einer (Sub-)Population ist. Sind sich alle Individuen sehr ähnlich, so ist der Suchraum stark eingeschränkt, die Suche nach einem globalen Optimum wäre nur noch zufällig erreichbar, unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten im Verlauf von vielen Läufen des Algorithmus wäre sie quasi unmöglich.

Die Mutation kann als Operator dieser Entwicklung entgegenwirken, da eine zur Steigerung der Varianz ausgelegte Mutation in der Lage ist, den „inhaltlichen Abstand“ der Individuen zueinander zu vergrößern, das heißt also, dafür zu sorgen, dass die Variablen der einzelnen Individuen eine bestimmte Streuung erlangen. Durch eine Mutation ist es möglich, ein lokales Optimum zu verlassen und die Suche nach einem globalen Optimum fortzusetzen. Dabei

kann eine Mutation eine sehr wichtige Rolle bei der Suche nach dem Optimum spielen. Gleichzeitig kann eine zu hohe Mutationsrate jedoch auch zu schlechten Ergebnissen führen, da gute Ergebnisse zerstört werden. Deshalb ist es wichtig, die Mutationsrate auf einem guten Level einzustellen. In der Literatur wird dafür meist eine Wahrscheinlichkeit von $1/n$ angegeben, wobei n die Anzahl der Variablen repräsentiert. Statistisch gesehen wird somit in jeder Runde eine Eigenschaft eines Individuums durch Mutation verändert. Später wird die optimale Mutationsrate für einen ganzheitlichen Architekturoptimierungsalgorithmus noch besprochen werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft einer Mutationsmethode ist die Adaption. Durch Adaption ist es möglich und sinnvoll, die Mutationsarten und -rate im Laufe einer Optimierung anzupassen. So ist es beispielsweise sinnvoll, zu Beginn einer Optimierung eine relativ hohe Schrittweite einer Mutation, also eine starke Mutation häufig einzusetzen. In dieser Phase der Optimierung befindet sich der Algorithmus in der breiten Suchphase, das heißt, dass durch häufige und starke Mutation der Suchraum ausgeweitet werden kann und im Sinne einer Vergrößerung der Varianz eingesetzt wird. Normalerweise ist es gewünscht, dass sich die Suche mit fortlaufender Zeit einschränkt. Auch hier kann wieder das schon früher verwendete Bild der Suchenden in einer Hügellandschaft bemüht werden: Zu Beginn sollten die Suchenden möglichst weit verbreitet werden, nach einer gewissen Zeit sollte die ungefähre Richtung der Suche immer klarer werden, die Suchenden bewegen sich auf kleinere Suchregionen zu, bis sie schließlich das Optimum, oder eines der Optima, gefunden haben. In diesem Sinne ist eine hohe Mutationsrate mit großen Mutationsschritten im späten Verlauf einer Optimierung nicht sinnvoll. Dies entspräche einer ständigen, mehr oder weniger zufälligen, Neuplatzierung der Suchenden in der Landschaft, weg von ihrem inzwischen schon begrenzten Suchraum. So ist es also sinnvoll, die Schrittweite der Mutationen im weiteren Verlaufe der Optimierung zu verkleinern. Die Mutation bleibt aber weiter sinnvoll, da auch der verkleinerte Suchraum gut abgesucht werden soll.

Es existieren zahlreiche Methoden der Adaption der Schrittweiten, die schon erfolgreich eingesetzt wurden. Eine Übersicht dieser Methoden findet sich beispielsweise bei [Poh00]. Auf die Einzelheiten dieser Methoden soll hier aber nicht eingegangen werden, da auch hier das Prinzip am wichtigsten ist.

Die Methoden der Mutation sind von der Repräsentation der Variablen abhängig. Für ganzzahlige und reelle Variablen ist eine einfache Veränderung der Variable mit bestimmter minimaler und maximaler Schrittweite gängig. Auch hier wird später auf die einzelnen ganzzahlig oder reell repräsentierten Variablen der ganzheitlichen Architekturgenerierung eingegangen werden. Für die Mutation von binären Variablen ist die Anwendung sehr einfach, da eine Variable nur die Werte 0 oder 1 einnehmen kann. Eine Mutation bedeutet hier das Umschalten von 0 auf 1 oder umgekehrt.

Bei kombinatorischen oder reihenfolgebasierten Problemen existiert eine Vielzahl von Mutationsoperatoren. Die Variablen liegen hier als Reihenfolge von Werten, beispielsweise Buchstaben vor. Hier ist es beispielsweise möglich, einzelne Variablen zu verschieben beziehungsweise auszuschneiden und an anderer Stelle wieder einzufügen (*insert mutation*). Es können auch die Werte einzelner Variablen ausgetauscht werden (*swap mutation*) oder Bereiche umgekehrt werden (*reverse mutation*).

Des Weiteren existieren zahlreiche problemspezifische Mutationen. Die Anwendung bekannter problemspezifischer Mutationen ist sehr sinnvoll, da auf diese Weise auf ein bestimmtes Problem in optimaler Weise reagiert werden kann. Wie später gezeigt werden wird, kommen im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware sowohl bekannte als auch speziell hierfür entwickelte Mutationsoperatoren zum Einsatz. Als kleines Beispiel kann im Vorgriff schon hier auf den Mutationsoperator „Wand verschieben“ hingewiesen werden. Die ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware hat es zum Ziel, den Arbeitsablauf eines Architekten, soweit möglich und sinnvoll, abzubilden. Das Verschieben einer Wand ist im händischen Entwurfsprozess eines Architekten ein gängiger „Mutationsoperator“, der häufig angewendet wird. In diesem Sinne wird dieser Operator auch bei der Architekturoptimierung zum Einsatz kommen, da es sich um einen einfachen, aber sehr effektiven Ansatz zur Veränderung eines Entwurfes handelt.

4.1.7 Das Wiedereinfügen

Nachdem durch Selektion, Rekombination und Mutation die Nachkommen einer Generation von Individuen produziert wurden, werden diese Nachkommen nun in die Population eingefügt.

Für diesen Vorgang sind vor allem zwei Faktoren entscheidend: *generation gap* und *reinsertion rate*. *Generation gap* bezeichnet den Unterschied zwischen der Anzahl der Individuen in der Ursprungspopulation und der Anzahl der Nachkommen. Dies bedeutet, dass eine *generation gap* von 1,0 den Zustand beschreibt, dass ebenso viele Nachkommen generiert wurden, wie es Eltern gibt. Ein niedrigerer Wert bedeutet, dass weniger Nachkommen erzeugt wurden, ein höherer Wert, dass es mehr Nachkommen als Eltern gibt. Die *reinsertion rate*, oder auch Wiedereinfügerate, bezeichnet hingegen den Anteil der Nachkommen, der auch in die neue Generation eingeht. Hier bedeutet ein Wert von 1,0, dass alle Nachkommen in die neue Generation übernommen werden. Ein kleinerer Wert bedeutet, dass eine Auswahl der Nachkommen getroffen wird, die wiedereingefügt werden. Ein höherer Wert als 1,0 ist hier nicht möglich.

Diese beiden Faktoren sind ein zentraler Bestandteil eines evolutionären Algorithmus, da sie entscheiden, wie der Algorithmus ablaufen wird. Wird beispielweise eine *generation gap* von 1,0 und eine Wiedereinfügerate von 1,0 gewählt, so bedeutet dies, dass in jeder Runde alle Eltern durch ihre Nachkommen ersetzt werden. Die Lebensdauer eines Individuums beträgt genau eine Generation. Werden weniger Nachkommen als Eltern gebildet (*generation gap* < 1,0), so bedeutet dies, dass nur ein Teil der Ursprungspopulation ersetzt wird, was wiederum bedeutet, dass die durchschnittliche Lebensdauer eines Individuum größer als eine Generation ist. Ist die *generation gap* größer als die Wiedereinfügerate, so bedeutet dies, dass nur ein Teil der Nachkommen auch wirklich in die neue Generation übernommen wird.

Wie man sich vorstellen kann, hat die Auswahl dieser Faktoren entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Optimierung. Ein wichtiger Faktor bei der Auswahl der Faktoren ist die erwartete durchschnittliche Qualität der Nachkommen. Steht beispielsweise zu befürchten, dass viele Nachkommen schlechter sind als ihre Eltern und nur wenige Nachkommen eine Verbesserung darstellen, so kann eine Strategie mit *generation gap* von 1,0 und Wiedereinfügerate von 1,0, also des kompletten Austauschs der Individuen dazu führen, dass sich die Population insgesamt verschlechtert. Es ist bei dieser Strategie nicht garantiert, dass das beste Individuum überlebt. Im Zusammenspiel mit der Selektion kann dies auch dazu führen, dass die Varianz der Population insgesamt abnimmt, wenn die Nachkommen nur von relativ wenigen Eltern abstammen und somit eng miteinander verwandt sind. Dies führt in den folgenden Generationen zu einer Rekombination von sehr ähnlichen Individuen,

was, wie man sich leicht vorstellen kann, die Varianz weiter verkleinert. Dieser Vorgang kann zu einer Art „Inzest“ führen, der ja auch in der Natur nicht bevorteilt wird.

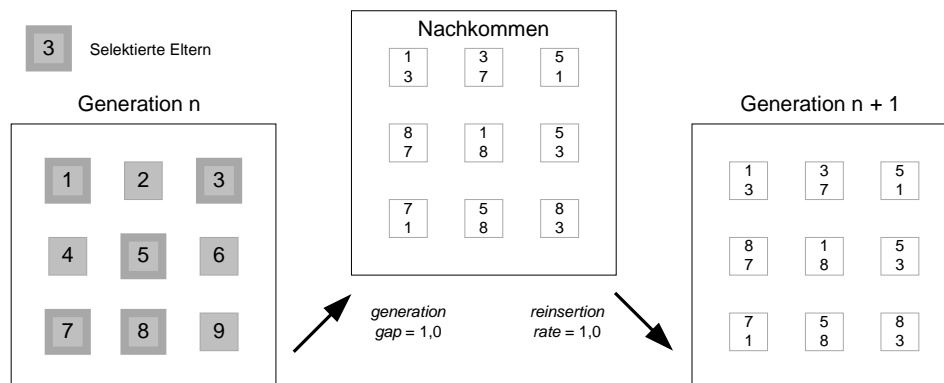


Abbildung 34: Wiedereinfügen mit vollständigem Ersetzen der Eltern

Wählt man eine Wiedereinfügerate von weniger als 1,0, so muss ein Verfahren zur Auswahl derjenigen Eltern gewählt werden, die ersetzt werden. Dies kann zufällig gleichverteilt geschehen oder aber unter Bewahrung der besten Individuen. Bewahrt man die besten Individuen, so wird auch von einer *elitest reinsertion* gesprochen. Diese Strategie wird häufig verwendet und hat viele Vorteile. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass zusätzlich das Alter jedes Individuums gespeichert und eine maximale Lebensdauer in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Lebensdauer definiert werden sollte. Ansonsten besteht die Gefahr eines Verharrens in einem Zustand, falls das beste Individuum nie durch Nachkommen übertroffen wird und somit niemals ersetzt wird. Dies kann zu einem „genetischen Einfrieren“ der Population führen (siehe [Sch92], S. 87). Auch hier ist der Vergleich mit der Natur evident: Während es durchaus Arten gibt, die quasi völlig durch Nachkommen ersetzt werden und wo alle lebenden Individuen mehr oder weniger gleich alt sind, gibt es doch keine Arten, wo, auch gute Individuen ewig leben (was natürlich aber nicht nur an der Gefahr genetischen Einfrierens liegt). Dies führt zu einer Starre der Population und zu einer Blockierung der Weiterentwicklung.

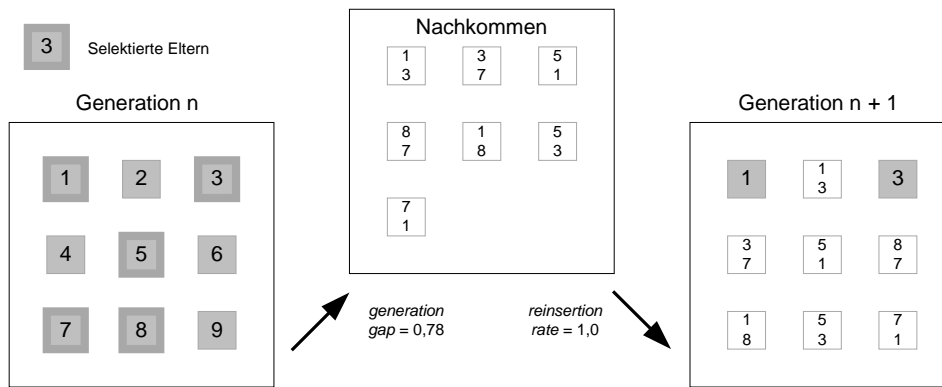


Abbildung 35: Wiedereinfügen unter Beibehaltung der besten Individuen

Die dritte Möglichkeit, nämlich eine Auswahl der Nachkommen, die wiedereingefügt werden, hat auch Vorteile. Auf diese Weise wird garantiert, dass eventuell entstehende, sehr schlechte Nachkommen sofort aussortiert werden und somit keine Chance zur Produktion von eigenen Nachkommen erhalten. Dabei besteht natürlich weiterhin die Möglichkeit alle Eltern zu ersetzen oder aber nur einen Teil der Eltern. Auf jeden Fall aber ist die *generation gap* größer als die Wiedereinfügerate. Dieses Vorgehen hat Vorteile, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass sich unter den Nachkommen viele schlechtere Individuen befinden, als es die Eltern waren, hoch ist. Wie später zu sehen sein wird, kann dies auf einige Variablen der ganzheitlichen Architekturgenerierung bezogen durchaus der Fall sein. Deshalb handelt es sich bei dieser Variante um eine durchaus bemerkenswerte.

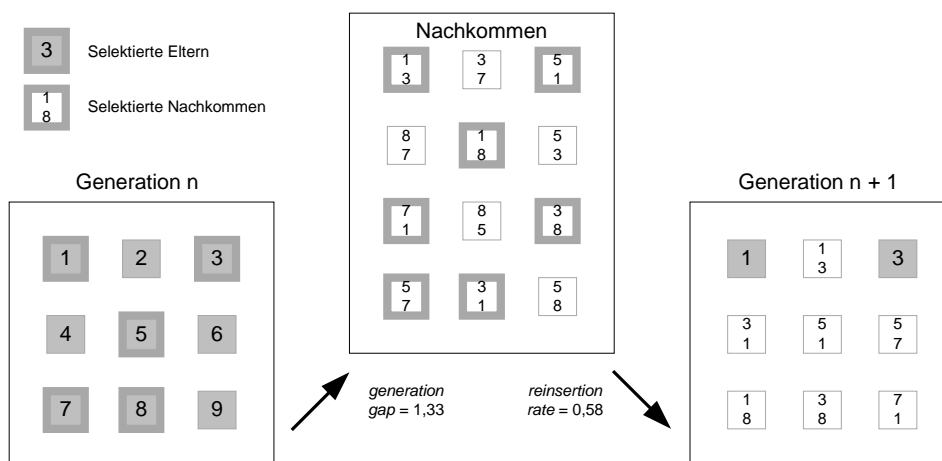


Abbildung 36: Wiedereinfügen mit Selektion der Nachkommen

Auch bei der abgebildeten Variante handelt es sich um eine Variante der *elitest reinsertion* und es sollte entsprechend mit einem Alter der Individuen gearbeitet werden.

4.1.8 Die Migration

Die Migration ist Bestandteil des in 4.1.1 bereits kurz vorgestellten regionalen Modells eines evolutionären Algorithmus. Das regionale Modell, das die Verwendung von Unterpopulationen vorsieht, ermöglicht es, mehr oder weniger unabhängige Berechnungen gleichzeitig anzustellen. Nach einer gewissen Zeit werden jedoch einzelne Individuen der Unterpopulationen untereinander ausgetauscht. Dieser Vorgang nennt sich Migration.

Wie [Poh00] beschreibt, wird die Migration durch verschiedene Faktoren bestimmt, die bestimmen, in welcher Weise, wie häufig und nach welcher Auswahl eine Migration stattfindet. Diese sind:

- Migrationstopologie
- Migrationsintervall
- Migrationsrate
- Migrationsauswahl

Durch die Einstellung dieser Faktoren kann im Wesentlichen bestimmt werden, wie schnell und auf welche Weise Informationen zwischen Unterpopulationen ausgetauscht werden. In der Anwendung in der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware hat die Verwendung von Unterpopulationen Vorteile: So ist es möglich, die Unterpopulationen anfangs mit unterschiedlichen Merkmalen zu versehen. Durch die relative Isolation einer Unterpopulation kann sich dieses Merkmal eine gewisse Zeit lang ungestört entwickeln und gute Lösungen erzielen. Würde man alle Individuen in nur einer einzigen großen Population zusammenfassen, so bestünde die Gefahr, dass bestimmte Eigenschaften, die vielleicht anfangs noch nicht zu guten Ergebnissen führen, sehr schnell verschwinden würden, da die Selektions- und damit die Rekombinationswahrscheinlichkeit gering wäre. Das regionale Modell hingegen erlaubt die parallele Untersuchung verschiedener Eigenschaften.

Dabei werden die Grundlagen für die Unterschiede der einzelnen Unterpopulationen bereits bei der Initialisierung gelegt. Ein gängiger und erfolgreich getesteter Ansatz wäre es, für einen bestimmten Entwurf verschiedene Initialisierungsstrategien, wie sie unter 3.5.4 beschrieben wurden, für einzelne Unterpopulationen zu wählen. So ist es beispielsweise denkbar, unterschiedliche Unterpopulationen mit verschiedenen Außenformen auszustatten. Dies führt dazu, dass sich die einzelnen Unterpopulationen zunächst „in Ruhe“ entwickeln

können und bessere Varianten entwickeln. Nach Ablauf einer bestimmten Zeit werden diese Unterpopulationen dann verglichen und es kommt zu Konkurrenz zwischen Individuen unterschiedlicher Unterpopulationen.

Generell kann festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen einzelnen Unterpopulationen immer so gewählt werden sollen, dass sie die wichtigste bzw. schwierigste Situation des Gebäudes klassifizieren. Wüsste ein Bauherr beispielsweise schon, dass sein Haus unbedingt rechteckig und mit einem Wärmedämmverbundsystem ausgestattet sein soll oder muss, so macht es natürlich keinen Sinn, unterschiedliche Außenformen und Wandstile in den einzelnen Unterpopulationen gegeneinander laufen zu lassen. Hier würde es, je nach Situation, vielleicht Sinn machen, die Unterpopulationen mit unterschiedlichen Grundrisskonfigurationen auszustatten. Oder wenn beispielsweise ein Bauherr schon genaue Kenntnisse über sein Haus hat, aber wissen möchte, welches Heizungssystem für ihn am besten ist, so macht es Sinn, die Unterpopulationen mit gleichen oder ähnlichen Entwürfen auszustatten, die aber jeweils über unterschiedliche Heizungssysteme verfügen. Anhand dieser einfachen Beispiele kann man die Mächtigkeit des Werkzeuges von Unterpopulationen erahnen. Sie geben dem Nutzer der Software ein Werkzeug an die Hand, bestimmte Eigenschaften eines Hauses gezielt zu optimieren. Dabei kann natürlich prinzipiell jede Eigenschaft des Hauses als Unterscheidungsmerkmal genutzt werden. Zunächst sollen jedoch noch die Parameter der Migration der Unterpopulationen näher beleuchtet werden.

Migrationstopologie

Die Migrationstopologie bestimmt die Art und Weise des Austauschs von Individuen zwischen den Unterpopulationen. Im einfachsten Falle handelt es sich um eine Ringtopologie, was bedeutet, dass ein Austausch immer mit der jeweils benachbarten Unterpopulation stattfindet. Die Anordnung der Unterpopulationen ähnelt dabei einem gedachten Ring, das heißt, dass Unterpopulation 1 mit Unterpopulation 2 tauscht, 2 mit 3 und n, wobei n die Anzahl der Unterpopulationen repräsentiert, mit 1. Dadurch wird der Ring geschlossen.

Die gängigste Topologie ist dabei die vollständige Netztopologie. Dies bedeutet, dass ein Austausch potentiell zwischen allen Unterpopulationen stattfindet. Im konkreten Ablauf heißt dies, dass, um ein Individuum in einer Unterpopulation auszutauschen, aus jeder damit verbundenen Unterpopulation, im Falle der vollständigen Netztopologie also jeder anderen, ein oder mehrere Individuen zur Migration gewählt werden. Danach wird gleichmäßig zu-

fallsverteilt eines der Individuen im dadurch entstandenen Migrationspool gewählt, das wiederum eines, zum Beispiel das schlechteste, Individuum der Ausgangsunterpopulation ersetzt.

Es existieren natürlich noch weitere Topologien, teilweise als Erweiterung der Ringtopologie. Eine genaue Erläuterung dieser Topologien ist an dieser Stelle jedoch unnötig.

Migrationsintervall

Das Migrationsintervall gibt die Häufigkeit des Austausches von Individuen zwischen Unterpopulationen an. Dabei kann das Migrationsintervall ein fester Wert sein, es kann also beispielsweise festgelegt werden, dass ein Austausch alle 30 Generationen stattfindet. Darüber hinaus kann das Migrationsintervall jedoch auch dynamisch festgelegt werden. Dies bedeutet, dass eine Migration durch ein bestimmtes Ereignis ausgelöst wird. Dies kann beispielsweise das Hervorbringen eines besonders guten Individuums in einer Unterpopulation oder aber das Konvergieren einer Unterpopulation sein.

Migrationsrate

Die Migrationsrate gibt an, wie viele Individuen zwischen den Unterpopulationen ausgetauscht werden. Auch hier kann es sich um einen festen Wert handeln, es kann also beispielsweise festgelegt werden, dass pro Migration ein Individuum ausgetauscht wird. Die Migrationsrate kann aber auch einen bestimmten Anteil, also beispielsweise 10 Prozent einer Unterpopulation festlegen. Da die Anzahl der Individuen in den Unterpopulationen nicht unbedingt immer gleich ist, kann mit einer anteiligen Bestimmung der Migrationsrate besser auf die vorhandenen Verhältnisse eingegangen werden. Auch die Migrationsrate kann natürlich im Verlaufe des Algorithmus angepasst werden und damit veränderbar sein.

Migrationsauswahl

Eine Migrationsauswahl findet an zwei Stellen statt. Zunächst werden aus einer oder mehreren Unterpopulationen ein oder mehrere Individuen ausgewählt, die in den Migrationspool eingehen. Dies geschieht in der Regel durch Auswahl des besten Individuums oder zufällig. Danach wird in der Unterpopulation, in der ein oder mehrere Individuen ersetzt werden, ausgewählt, welche Individuen ersetzt werden. Dies geschieht in der Regel entweder zufällig oder durch Auswahl des schlechtesten Individuums.

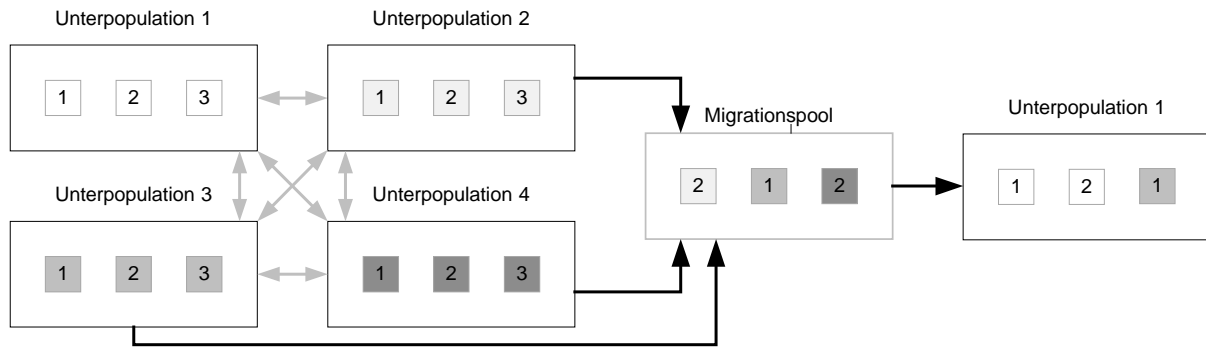


Abbildung 37: Schematischer Ablauf einer Migration

Abbildung 37 zeigt den schematischen Ablauf einer Migration. Alle Unterpopulationen sind zur Migration miteinander verbunden. Es handelt sich also um eine vollständige Netztopologie. Es soll ein Individuum in Unterpopulation 1 ersetzt werden. Dazu wird nun zunächst aus den Unterpopulationen 2, 3 und 4 jeweils ein Individuum ausgewählt und geht in einen temporären Migrationspool ein. Aus diesem wird nun zufällig ein Individuum ausgewählt und ersetzt ein Individuum aus Unterpopulation 1.

4.1.9 Die Konkurrenz von Unterpopulationen

Das Konzept von Unterpopulationen findet sich natürlich auch in der Natur, dabei ist für das Gedankenmodell zunächst egal, ob man als Analogie verschiedene Arten oder verschiedene Populationen der gleichen Art heranzieht, die sich einen Lebensraum teilen. Der entscheidende Unterschied zum bislang vorgestellten Modell liegt darin, dass im bisher beschriebenen Modell alle Unterpopulationen die gleichen Ressourcen zur Verfügung haben, da die Anzahl der Individuen pro Unterpopulation konstant bleibt, egal wie erfolgreich eine Unterpopulation ist. Dies ist in der Natur natürlich anders, da eine Population, die erfolgreicher ist, auch größer werden wird, da die Reproduktionswahrscheinlichkeit und –rate ansteigt. Im bisherigen Modell standen die Unterpopulationen somit also nicht in direkter Konkurrenz zueinander. Es ist aber durchaus sinnvoll, dies auch auf das Softwaremodell zu übertragen.

Um befähigt zu sein, eine Konkurrenzsituation herbeizuführen und eine qualifizierte Aussage über den Erfolg einer Unterpopulation treffen zu können muss natürlich zunächst ein Maßstab gefunden werden, der eine Ordnung der Unterpopulationen in Bezug auf ihren Erfolg zulässt. Um diese Ordnung herzustellen, werden die einzelnen Individuen der Unterpopulationen herangezogen. Dabei können alle Individuen oder aber nur das oder die besten Individuen pro Unterpopulation herangezogen werden. Die so gewählten Individuen werden

durch eine Fitnesszuweisung wie in 4.1.3 beschrieben klassifiziert. Zwischen den Individuen einer Unterpopulation wird der Mittelwert gebildet und stellt so die Güte einer Unterpopulation dar. Da diese Ordnung, besonders bei ähnlich erfolgreichen Strategien, häufig schwanken kann, wird sinnvollerweise ein sogenannter Positionswert gebildet. Dieser errechnet sich aus einer gewichteten Summe des Positionswertes der vergangenen Generation und dem Rang der aktuellen Generation [Poh00]. Auf diese Weise erlangt man eine Reihenfolge der Unterpopulationen.

Nun ist es sinnvoll, gute Unterpopulationen mit zusätzlichen Ressourcen, also mit Rechnerleistung zu belohnen, da diese mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einem guten Ergebnis führen werden. Es ist offensichtlich, dass in der Konkurrenz der Unterpopulationen miteinander eine Analogie zu der Konkurrenz von Individuen innerhalb einer Population liegt. Ähnlich wie dort wird auch hier ein Ranking erstellt. Analog zu den dort beschriebenen Umständen kann also auch hier mit einem dem Selektionsdruck analogen Wert, nämlich dem Verteilungsdruck (VP) gearbeitet werden. Je höher der Verteilungsdruck ist, desto mehr werden gute Unterpopulationen bevorteilt. Entsprechend des sich daraus ergebenden Graphen werden die Ressourcen auf die einzelnen Unterpopulationen verteilt.

Da in der Praxis häufig mit unterschiedlichen Strategien pro Unterpopulation gearbeitet wird, bietet sich hier noch die Definition des Ressourcenverbrauchs an. So kann es durchaus sein, dass der Ressourcen-, also Rechenzeitverbrauch, für eine Strategie wesentlich höher ist als für eine andere. Das Maß des Ressourcenverbrauchs einer Unterpopulation ergibt sich hier also aus dem Ressourcenverbrauch eines Individuums multipliziert mit der Anzahl der Individuen. Im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung hat es sich jedoch als sinnvoller erwiesen, nicht unterschiedliche Strategien konkurrieren zu lassen, sondern vielmehr unterschiedliche Eigenschaften (siehe 4.1.8). Obwohl es natürlich sehr wohl aufwändiger sein kann, eine Unterpopulation mit L-förmigen Außenformen zu berechnen, als eine mit rechteckigen Grundrissen, hat es sich in der Praxis erwiesen, dass es sinnvoll ist, den Ressourcenverbrauch der Individuen gleichverteilt, also mit 1, anzunehmen.

Bei der Verwendung des Konkurrenzmodells mit unterschiedlichen Strategien wird zumeist ein minimaler Ressourcenanteil pro Unterpopulation definiert, der das Überleben der Unterpopulation als Ganzes sichert. Dies ist in diesem Rahmen sinnvoll, da das Aussterben einer Unterpopulation zum Aussterben einer kompletten Strategie führen würde. In der Architek-

turgenerierung ist es jedoch ab einem bestimmten Zeitpunkt durchaus sinnvoll, es zuzulassen, dass Unterpopulationen aussterben, da es sehr gut möglich sein kann, dass die Eigenschaften der Entwürfe einer Unterpopulation dazu führen, dass eine Unterpopulation nicht wettbewerbsfähig ist und damit ausstirbt. Das Aussterben sollte jedoch erst im Verlaufe der Optimierung zugelassen werden, da das regionale Modell auch ein Werkzeug zur Varianzerhaltung ist. Somit ist es zu Beginn einer Optimierung durchaus sinnvoll, auch schlechtere Unterpopulationen „weiterleben“ zu lassen, um eine frühzeitige Konvergenz zu vermeiden. Dieser Ansatz lässt sich sehr gut über das Mittel des Verteilungsdruckes realisieren. Analog zum Selektionsdruck kann sogar durch einen Verteilungsdruck von 1 die Konkurrenz zwischenzeitlich völlig ausgesetzt werden. In der Praxis hat es sich als gut erwiesen, den Verteilungsdruck mit fortlaufender Optimierung anwachsen zu lassen. Dies garantiert eine frühe Bewahrung der Varianz und einen hohen Konkurrenzdruck gegen Ende der Optimierung. Im Extremfall kann dieses Vorgehen natürlich dazu führen, dass sich das regionale Modell zu einem globalen Modell entwickelt, nämlich dann, wenn nur noch eine Unterpopulation übrig sein sollte. Dies ist in diesem Falle aber ein gewünschtes Verhalten, da sich damit im Verlaufe der Optimierung herausgestellt hat, dass die Lösungen einer Unterpopulation die besten sind. Gegen Ende der Optimierung können somit alle Ressourcen darauf verwandt werden, die Eigenschaften der „siegreichen“ Unterpopulation weiter zu verbessern.

Natürlich ist auch bei der Konkurrenz analog zur Migration zu beachten, dass Aussagen zu Konkurrenzintervall, Konkurrenzrate und Konkurrenzauswahl getroffen werden müssen. Es hat sich als robust erwiesen, das Konkurrenzintervall an das Migrationsintervall anzupassen, das heißt, dass eine Neubewertung der Unterpopulationen nur dann stattfindet, wenn auch eine Migration durchgeführt wird. Die Konkurrenzrate wird in der Regel als maximaler Anteil der Individuen definiert, die von einer Unterpopulation abgegeben werden. Es ist sinnvoll, diese Rate als prozentualen Anteil einer Unterpopulation zu definieren, da auf diese Weise sichergestellt ist, dass kleine schlechte Unterpopulationen weniger Ressourcen abgeben müssen als große schlechte. Bei der Auswahl der abzugebenden Individuen kann man das beste, das schlechteste oder ein zufälliges Individuum wählen. In der Praxis ist es sinnvoll, das schlechteste oder ein zufälliges Individuum zu wählen, da so gewährleistet ist, dass schlechte Unterpopulationen nicht noch mehr bestraft werden und ihres besten Individuums beraubt werden. Das Belassen des besten Individuums gewährt im Rahmen der Selektion

und Rekombination die Chance, bessere Nachkommen zu erzeugen und Ressourcen zurückzugewinnen.

4.2 Die Festlegung von Einflusskategorien und Parametern

Nachdem nun die Grundlagen eines evolutionären Algorithmus geklärt sind, soll detailliert auf die Umsetzung der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware eingegangen werden. Wie in 4.1.1 beschrieben wurde, bezeichnet man die Gesamtheit der genetischen Eigenschaften eines Individuums als Genom. Auf die Architekturgenerierung bezogen, bezeichnet das Genom also den Entwurf als Ganzes, wobei das Genom nicht nur auf reine Eigenschaften des Gebäudes an sich beschränkt ist, sondern auch Grundstücks- oder Nachbarschaftseigenschaften kodiert werden.

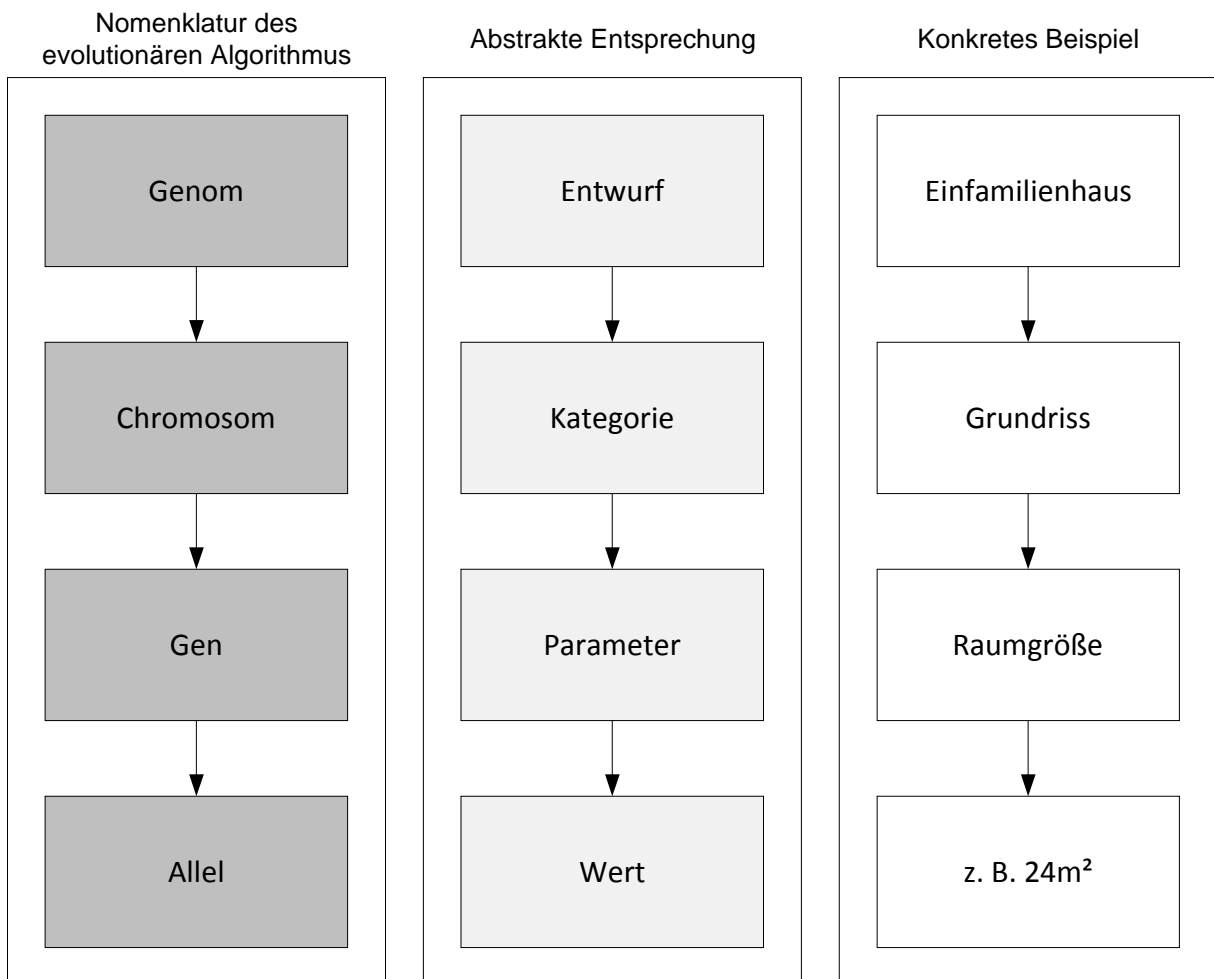


Abbildung 38: Begriffe und logische Verknüpfung der ganzheitlichen Architekturgenerierung

Ebenfalls in 4.1.1 wurde das Chromosom als „Sammelstruktur“ von Genen bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit soll das Chromosom analog zum abstrakten Begriff der Kategorie verwendet werden. Das Genom, also der Entwurf insgesamt, besteht aus mehreren Chromosomen, also Kategorien, worauf wiederum die Gene als Kodierung der Variablen liegen. Eine konkrete Ausprägung eines Gens, oder der Wert einer Variablen ist das Allel. Abbildung 38 zeigt diesen Sachverhalt.

In 2.5 wurde bereits ein erster Überblick über die Kategorien und Parameter eines Entwurfes gegeben. Es wurde auch bereits festgestellt, dass alle Parameter einer Kategorie angehören und eindeutig mathematisch quantifizierbar sein müssen. Dabei kann es durchaus sein oder ist sogar in der Regel so, dass Parameter voneinander abhängig sind. Wenn man etwa einen Punkt des Grundrisses als Parameter versteht, so hat dieser nicht nur Einfluss auf die geometrische Ausgestaltung des Entwurfes, sondern beispielsweise ebenfalls auf den Start- oder Endpunkt einer damit verknüpften Wand. Die Kategorien als zusammenfassendes Element von Parametern sind so also nicht als homogene und autarke Summe von Eigenschaften zu verstehen. Sie sind vielmehr in vielfältiger Weise verknüpft. Trotzdem erscheint es sinnvoll, Kategorien als logische Struktur zu verwenden, um einen besseren Überblick über den Gesamtvorgang zu behalten und im Verlauf der Optimierung gezielt Einfluss üben zu können. Das Individuum als Repräsentant eines architektonischen Entwurfes ist im Prinzip die Summe der Zustandswerte der einzelnen Geometrien und Bauteile. Diese bedingen jedoch viele andere Faktoren und müssen deshalb differenziert untersucht werden.

Bereits in 2.5 wurde ein Überblick über die hier vorgeschlagenen Kategorien gegeben. Diese sind Grundriss, Baukosten, Form, Energiekosten, Stil, Umwelt, Nachhaltigkeit und Nutzerbedürfnisse. Wie dort schon beschrieben, ist diese Liste nicht als unumstößlich oder vollständig zu betrachten. Sie gibt aber einen guten Ansatz, um viele Faktoren eines Entwurfes zu fassen. Erweitert werden müsste diese Liste jedenfalls um einige Ingenieurleistungen, wie beispielsweise Statik, Bauphysik oder Elektroplanung. Dies soll in diesem Rahmen aber aus naheliegenden Gründen nicht geschehen. Es sollen nun vielmehr die einzelnen vorgeschlagenen Parameter der vorliegenden Kategorien erläutert werden. In 4.3 wird dann auf die mathematische Quantifizierbarkeit dieser Parameter eingegangen.

An dieser Stelle soll noch ein weiterer Begriff eingeführt werden, der der besonderen Situation eines hier beschriebenen architektonischen Entwurfes Rechnung trägt. Wie kurz ange-

deutet nehmen sicherlich die Geometrien und Bauteile als Instanzen der in 3.3 beschriebenen Klassen eine Sonderstellung ein. Deshalb sollen hier die Geometrie als konkrete, aber abstrakte Beschreibung eines Gebäudes, sowie die Bauteile als konkrete und fassbare Ausprägung eines Gebäudes als Metakategorien, beziehungsweise in der Terminologie des evolutionären Algorithmus analog als Metachromosom bezeichnet werden. Diese Sonderstellung wird als gerechtfertigt erachtet, da es vor allem die auf diesen Metachromosomen befindlichen Gene sind, die direkt den Entwurf baulich repräsentieren. Die meisten Gene der anderen Chromosomen sind direkt oder indirekt von der Ausprägung der Gene auf den Metachromosomen abhängig. Als Beispiel seien die Gene des Chromosoms „Energie“ genannt. Diese, und damit im konkreten Sinne die Energiebilanz, sind fast ausschließlich von der Ausprägung der Gene auf dem Chromosom „Bauteile“ abhängig, da hier die konkreten Materialien, Wandstärken, Formen etc. kodiert werden. Das Chromosom „Energie“ ist ein gutes Beispiel für ein völlig passives Chromosom, das ausschließlich von den Zuständen von Genen auf anderen Chromosomen abhängig ist.

Eine weitere Besonderheit der Metachromosomen ist die Tatsache, dass ihre Gene nicht direkt in die Berechnung der Zielwertfunktion eines Individuums eingehen und somit nicht direkt einer Fitnesszuweisung und der daraus folgenden Selektion unterworfen sind. Es handelt sich hierbei sozusagen um „Tatsachen“, die objektiv vorhanden sind und subjektiv nicht direkt bewertbar sind, sondern durch die Gene der anderen Chromosomen, die von den Metachromosomen abhängig sind, bewertet werden. So kann beispielsweise ein Raum als Geometrie auf dem Metachromosom, der beispielsweise durch vier Koordinaten und vier Vektoren beschrieben ist, nicht direkt bewertet werden. Es handelt sich hierbei schlicht und einfach um acht Zahlenwerte, die einen Raum geometrisch beschreiben, die aber nur im Kontext anderer Parameter eine interpretierbare Bedeutung erhalten und nur so in die Fitnessbewertung eines Individuums einfließen können.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass Metachromosomen objektive Werte beziehungsweise Gene enthalten und nur indirekt in die Fitnessbewertung eingehen und normale Chromosomen interpretierte und in der Regel von den Werten der Metachromosomen abhängige Werte enthalten, die direkt der Fitnessbewertung und damit der Selektion unterworfen sind.

Nachdem nun die Kategorien beziehungsweise Metakategorien umrissen sind, kann näher auf die einzelnen Parameter eingegangen werden.

Geometrie

Die Parameter der Kategorie „Geometrie“ wurden bereits in 3.3.3 ansatzweise erläutert. Die Parameter der Geometrie sind im Prinzip deckungsgleich mit den Attributen der Instanzen der Klasse Geometrie, die wiederum in erster Linie Räume als geschlossene geometrische Gebilde repräsentieren. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass auch Außenräume als Raum definiert sind und nicht unbedingt jede Kante einer Geometrie in baulicher Hinsicht eine Wand darstellen muss. Auf diese Weise sind auch offene Grundrisse repräsentierbar.

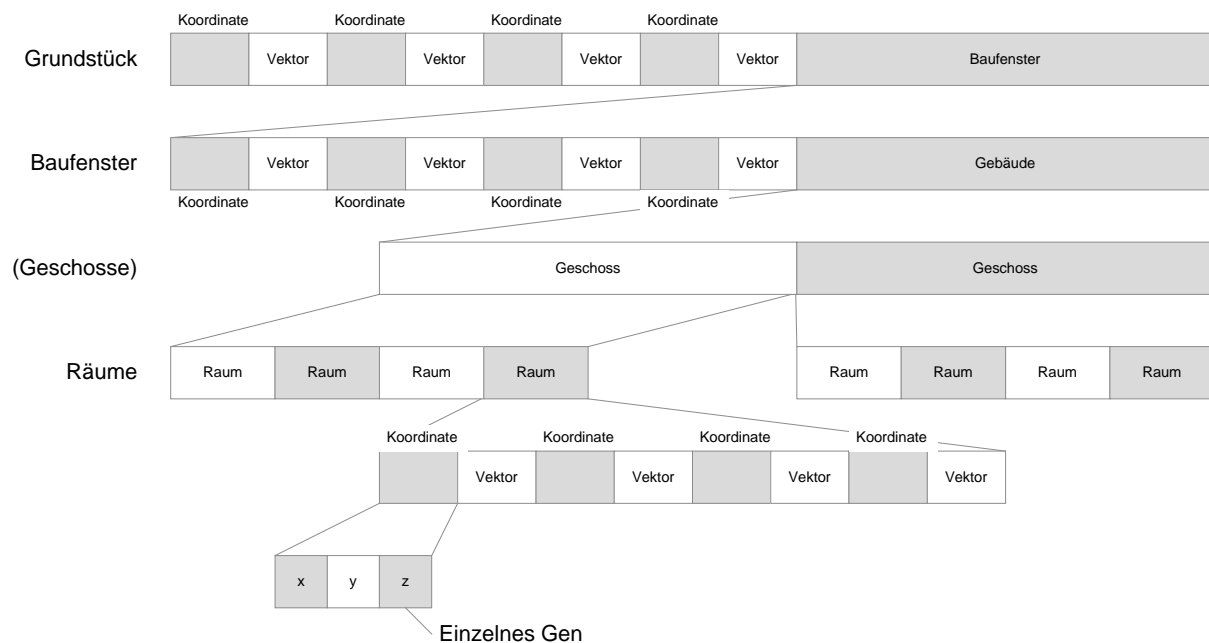


Abbildung 39: Chromosom 1, das die Geometrie kodiert

Das einzelne Gen, also die Variable, repräsentiert hierbei meistens einen reellen Zahlenwert als x-, y- oder z-Koordinate eines Punktes oder eines Vektors, wie in Abbildung 39 zu sehen ist. Dabei ist auf Chromosom 1, dem „Geometriechromosom“ die vollständige Information enthalten, um einen Entwurf als Ganzes geometrisch abzubilden. Dabei gibt es noch einige andere Gene, etwa solche, die kodieren, zu welchem Geschoss ein Raum gehört. Das Chromosom kann sich dabei bildlich als Strang von Informationen vorgestellt werden. Alle Gene sind darauf als eine Reihe von Informationsträgern aufgereiht und stellen das Gebäude dar.

Dabei muss beachtet werden, dass auch innerhalb des Chromosoms starke Abhängigkeiten bestehen, so ist etwa der Wert eines Vektors abhängig von den Werten des vorherigen und des folgenden Punktes, beziehungsweise umgekehrt. Das Gen wird später auch der Mutation unterworfen werden. So wird auch schnell klar, dass die Mutation eines einzelnen Genes, also beispielsweise einer x-Koordinate eines Raumes vielfache Änderungen mit sich bringt, da durch die Veränderung eines Punktes der Raum verändert wird, durch den Raum wird das Geschoss verändert, durch das Geschoss das Gebäude. Außerdem werden natürlich zahlreiche Eigenschaften anderer Chromosomen ebenfalls geändert, da etwa die Wände als Bauteile in direkter Abhängigkeit zu den Koordinaten stehen. Auf den Wänden basieren wieder andere Dinge, wie etwa die Energie- oder Kostenberechnung und so fort. Die Mutation eines Genes kann also sehr viele Eigenschaften des gesamten Individuums ändern.

Bauteile

Das „Bauteilchromosom“ bildet Chromosom 2 und ist das zweite hier als Metachromosom bezeichnete Chromosom, da auch dieses keine eher abstrakten Parameter kodiert, sondern konkrete Eigenschaften des Gebäudes enthält. Die Eigenschaften beziehungsweise Parameter dieser Kategorie wurden im Wesentlichen bereits in 3.3.2 und 3.4 umrissen. Es handelt sich bei den Bauteilen um konkret aus der Bauteilbibliothek gewählte Bauteilstile der einzelnen Bauteile, wie Wand, Fenster, Tür oder Decke. Daher ist die Struktur des Chromosoms 2 relativ simpel: Seine Gene kodieren in der Regel ganzzahlige Werte als Referenz auf die entsprechenden Stile in der Bauteilbibliothek, sowie Referenzen auf Geometrien, von denen die Bauteile abhängig sind. Bei einigen Bauteilen wird auch eine eigene Geometrie analog zu der oben beschriebenen Art und Weise gespeichert, so etwa bei abgehängten Decken, die natürlich nicht zwangsläufig die gleiche Geometrie wie ein Raum haben müssen. Außerdem werden natürlich weitere beschreibende Faktoren, wie der Durchmesser einer Stütze oder ähnliches gespeichert.

Grundriss

Das nächste Chromosom enthält die Gene oder Parameter, die den Grundriss beschreiben. Auf diesem Chromosom „sitzen“ die Eigenschaften, die den Grundriss beschreiben, beziehungsweise seine Qualität definieren. Diese Eigenschaften hängen natürlich in sehr hohem Maße von den Parametern der Geometrie, besonders der Räume, ab. Trotzdem sollen diese Faktoren in eine eigene Kategorie zusammengefasst werden, da es sich hierbei um passive

Faktoren handelt, die von der Geometrie abhängen, jedoch die Qualität des Grundrisses widerspiegeln sollen. Es handelt sich also um die Interpretation der geometrischen Werte unter grundrissbezogenen Gesichtspunkten. An dieser Stelle sei auch nochmals darauf hingewiesen, dass es sich dabei nicht um eine Interpretation im Sinne eines Architekturstiles handelt. Es handelt sich vielmehr um eine Interpretation auf konkreter Ebene, die vorher definierte nötige Eigenschaften eines Grundrisses darstellen. Die „architektonischen“ beziehungsweise stilistischen Aspekte des Grundrisses werden in einer eigenen Kategorie zusammengefasst.

Die wichtigsten Gene des Grundrisses sind: Verbindungen zwischen den Räumen, Raumgrößen, Seitenverhältnisse bzw. Wohlgeformtheit der Räume, minimale Seitenlängen der Räume und Einhaltung von Rastern. Es sei darauf hingewiesen, dass hier, besonders bei Beispielen, in der Regel von rechteckigen Geometrien ausgegangen wird. Dies dient der Einfachheit der Darstellung und ist keine systemimmanente Eigenschaft. Nach Durchsicht der hier vorgeschlagenen Parameter lässt sich sicher eine einfache Art und Weise erkennen, die Interpretation des Grundrisses auch auf freie Formen zu erweitern. Da hier aber vor allem das Konzept der architektonischen Optimierung thematisiert werden soll, würde die Interpretation von freien Formen die Darstellung unnötig verkomplizieren. Grundsätzlich gilt aber natürlich das hier vorgestellte Konzept auch für beliebige freie Formen.

Um die Verbindungen zwischen den Räumen zu interpretieren, werden zunächst alle möglichen Verbindungen ermittelt, das heißt, dass alle gemeinsamen Kanten, die Räume miteinander haben und die lang genug sind, um eine Tür oder einen Durchgang zu beherbergen, als mögliche Verbindung gewertet werden. Diese werden dann mit der Vorlage, also mit dem Soll-Zustand, der entweder vorher abgefragt wurde oder als Standard vorgegeben wird, verglichen. Es gibt dabei drei Kategorien von Verbindungen im Soll-Zustand: nötige, mögliche und nicht gewünschte Verbindungen. Somit kann auch darauf eingegangen werden, dass bestimmte Räume nicht aneinander grenzen sollen. Bereits hier wird deutlich, dass es sich bei dem Parameter um eine Interpretation der konkreten Werte von Chromosom 1 und 2 handelt.

Die Ermittlung der Raumgrößen ist relativ simpel und erfolgt durch Ermittlung der Fläche der entsprechenden zu Grunde liegenden Geometrien. Auch hier können die ermittelten Werte

mit den Soll-Werten verglichen werden, die ebenfalls durch Abfrage des künftigen Nutzers oder durch Vorgabe von Standards entstanden sind.

Die Wohlgeformtheit eines Raumes ist schon etwas schwieriger zu ermitteln. Wie gesagt, wird hier der Einfachheit halber von einem rechteckigen Grundriss ausgegangen. Für andere Grundrisse müsste dieser Parameter adaptiert und erweitert werden. Für den rechteckigen Grundriss kann hier einfach das Seitenverhältnis eines Raumes, also das Verhältnis der einen Seitenlänge zur anderen, herangezogen werden. Es wird vorgeschlagen, für jeden Raumtyp einen Bereich zulässiger Soll-Werte mitzugeben. So kann der Tatsache Rechnung getragen werden, dass bestimmte Räume durchaus länglicher sein dürfen als andere. So ist beispielsweise eine Küche oftmals länglicher als dies ein Wohnzimmer sein sollte. Trotzdem kann man sicher objektiv festlegen, dass ein Raum ein bestimmtes Seitenverhältnis nicht überschreiten sollte, um noch nutzbar zu sein. Dies sollte im Vorfeld geschehen und wird hier als Soll-Wert angenommen.

Als weiterer wichtiger Parameter des Grundrisses wird die Ermittlung der minimalen Seitenlänge eines Raumes empfohlen. Hintergrund dieses Parameters ist wiederum die Nutzbarkeit eines Raumes. Je nach Raumtyp sollte auch hier eine minimale Seitenlänge definiert werden, unter der ein Raum als nicht nutzbar zu gelten hat. Dieser Wert ist natürlich ebenfalls variabel, da der Wert sicherlich bei einer Abstellkammer anders aussehen wird, als bei einem Wohnzimmer. Mithilfe dieses Parameters lässt sich im Zusammenspiel mit dem vorherigen Parameter auf einfache Art und Weise sicherstellen, dass ein Raum nutzbar bleibt und die Wandlängen ein Mindestmaß nicht unterschreiten.

Schließlich soll noch der Parameter Rastereinhaltung betrachtet werden. Dieser Parameter ist optional, aber sicherlich bei den meisten Gebäuden von großem Vorteil. Dabei wird davon ausgegangen, dass dem Gebäude ein Konstruktionsraster zugrunde liegt. Natürlich ist es in diesem Sinne von Vorteil, dass sich auch die durch die Geometrie repräsentierten Wände auf diesem Raster befinden. Es wird daher vorgeschlagen, die Einhaltung eines Rasters, also das Maß, in dem alle Kanten des Gebäudes auf diesem liegen, als weiteren Parameter in die Berechnung eingehen zu lassen. Das Raster kann dabei adaptiv sein und sich den verwendeten Materialien anpassen, da das Konstruktionsraster natürlich von der verwendeten Konstruktionsart abhängig ist.

Baukosten

Das Chromosom „Baukosten“ ist ein sehr einfaches. Die Parameter dieses Chromosoms sind einfach die Kosten, die durch den Bau des Gebäudes entstehen würden, das durch das Individuum repräsentiert ist. Dabei muss die Berechnung der Baukosten natürlich die unterschiedlichen Kostengruppen, Regionalfaktoren etc. berücksichtigen, trotzdem handelt es sich im Prinzip um eine einfache Addition der Kosten des Baus der einzelnen Bauteile. Im Rahmen des Optimierungsvorgangs ist dabei der absolute Wert der Kosten nicht sehr relevant, sondern vielmehr der relative Wert, der die Fitness des Individuums bezogen auf die anderen Individuen angibt. Durch die ständige Verfügbarkeit eines Wertes für die Baukosten ergeben sich natürlich auch weitergehende Möglichkeiten, etwa eine Verrechnung der Baukosten mit den zu erwartenden Energiekosten auf einen bestimmten Zeitraum, so dass dieser Parameter als Werkzeug zur Nachhaltigkeit eines Entwurfes herangezogen werden kann. Dieser hieraus entstehende Parameter ist dann allerdings Teil der Kategorie Nachhaltigkeit. Dieses Chromosom besteht letztlich lediglich aus der Summe der Kosten der Bauteile, sowie aus Verrechnungsfaktoren oder auch Berechnungen zu der Größe des benötigten Erdaushubs etc.

Form

Die Form ist in gewisser Hinsicht ein Sonderfall, da es sich um eine Kategorie handelt, die nicht in jedem Falle benötigt wird. Diese Kategorie kommt nur dann zum Einsatz, wenn vom Nutzer oder durch die Bauordnung Vorgaben hinsichtlich der Außenform eines Gebäudes vorliegen. Trotz dieser Sondersituation wird es als sinnvoll erachtet, die Form als eigene Kategorie einzuführen, da, obwohl die Form im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung natürlich beliebig ausgeprägt sein kann, häufig doch gewisse Grundformen in der Praxis die größte Rolle spielen, zumal bei Planungen, für die der Einsatz einer hier beschriebenen Software in Frage kommt. Wie bereits bei der Beschreibung der Initialisierung angerissen, ist es im Rahmen der Generierung von Einfamilienhäusern durchaus sinnvoll, von gewissen Grundformen, wie einer rechteckigen, L-förmigen oder U-förmigen Außenform auszugehen, da diese nicht nur die Bauordnungen erfüllen, sondern auch unter Kostenaspekten meist günstiger sind als freie Formen. Nicht zuletzt bleibt festzustellen, dass sehr viele Einfamilienhäuser eine rechteckige Außenform als Grundlage haben. Ein Parameter dieser Kategorie ist dabei natürlich auch das Verhältnis von Außenfläche zu Volumen des Gebäudes, da diese Einfluss auf die Energiebilanz des Gebäudes hat (siehe beispielsweise [Vol06], S. 0-4).

Aber auch unter Vernachlässigung dieser Faktoren ist es sinnvoll, die Form als eigene Kategorie zu definieren. So kann beispielsweise hier eine eigene Optimierung der Form, entweder unter künstlerischen, architektonischen oder auch wirtschaftlichen Aspekten, stattfinden. Als Beispiel für die ökonomische Optimierung der Außenform sei das *Guggenheim Museum* in Bilbao genannt. Hier wurden die für die gewünschte freie organische Form benötigten Bauteile getrennt unter ökonomischen Aspekten optimiert (siehe [vBr99]).

Bei der Optimierung von freien Außenformen sind zwei Szenarien denkbar: Die Optimierung kann integriert oder isoliert stattfinden. Es ist dabei davon auszugehen, dass die Optimierung der Außenform ein eigener Algorithmus ist, der natürlich selbst auch wieder ein evolutionärer Algorithmus sein kann. Bei der integrierten Optimierung der Außenform würde in jeder Generation bei jedem Individuum eine Optimierung der Außenform stattfinden. Dies führt dazu, dass zu jedem Zeitpunkt der Gesamtoptimierung alle Informationen bezüglich der Außenform in optimierter Form vorliegen, die Erkenntnisse aus der Optimierung der Außenform können direkt in die Gesamtoptimierung einfließen. Nachteil dieser Methode ist, dass eine solche Optimierung sehr zeitaufwändig ist. Spielt dies keine Rolle, so ist dies sicherlich das Mittel der Wahl.

Bei einer isolierten Optimierung wird davon ausgegangen, dass der Entwurf einer optimierten Außenform entweder vor oder nach der Optimierung des Gesamtentwurfes stattfindet. Findet sie vor der Gesamtoptimierung statt, so ist eine Hüllform vorgegeben, an die sich der restliche Entwurf anpassen muss. Wird sie nach der Gesamtoptimierung vorgenommen, so muss sich der Entwurf der Außenform an das bestehende Gebäude halten. Welche Methode gewählt wird, ist sicherlich von der Art des Gebäudes, von der Intention des Benutzers oder anderen Faktoren abhängig. Es kann jedoch festgehalten werden, dass der so entstehende Entwurf im strengen Sinne nicht ganzheitlich optimiert ist, da eine getrennte Optimierung von Gebäude und Außenform stattfindet, was dazu führt, dass ein Informationsaustausch nur in eine Richtung möglich ist und keine ineinander greifende Optimierung möglich ist. Vorteil dieses Ansatzes ist jedoch der wesentlich geringere Zeitaufwand, der bei einem Bruchteil des Aufwandes der integrierten Lösung liegt. Um genau zu sein, liegt der Aufwand verglichen mit der integrierten Methode bei

$$\frac{1}{NInd * NGen}$$

wobei $NInd$ die Anzahl der Individuen in der Gesamtoptimierung und $NGen$ die durchschnittliche Anzahl von Generationen bei der Gesamtoptimierung bezeichnet. Bei nur 100 Individuen und 1000 Generationen ist der Aufwand also nur ein hunderttausendstel des Aufwandes der integrierten Optimierung. Andererseits handelt es sich relativ gesehen um einen konstanten Aufwandsunterschied, so dass bei einer linearen Steigerung der Rechenkapazität eines Computers, wovon man ausgehen kann („Moore's Gesetz“, siehe [Ste06], S. 41), der absolute Zeitunterschied immer geringer wird. Zumindest perspektivisch ist also die integrierte Optimierung vorzuziehen.

Umwelt

Das Chromosom „Umwelt“ fasst alle Parameter zusammen, die als äußere Faktoren auf den Entwurf Einfluss nehmen oder von diesem beeinflusst werden. Hierbei ist zunächst einmal die Ausrichtung zu nennen. Diese hat Einfluss auf die Lage der Räume innerhalb des Gebäudes, indem bestimmte Räume bevorzugt in bestimmte Himmelsrichtungen ausgerichtet werden, als Beispiel sei nur das Wohnzimmer genannt, das natürlich nicht unbedingt nach Norden ausgerichtet werden sollte und somit keine direkte Sonneneinstrahlung erfahren würde. Die himmelsrichtungsbezogene Ausrichtung ist aber natürlich nicht nur für die einzelnen Räume von Interesse, sondern auch für die Bauteile und die damit verbundene Berechnung von energetischen Gegebenheiten. Hier besteht natürlich eine starke Abhängigkeit zum Faktor Energie. So wird die Ausrichtung eines Bauteiles beispielsweise herangezogen, um die Wärmeverluste eines Bauteils zu berechnen, oder andererseits, um die solaren Zugewinne durch Sonneneinstrahlung zu berechnen [Vol06].

In die Kategorie „Umwelt“ fallen aber auch alle Faktoren, die in sonstiger Art und Weise Einfluss auf die Ausrichtung des Gebäudes an sich oder auf die Ausrichtung der Räume innerhalb des Gebäudes nehmen. So wird bei der Eingabe des zu bebauenden Grundstücks auch nach weiteren Faktoren gefragt, beispielsweise nach Lärmquellen, guten oder schlechten Sichtlinien oder dem Standort von natürlichen Hindernissen, wie erhaltenswerten Bäumen. Prinzipiell zählen aber alle derartigen Faktoren, die auf den Entwurf Einfluss nehmen, in diese Kategorie, nicht zuletzt natürlich auch die Ausprägung und Lage der eventuellen Nachbarbebauungen oder die Lage von Straßen, die unter Umständen auch Einfluss auf die Ausprägung des Baufensters haben.

Für das Beispiel der Einfamilienhäuser ist die Liste der sinnvollen Einflussfaktoren sicherlich begrenzt, für andere Bauaufgaben kann die Liste aber beliebig erweitert werden. So können beispielsweise auch Lage und Entfernung von öffentlichen Verkehrsmitteln einfließen, die beispielsweise wiederum Einfluss auf die nötige Anzahl von Parkplätzen haben. Es wird auch vorgeschlagen, weichere Faktoren, wie Kriminalitätsrate oder Einkommensniveau eines Gebietes einfließen zu lassen, da diese ebenfalls Auswirkungen auf die konkrete Ausprägung des Gebäudes haben können. Es sei in diesem Zusammenhang etwa auf die Bauaufgabe eines Einkaufszentrums hingewiesen, für den diese Faktoren durchaus eine wichtige Rolle spielen können. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren ist auch hier eine automatisierte Planung mit hohem Komplexitätsgrad realisierbar.

Energiekosten

Das Chromosom „Energiekosten“ ist ähnlich einfach wie das der Baukosten. Hier werden die Parameter kodiert, die die Energiebilanz ausmachen. Als Parameter der Kategorie sind also alle Variablen vorzusehen, die für eine Energiebilanz nach Energieeinsparverordnung (ENEV), DIN V 4108 und anderen zu berücksichtigen sind (zur Berechnung siehe beispielsweise [Vol06]). In erster Linie gehen hierbei natürlich die einzelnen, auf dem Chromosom 2 liegenden Bauteile in die Berechnung ein. Des Weiteren sind aber beispielsweise auch Informationen zu Art der Heizungsanlage oder der verwendeten Energieträger nötig. Außerdem gehen Informationen der Form, so etwa das Verhältnis von Außenfläche zu Volumen des Baukörpers in die Berechnung ein.

Die Berechnung der Energiekosten erfolgt dabei zunächst einmal über die Ermittlung des Energiebedarfs für das Gebäude. Dieser Wert ist absolut gesehen zunächst nicht aussagekräftig, wird aber zum einen ins Verhältnis zu den anderen Individuen gesetzt, was eine relative Fitnesszuweisung zulässt, zum anderen ist eine Aussage über die Einhaltung der entsprechenden rechtlichen Vorgaben möglich, wobei natürlich eine Nichteinhaltung im Rahmen der Fitnesszuweisung entsprechend bestraft werden muss.

Wie schon bei den Baukosten angesprochen, kann des Weiteren eine perspektivische Verrechnung mit Baukosten stattfinden, so dass eine Prognose des Verhältnisses von Bau- zu Energiekosten möglich wird. Hierfür müssen natürlich Prognosen gestellt werden, die etwa eine Entwicklung des Preisgefüges von Energieträgern berücksichtigen.

Außerdem besteht eine Abhängigkeit zu den Parametern aus dem Bereich Umwelt, so etwa bei der Berücksichtigung der Ausrichtung des Gebäudes in Bezug auf die Himmelsrichtungen.

Stil

Wie schon kurz angerissen, ist der Stil natürlich ebenfalls eine besondere Kategorie. Diese Kategorie ist sicherlich subjektiv gesehen die am schwersten zu fassende Kategorie, da hier berücksichtigt werden muss, inwiefern es sich bei dem Gebäude um „gute“ Architektur im Sinne eines Baustils handelt. Obwohl natürlich alle anderen Faktoren ebenfalls dazu beitragen, gute Architektur zu produzieren, handelt es sich bei den Fragen des Baustils um eine sehr wichtige Kategorie, da sie schließlich ausschlaggebend ist, was das Erscheinungsbild des Gebäudes anbelangt.

Wie bereits dargelegt, ist die Behandlung dieser Kategorie ein eigenes, sehr komplexes Thema, das in einer eigenen Arbeit behandelt wird (siehe [Sch07]), da es den Rahmen hier sprengen würde. Deswegen soll auch nur kurz umrissen werden, wie der Stil in die Berechnung einfließen kann. Es handelt sich hierbei um die Kategorie, an der immer wieder Ansätze zur automatischen Generierung von Architektur gescheitert sind, da hierbei nicht nur objektive und unmittelbar mathematisch quantifizierbare Parameter zu berücksichtigen sind. Aus diesem Grunde wird es als zielführend angesehen, zum jetzigen Zeitpunkt nicht generativ in diesem Sinne auf den Baustil einzugehen, sondern vielmehr einen Grad der Übereinstimmung mit einem vorhanden Stil, also dem eines Architekten, festzustellen. Im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung wird dabei definiert, dass der Stil lediglich das Gebäude an sich ohne Berücksichtigung äußerer Parameter beschreibt. Hintergrund hierfür ist eine logische Trennung von äußeren und inneren Einflüssen auf den Stil. Es wird festgestellt, dass der Stil sozusagen die Handschrift des Entwerfers ist, der in bestimmter Art und Weise auf Erfordernisse reagiert. Als Beispiel aus dem Einfamilienhausbau sei die Ausprägung der „Rückseite“ eines Hauses genannt. Bereits die Definition der Rückseite ist eine objektive Entscheidung, auf die verschiedene Parameter Einfluss haben. Dies können beispielsweise die Lage der Straße, die Ausrichtung bezüglich der Himmelsrichtungen oder eine Lärmquelle sein. Diese Entscheidung hat also nichts mit dem Stil zu tun. Eine Reaktion auf die Definition einer Rückseite ist zum Beispiel die Anordnung bestimmter untergeordneter Räume an dieser Seite und die entsprechende Ausprägung mit kleinen und wenigen Fenstern. Auch diese Entscheidung ist objektiv mit den hier beschriebenen Parametern messbar. Der Stil beginnt

dort, wo zum Beispiel entschieden werden muss, ob ein Fenster auf dieser Seite im Hoch- oder im Querformat angeordnet wird. Objektiv gesehen sind beide Möglichkeiten gleichwertig, wenn man davon ausgeht, dass beide Anordnungen gleich teuer sind. Aber in Bezug auf alle anderen Parameter ist kein Unterschied messbar: beide Fenster lassen gleich viel Licht herein, sie bringen die gleichen Kosten und Energiekosten mit sich, sie lassen gleich viel Lärm herein, sie haben den gleichen Anteil an der Belichtungsfläche bezogen auf die Grundfläche des dahinter liegenden Raumes. Die beiden Fenster sind also in allen objektiven Bereichen gleichwertig und trotzdem entscheidet der Architekt, dass das Fenster entweder so oder so eingebaut wird, je nachdem, inwiefern es besser zu seinem Entwurf passt. Dies kann also als subjektive Entscheidung aufgefasst werden, die zwar im Kontext des Gesamtentwurfes sicher richtig oder falsch sein kann, andererseits jedoch im Kontext zweier verschiedener Entwürfe zu zwei verschiedenen Lösungen führen kann, wobei beide objektiv gleichwertig sind. Durch die objektive Gleichwertigkeit kann der Computer unmöglich entscheiden, welche Lösung die richtige ist (es sei denn durch einen Zufallsgenerator, was zwar zu einer eigenen Ästhetik führen kann, hier jedoch nicht thematisiert werden soll). Angesichts dieser Betrachtung erscheint es zielführend, die Entscheidung, ob das Fenster so oder so verwendet wird, einem Abgleich mit einem Architektenprofil zu unterwerfen.

Ohne auf die Details der Umsetzung dieses Abgleichs eingehen zu können, soll das Konzept an diesem Beispiel klar gemacht werden. Anhand der Entscheidungen, die ein Architekt in gleicher Situation früher getroffen hat, wird entschieden, welche Lösung gewählt wird. Dabei können natürlich wiederum alle Parameter, die hier beschrieben werden, in diese Entscheidung einfließen, da diese natürlich von diesen abhängig ist, also zum Beispiel von der Frage, um welchen Raum es sich handelt, welche Richtung das Fenster hat, welches Material die umgebende Wand hat, welche Umweltfaktoren vorherrschen, oder wie die Fenster in den anderen Bereichen des Gebäudes angeordnet werden.

Natürlich handelt es sich bei dem beschriebenen Beispiel um ein einfaches. Die Frage des Stils umfasst natürlich zahlreiche Parameter. Trotzdem soll für die vorliegende Arbeit festgehalten werden, dass äußere Faktoren als solche keinen direkten, sondern nur indirekten Einfluss auf den Stil haben und dass die Definition eines Stils mittels eines Vergleiches mit einem Architektenprofil zustande kommt. Für die Optimierung des Gesamtgebäudes kann hieraus also analog zu den anderen Kategorien ein Wert bezogen werden, der eine Fitnessbe-

stimmung des Gebäudes bezüglich des Stils zulässt. Dieser Wert repräsentiert im Endeffekt den Grad der Übereinstimmung eines Entwurfes mit dem Stil eines bestimmten Architekten.

Kurz angerissen werden soll aber noch ein weiterer möglicher Aspekt des Baustils. Nämlich die Frage nach der „Ästhetik durch sich selbst“, also der Möglichkeit, dass es gar nicht nötig ist, den Stil als solchen zu behandeln. Es sei vielmehr die Anregung in den Raum gestellt, die entstehende Architektur als solche zu sehen, als das Ergebnis eines Prozesses, der es zum Ziel hat, möglichst viele Parameter zu berücksichtigen und aus diesem Prozess heraus Architektur zu schaffen, die das Ergebnis dieser Anforderungen ist und die somit als „vollständig“ erachtet werden kann. Auch im Sinne von beispielsweise ALBERTI [Alb88] kann so Architektur entstehen, bei der man nichts weglassen kann und bei der nichts hinzugefügt werden muss. In diesem Sinne wäre dann der Baustil nicht als ein Parameter, als eine „Stellschraube“ des Gesamtprozesses, sondern als Quintessenz desselben zu sehen. Diese Frage kann an dieser Stelle nicht erschöpfend erörtert werden, nicht zuletzt sind die Ergebnisse zur Beantwortung noch zu wenig umfassend, der Anstoß zu einer weiteren Betrachtung dieser Möglichkeit soll aber gegeben werden.

Nachhaltigkeit

Die Kategorie „Nachhaltigkeit“ verbindet alle Parameter, die dazu führen, dass das Gebäude über den aktuellen Zustand hinaus nutzbar bleibt und dabei möglichst geringe ökonomische oder umweltbedingte Folgekosten nach sich zieht.

Ein wichtiger Parameter der Nachhaltigkeit wurde bereits umrissen: Der Aspekt der energetischen Nachhaltigkeit des Gebäudes. Hierbei können wiederum mehrere Aspekte zusammengefasst werden. Zum Einen wird das Konzept der ökonomischen Nachhaltigkeit bezogen auf einen bestimmten Zeitraum optimiert. Dies bedeutet, dass verschiedene Lösungen unter dem Aspekt der Baukosten und der Energiekosten miteinander verglichen werden. Konkret kann dies bedeuten, dass ein Bauherr verschiedene Optimierungsziele setzen kann. So kann er beispielsweise völlig auf Baukosten optimieren. Dies führt dazu, dass ein Entwurf entsteht, der möglichst geringe Baukosten mit sich bringt. Eine energetische Optimierung findet dabei nur insofern statt, als natürlich die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Energieeinsparverordnung eingehalten werden müssen, um zu einem gültigen Entwurf zu gelangen. Das andere Extrem wäre eine völlige Optimierung auf Energiekosten, was dazu führt, dass ein Entwurf entsteht, der möglichst geringe Energiekosten mit sich bringt, den Aspekt der

Baukosten jedoch weitgehend vernachlässigt und nur insofern zur Anwendung kommt, als natürlich bei zwei energetisch gleichwertigen Entwürfen, der günstigere bezüglich der Baukosten favorisiert werden würde.

Abgesehen von diesen Extremen, die in der Regel nicht zu einem optimalen Ergebnis führen, ist eine Optimierung auf einen bestimmten Zeitraum möglich. Dies bedeutet, dass die Energiekosten zweier Entwürfe auf einen bestimmten Zeitraum mitberücksichtigt werden und addiert mit den Baukosten zu den Gesamtkosten auf einen bestimmten Zeitraum gesehen führen. Hierbei wird der Entwurf als der beste angesehen, der die geringsten Gesamtkosten mit sich bringt, was nicht unbedingt mit den geringsten Bau- bzw. Investitionskosten einhergeht. Dabei ist der Zeitraum aus praktischen Gründen nicht allzu hoch anzusetzen, da für die Berechnung der Energiekosten natürlicherweise Prognosen gestellt werden müssen, die mit größerem Zeitraum ungenauer werden. Alternativ kann natürlich auch die Verwendung aktueller Preise in Betracht gezogen werden.

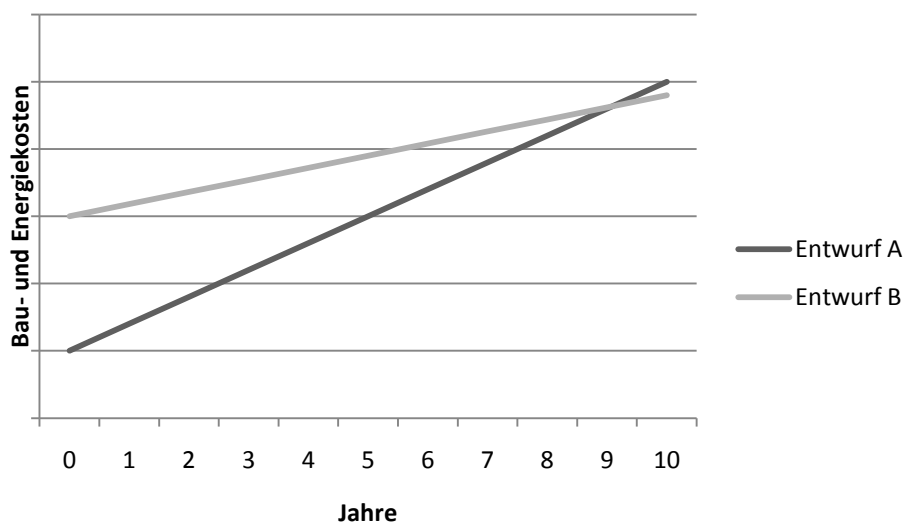


Abbildung 40: Berücksichtigung von Energiekosten auf einen Zeitraum bezogen

Abbildung 40 zeigt ein Beispiel für die Berücksichtigung von Kosten auf einen Zeitraum von 10 Jahren bezogen. Obwohl Entwurf A zunächst der günstigere Entwurf ist, wird er durch die höheren Energiekosten im Vergleich zu Entwurf B nach 10 Jahren der teurere. Der Bauherr sollte sich also, nachhaltig gesehen, für Entwurf B entscheiden.

Ein weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit ist natürlich die Nachhaltigkeit der verwendeten Energieträger. So ist es unter dem Aspekt der ökologischen Nachhaltigkeit natürlich sinnvoll-

ler, regenerierbare Rohstoffe zu verwenden als beispielsweise fossile Brennstoffe. Dieser Aspekt der Nachhaltigkeit geht in gewissem Maße bereits über die Berechnung der Energiebilanz in die Berechnung ein, da entsprechend der Energieberechnung nach Energieeinsparverordnung alle Energieträger mit einem Faktor versehen werden, der unter anderem auch diesen Aspekt widerspiegelt (Primärenergiefaktor, DIN 4701-10, siehe beispielsweise [Heg02], S. 200, zur Erläuterung [Roh08], S. 23). Trotzdem kann dieser Einfluss manuell verstärkt werden, um eine höhere ökologische Nachhaltigkeit der verwendeten Energieträger zu erzielen.

Ein weiterer Parameter der Nachhaltigkeit ist die ökologische Nachhaltigkeit der verwendeten Baumaterialien. Hierzu kann der verwendeten Bauteilbibliothek ein weiterer Faktor hinzugefügt werden, der die „ökologischen Kosten“ eines Materials widerspiegelt. Dabei können natürlich nicht nur die Beschaffungskosten eine Rolle spielen, sondern auch die Entsorgungs- bzw. Recyclingkosten in die Berechnung eingehen. Zu diesem Ansatz gibt es bereits ökologische Datenbanken, die diesen Aspekt berücksichtigen, so zum Beispiel die Datenbank GEMIS zur vergleichenden Analyse von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und der Energienutzung, die vom Öko-Institut und der Gesamthochschule Kassel entwickelt wurde (siehe [GEM09]). Diese Werte können dann als Parameter der Nachhaltigkeit in die Berechnung einfließen und je nach Gewichtung des Parameters zu einer bevorzugten Auswahl von ökologisch günstigen Materialien führen.

Nicht zuletzt kann jedoch auch die Nutzungsnachhaltigkeit in die Berechnung einfließen. Dies bedeutet, dass eine spätere Umnutzung von Räumen einfach möglich wird. Im Bereich des Einfamilienhausbaus bzw. generell des Wohnungsbaus ist hier vor allem die Nutzung von sogenannten Individualräumen sinnvoll. Dies sind Räume, wie beispielsweise Schlafzimmer, Kinderzimmer, Arbeitszimmer oder Gästezimmer. Durch einen Entwurf, der durch Größen und Seitenverhältnisse dieser Räume eine spätere Umnutzung zulässt, kann auf die veränderten Nutzerbedürfnisse im Laufe der Zeit eingegangen werden, so beispielsweise das nötig werden eines weiteren Kinderzimmers. Bei einer nachhaltigen Planung in diesem Sinne, kann beispielsweise ein Kinderzimmer einfach durch Umnutzung eines Gästezimmers erlangt werden.

Die Kategorie Nachhaltigkeit bündelt also verschiedene Aspekte der ökonomischen, ökologischen und nutzungsbedingten Nachhaltigkeit, wobei die Liste der Parameter natürlich belie-

big erweitert werden kann. Einzige Bedingung der einzuführenden Parameter ist die mathematische Quantifizierbarkeit.

Nutzerbedürfnisse (Bestandsparameter)

Als vorerst letztes Chromosom soll das der Nutzerbedürfnisse eingeführt werden. Auch dieses ist in gewisser Weise ein besonderes, da es eigentlich nur Teile der Nutzerbedürfnisse widerspiegelt. Wie in 2.6.1 beschrieben, werden die Nutzerbedürfnisse in offene und verdeckte Bedürfnisse unterteilt. Die offenen Bedürfnisse werden a priori abgefragt und können somit an dieser Stelle als gegeben erachtet werden. Zu diesen Bedürfnissen zählt etwa die Auswahl und Größe von Räumen. Diese offenen Bedürfnisse fließen nicht über das Chromosom „Nutzerbedürfnisse“ in den Entwurf ein, sondern werden, wie später gezeigt wird, als Maßstab für die Bestimmung des Zielfunktionswertes der Individuen und damit für die Fitnessbestimmung herangezogen. Sie sind somit sozusagen der Soll-Wert zahlreicher anderer Parameter, wie eben der Raumgrößen.

Wie aber oben beschrieben, liegen die verdeckten Bedürfnisse des künftigen Nutzers nicht vor, sondern müssen durch automatisierte oder manuelle Simulation des Entwurfes herausgefunden werden. Solche auf diese Art „entdeckten“ Bedürfnisse werden auf diesem Chromosom gespeichert. Stellt sich etwa bei der virtuellen Benutzung des Gebäudes durch den künftigen Nutzer heraus, dass er eine ganz bestimmte Wand verschieben möchte, so wird diese Anforderung an den Entwurf auf diesem Chromosom gespeichert.

Natürlich ist die Gewichtung des Chromosoms „Nutzerbedürfnisse“, wie bei allen Chromosomen adaptierbar, in der Regel wird das vorliegende Chromosom aber eine Art „Masterchromosom“ sein, da die Nutzerwünsche in der Regel alle anderen Ziele der Optimierung dominieren, soweit dies mit gesetzlichen Regelungen oder den Regeln der Gültigkeit des Entwurfes vereinbar ist. Konkret bedeutet dies zum Beispiel, dass, wenn der Nutzer eine Wand an einer bestimmten Stelle haben möchte, die Wand dort platziert werden muss.

Als Überschrift des Absatzes wurde der Begriff der Bestandsparameter in Klammern angeführt. Dies geschah aus dem Grunde, dass dieses Chromosom auch geeignet ist, Parameter eines eventuellen Bestandes aufzunehmen, falls keine Neuplanung durchgeführt wird, sondern eine Bestandsplanung. Auch bei der Arbeit im Bestand sind, wie bei Nutzervorgaben, bestimmte Parameter vorhanden, die es einzuhalten gilt. So wird in der Regel etwa eine ma-

ximale Ausdehnung beziehungsweise Außenform gegeben sein, vielleicht gibt es auch tragende Wände oder komplette Fassaden, die erhalten bleiben müssen. All diese Parameter eines Entwurfes werden auf diesem Chromosom gespeichert, da es aus Sicht der Optimierung gleichgültig ist, ob eine Vorgabe, wie eine Wandposition, durch den Nutzer oder durch bauliche Tatsachen gegeben ist. Die Optimierung muss diese Bedingungen jedenfalls einhalten.

Im bereits in Kapitel 2 beschriebenen mathematischen Sinne eines Optimierungsalgorithmus handelt es sich bei den Genen des vorliegenden Chromosoms um Rand- oder Nebenbedingungen, die eingehalten werden müssen. Streng formuliert könnte man auch sagen, dass die oben formulierte Forderung nach Gültigkeit von Entwürfen erst dann vorliegt, wenn die hier beschriebenen Nebenbedingungen eingehalten werden. Wie noch zu zeigen sein wird, muss eine Abweichung von der Erfüllung dieser Nebenbedingungen bei der Fitnesszuweisung der Individuen hart bestraft werden, obwohl eine Abstufung des Grades der Abweichung von den Nebenbedingungen möglich bleiben muss.

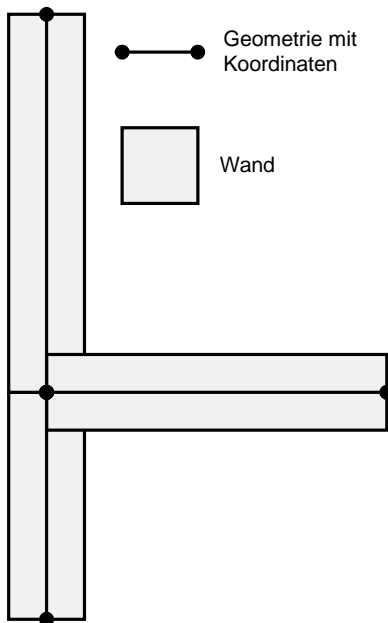
4.3 Mathematische Quantifizierbarkeit der Parameter

Wie bereits vorher beschrieben wurde, ist eine der Grundvoraussetzungen zur Umsetzung der ganzheitlichen Architekturgenerierung die mathematische Quantifizierbarkeit der verwendeten Parameter. Dies ist eine Grundvoraussetzung, da es sich um eine rein mathematische Optimierung im Sinne des Auffindens des Minimums einer Funktion handelt (siehe auch 2.4). Im Folgenden soll deshalb die mathematische Quantifizierbarkeit der im vergangenen Abschnitt beschriebenen Parameter gezeigt werden. Wie bereits erwähnt, ist die ganzheitliche Architekturgenerierungssoftware systembedingt offen für alle denkbaren weiteren Parameter, solange auch diese die Forderung nach mathematischer Quantifizierbarkeit erfüllen. Die folgenden Erläuterungen sollen deshalb nicht als vollständige Liste aller möglichen Parameter verstanden werden, sondern als Ausschnitt zur Erläuterung und Anleitung zur Erweiterung der Parameter. Auch das Hinzufügen vollständiger neuer Chromosomen ist durchaus denk- und machbar.

Geometrie

Das Konzept der Geometrie als Klasse wurde bereits ausführlich in 3.3.3 beschrieben, daher soll hier nicht nochmals detailliert darauf eingegangen werden. Es soll nur nochmals festgestellt werden, dass die Basis aller Geometrien eine Liste von Koordinaten ist, die eine x-, y- und z-Koordinate besitzen. Des Weiteren werden die verbindenden Vektoren im gleichen Format gespeichert. Eine Erweiterung um Bogen und Bézierkurven ist problemlos möglich.

Abbildung 41: Verwendung von Wänden



Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass es zweckmäßig ist, die Klasse der Geometrie direkt mit Methoden auszustatten, die es ermöglichen, häufig verwendeten Operationen, wie etwa Flächenberechnungen oder Boolesche Operationen direkt zu verwenden. Die Erstellung und Nutzung der Klasse Geometrie beruht im Wesentlichen auf mathematischer Geometrie und algorithmischer Geometrie, die an verschiedensten Stellen ausführlich behandelt wird (für gute Übersichten siehe beispielsweise [deB00], [Goo04] oder [Sch03]).

Bauteile

Auch die Verwendung von Bauteilen wurde schon verschiedentlich angesprochen. Die Verwendung basiert auf zwei Ebenen: Zum Einen ist jedes verwendete Bauteil mit einer Identifikationszahl (ID) ausgestattet. Diese ID erlaubt die Speicherung einer Referenz auf die in 3.4 beschriebene Bauteilbibliothek, was wiederum dazu führt, dass jedes verwendete Material eindeutig bestimmbar ist und in seinen physikalischen Eigenschaften vorliegt. Zum Anderen muss noch die Speicherung der konkreten Bauteile innerhalb der Software erklärt werden. Hier kommen bei den meisten Bauteilen wiederum Geometrien ins Spiel, die als Basis von Bauteilen dienen. Dabei ist es durchaus zweckmäßig, verschiedene Komplexitätsebenen zu verwenden. Als Beispiel sei das Bauteil Wand genauer erklärt: Eine einfache Wand, die in den allermeisten Fällen verwendet wird, ist gerade und hat eine konstante Höhe. In diesem Sinne ist es zweckmäßig im einfachen Falle davon auszugehen, dass eine Wand eine Basislinie, bestehend aus Start- und Endpunkt oder Startpunkt und Vektor, sowie eine Höhe besitzt. Mit diesen Werten ist eine einfache Wand vollständig beschrieben, da sich die Dicke der Wand aus dem zugrunde liegenden Wandstil ergibt. Des Weiteren ist es natürlich möglich, dass eine Wand nicht gerade, sondern beispielsweise gebogen ist. In die-

sem Falle ist es möglich, die Basislinie als Bogen zu definieren. Sollte eine Wand nicht konstant hoch sein, so ist es natürlich möglich, die Ansicht der Wand als beliebige Geometrie zu speichern. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dieses Vorgehen bei jeder einzelnen Operation aufwändiger ist, daher ist es durchaus sinnvoll, eine einfache Wand zu definieren, die in den allermeisten Fällen ausreichend ist und alle Operationen mit ihr vereinfacht. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass eine Wand immer mit Koordinaten einer Raumgeometrie verknüpft ist, was dazu führt, dass eine Wand, die subjektiv als durchgehend empfunden wird, durchaus aus zwei oder mehr Bauteilen bestehen kann, wie Abbildung 41 zeigt, wo die Wand von links betrachtet homogen erscheint, in Wirklichkeit aber, aufgrund der zugrunde liegenden Geometrie aus zwei Wänden besteht.

Im Folgenden sollen zusammenfassend die wichtigsten Bauteile mit den wichtigsten Eigenschaften aufgeführt werden. In Klammern stehen jeweils die zugrunde liegenden Datentypen. Die mathematische Quantifizierbarkeit der Werte ist offensichtlich:

- **Wand**
 - Start- und Endpunkt bzw. Startpunkt und Vektor (Koordinate) oder Basis als Bogen bzw. Bézierkurve oder Spline
 - Höhe (Gleitkommazahl) bzw. Ansichtsgeometrie (Geometrie)
 - Wandstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
- **Fenster**
 - Breite und Höhe (Gleitkommazahl) bzw. Geometrie als Hüllform (Geometrie)
 - Anker als Abstand zum Startpunkt der umgebenden Wand (Gleitkommazahl)
 - Fensterstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
 - In der Bauteilbibliothek je nach Bedarf und Verfügbarkeit Informationen zu Profilen, Glas, Griffen etc.
- **Tür**
 - Breite und Höhe (Gleitkommazahl) bzw. Geometrie als Hüllform (Geometrie)
 - Anker als Abstand zum Startpunkt der umgebenden Wand (Gleitkommazahl)
 - Türstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
 - In der Bauteilbibliothek je nach Bedarf und Verfügbarkeit Informationen zu Profilen, Zargen, Griffen etc.
- **Decke**
 - Geometrie, in der Regel als Referenz auf einen Raum (Geometrie)
 - Deckenstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
- **Abgehängte Decke**
 - Geometrie (Geometrie)
 - Abhängehöhe (Gleitkommazahl)
 - Abgehängte-Decken-Stil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
- **Boden**
 - Geometrie, in der Regel als Referenz auf einen Raum (Geometrie)
 - Bodenstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
- **Stütze**
 - Durchmesser (Gleitkommazahl) bzw. Breite und Länge (Gleitkommazahlen) bzw. Querschnittsgeometrie (Geometrie)
 - Höhe (Gleitkommazahl)
 - Position des Mittelpunkts (Koordinate)

- Stützenstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
- **Dach**
 - Dachart (Ganzzahl als Referenz auf Standarddachtyp oder freie Form)
 - **Dachflächen**
 - Flächengeometrie (Geometrie)
 - Dachflächenstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)
 - **Giebelflächen**
 - Flächengeometrie (Geometrie)
 - Wandstil (Ganzzahl als Referenz auf Bauteilbibliothek)

Grundriss

Wie oben beschrieben, gehören zu den Parametern des Grundrisses die Verbindungen zwischen den Räumen. Diese werden durch Feststellung gemeinsamer Kanten zwischen jeweils zwei Räumen festgestellt. Diese Kanten müssen eine Mindestlänge haben, um als Verbindung zu gelten.

Des Weiteren sind die Raumgrößen Parameter des Grundrisses. Diese werden nach Gauß-Elling-Verfahren beziehungsweise mittels Integralrechnung bestimmt. Die Koordinaten der Räume liegen dabei geordnet, das heißt in diesem Falle gegen den Uhrzeigersinn vor.

Die Seitenverhältnisse von Räumen lassen sich problemlos nur bei rechteckigen Räumen berechnen, wo die Länge der längeren Kante durch die Länge der kürzeren Kante geteilt wird. So ergibt sich eine Gleitkommazahl größer oder gleich 1. Bei nicht viereckigen Räumen mit vier Punkten wird vorgeschlagen, das Mittel der gegenüberliegenden Kanten zu bilden und entsprechend das Seitenverhältnis zu bilden. Bei nicht rechteckigen Räumen mit mehr als vier Punkten hat sich die Erstellung einer konvexen Hülle, das heißt des Polygons, das sozusagen als Hüllform des Raumes gefunden werden kann, als Grundlage der Berechnung des Seitenverhältnisses bewährt. Es wird vorgeschlagen, hierbei zunächst eine Glättung der konvexen Hülle mittels Winkeltoleranz vorzunehmen. Dies bedeutet, dass Kanten, die im Rahmen einer bestimmten Toleranz von einem Winkel von 0° beziehungsweise 180° von der vorherigen oder nachfolgenden Kante abweichen, vereinigt werden. Abschließend wird zur Ermittlung des Seitenverhältnisses ein Vergleich von kürzester und längster Kante gezogen. Ebenfalls möglich ist bei den Sonderformen der U- oder L-förmigen Räume, eine Zerlegung in Rechtecke, die dann einzeln auf ihr Seitenverhältnis geprüft werden. Bei der Anpassung der

möglichen Methoden zur Ermittlung des Seitenverhältnisses sollte beachtet werden, dass der Hintergrund der Operation die Ermittlung eines wohlgeformten Raumes ist und damit schlauchartige Räume vermieden werden sollen.

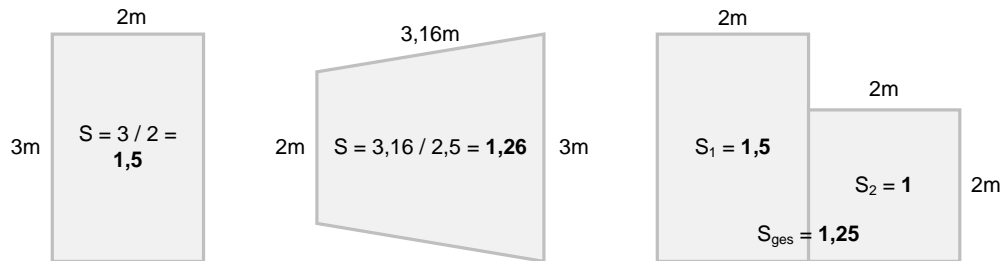


Abbildung 42: Berechnung des Seitenverhältnisses bei verschiedenen Geometrien

Abbildung 42 zeigt die Berechnung des Seitenverhältnisses für ein Rechteck per Division der längeren Kante durch die kürzere, für ein Trapez mittels Mittelwertbildung der gegenüberliegenden Kanten und entsprechende Division, sowie für einen L-förmigen Raum, der in zwei Rechtecke unterteilt wird. Hier werden zunächst die einzelnen Seitenverhältnisse berechnet, danach wird der Wert gemittelt. Man sieht, dass die Werte von Trapez und L sehr ähnlich sind, was, wenn man die Geometrien betrachtet, auch den Tatsachen entspricht.

Die Berechnung der minimalen Seitenlänge einer Geometrie ist natürlich sehr einfach: Von allen Kanten wird der kleinste Längenwert ermittelt.

Zur Ermittlung der Einhaltung von gegebenen Rastern wird versucht, alle Kanten mit einem zugrunde liegenden Raster in Übereinstimmung zu bringen. Der anteilige Wert der Einhaltung der Rastertreue ergibt sich aus der Division der Anzahl der Kanten eines Raumes durch die Anzahl der Kanten, die auf dem Raster zu liegen kommen. Sind also alle Kanten auf dem Raster, so ergibt sich ein Wert von 1. Der Wert ist immer eine Gleitkommazahl, die zwischen 0 und 1 liegt.

Baukosten

Die mathematische Quantifizierbarkeit der Baukosten zu zeigen, ist natürlich sehr einfach. Es handelt sich um eine Addition der Kosten der einzelnen Bauteile. Natürlich müssen in der Praxis noch einige weitere Berechnungen angestellt werden, so etwa die Berechnung eines Erdaushubes, oder die Multiplikation mit Regionalfaktoren, mathematisch gesehen handelt es sich allerdings um eine sehr banale Berechnung.

Form

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, kann in dieser Kategorie eine eigene, getrennte oder integrierte Optimierung stattfinden. Dieser Fall soll hier natürlich nicht detailliert behandelt werden.

Sollte dies nicht der Fall sein, so muss an dieser Stelle, so es eine Vorgabe gibt, eine Überprüfung der Übereinstimmung von Vorgabe und Zustand erfolgen. Da die Außenform als Geometrie vorliegt, ist dies ebenfalls nicht sehr kompliziert, da über Anzahl der Eckpunkte und Vergleich von Winkeln eine einfache Überprüfung auf Vorgaben möglich ist.

Des Weiteren wird in dieser Kategorie das Verhältnis von Außenfläche zu Volumen berechnet. Die Außenfläche wird dabei als Summe der Außenfläche der Außenwände, der Deckenfläche eventueller Rück- oder Vorsprünge, sowie der Dach- und Giebelflächen gebildet. Das Volumen errechnet sich als Summe der Volumina aller Innenräume. Das Verhältnis ist die Außenfläche geteilt durch das Volumen.

Umwelt

Zu den in dieser Kategorie befindlichen Parametern, die für den Einfamilienhausbau hohe Relevanz haben, gehören vor allem die Ausrichtung des Gesamtgebäudes, sowie die Ausrichtung bezogen auf umweltbedingt gegebene Parameter, wie Lärmquellen, Sichtlinien oder natürliche Hindernisse, wie erhaltenswerte Bäume.

Die Gesamtausrichtung des Gebäudes bezüglich der Himmelsrichtung geht indirekt über die Energieberechnung und die dort sich ergebenden Implikationen, wie Wärmeverluste, in die Berechnung ein. Bezogen auf die einzelnen Räume wird zur Ermittlung der Ausrichtung vorgeschlagen, die Außenwände eines Raumes zu betrachten. Hierbei wird die Normale des Wandvektors als Richtung angenommen und mit der gespeicherten Nordrichtung verglichen. Für alle praxisrelevanten Fragen genügt daraufhin eine Einordnung in die acht Himmelsrichtungen Nord, Nord-Ost, Ost, Süd-Ost, Süden, Süd-West, West und Nord-West. Hat ein Raum mehrere Außenwände, deren Normalen nicht in die gleiche Richtung zeigen, so hat der Raum mehrere Ausrichtungen, beispielsweise von Süd bis West, oder Norden und Süden.

Um die Randbedingungen bezüglich Lärms, Sicht oder Hindernissen zu quantifizieren, wird vorgeschlagen, das Grundstück mit einem dreidimensionalen Raster zu belegen. Dieses kann eine beliebig feine Körnung haben, unter praktischen Gesichtspunkten wird eine Körnung

von 0,5 Metern als ausreichend erachtet. Nun werden die Quellen der Umweltparameter als Ausgangspunkte einer Ausbreitungsfunktion genommen. So kann man beispielsweise für den Lärm die genaue Formel zur Schallausbreitung heranziehen, oder diese vereinfachen. Durch die Distanz eines jeden Rasterpunktes zur Lärmquelle ergibt die Ausbreitungsfunktion einen Wert für den Lärm an jedem Rasterpunkt. Hierbei sind für eventuelle weitere Faktoren beliebige Funktionen realisierbar, so wird für Punkte guter Sicht beispielsweise eine Funktion vorgeschlagen, die eine lineare oder dreieckige Ausbreitung berechnet. Für einen Baum als natürliches Hindernis wird sicher eine Funktion bevorzugt werden, die eine radiale Ausbreitung mit scharfen Rändern realisiert. Festzuhalten ist ebenfalls, dass für alle weiteren Berechnungen, deren Ausgangspunkt die so gewonnenen Werte sind, in der Regel nur eine relative Bewertung sinnvoll ist. Auf diese Weise kann man sagen, an welcher Stelle eines Grundstücks weniger Lärm ist, als an einer anderen. So kann beispielsweise durch die Lage des Gebäudes oder die Wahl von Fenstergrößen und Arten auf Lärmquellen eingegangen werden.

Energiekosten

Wie bereits angedeutet, ist die Quantifizierbarkeit der Parameter der Energiekosten mathematisch gesehen sehr simpel. Es wird zum einen eine Berechnung der Energiebilanz nach Energieeinsparverordnung vorgeschlagen. Hieraus lassen sich Aussagen über die energetische Gesamtqualität des Gebäudes treffen. Des Weiteren sollten natürlich auch Werte bezüglich beispielsweise der Wärmeverluste über ein Bauteil auch in diesem gespeichert werden, um im Verlaufe der Optimierung auf Schwachstellen reagieren zu können. Es ist an dieser Stelle also sehr sinnvoll, energetische Informationen auf kleinstmöglicher Ebene zu speichern, um hierauf reagieren zu können. Obwohl die Optimierung natürlich in einem gewissen Maße auf zufälligen Mutationen beruht, ist eine gerichtete Verbesserung, wo die Richtung der Verbesserung bekannt ist, sehr sinnvoll. Um das frühere Bild wiederaufzunehmen: Es macht keinen Sinn, den Sucher in der Landschaft in die falsche Richtung zu schicken, wenn man weiß, in welcher Richtung die besseren Lösungen liegen. Andererseits muss ein gewisses Maß an zufälliger Entwicklung natürlich beibehalten werden, da es kaum einen Parameter gibt, der eindimensional ist und keine Implikationen auf andere Parameter hat. Bezogen auf die Energie seien hier nur die Baukosten genannt, die in der Regel dem Streben nach günstigem Energieverbrauch entgegenstehen. Eine globale Beurteilung einer Verbesserung ist also nur unter Berücksichtigung der Gewichtung der Kategorien möglich.

Stil

Wie bereits beschrieben, ist die genaue Ausarbeitung der Kategorie Stil nicht Teil dieser Arbeit. Es kann also an dieser Stelle davon ausgegangen werden, dass die Berechnungen, die in diesem Bereiche angestellt werden, als interpretierbarer Wert zurückgeliefert werden. In der Regel wird dieser ein Wert sein, der eine Aussage darüber trifft, in welchem Maße der vorliegende Entwurf stilistisch mit einem Soll-Wert übereinstimmt.

Nachhaltigkeit

Der Bereich der Nachhaltigkeit umfasst verschiedene Parameter. Der Aspekt der ökonomisch-ökologischen Nachhaltigkeit bezogen auf die Bau- und Energiekosten eines Entwurfes, lässt sich einfach quantifizieren, indem die Baukosten, sowie die Energiekosten auf einen bestimmten Zeitraum addiert werden.

Eine Quantifizierung der Nachhaltigkeit der Energieträger erfolgt mittels Referenzwerte, die die unterschiedlichen Energieträger relativ zueinander einordnen. Es erfolgt hier keine absolute Einordnung, sondern eine Wertzuweisung analog der Werte der DIN 4701-10.

Auch die Quantifizierung der Nachhaltigkeit der verwendeten Baumaterialien bezogen auf Gewinnung und Recyclingfähigkeit geht über bereits interpretierte Werte in die Berechnung ein. Es wird vorgeschlagen, Werte aus bereits vorhandenen Datenbanken wie GEMIS ([GEM09]) zu verwenden, die diese Aspekte beurteilen. Eine qualifizierte Aussage bezüglich der Nachhaltigkeit in diesem Bereich ist wiederum über einen Vergleich der Werte unterschiedlicher Entwürfe möglich.

Um schließlich die Nachhaltigkeit bezogen auf die Nutzung quantifizieren zu können, wird vorgeschlagen, alle in einem Entwurf verwendeten Individualräume miteinander zu vergleichen. Diese sollten untereinander möglichst ähnlich sein, um eine spätere einfache Umnutzung der Räume zu ermöglichen. Hierbei sind vor allem Raumgrößen und Seitenverhältnisse von Interesse. Diese sollten innerhalb eines bestimmten Rahmens gleich sein. Die Nachhaltigkeit lässt sich so mittels einer maximalen Abweichung der Raumgrößen und des Seitenverhältnisses messen.

Nutzerbedürfnisse (Bestandsparameter)

Wie beschrieben, gehen die Parameter der Nutzerbedürfnisse beziehungsweise eines eventuellen Bestandes als Vorgaben bezüglich einzelner anderer vorhandener Parameter in die

Berechnung ein. Dies bedeutet, dass die zu verändernden Parameter, etwa die Position einer Wand, mit einem entsprechenden Verweis, einem sogenannten „Tag“ versehen werden. Ein Tag ist eine Art „Etikett“, das einen Datensatz, hier also einen oder mehrere Parameter, mit zusätzlichen Informationen versieht. Diese zusätzlichen Informationen bestehen aus der gewünschten Veränderung beziehungsweise aus dem Wunsch nach Nichtveränderung (zum Beispiel bei einer im Bestand gegebenen Wand).

Zur Quantifizierung des Maßes der Übereinstimmung eines Entwurfes mit den Nutzerbedürfnissen wird nun für jeden vorhandenen Parameter geprüft, ob ein solcher Tag vorhanden ist. Sollte dies der Fall sein, so wird geprüft, ob der tatsächliche Zustand des Parameters dem gewünschten entspricht. Das Maß der Übereinstimmung wird bestimmt und die Summe der Abweichungen gebildet.

4.4 Verarbeitung von Parametern

Nachdem die wichtigsten Parameter erklärt und in ihrer mathematischen Quantifizierbarkeit erläutert wurden, soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, in welcher Weise die beschriebenen Parameter in den evolutionären Algorithmus eingehen, das heißt vor allem, in welcher Weise die Parameter zur Berechnung des Zielfunktionswertes und damit der Fitness verarbeitet werden und welche Rekombinations- und Mutationsoperatoren konkret vorgeschlagen werden.

4.4.1 Verarbeitung bei der Zielfunktionswertberechnung

Wie bereits ausführlich beschrieben, handelt es sich bei den Chromosomen Geometrie und Bauteil um sogenannte Metachromosomen. Die Parameter dieser Kategorien gehen ausschließlich indirekt in die Berechnung des Zielfunktionswertes eines Individuums und damit in die Fitness ein. Eine Geometrie als solche oder ein Bauteil können schließlich auch nur im Lichte anderer Parameter bewertet werden. Daher werden hier auch nur die Parameter der übrigen Chromosomen beschrieben werden.

Der Zielfunktionswert ist prinzipiell ein Vergleich von Soll- und Ist-Wert, das heißt, dass es eine Funktion gibt, in die die beiden Werte einfließen. Je weiter der Ist-Wert vom Soll-Wert abweicht, desto größer muss der Rückgabewert sein. Da es sich bei der vorliegenden Optimierung um eine Minimierungsfunktion handelt, zeigt ein Zielfunktionswert von 0, dass eine

Vorgabe optimal eingehalten wird. Je höher der Wert ist, desto schlechter ist das Individuum.

Generell sollte bei der Wahl der Zielfunktionen darauf geachtet werden, dass die Bestrafung einer Abweichung vom Optimum in etwa vergleichbar bleibt, da zwischen den Zielfunktionswerten der unterschiedlichen Parameter eine gewichtete Summe gebildet werden wird. Als Beispiel sei ein Raum genannt, der nur auf die Parameter Raumgröße und Verbindungen optimiert werden soll. Die Gewichtung der beiden Werte liegt bei jeweils 0,5, also 50 Prozent. Die optimale Raumgröße betrage 30m^2 und der Raum muss zwei Verbindungen aufweisen. Wenn der Raum nun 27m^2 groß ist, so handelt es sich mit einer Abweichung um 10 Prozent um eine relativ geringe Abweichung, die nicht allzu hart bestraft werden sollte, als Beispiel sei ein Wert von 5 angenommen. Wenn nun eine der beiden nötigen Verbindungen fehlt, so handelt es sich zwar um eine Nichteinhaltung einer Nebenbedingung, die relativ hart bestraft werden muss, diese muss aber im Verhältnis zu den anderen Werten stehen. Würde man das Fehlen dieser Verbindung nun etwa mit einem Wert von 1000 bestrafen, so ergäbe sich durch das Bilden einer gewichteten Summe ein Zielfunktionswert von 502,5 für den Raum. Hätte man nun einen zweiten Raum eines anderen Individuums, der zwar nur 15m^2 groß ist, was eine Abweichung um 50 Prozent bedeutet und in diesem Beispiel mit einem Wert von 100 bestraft werden soll, der aber gleichzeitig beide Verbindungen hat und so hier keine Strafe erhält, so ergibt sich für diesen Raum eine gewichtete Summe von 50. Der zweite Raum wäre in diesem Beispiel also etwa zehn Mal besser als der erste Raum.

Aus diesem Beispiel wird die Verhältnismäßigkeit der Bestrafung ersichtlich. Würde man die fehlende Verbindung mit 100 bestrafen, so ergäben sich für Raum 1 ein Zielfunktionswert von 52,5 und für Raum 2 ein Zielfunktionswert von 50, also Werte, die die Wahrheit wesentlich besser abbilden. Es sei aber auch darauf hingewiesen, dass der absolute Wert der Zielfunktion völlig gleichgültig ist. Lediglich der Vergleich der beiden Werte ist von Interesse. Es muss also für jeden Parameter eine Zielfunktion definiert werden, die in der Lage ist, für ähnliche „Vergehen“ ähnliche Strafen zu verteilen, unabhängig davon, wie der absolute Wert nun aussehen mag.

Es sei in diesem Zusammenhang aber auch noch darauf hingewiesen, dass es sehr sinnvoll ist, die jeweiligen Zielfunktionswerte der einzelnen Parameter auch an „Ort und Stelle“ und atomar zu speichern. Dies bedeutet, dass der Zielfunktionswert für den Parameter Raum-

größe auch im jeweiligen Raum als solcher gespeichert wird und nicht nur der gemittelte Wert aller Parameter. Auf diese Weise lassen sich die Probleme eines Raumes identifizieren und gegebenenfalls beheben. Wird beispielsweise festgestellt, dass ein Raum zu klein ist, so kann man dies eventuell durch eine entsprechende Reaktion durch eine Mutation „Wand verschieben“ beheben. Läge der einzelne Wert für die Raumgröße hier nicht vor, so ließe sich das Problem auch nicht eindeutig identifizieren und es könnte nicht gezielt reagiert werden.

Grundriss

Beim Grundriss soll die Konzentration wieder auf den Parametern Raumgröße, Raumverbindungen, Seitenverhältnis und minimalen Seitenlängen liegen.

Bei der Raumgröße ist der Soll-Wert durch die Eingaben des Nutzers beziehungsweise durch die Vorgaben der Software definiert. Es gibt also einen eindeutigen Zahlenwert, der die optimale Raumgröße angibt. Eine Abweichung von diesem Wert muss durch einen höheren Zielfunktionswert als 0 bestraft werden, allerdings sollen Werte, die nahe am Optimum liegen, nur sehr schwach bestraft werden, wohingegen extrem abweichende Werte auch sehr stark bestraft werden sollen. Es bietet sich also als Zielfunktion für die Raumgröße eine Quadratfunktion an, die im Bereich um den Soll-Wert recht flach ist, die aber gleichzeitig große Abweichungen hart bestraft.

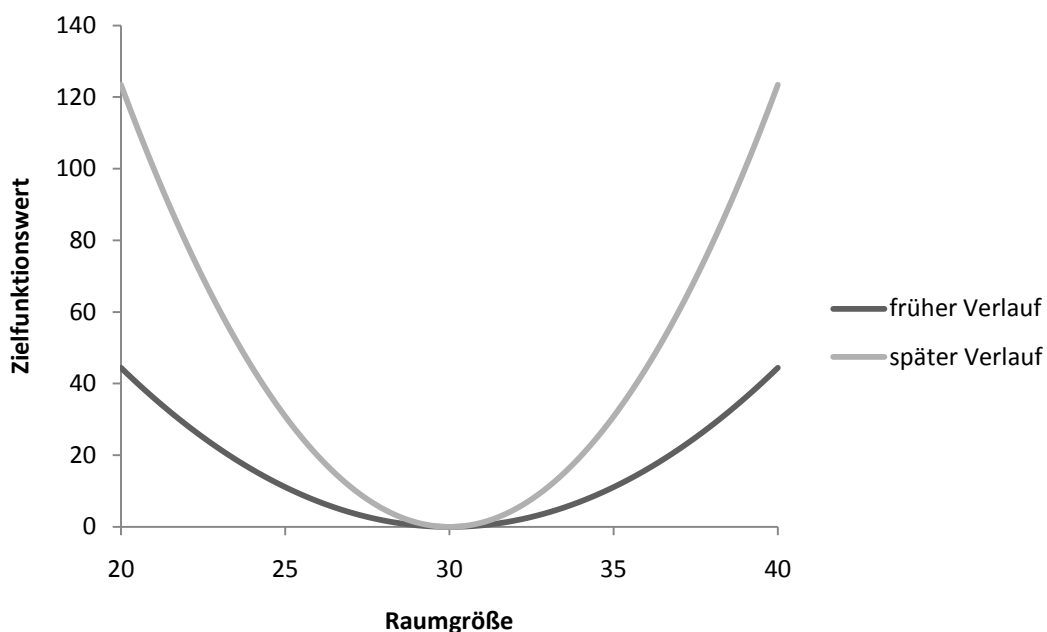


Abbildung 43: Zielfunktionswerte für eine Soll-Raumgröße von 30m²

Abbildung 43 zeigt eine Beispielzielfunktion für eine Soll-Raumgröße von 30m² im frühen und im späten Verlauf der Optimierung. Wie oben beschrieben, soll die Bestrafung verhältnismäßig sein. Gleichzeitig wird die Suche aber im Verlaufe der Optimierung eingeschränkt, was dadurch bewerkstelligt werden kann, dass Abweichungen vom Soll-Wert im weiteren Verlaufe härter bestraft werden. Daher wurde folgende Zielfunktion gewählt:

$$f(F) = a * (F - F_{soll})^2$$

Hierbei ist a ein Skalierungsfaktor, der die Härte der Bestrafung regelt, F ist die tatsächliche Fläche des Raumes und F_{soll} ist der Sollwert für die Fläche des Raumes. Es wird vorgeschlagen, dass im frühen Verlaufe der Optimierung folgender Skalierungsfaktor verwendet wird:

$$a = \frac{400}{F_{soll}^2}$$

Daraus ergibt sich als Zielfunktion:

$$f(F) = \left(\frac{400}{F_{soll}^2}\right) * (F - F_{soll})^2$$

Diese Zielfunktion entsteht durch eine vorgesehene Bestrafung einer Abweichung um 50 Prozent mit einem Wert von 100. Für den späteren Verlauf wird vorgesehen, dass bereits eine Abweichung um 30 Prozent zu einer Bestrafung mit 100 führt. Daraus ergibt sich als Skalierungsfaktor:

$$a = \frac{10000}{9 * F_{soll}^2}$$

Die Zielfunktion lautet dann entsprechend:

$$f(F) = \left(\frac{10000}{9 * F_{soll}^2}\right) * (F - F_{soll})^2$$

Natürlich kann die Veränderung des Skalierungsfaktors auch adaptiv geschehen und linear mit fortlaufender Zeit angepasst werden. Auch ein größerer Skalierungsfaktor zu einem noch späteren Zeitpunkt der Optimierung ist denkbar. Ebenso kann die Vergrößerung des Skalierungsfaktors an bestimmte Ereignisse geknüpft werden, so etwa daran, dass beispielsweise

80 Prozent aller Räume nur noch eine mittlere Abweichung um einen bestimmten Wert aufweisen, oder ähnliches.

Als nächstes soll der Parameter Verbindungen genauer betrachtet werden. Hierbei handelt es sich um einen anderen Typ von Parameter, da hier einfach die fehlenden Verbindungen gezählt werden können. Es wird dementsprechend vorgeschlagen, einen pauschalen Strafwert für jede fehlende Verbindung zu vergeben, was zu einer linearen Zielfunktion führt.

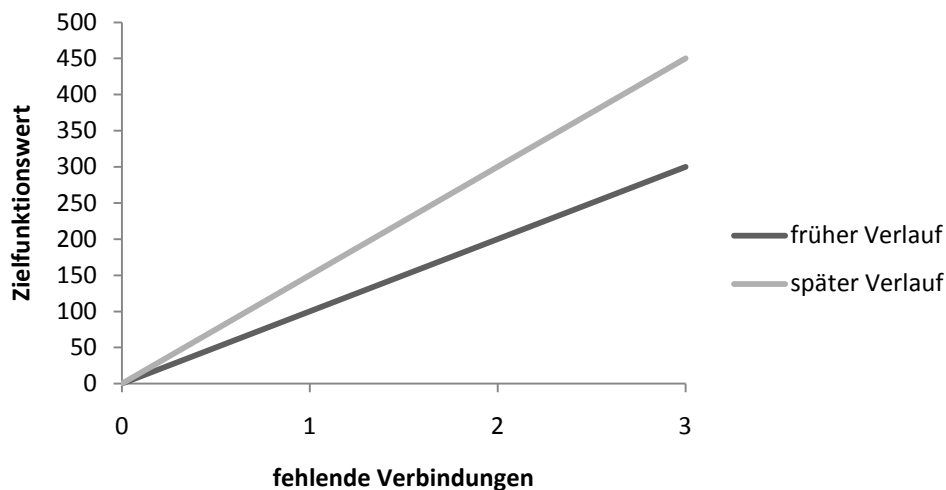


Abbildung 44: Zielfunktion für Raumverbindungen

Auch hier wird vorgeschlagen, den Grad der Bestrafung im Verlaufe der Optimierung zu verändern. Für den Beginn wird ein Wert von 100 für jede fehlende Verbindung vorgeschlagen. Später kann der Wert dann erhöht werden. Im Beispiel wurde der Wert auf 150 erhöht. Die vorgeschlagenen Werte sind natürlich prinzipiell willkürlich gewählt, allerdings wurden sie im Sinne der oben erwähnten Verhältnismäßigkeit getestet und haben sich als gut erwiesen.

Als nächstes soll der Parameter Seitenverhältnis angesprochen werden. Für das Seitenverhältnis eines Raumes liegen vorgeschlagene minimale und maximale Werte vor. Diese sind bereits in der Software integriert, könnten aber natürlich von einem professionellen Nutzer, etwa einem Architekten verändert werden. Durch das Vorhandensein eines minimalen und maximalen Wertes handelt es sich hierbei um einen anderen Zielfunktionstypen als bei den Raumgrößen, wo es nur einen optimalen Wert gab. Hier muss eine solche Funktion gewählt werden, die es zulässt, dass alle Werte im Bereich zwischen minimalem und maximalem Seitenverhältnis als optimal erachtet werden.

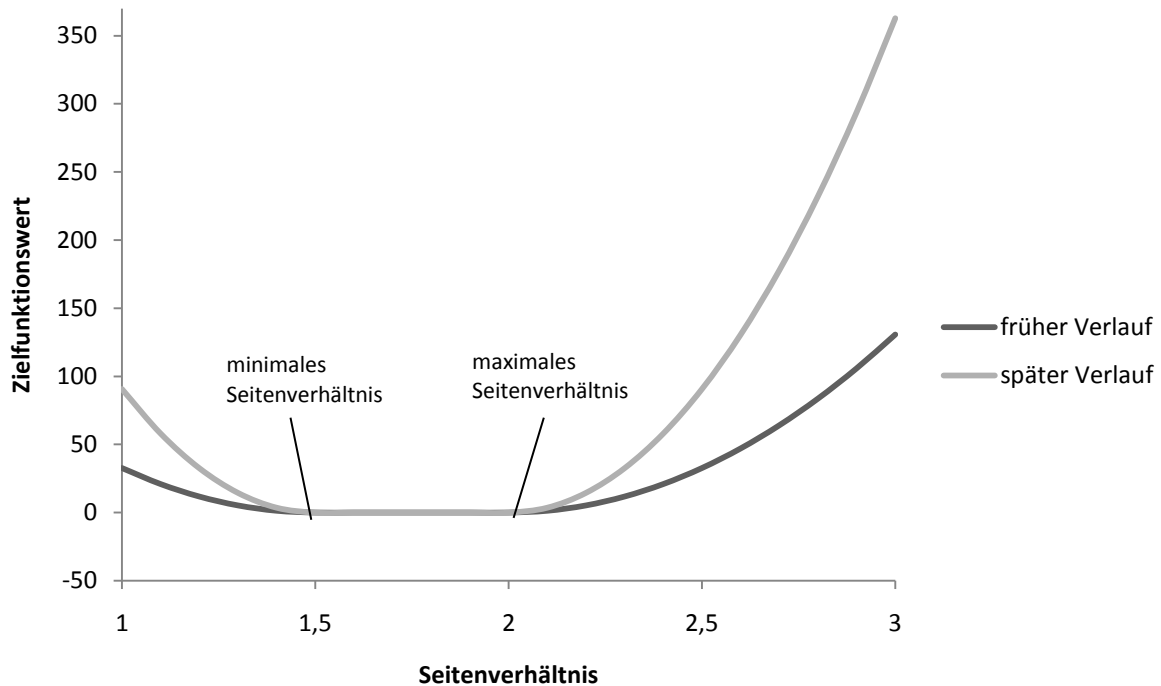


Abbildung 45: Zielfunktion für den Parameter Seitenverhältnis

Wie in Abbildung 45 zu erkennen ist, wird die Zielfunktion so gewählt, dass die Funktion für alle Werte im Bereich zwischen minimalem und maximalem Seitenverhältnis (hier 1,5 bzw. 2) den Wert 0 zurückliefert. Wie bereits bei der Funktion für die Raumgröße wird auch hier ein Skalierungsfaktor verwendet, um im Verlaufe der Optimierung Abweichungen härter bestrafen zu können, es handelt sich also auch hier um eine adaptive Zielfunktion. Um auch die Soll-Werte in der Skalierung berücksichtigen zu können, geht der Durchschnitt der beiden Soll-Werte in den Skalierungsfaktor ein. Analog zur Zielfunktion der Raumgrößen ergibt sich so für den Skalierungsfaktor zu Beginn der Optimierung folgende Funktion:

$$S_{mean} = \frac{S_{min} + S_{max}}{2}$$

$$a = \frac{400}{S_{mean}^2}$$

Dabei bezeichnet S_{mean} das durchschnittliche optimale Seitenverhältnis, das sich aus dem Mittelwert zwischen dem minimalen Seitenverhältnis S_{min} und dem maximalen Seitenverhältnis S_{max} ergibt. Dieser Wert geht nun wiederum in den Skalierungsfaktor a ein.

Für die eigentliche Zielfunktion wird die minimale Distanz des tatsächlichen Seitenverhältnisses zu Minimum oder Maximum berechnet:

$$\{S < S_{min} \mid S > S_{max}\}: d_{min} = \text{Min}(|S_{min} - S|, |S_{max} - S|)$$

$$\{S_{min} \leq S \leq S_{max}\}: d_{min} = 0$$

Die minimale Distanz d_{min} ergibt sich für ein tatsächliches Seitenverhältnis S , das kleiner als S_{min} oder größer als S_{max} ist aus dem kleineren Wert des Abstandes zum Minimum oder Maximum. Für ein tatsächliches Seitenverhältnis, das kleiner oder gleich dem Minimum und größer oder gleich dem Maximum ist, ergibt sich eine Distanz von 0.

Die eigentliche Zielfunktion sieht dann so aus:

$$f(S) = a * d_{min}^2$$

Oder ausführlich:

$$f(S) = \frac{400}{\left(\frac{S_{min} + S_{max}}{2}\right)^2} * d_{min}^2$$

Für die Anpassung des Skalierungsfaktors im Verlaufe der Optimierung wird dann wieder analog zur Berechnung der Zielfunktion für die Raumgröße vorgegangen. Es handelt sich bei der Zielfunktion für das Seitenverhältnis also um eine Abwandlung der Zielfunktion für die Raumgröße. Der Hauptunterschied liegt in der Definition eines „guten Bereichs“, für den die Zielfunktion immer 0 zurückliefert und das Seitenverhältnis somit als optimal betrachtet wird.

Als letzter Parameter des Grundrisses soll jetzt noch auf die minimale Seitenlänge eingegangen werden. Auch bei der Zielfunktion dieses Parameters handelt es sich um eine Abwandlung der Zielfunktion für die Raumgröße. Kennzeichen der minimalen Seitenlänge ist, dass hier ein minimaler Wert definiert ist, unterhalb dessen eine Wand keinen Sinn macht. Der Zielfunktionswert muss deshalb also für alle Werte oberhalb des Minimalwertes 0 ergeben, während Längen unterhalb des Minimums bestraft werden sollen. Die Bestrafung soll dabei ebenfalls eine Aussage über den Grad der Abweichung liefern.

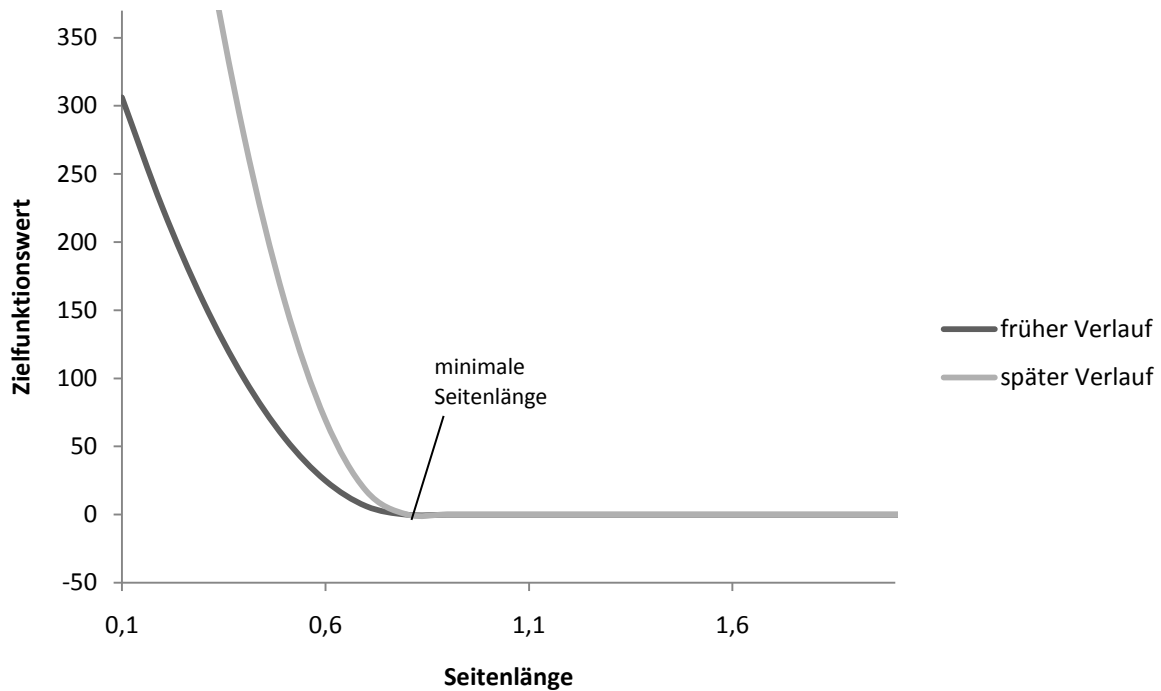


Abbildung 46: Zielfunktion für die minimale Seitenlänge

Wie in Abbildung 46 zu sehen ist, wird die Zielfunktion so gewählt, dass sie für alle Werte oberhalb der minimalen Seitenlänge, in diesem Falle 0,8, 0 zurückliefert, wohingegen für alle Werte unterhalb der minimalen Seitenlänge abhängig vom Grad der Abweichung ein Wert größer 0 zurückgeliefert wird. Wie in den vorherigen Beispielen wird auch hier ein Skalierungsfaktor gewählt, so dass es sich ebenfalls um eine adaptive Zielfunktion handelt.

Konkret bedeutet dies, dass der Skalierungsfaktor analog zu vorher berechnet wird:

$$a = \frac{400}{l_{min}^2}$$

Hierbei ist l_{min} die minimale Seitenlänge. Mithilfe des Skalierungsfaktors lässt sich wiederum der Zielfunktionswert berechnen:

$$\{l < l_{min}\}: f(l) = a * (l - l_{min})^2$$

$$\{l \geq l_{min}\}: f(l) = 0$$

Insgesamt lässt sich somit feststellen, dass die Parameter der Kategorie Grundriss gut geeignet sind, einige prinzipielle Zielfunktionstypen einzuführen. Es wurden Zielfunktionen für einen optimalen Wert (Raumgröße), einen optimalen Bereich (Seitenverhältnis), einen opti-

malen Grenzwert (minimale Seitenlänge), sowie für einen linearen Verlauf (Verbindungen) erläutert. Diese unterschiedlichen Typen lassen sich prinzipiell für zahlreiche Faktoren anpassen und sind somit wichtige Grundbestandteile der Ermittlung der Zielfunktionen.

Um nun die gesamte grundrissbezogene Zielfunktion eines Raumes formulieren zu können, werden die einzelnen Werte, die sich aus den Zielfunktionen der Parameter ergeben haben, mittels einer gewichteten Summe verbunden. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei Raumgröße, minimaler Seitenlänge und Seitenverhältnis um Parameter des Raumes handelt, während die fehlenden Verbindungen auf Geschossebene errechnet werden, um zu verhindern, dass fehlende Verbindungen doppelt gezählt werden. So würde, wenn etwa eine Verbindung zwischen Küche und Esszimmer fehlt, diese Verbindung auf Raumebene doppelt zählen, da sie sowohl in der Küche, als auch im Esszimmer fehlt.

Die gesamte Zielfunktion eines Raumes ergibt sich also aus

$$f(s) = w_{Größe} * f_{Größe}(s) + w_{SeitV} * f_{SeitV}(s) + w_{minL} * f_{minL}(s) + w_{Verb} * f_{Verb}(s)$$

wobei w_i den Gewichtungsfaktor und $f_i(s)$ den Zielfunktionswert des jeweiligen Parameters bezeichnet, und der Wert für die Verbindungen aus dem Geschoss kommt. Für die Gewichtungsfaktoren gilt:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Dies bedeutet, dass die Summe aller Gewichtungsfaktoren 1 ergeben muss. Einfach gesagt heißt das, dass die Gewichtung eines Faktors prozentual angegeben werden muss und zwar derart, dass alle Gewichtungsfaktoren zusammen 100 Prozent ergeben.

Als Beispiel könnte man festlegen, dass die Raumgröße und Verbindungen mit 30 Prozent und Seitenlänge sowie Seitenverhältnis mit 20 Prozent gewichtet werden. Daraus ergibt sich:

$$f(s) = 0,3 * f_{Größe}(s) + 0,2 * f_{SeitV}(s) + 0,2 * f_{minL}(s) + 0,3 * f_{Verb}(s)$$

Ein konkretes Beispiel könnte folgendermaßen aussehen: Es gibt einen Raum, der 25m² groß ist, dessen Seitenverhältnis 2,2 beträgt und dessen kleinste Seitenlänge 0,6m beträgt. Im Geschoss fehlt eine Verbindung. Als Soll-Werte sollen die oben verwendeten Beispiele gel-

ten. Die Optimierung sei am Beginn. Daraus ergibt sich aus obenstehenden Formeln beziehungsweise Graphen folgende Berechnung des Zielfunktionswertes:

Raumgröße: $f(25) = \left(\frac{400}{30^2}\right) * (25 - 30)^2 = 11,1$

Seitenverhältnis: $f(2,2) = \frac{400}{\left(\frac{1,5+2}{2}\right)^2} * 0,2^2 = 5,22$

Seitenlänge: $f(0,6) = \frac{400}{0,8^2} * (0,6 - 0,8)^2 = 25$

Verbindungen: $f(1) = 1 * 100 = 100$

Gesamter Zielfunktionswert: $f(s) = 0,3 * 11,1 + 0,2 * 5,22 + 0,2 * 25 + 0,3 * 100 = 39,37$

Der Zielfunktionswert des Raumes liegt also bei 39,37. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass dieser Wert alleine keine große Aussagekraft hat, sondern nur in Relation zu den gleichen Räumen anderer Individuen seine Aussagekraft enthält. Dieser Wert wird nämlich zu den Werten anderer Individuen in Relation gestellt werden, um die Fitness des Individuums und damit die Vermehrungswahrscheinlichkeit festzulegen.

Auch für die Parameter der anderen Kategorien wird zur Ermittlung der Gesamtzielfunktion analog vorgegangen. Auch hier werden die ermittelten Werte mittels einer gewichteten Summe verarbeitet.

Baukosten

Als nächstes soll wieder der Parameter Baukosten betrachtet werden. Im Unterschied zu den Parametern des Grundrisses, handelt es sich hier um einen wesentlich einfacheren und greifbareren Faktor. Die Ermittlung der Baukosten erfolgt durch eine Kostenberechnung nach DIN 276 und 277. Da die Kosten der einzelnen Bauteile in der Bauteilbibliothek niedergelegt sind, ist dies auch kein großes Problem, obwohl natürlich noch zahlreiche weitere Faktoren, wie etwa regionale Kostenfaktoren, berücksichtigt werden müssen.

Trotzdem handelt es sich im Prinzip bei der Ermittlung der Baukosten um eine einfache Addition von Werten, auf die inhaltlich nicht weiter eingegangen werden muss, nicht zuletzt, da hierzu zahlreiche Veröffentlichungen existieren (siehe beispielsweise [Has05] und [Frö06]).

Es soll aber noch kurz auf die Verrechnung der ermittelten Werte eingegangen werden. Ein Wert für die Baukosten, der sich ergibt, beispielsweise 200.000 €, ist natürlich an sich nicht aussagekräftig. Auch hier ist es vielmehr so, dass der Wert nur in Relation zu den anderen Individuen einer Population oder Subpopulation interpretierbar wird. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der Wert für die Baukosten eventuell auch noch indirekt in die Bewertung eingeht, da er eventuell mit den Energiekosten verrechnet werden muss. Dies ist aber ein Parameter der Nachhaltigkeit und die Relevanz dieses Parameters hängt nicht zuletzt von der Gewichtung der Kategorien durch den Nutzer ab.

Neben der Interpretierbarkeit durch die Gegenüberstellung eines Individuums mit anderen, ist aber auch die Vergleichbarkeit des Zielfunktionswertes mit den Zielfunktionswerten aus anderen Kategorien von entscheidender Bedeutung. Wie bereits dargelegt, ist diese Vergleichbarkeit durchaus gewünscht und lässt sich durch eine reine Übernahme eines Euro-Wertes für die Baukosten nicht erreichen. Diese Tatsache, zusammen mit der Relativität der Kosten, führt dazu, dass die Zielfunktion für den Bereich der Baukosten interpretiert werden muss. Ein weiteres Problem in der Kategorie der Baukosten ist die Tatsache, dass der optimale Wert unbekannt ist. Anders als beispielsweise bei einer Raumgröße, wo der Soll-Wert festgelegt ist, kann vor einer Optimierung nicht gesagt werden, was die kleinstmöglichen Baukosten sind. Es sei aber darauf hingewiesen, dass sich die Baukosten stets im Bereich der Möglichkeiten, die durch die Bauteilbibliothek gegeben sind, bewegt. Der optimale Wert für die Baukosten ergibt sich also aus der optimalen Verwendung der vorhandenen Bauteile. Sollte in der Bauteilbibliothek das optimale Bauteil nicht vorhanden sein, so kann der optimale Wert auch nicht gefunden werden. Die Suche nach der optimalen Lösung ist also auch ein Problem der Vollständigkeit der Bauteilbibliothek. Dies ist aber nur eine Frage der Vollständigkeit der Bauteilbibliothek und damit eine praktische Frage. Für die theoretische Betrachtung der Optimierung der Baukosten soll angenommen werden, dass das optimale Bauteil vorhanden ist.

Um nun die genannten Faktoren in eine Zielfunktionswertberechnung einfließen zu lassen, wird vorgeschlagen, die jeweils besten Baukosten einer (Sub-)Population mit einem Zielfunktionswert von 0 auszustatten und die schlechtesten Baukosten mit einem Wert von 100. Alle Werte dazwischen werden proportional einem Wert zwischen 0 und 100 zugewiesen. Obwohl dies natürlich, wie bereits oben beschrieben, willkürliche Werte sind, sind sie doch ge-

eignet, eine realistische Abbildung der Tatsachen zu gewährleisten und auch eine Vergleichbarkeit mit den Zielfunktionswerten anderer Kategorien herzustellen.

Die Zielfunktion ergibt sich also aus

$$f(C) = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} * 100$$

wobei C die tatsächlichen Kosten eines Individuums bezeichnet und C_{min} beziehungsweise C_{max} die minimalen und maximalen Kosten eines Individuums einer Population bezeichnen. Als Beispiel gebe es eine Population mit drei Individuen, wovon eines 200.000 €, eines 230.000 € und eines 300.000 € koste. Der Zielfunktionswert für die drei Individuen ergibt sich also folgendermaßen:

$$f(200000) = \frac{200000 - 200000}{300000 - 200000} * 100 = 0$$

$$f(230000) = \frac{230000 - 200000}{300000 - 200000} * 100 = 30$$

$$f(300000) = \frac{300000 - 200000}{300000 - 200000} * 100 = 100$$

Man sieht also, dass das beste Individuum stets einen Zielfunktionswert von 0 erhält, das schlechteste einen von 100 und alle dazwischen einen entsprechenden proportionalen Wert. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass eine Vergleichbarkeit untereinander und mit anderen Werten besteht.

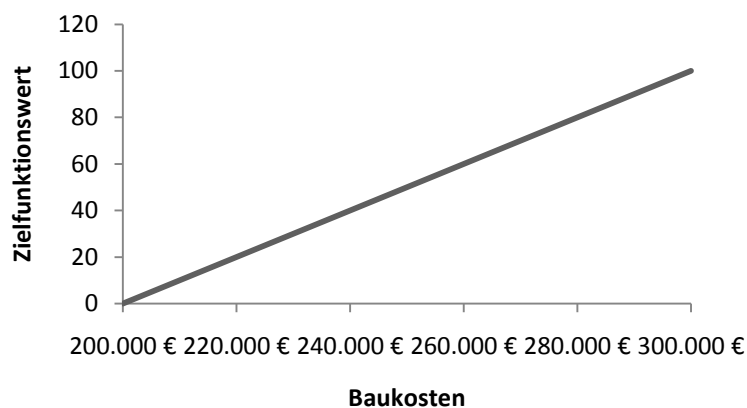


Abbildung 47: Zielfunktionswerte für einen minimalen Wert von 200.000 € und einen maximalen Wert von 300.000 €

Es sei schließlich noch darauf hingewiesen, dass die Ermittlung dieser Zielfunktionswerte nicht durch das Individuum selbst erfolgen kann, da dem Individuum die Kosten der anderen Individuen nicht bekannt sind. Die Berechnung des baukostenbezogenen Zielfunktionswertes eines Individuums muss von übergeordneter Stelle, also entweder von der Subpopulation oder von der Population aus, erfolgen. Es ist ebenfalls zu beachten, dass zur Zielfunktionswertermittlung einer eventuellen temporären Population, die nach der Rekombination entsteht, um zu ermitteln, welche Nachkommen in die Population eingehen, der minimale und der maximale Wert neu ermittelt werden müssen. Die Zielfunktionsberechnung muss also für jede Berechnung den minimalen und maximalen Wert neu berechnen.

Form

Wie beschrieben, kann die Berechnung der optimalen Form entweder einfach oder mit einem getrennten Algorithmus stattfinden. Im Falle einer getrennten Optimierung, also einer Optimierung in einem eigenen Optimierungsalgorithmus, beispielsweise einem getrennten evolutionären Algorithmus, muss dieser Algorithmus einen geeigneten Wert zurückliefern, der die Individuen ins Verhältnis zueinander setzt und einen nach den beschriebenen Gesichtspunkten vergleichbaren Wert zurückliefert. Es kann hier natürlich nicht auf die Details eines solchen isolierten Optimierungsalgorithmus eingegangen werden, es muss aber festgehalten werden, dass dieser Algorithmus, um in die Gesamtoptimierung eingehen zu können, einen interpretierten Wert zurückliefern muss.

Sollte bereits eine Vorgabe bezüglich der Außenform vorliegen, so kann die einfache Optimierung integriert stattfinden. In diesem Fall muss wieder ein Vergleich von Ist- mit Soll-Wert stattfinden. Beispielhaft soll hier auf den Fall eingegangen werden, dass die Vorgabe existiert, dass das Gebäude viereckig sein muss. Die Ableitungen für andere Fälle werden dann offensichtlich.

Zur Beurteilung, inwiefern eine Außenform mit einer Vorgabe übereinstimmt, wird vorgeschlagen auf die Winkel der Außenform zurückzugreifen. Hierbei sind sowohl die Winkelsumme, als auch die konkreten Winkel zu betrachten.

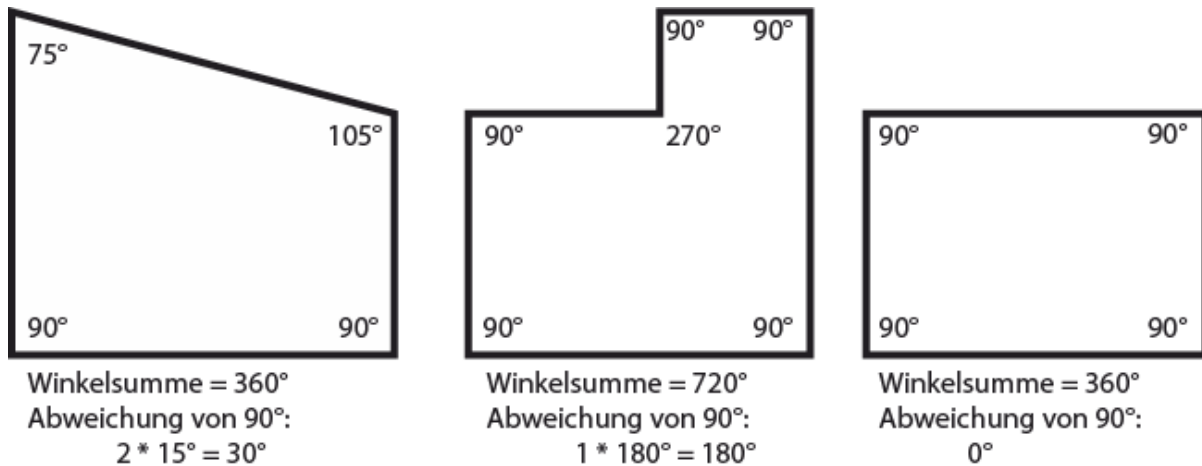


Abbildung 48: Vergleich von Außenformen mittels Innenwinkeln

Abbildung 48 zeigt ein Beispiel verschiedener Individuen. Das erste Beispiel zeigt ein zwar viereckiges, aber nicht rechteckiges Gebäude. Die Winkelsumme entspricht zwar den 360°, die durch die Forderung nach einem Rechteck den Soll-Wert bilden, die zweite Forderung nach Innenwinkeln mit 90° wird aber nur teilweise erfüllt. An zwei Ecken wird dieser Wert um 15° unter- bzw. überschritten, was zu einer Totalabweichung von 30° führt. Im zweiten Beispiel weicht schon die Winkelsumme ab, die 720° beträgt. Hiermit ist klar, dass es sich um ein Sechseck handeln muss. Durch die somit vorhandene Winkelabweichung wird das Ergebnis zusätzlich verschlechtert. Beim dritten Beispiel schließlich werden sowohl Winkelsumme als auch Einzelwinkel eingehalten, es handelt sich um ein optimales Ergebnis im Sinne der Vorgabe, so wie auch alle weiteren Vierecke. Es wird nun vorgeschlagen, den Zielfunktionswert aus der Summe der Abweichungen von Winkelsumme und Einzelwinkeln zu bilden. Da sich aus der Winkelsumme die Anzahl der Ecken berechnen lässt (Eckenanzahl = Winkelsumme / 180° + 2), wird vorgeschlagen, jede zusätzliche oder fehlende Ecke mit 50 zu bestrafen. Hinzu kommt die Hälfte der Summe der Abweichungen der einzelnen Ecken. Die Hälfte wird deshalb vorgeschlagen, da die Drehung einer Kante ja immer die Änderung von zwei Ecken um den gleichen Betrag nach sich zieht. Im obigen Beispiel ergäben sich also Zielfunktionswerte von 15, 190 und 0. Für alle weiteren Formvorgaben lässt sich dieser Ansatz natürlich analog fortführen. Auch die Definition eines gültigen Bereichs von Winkelabweichungen ist unproblematisch.

Umwelt

Im Bereich der Parameter der Kategorie Umwelt soll zunächst der Faktor der Ausrichtung der einzelnen Räume betrachtet werden. Wie in 4.3 beschrieben, gibt es für viele Räume eine optimale Ausrichtung in eine Himmelsrichtung, so etwa für Wohn- oder Schlafzimmer. Für andere Räume, wie beispielsweise eine Abstellkammer, ist die Ausrichtung natürlich egal, die Bewertung der Ausrichtung eines solchen Raumes wird nicht direkt vorgenommen. Sollte sich die Abstellkammer jedoch an der Südseite befinden, so geht diese Position natürlich indirekt in die Bewertung ein, da sie anderen Räumen den Platz an der Südfassade „wegnimmt“.

Für die Berechnung des Zielfunktionswertes der Ausrichtung eines Raumes wird vorgeschlagen, den absoluten Wert der Differenz zwischen tatsächlicher Ausrichtung und Soll-Ausrichtung zu wählen. Hierbei wird die Richtung Norden als 0° definiert, Osten sind 90° , Süden 180° und Westen 270° .

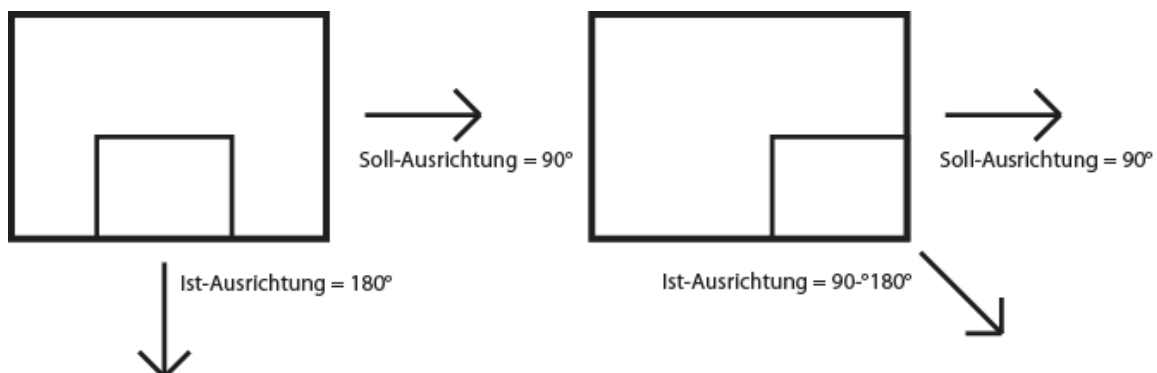


Abbildung 49: Beurteilung der Raumausrichtung

In Abbildung 49 ist ein Beispiel zweier verschiedener Individuen zu sehen. In einem Beispiel befindet sich der zu beurteilende Raum an der Südseite, im anderen befindet er sich an der Süd-Ost-Ecke. Der Soll-Wert für die Ausrichtung beträgt 90° , was Osten entspricht. Im ersten Fall beträgt die Abweichung von Ist-Ausrichtung zu Soll-Ausrichtung 90° , was direkt in einen Zielfunktionswert von 90 übersetzt wird. Im zweiten Fall befindet sich der Raum auf einer Ecke und ist somit auch in Richtung Osten ausgerichtet. Dies führt dazu, dass der Raum einen Zielfunktionswert von 0 zugewiesen bekommt. Der maximale Zielfunktionswert eines Raumes bezogen auf die Ausrichtung ist somit 180.

Zur Beurteilung der anderen umweltbedingten Parameter eines Entwurfes wird das in 4.3 beschriebene dreidimensionale Raster zugrunde gelegt. So wird beispielsweise für den Parameter Lärm ein Raster erzeugt, das den Lärm an jeder Stelle des Rasters definiert. Es wird davon ausgegangen, dass die tatsächlichen Werte auf eine Skala von 0 bis 100 übertragen werden. Dieses Raster wird nunmehr mit den einzelnen Räumen übereinandergelegt. Der tatsächliche Lärmwert eines Raumes ergibt sich aus dem maximalen Wert eines Rasterpunktes innerhalb des Raumes. Dieser Wert ist wiederum mit den vorgegebenen Soll-Werten für die einzelnen Räume zu vergleichen. Hier wird ein zumutbarer Wert festgelegt, der beispielsweise für eine Abstellkammer beliebig hoch ist (also 100), während er für ein Schlafzimmer 0 beträgt. Nun wird ein Überschreiten des Soll-Wertes mit der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bestraft. Wird beispielsweise für ein Schlafzimmer ein Ist-Wert von 30 ermittelt, so beträgt der Zielfunktionswert ebenfalls 30. Für eine detailliertere Optimierung wird vorgeschlagen, auch die Lage und Größe von Fenstern in die Berechnung einfließen zu lassen. In diesem Sinne könnte man beispielsweise den mittleren Lärmwert an den Fenstern ermitteln und in die Berechnung einfließen lassen.

Analog wird bei den anderen Umweltfaktoren wie Sicht oder natürlichen Hindernissen vorgegangen, wobei es sich bei der Sicht natürlich um einen positiven Faktor handelt und bei einem Hindernis, das nicht bebaut werden darf, um einen Wert, der in keinem Raum von 0 abweichen darf. Die Vorgehensweise ist aber analog, der Zielfunktionswert wird entsprechend berechnet.

Energiekosten

Die Berechnung der Energiekosten erfolgt, wie beschrieben, durch die Aufstellung einer Energiebilanz. Die Bewertung der Energiekosten erfolgt analog zur Bewertung der Baukosten. Dies bedeutet, dass man den optimalen Wert der Energiekosten zunächst nicht weiß. Daher wird vorgeschlagen, die tatsächlichen Kosten des besten und des schlechtesten Individuums als Ausgangspunkt zu verwenden. Analog zu den Baukosten wird das beste Individuum mit 0, das schlechteste mit 100 als Zielfunktionswert bedacht. Als Abweichung von den Baukosten existiert allerdings bei den Energiekosten beziehungsweise beim Energieverbrauch eines Hauses eine Grenze, die durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) definiert wird. Sollte also ein Individuum die Vorgaben der EnEV nicht einhalten, so muss diese Abweichung zusätzlich bestraft werden, da eine Nebenbedingung, nämlich die Einhaltung der

gesetzlichen Vorgaben, nicht erfüllt ist. Diese Nichteinhaltung sollte mit einem zusätzlichen Wert von 100 bestraft werden, so dass sich für das schlechteste Individuum, das die gesetzlichen Vorgaben nicht einhält ein maximaler Zielfunktionswert von 200 ergibt. Die Formel ist also analog zu den Baukosten:

$$f(E) = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} * 100$$

Sollten die gesetzlichen Vorgaben nicht eingehalten werden, so gilt:

$$f(E) = f(E) + 100$$

Stil

Wie bereits beschrieben, wird die Bewertung des Stils gesondert behandelt. An dieser Stelle sei nur darauf hingewiesen, dass die Stilbewertung einen Wert zurückliefert, der die Übereinstimmung des Stils eines Individuums mit einem Soll-Wert quantifiziert. So kann beispielsweise ein umgekehrter Prozentwert als Zielfunktionswert herangezogen werden. Stimmt ein Entwurf zu 100 Prozent mit der Vorgabe überein, so ergibt sich ein Zielfunktionswert von 0, stimmt der Entwurf zu 0 Prozent überein, so ist der Wert 100.

Nachhaltigkeit

Bei den Parametern der Nachhaltigkeit soll zunächst die energetische Nachhaltigkeit behandelt werden. Wie beschrieben, gehen in diesen Parameter die Baukosten sowie die Energiekosten auf einen bestimmten Zeitraum ein. Der so entstehende Wert kann wie die Baukosten behandelt werden, Das heißt, dass die Berechnung des Zielfunktionswertes analog zu den Baukosten geschieht, eine Streuung der Zielfunktionswerte von 0 bis 100 für das beste beziehungsweise schlechteste Ergebnis wird vorgeschlagen.

Die Nachhaltigkeit der Energieträger erfolgt analog zu den in die Ermittlung der Energiebilanz eingehenden. An dieser Stelle wird für die einzelnen Energieträger ein Faktor vergeben, der an dieser Stelle verstärkt werden kann. Hierzu wird eine Abbildung auf eine Skala von 0 bis 100 vorgeschlagen, wobei der beste Energieträger (Sonne) einen Wert von 0 erhält, der schlechteste (Strom) erhält einen Wert von 100.

Die Nachhaltigkeit der verwendeten Baumaterialien bezogen auf Gewinnung und Recyclingfähigkeit wird anhand einer Datenbank (siehe [GEM09]) ermittelt. Die hier vorhandenen

Werte werden für ein Individuum addiert. Danach wird der Gesamtwert eines Individuums wiederum analog zum bisherigen Vorgehen auf eine Zielfunktionswertskala von 0 bis 100 projiziert.

Um die grundrissbezogene Nachhaltigkeit zu gewährleisten, werden Soll-Werte für die Individualräume bezüglich der Raumgrößen und Seitenverhältnisse vorgegeben. Danach werden die tatsächlichen Werte analog zur Berechnung der grundrissbezogenen Zielfunktionswerte Raumgröße und Seitenverhältnis ermittelt und gehen hier ein.

Nutzerbedürfnisse (Bestandsparameter)

Die Verarbeitung der Nutzerbedürfnisse beziehungsweise Bestandsparameter in dieser Kategorie erfolgt, wie beschrieben, durch die Kennzeichnung des Soll-Zustandes einzelner Bauteile. Für jede so vorhandene Vorgabe wird geprüft, ob die Vorgabe eingehalten wird. Es soll hier nicht auf jede mögliche Konfiguration eingegangen werden, sondern lediglich ein Beispiel betrachtet werden: Der Nutzer hat festgelegt, dass eine Wand eine bestimmte Position haben soll. Ist bei einem Individuum diese Wand tatsächlich an der vorgegebenen Stelle, so wird dies mit einem Zielfunktionswert von 0 bedacht. Für eine Abweichung wird vorgeschlagen, dass die Tatsache einer Abweichung als solche bereits mit einem Strafwert von 50 belegt wird, da es sich bei einer Nutzervorgabe um eine einzuhaltende Nebenbedingung handelt. Des Weiteren macht es Sinn, den Grad der Abweichung festzustellen. Hierzu wird wieder vorgeschlagen, die kleinste und größte Abweichung zu ermitteln. Daraufhin wird die „beste“ Lösung mit einem zusätzlichen Wert von 0, die schlechteste Lösung mit 100 versehen. So ergibt sich für das „beste“ Individuum, das die Vorgabe nicht einhält, ein Wert von 50, für das schlechteste ein Wert von 150. Die Mittelwerte werden entsprechend proportional abgebildet.

Für andere Bauteile wird entsprechend vorgegangen. Es soll hier nicht auf jedes mögliche Bauteil eingegangen werden. Die Zielfunktionswerte sollten aber analog gebildet werden: Eine Abweichung wird pauschal mit 50 bestraft, zusätzlich wird der Grad der Abweichung mit 0 bis 100 bestraft.

4.4.2 Verarbeitung bei der Rekombination

Die Verarbeitung der Parameter bei der Rekombination ist wieder besonders. Die Besonderheit liegt in der Tatsache begründet, dass es bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung

die oben beschriebenen Metachromosomen beziehungsweise Metakategorien gibt, nämlich Geometrie und Bauteile. Wie bereits umrissen, sind die Metachromosomen durch die Tatsache gekennzeichnet, dass sie die eigentliche „Substanz“ des Gebäudes ausmachen. In Ihnen ist die Gestalt und Ausprägung des Gebäudes kodiert. Alle anderen Parameter sind im Prinzip Folgen der Metachromosomen und vom Zustand der Parameter in diesen Bereichen abhängig. Zwar sind alle Parameter zur Optimierung wichtig, aber die Parameter der Kategorien Grundriss und Bauteile sind die Basis aller anderen Parameter.

Daraus folgt für die Verarbeitung der Parameter im Rahmen der Rekombination, dass ausschließlich die Parameter in den Bereichen Geometrie und Bauteile wirklich verändert werden. Die Parameter der anderen Kategorien ergeben sich aus den Parametern, die verändert wurden. Das bedeutet natürlich nicht, dass die Parameter der anderen Kategorien keinen Einfluss auf die Rekombination hätten. Die Schlüsse, die aus dem Zustand dieser Parameter gewonnen werden, sollten sehr wohl in die Rekombination eingehen. Allerdings haben sie nur Einfluss auf die Art und Wahl der Rekombinationsmethoden, werden jedoch selbst nur indirekt rekombiniert. Ein kleines Beispiel vorab: Die Baukosten einer Wand zwischen Küche und Esszimmer sind ein Parameter der Kategorie Baukosten. Will man nun zwei Individuen miteinander rekombinieren, so können die Baukosten der Wand im einen und anderen Entwurf Einfluss auf die Wahl der neuen Wand haben. Die Änderung des Wandstils, die daraus hervorgeht, ist jedoch eine Änderung auf dem Chromosom Bauteile, die Rekombination auf dem Chromosom Baukosten findet nur indirekt durch die Wahl des Wandstils statt.

Des Weiteren ist zu beachten, dass es Kategorien gibt, deren Parameter eher von der Geometrie beeinflusst werden und andere, deren Parameter eher von den Bauteilen beeinflusst werden. Natürlich ist auch dies eine Vereinfachung, da die Bauteile immer von der Geometrie abhängen. So ist es per definitionem unmöglich, eine Wand zu verschieben. Es wird immer die Geometrie verschoben, die Grundlage für die Wand ist. Gleiches gilt auch für alle anderen Bauteile. Insofern hängen im Endeffekt natürlich alle Parameter von der Geometrie ab, dennoch gibt es aber Parameter, die in erster Linie von der Wahl eines Bauteilstils, also der konkreten Wahl der Materialien und ihrer Schichtung abhängen. Diese Parameter sind primär abhängig von den Parametern der Geometrie.

Abbildung 50 zeigt homogen abhängige Kategorien. Dies bedeutet, dass die Parameter dieser Kategorien, mit den beschriebenen Abhängigkeiten, eindeutig von einer Metakategorie abhängen. Diese Kategorien sind Grundriss und Form, die eindeutig von der Geometrie abhängen, sowie Energie- und Baukosten, die wiederum eindeutig von den Bauteilen abhängen, in erster Linie von der Wahl der Bauteilstile und damit der Materialien.

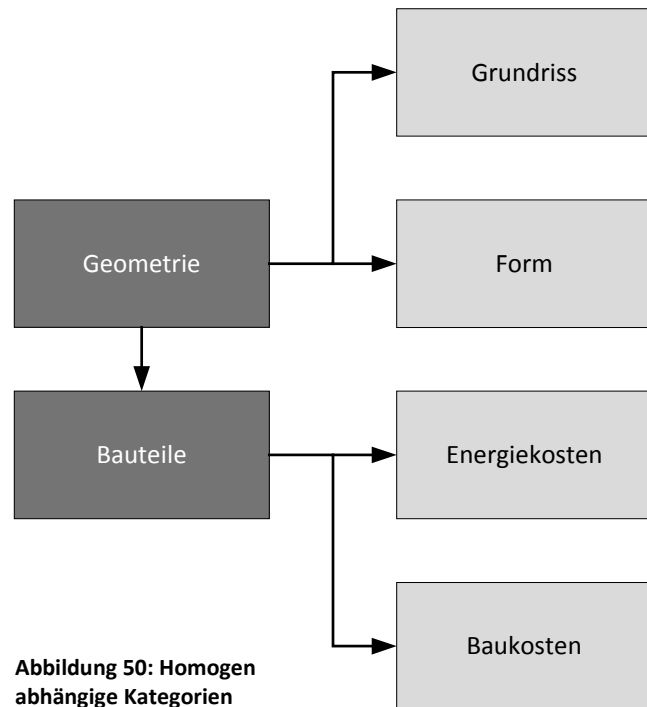


Abbildung 50: Homogen abhängige Kategorien

Abbildung 51 hingegen zeigt die Kategorien, deren Parameter heterogen bezüglich der Abhängigkeit von einem Metachromosom sind. Hierzu gehört die Kategorie Umwelt, deren Parameter „Ausrichtung“ in erster Linie von der Geometrie, also von Lage und Drehung von Räumen abhängt, deren andere Parameter aber, wie beispielsweise der Lärm, sowohl von den gewählten Bauteilen, als auch von der Lage der Geometrie abhängt. Hierzu gehört auch die Kategorie Stil, da sich der Baustil eines Gebäudes ja sowohl über den Grundriss, der direkt von der Geometrie abhängt, als auch über die Beschaffenheit der Bauteile, besonders der Oberflächen, definiert. Auch im Bereich der Nachhaltigkeit sind die Parameter heterogen bezüglich der Abhängigkeiten. Während die Nachhaltigkeit bezüglich energetischer Faktoren und Faktoren der Materialien eher von der Art und Weise der Bauteile abhängt, ist die nutzungsbedingte Nachhaltigkeit eher von der Geometrie eines Raumes abhängig. Schließlich sind auch die Nutzerbedürfnisse nicht eindeutig einer Metakategorie zuzuordnen. Sowohl Nutzer-, als auch Bestandsparameter können sowohl die Geometrie eines Raumes betreffen, als auch die genaue Ausprägung eines Bauteils, seiner Oberfläche, Ausdehnung oder anderes.

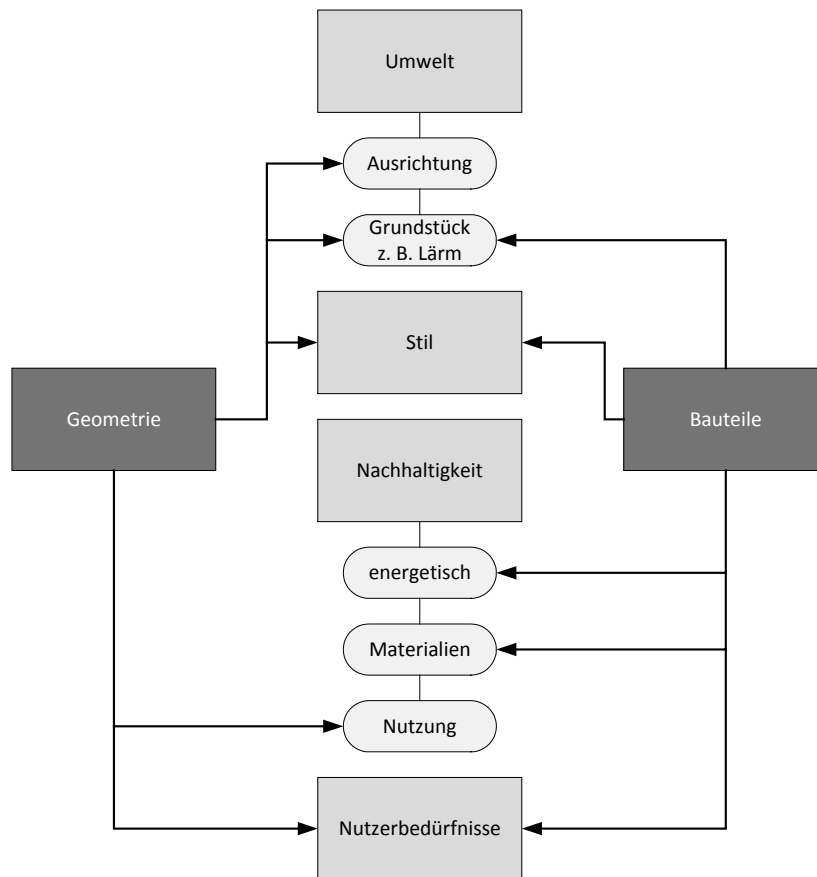


Abbildung 51: Heterogen abhängige Kategorien

Bezüglich der konkreten Ausprägung der Rekombination zweier Individuen sei zunächst nochmals auf die prinzipiellen Möglichkeiten der Rekombination, die in 4.1.5 beschrieben wurden, hingewiesen. Grundsätzlich ist es so, dass je nach Ausprägung der einzelnen Fitnesswerte eines Individuums, beziehungsweise seiner Teilbereiche, unterschiedliche Rekombinationsmethoden vorgeschlagen werden.

Geometrie-Bauteil-Crossover

Als erste und einfachste Methode sei eine Abwandlung der *Crossover*-Rekombination vorgestellt. Bei einer *Crossover*-Rekombination in seiner Grundform werden binäre Variablen eines Elternteils komplett übernommen. Sollte bei einer Rekombination der Fall vorliegen, dass bei einem Elternteil die Parameter der Kategorien, die von der Geometrie abhängen, besonders gut sind, während beim anderen Elternteil die Parameter der Kategorien, die von den Bauteilen abhängen sehr gut sind, so wird vorgeschlagen ein sogenanntes *Geometrie-Bauteil-Crossover* durchzuführen.

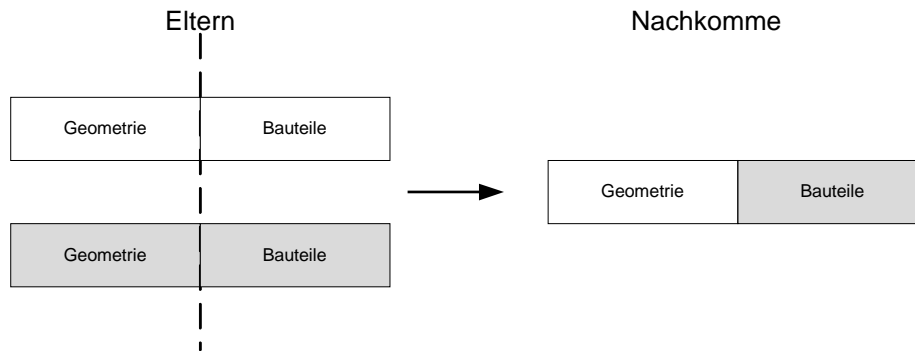


Abbildung 52: Geometrie-Bauteil-Crossover

Wie in Abbildung 52 zu sehen, werden dabei alle Parameter der Kategorien Geometrie beziehungsweise Bauteile als eine Variable zusammengefasst. Diese Variable wird behandelt, als sei sie binär. Es wird nun die Geometrie des einen Elternteils verwendet, während die Bauteile, also insbesondere die Bauteilstile, des anderen Elternteils verwendet werden. Die Parameter der anderen Kategorien werden entsprechend mit geändert, da sie, wie gezeigt, direkt von den Parametern der Geometrie und der Bauteile abhängig sind. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass dieses Verfahren nur bedingt und mit gewissen Wahrscheinlichkeitsfaktoren zum Einsatz kommen sollte. Da die Nachkommen einer solchen Rekombination ihren Eltern sehr ähnlich sind, besonders was das geometrische Erscheinungsbild anbelangt, ist die Diversifizierung der Population natürlich auch relativ gering. Eine geringe Diversifizierung führt zur Gefahr einer vorzeitigen Konvergenz, da der Suchraum stark eingeschränkt wird. Andererseits ist diese Methode ein mächtiges Werkzeug zum schnellen Finden guter Lösungen. Dies ist leicht nachvollziehbar, wenn man sich vor Augen führt, dass es durchaus möglich ist, dass ein Entwurf vom Grundriss her fast optimal ist, während ein anderer von der Wahl der Bauteile her optimal ist. Eine Kombination dieser Entwürfe mittels *Geometrie-Bauteil-Crossover* führt in dieser Konstellation in der Regel zu sehr guten Ergebnissen. Natürlich führt eine solche Rekombinationsmethode aber nicht immer zu besseren Ergebnissen in allen Kategorien. So ist es beispielsweise denkbar, dass die Bauteile eines Entwurfes im Hinblick auf den Energieverbrauch sehr gut gewählt sind. In den Energieverbrauch fließen aber ebenfalls Faktoren der Form, wie A/V-Verhältnis, aber auch Faktoren der Umwelt beziehungsweise der Geometrie, wie Ausrichtung und Lage oder Ausmaße eines Bauteils, ein. Durch die Kombination der Bauteile des einen Entwurfes mit der Geometrie eines anderen kann der neue Energieverbrauch unter Umständen durchaus ungünstiger sein, als dies beim Elternteil der Fall war.

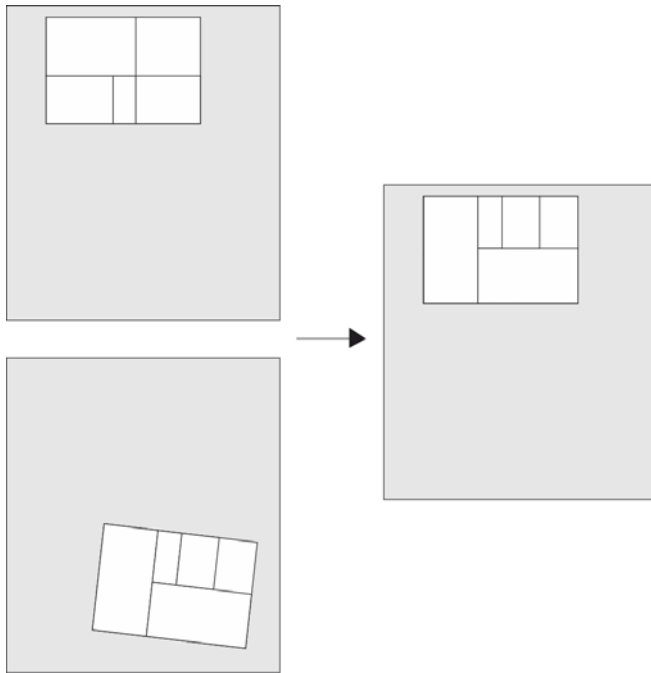


Abbildung 53: Grundriss-Crossover

Geometrie-Crossover

Um den Parametern der Kategorie Geometrie gerecht zu werden, sollte man auch innerhalb der Geometrie nochmals zwischen den inneren und äußeren Parametern der Geometrie unterscheiden. Die innere Geometrie beschreibt im Wesentlichen die Räume, aus deren Summe sich die Geschosse und das Gebäude ergeben. Die äußeren Parameter beschreiben Lage und Ausrichtung des Gebäudes innerhalb des Grundstücks beziehungsweise des Baufensters. Auch

hier kann man wieder eine Crossover-Rekombination in Betracht ziehen. Dies bedeutet, dass innerhalb der Geometrie die inneren Parameter des einen Elternteils und die äußeren Parameter des anderen Elternteils übernommen werden.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird dabei im Prinzip der Grundriss des einen Elternteils übernommen und mit der Lage und Ausrichtung auf dem Grundstück des anderen Elternteils rekombiniert.

Dieses Vorgehen kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die inneren Parameter des einen Elternteils, die ja hauptsächlich in den Parametern des Grundrisses Niederschlag finden, besonders gut sind, während die äußeren Parameter des anderen Elternteils, die ja vor allem in den Kategorien Umwelt und Energie zum Tragen kommen, besonders gut sind. Die Rekombination dieser beiden Parametergruppen kann dann zu einem deutlich besseren Ergebnis führen.

Linienrekombination der äußeren geometrischen Parameter

Alternativ zu einem Crossover können die äußeren Parameter der Geometrie natürlich auch mittels einer erweiterten Linienrekombination behandelt werden. Es wird hierbei vorgeschlagen, die klassische Linienrekombination um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lage der Lösungen zu erweitern. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, die Parameter der Nach-

kommen mit höherer Wahrscheinlichkeit in der Nähe der Lage des besseren Elternteils zu suchen.

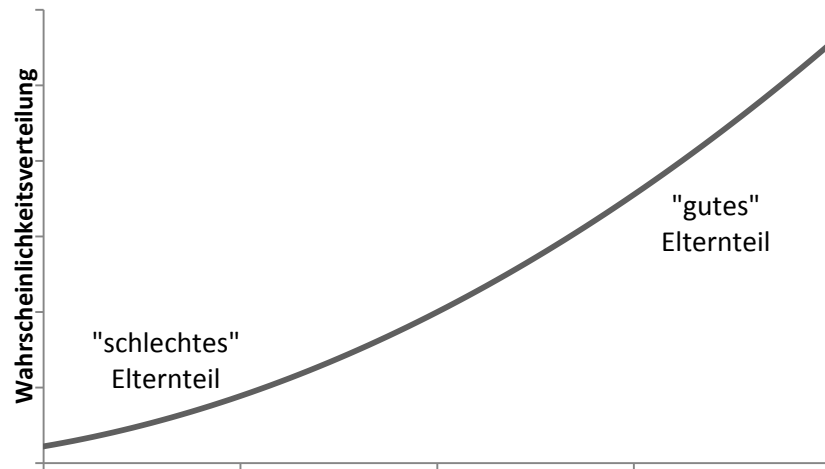


Abbildung 54: Wahrscheinlichkeit der Lage rekombinierter Variablen

Wie in Abbildung 54 zu sehen ist, liegt der Wert der neuen Variablen beim Nachkommen im Bereich zwischen den alten Werten der Elternteile beziehungsweise er kann auch etwas außerhalb dieses Bereichs liegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert in der Nähe des Wertes des „guten“ Elternteils in Bezug auf diese Variable sein wird, ist höher, als dass er einen

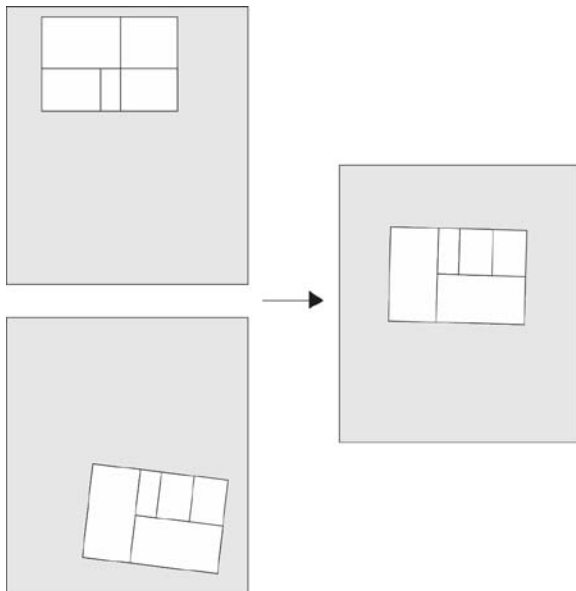


Abbildung 55: Linienrekombination der äußeren geometrischen Parameter

Wert in der Nähe des „schlechteren“ Elternteils annimmt. Um die Varianz der Population aufrecht zu erhalten, ist es wichtig, dass der neue Wert nicht ausschließlich den momentan besseren Wert annimmt, da dieser Wert genauso gut in einem lokalen Minimum liegen könnte, was wiederum zu einer vorzeitigen Konvergenz führen könnte.

Diese erweiterte Linienrekombination, die übrigens in einigen Fällen zur Anwendung kommt, kann nun einzeln auf die beiden äußeren Parameter der Lage (Position) und der Ausrichtung (Drehung) angewandt werden. Das Ergebnis könnte wie in Abbildung 55 aussehen. Aus der Kombination von Lage und Ausrichtung der beiden Elternteile ist ein Nach-

komme entstanden, dessen Werte bezüglich dieser Parameter zwischen den Werten der Elternteile liegen.

Raum-Organisations-Crossover

Wenn man sich den Möglichkeiten der Rekombination von inneren Geometrien zuwendet, so wird die Sache natürlich wesentlich schwieriger. Zwar liegen die Parameter der Geometrie, also beispielsweise eine Koordinate eines Raumes, ebenfalls als normale Gleitkommazahl vor, doch eine bloße Rekombination zweier Koordinaten macht wenig Sinn. So könnte man zwar jede einzelne Koordinate eines Gebäudes mit den entsprechenden Koordinaten des anderen Elternteiles rekombinieren, doch das Ergebnis ist keine sinnvolle Rekombination im Sinne einer gültigen neuen Entwurfsvariante. Der Grund hierfür liegt unter anderem darin, dass bei einer Geometrie, die einen architektonischen Entwurf repräsentiert, die Sinnhaftigkeit der Geometrie neben der Information der bloßen Zahlen der Koordinaten auch in der Information liegt, wie diese zueinander angeordnet sind. Es existiert also, ob implizit oder explizit, bei jedem Entwurf ein Organisationsdiagramm, das Informationen bezüglich der Beziehungen der Räume zueinander enthält. Des Weiteren würde, nebenbei gesagt, eine einfache Rekombination der Koordinaten zu ungültigen Entwürfen führen, da nicht gewährleistet werden kann, dass alle Räume nach einer Rekombination ohne Überlappung mit anderen Räumen existieren.

Es müssen also Rekombinationsmethoden gefunden werden, die geeignet sind, einen gültigen Nachkommen zweier Entwürfe zu liefern. Hierbei stellt sich natürlich die Frage, was der „Mittelwert“ zweier Grundrisse ist. Zunächst sei für die folgenden Betrachtungen festgestellt, dass der Grundriss in diesem Falle mit der Geometrie bedeutungsgleich ist, da die weiteren Geometrien, die zur Kategorie Geometrie gehören, wie die Geometrie eines Bodens, von der Geometrie des jeweiligen Raumes abhängig sind. Es geht in diesem Falle also in erster Linie um die Rekombination von Raumgeometrien. Des Weiteren kann man feststellen, dass der Grundriss in diesem Falle aus den beiden Komponenten Raumgeometrien und Organisationsdiagramm besteht. Auf diese Weise können sowohl geometrische Parameter, als auch organisatorische Parameter in die Rekombination eingehen.

Ähnlich wie bei der Initialisierung, die ja schon beschrieben wurde, gibt es auch hier zwei prinzipielle Ansätze: *Top-Down*-Methoden und *Bottom-Up*-Methoden. Erstere gehen davon aus, dass eine Außenform gegeben ist. Von dieser ausgehend müssen sich die Räume anpas-

sen. Letzere hingegen gehen nicht von einer festen Außenform aus. Diese ergibt sich vielmehr aus der Addition der Räume. Praktische Erwägungen im Sinne von Angleichungen ähnlicher Kanten seien an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Als einfachste Methode der inneren geometrischen Rekombination wird hier das *Raum-Organisations-Crossover* vorgestellt. Diese Methode kann sowohl für *Top-Down*- als auch für *Bottom-Up*-Konstellationen adaptiert werden. Hierbei werden analog zum Vorgehen beim *Geometrie-Bauteil-Crossover* die Räume des einen Elternteils herangezogen und die Organisation des anderen. Als *Top-Down*-Methode wird ein *geometriedominiertes Raum-Organisations-Crossover* genommen. Dies bedeutet konkret, dass der geometrische Grundriss eines Elternteiles übernommen wird, während, soweit möglich, die Raumfunktionen aus dem Organisationsdiagramm des anderen entlehnt werden.

Wie in Abbildung 56 zu sehen ist, können natürlich nicht immer alle Verbindungen des jeweiligen Elternteils übernommen werden. Diese Methode ist vor allem dann von Vorteil, wenn die geometrischen Parameter der Eltern gut sind, da diese Methode keine geometrischen Veränderungen vornimmt. Sie ist ebenso gut geeignet, gute geometrische Lösungen mit neuen organisatorischen Varianten auszustatten.

Als Alternative dieser Variante kann auch ein *organisationsdominiertes Raum-Organisations-Crossover* verwendet werden.

Dieses funktioniert weitgehend gleich, der

Unterschied besteht allerdings darin, dass die Organisationsstruktur des einen Elternteils übernommen werden *muss*. Dies bedeutet wiederum, dass der Grundriss soweit verändert werden muss, dass diese Forderung erfüllt werden kann. Der rechnerische Aufwand zur ge-

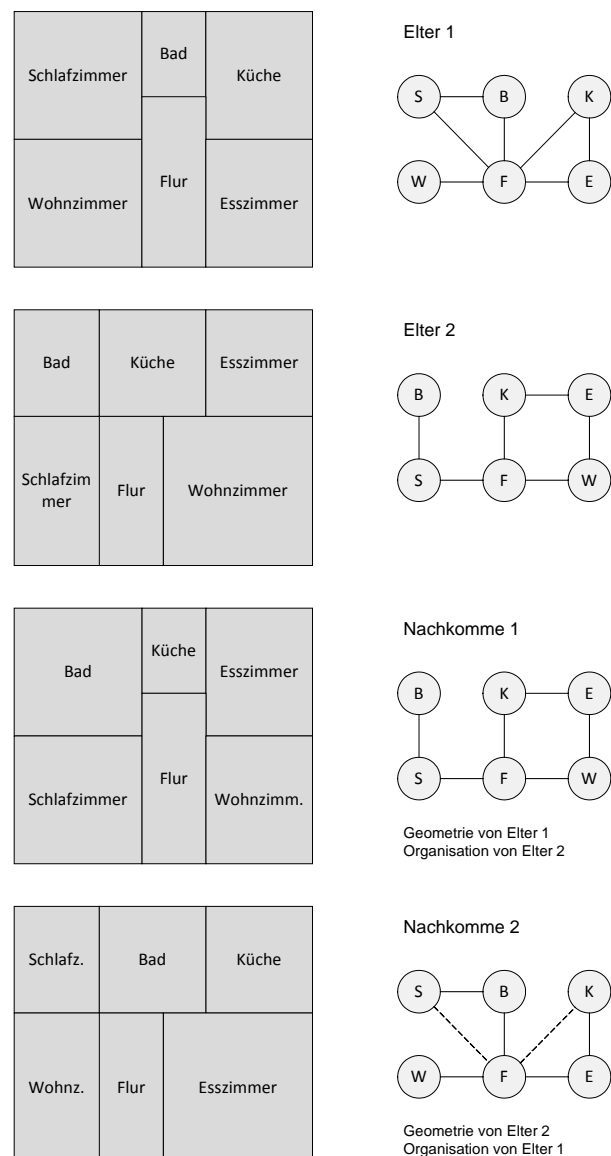


Abbildung 56: Raum-Organisations-Crossover

zielten Veränderung eines Grundrisses in dieser Form ist jedoch sehr hoch. Da das Verschieben von Wänden auch eine Mutationsmethode ist, die später vorgestellt werden wird, sollte überlegt werden, ob die hier beschriebene Variante Vorteile gegenüber der zufälligen Mutation hat.

Kombinatorische Raumrekombination

Die kombinatorische Raumrekombination ist eine *Bottom-Up*-Methode. Es gibt sie in zwei Ausführungen: Die Raumrekombination mit Crossover der Organisation und die Raumrekombination mit kombinatorischer Organisationsrekombination.

Um die beiden Fälle zu beleuchten, soll zunächst erläutert werden, was beiden Methoden gemeinsam ist: die Rekombination der Raumgeometrien. Um eine wirkungsvolle Rekombination von Raumgeometrien im Sinne eines Fortschritts der Optimierung im Rahmen des evolutionären Algorithmus zu gewährleisten, müssen bei der Rekombination die Parameter berücksichtigt werden, die bei der Bestimmung der Fitness eines Individuums eine Rolle spielen. Dies sind in erster Linie die Parameter der Kategorie Grundriss, wobei die wichtigsten Parameter die der Raumgröße, des Seitenverhältnisses, der minimalen Seitenlänge und der Raumverbindungen sind. Da die Raumverbindungen Parameter sind, die über das Organisationsdiagramm behandelt werden, bleiben Raumgröße, Seitenverhältnis und minimale Seitenlänge. Um nun zwei Räume unter geometrischen Gesichtspunkten zu rekombinieren wird vorgeschlagen, auf die Parameter Größe und Seitenverhältnis eine erweiterte Linienrekombination wie oben beschrieben anzuwenden. Dies bedeutet, dass ein Wert für Größe und Seitenverhältnis ermittelt wird und der Wert der Nachkommen zwischen diesen Werten beziehungsweise leicht darüber oder darunter gewählt wird. Aus diesen Werten lässt sich dann eine neue Geometrie konstruieren. Es wird eine Methode implementiert, die eine zufällige Geometrie erzeugt, die diese Rahmenbedingungen einhält.

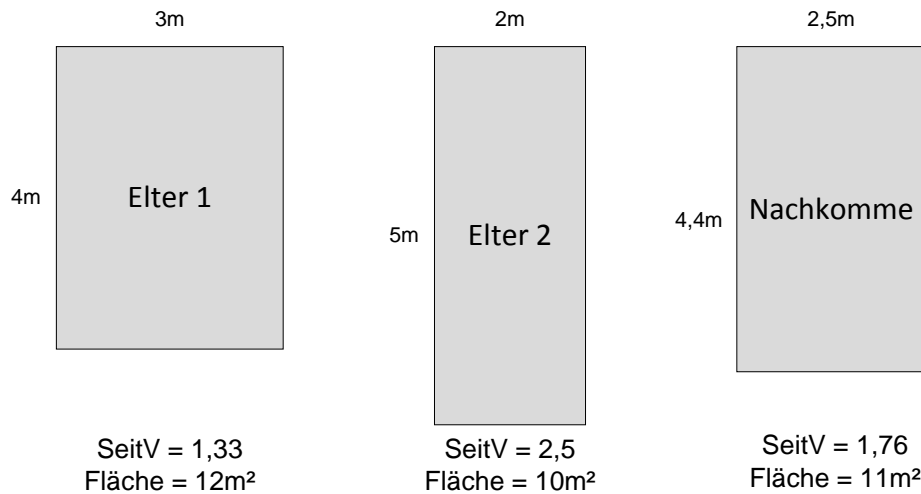


Abbildung 57: Beispiel einer Raumrekombination mit den Parametern Seitenverhältnis und Fläche

Abbildung 57 zeigt ein einfaches Beispiel für eine solche Raumrekombination. In 4.3 wurde erläutert, wie ein Seitenverhältnis für nicht-rechteckige Geometrien ermittelt werden kann. Insofern ist diese Methode natürlich auf beliebige Geometrien anwendbar. Als Einschränkung sei angefügt, dass es bei der Rekombination von Räumen mit unterschiedlicher Kantenanzahl sinnvoll ist, die Kantenanzahl eines der Elternteile per *Crossover* zu übernehmen. Es hat sich als nicht praktikabel erwiesen, die Kantenanzahl zu mitteln. Als Beispiel denke man nur an die Kombination eines rechteckigen Raumes mit einem L-förmigen Raum. Würde man die Kantenanzahl mitteln, so ergäbe dies ein Fünfeck. Eine Form, die unter praktischen Gesichtspunkten wohl eher als exotisch zu bezeichnen ist. Eine praktische Möglichkeit der Raumrekombination ist auch das größtmögliche Überlagern zweier Flächen, die Verbindung der jeweils am nächsten liegenden Eckpunkte und die Wahl eines neuen Eckpunktes auf dieser Linie. Dies ist im mathematischen Sinne zwar nicht mit obiger Methode identisch, in praktischer Hinsicht jedoch durchaus anwendbar.

Bei der Raumrekombination mit *Crossover* der Organisation werden die so erhaltenen Räume nun mit der Organisationsstruktur eines der Elternteile verbunden. Hierbei sollte natürlich mit hoher Wahrscheinlichkeit dasjenige Elternteil gewählt werden, das beim Parameter Verbindungen eine bessere Fitness aufweist.

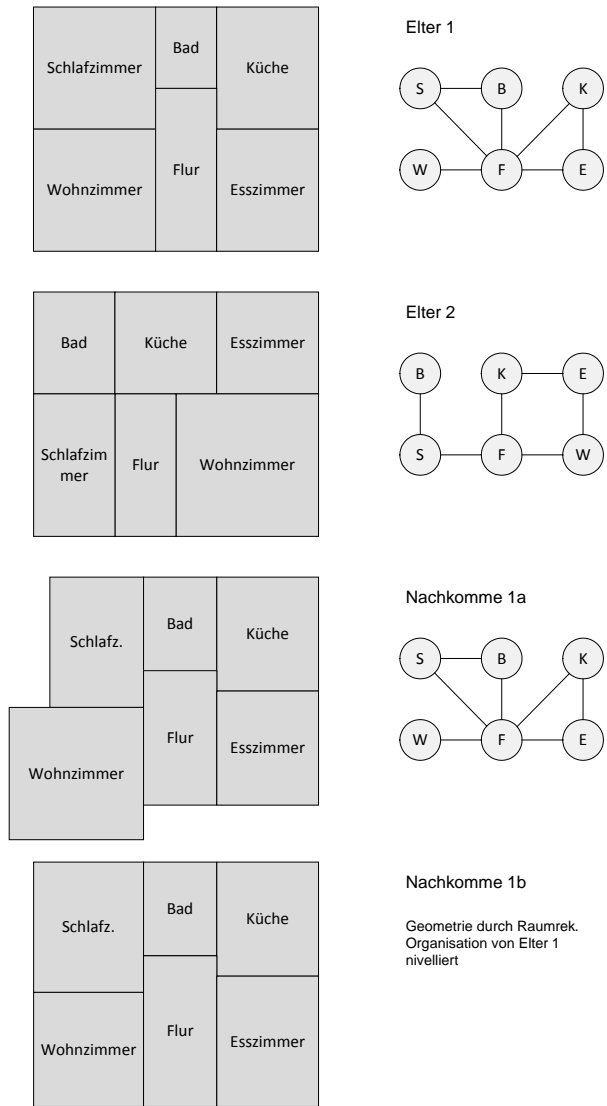


Abbildung 58: Raumrekombination mit Crossover der Organisation

Abbildung 58 zeigt ein Beispiel für dieses Vorgehen. Aus diesem Beispiel wird auch deutlich, dass es sich um eine *Bottom-Up*-Methode handelt, da das Ergebnis eine andere Außenform aufweist. Obwohl dies natürlich durchaus zu guten Ergebnissen führen kann, ist es in der Praxis, besonders im Einfamilienhausbau, der ja hier behandelt wird, oftmals von Vorteil, das Ergebnis zu nivellieren. Dies bedeutet, dass die Außenkanten auf eine gemeinsame Rasterlinie verschoben werden, so dass das Ergebnis der Rekombination „aufgeräumter“ wird. Diese Nivellierung kann auch teilweise geschehen, das heißt, dass man beispielsweise nur eine Kante verschiebt. Dieser Entwicklung kann natürlich auch schon bei der eigentlichen Raumrekombination Vorschub geleistet werden, etwa indem man solche Räume entstehen lässt, die bereits mit den vorgegebenen Rastergrößen vereinbar sind.

Es sei daran erinnert, dass es prinzipiell sinnvoll ist, bei der Optimierung ein Raster anzugeben beziehungsweise zuzulassen, da dies nicht nur in praktischer Sicht ökonomischer ist, sondern auch die Entwicklung guter Grundrisse fördert. Andererseits wird so natürlich die Suche eingeschränkt. Die Ergebnisse werden sich innerhalb eines Schemas befinden, das zwar unter ökonomischen und praktischen Gesichtspunkten gut sein kann, aber mit großer Wahrscheinlichkeit werden diese Ergebnisse nicht vom Erwarteten abweichen. Dieser Rekombinationsparameter ist also entsprechend, je nach Ziel der Optimierung, einzusetzen.

Als weitere Methode der Raumrekombination wurde die Rekombination mit kombinatorischer Organisationsrekombination erwähnt. Diese Methode stimmt in der Rekombination der einzelnen Räume miteinander überein. Der Unterschied liegt in der Behandlung der Organisationsstruktur. Während bei der eben vorgestellten Methode die Organisation eines

der Elternteile übernommen wurde, wird in diesem Falle auch die Organisation der Eltern miteinander rekombiniert. In diesem Sinne handelt es sich um die weitestgehende *Bottom-Up*-Rekombinationsmethode. Hierbei wird zunächst das Organisationsdiagramm eines Elternteiles übernommen. Nun wird analysiert, ob beim anderen Elternteil Teile des Organisationsdiagrammes besonders gut sind, das heißt, dass hier Verbindungen bestehen, die beim anderen Elternteil nicht bestehen, die aber gut bewertet wurden. Sollte dies der Fall sein, so

wird der entsprechende Raum des Organisationsdiagramms mit seinen Verbindungen dem einen Elternteil entnommen und dem anderen Elternteil „eingesetzt“.

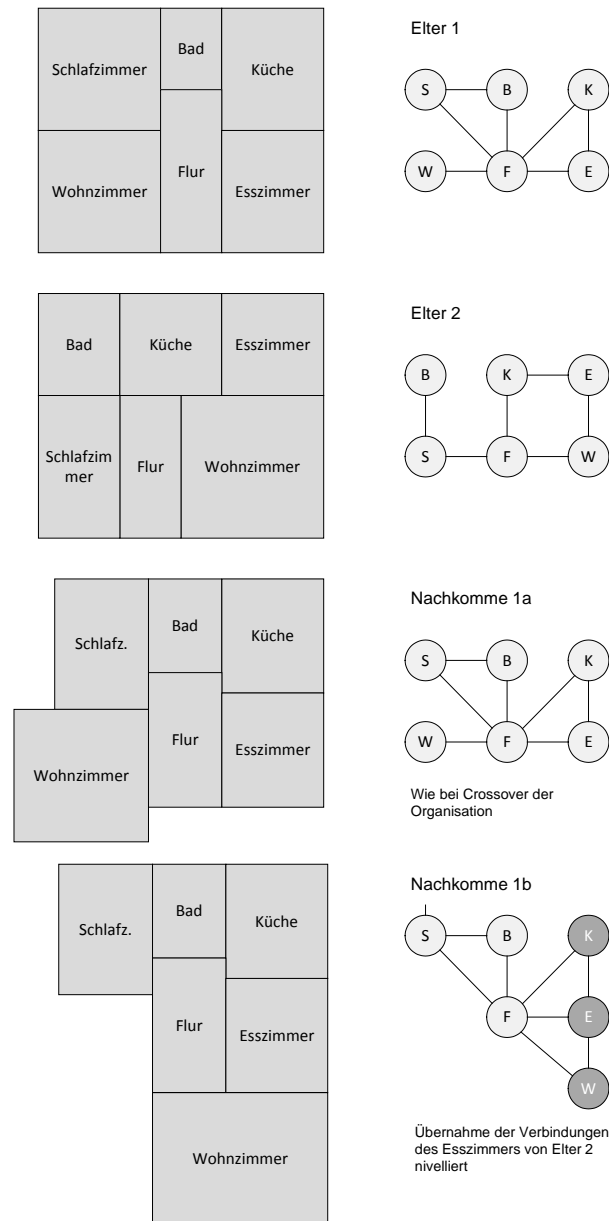


Abbildung 59: Raumrekombination mit kombinatorischer Organisationsrekombination

Abbildung 59 zeigt ein Beispiel hierfür. Zunächst wurde, wie bei Nachkomme 1a zu sehen ist, eine Rekombination wie vorher vorgenommen, die Organisationsstruktur von Elter 1 wurde übernommen. Danach wurde per Analyse festgestellt, dass der Teilabschnitt des Esszimmers von Elternteil 2 besonders gut ist, da hier eine Verbindung zu Wohnzimmer und Küche besteht, was in diesem Falle als Vorgabe dienen soll. Da bei Nachkomme 1a bereits eine Verbindung zwischen Esszimmer und Küche bestand, ist es nur nötig, eine Verbindung zum Wohnzimmer herzustellen. Dies geschieht durch Verschiebung des Wohnzimmers an eine Kante. Da auch eine Verbindung zum Flur möglich ist, wird diese ebenfalls hergestellt.

In der Abbildung ist die bereits nivellierte Version zu sehen. Dies bedeutet, dass die

Kante des Wohnzimmers auf die Außenkante des Flurs verschoben wurde. Die Vor- und Nachteile dieser Methode entsprechen den oben besprochenen Vor- und Nachteilen der analogen Methode beim Organisations-Crossover. Die Rekombination mit kombinatorischer

Organisationsrekombination ist eine relativ radikale Methode, die zu Beginn einer Optimierung sehr gut sein kann, da sie zu neuen Individuen führen kann, die den Suchraum an anderer Stelle durchsuchen. Andererseits werden durch diese Methode zahlreiche abhängige Parameter der Elternteile zerstört, was nicht unbedingt zu besseren Ergebnissen führen muss. Es ist aber natürlich auch so, dass sich die Organisationsstrukturen der einzelnen Individuen immer mehr ähneln, da ja ein Ziel vorgegeben ist. In diesem Sinne ist diese relativ aufwändige Methode zu einem späten Zeitpunkt der Optimierung zwar auch nicht mehr so radikal, bringt aber andererseits in der Regel auch nicht mehr so einen großen Fortschritt. In diesem Sinne wird die Anwendung dieser Methode vor allem zu Beginn einer Optimierung empfohlen.

Anders ist dies, wenn die Organisationsstruktur nicht in starren Formen vorgegeben ist. Da es möglich ist, gewünschte Verbindungen auch als Kann- und nicht als Muss-Verbindung zu definieren, wobei der Unterschied darin besteht, dass das Fehlen einer Kann-Verbindung nicht bestraft wird, kann durch eine weitgehende Definition der Organisation durch Kann-Verbindungen genügend Freiraum für „ungewöhnliche“ Organisationen gelassen werden. Sollte dies der Fall sein, so kann die hier beschriebene Methode auch im späten Verlauf einer Optimierung noch von hohem Nutzen sein, nicht zuletzt, da die Homogenität der Population bezüglich der Organisation mit hoher Wahrscheinlichkeit geringer ist.

Kombinatorische Außenformrekombination

Bei der kombinatorischen Außenformrekombination handelt es sich um eine *Top-Down*-Methode. Dies bedeutet, dass die Außenformen der beiden Elternteile miteinander rekombiniert werden. Von der neuen Außenform ausgehend, werden dann die Räume verteilt.

Die Außenformen können entweder additiv oder gemittelt rekombiniert werden. Bei einer additiven Rekombination handelt es sich im Prinzip um eine den Booleschen Operationen ähnliche Methode. Die beiden Außenformen werden mit größtmöglicher Überschneidungsfläche überlagert. Danach findet eine Vereinigung der beiden Flächen statt.

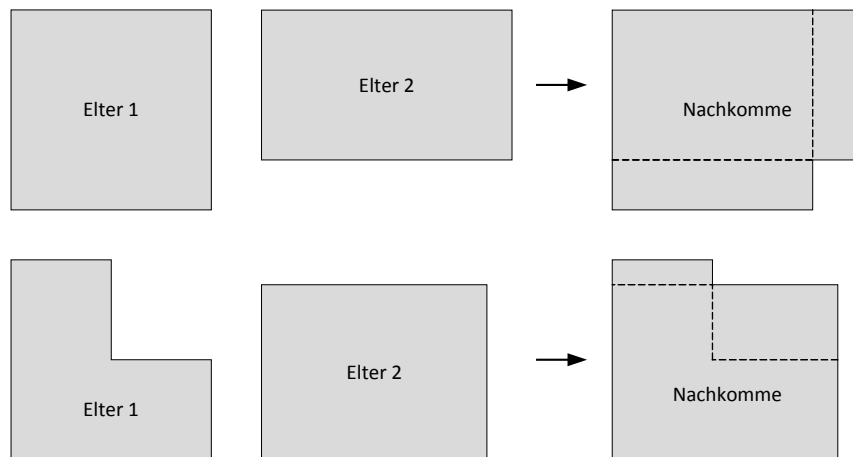


Abbildung 60: Additive Außenformrekombination

Abbildung 60 zeigt ein Beispiel für eine additive Außenformrekombination. Unter Umständen kann die neue Form, die ja größer ist als die Ausgangsformen noch skaliert werden, so dass sie in der Fläche den Eltern entspricht, oder aber es wird mit einer entsprechenden Mutationsmethode reagiert. Der Vorteil der additiven Rekombination ist die Entstehung von neuen Formen. So wird aus zwei Rechtecken immer wieder eine L-Form entstehen, aus L-Formen können komplexere Formen entstehen und so weiter. Die Varianz der Population wird so erhöht. Sollte allerdings aus den Vorgaben heraus eine bestimmte Außenform gefordert werden, so sollte diese Methode nicht angewendet werden, da sie in der Regel die Außenform verändert.

Anders verhält sich dies für die gemittelte Außenformrekombination. Die gemittelte Außenformrekombination ist nur für die Rekombination von zwei Individuen mit einer gleichen Kantenzahl der Außenform ratsam. Bei dieser Methode werden die beiden Elternteile ebenfalls in größtmögliche Übereinstimmung gebracht. Anschließend wird aber nicht eine Vereinigung der Flächen vorgenommen, sondern es wird für die jeweils am engsten beieinander liegenden Eckpunkte ein neuer Punkt auf der Verbindungslinie der beiden Punkte gesucht. Um beispielsweise bei zwei Rechtecken auch als Nachkommen ein Rechteck zu erhalten, sollte der Faktor für alle Eckpunkte konstant gewählt werden.

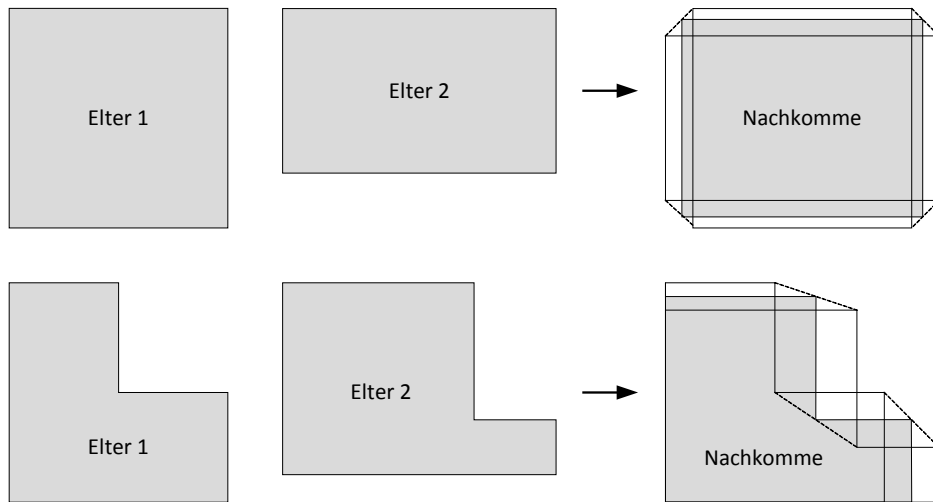


Abbildung 61: Gemittelte Außenformrekombination

Diese Methode ist besonders für die Rekombination in Fällen geeignet, in denen zwar eine Außenform vorgegeben ist, diese jedoch in den Ausmaßen und Proportionen nicht genau definiert ist. Durch diese Rekombination wird die Varianz der Außenformen in einem vorgegebenen Rahmen gewährleistet. Um diese Methode umzusetzen, müssen natürlich verschiedene Methoden vorausgesetzt werden, wie etwa die Möglichkeit der Überlagerung der Geometrien, sowie die Ausrichtung auf einer Basislinie. Hierauf soll jedoch nicht detailliert eingegangen werden, da diese Möglichkeiten als gegeben angesehen werden. Es sei auch noch darauf hingewiesen, dass es noch zahlreiche weitere Möglichkeiten gibt, zwei Geometrien miteinander zu rekombinieren und diese Rekombination keineswegs auf rechteckige Geometrien oder gerade Kanten beschränkt ist. Die entsprechenden Methoden sind analog anzuwenden, so können etwa bei der Rekombination von bogenförmigen Kanten der Radius und die Basispunkte gemittelt werden. Da hier aber in erster Linie das Prinzip der Anwendung von Rekombination im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung erläutert werden soll, ist eine detaillierte Auflistung aller möglichen Methoden nicht möglich oder nötig.

Nachdem nun die Außenformen der beiden Elternteile miteinander rekombiniert wurden, ist der nächste Schritt das Einfügen der Räume in den Nachkommen. Hierbei kann entweder ein Crossover gewählt werden, was bedeutet, dass die Räume eines Elternteiles übernommen werden, oder aber es kann zunächst ein Raum-Organisations-Crossover durchgeführt werden. In beiden Fällen ergibt die Addition der Räume die Außenform eines der Elternteile. Um diese alte Außenform nun in die neue Außenform des Nachkommens zu projizieren, wird

vorgeschlagen, die einzelnen Räume in gleicher Weise zu skalieren, wie dies bei der Außenform geschehen ist. Nun können die Räume in die neue Außenform übernommen werden. Im Falle der additiven Außenformrekombination ist die neue Außenform in jedem Falle mindestens so groß wie die Ausgangsform, so dass der überschüssige Raum an die benachbarten Räume fallen kann. Eine etwaige Skalierung sollte in diesem Falle erst erfolgen, wenn die Räume eingefügt wurden. Wie man leicht feststellen kann, sind die Methoden der Außenformrekombination somit nicht nur auf die Rekombination von Außenformen beschränkt, da auch die Räume verändert werden. Die Anpassung der Räume an die neue Außenform ist aber weniger als Raumrekombination zu sehen – dafür sind die oben beschriebenen Methoden geeignet – sondern vielmehr als Mutation, da die Räume durch die Anpassung nicht mit den Räumen des anderen Elternteiles vermischt werden, sie werden vielmehr zufällig verändert.

Kombinatorische Gesamtrekombination

Die bisher vorgestellten Methoden geben dem Nutzer der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware bereits ein breites Spektrum an Methoden an die Hand, die befähigt sind, eine Rekombination im Sinne einer Mischung von guten Ansätzen und somit eines Weiterkommens der Optimierung zu leisten. Es soll aber schließlich die Möglichkeit der kombinatorischen Gesamtrekombination nicht unerwähnt bleiben. Hierbei handelt es sich um eine Möglichkeit, mit einer einzigen Operation sowohl die Geometrie der Räume, als auch die Verbindungen zu rekombinieren. Obwohl diese Methode mit Umwegen auch für zwei sehr unterschiedliche Individuen als Elternteile anwendbar ist, ist die Anwendung für Elternteile mit gleicher Kanten- beziehungsweise Eckpunktzahl sinnvoller, weshalb hier auch auf diese Methode eingegangen werden soll.

Grundlage dieser Methode ist es, das Haus neu aufzubauen, beginnend bei der Erschließung. Danach werden Elemente der Eltern, so möglich, übernommen. Das Ergebnis ist ein neues Gebäude, das sich sehr von seinen Eltern unterscheiden kann, aber trotzdem Merkmale dieser aufweist. Da diese Methode die aufwändigste ist, soll sie Schritt für Schritt erklärt werden.

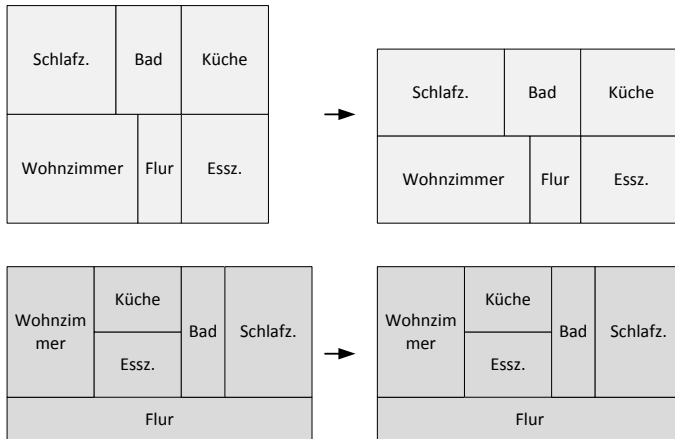


Abbildung 62: Anpassung der Größen

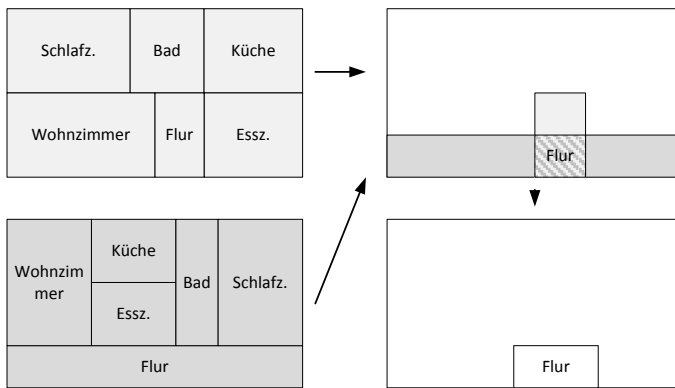


Abbildung 63: Rekombination der Erschließung

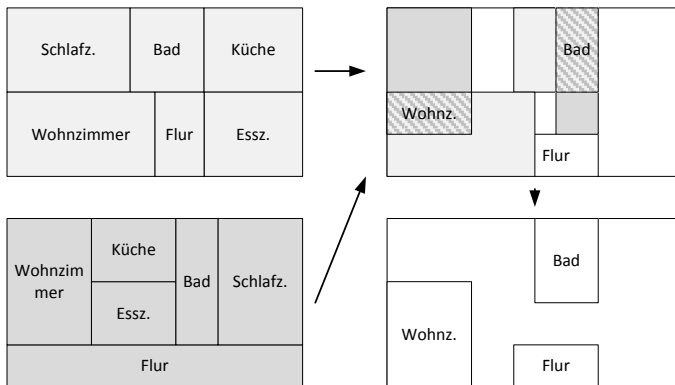


Abbildung 64: Erstellung der neuen Räume aus überlappenden Ausgangsräumen

Im in Abbildung 62 zu sehenden ersten Schritt wird eines der Elternteile dem anderen Elternteil angepasst. Dies bedeutet, dass die entsprechende Außenform so skaliert wird, dass sie mit der anderen Außenform übereinstimmt. Die Räume werden dann entsprechend ebenfalls skaliert. Als Ergebnis erhält man zwei Elternteile, die zueinander deckungsgleich sind. In der nächsten Abbildung ist der zweite Schritt zu sehen. Die Erschließungen, in diesem Falle also der Flur, werden zueinander in Deckung gebracht. Sollte eine Schnittmenge entstehen, so wird diese als neuer Flur genommen. Sollte dies nicht der Fall sein, so wird einer der beiden Flure übernommen. Gegebenenfalls kann der Flur auch vergrößert werden, falls er zu klein sein sollte. Auch kann an dieser Stelle eine Ausrichtung auf ein eventuelles Raster erfolgen. In Abbildung 64 ist der nächste Schritt zu sehen. Hier werden zunächst diejenigen Räume, die sich in beiden Elternteilen überschneiden, übereinander gelegt. Zunächst entsteht der neue Raum aus der Schnittfläche der beiden Räume. Anschließend kann, wie in diesem Beispiel, noch eine Vergrößerung der Räume und eine Anpassung auf ein eventuelles Raster erfolgen.

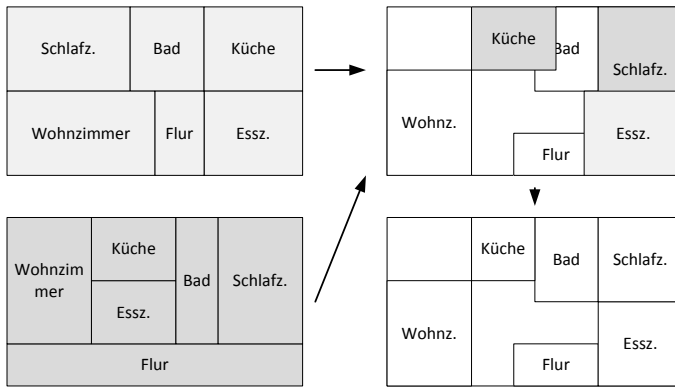


Abbildung 65: abwechselndes Übernehmen von Räumen der beiden Elternteile

In Abbildung 65 ist der vorletzte Schritt der kombinatorischen Gesamtkombination zu sehen. Jeweils abwechselnd werden von den beiden Elternteilen Räume übernommen, soweit im Nachkommen freier Raum ist, um diese dort einzusetzen. Im letzten Schritt wird dann der nun ungültige

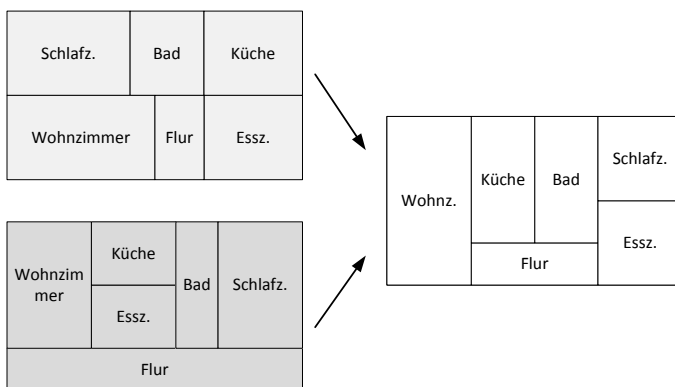


Abbildung 66: Validierung des Nachkommens durch Vergrößerung der Räume

Entwurf des Nachkommen (es gibt leere Flächen) wieder gültig gemacht, indem der leere Raum durch Nachbarräume besetzt wird. Da die Zielgrößen der einzelnen Räume bekannt sind, kann hier gezielt vergrößert werden. Man sieht am Ergebnis, dass es sich um eine echte Mischung der beiden Elternteile handelt. Während der Flur,

das Bad und das Wohnzimmer Ähnlichkeit mit beiden Entwürfen hat, da sich diese Räume überlappten, entspricht das Esszimmer eher Elternteil 1. Küche und Schlafzimmer ähneln eher der Konfiguration von Elternteil 2.

Auch wenn man sich die Organisationsdiagramme der Eltern, sowie des Nachkommen in Abbildung 67 anschaut, wird man Elemente beider Elternteile wiedererkennen. So ist etwa die Verbindung Flur – Bad – Schlafzimmer eindeutig Elter 1 zuzuordnen (unabhängig von der Frage, ob das gut ist). Die Verbindung zwischen Küche und Wohnzimmer ist Elter 2 zuzuordnen, während gemeinsame Elemente, wie die Verbindung zwischen Wohnzimmer, Flur und Esszimmer auch im Nachkommen vorhanden sind.

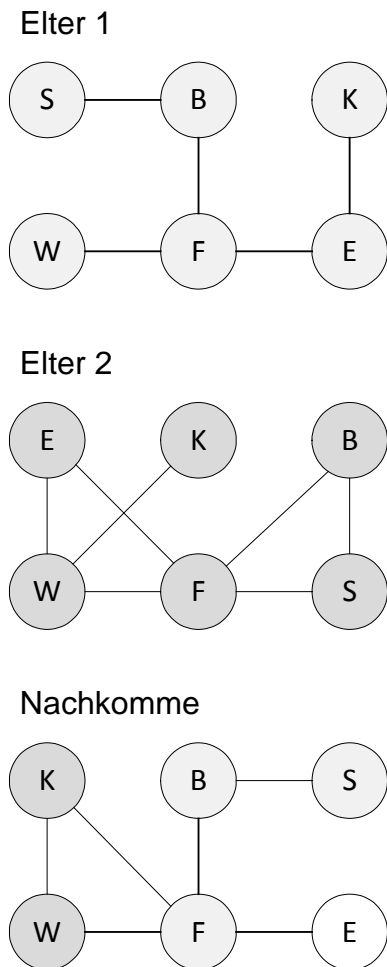


Abbildung 67: Organisationsdiagramme bei der kombinatorischen Gesamtrekombination

Das Beispiel wurde absichtlich so gewählt, dass es zu massiven Änderungen kommt. In der Praxis macht die Anwendung dieser Rekombinationsmethode zwar im Prinzip in jeder Phase Sinn, jedoch führt sie in der frühen Phase eher zu einer Erhöhung der Varianz und nicht unbedingt zu Verbesserungen. Es werden jedoch der Suchraum erweitert und Varianten geschaffen, die unter Umständen durch weitere Rekombination oder schon durch Mutation zu sehr guten Ergebnissen führen können. Auch in der späten Phase der Optimierung macht der Einsatz Sinn. Da sich die einzelnen Individuen in der späten Phase ähnlicher sind als in der frühen Phase, ist es hier auch wahrscheinlicher, dass gemeinsame Eigenschaften beziehungsweise überlappende Flächen existieren. Dies liegt darin begründet, dass schon eine gewisse Optimierung stattgefunden hat. Dies bedeutet unter anderem, dass mit höherer Wahrscheinlichkeit die Anordnung der Räume ähnlich ist, da Faktoren wie Ausrichtung der Räume oder Raumgröße bereits stärker wirken konnten. Für die Rekombination bedeutet dies zum Beispiel, dass ein Wohnzimmer, das an der Südseite sein soll, mit höherer Wahrscheinlichkeit bei

beiden Eltern an der Südseite zu finden sein wird und dass beide Räume auch ähnlich groß sind. Für die Rekombination heißt dies, dass der Nachkomme das Wohnzimmer ebenfalls mit hoher Wahrscheinlichkeit an der Südseite hat. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass gute Eigenschaften, die in beiden Elternteilen vorhanden sind, auch auf die Nachkommen übertragen werden, während noch nicht so gute Eigenschaften mit hoher Wahrscheinlichkeit modifiziert werden und damit die Chance auf eine Verbesserung erhalten.

Rekombination bei Bauteilen

Nachdem nun einige Methoden der Rekombination auf dem Chromosom der Geometrie erläutert wurden, sollen die Möglichkeiten der Rekombination auf dem zweiten Metachromosom, dem der Bauteile vorgestellt werden. Wie bereits festgestellt wurde, sind die Bauteile direkt abhängig von den Geometrien. Wurde also durch eine Rekombination oder Mutation eine Kante eines Raumes geändert, so hat sich auch die entsprechende Wand geän-

dert, da diese direkt von den Punkten der Geometrie abhängt. Insofern findet auch keine geometrische Rekombination von Bauteilen statt, da diese Rekombination bereits bei der Geometrie durchgeführt wurde. Es findet aber sehr wohl eine Rekombination der Bauteileigenschaften statt, die nicht von der Geometrie abhängen. Dies sind alle Eigenschaften, die durch eine Referenz auf einen entsprechenden Bauteilstil in der Datenbank gespeichert werden, also Eigenschaften wie U-Wert, Kosten oder Oberflächenbeschaffenheit.

Es wurde ebenfalls bereits angesprochen, dass eine Rekombination nach Möglichkeit eine Mischung der Eigenschaften beider Elternteile ist. Eine Ausnahme bildet das Crossover, da es sich hierbei um die Übernahme der Eigenschaften eines einzelnen Elternteiles handelt. Insofern ist das Crossover natürlich auch die erste und einfachste Methode der Bauteilrekombination. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten: Zum einen gibt es die Möglichkeit des einzelnen Bauteil-Crossovers, zum anderen die Möglichkeit des Bauteilgruppen-Crossovers und schließlich auch noch die Möglichkeit des kompletten Crossovers.

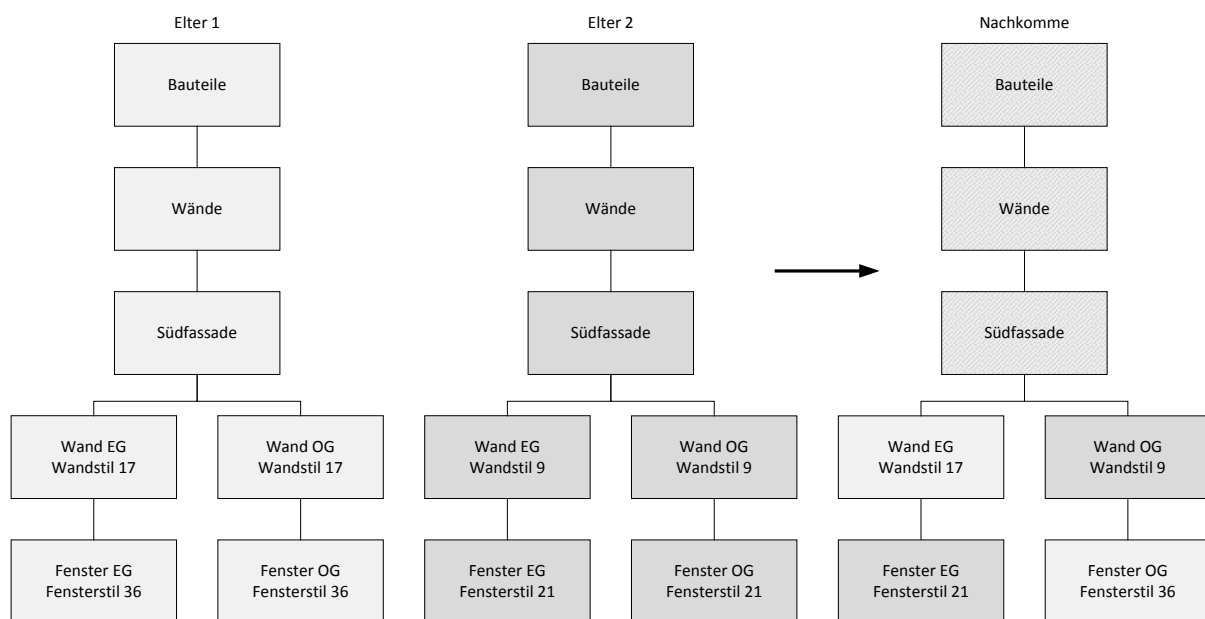


Abbildung 68: Einzelne Bauteilrekombination

Beim einzelnen Bauteil-Crossover wird für jedes einzelne verplante Bauteil entschieden, ob das Bauteil von Elternteil 1 oder von Elternteil 2 verwendet werden soll. Diese Methode führt natürlich zu einer höheren Varianz der Population, andererseits führt es aber auch zu „wildem“ Entwürfen, die inhomogen erscheinen können. Der Einsatz dieser Methode hängt insofern also vom Optimierungsziel ab, ohne dies an dieser Stelle bewerten zu wollen.

In Abbildung 68 ist ein Beispiel einer solchen Bauteilrekombination zu sehen. Es wurde für dieses Beispiel eine Südfassade eines zweigeschossigen Gebäudes gewählt. Es sind als Bauteile jeweils eine Wand im Erdgeschoss und im Obergeschoss mit den dazugehörigen Fenstern vorhanden. Die Wand- und Fensterstile eines Elternteiles sind jeweils gleich, das Gebäude hat ein homogenes Erscheinungsbild. Bei der einzelnen Bauteilrekombination wird beim Nachkommen nun für jedes der vier beispielhaften Bauteile entschieden, ob der Bauteilstil von Elternteil 1 oder 2 übernommen wird. Dies muss natürlich nicht, wie im obigen Beispiel, dazu führen, dass jeweils eine Wand und ein Fenster von einem anderen Elternteil übernommen wird, es kann jedoch dazu führen. Das Erscheinungsbild ist nun natürlich nicht mehr so homogen, was je nach Optimierungsziel gut oder schlecht sein kann.

Die nächste Möglichkeit des Crossovers besteht in der Möglichkeit des Bauteilgruppen-Crossovers. Hierbei werden, wie der Name schon sagt, Bauteilgruppen gebildet.

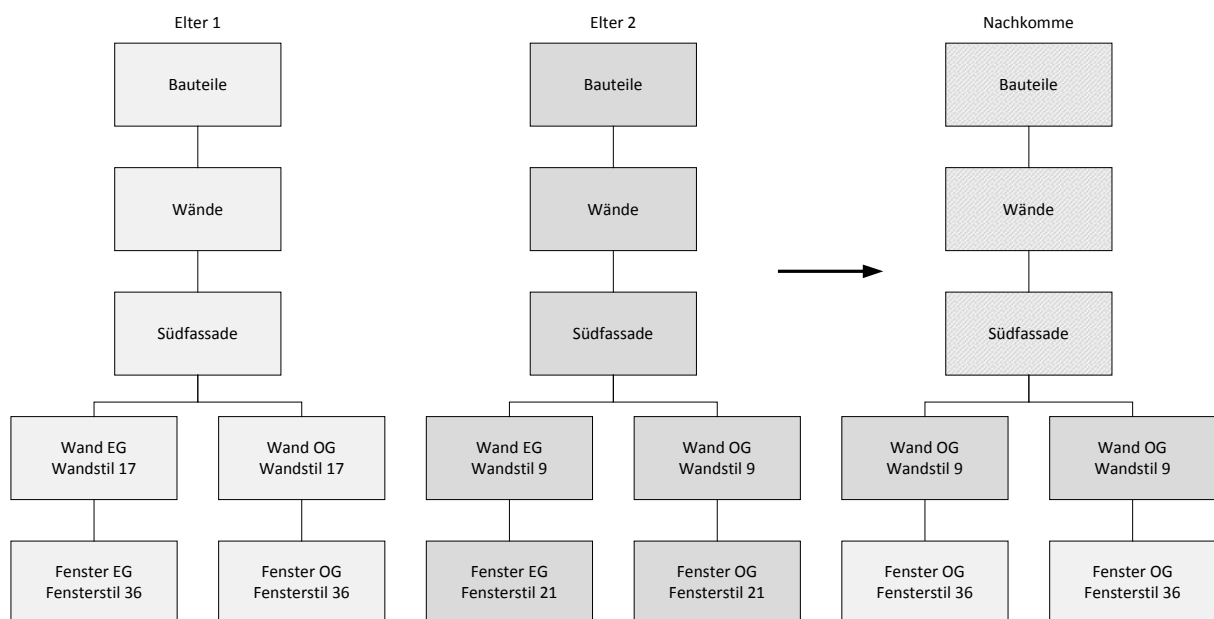


Abbildung 69: Bauteilgruppen-Crossover

Die Festlegung der Bauteilgruppen kann dabei frei oder nach einem vorher definierten Muster erfolgen. Im Beispiel in Abbildung 69 kann eine solche Bauteilgruppe beispielsweise alle Wände einer Fassade sowie alle Fenster einer Fassade umfassen. Genauso ist es aber möglich, die komplette Südfassade zu einer Bauteilgruppe zusammenzufassen, oder aber nur die Wand und das Fenster im Erdgeschoss. Entsprechend wird für jede Bauteilgruppe entschieden, die Bauteile welchen Elternteiles übernommen werden sollen. Mit der Definition von Bauteilgruppen steht dem Nutzer der Software insofern also ein Werkzeug zur direkten Be-

einflussung des Erscheinungsbildes zur Verfügung, sofern er dies möchte. Er kann durch die Definition bestimmter Bauteilgruppen für ein homogenes Aussehen des Gebäudes sorgen beziehungsweise wahrscheinlicher machen.

Als letzte hier beschriebene Möglichkeit des Crossovers bei Bauteilen steht schließlich noch das komplette Crossover zur Verfügung.

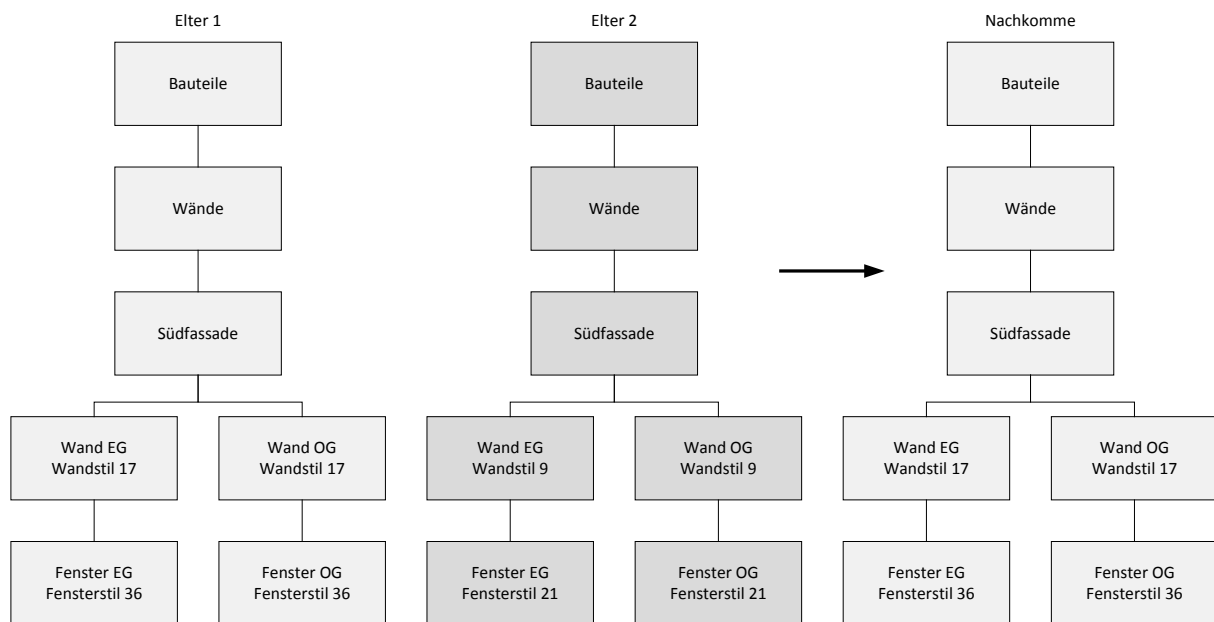


Abbildung 70: Komplettes Bauteil-Crossover

Wie der Name schon sagt und Abbildung 70 zeigt, wird beim kompletten Crossover für alle Bauteile des Nachkommen der Bauteilstil des entsprechenden Bauteils eines Elternteils verwendet. Die Auswahl des dominierenden Elternteils kann dabei zufällig oder gerichtet, je nach Fitness, erfolgen. Es wird jedoch empfohlen auch bei einer gerichteten Auswahl des Elternteils eine Zufallskomponente zu berücksichtigen, da auf diese Weise eine Vermeidung lokaler Minima erfolgen kann.

Eine Alternative zum Crossover ist die Verwendung einer erweiterten Bauteil-Linienrekombination. Hierbei handelt es sich um eine Adaption der bereits früher vorgestellten erweiterten Linienrekombination, das heißt, dass der Nachkomme für ein Bauteil einen Bauteilstil zugewiesen bekommt, der zwischen den Werten der Eltern oder knapp darüber liegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass das neue Bauteil in der Nähe des „guten“ Elternteils liegt, ist dabei höher (siehe auch Abbildung 54). Da ein Bauteil jedoch keine Variable im Sinne einer Ganz- oder Gleitkommazahl ist, stellt sich natürlich die Frage, wie ein Bauteilstil ge-

funden werden kann, der „zwischen“ dem der Elternteile liegt. Hierbei kommen wieder die Vorteile der integrierten Material- und Bauteilbibliothek als Datenbank zum Tragen. Wie bereits ausgeführt, sind in der Datenbank die einzelnen Eigenschaften eines Bauteilstiles gespeichert, beispielsweise der U-Wert. Nehmen wir nun an, dass eine Wand eines Elternteiles einen U-Wert von 0,35 hat, während die Wand des anderen Elternteiles einen U-Wert von 0,5 hat. Mittels einer einfachen Datenbankabfrage lassen sich nun alle Bauteilstile auswählen, deren U-Wert zwischen 0,35 und 0,5 liegt. Die Ausgabe lässt sich dabei auch automatisch sortieren, so dass die geforderte erweiterte Linienrekombination im Bereich der so entstandenen sortierten Liste durchgeführt werden kann.

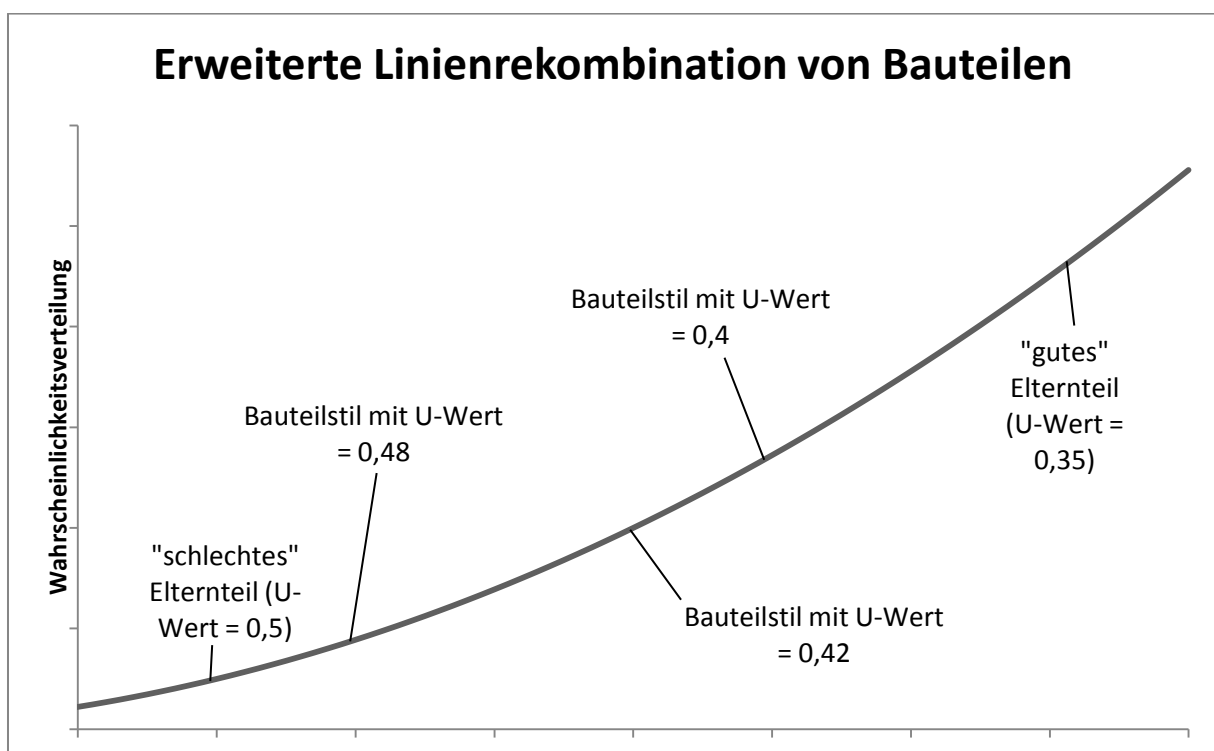


Abbildung 71: Erweiterte Linienrekombination von Bauteilen

Diese Rekombination kann natürlich für beliebige Parameter durchgeführt werden, so etwa für Kosten oder Maße. Auch die Berücksichtigung von Farben ist kein Problem. Der Farbwert eines Materials kann mittels RGB-Werten gespeichert werden. Der R-, G- und B-Wert gibt dabei den Rot-, Grün und Blauanteil einer Farbe an. Ein Speicherverfahren, das auch im Computer üblich ist. Durch die Angabe der einzelnen Anteile lässt sich somit auch problemlos eine entsprechende Datenbankabfrage realisieren, die Farbwerte in einem bestimmten Bereich abfragt. Auch eine Abfrage über mehrere Werte ist mittels einer Gewichtung der einzelnen Faktoren möglich. Die Sinnhaftigkeit des Einsatzes einer Linienrekombination für

Bauteile steigt natürlich mit dem Umfang der Datenbank. Der Einsatz dieser Methode ist aber jedenfalls möglich, da eine Abfrage mit kleinem Datensatz einem Crossover entspricht. Sollte die oben beschriebene Abfrage nämlich nur die Ursprungswerte zurückliefern, da keine Bauteile gespeichert sind, die zwischen den geforderten Werten liegen, so wird automatisch einer der beiden Ausgangsstile gewählt werden.

Abschließend sollte noch darauf hingewiesen werden, dass die obigen Erwägungen bezüglich einer Rekombination bezogen auf ein einzelnes Bauteil, auf eine Bauteilgruppe oder auf das ganze Gebäude hier natürlich analog anwendbar sind, da die Heterogenität des Entwurfes natürlich auch hier durch eine Rekombination auf Bauteilebene ansteigt.

4.4.3 Verarbeitung bei der Mutation

Nachdem die wichtigsten Methoden der Rekombination geklärt wurden, soll nun auf die Möglichkeiten bei der Mutation eingegangen werden. Die Mutation ist einer der wichtigsten Schritte im Verlaufe eines evolutionären Algorithmus, besonders im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung. Eine Mutation ist eine zufällige Änderung des Erbguts, die natürlich auch in der Natur vorkommt (siehe [Hic08], S. 136). Im Rahmen der Optimierung ist die Mutation nicht zuletzt ein Mittel zum Entkommen aus lokalen Minima. Dies bedeutet, dass ein Individuum, das in einem lokalen Minimum „gefangen“ ist, durch eine zufällige Mutation aus diesem entkommen kann. Wie sich gezeigt hat, ist die Mutation bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung besonders wichtig, da die Methoden der Mutation gut geeignet sind, kleine, aber entscheidende Änderungen vorzunehmen, ohne andere, bereits gute Eigenschaften eines Individuums zu zerstören, wie es bei der Rekombination, je nach Methode, häufiger der Fall sein kann.

Beim Einsatz einer Mutation in der Optimierung gilt es abzuwägen, inwiefern die Mutation völlig zufällig geschehen sollte, beziehungsweise ob sie gerichtet erfolgen sollte. Eine gerichtete Mutation bedeutet beispielsweise, dass, wenn man zwei nebeneinander liegende Räume hat, wovon einer zu klein und einer zu groß ist, den zu großen Raum auf Kosten des zu kleinen Raumes vergrößert. Dies ist eine naheliegende Maßnahme, da sie mit Sicherheit die Fitness des Individuums bezogen auf die Größe der beiden Räume erhöht. Bei der Komplexität der Zusammenhänge mit anderen Kategorien kann jedoch keine garantierte Aussage über die gesamte Fitnessverbesserung getroffen werden. Im Falle einer völlig zufälligen Mutation ist die Wahrscheinlichkeit der Vermeidung lokaler Minima größer und auch die Va-

rianz der Population wird stärker erhöht. Andererseits ist natürlich nicht gewährleistet, dass sich die Fitness des Individuums auch nur in einem einzigen Punkt erhöht. Insgesamt ist daher festzustellen, dass beide Mutationsarten zum Einsatz gelangen sollten. Dabei ist insgesamt ein bevorzugter Einsatz einer gerichteten Mutation zielführend. Allerdings sollte in regelmäßigen Abständen eine völlig zufällige Mutation ausgewählt werden, um lokale Minima vermeiden zu können und die Varianz der Population zu erhalten oder zu erhöhen.

Wie schon bei den Methoden der Rekombination werden die Methoden der Mutation nur auf die Parameter der Metachromosomen Geometrie und Bauteile direkt angewendet. Da die Parameter der anderen Kategorien von diesen Parametern abhängen, werden mit einer Änderung eines Parameters auf einem Metachromosom auch Parameter auf anderen Chromosomen geändert. Es sei nochmals kurz darauf hingewiesen, dass die konkreten Informationen zum Zustand des Gebäudes nur auf den Metachromosomen liegen. Alle anderen Parameter sind Interpretationen der Parameter der Metachromosomen. In diesem Sinne sollen hier mögliche Mutationsoperatoren für Geometrien und für Bauteile gezeigt werden.

Die Mutationsparameter der Geometrie entsprechen im Prinzip den einfachen geometrischen Funktionen der Verschiebung eines oder mehrerer Punkte, der Drehung, der Verschiebung oder Skalierung einer ganzen Geometrie sowie des Löschens oder Hinzufügens von Punkten. Dies sind einfache geometrische Operationen, die nicht im Detail erklärt werden müssen. Allerdings ist natürlich der Kontext der Operationen zu beachten. So ist beispielsweise das Verschieben oder Drehen der kompletten Außenform inklusive aller darin befindlichen Geometrien im Rahmen des Baufensters ohne weiteres möglich. Das Verschieben oder Drehen eines einzelnen Raumes ist im Kontext der Forderung nach Gültigkeit der Entwürfe nicht ohne weiteres möglich. Hier muss beachtet werden, dass eventuelle Nachbarräume eventuell auch geändert werden müssen, so dass die Gültigkeit des Entwurfs erhalten bleibt.

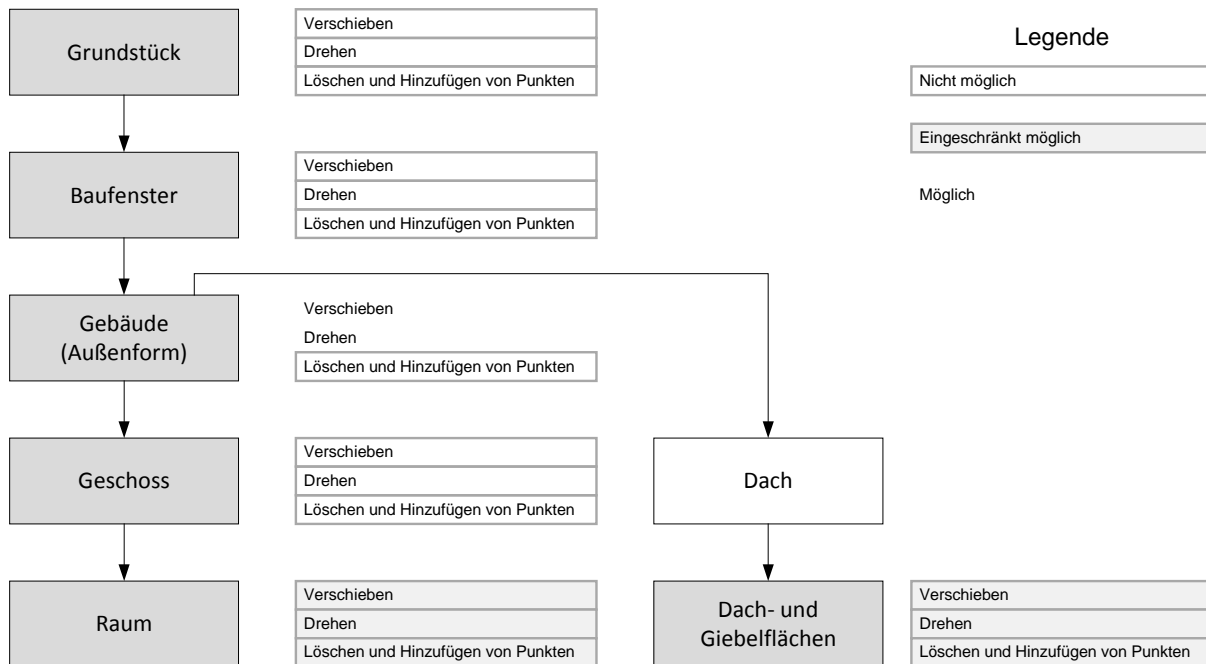
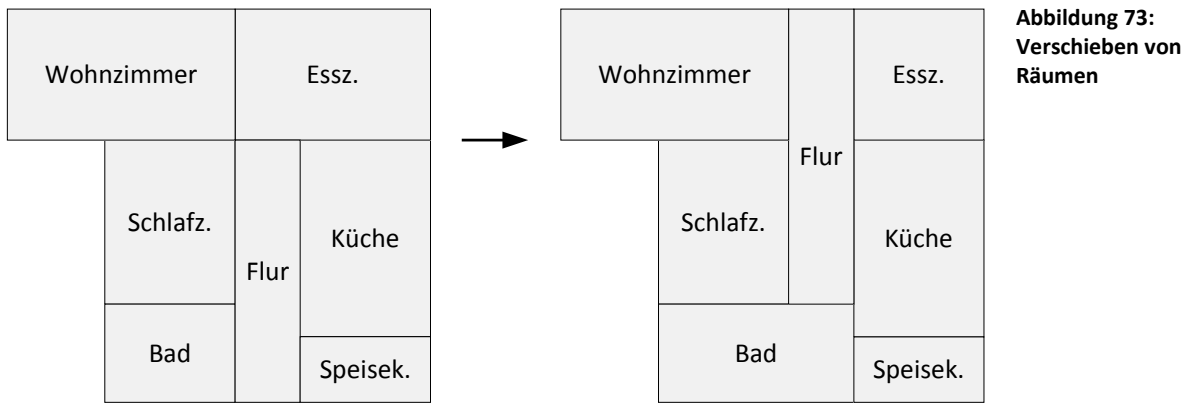


Abbildung 72: Möglichkeiten der geometrischen Mutation

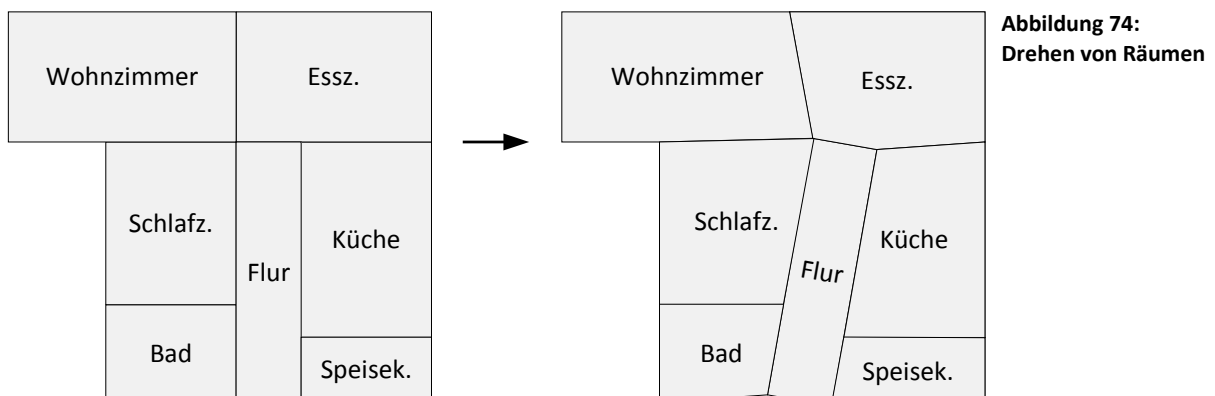
In Abbildung 72 ist eine Zusammenfassung der Möglichkeiten der einfachen geometrischen Mutation zu sehen. Das Grundstück wird als gegeben definiert. Eine geometrische Veränderung ist somit nicht möglich. Gleiches gilt für das Baufenster, das zwar berechnet werden kann und nicht vom Bauherrn angegeben werden muss, trotzdem ist es als fest definiert zu betrachten. Das Gebäude als Definition der Außenform hingegen kann im Rahmen des Baufensters frei verschoben und gedreht werden. Das Löschen oder Hinzufügen von Punkten ist nicht direkt möglich, da die Außenform aus der Summe der Räume entsteht. Gleiches gilt für das einzelne Geschoss, das als Container für Räume fungiert und keine eigene Geometrie besitzt. Am schwierigsten wird es für Räume und Dach- beziehungsweise Giebelflächen. Hier sind zwar alle einfachen Operatoren möglich, jedoch ist hier auf die Einhaltung der Gültigkeit des Entwurfs zu achten. Beispielhaft sollen daher vor allem die Operationen für den Raum betrachtet werden, da diese am schwierigsten durchzuführen sind.

Bei allen einfachen geometrischen Operationen ist auf die Konsistenz des Entwurfes zu achten, dies bedeutet für den Raum vor allem, dass keine leeren Flächen entstehen dürfen. Wirkliche „leere Flächen“, wie etwa Lufträume werden ebenfalls als Raum definiert.



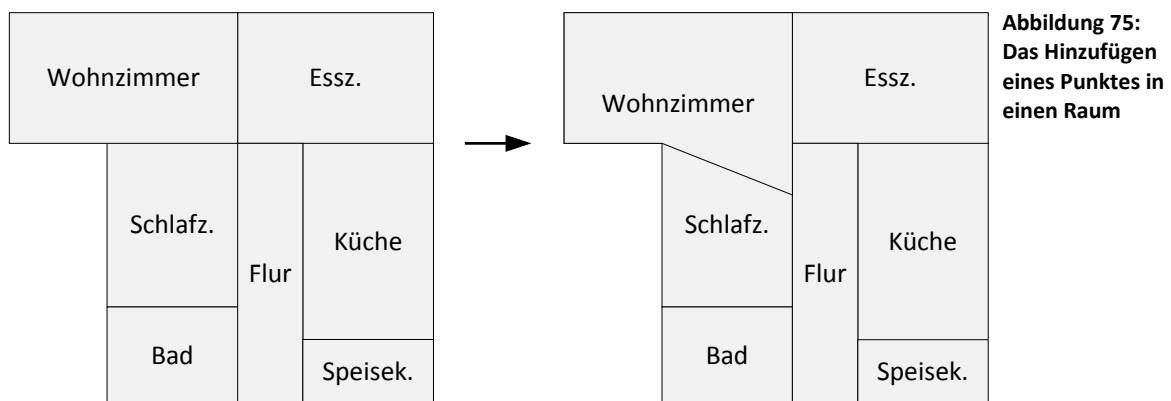
Beim Verschieben eines Raumes wie in Abbildung 73 muss daher der leere Raum gefüllt werden. Im Beispiel wurde der Flur nach oben verschoben. Zum Einen muss natürlich die Fläche, die der Raum nun einnimmt von dem Raum abgezogen werden, der vorher diese Fläche besetzte, hier das Esszimmer, zum Anderen muss die nun vakante Fläche gefüllt werden. Sollte dies möglich sein, so bietet es sich natürlich an, die Fläche mit dem nun verkleinerten Raum zu füllen. Hat dieser jedoch keine gemeinsame Kante mit der leeren Fläche, so müssen ein oder mehrere Räume, die eine gemeinsame Kante besitzen, dies tun. Im Beispiel wurden der Flur und das Bad vergrößert. Insofern ist also zu sehen, dass das Verschieben von Räumen implizit auch eine Mutation von Raumgrößen sein kann. Dass zusätzlich auch Parameter anderer Kategorien, wie etwa Ausrichtung oder Energiebilanz geändert werden können, ist natürlich ebenfalls klar.

Das Drehen von Räumen ist natürlich im „klassischen“ Einfamilienhausbau nicht gerade die gängigste Option (obwohl bei vielen Fertighäusern durchaus um 45° gedrehte Flure zum Einsatz kommen). Trotzdem handelt es sich um eine allgemeine Operation, die natürlich ohne weiteres möglich ist.



Wie in Abbildung 74 zu sehen ist, müssen dabei natürlich alle Punkte, die der Flur mit den anderen Räumen gemeinsam hatte, mitgedreht werden. Dies führt zwar dazu, dass alle Räume von dieser Drehung beeinflusst werden, aber so wird eine Einhaltung der Gültigkeit des Entwurfes gewährleistet. Natürlich sind auch Strategien denkbar, bei denen nicht der ganze Raum, sondern nur eine Kante gedreht wird, aber das Prinzip ist das gleiche.

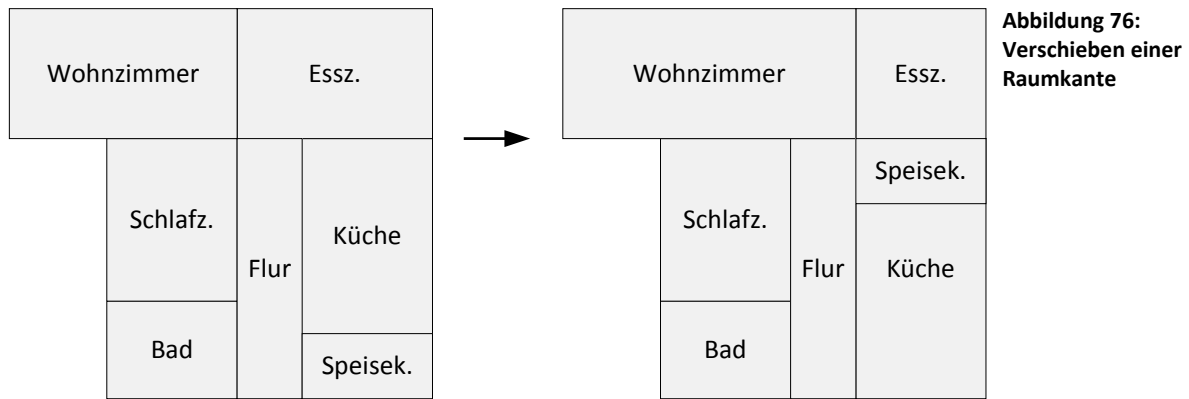
Auch beim Hinzufügen oder Löschen von Punkten müssen diese Punkte auf allen Vektoren von anderen Räumen, die mit dem Ausgangsvektor übereinstimmen ebenfalls eingefügt oder gelöscht werden.



Das Hinzufügen oder Löschen eines Raumpunktes geht natürlich auch immer mit einer Vergrößerung oder Verkleinerung des Raumes einher. So muss dann natürlich auch die zusätzliche Fläche beim darunterliegenden Raum abgezogen werden, beziehungsweise es muss die entstehende leere Fläche analog zum vorherigen Vorgehen aufgefüllt werden.

Zusätzlich zu diesen geometrischen Mutationen ist natürlich auch das Austauschen von Räumen möglich. Hierbei werden einfach die Eigenschaften eines Raumes mit denen eines anderen Raumes getauscht, ohne die Geometrie ebenfalls zu tauschen. Dies kann eine sehr gute Mutation in Bezug auf die Einhaltung von notwendigen Verbindungen sein, da das Organisationsdiagramm auf diese Art stark modifiziert werden kann.

Die mit Sicherheit am häufigsten angewandte Mutation ist das Verschieben einer Kante eines Raumes, was natürlich implizit das Verschieben einer Wand bedeutet, da die Wand mit der Geometrie verknüpft ist. Beim Verschieben einer Wand muss beachtet werden, dass dabei keine Räume verschwinden dürfen.



Wie in Abbildung 76 zu sehen ist, ist das Verschieben der Kante zwischen Wohn- und Esszimmer problemlos möglich. Das Verschieben der Wand der Küche nach unten führt jedoch dazu, dass die Speisekammer verschwinden würde. Dieser Fall muss entweder von vornherein ausgeschlossen werden, das heißt es muss vor dem Verschieben ein Test durchgeführt werden, ob diese Verschiebung möglich ist, oder aber es muss, wie im obigen Beispiel, die Speisekammer an anderer Stelle, vorzugsweise der Küche, wiedereingefügt werden, um die Beibehaltung dieses Raumes zu gewährleisten. Wie am Beispiel sehr gut zu sehen ist, kann mit dem Mutationsoperator der Kantenverschiebung sehr viel geändert werden. So wurden im Beispiel nicht nur implizit die entsprechenden Wände verschoben, sondern es wurden auch Raumgrößen und Verbindungen verändert, also das Organisationsdiagramm modifiziert. Dies bedeutet, dass die Verschiebung einer einzelnen Kante sehr große Veränderungen mit sich bringen kann. Zusammen mit der Möglichkeit, Räume zu tauschen, hat man somit ein recht einfaches aber sehr mächtiges Werkzeug zur Modifikation von Entwürfen zur Hand, das auch in sehr hohem Maße mit der Arbeit eines Architekten übereinstimmt. Auch hier ist es im Entwurfsalltag eine gängige „Operation“, eine Wand zu verschieben, oder Räume zu vertauschen, um bestimmte Aspekte zu verbessern.

Schließlich soll noch auf die Mutation bei Bauteilen hingewiesen werden. Wie bereits erklärt, können die geometrischen Aspekte der meisten Bauteile nur implizit durch eine Änderung der Geometrie des entsprechenden Raumes geändert werden. Allerdings kann natürlich sehr wohl zum Beispiel die Position eines Fensters im Raum geändert werden. Gleiches gilt für die Position einer Tür in einer Wand oder in analogen Fällen. Eine der wichtigsten Mutationen bezogen auf die Bauteile ist jedoch unzweifelhaft die Veränderung des Bauteilstils. Analog zu der Rekombination von Bauteilstilen, die bereits beschrieben wurde, kann auch der Bauteil-

stil eines Bauteiles mutieren. Auch hier wird diese Tatsache durch die Vorteile, die die Bauteildatenbank liefert, unterstützt. Da eine Mutationsschrittweite nicht unbegrenzt sein sollte, können, wie oben, mittels einer einfachen Datenbankabfrage „benachbarte“ Bauteilstile bezogen auf einzelne oder alle Parameter zu den aktuell verwendeten selektiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, die Schrittweite einer Mutation bei Bauteilstilen zu definieren und anzuwenden. Ebenfalls analog zu den Erwägungen bei der Rekombination ist es natürlich auch hier möglich und eine Frage der Zielsetzung, auszuwählen, welche Bauteile einer Mutation unterworfen werden. Es ist möglich, einzelne Bauteile zu mutieren, aber es ist ebenso möglich, Bauteilgruppen zu bilden oder sogar beispielsweise alle Außenwände eines Entwurfes gleichzeitig zu mutieren. Die Auswirkungen der einzelnen Auswahlen wurden bereits besprochen.

4.5 Umsetzung des Optimierungsalgorithmus

Nachdem viele Einzelschritte der Optimierung nun detailliert erklärt wurden, kann der Optimierungsalgorithmus zusammenfassend umrissen werden. Der Algorithmus läuft im Wesentlichen wie unter 4.1 beschrieben ab. Dies bedeutet, dass zunächst die Initialisierung erfolgt. Diese wurde ebenfalls bereits beschrieben. Es wird empfohlen, die Optimierung stets mit mehreren Unterpopulationen ablaufen zu lassen. Die Auswahl der Unterschiede für die einzelnen Unterpopulationen kann automatisch erfolgen, wie später gezeigt werden wird. Als für die meisten Optimierungen vorteilhaft hat es sich jedoch erwiesen, die einzelnen Unterpopulationen mit unterschiedlichen Konfigurationen bezüglich der Initialisierung, besonders bezüglich der Außenform, starten zu lassen. Möglich ist aber natürlich eine Unterscheidung in allen Parametern. So kann es für einen bestimmten Bauherrn, der schon genaue Vorstellungen seines Hauses hat, von Vorteil sein, lediglich die Materialien der Außenwände zu optimieren. In diesem Sinne ist es dann natürlich auch ratsam, die einzelnen Unterpopulationen mit unterschiedlichen Einstellungen bezüglich dieses Faktors zu initialisieren. Als guter Kompromiss bezüglich der Balance zwischen Variation und Rechenzeit hat sich eine Konfiguration mit fünf Unterpopulationen mit jeweils 20 Individuen erwiesen.

Nach der Initialisierung werden zunächst die Zielfunktionswerte der einzelnen Individuen bestimmt. Dies erfolgt wie in 4.4.1 beschrieben. Es wird dabei empfohlen, eine adaptive Berechnung zu verwenden, die mit fortgeschrittener Optimierung schlechte Entwürfe stärker bestraft. Aus den Zielfunktionswerten wird dann die Fitness der einzelnen Individuen be-

rechnet. Es kommt aus den unter 4.1.3 beschriebenen Gründen eine reihenfolgebasierte Fitnesszuweisung zum Tragen. Auch hier wird eine adaptive Verwendung des Selektionsdruckes empfohlen. Der Selektionsdruck sollte zu Beginn der Optimierung etwa bei einem Wert von 1,2 liegen. Mit fortlaufender Optimierung kann der Druck erhöht werden, wobei ein maximaler Wert von 3 empfohlen wird. Diese Werte finden sich sowohl in der einschlägigen Literatur, werden aber auch durch konkrete Testreihen der vorliegenden Optimierung bestätigt. Die Anpassung des Selektionsdruckes kann ebenfalls adaptiv erfolgen. Dies bedeutet, dass die Wahl des Selektionsdruckes vom Erfolg beziehungsweise der Homogenität einer Population abhängig gemacht wird. Bei einer sehr homogenen Population kann es vorteilhaft sein, den Selektionsdruck zu erhöhen, um die etwas besseren Entwürfe stärker zu bevorzugen und deren Eigenschaften zu fördern. Ein zu niedriger Selektionsdruck bei einer stark homogenen Population kann dazu führen, dass bessere Individuen weniger bevorzugt werden, obwohl diese Möglichkeit bereits durch die Wahl einer reihenfolgebasierten Fitnesszuweisung minimiert werden kann.

Nachdem die Fitnesszuweisung erfolgt ist, kann die Selektion beginnen. Hier wird ein *stochastic universal sampling* (SUS) vorgeschlagen. Dieses bietet, wie in 4.1.4 gezeigt, im Vergleich zu vielen anderen Methoden den Vorteil, dass zwar mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sehr gute Individuen gewählt werden, auf der anderen Seite aber auch schlechte Individuen mit einiger Wahrscheinlichkeit zur Reproduktion ausgewählt werden, was zu einer Erhaltung der Varianz führt (siehe auch Abbildung 29).

Als nächster Schritt erfolgt die Rekombination der selektierten Individuen entsprechend der Methoden, die erläutert wurden. Die Auswahl der Methoden kann ebenfalls automatisch gesteuert werden, wie später erläutert werden wird. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden wurden in 4.4.2 besprochen, wenngleich natürlich auch hier eine Erweiterung der Methoden durchaus möglich und wünschenswert ist. Im Falle einer starren Rekombinationsauswahl wird zur geometrischen Rekombination momentan empfohlen, die kombinatorische Gesamtrekombination zu wählen. Diese führt zu guten und neuen Ergebnissen im Sinne der Qualität und Varianz der Population. Bei der Rekombination der Bauteile kann erwogen werden, in den einzelnen Unterpopulationen unterschiedliche Bauteilgruppen zu bilden. Dies führt ebenfalls zu einer hohen phänotypischen Varianz der Ergebnisse.

Nach der Rekombination erfolgt zunächst die Mutation. Diese kann sowohl auf die Eltern als auch auf die Nachkommen der aktuellen Generation angewandt werden. In der entsprechenden Literatur finden sich meist empfohlene Mutationsraten von 1 geteilt durch die Anzahl der Variablen (vgl. z. B. [Ger04], S. 98). Im Falle der Architekturgenerierung wird aber eine höhere Mutationsrate, besonders beim Verschieben von Wänden, empfohlen. Die positiven Auswirkungen einer Verschiebung sind oftmals hoch, gleichzeitig sorgt die Mutation für eine hohe Varianz der Ergebnisse. In diesem Sinne kann eine Mutationsrate von 1 geteilt durch die Anzahl der Individuen mal zehn vorgeschlagen werden. Statistisch gesehen werden also 10 Prozent der Eigenschaften eines Individuums verändert.

Im nächsten Schritt werden aus dem temporären Pool der Nachkommen diejenigen Individuen gewählt, die wirklich in die Population wiedereingefügt werden. Hier wird im Prinzip eine kleine „Unterrunde“ der eigentlichen Optimierung ausgelöst. Auch den Nachkommen wird eine Fitness zugewiesen. Diese Fitness wird dann mit den Eltern verglichen. Insgesamt werden dann die besten Individuen übernommen. Um den Fortgang der Optimierung zu gewährleisten, werden jedoch zwei Einschränkungen vorgeschlagen: Zum Einen sollte eine maximale Lebensdauer für Individuen festgelegt werden. Nach der Anzahl der hier festgelegten Runden sollte ein Individuum auf jeden Fall durch einen Nachkommen ersetzt werden, um zu vermeiden, dass eine Optimierung vorzeitig steckenbleibt. Zum Anderen sollte in jeder Runde mindestens ein Nachkomme auch wiedereingefügt werden, auch wenn seine Fitness schlechter ist, als die der Eltern. Auch dies ist eine Strategie zur Erhöhung der Varianz und zur Vermeidung einer frühzeitigen Konvergenz der Optimierung.

In bestimmten Abständen sollte nun noch eine Migration zwischen den Unterpopulationen stattfinden. Um eine gute Durchmischung der Populationen zu gewährleisten, wird eine vollständige Netztopologie vorgeschlagen. So kann potentiell jedes Individuum in jede Unterpopulation gelangen. Nach einer Migration von Individuen zwischen Unterpopulationen muss jedoch für einige Generationen, vorgeschlagen werden etwa 30, ein Migrationsstopp verhängt werden. In dieser Zeit erhalten die migrierten Individuen Gelegenheit, in den neuen Unterpopulationen für Veränderungen zu sorgen, oder eben auch nicht, falls die Durchmischung in diesem Falle nicht zu besseren Ergebnissen führt.

Im gleichen Rhythmus wie eine Migration sollte schließlich noch eine Konkurrenzanalyse zwischen den einzelnen Unterpopulationen durchgeführt werden. Hierbei wird zunächst ein

durchschnittlicher Fitnesswert einer Unterpopulation aus dem Durchschnitt der Fitness ihrer Individuen gebildet. Anschließend wird ein Ranking erstellt, das auch den Durchschnitt der vorherigen Vergleiche berücksichtigt. Entsprechend der Qualität einer Unterpopulation sollten die schlechtesten Unterpopulationen Individuen an die besten Unterpopulationen abgeben. Dies entspricht einer Verteilung der vorhandenen (Rechen-)Ressourcen. Auf diese Weise können erfolgreiche Unterpopulationen einen prozentual größeren Anteil an der Rechenleistung zugewiesen bekommen. Es kann auch entschieden werden, eine Ressourcenaufteilung erst im späteren Verlauf einer Optimierung anzuwenden, um zu verhindern, dass anfangs schlechtere Unterpopulationen zusätzlich benachteiligt werden. Andererseits hat sich gezeigt, dass die anfangs guten Unterpopulationen meist auch im weiteren Verlaufe die besseren Unterpopulationen sind.

In vielen Fällen wird das regionale Modell der Verwendung von Unterpopulationen angewandt, um in den einzelnen Abschnitten unterschiedliche Optimierungsstrategien zu verwenden. Dies ist natürlich auch hier möglich. So kann etwa in jeder Unterpopulation eine unterschiedliche Rekombinationsmethode zum Einsatz kommen, wobei die Erläuterungen in 4.4.2 zeigen, dass es eher sinnvoll wäre, unterschiedliche Rekombinationsmethoden zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Optimierung einzusetzen und nicht eine Strategie für eine Unterpopulation zu verwenden. Trotzdem könnte in diesem Falle eine minimale Unterpopulationsgröße definiert werden, um das Aussterben einer Strategie zu verhindern. Am sinnvollsten ist jedoch die Verwendung unterschiedlicher Initialisierungsstrategien in den einzelnen Unterpopulationen, da hier die größten Unterschiede zu erwarten sind. Da diese unterschiedlichen Strategien nur einmal zu Beginn der Optimierung zum Tragen kommen, muss in diesem Falle keine Minimalgröße einer Unterpopulation definiert werden. Es ist in diesem Falle legitim, einzelne Unterpopulationen aussterben zu lassen, da dies dazu führt, dass mehr oder alle Ressourcen zur weiteren Optimierung der guten Unterpopulation verwendet werden. Natürlich kann hier auch eine minimale Lebensdauer einer Unterpopulation definiert werden. Dies führt dazu, dass zumindest bis zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Migration zwischen Unterpopulationen stattfinden kann.

Nachdem die Migration und die Zuweisung von Ressourcen stattgefunden haben, beginnt der Optimierungskreislauf wieder von vorne. Der Kreislauf wird solange fortgesetzt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

4.6 Die Abbruchkriterien

Um die Optimierung beenden zu können, muss ein Abbruchkriterium erfüllt sein. Die Abbruchkriterien können dabei verschiedenartig sein. Es kann prinzipiell zwischen direkten und abgeleiteten Abbruchkriterien unterschieden werden [Poh00]. Das erste und ein direktes Abbruchkriterium einer Minimierung ist natürlich das Erlangen eines Individuums, das einen Zielfunktionswert von 0 erreicht. Das Erreichen dieses Punktes bedeutet nämlich, dass alle in die Berechnung eingegangenen Parameter in optimalem Zustand sind. Eine weitere Optimierung ist durch die gegebenen Parameter nicht möglich, da es kein besseres Individuum geben kann. Sollte das Ziel der Optimierung nicht nur ein Individuum, sondern mehrere sein, so kann der Algorithmus natürlich fortgesetzt werden. Das Erreichen eines Zielfunktionswertes von 0 ist jedoch sehr unwahrscheinlich. Bei der Vielzahl an Parametern ist der so definierte optimale Zustand quasi nicht zu erreichen. Der Abbruch der Optimierung muss also noch auf anderem Wege möglich sein. Hierzu kann zum Beispiel eine Mindestqualität definiert werden, also ein Zielfunktionswert ungleich 0, der erreicht werden soll. Doch auch diese Definition ist unsicher, da man im Voraus unmöglich sagen kann, welche Qualität eine Population erreichen wird. Es kann ja auch gut sein, dass das tatsächlich erreichbare Optimum nicht bei 0, sondern beispielsweise bei 50 liegt, weil die Nebenbedingungen und Voraussetzungen, beispielsweise des Grundstücks derart sind, dass kein in diesem Sinne optimales Ergebnis gefunden werden kann.

Ein weiteres direktes Abbruchkriterium ist die Definition einer Maximalzahl von Generationen. Dies ist ein besonders wichtiges Abbruchkriterium, da es sich um ein Kriterium handelt, das immer erreicht wird und somit immer verwendet werden sollte. Es können natürlich weitere Kriterien definiert werden, doch die Definition einer Maximalzahl von Generationen deckelt den maximalen Aufwand einer Optimierung. Die zu verwendende Maximalzahl kann dabei durch einige Erfahrung im Umgang mit bestimmten Problemstellungen festgesetzt werden.

Im Gegensatz zu den direkten werden die abgeleiteten Abbruchkriterien durch die Ermittlung von Hilfsgrößen definiert. Von den Kriterien dieser Art soll vor allem der laufende Mittelwert sowie die Ermittlung der Variable *Phi* vorgestellt werden, da beide mit Erfolg im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung eingesetzt wurden.

Um den laufenden Mittelwert zu ermitteln, wird der Mittelwert der Zielfunktionswerte der besten Individuen der letzten Generationen gebildet und daraufhin die Differenz zum besten Individuum der aktuellen Generation gebildet. Unterschreitet dieser so gebildete Faktor einen bestimmten Wert, so wird die Optimierung abgebrochen. Hintergrund dieses Wertes ist die Untersuchung der Optimierung auf ein Fortschreiten. Sollte der ermittelte Wert bei 0 liegen, so bedeutet dies, dass die besten Individuen seit den Generationen, die in die Berechnung eingehen, nicht mehr besser geworden sind. Dies deutet auf eine Konvergenz der Optimierung hin und eine weitere Verbesserung ist nicht mehr zu erwarten. Es muss natürlich beachtet werden, dass der Wert für die in Betracht zu ziehenden Generationen nicht zu klein gewählt wird, da ansonsten schon lokale Minima, die wieder verlassen werden können, zu einem Abbruch der Optimierung führen können.

Das Kriterium *Phi* gibt ebenfalls einen Hilfwert an, der auch als Konvergenzkriterium definiert wurde (siehe [Poh00], S. 69). *Phi* wird aus 1 minus den besten Zielfunktionswert der aktuellen Generation geteilt durch den Mittelwert aller Zielfunktionswerte einer Generation gebildet. Das heißt, dass *Phi* einen Hinweis darauf gibt, wie eng die Individuen einer Population in ihrer Qualität beieinanderliegen. Liegen die Individuen eng beieinander, so nähert sich *Phi* 1 an. Ein Nachteil dieser Methode liegt in der Tatsache, dass auch im späten Verlaufe einer Optimierung einzelne Individuen durchaus sehr schlecht sein können, obwohl man allgemein sagen kann, dass sich die Zielfunktionswerte im Verlaufe einer Optimierung immer mehr aneinander angleichen. Diese einzelnen sehr schlechten Individuen, die hauptsächlich durch Rekombination oder große Mutationsschritte zustande kommen, „verfälschen“ dann den Mittelwert der Zielfunktionswerte einer Generation, erhöhen ihn also relativ stark. Durch diese Entwicklung kann es passieren, dass das Abbruchkriterium nicht erreicht wird, obwohl die meisten Individuen einer Generation in ihrer Qualität sehr eng beieinander liegen. Diese Gefahr kann durch den Einsatz von adaptiven Mutationen und Rekombinationen gemindert werden. Das heißt, dass im späten Verlaufe einer Optimierung nur noch kleine Mutationsschritte vollzogen werden. Im Falle der ganzheitlichen Architekturgenerierung ist dies jedoch nicht einfach auszuschließen, da die meisten Mutationsoperatoren, wie etwa das Verschieben einer Wand, nur schwierig in der Schrittweite angepasst werden können.

Insgesamt hat sich in Testläufen die Verwendung der beiden Abbruchkriterien „maximale Generationen“ und „laufender Mittelwert“ als gut herausgestellt. Der laufende Mittelwert

bildet allgemein ein gutes Kriterium, da sich hiermit genaue Aussagen über das Fortschreiten der Optimierung machen lassen. Die Hinzunahme des Kriteriums der maximalen Generationen ist sozusagen ein „Sicherheitsfaktor“, der bewirkt, dass eine Optimierung immer abgebrochen wird. Das Erreichen eines definierten Optimums als zusätzliches Kriterium ist durchaus legitim, führt jedoch äußerst selten zum Abbruch der Optimierung.

4.7 Steuerung der Optimierung und Rückfluss in die Initialisierung

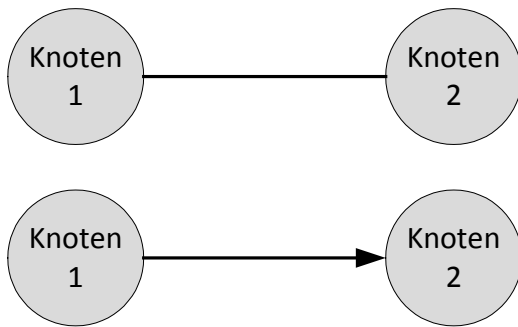
Obwohl die eigentliche Optimierung nach Erfüllung eines Abbruchkriteriums beendet ist, bedeutet dies nicht, dass der Gesamtalgorithmus als solcher vollständig erfasst ist. Wie schon vorher beschrieben, spielt die Nachverfolgbarkeit der Ergebnisse einer Optimierung eine große Rolle, da die Erkenntnisse, die sich aus Konfiguration und Ablauf einer Optimierung ergeben, in spätere Optimierungen einfließen sollen. Eine besondere Rolle spielen hierbei die unter 3.5.4 erläuterten Methoden der Initialisierung. Wie dort beschrieben wurde, sind die Möglichkeiten der Kombination von Initialisierungsmethoden der einzelnen Teilabschnitte eines Entwurfes sehr groß. Sie sind potentiell so groß, dass eine rein zufällige Initialisierung zwar zu guten Ergebnissen führen kann, es jedoch Sinn macht, die Initialisierung zumindest teilweise gerichtet zu vollziehen.

Konkret bedeutet dies, dass durch die Erfahrung, die mit jeder Optimierung größer wird, eine Einschätzung erfolgen kann, wie erfolgreich eine bestimmte Initialisierungsmethode sein wird. Dabei gibt es eine Eingangs- und eine Ausgangsgröße. Die Eingangsgröße ist die Konfiguration, die der Optimierung durch den Nutzer beziehungsweise durch die Randbedingungen mitgegeben wird. Die Ausgangsgröße ist ein fertiger „Initialisierungsstring“, also eine Art Wort, das aus den Buchstaben der einzelnen vorher beschriebenen Initialisierungsschritte besteht. Ein einfaches, nicht unbedingt realistisches Beispiel, um dies zu demonstrieren: Der Nutzer hat vor Beginn der Optimierung die Möglichkeit, anzugeben wie hoch sein Flächenbedarf ist und welchen Baustandard er wünscht. Des Weiteren besteht, wie oben beschrieben, die Möglichkeit, im ersten Initialisierungsschritt festzulegen, welche Außenform das Haus haben soll. Dabei wird jeder mögliche Außenformtyp mit einem Buchstaben belegt. Angenommen, dass sich in zahlreichen Optimierungsdurchläufen ergeben hat, dass eine längliche, rechteckige Außenform zu besonders guten Ergebnissen im Zusammenhang mit der vom Nutzer gewünschten Konfiguration führt, so ist es sinnvoll, diese Erkenntnis in kommende Initialisierungen einfließen zu lassen. Natürlich ist dieses einfache Beispiel nicht

sehr realistisch und auch sehr einfach. Es demonstriert jedoch die Anforderungen an eine gerichtete Initialisierung: Es muss sich um ein System handeln, das es ermöglicht, bei bestimmten Ausgangskonfigurationen zu bestimmten Initialisierungsmethoden zu führen.

4.7.1 Die Initialisierung als Graph

Hier soll ein der Graphentheorie entlehnter gerichteter Graph ohne Mehrfachkanten herangezogen werden. Ein Graph bezeichnet einfach ein anschauliches Modell von Punkten, zwischen denen Linien verlaufen. Die Punkte werden dabei oft als Knoten bezeichnet, die Linien



als Kanten (siehe [Tit03], S. 11).

Abbildung 77 zeigt zwei einfache Graphen, wobei es sich beim oberen Beispiel um einen ungerichteten, beim unteren um einen gerichteten Graphen handelt. Der Unterschied liegt dabei darin, dass beim gerichteten Graphen jede Verbindung zwischen zwei Knoten eine Richtung hat.

Abbildung 77: Einfache Graphen

Auch die Initialisierung kann als Graph aufgefasst werden, da es sich um eine Verknüpfung von Knotenpunkten handelt, wobei jeder Knoten für eine mögliche Initialisierungsmethode steht. Eine Ebene von Knoten ist dabei immer ein Initialisierungsschritt. Die Knoten einer Ebene haben nie eine Verbindung untereinander und jeder Knoten einer Ebene hat eine Verbindung zu jedem Knoten der nächsten Ebene.

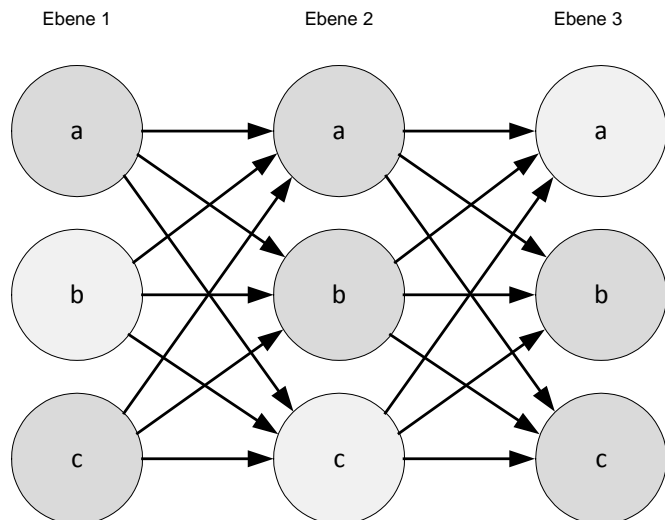


Abbildung 78: Ebenensystem des Graphen

Abbildung 78 zeigt dieses Prinzip. Hierbei können die Ebenen beispielsweise für die Initialisierungsschritte Außenform, horizontale Erschließung und vertikale Erschließung stehen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, kann von jeder Außenforminitialisierung, die durch die

Buchstaben a, b und c repräsentiert ist, der nächste Schritt wiederum jede Methode der Initialisierung der horizontalen und von hier aus wiederum jede Methode der vertikalen Erschließung sein. Der Graph stellt eine anschauliche Möglichkeit dar, den Weg der Initialisie-

rung zu beschreiten. Hier ist beispielhaft der Weg b-c-a hervorgehoben. Zunächst ist der Graph zwar sehr anschaulich, er bietet in dieser Form jedoch noch keine Möglichkeit, der Initialisierung als solcher zu helfen, da er keine Informationen bezüglich einer guten Initialisierung speichern kann. Auch diese Möglichkeit bietet jedoch ein Graph und zwar durch die Möglichkeit, jeder Kante eine Gewichtung beziehungsweise eine Distanz mitzugeben. Hierbei handelt es sich im Prinzip um einen einfachen Zahlenwert, der die Wertigkeit einer Kante angibt. Im konkreten Fall wird

vorgeschlagen, jeder Kante einen Wert zuzuweisen, der die Wahrscheinlichkeit repräsentiert, mit der dieser Weg beschritten werden wird. Die Wahrscheinlichkeit ergibt dabei in der Summe der Verbindungen, die von einem Knoten

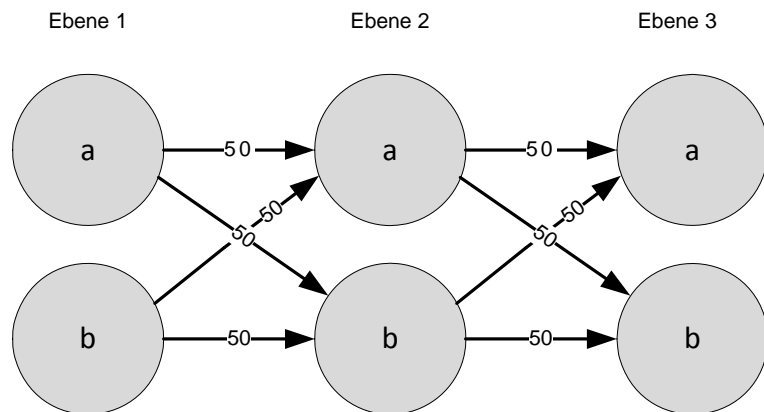


Abbildung 79: Graph mit Kantengewichtung zu Beginn

ausgehen 100 Prozent. Abbil-

dung 79 zeigt ein Beispiel eines solchen Graphen. Zu Beginn wird jede Verbindung mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit bewertet, da die Summe der Wahrscheinlichkeiten 100 Prozent ergeben muss und an jedem Knoten zwei mögliche Wege existieren.

Nach jeder Optimierung werden die Ergebnisse als Feedback in den Graphen eingespeist, was dazu führt, dass der Graph mit jeder Optimierung mehr Informationen darüber speichert, welche Konfiguration vielversprechend sein wird. Es sind dabei verschiedene Möglichkeiten des Feedbacks denkbar. So kann jedes Individuum zur Bewertung herangezogen werden oder es können nur wenige gute oder aber nur das beste Individuum verwendet werden. Auch eine Verwendung des besten und des schlechtesten Individuums ist denkbar. Da jedoch auch automatisiert sehr viele Optimierungen durchgeführt werden können, um den Graphen zu „trainieren“, wird vorgeschlagen, dass jeweils nur das beste Individuum herangezogen wird, um seine Initialisierungsmethode zu bewerten. Bei allen anderen Konfigurationen ergeben sich Interpretationsschwierigkeiten bezüglich der Feststellung, welches Individuum noch gut oder schon schlecht ist, zumal der Zielfunktionswert eines Individuums, wie oben dargelegt, nur relativ, nicht aber absolut gesehen bewertet werden kann. In diesem Sinne wird also vorgeschlagen, nach jeder Optimierung, den „Initialisierungsweg“ des besten

Individuums im Graphen „nachzufahren“ und dabei jede Kante mit einem Prozentpunkt höherer Wahrscheinlichkeit zu belegen. Dies führt natürlich automatisch zu einer schlechteren Bewertung der anderen Kanten, da die Summe der Kantenwahrscheinlichkeiten wiederum 100 Prozent ergeben müssen. Im Extremfall kann dies auch zum „Löschen“ einzelner Verbindungen führen, falls diese mit einer Wahrscheinlichkeit von 0 Prozent belegt werden. Hier-

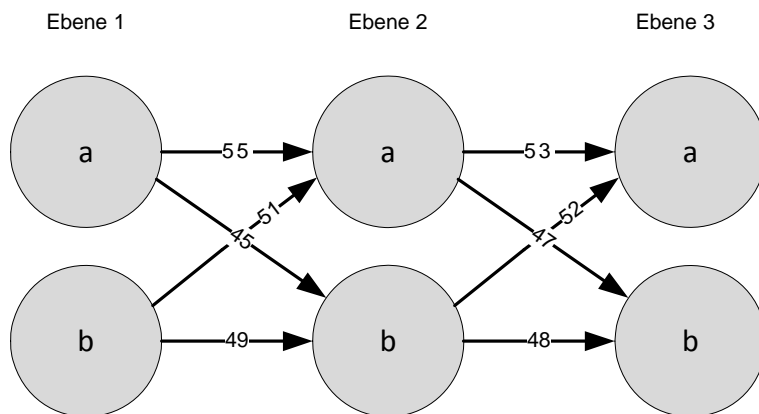


Abbildung 80: Graph mit Wahrscheinlichkeitsbewertung der Kanten nach 10 Durchläufen

von sollte in der Regel jedoch abgesehen werden, um die Varianz beizubehalten. In der Praxis sollte somit immer eine Mindestwahrscheinlichkeit beibehalten werden.

Abbildung 80 zeigt ein Beispiel für einen Graphen nach 10 Durchläufen. Durch die Bewertung

der Kanten durch das jeweils beste Individuum haben sich die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Wege verändert. So ist bei einem Start bei a der Weg a – a – a am wahrscheinlichsten.

Natürlich fehlt dem Graphen noch ein Ausgangspunkt. Wie schon angedeutet, besteht dieser aus einer Konfiguration, die vom Benutzer vorgegeben wird. Dabei können alle möglichen Kriterien hinzugezogen werden. Einfache Ausgangspunkte sind Flächenbedarf und Hausstandard, aber natürlich können auch Energiestandard oder Anzahl der Bewohner oder bestimmte Regionen oder Umweltfaktoren als Kriterien herangezogen werden. Flächenbedarf und Hausstandard sind neben Umweltfaktoren jedoch in besonderem Maße geeignet, als Kriterien herangezogen zu werden, da diese Kriterien zahlreiche andere Faktoren, wie Raumkonfiguration und -größen oder Gesamtgröße beeinflussen und somit geeignet sind, die Ausgangsdaten zu kategorisieren. Prinzipiell sind jedoch zahlreiche Kriterien denkbar. Wichtig ist die Feststellung, dass für jede Ausgangskonfiguration die Gewichtungen der Kanten separat gespeichert werden müssen, da ein bestimmter Graph nur für einen Ausgangszustand gelten kann.

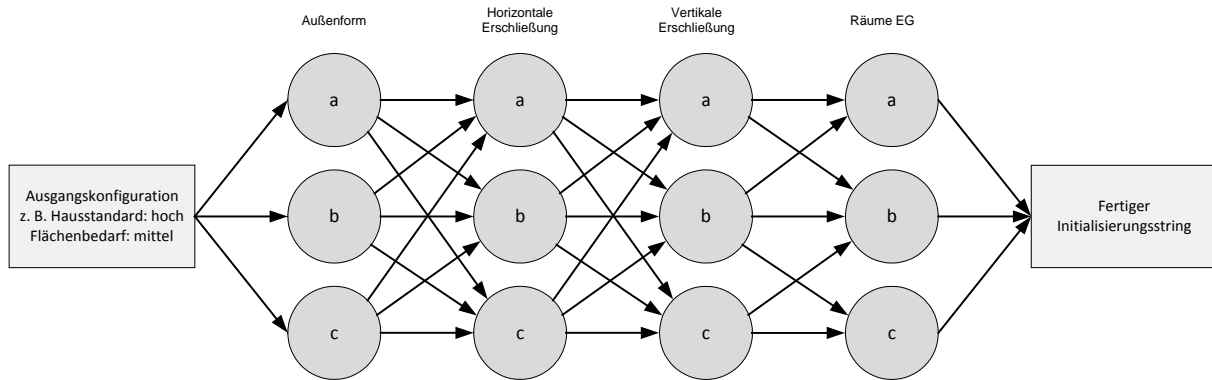


Abbildung 81: Übersicht über den Initialisierungsgraphen

Abbildung 81 zeigt nochmals eine vereinfachte Übersicht über den Vorgang der Auswahl der Initialisierungsmethode. Am Anfang steht eine bestimmte Ausgangskonfiguration, die als Input in den Graphen betrachtet werden kann. Danach erfolgt an jedem Knoten eine zufalls-gesteuerte Auswahl des nächsten verbundenen Knotens, wobei jeder nächste Knoten mit der Wahrscheinlichkeit des jeweils zu ihm weisenden Kantenwertes ausgewählt wird. Am Ende ergibt sich so ein „Wort“, wie etwa „abbc“, das den Initialisierungsvorgang beschreibt. Natürlich gibt es auf jeder Ebene mehr Knoten als dargestellt und auch die Ebenen an sich sind nicht vollständig. Das Prinzip sollte auf diese Weise jedoch klar werden.

Natürlich wäre es mit dem so vorhandenen Graphen möglich, den optimalen Weg durch den Graphen zu suchen, also den Weg, der jeweils den höchsten Wert der Kanten vereint. Ein Beispiel für Algorithmen, die diesen Vorgang beschreiben, ist etwa der Dijkstra-Algorithmus (siehe [Cor04], S. 598ff, dort sind auch andere Algorithmen dieser Art beschrieben). Ein solcher Algorithmus soll jedoch explizit nicht verwendet werden, da dies dazu führen würde, dass nur noch bestimmte Wege gegangen werden. Ziel ist es aber vielmehr, weiterhin ein hohes Maß an Zufall bei der Initialisierung zu wahren, da nur so für eine hohe Varianz der Startpopulation gesorgt werden kann. Der Zufall soll jedoch gerichtet eingesetzt werden, um mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine gute Ausgangspopulation zur Verfügung zu haben, da dies die Ergebnisse verbessert und die Rechenzeit verringert.

Beim Einsatz der graphenoptimierten Initialisierung muss beachtet werden, dass die Methode auf verschiedene Arten eingesetzt werden kann. Zum Ersten kann diese Methode einmalig verwendet werden. Dies bedeutet, dass alle Individuen aller eventuellen Unterpopulationen auf die gleiche Art und Weise initialisiert werden. Dies ist sinnvoll, wenn die inneren und

äußeren geometrischen Erfordernisse relativ eindeutig sind. Die Optimierung wird sich dann hauptsächlich auf andere Bereiche, etwa die Lage auf dem Grundstück oder energetische Fragen konzentrieren. Zum Zweiten ist es aber auch möglich, die graphenoptimierte Initialisierung einmal pro Unterpopulation einzusetzen. Dies führt dazu, dass die Unterpopulationen zu Beginn geometrisch relativ homogen sind. Diese Methode ist in den meisten Fällen sinnvoll, da so eine ausgewogene Optimierung mit ausreichender Varianz möglich ist. Schließlich kann die graphenoptimierte Initialisierung aber auch bei der Initialisierung jedes einzelnen Individuums eingesetzt werden. Dies führt dazu, dass potentiell jedes Individuum auf unterschiedliche Weise initialisiert wird. Auch diese Methode kann Sinn machen, vor allem, wenn die geometrische Suche sehr breit angelegt werden soll. Unter Umständen kann es auch sinnvoll sein, zunächst eine solche Suche auszuführen, um Rückschlüsse auf die optimale Initialisierung zu gewinnen und anschließend einen weiteren Optimierungsvorgang durchzuführen.

Welche Methode auch eingesetzt wird, es kann doch festgehalten werden, dass die graphenoptimierte Initialisierung die Suche beschleunigt und durch die wahrscheinlichkeitsbasierte Zufallsverteilung eine ausreichende Varianz sichergestellt ist.

4.7.2 Die Gewichtung der Einflussfaktoren

Zur Steuerung der Optimierung gehört sicher auch noch ein weiteres sehr wichtiges Thema, nämlich die Gewichtung der Einflussfaktoren. Wie in 2.4 bereits dargelegt wurde, gibt es zwei gängige Methoden der Verarbeitung von Parametern bei einer Mehrkriterienoptimierung, wie sie hier vorliegt: Das Bilden einer gewichteten Summe und das Konzept der Pareto-Optimalität. Wie dort erklärt wurde, soll im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung das Konzept der gewichteten Summe eingesetzt werden, da dies den Anforderungen am besten gerecht wird. An dieser Stelle soll nochmals festgehalten werden, was dies für die Optimierung konkret bedeutet.

Wie oben dargestellt, werden bei der ganzheitlichen Architekturgenerierung Kategorien und Parameter unterschieden. Die Kategorien sind die den Parametern übergeordnete Instanz. Jede Kategorie verfügt über einen oder mehrere Parameter. Für die gewichtete Summe be-

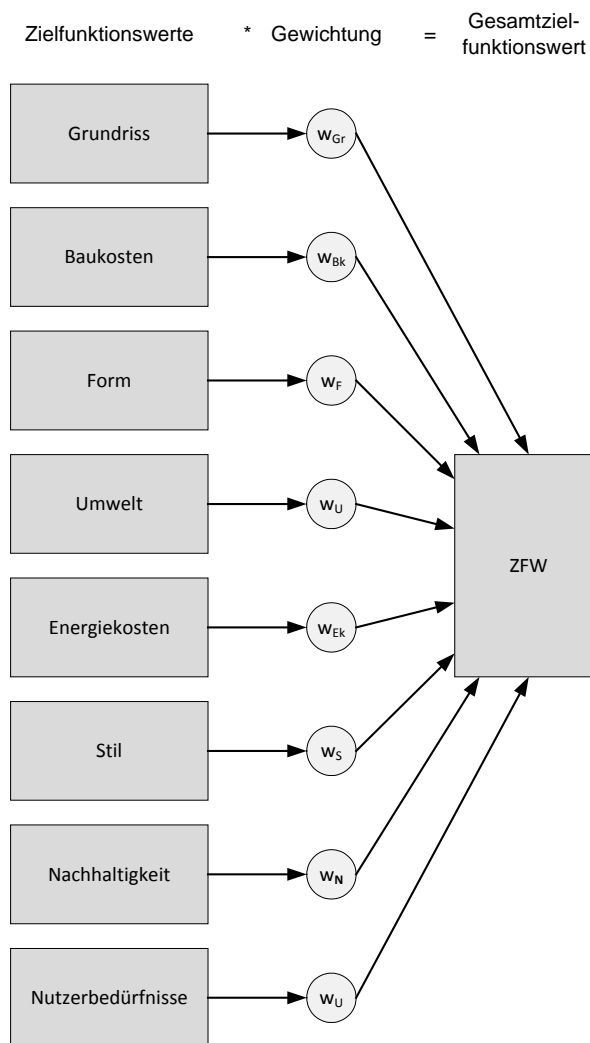


Abbildung 82: Gewichtung der Kategorien

deutet dies, dass zunächst eine Gewichtung auf Ebene der Kategorien stattfindet. Dies bedeutet, dass jeder Kategorie eine prozentuale Wichtigkeit bezogen auf die Gesamtoptimierung zugewiesen wird. Die Summe der Gewichtungen muss 100 Prozent beziehungsweise 1 ergeben. Es wurden hier acht Kategorien festgelegt, nämlich Grundriss, Baukosten, Form, Umwelt, Energiekosten, Stil, Nachhaltigkeit und Nutzerbedürfnisse beziehungsweise Bestandsparameter. Im Ausgangszustand hat somit jede dieser Kategorien eine Gewichtung von $1/8$ oder $0,125$. Konkret bedeutet dies, dass bei der Berechnung der Zielfunktionswerte für die Individuen der jeweilige Zielfunktionswert einer Kategorie mit dem Faktor $0,125$ multipliziert wird und dann die Werte der einzelnen Kategorien addiert werden. Auf diese Weise fließt die Gewichtung in die Berechnung ein, wie in Abbildung 82 zu sehen ist.

Natürlich muss die Gewichtung nicht immer den gleichen Wert haben, da hier vielmehr das mächtigste Instrument zur Steuerung der Optimierung verborgen ist. Der Nutzer hat die Möglichkeit, durch Veränderung der Gewichtung einzelner oder aller Kategorien enormen Einfluss auf die Optimierung zu nehmen. So kann er beispielweise durch eine Gewichtung von 0 für eine bestimmte Kategorie die Parameter dieser Kategorie völlig vernachlässigen. Die Parameter dieser Kategorie finden dann bei der Optimierung überhaupt keinen Niederschlag mehr. Im Extremfall könnte der Nutzer sogar alle Kategorien bis auf eine mit einer Gewichtung von 0 versehen. Die Optimierung findet dann nur noch auf Parameter dieser

Kategorie statt, wobei eine solche Einstellung natürlich nicht empfohlen werden kann, da sie natürlich auch zu sehr eindimensional ausgerichteten Entwürfen führt. Trotzdem sollte dieses Beispiel das Konzept der gewichteten Summe klar machen: Es ist *das* Instrument zur Steuerung der Optimierung. Zu beachten ist natürlich, dass bei einer geringeren Gewichtung einer Kategorie, die Parameter der anderen Kategorien entsprechend wichtiger werden, da die Summe der Gewichtungen immer 1 ergeben muss.

Natürlich ist das Konzept der gewichteten Summe nicht nur auf die Kategorien beschränkt. Auch die einzelnen Parameter einer Kategorie werden analog gewichtet. Auf diese Weise ist es beispielsweise möglich, gezielt einzelne Parameter, wie beispielsweise das Seitenverhältnis von Räumen stärker zu gewichten oder eben auch komplett auszuschalten. Die Berechnung der Zielfunktionswerte erfolgt dabei analog. Innerhalb einer Kategorie werden für jeden Parameter die Zielfunktionswerte berechnet, anschließend werden diese mittels der gewichteten Summe zusammengefasst und ergeben den Zielfunktionswert einer Kategorie, die natürlich wiederum mittels der gewichteten Summe den Gesamtzielfunktionswert eines Individuums ergibt. Natürlich werden aber alle Parameter und Kategorien standardmäßig mit einer guten Gewichtung versehen, so dass der unerfahrene Benutzer zu guten Ergebnissen kommen kann, unabhängig von eigenen Einstellungen bezüglich der Gewichtung. Für den erfahrenen Benutzer ist dies jedoch ein mächtiges Werkzeug zur Beeinflussung der Ergebnisse der Optimierung.

Schließlich soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Gewichtung eines Parameters oder einer Kategorie nicht unbedingt für den gesamten Verlauf der Optimierung fix sein muss. Es ist vielmehr auch möglich, einen bestimmten Rahmen für eine Gewichtung vorzugeben. Dies hat den Vorteil, dass die Gewichtungen im Verlaufe der Optimierung angepasst werden können. Dies ist sinnvoll, da es sein kann, dass mit anderen Gewichtungen ein besseres Ergebnis zu erzielen ist, als mit den ursprünglich angegebenen Vorgaben.

Hat der Benutzer also keine absolut festen Vorgaben bezüglich bestimmter Parameter, so kann er der Optimierung diese Freiheit einräumen. Während der Optimierung können dann Parameter in ihrer Gewichtung verändert werden, um insgesamt bessere Ergebnisse zu erzielen. In diesem Sinne handelt es sich dann um ein selbstregulierendes System, das die optimalen Einstellungen bezüglich der Gewichtung und damit der Optimierungsziele selbst reguliert. Standardmäßig sind natürlich bestimmte Mindestgewichtungen vorgegeben, da es

ansonsten dazu führen würde, dass Parameter, die schlecht sind, einfach in ihrer Gewichtung so weit minimiert werden, dass sie nicht mehr relevant sind. Das Ergebnis wäre damit nicht ein auf diesen Parameter optimiertes Ergebnis, sondern vielmehr ein Ignorieren der Parameter, die nicht passen.

Umgekehrt kann es sogar sehr sinnvoll sein, Parameter, die schlecht sind, stärker zu gewichten, um die Optimierung vermehrt in dieser Richtung nach einer guten Lösung suchen zu lassen, da eine stärkere Gewichtung eines Parameters auch zu einer verstärkten Optimierung in diesem Bereich führt. Beachtet werden muss allerdings prinzipiell, dass die veränderten Gewichtungen immer für alle Individuen einer Population gelten müssen, da ansonsten keine Vergleichbarkeit mehr gegeben ist und die Fitnesszuweisung nicht mehr korrekt funktioniert. Eine Vergleichbarkeit ist immer nur unter gleichen Randbedingungen gegeben.

5 Output

Mit dem Abschluss der Optimierung ist die Benutzung der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware nicht beendet. Die Ergebnisse können in verschiedenen Formaten ausgegeben werden, was natürlich eine Voraussetzung zur effizienten Nutzung der Software ist.

Des Weiteren können die Ergebnisse, wie schon früher angedeutet, durch den Benutzer, Architekt oder Bauherr, betrachtet und bewertet werden. Die Ergebnisse dieser Bewertung können dann wieder in eine erneute Optimierung eingehen. Dieser Kreislauf lässt sich wiederholen, bis das Ergebnis zufriedenstellend ist.

5.1 Ausgabe der Ergebnisse

Es soll an dieser Stelle nicht detailliert auf die technischen Details einer Ausgabe in den verschiedenen Formaten eingegangen werden, da dies kein Hauptthema der Arbeit ist. Trotzdem soll ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten gegeben werden, so dass eine Einschätzung möglich wird.

5.1.1 Ausgabe von Planmaterial

Die erste und einfachste Methode der Ausgabe ist das Erstellen von „Papierplänen“ im PDF-Format. Diese Möglichkeit ist natürlich in erster Linie für Bauherren von Interesse, die über keine CAD-Software verfügen. Auf diese Weise können sie die Ergebnisse der Optimierung direkt betrachten und benutzen.

Dabei ist die Ausgabe natürlich nicht auf die reinen Zeichnungen, also die benötigten Grundrisse und Schnitte beschränkt. Es erfolgt auch eine automatische Ausgabe der Energiebilanz sowie einer Kostenaufstellung, wie sie auszugsweise in Abbildung 83 und ausführlich im Anhang in Abbildung 93 zu sehen ist. Denkbar ist auch eine Erweiterung um eine automatisierte Ausgabe von ausgefüllten Formularen zur Beantragung einer Baugenehmigung. Auf diese Weise kann der Planungsprozess effizient gestaltet werden. In diesem Sinne ist dieser Export natürlich auch für den Architekten ein großer Vorteil.

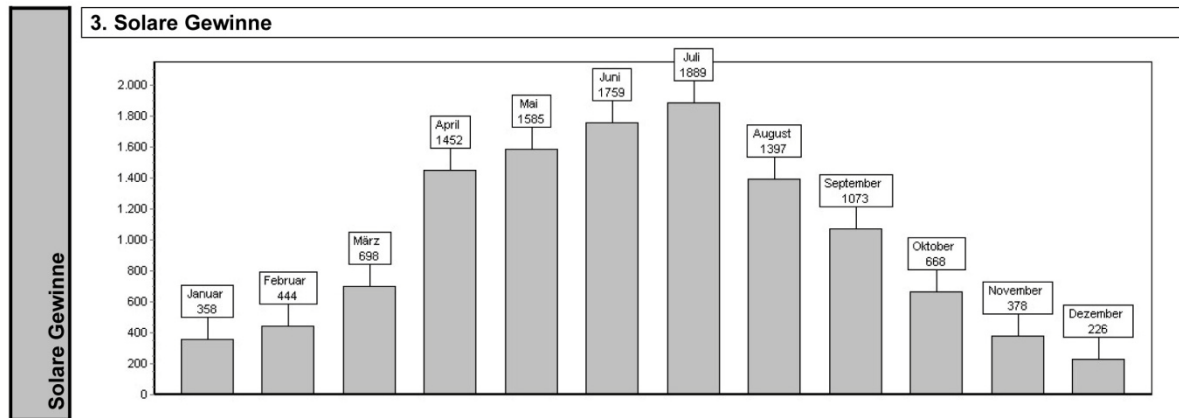


Abbildung 83: Auszug aus der automatisch erstellten Energiebilanz (ausführlich im Anhang, Abbildung 93)

5.1.2 Ausgabe als CAD-Datei

Für den Architekten ist diese Option natürlich von besonderem Interesse. Es ist möglich, mittels eines Plug-Ins die Ergebnisse der Optimierung direkt in die Software *Autodesk Architecture*, also im Prinzip *AutoCAD*, zu exportieren. Der besondere Vorteil, der sich hier anbietet, ist die Tatsache, dass alle Bauteile, die in der Optimierung, also von der Software genutzt werden, direkt in *AutoCAD* umgesetzt werden. Dies beinhaltet natürlich auch die Informationen der Material- und Bauteildatenbank. Die hier gespeicherten Informationen bezüglich der verwendeten Bauteile werden ebenso exportiert, wie alle Bauteile dreidimensional umgesetzt werden. Es werden gleichzeitig Layouts mit allen nötigen Grundrissen und Schnitten angelegt, so dass der Architekt die Pläne im Prinzip nur noch ausdrucken muss.

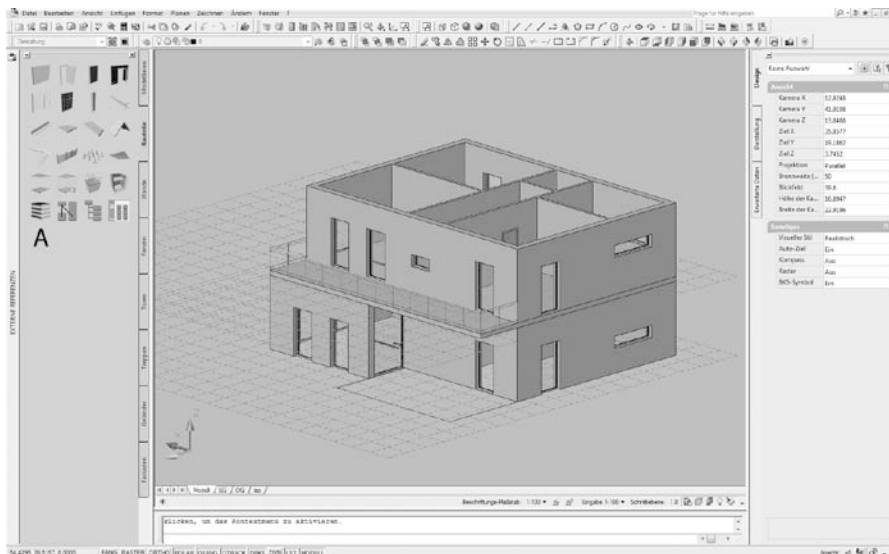


Abbildung 84: Beispiel eines berechneten Gebäudes in AutoCAD

5.1.3 Ausgabe von „Rohdaten“

Um die durch die Software produzierten Daten auch später noch nutzen zu können, und um die Anpassung der Daten an beliebige Softwarelösungen zu ermöglichen, wird das Ergebnis der Optimierung auch als XML-Datei ausgegeben. XML steht für *Extensible Markup Language* und ist ein weltweiter Standard zur strukturierten Ausgabe von Daten. Die gesamte in den vorherigen Abschnitten beschriebene Datenstruktur, alle Klassen und Bauteile werden in eine XML-Datei ausgegeben. Es steht also dem Anwender absolut frei, diese Datei zu interpretieren und in ein beliebiges anderes Programm zu importieren.

```
-<wand bauteilid="16" hoehe="3.0000000000" stil="10" aussenflaeche="0.0000000000" startx="124.0819814100" starty="48.0542105800" startz="0.0000000000"
endx="129.9282018000" endy="46.7045042600" endz="0.0000000000">
  <raumref id="1"> </raumref>
  <kosten baukosten="0.0000000000"> </kosten>
  <energie uwert="0.35" zugewinn="18"> </energie>
- <fenster id="17" distanz="0.2000000000" stil="20" breite="1.1000000000" hoehe="1.7000000000" brhoehe="1.1000000000">
  <kosten baukosten="0.0000000000"> </kosten>
  <energie uwert="0.6" zugewinn="6"> </energie>
  </fenster>
- <fenster id="19" distanz="1.7000000000" stil="20" breite="1.1000000000" hoehe="1.7000000000" brhoehe="1.1000000000">
  <kosten baukosten="0.0000000000"> </kosten>
  <energie uwert="0.6" zugewinn="6"> </energie>
  </fenster>
- <fenster id="18" distanz="3.2000000000" stil="20" breite="1.1000000000" hoehe="1.7000000000" brhoehe="1.1000000000">
  <kosten baukosten="0.0000000000"> </kosten>
  <energie uwert="0.6" zugewinn="6"> </energie>
  </fenster>
</wand>
```

Abbildung 85: Ausschnitt einer Ausgabe als XML-Datei

5.1.4 Ausgabe im Browser

Eine der wichtigsten Ausgabeformen ist die Ausgabe als X3D-Datei. Dies ist besonders wichtig, da es das Konzept der kompletten Bearbeitbarkeit über das Internet oder ein Intranet gewährleistet. X3D steht für *Extensible 3D* und basiert ebenfalls auf dem XML-Standard. Es handelt sich um eine nach ISO-Standard spezifizierte Methode der Beschreibung dreidimensionaler Objekte.

Mittels eines Plug-Ins in jedem gängigen Browser lassen sich auf diese Weise sämtliche Ergebnisse der Optimierung direkt dreidimensional im Browser betrachten (siehe auch [Sch06]). Besonderer Vorteil dieser Methode ist auch die direkte Begehbarkeit des Entwurfs. Dem Benutzer steht ein sogenannter *Avatar* zur Verfügung, eine Art *alter ego*, mittels dessen das Haus begangen werden kann. Auf diese Weise ist garantiert, dass auch der Bauherr die Planung versteht, er muss nicht die Abstraktionsebene eines architektonischen Planes nachvollziehen.

5.2 Bewertung der Ergebnisse und Rückfluss in die Optimierung

Die gerade beschriebene Möglichkeit des Exports der Ergebnisse im X3D-Format bietet noch einen weiteren, sehr wertvollen Vorteil: Jedes Objekt der X3D-Datei kann mit Sensoren aus-

gestattet werden. Es bietet sich somit eine Interaktivität, die es dem Benutzer erlaubt, mit dem Gesehenen direkt zu interagieren und dieses zu bewerten. Wie in 2.6.1 beschrieben, werden die Nutzerbedürfnisse in offene und verdeckte Bedürfnisse unterteilt. Die offenen Bedürfnisse werden dabei bereits im Vorfeld der Optimierung abgefragt. In der Regel ist es aber so, dass der Bauherr auch verdeckte Bedürfnisse hat, das heißt Bedürfnisse, die er im Vorfeld nicht verbalisieren kann. Die direkte dreidimensionale Begehung des Hauses eröffnet hierbei neue Möglichkeiten, die auch weit über eine herkömmliche Visualisierung hinausgehen. Bei einer klassischen Visualisierung ist es nur möglich, das Gebäude aus einem in der Regel vom Architekten festgelegten festen, meist günstigen, Blickwinkel zu betrachten. Die Möglichkeiten des X3D-Formats gehen weit darüber hinaus. Der Benutzer kann das Haus wirklich benutzen. Sollte die Möglichkeit implementiert sein, das Haus auch direkt mit Möbeln auszustatten, so kann er unter realen Bedingungen alle Aspekte des Hauses untersuchen. Es ist klar, dass natürlich auch Lichtsituationen, etwa ein Tagesverlauf mit entsprechendem Sonnenstand simuliert werden können. Im Rahmen dieser Möglichkeiten hat der Benutzer eine viel größere Chance, Dinge, die ihm gefallen oder eben auch nicht gefallen, vor dem Bau zu bemerken und darauf zu reagieren.

Diese Reaktion kann dadurch erfolgen, dass der Benutzer Dinge, die er gut oder nicht gut findet, markiert. Die Sensoren eines jeden Bauteils reagieren, sobald sich der Benutzer einem Bauteil nähert. Hier hat er die Möglichkeit, sämtliche Eigenschaften des Bauteils zu beurteilen. So kann er beispielsweise bei einer Wand zwar die Position mit „gut“ bewerten, die verwendeten Materialien aber als „schlecht“. Die Komplexität der Menüs lässt sich so anpassen, dass ein Bauherr mit der Vielzahl der Möglichkeiten nicht überfordert wird. Für einen Architekten stehen jedoch sämtliche Optionen zur Verfügung.

Nachdem der Benutzer die Bewertung des Gebäudes abgeschlossen hat, kann das Gebäude, so es Änderungswünsche gibt, wieder der Optimierung zugeführt werden. Dabei werden wie oben beschrieben alle Eigenschaften mit einem sogenannten „Tag“ ausgezeichnet. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Position einer Wand mit einem „Sperrtag“ versehen wird, falls der Benutzer diese mit „gut“ bewertet hat. Die Optimierung kann nun wieder von vorne beginnen, allerdings mit der Einschränkung, dass die für gut befundene Wand nicht verschoben wird. Alles andere darf sich ändern. Dies bedeutet natürlich auch, dass bei jeder Methode, also jeder Rekombination oder Mutation, die Einhaltung von *Sperrtags* implementiert ist.

Des Weiteren geht jede Entscheidung, die ein Bauherr trifft, in sein „Stilprofil“ ein. Eine der Optimierungskategorien ist die Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Stil eines Architekten. In diesem Sinne geht jede einzelne Entscheidung, die er bei der Bewertung eines Entwurfes trifft, in sein Profil ein und wird gespeichert. Diese Erkenntnisse werden dann beim nächsten Projekt in die Ersoptimierung integriert, so dass es sich um ein lernfähiges System handelt, das mit jeder Anwendung der Intention des Architekten näher kommt.



Abbildung 86: Bewertung von Ergebnissen im Browser

6 Fazit und Ausblick

Ausgangspunkt der Arbeit ist der unter 1.1 und 1.2 formulierte Mangel an Qualität des Gebauten und die momentane Machtlosigkeit des Architekten bezogen auf eine Verbesserung dieses Zustands. Hier kann zunächst festgestellt werden, dass gerade diese Punkte durch die vorliegende Arbeit zum Positiven verändert werden können. Es werden so große Zeitressourcen frei, dass sich der Architekt wieder mit seinem baukünstlerischen Auftrag befassen kann. Das in diesem Sinne formulierte Ziel der Arbeit kann also erfüllt werden. Es sollten zunächst jedoch auch einige Ergebnisse der Optimierung betrachtet werden (siehe Anhang A, Abschnitt I), um zu erkennen, was die Software kann und was sie (noch) nicht kann.

6.1 Bewertung der Ergebnisse

Bezogen auf die formulierten Parameter liefert die Software ein optimales Ergebnis im Sinne der unter 1.5.1 und 1.8 beschriebenen Optimierung. Es konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die Grundrisse der errechneten Gebäude bezogen auf die Forderungen nach Raumgrößen, Seitenverhältnis, minimaler Seitenlänge und Verbindungen sehr gut sind. Auch bezogen auf die weiteren Parameter, etwa Baukosten, Energiekosten und Umweltfaktoren ist das Ergebnis sehr gut. Hiermit ist das Hauptziel der Arbeit, die Beschreibung eines Algorithmus der ganzheitlichen Architekturgenerierung, erfüllt.

Das hier entworfene System ist befähigt, nötige Grundvoraussetzungen abzufragen, einen im Sinne der oben formulierten Parameter optimierten Entwurf zu liefern und diese Ergebnisse auszugeben. Für ein einfaches Einfamilienhaus beträgt der Zeitaufwand für die Eingabe der nötigen Daten etwa zehn Minuten. Der Optimierungsprozess läuft ab, ohne dass ein Eingreifen seitens des Benutzers nötig ist. Er kann, je nach Komplexität des Entwurfs, zwischen wenigen Minuten und einigen Stunden dauern. Sollte der Benutzer noch Änderungen wünschen, die eine erneute Optimierung nötig machen, so ist hierfür nochmals etwa der gleiche Zeitaufwand erforderlich. Entscheidend ist, dass dem Architekten mit der ganzheitlichen Architekturgenerierungssoftware ein Werkzeug an die Hand gegeben werden kann, das in der Lage ist, an einem Arbeitstag ein komplett durchgearbeitetes, optimiertes Gebäude zu berechnen. Dieses liegt auch als dreidimensionales Objekt und zur Weiterbearbeitung als CAD-Zeichnung vor. Dies bedeutet, dass die hier vorgestellte Software in der Lage ist, in kürzester Zeit einen Entwurf zu liefern, der die Leistungsphasen 1 bis 4 nach HOAI abdeckt.

Selbst unter Berücksichtigung von einem Arbeitstag zur Nachbereitung der optimierten Ergebnisse ist die Zeit- und damit Geldersparnis des Architekten enorm.

Auch die Möglichkeit der Einarbeitung von Parametern, die bisher nicht unmittelbar in den Entwurfsprozess einfließen konnten, wie etwa die Energieberechnung, die immer einen schon „fertigen“ Entwurf benötigt, ist problemlos. Eine Erweiterung der Software an dieser Stelle, beispielsweise durch Erkenntnisse der Bauphysik mittels einer genaueren Berechnung oder einer Simulation, ist ohne Weiteres möglich. Einzige Forderung ist dabei die mathematische Quantifizierbarkeit und die Integration eines Zielfunktionswertes, der in die Gesamtoptimierung einfließen kann. Doch auch durch die Berechnung nach EnEV kann eine der anfangs formulierten Hauptforderungen nach Integration von Fachwissen prinzipiell als erfüllt angesehen werden und ist analog für alle weiteren Fachbereiche möglich.

6.2 Probleme der Software

Ein erstes Problem, das sich in den Ergebnissen der Software zeigt, ist der Beweis einer Tatsache, die eigentlich wohl keines Beweises mehr bedurft hätte: Ohne eine Lösung der Frage nach dem Baustil kann (zunächst) keine gute Architektur entstehen. Wie bereits oben beschrieben, ist die Bearbeitung der „Stilfrage“ so komplex, dass sie in einer separaten Arbeit betrachtet werden muss (siehe [Sch07; Sch06]). In die vorliegende Arbeit konnte die dort formulierte Optimierung des Stils noch nicht einfließen. Daher ist es evident, dass das so entstandene Ergebnis nicht im Sinne eines optimalen baukünstlerischen Entwurfes verstanden werden kann und darf.

Ein Beispiel hierfür sind die entstandenen Fassaden. Ohne eine ästhetische Bearbeitung der Fassaden, das heißt also nur unter Berücksichtigung der hier formulierten Parameter wie Licht, Baukosten und Energiebilanz, können auch nur rein funktionale Fassaden entstehen. Die Software trifft keine ästhetischen Aussagen bei der Erstellung einer Fassade. Die entscheidenden Faktoren sind hierbei etwa eine Balance zwischen Kosten und nötiger Belichtungsfläche. In der Praxis bedeutet dies, dass die Fenster eines Raumes in der Regel den Mindestanforderungen bezüglich der Belichtungsfläche entsprechen. Hiermit ist gewährleistet, dass die Anforderungen an die Belichtung erfüllt sind. Gleichzeitig werden die Baukosten niedrig gehalten und auch für die Energiebilanz ist es in der Regel günstig, kleine Fensterflächen zu haben. Unter den beschriebenen Umständen ist dies aber nicht als Mangel der

Software oder des Konzepts zu interpretieren, sondern vielmehr als Beweis ihrer Leistungsfähigkeit, da eine geringe Fensterfläche ein optimales Ergebnis bezogen auf die formulierten Anforderungen darstellt. Es kann also auch hier festgestellt werden, dass die Software ihre Funktion erfüllt, dass jedoch zum optimalen Einsatz der Software die Frage nach Ästhetik oder Baustil jedenfalls beantwortet werden muss. Hier sei jedoch nochmals kurz auf die Möglichkeit hingewiesen, dass das Ergebnis der Software eine eigene Ästhetik entwickelt, die sich nicht aus der Betrachtung von Stilmerkmalen ergibt, sondern die daraus entsteht, dass das Gebäude das Ergebnis eines Optimierungsprozesses ist, der im besten Falle dazu führt, dass kein Teil weggelassen werden kann und keiner hinzugefügt werden muss. So gesehen erlangt das Gebäude eine Ästhetik durch sich selbst, so dass der Baustil nicht als Parameter, sondern als Quintessenz des Prozesses zu interpretieren wäre.

Ein praktisches Problem ergibt sich bei der Frage nach der Größe der zugrunde liegenden Material- und Produktdatenbank. Diese sollte ausreichend mächtig sein, um eine echte Optimierung, vor allem bezogen auf Kosten und Energiebilanz, zu ermöglichen. Bei einer kleinen Datenbank sind natürlich auch die diesbezüglichen Ergebnisse in ihrer Vielfalt eingeschränkt. Es handelt sich dann weniger um eine evolutionäre Optimierung, sondern vielmehr um eine vollständige Durchsuchung der Möglichkeiten, da die Menge dieser so klein ist, dass sie mit großer Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Bewertung unterworfen werden. Natürlich sind die Ergebnisse auch so optimal, aber eben nur bezogen auf einen sehr kleinen Suchraum.

Um die Leistungsfähigkeit der Software zu erhöhen, müssen auch weitere Parameter einbezogen werden. Die hier diskutierten Parameter sind nur eine Auswahl, die es ermöglicht, den Ansatz der ganzheitlichen Architekturgenerierung und die Durchführbarkeit einer entsprechenden Optimierung zu zeigen. Der Weg hierzu ist mit den beschriebenen grundsätzlichen Methoden jedoch einfach. Eine Erhöhung der Zahl der Parameter sollte auch bezüglich der Emergenz des Systems angestrebt werden. Der Nachweis einer Emergenz ist zwar schwierig, die Wahrscheinlichkeit des Phänomens erhöht sich hier jedoch mit der Komplexität des Systems.

6.3 Weitere Schritte

Im Zusammenhang mit den aufgetretenen Problemen wurden schon einige der nächsten Schritte angesprochen: Die Bauteil- und Materialdatenbank muss so groß wie möglich werden und die Anzahl der Parameter muss erhöht werden. Bezogen auf den Stil muss dieser entweder als solcher in den Entwurfsprozess integriert werden oder aber es müssen weitere Überlegungen im Sinne einer Ästhetik durch sich selbst, die oben beschrieben wurde, angestellt werden. Dies ist sicher ebenfalls nach einer Erhöhung der Anzahl der Parameter sinnvoll.

Darüber hinaus sollten so viele und so gute Detaillösungen wie möglich in das Gesamtsystem integriert werden. Hier sind zuallererst die Bereiche zu nennen, die in der Regel von Fachingenieuren, also vor allem in der Statik, Bauphysik und Elektroplanung bearbeitet werden. Eine Integration von spezialisierten Lösungen kann die Relevanz des Gesamtsystems stark erhöhen. Nicht zuletzt, da sich hier die Möglichkeit bietet, die Arbeit dieser Fachbereiche wirklich in den Entwurfsprozess zu integrieren, also im Prinzip zu parallelisieren, anstatt die Planungen wie herkömmlich seriell zu verarbeiten. Doch auch für viele andere hier angesprochene Bereiche ist eine vertiefende Bearbeitung sinnvoll. Die vorliegende Arbeit ist eine Grundlagenarbeit, die zeigt, dass der Ansatz zur ganzheitlichen Generierung von Architektur funktioniert. Weitere Arbeit, beispielsweise an der Frage der Energieverbrauchsberechnung ist aber wünschenswert.

Um eines der Hauptziele der Arbeit, die Verkürzung des Planungsweges für den Architekten, also die schnellere Planung zur Freimachung von Ressourcen zur künstlerischen Arbeit, zu optimieren, erscheint es sinnvoll, die nötigen, aber wenig kreativen Arbeiten weiter zu automatisieren. So ist es auch nur eine Frage des Aufwands, die bestehende Bauteil- und Materialdatenbank um Standarddetails zur Ausführungsplanung zu erweitern. Dass es nur ein relativ geringer und keinesfalls komplexer Vorgang ist, die Software um ein automatisiertes Ausfüllen der meisten nötigen Formulare zur Einreichung des Bauvorhabens bei der Baugenehmigungsbehörde zu erweitern, kann festgehalten werden.

In diesem Zusammenhang ist es auch sinnvoll, eine Anbindung an bestehende Baudatenbanken, beispielsweise Baukostendienste, herzustellen. Diese sind oftmals auch mit Standardausschreibungstexten versehen, so dass eine vollständig automatisierte Arbeit einschließlich

der Vorbereitung für die Vergabe erreichbar ist. Aus Sicht der Informatik handelt es sich um absolut banale Aufgabenstellungen, deren Umsetzung keiner speziellen Fachkompetenz eines Informatikers bedarf, sondern nur der eines Programmierers. Im Zusammenspiel mit der hier entworfenen, funktionierenden Architekturgenerierungssoftware ist eine solche automatisierte Planung nur eine Frage des Aufwands. Eine Erweiterung um die Leistungsphasen 5 und 6 ist somit in Reichweite.

Auch die Integration von neuen Kategorien sollte in weiteren Schritten geplant werden. Ebenso ist die Integration von eigenen Algorithmen in den Gesamtalgorithmus kein Problem. In diesem Sinne ist auch die Einarbeitung sinnvoller Simulationen folgenden Arbeiten vorbehalten. Hier gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit der Gesamtsoftware durch koordinierte Integration solcher Arbeiten zu erweitern.

6.4 Schluss

Mit den hier geforderten weiteren Schritten ist es möglich, eine ganzheitliche – auch auf die Fachingenieure bezogene – Planung, die sämtliche technische Anforderungen, alle Bauteile dreidimensional, alle Details, die detaillierte Kostenberechnung, die Darstellung im dreidimensionalen Raum und sogar die Ausschreibungstexte enthält, innerhalb weniger Stunden durchzuführen. Die Zeit- und damit Kostenersparnis ist enorm.

Der Architekt ist heute in hohem Maße ein Problemlöser, ein Einarbeiter von Fachwissen, das von anderer Stelle kommt. Die ganzheitliche Architekturgenerierung gibt ihm die Möglichkeit, sehr schnell einen Entwurf zu erhalten, der diese Kompetenz bereits beinhaltet. Seine Kompetenz, die im Bereich der Gestaltung liegt, wird gerade hierdurch wieder wichtiger und stärker. Er kann seine Kernaufgaben freier ausüben und erhält bei Bedarf sofortiges Feedback auf seine Änderungen. Er ist nicht mehr nur der passive Gestalter, der auf die Probleme, die sich in anderen Bereichen ergeben, reagieren muss, sondern er kann aktiv planen. Er erhält natürlich in seiner Eigenschaft als Fachmann auch wesentlich weitreichendere Möglichkeiten, in die Gestaltung der Parameter einzugreifen, nicht zuletzt durch die Möglichkeit der Gewichtung von Parametern. Hiermit erhält er die Möglichkeit, die Präferenzen eines Entwurfes entsprechend den Gegebenheiten anzupassen, beziehungsweise einen Rahmen für die weitere Entwicklung vorzugeben. Nicht zuletzt wird durch sein Feedback sein Architektenprofil stetig verändert, bis es seinen Prinzipien und Vorlieben so gut

wie möglich entspricht. Der Architekt selbst ist also für die Optimierung ein Umweltfaktor im systemischen Sinne, der auf die Ergebnisse Einfluss nimmt.

Es ist nicht Ziel der ganzheitlichen Architekturgenerierung, „Computerarchitektur“ zu erzeugen. Das Ergebnis der ganzheitlichen Architekturgenerierung wird oftmals sehr einfach sein, ja es wird vielleicht sogar banal erscheinen. Dies liegt aber daran, dass die Ergebnisse nicht darauf abzielen, spektakuläre Architektur zu liefern, die in ihrer geometrischen Ausprägung nur mit einem Computer beherrschbar ist. Zwar ist es prinzipiell mit der Software natürlich möglich, auch solche Geometrien zu beherrschen, doch wird diese Art der Architektur hier bewusst ausgeklammert, da sie die Prinzipien und ins Feld geführten Beispiele der ganzheitlichen Architekturgenerierung verwässern und vom Kern der Dinge ablenken würde. Es wurde daher hier fast ausschließlich mit rechteckigen Formen gearbeitet, was jedoch keine Systembeschränkung, sondern eine freiwillige Selbstbeschränkung zur Erhöhung der Klarheit ist. Es sei auch darauf hingewiesen, dass die Beherrschung komplexer Formen mit dem Computer aus Sicht der Informatik fast ebenso banal ist, wie die Beherrschung von Quadraten, lediglich der Rechenaufwand ist höher. Das hier gesteckte und erreichte Ziel war es vielmehr, völlig „normale“ Architektur zu liefern, die jedoch auf umfangreichem Wissen basiert und die aus Wechselbeziehungen zwischen Parametern entsteht, die sich in ihrer Komplexität dem einfachen Betrachten entziehen. Dabei ist die Komplexität oftmals nicht auf den ersten Blick erkennbar, sie ist jedoch systemimmanent und ergibt sich aus der Summe ihrer Parameter.

Der so entstehende Freiraum des Architekten riesig. Er könnte sich wieder voll seinen baukünstlerischen Aufgaben und Verpflichtungen widmen und darangehen, auf Grundlage einer automatisierten Planung die anfangs formulierten Mängel der derzeitigen Bautätigkeit zu beseitigen.

A Anhang: Ergebnisse

I. Berechnete Gebäude

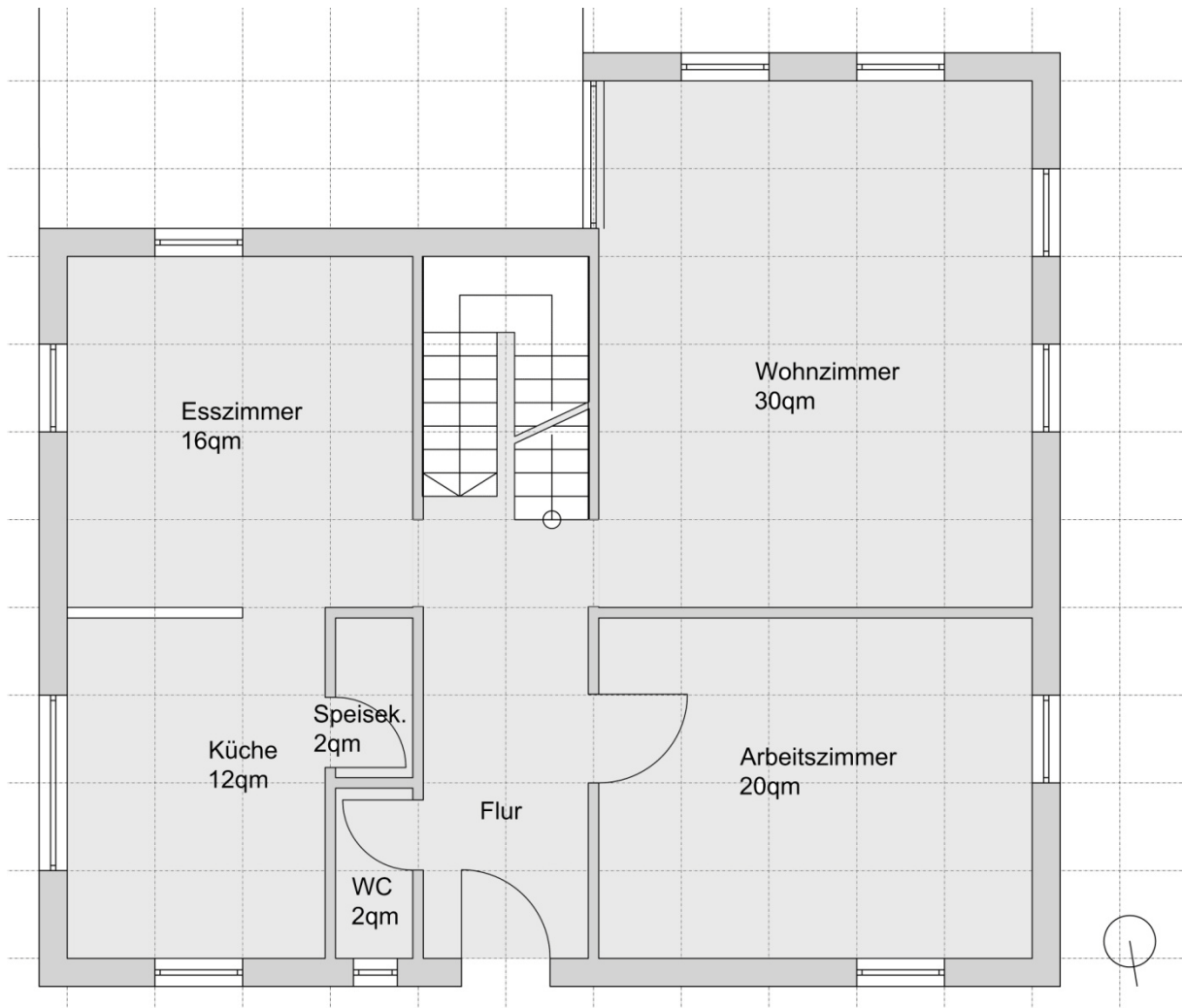


Abbildung 87: Beispielergebnis 1, EG

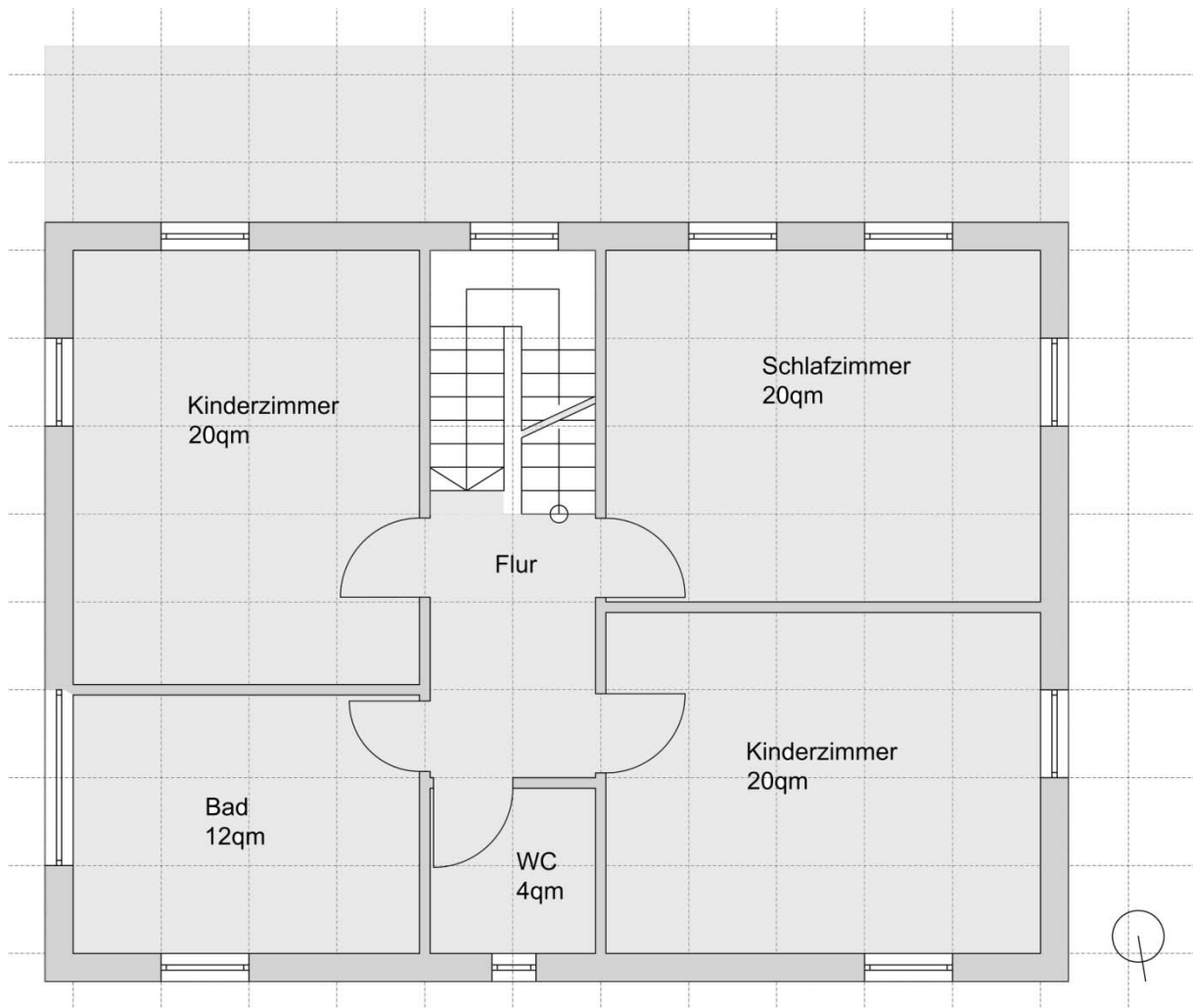


Abbildung 88: Beispielergebnis 1, OG

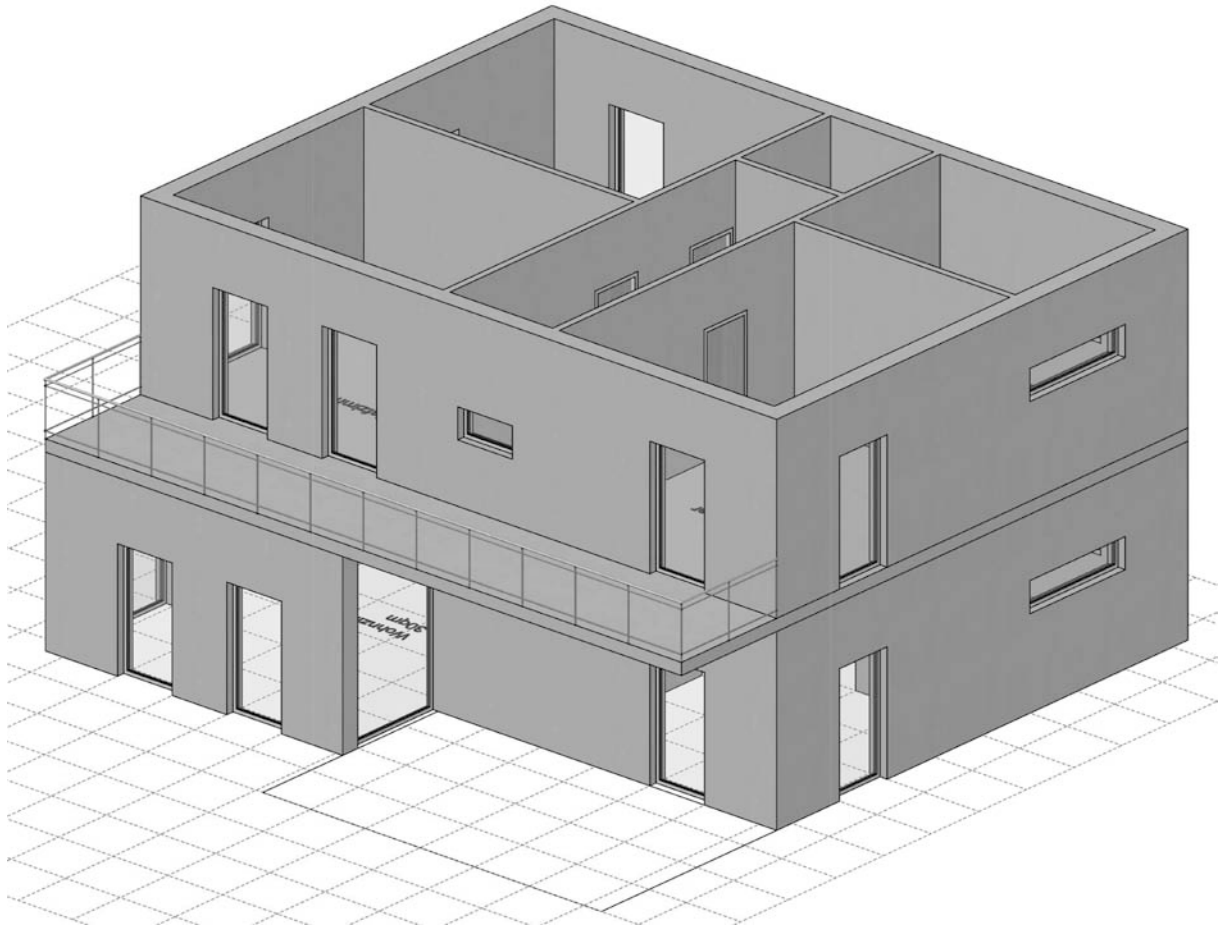


Abbildung 89: Beispielergebnis 1, Isometrie

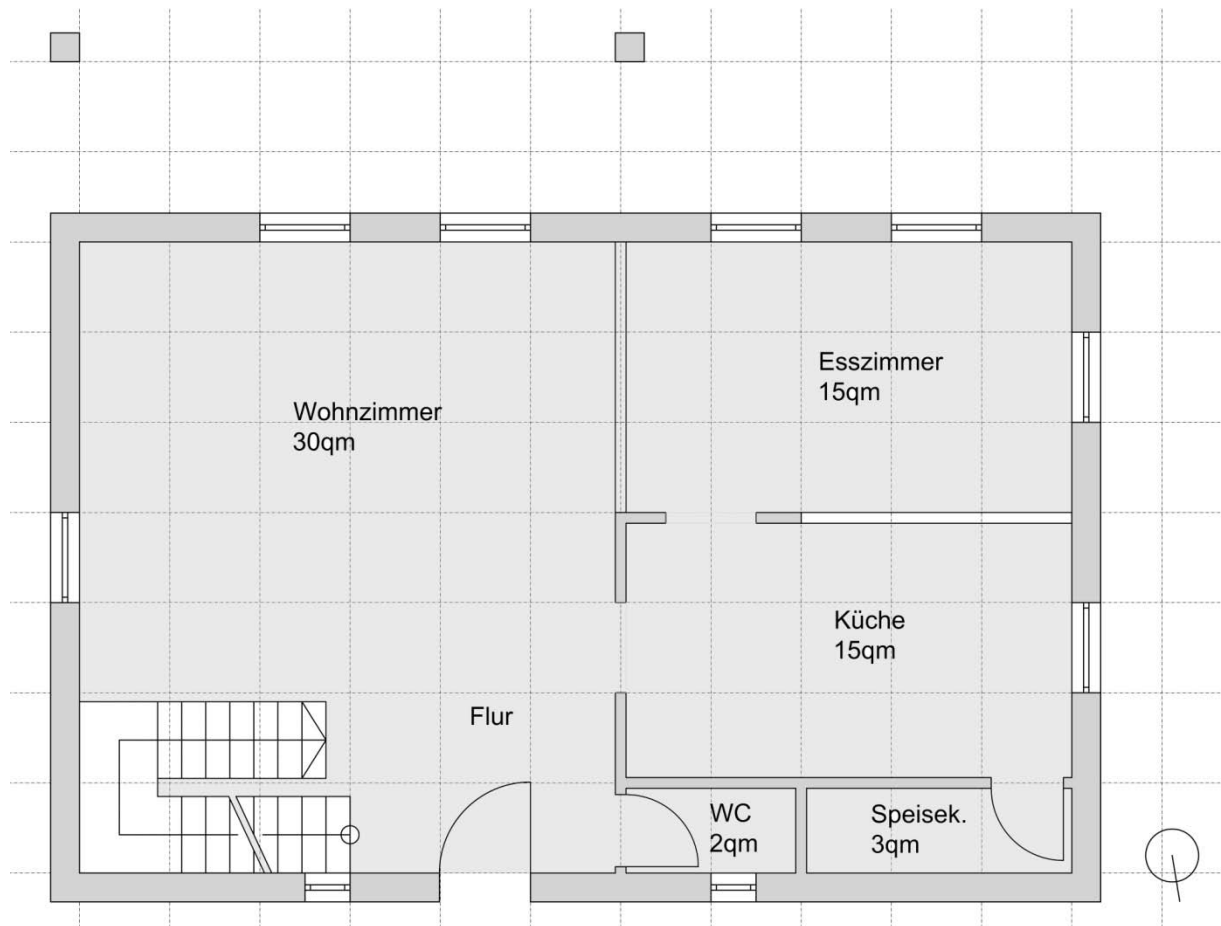


Abbildung 90: Beispielergebnis 2, EG

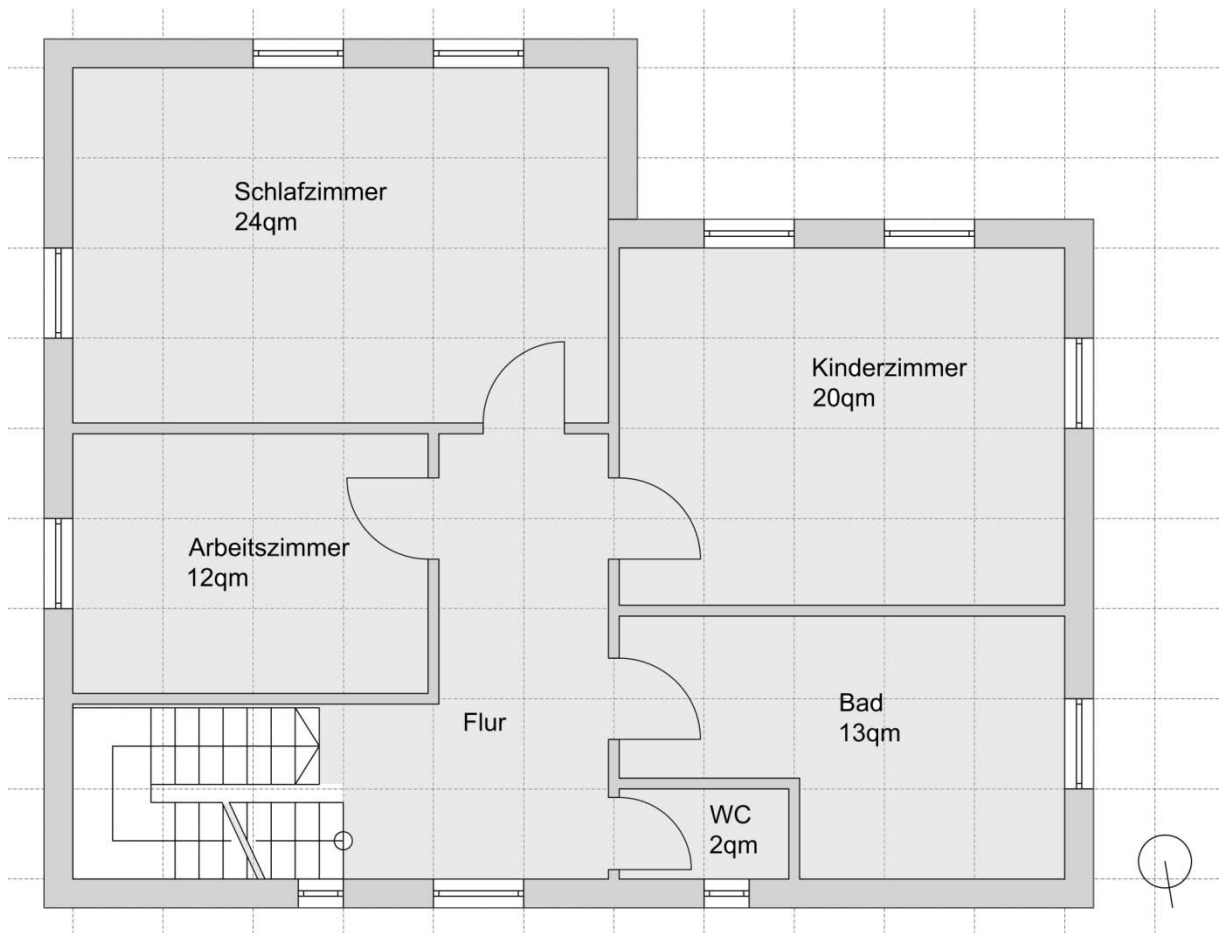


Abbildung 91: Beispielergebnis 2, OG

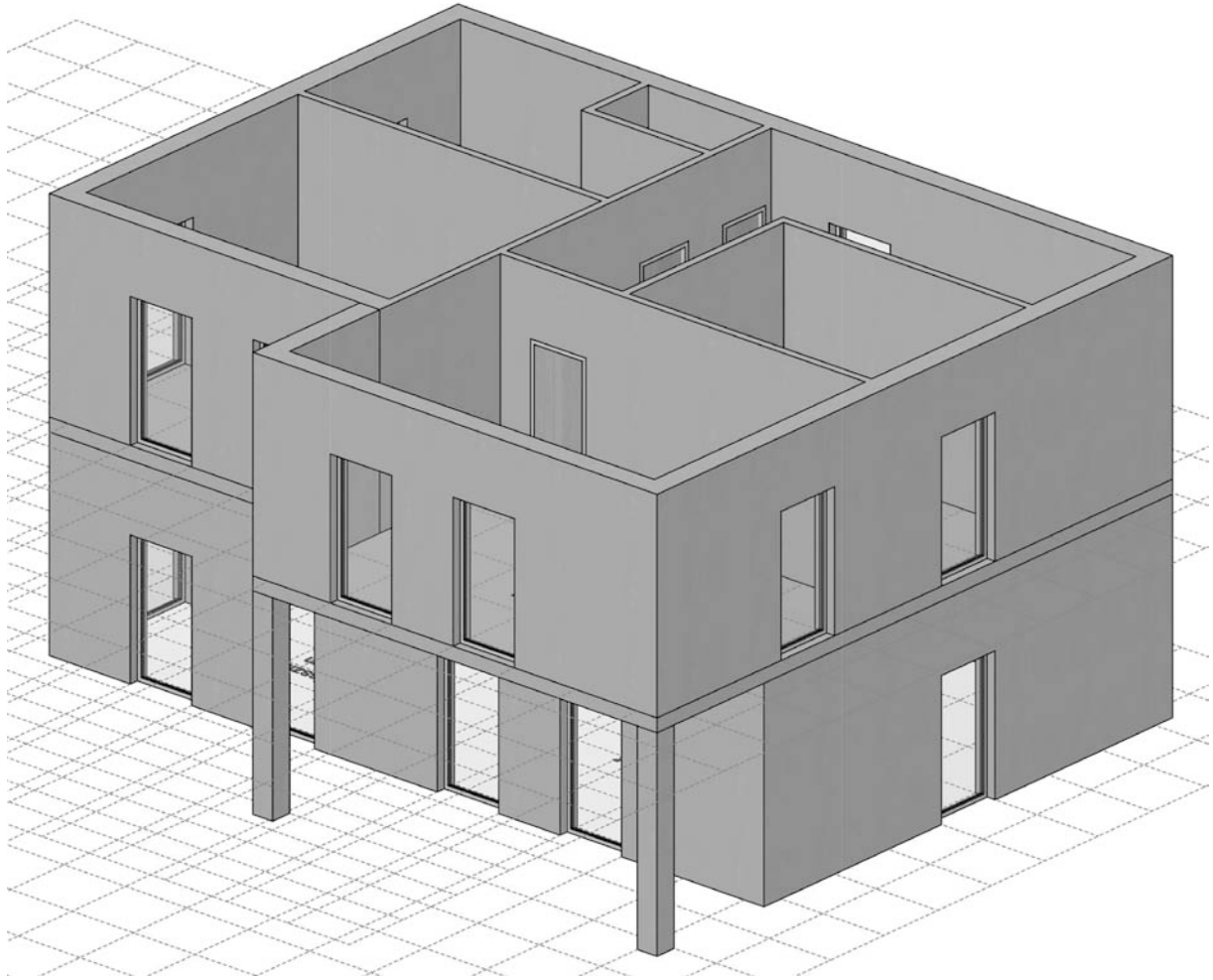


Abbildung 92: Beispielergebnis 2, Isometrie

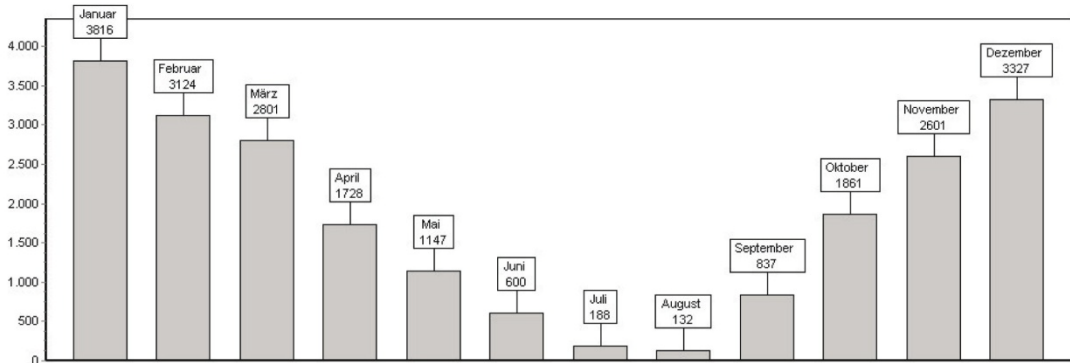
II. Energiebilanz

Bauvorhaben: Testbauvorhaben		Projekt-Nr.: 0001			
Monatsbilanzverfahren					
Volumen Flächen	Gebäudevolumen in m ³	$V_e =$	1230,07		
	reines Luftvolumen	$V = V_e \cdot 0,8$ bzw. $0,76$	934,85		
	Gebäudenutzfläche in m ²	$A_N = V_e \cdot 0,32$	393,62		
	Flächen-Volumenverhältnis	$A/V_e =$	0,5		
1. Transmissionswärmeverlust					
Bauteil		Fläche [m ²]	U-Wert [W/m ² K]	F_{xi}	H_T [W/K]
Außentür 0 in Außenwand 0		1,89	1,2	1	2,27
Außenwand 0		8,2	0,22	1	1,8
Fenster 0 in Außenwand 1		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 1		19,59	0,22	1	4,31
Fenster 0 in Außenwand 2		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 2		17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 3		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 3		4,86	0,22	1	1,07
Fenster 0 in Außenwand 4		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 4		8,59	0,22	1	1,89
Fenster 0 in Außenwand 5		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 5		6,99	0,22	1	1,54
Fenster 0 in Außenwand 6		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 6		3,95	0,22	1	0,87
Fenster 0 in Außenwand 7		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 7		17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 8		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 8		2,64	0,22	1	0,58
Fenster 0 in Außenwand 9		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 9		11,63	0,22	1	2,56
Fenster 0 in Außenwand 10		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 10		7,28	0,22	1	1,6
Fenster 0 in Außenwand 11		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 11		8,59	0,22	1	1,89
Fenster 0 in Außenwand 12		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 12		11,63	0,22	1	2,56
Fenster 0 in Außenwand 13		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 13		7,28	0,22	1	1,6
Fenster 0 in Außenwand 14		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 14		4,86	0,22	1	1,07
Fenster 0 in Außenwand 15		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 15		17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 16		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 16		3,95	0,22	1	0,87
Fenster 0 in Außenwand 17		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 17		17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 18		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 18		2,64	0,22	1	0,58
Fenster 0 in Außenwand 19		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 19		8,59	0,22	1	1,89
Fenster 0 in Außenwand 20		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 20		6,99	0,22	1	1,54
Fenster 0 in Außenwand 21		1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 21		8,59	0,22	1	1,89
Fenster 0 in Außenwand 22		1,5	1,2	1	1,8

Bauteil	Fläche [m²]	U-Wert [W/m²K]	F _{xi}	H _T [W/K]
Außenwand 22	8,59	0,22	1	1,89
Fenster 0 in Außenwand 23	1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 23	6,99	0,22	1	1,54
Fenster 0 in Außenwand 24	1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 24	11,63	0,22	1	2,56
Fenster 0 in Außenwand 25	1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 25	17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 26	1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 26	17,08	0,22	1	3,76
Fenster 0 in Außenwand 27	1,5	1,2	1	1,8
Außenwand 27	3,95	0,22	1	0,87
Dachfläche 0	150	0,36	1	54
Boden	150	0,3	0,6	27
wärmeübertragende Flächen A [m²] =	612,89		H _T [W/K] =	191,38
Wärmebrücken	ohne genauen Nachweis	Fläche * 0,10	H _T [W/K] =	61,29
			H _T [W/K] =	252,67
zulässiger Maximalwert \dot{H}' [W/m²K] =	0,6	> H \dot{H} vorhanden =		0,41

monatliche Transmissionswärmeverluste

Transmissionswärmeverluste



2. Lüftungswärmeverlust

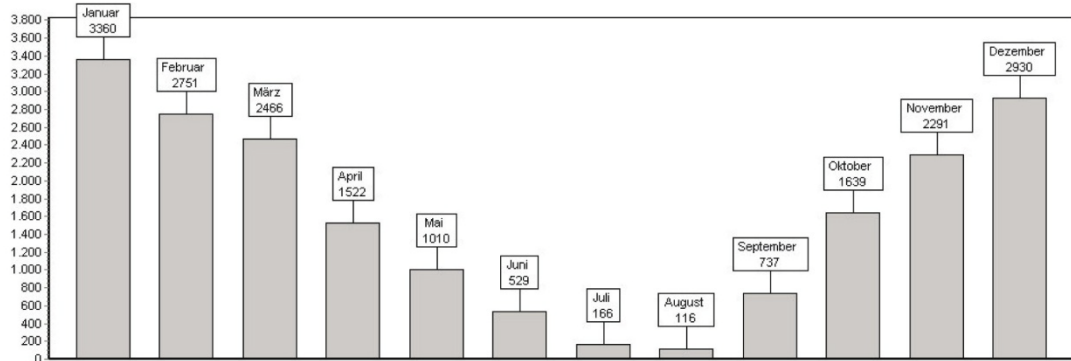
freie Lüftung ohne Dichtigkeitsnachweis $n = 0,7 \text{ 1/h}$

wirksame Wärmespeicherfähigkeit der Luft	beheiztes Luftvolumen V	Luftwechselrate n
0,34	935	0,7

$H_V \text{ [W/K]} = 222,49$

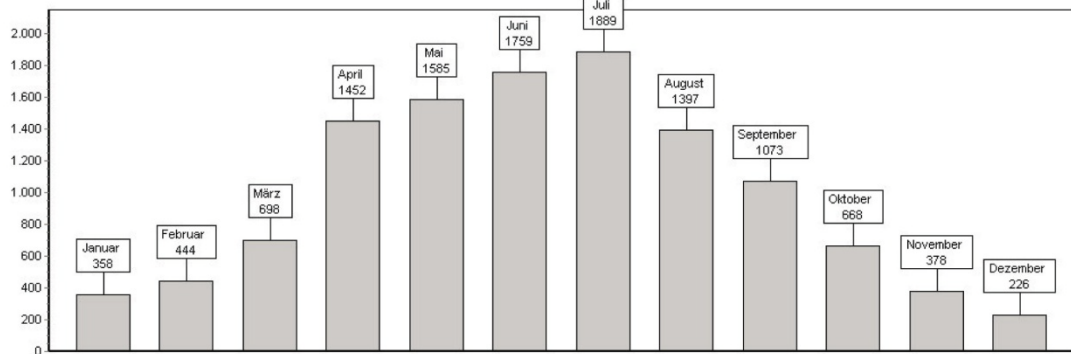
monatliche Lüftungswärmeverluste

Lüftungs-
wärmeverluste



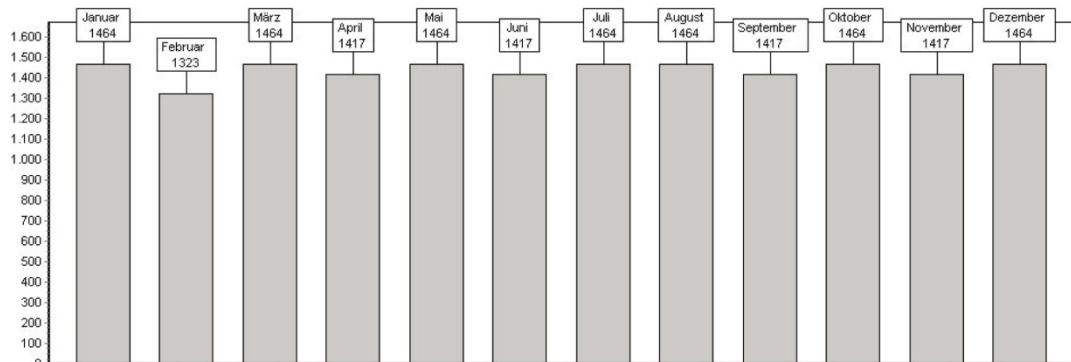
3. Solare Gewinne

Solare Gewinne



4. Interne Gewinne

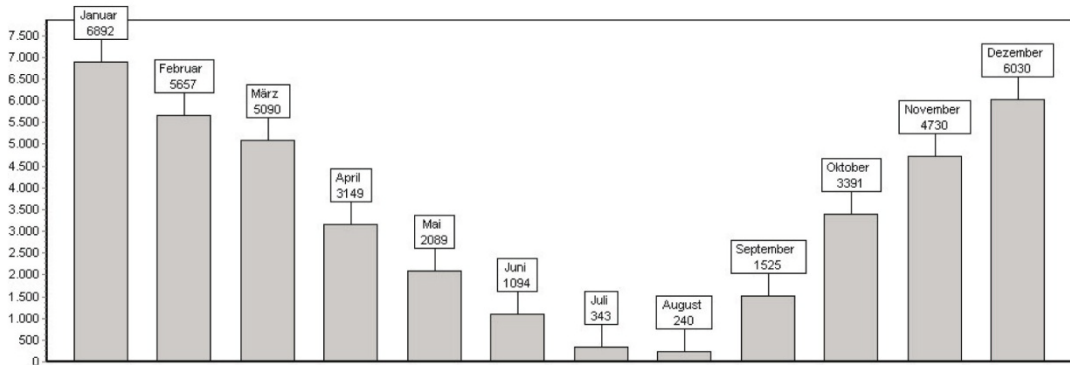
Interne Gewinne



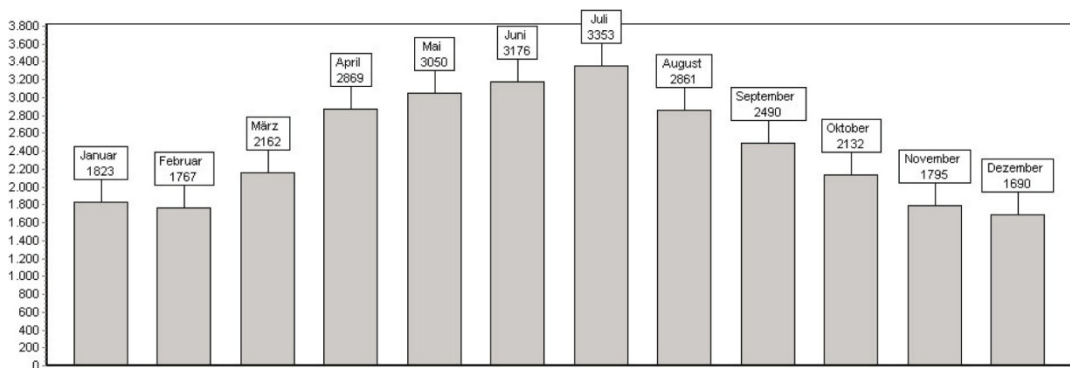
5. Gewinn-/Verlustverhältnis

Gewinn-/Verlustverhältnis unter Berücksichtigung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit, sowie einer eventuellen Nachtabschaltung

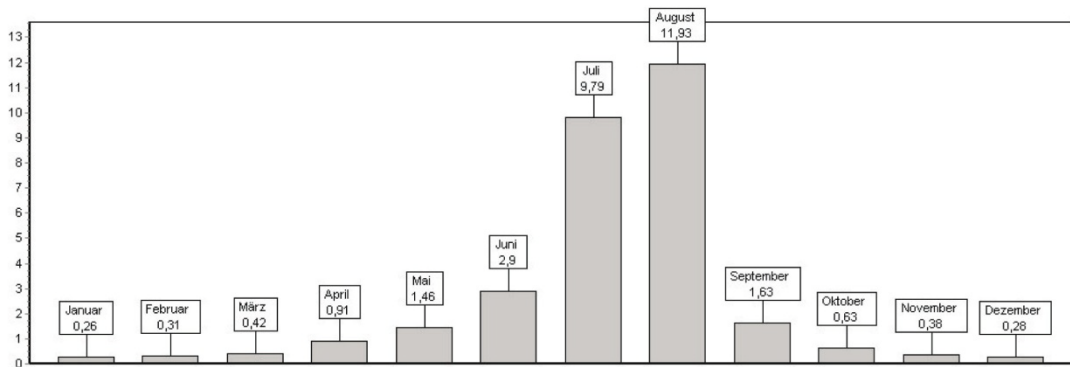
monatliche Verluste



monatliche Gewinne



Gewinn-/Verlustverhältnis



Gewinne/Verluste

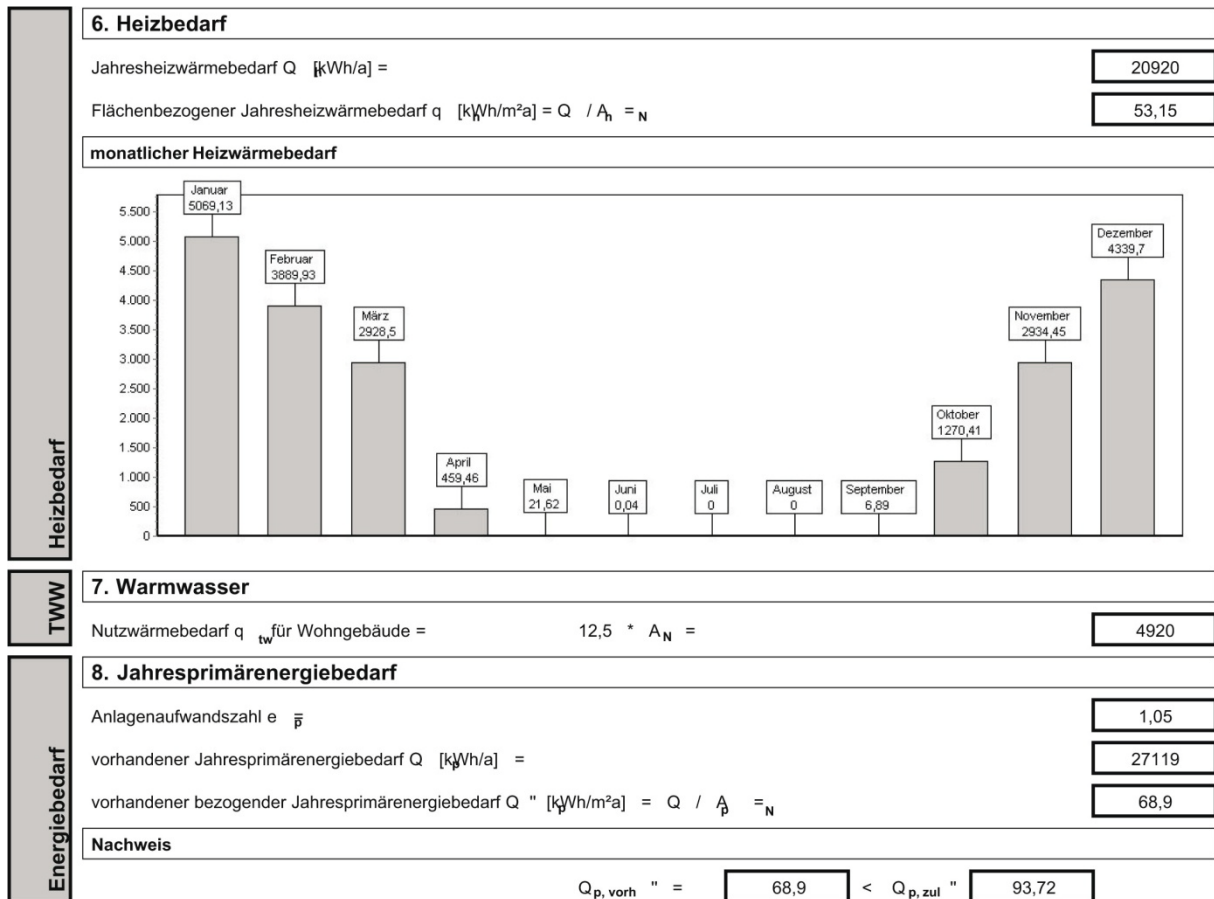


Abbildung 93: Beispiel einer automatisch erstellten Energiebilanz

Literaturverzeichnis

[Akai08] **Arbeitskreis Architekturinformatik (akai)**. 129.187.53.14. *AKAI*. [Online] 2008. [Zitat vom: 5. Februar 2008.] <http://129.187.53.14/~akai/index.php/Positionspapier>.

[ETH04] **ETH Zürich**. CAAD.HBT.ETHZ.CH . Kaisersrot. [Online] 2004. [Zitat vom: 5. Februar 2008.] <http://wiki.arch.ethz.ch/twiki/bin/view/Kaisersrot/ParzellenP>.

[Ima01] **Images Australia Pty Ltd**. *Cyberspace: The World of Digital Architecture*. Mulgrave, Victoria : Images Publishing, 2001.

[dtv99] *dtv Lexikon*. Mannheim : Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH, 1999.

[Ent09] Entwurfsgenerator. [Online] [Zitat vom: 16. Februar 2009.] <http://www.entwurforschung.de/Entwurfsgenerator/index.htm>.

[GEM09] GEMIS Website. [Online] [Zitat vom: 16. Februar 2009.] <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>.

[Hon01] *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure in der ab 1. Januar 2002 gültigen Fassung in Euro*. Stuttgart : Kohlhammer, 2001.

[Alb88] **Alberti, Leon Battista**. *Zehn Bücher über die Baukunst / Leon Battista Alberti. Ins Dt. übertr., eingeleitet u. mit Anm. u. Zeichn. vers. durch Max Theuer*. [Übers.] Max Theuer. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1988.

[Bae05] **Baecker, Dirk, [Hrsg.]**. *Schlüsselwerke der Systemtheorie*. Wiesbaden : VS, Verl. für Sozialwiss., 2005.

[Bak87] **Baker, J. E.** Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm. *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their Application*. 1987, S. 14-21.

[Bal99] **Balzert, Heide**. *Lehrbuch der Objektmodellierung: Analyse und Entwurf*. Heidelberg, Berlin : Spektrum, Akademischer Verlag, 1999.

[Ber03] **Berka, Walter, [Hrsg.]**. *Woher kommt das Neue? : Kreativität in Wissenschaft und Kunst*. Wien, Köln, Weimar : Böhlau, 2003.

- [Bli95] **Blickle, Tobias und Thiele, Lothar.** A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms. *TIK-Report Nr. 11*. Zürich : Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1995.
- [Bli97] **Blickle, Tobias.** Theory of Evolutionary Algorithms and Application to System Synthesis. *TIK-Schriftenreihe Nr. 17*. 1997.
- [Can95] **Cantú-Paz, E.** A Summary of Research on Parallel Genetic Algorithms. . *Technical Report IlliGAL No. 95007, University of Illinois at Urbana-Champaign*. Juli 1995.
- [Chi94] **Chipperfield, A. J. und Fleming, P. J.** *Parallel Genetic Algorithms: A Survey. Technical Report No. 518*. Sheffield : Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, 1994.
- [Cor04] **Cormen, Th. H., Leiserson, C. E. und Stein, C.** *Algorithmen : eine Einführung*. München, Wien : Oldenbourg, 2004.
- [Dar59] **Darwin, Charles.** *On the origin of species by means of natural selection*. London : Murray, 1859.
- [deB00] **de Berg, Mark, et al.** *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hing Kong, London, Milan, Paris, Singapore, Tokyo : Springer, 2000.
- [Deb01] **Deb, Kalyanmoy.** *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester : Wiley & Sons, 2001.
- [DeP07] **DePauli-Schimanovich, Werner.** *EUROPOLIS4 - Kultur, Politik, Musik, Revolutionäres, Historisches, Literarisches*. [Hrsg.] Norbert Rozsenich. Wien : Novum-Verlag, 2007. Bd. 4.
- [Erk00] **Erk, Katrin und Priese, Lutz.** *Theoretische Informatik : Eine umfassende Einführung*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio : Springer, 2000.
- [Fra95] **Frazer, John.** *An Evolutionary Architecture*. London : Architectural Association, 1995.

[Frö06] **Fröhlich, Peter J.** *Hochbaukosten - Flächen - Rauminhalte : Kommentar zur DIN 276, DIN 277 und DIN 18960. 13., überarbeitete Auflage.* Wiesbaden : Vieweg, 2006.

[Ger04] **Gerdes, Ingrid, Klawonn, Frank und Kruse, Rudolf.** *Evolutionäre Algorithmen : genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen.* Wiesbaden : Vieweg, 2004.

[Goo04] **Goodman, Jacob E. und O'Rourke, Joseph.** *Handbook of Discrete and Computational Geometry, Second Edition.* Boca Raton : CRC Press, 2004.

[Has05] **Hasselmann, Willi und Weiß, F. Knut.** *Normengerechtes Bauen : Kosten, Grundflächen und Rauminhalte von Hochbauten nach DIN 276 und DIN 277. 19., überarbeitete und erweiterte Auflage.* Köln : Müller, 2005.

[Haw06] **Hawkins, Jeff.** *Die Zukunft der Intelligenz : wie das Gehirn funktioniert, und was Computer davon lernen können.* Reinbek bei Hamburg : Rowohlt-Taschenbuch-Verlag, 2006.

[Heg02] **Hegner, Hans-Dieter und Vogler, Ingrid.** *Energieeinsparverordnung EnEV - für die Praxis kommentiert: Wärmeschutz und Energiebilanzen für Neubau und Bestand. Rechenverfahren, Beispiele und Auslegungen für die Praxis.* Berlin : Ernst, 2002.

[Hic08] **Hickman, Cleveland P., et al.** *Zoologie.* München : Pearson Education, 2008.

[Hof91] **Hofstadter, Douglas R.** *Gödel Escher Bach - ein Endloses Geflochtenes Band.* München : dtv, 1991.

[Hor03] **Horn, Christian, Kerner, Immo O. und Forbrig, Peter, [Hrsg.].** *Lehr- und Übungsbuch Informatik 1. Grundlagen und Überblick.* München : Hanser Fachbuchverlag, 2003.

[Hos01] **Hosser, Dietmar.** Brandschutzkonzept für die 'Arena auf Schalke' in Gelsenkirchen. *Kurzreferate. 9. Internationales Brandschutz-Symposium. "Ingenieurmethoden für die Brandsicherheit". München, 25. und 26. Mai 2001.* Braunschweig : TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz -iBMB-, 2001, S. 263-282.

[bui09] **IAI, buildingSmart - Industrieallianz für Interoperabilität -.** buildingSmart. [Online] [Zitat vom: 17. Februar 2009.] <http://www.buildingsmart.de/>.

- [Kri96] **Krieger, David J.** *Einführung in die allgemeine Systemtheorie*. München : Fink, 1996.
- [Kup05] **Kupfer, Dominik, [Hrsg.]**. *Landesbauordnung für Baden-Württemberg*. München : Beck, 2005.
- [Lin89] **Linder, Hermann, et al.** *Linder Biologie*. 20. s.l. : Metzler, 1989.
- [Lyn99] **Lynn, Greg.** *Animate form*. New York : Princeton Architectural Press, 1999.
- [Lyn02] **Lynn, Greg und Rashid, Hani.** *Architectural laboratories*. Rotterdam : NAI publishers, 2002.
- [Men05] **Menzel, Klaus.** *Algorithmen. Vom Problem zum Programm*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2005.
- [Mie98] **Miettinen, Kaisa M.** *Nonlinear multiobjective optimization*. Boston, London, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999. International Series in Operations Research & Management Science ; 12.
- [Neu00] **Neufert, Ernst.** *Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel; Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden*. 36., erw. und überarb. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 2000.
- [Nis94] **Nissen, Volker.** *Evolutionäre Algorithmen : Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten*. Wiesbaden : Dt. Univ.-Verl. , 1994.
- [Obe07] **Oberstenfeld, Wolfgang.** *TSP - Traveling Salesman Problem: Das Lösungsverfahren*. s.l. : GRIN Verlag, 2007.
- [Pen05] **Peng, Yu, et al.** A new algorithm for Boolean operations on general polygons. *Computers & Graphics* 29. 2005, S. 57-70.
- [Poh00] **Pohlheim, Hartmut.** *Evolutionäre Algorithmen - Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio : Springer, 2000.

- [Pom08] **Pomberger, Gustav und Dobler, Heinz.** *Algorithmen und Datenstrukturen: Eine systematische Einführung in die Programmierung.* München : Pearson Education, 2008.
- [Ric04] **Richter, Klaus und Rost, Jan-Michael.** *Komplexe Systeme.* Frankfurt am Main : Fischer-Taschenbuch-Verlag, 2004.
- [Riv00] **Rivero, M. und Feito, F. R.** Boolean operations on general planar polygons. *Computers & Graphics* 24. 2000, S. 881-896.
- [Roh08] **Rohde, Christoph.** *Die Energieeinsparverordnung 2007.* Hamburg : Diplomica Verlag, 2008.
- [Rot27] **Roth, Alfred.** *Zwei Wohnhäuser von Le Corbusier und Pierre Jeanneret.* Stuttgart : Akad. Verlag Dr. Fr. Wedekind & Co, 1927.
- [Rud89] **Rudofsky, Bernard.** *Architektur ohne Architekten : eine Einführung in die anonyme Architektur.* Salzburg, Wien : Residenz-Verlag, 1989.
- [San90] **Sandkühler, Hans Jörg, [Hrsg.].** *Europäische Enzyklopädie zu Philosophie und Wissenschaften.* Hamburg : Meiner, 1990. Bd. 2.
- [Sch96a] **Schmitt, Gerhard.** *Architektur mit dem Computer.* Braunschweig, Wiesbaden : Vieweg, 1996.
- [Sch05] **Schnase, Alfons.** *Evolutionäre Erkenntnistheorie und biologische Kulturtheorie.* Würzburg : Königshausen und Neumann, 2005.
- [Sch03] **Schneider, Philip J. und Eberly, David H.** *Geometric Tools for Computer Graphics.* Amsterdam, Boston, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo : Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- [Sch02] **Schreckenberg, Michael, [Hrsg.].** *Pedestrian and evacuation dynamics.* Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo : Springer, 2002.
- [Sch01] **Schüle, Johann August und Brunner, Karl-Michael.** *Soziologische Theorien.* Wien, New York : Springer, 2001.

- [Sch07] **Schwarz, Jovincet.** *Ansatz zur computergesteuerten Generierung von Architekturstilen und der Abbildung von Entscheidungsprozessen eines Architekten (Dissertation, in Arbeit).* Stuttgart : Universität Stuttgart, Institut für öffentliche Bauten und Entwerfen, 2007.
- [Sch06] —. *Computergenerierter Wohnungsbau (Diplomarbeit Sommersemester 2006).* Stuttgart : Universität Stuttgart, Institut für öffentliche Bauten und Entwerfen, 2006.
- [Sch92] **Schwefel, Hans-Paul und Kursawe, Frank.** Künstliche Evolution als Modell für natürliche Intelligenz. [Hrsg.] Werner Nachtigall. *Technische Biologie und Bionik 1 / 1. Bionik-Kongress, Wiesbaden 1992, BIONA report 8.* Stuttgart : G. Fischer, 1992, S. 73-91.
- [Sch96] **Schwehm, M.** *Globale Optimierung mit massiv parallelen genetischen Algorithmen.* s.l. : Universität Erlangen-Nürnberg, 1996. Dissertation.
- [Sed02] **Sedgewick, Robert.** *Algorithmen.* München : Pearson Studium, 2002.
- [Sei92] **Seiffert, Helmut.** *Einführung in die Wissenschaftstheorie.* München : Beck, 1992. Bd. 3.
- [Spu04] **Spuybroek, Lars.** *Nox : machining architecture ; Bauten und Projekte.* München : Dt. Verl.-Anst., 2004.
- [Sta07] **Starke, Gernot.** *Software-Architekturen : Ein praktischer Leitfaden.* München : Hanser Verlag, 2007.
- [Ste01] **Steele, James.** *Architektur und Computer : Planung und Konstruktion im digitalen Zeitalter.* München : Callwey, 2001.
- [Ste06] **Steinmüller, Karlheinz und Steinmüller, Angela.** *Die Zukunft der Technologien.* Hamburg : Murmann, 2006.
- [Süß04] **Süß, Sabine [Red.].** *Design und Architektur: Studium und Beruf: Fakten, Positionen, Perspektiven.* [Hrsg.] Internationales Forum für Gestaltung Ulm. Basel, Boston, Berlin : Birkhäuser, 2004.

[Tit03] **Tittmann, Peter.** *Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung.* München, Wien : Hanser Verlag, 2003.

[vBr99] **van Bruggen, Coosje.** *Frank O. Gehry - Guggenheim Museum Bilbao.* New York : Guggenheim Museum Publ., 1999.

[Vol06] **Volland, Karlheinz und Volland, Johannes.** *Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2006 : Schritt für Schritt zum Energieausweis für Wohngebäude.* Köln : R. Müller, 2006.

[vRi08] **von Rimscha, Markus.** *Algorithmen kompakt und verständlich: Lösungsstrategien am Computer.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2008.

[Wah91] **Wahrig, Gerhard.** *Deutsches Wörterbuch.* Gütersloh, München : Bertelsmann-Lexikon-Verlag, 1991.

[Wei07] **Weicker, Karsten.** *Evolutionäre Algorithmen.* Wiesbaden : Teubner, 2007.

[Wil91] **Willke, Helmut.** *Systemtheorie : Teil 1, Eine Einführung in die Grundprobleme der Theorie sozialer Systeme.* Stuttgart, New York : Gustav Fischer Verlag, 1991.

[Yon07] **Yong, Kui Liu, et al.** An algorithm for polygon clipping, and for determining polygon intersections and unions. *Computers & Geosciences* 33. 2007, S. 589-598.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Projekt Kaisersrot (Quelle: Internetseite des Projekts)	20
Abbildung 2: Der Entwurfsgenerator (Quelle: www.entwurforschung.de).....	21
Abbildung 3: Strukturdiagramm der ganzheitlichen Architekturgenerierung.....	36
Abbildung 4: Beispiel einer Optimierungsfunktion mit einem Parameter	50
Abbildung 5: Vorgeschlagene Kategorien	53
Abbildung 6: Nutzerbedürfnisse	55
Abbildung 7: Webinterface zur Erfassung von Randbedingungen	60
Abbildung 8: Randbedingungen auf Projekt- und Grundstücksebene	61
Abbildung 9: Randbedingungen der geographischen Lage	62
Abbildung 10: Hierarchische Ebenen des Klassenmodells.....	67
Abbildung 11: Boolesche Operationen	70
Abbildung 12: Struktur der Material- und Bauteildatenbank.....	72
Abbildung 13: Beispiele generierter Außenformen	81
Abbildung 14: Beispiele generierter Flure in Kombination mit Außenformen.....	82
Abbildung 15: Beispiele generierter Treppen	84
Abbildung 16: Grundrissbezogene Komplexitätsebenen.....	85
Abbildung 17: Das Gebäude nach dem vierten Schritt	87
Abbildung 18: Der fertige "Rohentwurf"	87
Abbildung 19: Struktur eines einfachen evolutionären Algorithmus	95
Abbildung 20: Struktur eines erweiterten evolutionären Algorithmus.....	96
Abbildung 21: Probleme bei proportionaler Fitnesszuweisung.....	102
Abbildung 22: Lineares Ranking mit unterschiedlichem Selektionsdruck (SP).....	103
Abbildung 23: Schematische Darstellung einer Rouletteselektion.....	105
Abbildung 24: Qualität und Diversizität bei der Rouletteselektion	106
Abbildung 25: Schematische Darstellung einer SUS-Selektion	107
Abbildung 26: Qualität und Diversizität bei der SUS-Selektion	108
Abbildung 27: Qualität und Diversizität bei der Turnierselektion (25 Individuen, Turniergröße 4).....	109
Abbildung 28: Qualität und Diversizität bei der Truncation-Selektion	110
Abbildung 29: Qualität und Diversizität der Selektionsmethoden in der Übersicht	111
Abbildung 30: Hyperwürfel um zwei Variablen bei diskreter Rekombination	113

Abbildung 31: Mögliche Nachkommen bei der intermediären Rekombination.....	114
Abbildung 32: Schema des <i>single-point crossover</i>	115
Abbildung 33: Schema eines <i>multi-point-crossover</i>	115
Abbildung 34: Wiedereinfügen mit vollständigem Ersetzen der Eltern	122
Abbildung 35: Wiedereinfügen unter Beibehaltung der besten Individuen	123
Abbildung 36: Wiedereinfügen mit Selektion der Nachkommen.....	123
Abbildung 37: Schematischer Ablauf einer Migration	127
Abbildung 38: Begriffe und logische Verknüpfung der ganzheitlichen Architekturgenerierung	130
Abbildung 39: Chromosom 1, das die Geometrie kodiert	133
Abbildung 40: Berücksichtigung von Energiekosten auf einen Zeitraum bezogen	144
Abbildung 41: Verwendung von Wänden	148
Abbildung 42: Berechnung des Seitenverhältnisses bei verschiedenen Geometrien	152
Abbildung 43: Zielfunktionswerte für eine Soll-Raumgröße von 30m ²	158
Abbildung 44: Zielfunktion für Raumverbindungen.....	160
Abbildung 45: Zielfunktion für den Parameter Seitenverhältnis	161
Abbildung 46: Zielfunktion für die minimale Seitenlänge.....	163
Abbildung 47: Zielfunktionswerte für einen minimalen Wert von 200.000 € und einen maximalen Wert von 300.000 €.....	167
Abbildung 48: Vergleich von Außenformen mittels Innenwinkeln.....	169
Abbildung 49: Beurteilung der Raumausrichtung.....	170
Abbildung 50: Homogen abhängige Kategorien	175
Abbildung 51: Heterogen abhängige Kategorien.....	176
Abbildung 52: Geometrie-Bauteil-Crossover	177
Abbildung 53: Grundriss-Crossover	178
Abbildung 54: Wahrscheinlichkeit der Lage rekombinierter Variablen.....	179
Abbildung 55: Linienrekombination der äußeren geometrischen Parameter.....	179
Abbildung 56: Raum-Organisations-Crossover	181
Abbildung 57: Beispiel einer Raumrekombination mit den Parametern Seitenverhältnis und Fläche	183
Abbildung 58: Raumrekombination mit Crossover der Organisation.....	184
Abbildung 59: Raumrekombination mit kombinatorischer Organisationsrekombination....	185

Abbildung 60: Additive Außenformrekombination	187
Abbildung 61: Gemittelte Außenformrekombination	188
Abbildung 64: Erstellung der neuen Räume aus überlappenden Ausgangsräumen	190
Abbildung 62: Anpassung der Größen	190
Abbildung 63: Rekombination der Erschließung.....	190
Abbildung 65: abwechselndes Übernehmen von Räumen der beiden Elternteile.....	191
Abbildung 66: Validierung des Nachkommens durch Vergrößerung der Räume.....	191
Abbildung 67: Organisationsdiagramme bei der kombinatorischen Gesamtrekombination	192
Abbildung 68: Einzelne Bauteilrekombination.....	193
Abbildung 69: Bauteilgruppen-Crossover	194
Abbildung 70: Komplettes Bauteil-Crossover	195
Abbildung 71: Erweiterte Linienrekombination von Bauteilen.....	196
Abbildung 72: Möglichkeiten der geometrischen Mutation.....	199
Abbildung 73: Verschieben von Räumen	200
Abbildung 74: Drehen von Räumen	200
Abbildung 75: Das Hinzufügen eines Punktes in einen Raum.....	201
Abbildung 76: Verschieben einer Raumkante.....	202
Abbildung 77: Einfache Graphen.....	210
Abbildung 78: Ebenensystem des Graphen	210
Abbildung 79: Graph mit Kantengewichtung zu Beginn	211
Abbildung 80: Graph mit Wahrscheinlichkeitsbewertung der Kanten nach 10 Durchläufen	212
Abbildung 81: Übersicht über den Initialisierungsgraphen	213
Abbildung 82: Gewichtung der Kategorien	215
Abbildung 83: Auszug aus der automatisch erstellten Energiebilanz (ausführlich im Anhang, Abbildung 93)	219
Abbildung 84: Beispiel eines berechneten Gebäudes in AutoCAD	219
Abbildung 85: Ausschnitt einer Ausgabe als XML-Datei	220
Abbildung 86: Bewertung von Ergebnissen im Browser	222
Abbildung 87: Beispielergebnis 1, EG.....	229
Abbildung 88: Beispielergebnis 1, OG	230
Abbildung 89: Beispielergebnis 1, Isometrie.....	231
Abbildung 90: Beispielergebnis 2, EG.....	232

Abbildung 91: Beispielergebnis 2, OG	233
Abbildung 92: Beispielergebnis 2, Isometrie.....	234
Abbildung 93: Beispiel einer automatisch erstellten Energiebilanz	239

Soweit nicht anders angegeben, stammen die Abbildungen vom Verfasser der Arbeit. Abbildung 21 bis Abbildung 23, Abbildung 25 sowie Abbildung 30 bis Abbildung 37 sind [Poh00] entlehnt.