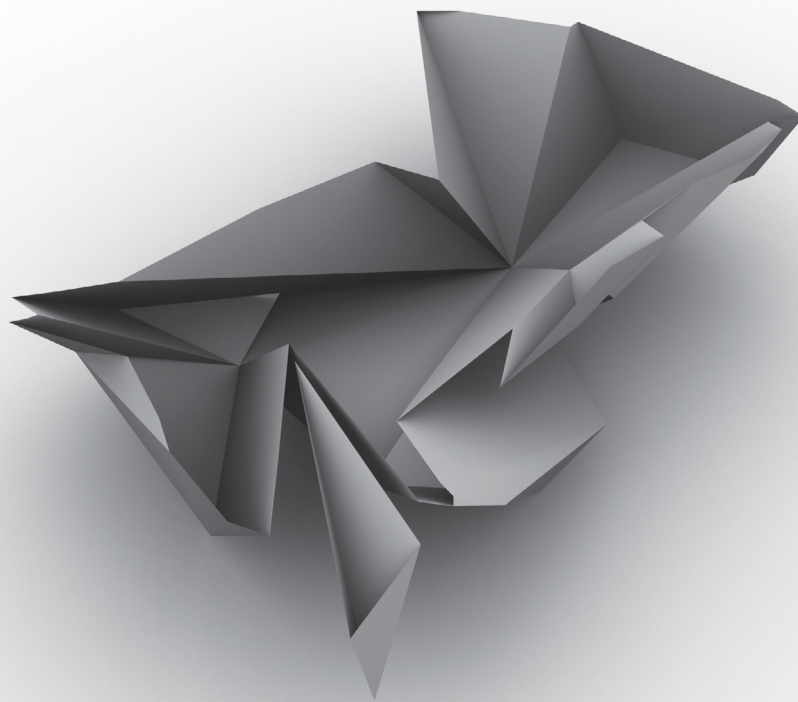


# Architektonische Formfindung akustischer Räume mit Hilfe evolutionärer Algorithmen

Achim Benjamin Spaeth







# **Architektonische Formgebung akustischer Räume mit Hilfe evolutionärer Algorithmen**

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

Vorgelegt von  
Achim Benjamin Spaeth  
aus Ravensburg

Hauptberichter: Prof. Achim Menges  
Mitberichter: Prof. Dr. Hanno Ertel

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Februar 2014

Institut für computerbasiertes Entwerfen (ICD) der Universität Stuttgart

2014

**Architektonische Formgebung akustischer Räume mit Hilfe evolutionärer  
Algorithmen**

Der Beruf des Architekten ist eine abenteuerliche Tätigkeit:  
Ein Grenzberuf in der Schwebe zwischen Kunst und  
Wissenschaft, auf dem Grat zwischen Erfindung und  
Gedächtnis, zwischen dem Mut zur Modernität und echter  
Achtung der Tradition.

*Renzo Piano*

## **Vorwort**

Diese Arbeit habe ich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am CAAD Labor der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart begonnen und in der Hauptsache auch dort bearbeitet. Nach meinem Wechsel im Februar 2012 an die Xi'an Jiaotong Liverpool University in Suzhou /China habe ich die Arbeit extern fertiggestellt. Für die fortwährende Unterstützung und den mir eingeräumten Freiraum an der Universität Stuttgart, um diese Arbeit anfertigen zu können, möchte ich Prof. Dr. Christian Stoy und Prof. Dr. Hanno Ertel herzlich danken. Darüber hinaus möchte ich Hanno Ertel besonders danken, denn durch seine Leidenschaft für die Akustik hat er mich letztlich zu meinem Thema inspiriert. Prof. Achim Menges möchte ich für die Bereitschaft, das Thema an seinem Institut für computerbasiertes Entwerfen zu beheimaten und für seine kritische und konstruktive Betreuung danken. Weiterer Dank gebührt meinen Kollegen am CAAD Labor, namentlich Jens Wiesner und Stephan Droste, für ihre kritische Begleitung und ihre freundschaftlichen Ermunterungen. Danken möchte ich auch Alex Fries für seine Hilfe und für sein unermüdliches Engagement bei der Programmierung der Software. Ohne die Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen wäre diese Arbeit nicht entstanden. Hierfür möchte ich Prof. Dr. Michael Vorländer und insbesondere Dr. Dirk Schröder für Ihren geduldigen Rat danken.

<b>Vorwort</b>	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>12</b>
<b>Abstract (Zusammenfassung in englischer Sprache)</b>	<b>15</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1. Der architektonische Entwurf als multivariabler Algorithmus	17
1.2. Performanz orientierte Entwurfskonzepte	20
1.3. Design als empirische „Wissenschaft“	21
1.4. Lösungsalgorithmen für Optimierungsprobleme	23
<b>2. Aufgabenstellung</b>	<b>27</b>
2.1. Raumkonzepte akustischer Räume	27
2.2. Raumgestalt und Akustik	28
2.3. Gestaltgebung akustischer Räume	28
2.4. Raummorphologie und Ästhetik	29
2.5. Methoden	30
<b>3. Entwurfsmethoden und Systeme</b>	<b>32</b>
3.1. Performatives Entwerfen	32
3.1.1. Analoge performante Formfindungsverfahren	33
3.1.2. Simulationsbasierte Gestaltoptimierung	36
3.1.3. Regelbasierte Gestalterzeugungsverfahren	37
3.1.4. Kombinatorische Lösung von Planungsproblemen der Grundrissverteilung	39
3.1.5. Parameter- und Strukturoptimierung	41
3.2. Kreative und ästhetische Systeme	42
3.2.1. Statistische Ästhetik	42
3.2.2. Evolutionäre Algorithmen als Kreativwerkzeuge	44
3.3. Komplexe Systeme	46
3.3.1. Problemarten	46
3.3.2. Problemkomplexität	47
3.3.3. „Bösartige“ und „schlecht definierte“ Probleme	51
<b>4. Raumakustik</b>	<b>52</b>
4.1. Grundtypen akustischer Räume	52
4.1.1. Rechteckform: Musikvereinssaal, Wien	53
4.1.2. Hufeisenform: Semperoper, Dresden	55

4.1.3.	Hufeisenform Oper Oslo	57
4.1.4.	Fächerform: Oper Sydney	59
4.1.5.	Fächerform: Festspielhaus, Bayreuth	60
4.1.6.	Weinbergterrassenform: Philharmonie Berlin	63
4.2.	Physikalische Grundlagen des hörbaren Schalls	65
4.2.1.	Schallausbreitung	65
4.2.2.	Schallreflexion, Schallabsorption, Schallbeugung	66
4.3.	DIN ISO 3382-1 und DIN 4109	71
4.4.	Impulsantwort, Impulsdiagramm	72
4.5.	Kennwerte der Raumakustik	73
4.5.1.	Nachhallzeit	73
4.5.2.	Anfangszeit (Initial Time)	76
4.5.3.	Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time)	77
4.5.4.	Klarheitsmaß C (Clarity)	77
4.5.5.	Hallmaß H	78
4.5.6.	Schwerpunktzeit TS (Center Time)	78
4.5.7.	Seitenschallgrad / Seitenschallmaß LF / LFC (Lateral Fraction Coefficient)	78
4.5.8.	Echokriterium	79
4.5.9.	Schallquellenverstärkung G (sound strength)	80
4.5.10.	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient (IACC)	80
4.6.	Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieverteilung	82
4.7.	Analyseverfahren der Raumakustik	83
4.7.1.	Physische Modelle	83
4.7.2.	Graphische Analyse	84
4.7.3.	Numerische Analyse	85
4.7.4.	Auralisierung	88
4.8.	Planungsmethoden der Raumakustik	89
4.8.1.	Planungsgrößen in der Raumakustik	89
4.8.2.	Raumakustische Planung aus dem Lehrbuch	89
4.8.3.	Primärstruktur aus Vorbildern	90
4.9.	Aktuelle Tendenzen	91

4.9.1.	Veränderte Anforderungen an die Raumakustik	91
4.9.2.	Aktuelle Planungsansätze	92
4.10.	Zusammenfassung	97
4.10.1.	Relevante akustische Größe und Wertebereiche	97
4.10.2.	Analyse Methoden / Planungsmethoden	98
4.10.3.	Geometrische Ableitungen	98
4.10.4.	Einschränkung numerischer Simulationen	98
<b>5.</b>	<b>Evolutionäre Algorithmen</b>	<b>99</b>
5.1.	Algorithmen	99
5.2.	Natürliche Evolution	100
5.3.	Simulierte Evolution	102
5.4.	Allgemeiner evolutionärer Algorithmus (EA)	103
5.1.	Evolutionäre Strategie	104
5.1.	Genetischer Algorithmus	105
5.2.	Elemente des evolutionären Algorithmus	106
5.2.1.	Population / Populationsgröße	106
5.2.2.	Bewertung oder Güte	106
5.2.3.	Selektionswert oder Fitnesswert	107
5.2.4.	Selektionsdruck	107
5.2.5.	Elitäre Selektion / Trunkierungsselektion	108
5.2.6.	Fitnessproportionale Selektion / Roulette-Selektion	108
5.2.7.	Turnierselektion	108
5.2.8.	Stochastic universal sampling Selektion nach J. Baker	108
5.2.9.	Paarungsselektion oder Elternselektion	109
5.2.10.	Umweltselektion	109
5.2.11.	Mutation	109
5.2.12.	Rekombination	110
5.3.	Nebenbedingungen	111
5.3.1.	Behandlung von Nebenbedingungen als Letalmutation	112
5.3.2.	Tolerante Behandlung von Nebenbedingungen	112
5.3.3.	Behandlung von Nebenbedingungen in der Zielfunktion	112
5.4.	Interaktion und Kontrolle	113
5.4.1.	Interaktion durch Evaluationskriterien	114

5.4.2.	Kontrolle durch Auswahl	115
5.4.3.	Kontrolle durch Manipulation	115
5.4.4.	Kollaborative und autarke Systeme:	116
<b>6.</b>	<b>Methode zur Entwicklung eines evolutionären Algorithmus</b>	<b>117</b>
6.1.	Anforderungsanalyse (Phase1)	118
6.2.	Problemanalyse und Risikobewertung (Phase 2)	118
6.3.	Repräsentationsalternativen (Phase 3)	120
<b>7.</b>	<b>Aufbau des Algorithmus zur Formgebung akustischer Räume</b>	<b>121</b>
7.1.	Problemdefinition	121
7.2.	Komplexität des Problems	123
7.3.	Suchraum	125
7.4.	Ergebnisraum	125
7.5.	Zielfunktion	125
7.6.	Nebenbedingungen	127
7.7.	Optimierungsziel	128
7.8.	Benutzerkontrolle	128
<b>8.</b>	<b>Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus</b>	<b>129</b>
8.1.	Geometrie und Materialsynthese	129
8.1.1.	Darstellung der Geometrie	129
8.1.2.	Genetische Geometrienotation	132
8.1.3.	Darstellung der akustischen Materialeigenschaften	132
8.1.4.	Genetische Materialnotation	132
8.1.5.	Anwendung des Evolutionsparameters Mutation	133
8.1.6.	Anwendung des (Pseudo-) Evolutionsparameters Rekombination	134
8.2.	Raumakustische Simulation	135
8.2.1.	Simulation geometrischer Reflexionen mittels Spiegelschallquelle	137
8.2.2.	Abschätzung des Berechnungsaufwands der geometrischen Reflexion	144
8.2.3.	Simulation des diffusen Anteils mittels Schallteilchenverfahren	145



8.2.4.	Anpassung des hybriden Energiemodells	151
8.2.5.	Experimenteller Vergleich der Simulations-Methode im Formfindungsalgorithmus und einer kommerziellen Raumsimulationssoftware	152
8.3.	Akustische Bewertungskriterien	156
8.4.	Ästhetisch architektonische Bewertungskriterien	159
8.4.1.	Anzahl der Dreiecke	161
8.4.2.	Innenwinkel der Dreiecke	161
8.4.3.	Eingeschlossener Winkel	162
8.4.4.	Größe der Dreiecksflächen	162
8.4.5.	Achsenausrichtung der Flächen	162
8.4.6.	Vertex- Ordnung	163
8.4.7.	Gesamtoberfläche	163
8.4.8.	Gesamtvolumen	163
8.4.9.	Zusammenfassung Bewertung	163
8.5.	Kriterien für die Nutzbarkeit	164
8.5.1.	Sichtverbindungen	164
8.5.2.	Neigung der Flächen	165
8.5.1.	Kopffreiheit	167
8.5.2.	Abstand Bodenfläche	167
8.5.3.	Akustisch transparente Konstruktion	167
8.6.	Populationskonzept	168
8.7.	Randbedingungen	171
8.7.1.	Bauraum	171
8.7.2.	Kontext (Quellen Empfänger)	171
8.7.3.	Raummodelle importieren	171
8.8.	Zusammenfassende graphische Darstellung des genetischen evolutionären Algorithmus	172
8.9.	Graphische Benutzeroberfläche	175
8.9.1.	Einstellungen	175
8.9.2.	EA (evolutionärer Algorithmus)	177
8.9.3.	Bewertung	179
8.9.4.	Simulation	180

8.9.5.	Ergebnisse	183
<b>9.</b>	<b>Anwendung des EA auf unterschiedliche Szenarien</b>	<b>184</b>
9.1.	Pareto-Kriterium Vergleich mit bestehenden akustischen Räumen	184
9.2.	Aufgabenstellung mit neuen Konfigurationen (Raummusik)	185
<b>10.</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>188</b>
10.1.	Bewertung der Ergebnisse	188
10.1.1.	Geometrische Morphometrik in der Biologie	189
10.1.2.	Morphologische Kriterien zur Unterscheidung der Raumhüllen	194
10.1.3.	raumakustische Typologien	195
10.1.4.	Kriterien zur Beschreibung von Architektur	197
10.1.5.	Proportionen und Maßverhältnisse	199
10.1.6.	Materialität	202
10.2.	Zusammenfassung der Kriterien zur Bewertung der Unterschiedlichkeit der erzeugten Raumkonzepte	202
10.3.	Bewertung des Formfindungsprozess für akustische Räume	203
10.3.1.	Vergleichbarkeit der akustischen Qualität	203
10.3.2.	Innovationsfähigkeit der Genese	205
10.3.3.	Konvergenz des evolutionären Prozesses (W02-G-100-1000)	212
10.3.4.	Konvexität der Gestalten	218
10.3.5.	Universalität der Gestaltsynthese	218
10.4.	Gesamtbewertung	219
10.5.	Ausblick für weiterführende Arbeiten	220
10.5.1.	Dilemma simulationsbasierter Entwurfssysteme	220
10.5.2.	Spezifikation der Geometrie	220
10.5.3.	Weitere Evaluationskriterien	221
<b>11.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>222</b>
<b>12.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>227</b>
<b>13.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>233</b>
<b>14.</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>250</b>
<b>15.</b>	<b>Anhang</b>	<b>251</b>
15.1.	Erstellung der Modelle für den Import in die Simulation	251

15.1.1. Triangulierung	251
15.1.2. Akustische Materialeigenschaften	251
15.1.3. Definition von Quellen und Empfängern	252
15.2. Datenformate akustische Simulation	252
15.2.1. Datenformat der geometrischen Hülle für den Import	252
15.2.1. Datenformat der Empfänger und Quellen für den Import	252
15.2.1. Datenformat der Vorgabewerte der akustischen Kennwerte	253
15.3. Ergebnisse integrierte raumakustischen Simulation	254
15.3.1. Musikvereinssaal Wien	254
15.3.2. Philharmonie Berlin	256
15.3.3. Festspielhaus Bayreuth	259
15.3.4. Semperoper	261
15.4. Beschreibung des Quaderraumes für den Plausibilitätsvergleich	263
15.4.1. Beschreibung der Geometrie	263
15.4.2. Ergebnisse aus den verschiedenen Analysen des Quaderraumes	263
15.5. Vergleich der akustischen Kennzahlen der Grundtypen aus der integrierten Simulation	265
15.6. Dokumentation der durchgeführten Experimente mit dem evolutionären Algorithmus	269
15.6.1. NR1-G-100-500	269
15.6.2. W01-A-24-500	275
15.6.3. W02-G-100-1000	280
15.6.4. W03-MN-24-500	286
15.6.5. W07-MN-50-500	291
15.6.6. W10-G-100-500	295
15.6.7. S01-G-20_50-1000	301
15.6.8. B01-A-24-500	308
15.6.9. BA-G-24-500	314

## **Zusammenfassung**

Der Entwurf akustischer Räume, wie beispielsweise eines Konzertsaals oder einer Opernbühne, stellt für Architekten und Ingenieure, trotz technischer Hilfsmittel, nach wie vor eine große Herausforderung dar. Die vorliegende Arbeit möchte einen Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderung leisten. Sie untersucht grundsätzlich die Möglichkeit, Performanz relevante Kennwerte als entwurfsbestimmende Größen in den Entwurfsprozess zu integrieren. Die Leistungsfähigkeit oder Performanz von Raum ist schon seit Vitruv Gegenstand des theoretischen und praktischen Schaffens der Architekten. Diese Arbeit rückt die Raumakustik, die bisher eher eine nachgeordnete Rolle in der Wahrnehmung der Architekten spielt, in den Vordergrund und macht diese zum beispielhaften Untersuchungsgegenstand. Performative Entwurfsmethoden also Entwurfsmethoden, die die Leistungsfähigkeit als Entwurfs bestimmende Größe in den Prozess der Formfindung integrieren manifestieren sich beispielsweise in den Seifenblasenversuchen und den daraus entstandenen Tragwerken Frei Ottos. Durch die Entwicklung rechentechnischer Verfahren entstanden simulations- und evolutionsbasierte Verfahren zur Unterstützung von Entwurfsprozessen. Simulationsbasierte Gestaltoptimierungsverfahren aus dem Bauingenieurwesen oder regelbasierte Gestalterzeugungsverfahren aus dem Bereich der Architektur zeugen von der Entwicklung von analogen Verfahren zu numerisch-digitalen Methoden, die sich auch und nicht zuletzt evolutionären Prozessen bedienen. Mit dem Beginn Computer basierter Methoden in Naturwissenschaft und Ingenieurwesen beschäftigen sich schon in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts die Theoretiker mit der damit einhergehenden digitalen und seriellen Ästhetik. Nicht nur technische Kriterien werden im dem hier vorgestellten Verfahren angewendet, sondern auch die Suche nach einer Ästhetik, die sich aus dem numerisch-seriellen Ansatz ergibt, wirkt in die Entwicklung eines Formgebungsverfahrens für akustische Räume hinein. Basis für die Entwicklung ist die Erarbeitung der akustischen Grundlagen und deren Wirkung auf Material und Geometrie, also der Raumgestalt. Daneben werden die elementaren Bestandteile evolutionärer und genetischer Prozesse und

ästhetischer Entwurfssysteme erarbeitet. Die Integration zu einem formgebenden Gestaltungsverfahren für akustische Räume erfolgt über die Verwendung einer raumakustischen Simulation als Hauptbestandteil der Bewertungsfunktion innerhalb eines genetischen evolutionären Prozesses. Basierend auf einer echtzeit-fähigen raumakustischen Simulation, wird eine für die vorliegende Aufgabe ausreichend genaue aber etwas vereinfachte Akustiksimulation entwickelt. Die Geometrie und Materialität der Gestalten wird auf Grundlage eines genetischen Codes entwickelt, der sich als Punkteliste manifestiert. In dieser Liste sind den Punkten entsprechend akustische Information über Absorptions- und Diffusionswerte zugeordnet. Das Syntheseverfahren bildet aus Punkten der genetische Codierung Tetraeder, die sich zu einer durchdringungsfreien und geschlossenen Hüllform verschmelzen. Der Tetraeder ist der 3-Simplex, also der einfachste 3-dimensionale Körper. Ähnlich dem Dreieck, mit welchem im 2-dimensionalen Bereich alle Formen angenähert werden können, ist diese beliebige Annäherung mit dem Tetraeder auch für Volumina möglich. Durch diese Verfahren ist gewährleistet, dass die Oberfläche der Gestalt immer stetig geschlossen ist, was die Grundlage für die Durchführung einer raumakustischen Simulation ist. Neben der Hülle ist auch die Quellen-Empfänger-Konstellation Bestandteil des akustischen Systems. Diese wird vom Benutzer als Entwurfparameter in Form einer räumlichen Anordnung von Empfänger und Quellen vorgegeben und in der Simulation verwendet. Der jeweilige Entwurfsprozess ist nicht universell, sondern muss auf die jeweilige Entwurfsituation angepasst werden. Deshalb bietet das Programm sowohl für den evolutionären Prozess, wie auch für die Bewertungsfunktion unterschiedliche Einstellungs- und Gewichtungsmöglichkeiten. So kann der Benutzer für seine individuelle Entwurfsaufgabe seiner Verantwortung als Entwerfer gerecht werden. Die Ergebnisse aus dem Formgebungsverfahren sind nur bedingt als fertige Architektur zu verstehen. Vielmehr liefern sie grundsätzliche Konzeptansätze für mögliche akustische Räume. Deutlich wird dies beim Vergleich von Gestalten, die vom Formfindungsalgorithmus erzeugt wurden mit bestehenden Raumtypen. So liefert das Formgebungsverfahren, unter Verwendung der dem Originaltyp entsprechenden Quellen-Empfänger-Konstellation, ein alternatives

Raumkonzept bei mindestens gleicher akustischer Qualität. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das entwickelte Formgebungsverfahren im Grundsatz funktioniert. Die erzeugten Ergebnisse weisen aber in ihrer architektonischen und ästhetischen Ausprägung noch Entwicklungspotential auf. Weiteres Potential besteht in der Ausweitung der untersuchten Performanzkriterien hinaus auf beispielsweise raumklimatische oder andere numerisch simulierbare Kriterien.

### **Abstract (Zusammenfassung in englischer Sprache)**

The design of acoustic spaces, like concert halls or opera houses is, despite all technical means, still a big challenge for both architects and engineers. The present work wants to contribute to the achievement of this challenge. The work investigates fundamentally the possibility of integrating performance based parameter as design drivers into the design process. Since the time of Vitruv, performance of space is a matter of architects' theoretical and practical work. This work focuses on room acoustics, which takes a more subordinated role in architects' perception, and promotes it as the exemplary objective of investigation. Performance related design methods have already been manifested in Frei Otto's soap bubble experiments and the constructions emerging from there. Through the development of computer based methods, simulation and evolution based approaches to support design processes emerged. Simulation based shape optimisation methods in the domain of engineering or shape grammar methods in the domain of architecture witness the development from analogous methods to numerical digital methods, where evolutionary processes are included. With the appearance of computer based methods in science and engineering, since the nineteen sixties, theorists are engaged with the aesthetics linked to digital and serial methods. Not only technical criteria but also aesthetics, which is based on a numerical and serial approach, affects the form generating design system for acoustic spaces. The foundation of the system is the formulation of the acoustic basics and its effect on material and geometry, thus the 'Raumgestalt'. Aside, the fundamental parts of evolutionary and genetic processes and aesthetic design systems are formulated. The integration to a form generating design system for acoustical spaces is realised by the use of a room acoustic simulation as the main part of an evaluation function within an evolutionary genetic algorithm. Based on a real time room acoustics simulation, a sufficient precise but simpler acoustic simulation is developed. The geometry and the material of the objects are generated on the basis of a genetic code, which is a point list. Absorption and scattering information are assigned correspondingly to the points in the list. The synthesis algorithm is using the points to form tetrahedrons, which emerge to a non-self-intersecting and closed hull. The tetrahedron is a 3-simplex, which

represents the simplest 3 dimensional volume existing. Alike the triangle, which has the capacity to approximate any 2 dimensional shapes tetrahedron has the ability to approximate any volumes in any required precision. This method assures that the surface of the object is continuously closed and therefore allows executing a room acoustic simulation. Besides the hull, the source receiver constellation is also a crucial part of the acoustic system. It is defined by the user as a spatial configuration and is used in the simulation. The described design process is not universal but has to be defined for each design task individually. Therefore both, the evolutionary as well as the evaluation algorithm is providing different settings and weighting settings to allow investigative explore. Thus users retain their responsibility for individual design tasks. The results of the shape generating algorithm are representing fundamental concepts for potential acoustic spaces rather than finalised architecture. This becomes obvious through the comparison of different 'Gestalten' created by the algorithm and corresponding acoustic building types. The shape generation algorithm using the corresponding source receiver constellation deduced from the building precedent creates alternative spatial concepts with at least the same acoustic quality as the precedent. The presented work shows that the developed shape generation method works in principle. The generated results show potential for improvement in respect to architectural and aesthetical quality. Further potential is also discovered through the extension of the considered performance criteria towards climatic or other criteria which can be represented by numerical simulations.



## 1. Einleitung

### 1.1. Der architektonische Entwurf als multivariabler Algorithmus

Formgebung, also die Erzeugung der äußeren Gestalt eines Raumes, ist die Aufgabe des Architekten. Die äußere Gestalt beschränkt sich dabei nicht nur auf den sichtbaren Teil des Raumes, sondern bezieht sich auf das wahrnehmbare Ganze der Raum- oder Objektgestalt. Ein ganzheitliches Raumwahrnehmungsverständnis impliziert neben anderen Wahrnehmungsbereichen auch das Hörbare. (Schricker 2001, S. 7) Um zu einer Raumgestalt zu gelangen, müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse und Bedingungen in die Ganzheit einer Gestalt integriert werden. Unterschiedlichste Einzelaspekte müssen gegeneinander abgewogen werden und zu Gunsten eines Gesamten zusammenwirken. Durch die differenzierte Integration technischer, funktionaler, sozialer, ökologischer, ökonomischer, physikalischer und nicht zuletzt ästhetisch-gestalterischer Aspekte entsteht so ein komplexes System, in dem die einzelnen Komponenten zueinander in Wechselbeziehung stehen. Der architektonische Entwurf ordnet die potentiellen Möglichkeiten des Systems der Wechselbeziehungen zu einer konkreten Gestalt. Das System ist offen und unbestimmt. Es enthält unterschiedliche Parameter auf unterschiedlichen Gestaltebenen. Der, durch einen Entwurf, erreichte Ordnungszustand des Systems ist aufgrund der Offenheit und Unbestimmtheit des multidimensionalen, multivariablen Systems jedoch nicht der einzig mögliche Zustand, sondern er muss als eine Möglichkeit unter anderen Möglichkeiten betrachtet werden. Der Entwurf stellt nicht „die“ Lösung dar; sondern „eine“ Lösung. Unter diesen möglichen Zuständen gibt es Zustände unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit und Fragilität. Diejenigen mit geringer Wahrscheinlichkeit und hoher Fragilität weisen einen höheren Grad an ästhetischer Qualität auf.

*„Um zusammenzufassen läßt sich Folgendes sagen: Kunstwerke sind Objekte in einem relativ unwahrscheinlichen Zustand. Diesen Zustand kann man als ästhetischen Zustand bezeichnen. Als Objekte sind die Kunstwerke somit Träger einer aus Elementen (Zeichen) aufgebauten und besonders selektierten Verteilung. Diese selektierte Exzentrizität kann als ästhetische Information aufgefaßt werden, denn sie ist repertoirebezogen und zeigt kommunikative Wirkungen. Die statistische Beschreibung auf Grund von Häufigkeitsangaben, die sich auf Auswahl, Verteilung bzw. Gliederung der Elemente und Zusammenfassungen von Elementen etc. bezieht, gibt numerische Indizes an, die diese Selektion hoher Exzentrizität vergleichsweise erkennbar macht. Alle im Prinzip statistisch vorgehenden Prozesse, die sich an einem selektierbaren Material abspielen, die repertoirebezogen in der sogenannten "Schöpfung" und übertragungsabhängig in der sogenannten "Wirkung" sind, haben die Chance, ästhetischer Prozeß zu sein.“ (Bense 1960, S. 45)*

Benses Theorie der ästhetischen Entropie, die sich auf Werke der Kunst beziehen, lassen sich auf den architektonischen Entwurf übertragen. Die Konsequenz, die sich daraus ergibt, ist, dass ein architektonisches Entwurfsverfahren, welches aus einem Repertoire einen möglichst unwahrscheinlichen Zustand als Ergebnis selektiert, das Potential eines ästhetischen Prozesses besitzt. Im Umkehrschluss kann man daraus ableiten, dass ein Entwurf mit ästhetischer Qualität einen relativ unwahrscheinlichen Zustand aus der großen Menge anderer möglichen Entwurfslösungen darstellt. Der ästhetische Zustand ist nach Bense also ein fragiler und kontextueller.

Innerhalb eines Entwurfssystems, kann es also unterschiedliche Parameterkombinationen geben, die einen gewünschten Ordnungszustand repräsentieren. Gelingt es, den Ordnungszustand (Fragilität) des Systems in einer mathematischen oder algorithmischen Funktion ausreichend und in Abhängigkeit der Eingabeparameter (Kontext) zu beschreiben, so steht eine Funktion zur Verfügung, deren Lösungen die Eingabeparameter liefert die notwendig sind, um den gewünschten Ordnungszustand zu erreichen; also eine mögliche Lösung des Entwurfsproblems. Je unwahrscheinlicher der Ordnungszustand, desto geringer die Anzahl der möglichen gültigen Parameterkonstellationen, desto höher aber auch das ästhetische Potential. In der beschriebenen Zielfunktion spiegeln sich genau die Anforderungen und Bewertungskriterien wider, die an die Entwurfsaufgabe gestellt sind. In ihr manifestieren sich sämtliche Kriterien, die zur Validierung des Entwurfes notwendig sind, aber eben auch nur diejenigen, die in die Funktion Eingang gefunden haben. Für architektonische Entwurfsaufgaben sind die Kriterien einer Zielfunktion meist nicht nur sehr vielfältig (multidimensional) und von unterschiedlichem Charakter (multimodal), sondern können in ihrer Gesamtheit

oft nur schwer oder nicht eindeutig erfasst werden. Für die Zielfunktion bedeutet dies, dass sie nicht unbedingt ein eindeutig berechenbares, sprich determiniertes, Ergebnis besitzt. Um dennoch brauchbare Lösungen zu bekommen, kann die nicht-deterministische Zielfunktion als Maximierungsfunktion formuliert werden. Die Maximierung der Zielfunktion soll die Eingabeparameter liefern, welche den größtmöglichen Zielwert der Funktion hervorrufen, wobei der maximale Wert, also das globale Maximum oder Optimum der Zielfunktion, häufig nicht bekannt ist. Die zu erwartende Ergebnislandschaft verfügt also über mehrere Hochpunkte, die als lokale Maxima oder Optima bezeichnet werden. Die Suche nach diesen Hochpunkten oder lokalen Optima ist die Aufgabe, der sich der Entwerfer gegenüber konfrontiert sieht. In diesem Sinne können Entwurfsaufgaben als Optimierungsaufgaben verstanden werden. Wobei Optimierung in diesem Zusammenhang nicht bedeutet den alleingültigen optimalen Entwurf finden zu wollen, sondern ein Ergebnis zu finden, das bezüglich den in der Zielfunktion formulierten Kriterien ausreichend gut oder bestmöglich entspricht. Anders ausgedrückt besteht die Optimierung darin, die bestmöglichen Parameterkombinationen möglicher aber unwahrscheinlicher Ordnungszustände zu finden. Insofern kann sich die Optimierung immer nur auf die Kriterien beziehen, die in die Zielfunktion Eingang gefunden haben und dort beschrieben sind. Wie schon erwähnt ist das Ergebnis nicht universell, sondern in seinem konkreten Kontext zu bewerten.

*"Die genetischen Algorithmen finden das Optimum desjenigen Zusammenhanges heraus, welchen die Kriterien repräsentieren, die als Argumente in die Fitness-Funktion eingehen. Was immer in das Format solcher Kriterien paßt, kann verarbeitet werden. Die Frage ist also: Was paßt in dieses Format und was nicht? Wird es bei den Belangen der Ökonomie und des physischen Komforts bleiben? Oder gibt es auch unter den Wünschen der Wahrnehmung solche, die zu Argumenten der Fitness-Funktion werden könnten? (Franck, Franck 2008, S. 183)*

## 1.2. Performanz<sup>1</sup> orientierte Entwurfskonzepte

*"Eine Architektur, die aus dem Werden das Verhalten und aus dem Verhalten das Sein ableitet, ist eine Architektur der Wechselwirkungen aus Form, Material, Struktur und Umwelt. Eine performative Architektur." (Hensel, Menges 2008, S. 17)*

Die Formulierung einer architektonischen Entwurfsaufgabe als Optimierungsproblem ist das Ergebnis eines veränderten Paradigmas des Entwurfsprozesses. Der Entwurf ist nicht mehr ein hierarchischer, sondern ein integrativer Prozess. Diesen Paradigmenwechsel vom Deduktiven zum Induktiven kann man als Folge einer veränderten Zoomgröße auf die Wirklichkeit beschreiben<sup>2</sup>, oder als Ergebnis einer veränderten Organisation des Architektenwissens vom Kreis hin zur Netzstruktur begreifen.<sup>3</sup> Resultat dieses veränderten Begriffs des Entwerfens ist es „[...] die bislang übliche und gewohnte Kontrolle über das konkrete Ergebnis aufzugeben.“ (Hovestadt 2009, S. 81) Dieser Verlust erfolgt zu Gunsten des Gewinns der Kontrolle über die Ziele und Regeln des Prozesses. Die Formulierung der Ziele, die die zu entwerfende Architektur erfüllen soll, kann durch die Beschreibung von Leistungsmerkmalen, also Performanz orientiert erfolgen. D.h. nicht eine formale Vision, nicht die visuelle Assoziation mit der gestellten Aufgabe bestimmt die Architektur, sondern die angestrebten Leistungsmerkmale formen die Gestalt.

---

<sup>1</sup> Frazer(1995) unternimmt 1988/89 an der Architectural Association den Versuch den Entwurf als ein performanz basiertes Problem zu beschreiben. Der Begriff wird durch Kolarevic, Malkawi (2005), Oxman(2008) und Hensel, Menges(2008) weiterverwendet und weiterentwickelt. Im Zusammenhang mit computerbasierten Methoden erlebt der Begriff eine Renaissance ist aber dem Prinzip nach schon bei Vitruv beschrieben.

<sup>2</sup> „Durch eine detailliertere Betrachtung der Realität begreifen wir die Zusammenhänge z.B. auf der Ebene der DNS. D.h. wir sind nicht mehr angewiesen auf eine großmaßstäbliche Betrachtung von außen, sondern begreifen die inneren Vernetzungen. Die Wirklichkeit kann dadurch auf strukturelle Weise beschrieben werden, also als Genotyp und ist nicht mehr nur auf die phänotypische Beschreibung reduziert.“ Hovestadt 2009

<sup>3</sup> „Der Architekt verfügt nicht mehr über ein abgeschlossenes kreisförmiges Universalwissen, welches er aus sich schöpfend im Entwurfsprozess in eine Architektur transformiert, sondern das Wissen ist netzwerkartig zwischen mehr oder weniger angrenzenden Wissensgebieten organisiert. Dem Netz und seinen unterschiedlichen Knoten und Verbindungen folgend entwickelt sich der Entwurf.“ de Bruyn, Reuter 2011

*„Das rechnergestützte Arbeiten erlaubt es, die bislang übliche und gewohnte Kontrolle über das konkrete Ergebnis aufzugeben. Pointiert formuliert heißt das, dass wir bis zum Ende der Berechnungen nicht wissen, wie ein Gebäude aussehen wird; wir wissen nicht einmal genau «warum» es so aussieht.“ (Hovestadt 2009, S. 81)*

Die Leistungsmerkmale beziehen sich entweder auf die Architektur als Gesamtgestalt, beispielsweise in Form einer klimatischen, ökonomischen, funktionalen oder gestalterischen Gesamtperformanz eines Gebäudes oder aber dezidiert auf einzelne Elemente der Architektur wie zum Beispiel die Tragfähigkeit, Größe, Form oder Materialität einzelner Elemente. Werden bestimmte Eigenschaften der Elemente und die gewünschten Merkmale in den Entwurfsprozess integriert, so bestimmen sie die finale Gestalt des Entwurfes. Durch die Definition von Relationen zwischen den Elementen wird die architektonisch relevante Struktur vorgegeben. Das finale Erscheinungsbild, die Gestalt wird erst durch die Konkretisierung innerhalb der Struktur real. Die Performanz von Elementen oder Gestalten kann auf unterschiedliche Art und Weise in Entwurfsprozesse integriert werden. Regelbasierte Systeme erlauben es den Akteuren sich ausschließlich in gültigen Lösungsbereichen der Entwurfsaufgabe zu bewegen und erzwingen somit inhärent gültige und damit in Bezug auf das Regelwerk performante Lösungen. Auswahlbasierte Systeme nehmen eine auf die Performanz bezogene Bewertung vor und wählen entsprechend bestimmten Kriterien Ergebnisse aus. Mittel zur Bewertung von Gestalten und Elementen können beispielsweise Performanz orientierte Simulationen sein. In diesem Sinne möchte die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Diskussion des performanten Entwerfens leisten.

### **1.3. Design als empirische „Wissenschaft“**

Entwerfen unterscheidet sich grundlegend von anderen kognitiven Prozessen und bildet daher eine eigene Kategorie<sup>4</sup>. Ihr Anliegen liegt nicht in der genauen Abbildung der Realitäten als Grundlage des Vorhandenen und Neuen, sondern viel mehr im Erschaffen des Neuen und dem damit verbundenen Verständnis des Neuen und des Vorhandenen als ein neuentstandenes Gesamtsystem.

---

<sup>4</sup> "Die Vorgehensweise des Architekten, Planers und Entwerfers ist eine eigenständige kognitive Tätigkeit, die sich von anderen kognitiven Typen wie Lehren, Lernen, Forschen oder Organisieren unterscheidet." (de Bruyn, Reuter 2011, S. 33)

*“Science is still searching for a theory of explanation, architecture for a theory of generation- and it is just possible that the latter will be advanced before the former. In other words, form generating models developed for architectural purposes (or based on unorthodox or incorrect scientific views) may be valuable if they model a phenomenon that scientists are seeking to explain.” (Frazer 1995, S. 20)*

Durch das Hinzufügen des Neuen in ein vorhandenes System, ergeben sich neue Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Komponenten, die zu einer Neudefinition des Systems führen, die über die Summe der Einzelkomponenten hinaus weist. Emergente Systeme sind deshalb in ihrem Ergebnis sehr schwer oder gar nicht vorhersehbar. Darin liegt der Reiz des Entwerfens, aber auch dessen Herausforderung. Durch experimentelles Verändern der Systeme, kann der Weg für Lösungen geöffnet werden, die durch streng wissenschaftliche Methoden vielleicht nur schwer oder gar nicht beschrrieben werden können. Der Entwurf löst sich von streng wissenschaftlichen Methoden, um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Diese sind nicht weniger wertvoll als streng wissenschaftliche gewonnene Erkenntnisse, da sie durch das Generieren des Neuen über die Erklärung des bereits Vorhandenen hinausgehen.

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zur Naturwissenschaft ist nach de Bruyn und Reuter (de Bruyn, Reuter 2011) das Kontext bezogene oder situative Wissen und Handeln beim Entwerfen. Das bedeutet, dass für die Gewinnung der Erkenntnisse, die Umgebung, der Kontext in den kognitiven Prozess des Entwerfens einbezogen und berücksichtigt werden muss. Und folglich die Ergebnisse immer in Bezug zu Ihrem Kontext verstanden sein wollen. Das Kontext bezogene Sollwissen der Architekten ist nicht allgemein gültig und beschreibt nicht die Welt wie sie ist, sondern wie sie im entsprechenden Kontext sein sollte oder könnte. Entgegen dem naturwissenschaftlichen Ansatz, der versucht die beteiligten Elemente in einer abgeschlossenen Laborsituation unter Kontrolle zu haben, ist das Entwerfen als offenes System zu verstehen, indem netzwerkartig Wissen und Einflüsse integriert werden.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als ein empirischer Beitrag zur Wissenschaft in dem Sinne, dass ein Neues in einem spezifischen Kontext hinzugefügt wird und sich daraus eine Erkenntnis erschließt. Also nicht die theoretische Analyse, sondern die empirische Synthese führt zu einer neuen Entwurfsmethode, die betrachtet analysiert und bewertet wird. Die

informationswissenschaftlichen Methoden und die Entwicklung der Algorithmen und Berechnungen sind nicht mit einem naturwissenschaftlichen Anspruch verwendet, sondern sind in einem entwerferischen Kontext zu verstehen. Die im wissenschaftlichen Sinne nicht korrekte oder nicht vollständig korrekte oder nicht vollständige Anwendung von wissenschaftlichen Methoden, wie z.B. evolutionären Algorithmen oder akustischer Simulation kann mit Ergebnissen überraschen, die mit streng wissenschaftlicher Herangehensweise nicht oder nur mit großem Aufwand erreichbar sind.

*„Auch wenn gewisse Algorithmen aus theoretischer Sicht untauglich sein mögen, um zu einer -mathematisch- sauberen und analytisch präzisen Lösung zu kommen, können sie für unsere Aufgaben durchaus wirksame Werkzeuge sein, weil wir nicht unbedingt nach der einen und einzig perfekten Lösung, sondern nach nützlichen, praktikablen und korrekten Ergebnissen suchen, um den Rechenaufwand in einem überschaubaren Rahmen zu halten.“ (Hovestadt 2009, S. 192)*

Im Sinne des situativen und kontextuellen Handelns und Erkennens, ist die vorliegende Entwicklung eines evolutionären Algorithmus zur Gewinnung von akustischen Raumkonzepten eben nicht allgemeingültig und lässt als Ergebnis nicht „den idealen“ Konzertsaal erwarten, sondern ist von situativen entwerferischen Entscheidungen und Vorgaben, die durchaus subjektiven und individuellen Charakters sind, geprägt.

#### **1.4. Lösungsalgorithmen für Optimierungsprobleme**

Es existieren Optimierungsprobleme, die nicht durch deterministische Verfahren zu lösen sind. Unter anderen gehören hierzu Probleme, die nicht vollständig oder nicht korrekt formuliert sind. Selbst korrekt und vollständig formulierte Probleme können sich auf Grund großer Komplexität einer Lösung durch deterministische Verfahren entziehen. Standardbeispiel hierfür ist das sogenannte „Problem des Handlungsreisenden“, welches auf Grund seiner hohen Komplexität (NP) nicht mit deterministischen Verfahren gelöst werden kann.<sup>5</sup>

Die Entwicklung von Verfahren zur Lösung von nicht linearen Optimierungsproblemen ist Gegenstand der Informatik. Dabei stehen dort vor

---

<sup>5</sup> Das Problem wurde 1930 erstmals explizit von Karl Menger auf einem Kongress in Wien formuliert. Heute ist man nachweislich in der Lage das Optimum mit einer Abweichung von 1% zu approximieren.

allein die Effizienz der Algorithmen und deren Zuverlässigkeit im Finden der Optima im Vordergrund. Das Hauptproblem besteht darin, dass das Optimum bzw. die Stelle des Optimums nicht bekannt ist, und die Größen der Probleminstanzen für pragmatische Anwendungen zu groß sind, um alle möglichen Lösungen zu erzeugen (brute-force Methode) und sie gegeneinander zu bewerten. Abhilfe schaffen heuristische Verfahren, die sich dadurch auszeichnen, dass sie ohne Kenntnis des Optimums bestimmte Annahmen treffen, um Lösungen effizienter zu finden als dies mit der mit der brute-force Methode möglich wäre. Wenn Annahmen in den Suchprozessen durch zufallsgesteuert ablaufen, so nennt man diese Methoden probabilistische Heuristiken. Zufallsgesteuerte Methoden werden auch häufig als Monte-Carlo-Methoden bezeichnet, da es einem Glückspiel gleicht, die Lösung zu finden. Es existiert eine Vielzahl von Optimierungsalgorithmen in unterschiedlichsten Varianten. Denn Lösungsalgorithmen versuchen die Ergebnislandschaft möglichst effizient abzusuchen. Dabei ist zu unterscheiden, ob ein lokales oder ein globales Optimum gesucht wird.

Lokale Optima lassen sich beispielsweise mit der Bergsteigermethode (hill climbing) ermitteln. Ausgehend von einer beliebigen zufällig angesteuerten Lösung wird in der Umgebung in einem bestimmten Abstand eine bessere Lösung gesucht. Findet der Bergsteiger einen in seiner vorgegebenen Schrittweite erreichbaren höheren Punkt in der Ergebnislandschaft, so nimmt er diese Position ein und sucht erneut nach einem erreichbaren höheren Punkt in der Ergebnislandschaft. Für den Bergsteigeralgorithmus ist es notwendige Bedingung, Kenntnis über die Umgebungsfunktion, welche die Lösungen in der Nachbarschaft eines bestimmten Punktes repräsentiert, zu haben. D.h. die Ausprägung der Ergebnislandschaft ist bekannt. Hat der Algorithmus ein lokales Optimum gefunden, wird der Bergsteiger dort verharren, denn er ist nicht mehr in der Lage in der näheren Umgebung einen besseren Punkt zu finden. Durch das Aussenden mehrerer Bergsteiger (Populationskonzept) kann in einem Durchgang parallel an unterschiedlichen Stellen gesucht werden und mehrere lokale Optima gefunden werden. Um das Konvergieren in lokalen Optima zu vermeiden, wurden andere Verfahren entwickelt. So zum Beispiel der Ameisenalgorithmus (ant colony optimization) oder der Sintflut Algorithmus



(great deluge algorithm) oder die simulierte Abkühlung (simulated annealing). Der Ameisenalgorithmus versucht die natürliche Verhaltensweise von Ameisen innerhalb der Ergebnislandschaft nachzuahmen. Es werden Ameisen von einem bestimmten Punkt aus ausgesendet. Auf ihrem Weg sondern die Ameisen Pheromon ab. Geleitet wird die Ameise durch die Intensität der Pheromon Spuren. Ist keine Pheromon Spur in der Nähe so bewegt sich die Ameise willkürlich, also zufällig, durch den Ergebnisraum, immer auf der Suche nach Futter. Findet eine Ameise eine Futterquelle (Ziel) so kehrt sie zum Ausgangspunkt zurück. Durch häufiges Benutzen einer Spur wird das Pheromon intensiver. Die längeren Wege (nicht so gute Lösungen) sind gegenüber den kürzeren Wegen (bessere Lösungen) mit weniger Pheromon ausgestattet, da sich das Pheromon im Laufe der Zeit verflüchtigt. So kristallisieren sich im Laufe der Zeit gute Wege zum Futter gegenüber den nicht so guten Wegen heraus. Es ist offensichtlich, dass sich dieses Verfahren sehr gut zur Lösung des Problems des Handlungsreisenden anwenden lässt. Aber auch andere Probleme können so transponiert werden, dass sie mit dieser Methode gelöst werden können. Da die Ameisen unabhängig voneinander agieren können (mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit verlassen sie die Pheromon Spur) ist das Finden des globalen Optimums wahrscheinlich.

Der Sintflut Algorithmus versucht, eine effiziente Suche durch die schrittweise Einschränkung des Suchraumes zu erreichen. Wenn man sich den Ergebnisraum als ein Gebirge mit Tälern und Gipfeln vorstellt und diese Landschaft schrittweise mit Wasser füllt so wird klar was der Sintflut Algorithmus beabsichtigt. Durch den steigenden Wasserspiegel werden die besseren Regionen von den weniger guten unterschieden und die Region in der sich das globale Optimum befindet wird identifizierbar.

Die simulierte Abkühlung macht sich, auch die Methode der Suchraumeinschränkung zu nutze. Der physikalische Prozess der Abkühlung eines Materials wird durch die Vorgabe einer kontinuierlich absteigenden Temperaturfolge  $T$  simuliert. Dabei wird durch die kontinuierliche Abkühlung die Anzahl der möglichen Stellen des Optimums reduziert; analog der beweglichen Molekülen bei der physikalischen Abkühlung.

Eine weitere wichtige Methode zur Lösung von Optimierungsproblemen ist der evolutionäre Algorithmus. Durch die Anwendung evolutionärer Prozesse wie Mutation, Rekombination und Selektion können multidimensionale, nicht lineare Optimierungsprobleme gelöst werden. Evolutionäre Algorithmen zeichnen sich außerdem durch ihre große Robustheit aus. Das bedeutet auch für Probleme deren Ergebnisraum nicht genau definiert ist, können adäquate Lösungen gefunden werden.

*Evolution-based algorithms have been found to be some of the most flexible, efficient, and robust of all search algorithms known to computer science (Goldberg 1989) (Bentley, Corne 2002, S. 9)*

Der evolutionäre Algorithmus ist, aufgrund dieser Robustheit und weil er ohne einen Konvergenzbeweis auskommt (Petzold 1998, S. 2), für die hier betrachtete Aufgabe geeignet. Eine über die Einordnung in die Reihe anderer Optimierungsverfahren hinausgehende Beschreibung der Eigenschaften und Elemente genetischer evolutionärer Algorithmen wird nachfolgend in Kapitel 5 gegeben.

## 2. Aufgabenstellung

### 2.1. Raumkonzepte akustischer Räume

Das Entwerfen eines akustischen Raumes, wie beispielsweise eines Theaters oder eines Konzertsaals ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Gerade bei Konzert- oder Opernsälen ist neben den funktionalen und ästhetisch-architektonischen Aspekten vor allem die Akustik ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Die Raumakustik ist ein komplexes System aus Geometrie, Material und menschlicher Wahrnehmung. Zur Bewältigung der Entwurfsaufgabe dienen nicht selten bereits bestehende Räume als Vorbild. Diese historischen Vorbilder, z.B. die Semper Oper in Dresden (1841), die beim Neubau der Oper Oslo (2008) des Architekturbüros Sønnetta(Meyer 2008) Vorbild war, sind geprägt von der Aufführungspraxis ihrer Entstehungszeit. Sie sind konzipiert für die Darbietung klassischer symphonischer Musik, klassischer Kammermusik oder szenischer Aufführungen in einer meist frontalen Darbietung. Eine nahezu revolutionäre Entwicklung aus akustisch-konzeptioneller Sicht stellt das Weinbergprinzip mit seiner Verschiebung der Bühnenposition in die Raummitte, wie sie in der Liederhalle in Stuttgart oder in der Philharmonie in Berlin Ende der 50er Anfang der 60er des 20. Jahrhunderts umgesetzt ist, dar. Diese konzeptionelle Neuerung wird durch eine Spezialisierung des Raumes zu einer reinen symphonischen Bühne und durch ein verändertes Verständnis der Aufführungspraxis hervorgerufen. Durch die Entstehung moderner zeitgenössischer Musik und durch veränderte Anforderungen an die Aufführungsorte sind die Vorbilder der Aufführungsstätten aus der klassischen Zeit nur noch bedingt tauglich. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob es zeitgemäß und dem Selbstverständnis einer modernen Informationsgesellschaft angemessen ist, für aktuelle Planungen Raumkonzepte aus dem 18. und 19. Jahrhundert als Vorbild herzunehmen und nachzubilden.

Wie also können neue Konzepte für akustische Räume entsprechend den sich aktuellen und veränderten Anforderungen entwickelt werden? Können mit einer entsprechenden Methode auch für die klassischen Anforderungen neue räumliche Konzepte für akustische Darbietungsräume entwickelt werden?

## **2.2. Raumgestalt und Akustik**

Die Akustik eines Raumes ist abhängig von seiner Raumgestalt. Das Zusammenwirken von Materialität und Geometrie bestimmen das akustische Verhalten des Raumes. Es lässt sich durch entsprechende Kennwerte differenziert beschreiben. Akustische Kennwerte sind für einen Raum eindeutig und signifikant. Im Umkehrschluss müsste sich aus der Vorgabe von Kennwerten eine geeignete materielle und geometrische Gestalt des Raumes entwickeln lassen. Der Umkehrschluss ist zwar nicht eindeutig, da man sich leicht vorstellen kann, dass es unterschiedliche Räume mit denselben akustischen Kennwerten geben kann. Dennoch, so die These der Arbeit, kann aus den Vorgabekennwerten eine oder mehrere geeignete Raumgestalten entwickelt werden. Ziel der Untersuchung ist es, eine Methode zu entwickeln, die unter Vorgabe von akustischen Zielgrößen Raumkonzepte für akustische Räume hervorbringt. Evolutionäre Algorithmen scheinen für diese Methode geeignet, da die sie in der Lage sind nichtvollständig definierte und gemischtwertige Probleme, was Entwurfsprobleme zu sein scheinen, zu lösen. (Petzold 1998, S. iii) Darüber hinaus verspricht die Verwendung von evolutionären Algorithmen die Möglichkeit in unerwartete Lösungsbereiche vorzudringen zu können. (Bentley, Corne 2002, S. v)

## **2.3. Gestaltgebung akustischer Räume**

Die wünschenswerten akustischen Kriterien für Räume sind bekannt und wissenschaftlich nachgewiesen<sup>6</sup>. Sie finden in der Planungspraxis breite Anwendung. Es sind objektiv messbare und vergleichbare Größen bekannt, mit deren Hilfe die akustische Qualität von Räumen signifikant bestimmt werden kann. Sie sind durch die geometrische (primäre) und materielle (sekundäre) Ausprägung des Raumes bestimmt. Sowohl die primäre also auch die sekundäre Raumstruktur prägen durch ihr Zusammenwirken die Raumakustik. Durch das meist nachgelagerte Anpassen der Sekundärstruktur an die notwendigen raumakustischen Anforderungen, ohne initiale Berücksichtigung

---

<sup>6</sup> Physikalische Grundlagen zur Raumakustik sind ausführlich bei Kuttruff(2000), Fasold(2003) beschrieben. Anwendungsorientierte Grundlagen finden sich bei Barron(1993), Tempelton(1993) und Metha et al.(1999)

der Primärstruktur, wird das Potential, welches in einer geeigneten Primärstruktur liegt, ignoriert. Das Potential könnte dadurch erschlossen werden, dass primäre und sekundäre Struktur anhand der gewünschten akustischen Zielkriterien von vorneherein in gegenseitiger Wechselwirkung zu einander entwickelt werden. Die vorliegende Arbeit untersucht, ob mit Hilfe von evolutionären Algorithmen eine Formgebungsmethode entwickelt werden kann, die anhand von akustischen Zielgrößen und raummorphologischen Größen als Eingabeparameter differenzierte Raumkonzepte ausbildet. Dabei steht im Vordergrund, Raumstrukturen in Abhängigkeit der vorgegebenen akustischen Zielwerte zu entwickeln und nicht eine im ingenieurs-technischen oder wissenschaftlichen Sinne optimale Akustik für einen vorgegebenen Entwurf zu finden. Die Verwendung der wissenschaftlichen Methoden der evolutionären Algorithmen und der Raumakustik wird als Quelle der Inspiration genutzt, um Designkonzepte zu entwickeln. (vgl. Frazer 1995, S. 12) Grundlage für die Entwicklung der Formgebungsmethode ist die Identifizierung der notwendigen und geeigneten Parameter und Kriterien für die Entwicklung und Bewertung der Raumstrukturen.

#### **2.4. Raummorphologie und Ästhetik**

Die bekannten Kenngrößen der Raumakustik basieren auf den physikalischen Phänomenen des Schalls und dessen physiologischen und psychologischen Auswirkungen auf den Menschen. Die Forschung hat für die Raumakustik aus messbaren physikalischen Größen durch Intersubjektivierung Bewertungskriterien entwickelt und verallgemeinernd festgelegt. An denen muss und kann sich ein akustischer Raum messen lassen. Für eine ästhetische Bewertung sind bisher keine entsprechenden Werte oder Messgrößen bekannt. Sie unterliegt, nach wie vor, einer individuellen und damit subjektiven Bewertung. Eine umfassende Intersubjektivierung entsprechend der akustischen Kriterien ist bisher für eine ästhetische Bewertung nicht unternommen worden. Eine ästhetische Bewertung der erzeugten Ergebnisse ist aber notwendig, um Raumkonzepte über die Akustik hinaus betrachten und bewerten zu können. Denn erst durch das Anwenden von ästhetischen Prinzipien wird der Raumerzeugung ein Gestaltungswille aufgezwungen. Die

Anwendung allein technischer Kriterien, wie die der Akustik beispielsweise, würde die erzeugten Gestalten der Gefahr der Beliebigkeit aussetzen. Da die akustischen Kriterien im Prinzip fest definiert sind, bieten die ästhetischen Kriterien die Möglichkeit den Erzeugungsvorgang differenziert zu gestalten und ästhetisches Potential zu erzeugen. Häufig wird das Problem der ästhetischen Bewertung durch eine Interaktion des Benutzers gelöst. Das bedeutet, dass ein Nutzer direkt in den Erzeugungsmechanismus eingreift, indem er z.B. für sein Empfinden ungeeignete Individuen ändert oder entfernt, oder die Individuen der Population entsprechend seinen Präferenzen bewertet oder auswählt. Ein entscheidender Nachteil dieser Methode ist die schlechte Performanz des Bewertungssystems Mensch. Das menschliche Gehirn kann nur eine verhältnismäßig begrenzte Menge von Gestalt-Individuen betrachten und bewerten. Außerdem sind die Bewertungskriterien und die jeweilige Gewichtung nicht transparent und vermutlich auch nicht während des gesamten Vorgangs konstant. Will man die Performanz des Entwurfssystems erhalten, muss das ästhetische Kriterium im Algorithmus verankert werden. Die Einbindung einer raummorphologischen Beschreibung der Raumkonzepte soll die Integration der ästhetischen Bewertung in das Entwurfssystem bewerkstelligen. Die Raumorphologie wird in Abhängigkeit der verwendeten Geometriesynthese des Entwurfssystems entwickelt, da die Raumorphologie die Verhältnisse und Beschaffenheit der Elemente zu einander beschreibt. Die Raumorphologie ist keine Beschreibung der ästhetischen Wirkung des Gegenstandes auf den Rezipienten, sondern eine Beschreibung der strukturellen Beschaffenheit des Raumes. Die konkrete Beschreibung, also die konkreten raummorphologischen Werte unterliegen der individuellen und subjektiven Verantwortung des Entwerfers.

## **2.5. Methoden**

Grundlage für die Entwicklung einer Formerzeugungsmethode für akustische Räume ist die Kenntnis der relevanten akustischen Planungs- und Gütegrößen der Raumakustik. Diese Werte sind aus der raumakustischen Forschung für den vorliegenden Zweck ausreichend bekannt und können aus der Literatur

ausgewählt und entnommen werden. Die Grundlagen der Raumakustik und die verwendete Literatur wird in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Für viele Probleme aus dem technischen Bereich gibt es inzwischen Lösungen, die sich der Hilfe evolutionärer Algorithmen bedienen. Es gibt Standardalgorithmen, die entsprechende Standardprobleme effizient lösen. Es existieren Methoden zur Einordnung eines individuellen Problems und Hilfestellungen zum Entwurf von evolutionären Algorithmen. Ausgehend von diesen Methoden soll der Algorithmus für das vorliegende Problem entwickelt werden.

Im Laufe der Zeit haben sich 4 Grundtypen für akustische Räume herausgebildet. Jeweils ein in der Fachwelt anerkannter und in der Literatur ausreichend beschriebener Vertreter jeden Typs wird kurz beschrieben und der Bewertungsfunktion des evolutionären Algorithmus unterzogen. Dadurch können empirisch Vergleichswerte für die Bewertungsfunktion ermittelt werden. Die hier ermittelten Werte können als Vergleichsmarken für die generierten Raumstrukturen dienen.

Zentraler Bestandteil der Arbeit ist das Konzept eines evolutionären Algorithmus zur Formerzeugung akustischer Räume und die Überprüfung, ob dieses Raumerzeugungskonzept im architektonischen Kontext tragfähig ist. Grundlage ist die Erstellung einer Problemdefinition aus der Analyse der abstrakten Entwurfsaufgabe und die theoretische Ableitung des Algorithmus aus den Erkenntnissen des Literaturstudiums. Weiterführend wird der Algorithmus prototypisch in ein Programm übersetzt, um konkrete Ergebnisse produzieren zu können und diese augenscheinlich bewerten zu können. Die dafür notwendige Software wird nicht vom Autor selbst programmiert, sondern durch einen studentischen Hilfswissenschaftler, unter Vorgabe der Konzepte und Abläufe durch den Autor. Anhand des entwickelten Programms können geeignete Evolutionsparameter und raummorphologische Größen empirisch für eine spezifische Entwurfsaufgabe ermittelt und angewendet werden.

Abschließend wird der entwickelte Formgebungsalgorithmus auf seine Tauglichkeit bezüglich der gestellten Aufgabe hin bewertet. Dabei werden

neben der Effizienz auch die Varianz der Ergebnisse und deren Tauglichkeit als architektonische Entwurfskonzepte betrachtet.

### **3. Entwurfsmethoden und Systeme**

#### **3.1. Performatives Entwerfen**

Die Anwendung digitaler Werkzeuge im Entwurfsprozess hat einen Paradigmenwechsel in Gang gesetzt. Wurde bisher das Objekt in seiner formalen Präsenz als Ergebnis einer Vision oder eines entwerferischen Gestaltungswillens betrachtet, so wird das Objekt zunehmend als Ergebnis eines Prozesses des Informierens aufgefasst. Das Form-Machen weicht zunehmend dem Form-Finden (Oxman 2008). Ein performatives Entwurfssystem zeichnet sich dadurch aus, dass das Gestaltergebnis aufgrund eines objektivierten Bewertungsprozesses gefunden wird, der die Leistungsfähigkeit (Performanz) der Gestalt analysiert und bewertet. Leistungsfähigkeit in Bezug auf Gestalt bedeutet in diesem Zusammenhang, in wie weit die Gestalt, die vorgegebenen Kriterien erfüllen kann. Es sind unterschiedliche Kriterien der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit des Entwurfskontextes denkbar. Neben physikalischen, sind auch funktionale oder ästhetische Aspekte relevant und, solange sie objektiviert beschreibbar und messbar sind, können sie auch in diesem Sinne als Performanzkriterien dienen. Durch die Integration dieser, auf die Performanz von Gebäuden gerichteten Kriterien, in digitale Entwurfssysteme, verlagert sich der Fokus vom Formalen zum Performanten. Die explizite Formulierung der Performanz, also von Leistungsmerkmalen in den Entwurfsalgorithmen und die damit verbundenen Externalisierung und objektivierte Darstellung, ermöglicht es, deren Einhaltung auch zu verifizieren. Die Performanz eines Gebäudes lässt sich in Größen darstellen, die sich maschinell und eindeutig verarbeiten lassen. Numerische Simulationen liefern die notwendigen Ergebnisse mit denen Vergleiche angestellt werden können. Dabei stellt die Performanz ein entscheidendes Kriterium zur Unterscheidung zu algorithmischen Formgrammatiken dar. Welche Kriterien die Gesamtperformanz bilden sind unterliegt der Entscheidung der Entwerfer und ist selbstverständlich im Kontext der Entwurfsaufgabe zu verstehen.



*"Im Gegensatz dazu [algorithmische Formengrammatiken] haben die genetischen Algorithmen mit der Funktion als dem, was die Graphiken bedeuten, zu tun. Nicht, daß die maschinelle Verarbeitung an und für sich mehr wäre als die Manipulation bedeutungsloser Muster. Die Zielfunktion, mit der die Tauglichkeit der Varianten gemessen wird, legt jedoch Kriterien an, die Funktionalität repräsentieren." (Franck, Franck 2008, S. 182)*

### 3.1.1. Analoge performante Formfindungsverfahren

„Performante“ Formfindungsverfahren in der Architektur sind nicht erst mit der Anwendung von Computern im Entwurfsprozess entstanden. Performanz ist im weiteren und im engeren Sinne ein Grundanliegen der Architektur, was sich schon im Vitruv’schen Dreiklang „Firmitas, Utilitas, Venustas“ manifestiert. Die Entwicklung von Entwurfsverfahren, die während des Entwerfens die Performanz des Entworfenen erkennen, bewerten oder entwickeln, ist eine Konsequenz aus den gewachsenen Anforderungen an die Architektur der Gegenwart. Auch analoge oder manuelle Verfahren können in diesem Sinne „performant“ sein. Die Hängemodelle des Antonio Gaudí sind in diesem Sinn als ein performantes Formfindungsverfahren zu verstehen.

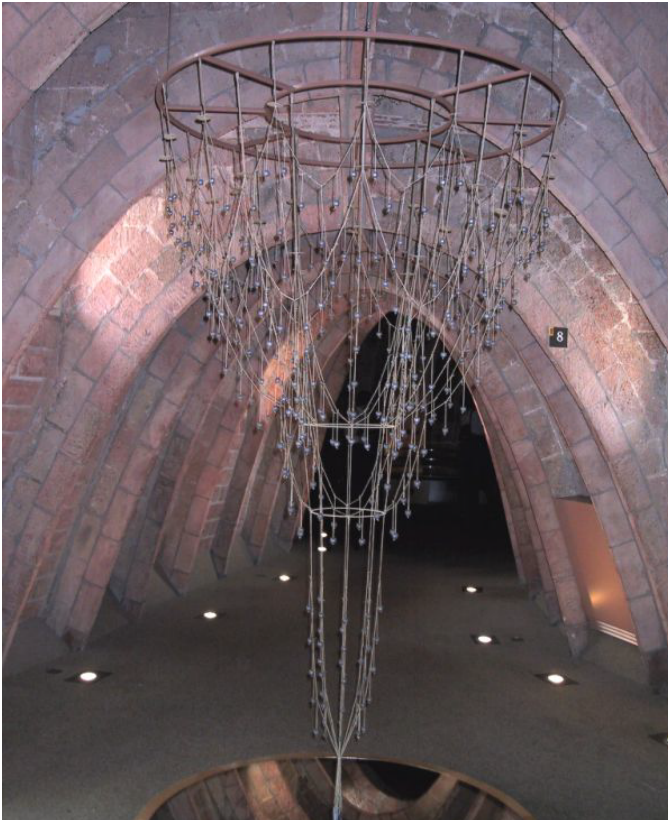


Bild 1: A. Gaudí: Hängemodell Sagrada Família (Rudy 2008)

Die Ergebnisgestalt wird systemimmanent durch die Gravitation informiert und indirekt durch Manipulation der Randkurven, Seillängen und Knotenpunkte durch den Entwerfer beeinflusst. Durch das Informieren der Gestalt mit Hilfe der Gravitation entsteht eine sehr „performante“ Tragstruktur.

In diese Gruppe der analogen performativen Formfindungsprozesse, lassen sich auch die Methoden von Frei Otto eingliedern. Neben Hängemodellen, ähnlich denen Gaudís, erzeugt Otto mit Hilfe von Drahtschlingen und Seifenwasser bezaubernde Oberflächen. Geleitet wird diese Methode durch die Vorstellung einer effektiven Architektur, inspiriert durch das Vorbild Natur. Hintergrund für die Verwendung von Seifenhaut in den konstruktiven Formfindungsmodellen ist ihre Eigenschaft, ideale Minimalflächen innerhalb der vorgegebenen Begrenzungen zu entwickeln. Aus Minimalflächen lassen sich besonders effektive Tragwerke entwickeln.

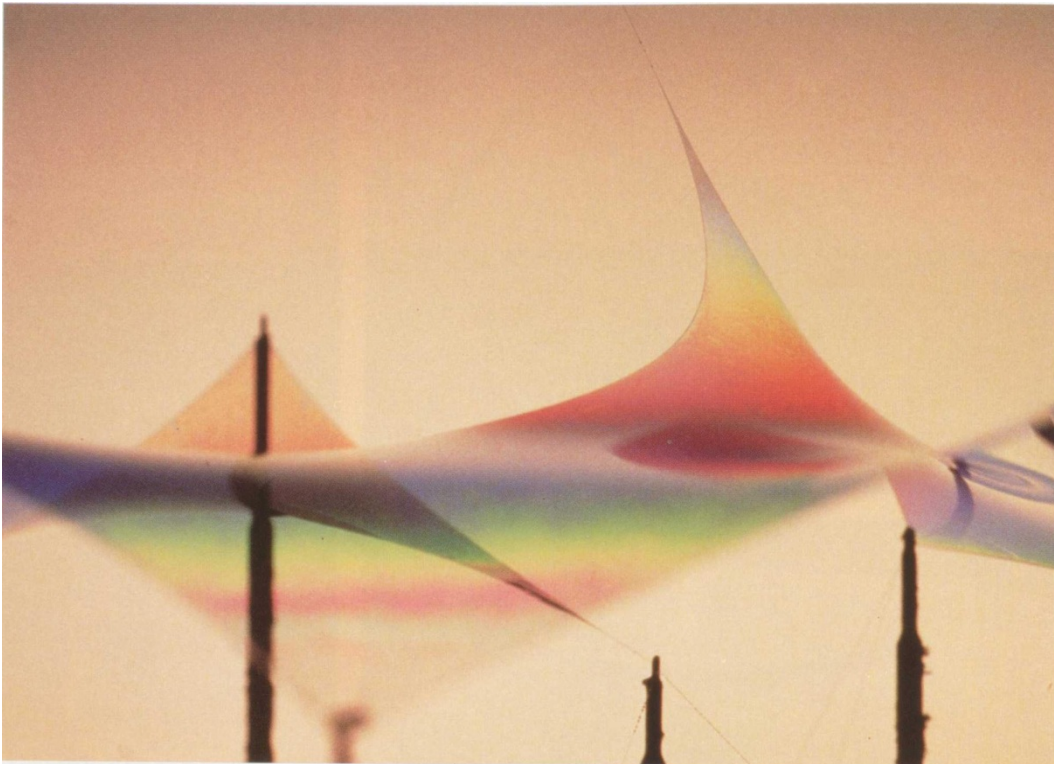


Bild 2: Frei Otto: Seifenhautmodell zur Formfindung eines Zeltes (Schanz, Otto 1995, S. 44)

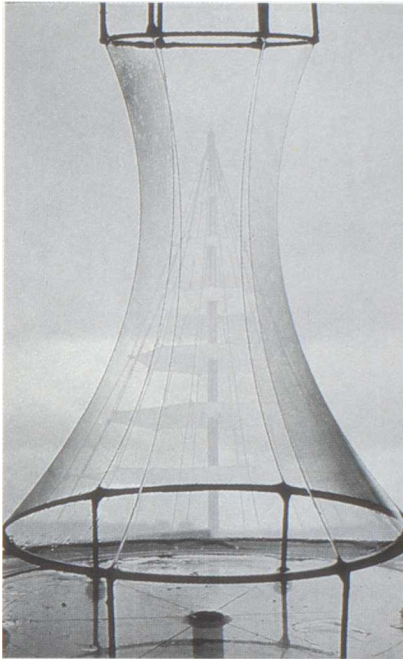


Bild 3: Frei Otto: Seifenhautmodell eines Seilnetzkühlturms (Schanz, Otto 1995, S. 111)

Die Seifenhautmethode ist ein Entwurfssystem, innerhalb dessen sich der Entwerfer durch die Veränderung der Randbedingungen auf die Suche nach einer geeigneten Form begeben kann; immer in der Gewissheit ein effektives Tragwerk zu entwickeln. Diese Gewissheit der Tragwerkseffizienz wird erkaufte durch den Verzicht auf die direkte Formgestaltung, denn die Form kann nur systemimmanent, also indirekt durch die Veränderung der Randbedingungen beeinflusst werden. Diesen Methoden ist gemeinsam, dass die erzeugte oder gefundene Gestalt nicht allein durch eine Vision der finalen Gestalt entsteht, sondern entscheidend durch ein systemimmanentes Informieren der Form. Frei Otto selbst spricht von Selbstbildung und Gestaltwerdung. (Otto 1988 , Otto 1984)

Sowohl der Formfindungsprozess von Gaudí, also auch der von Otto bedienen sich physikalischer Phänomene: zum einen der Gravitation und zum anderen der Oberflächenspannung der Seifenlauge. Beide beschriebenen Formfindungsprozesse sind, dadurch, dass sie sich physikalischen Phänomenen als Parameter und Systemgrundlage bedienen, auch auf diese beschränkt. Die Seifenhautmodelle Frei Ottos können nichts anderes als eben „nur“ eine Minimalfläche innerhalb des vorgegebenen Randdrahtes

auszubilden. Ähnlich verhält es sich mit den Hängemodellen Gaudís, die eben „nur“ innerhalb der Gravitation reagieren können.

### **3.1.2. Simulationsbasierte Gestaltoptimierung**

Über die Verwendung realer physikalischer Phänomene hinaus können auch Simulationen in Entwurfssysteme integriert werden. Inspiriert durch die Effizienz biologischer Konstruktionen, schlägt Claus Mattheck eine Gestaltoptimierung von technischen Konstruktionen mit Hilfe von Simulationsmethoden vor.

(Mattheck 1989). In Anlehnung an die Knotenbildung von Baumästen, entwickelt er eine Methode, die darin besteht, das Baumwachstum durch eine kombinierte Simulation aus Wärmeausdehnung, Materialschwellung und Tragfähigkeitsanalyse nachzuahmen. Bäume entwickeln an den Ansatzstellen der Äste, entsprechend der tatsächlichen Belastung der Äste, an den stärker belasteten Stellen mehr Material als an den weniger belasteten Stellen. Es entsteht, ein auf die Tragfähigkeit bezogenes, effizientes Baumwachstum.

Mattheck transformiert diesen natürlichen Wachstumsvorgang in eine technische Umgebung. Die Materialanlagerung wird durch eine Simulation der Wärmeausdehnung abgebildet, welche in einer künstlichen Materialschwellung am untersuchten Tragwerksknoten resultiert. Anschließend wird die Tragfähigkeit der Knotengestalt durch eine FEM Analyse untersucht. Die Analyse liefert die belasteten und unbelasteten Knotenbereiche. Die unbelasteten Bereiche des Knotens werden entfernt. Die verbleibenden belasteten Teile werden wiederum der Schwellung durch die Wärmesimulation unterzogen. Dadurch wird das natürliche Wachstum eines Baumknotens simuliert, der, analog zur Methode Matthecks, an den belasteten Stellen mehr Zellmaterial anlagert als an den unbelasteten Stellen.

Im Gegensatz zu den physikalischen Methoden, kann bei der Simulation der zugrundeliegende natürlich physikalische Vorgang zum einen beschleunigt und zum anderen derart transponiert werden, dass natürliche Wachstumsvorgänge auf nichtwachsende Materialien wie Stahl oder Kunststoffe übertragen werden können.

Simulationen können aber nicht nur im übertragenen Sinne für eine Gestaltoptimierung verwendet werden. Eine direkte Verwendung der

Simulationsergebnisse als Evaluationsgrößen zeigt die Optimierung der Geometrie von Konzertsälen aufgrund einer akustischen Simulation (Sato u. a. 2004). In einem iterativen, evolutionären Prozess wird die akustische Performanz einer vorgegebenen Hüllform durch Veränderung der Geometrie optimiert. Die Materialeigenschaften der Hülle bleiben dabei unverändert. Die Ausgangs-Hülle wird in regelmäßige Subflächen unterteilt, um die Hülle bzw. ihre Subflächen manipulieren zu können. Die Ergebnisse sind dadurch strukturell vorgezeichnet. Die Bewertung der Hörerplätze wird durch eine durchschnittliche Qualität oder durch das Erreichen einer Minimalqualität vorgenommen.

### 3.1.3. Regelbasierte Gestalterzeugungsverfahren

Regelbasierte Gestalterzeugungsverfahren oder ‚shape grammars‘ basieren auf einem Design Algorithmus, dessen Kernstück ein ästhetisches System ist. Grundlegendes Merkmal der ‚shape grammars‘ ist es, dass die Erzeugungsdomäne so gut bekannt ist, dass aus dem vorhandenen Wissen ausreichend signifikante Gestaltungs- bzw. Erzeugungsregeln abgeleitet werden können. Durch die Definition eines ästhetischen Systems, ist der Algorithmus in der Lage aus einer Eingabe eine entsprechende Ausgabe zu erstellen.

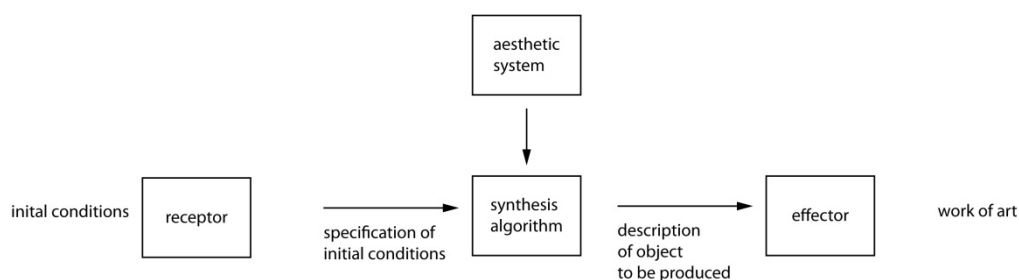


Bild 4: Schema Design Algorithmus nach Stiny u. Gips (Stiny, Gips 1978, S. 13)

Der Design Algorithmus als Ganzes und auch das ästhetische System als Teilsystem sind in sich geschlossene Systeme. Elemente werden nach festgelegten Regeln des ästhetischen Systems zu einander in Relation gesetzt. Dadurch entstehen immer Ergebnisse, die den Vorgaben des ästhetischen Systems entsprechen, also immer gültig sind. Das ästhetische System ist

sozusagen der festgelegte Stil. Durch die variablen Parameter werden innerhalb dieses Stils Varianten erzeugt. Das ästhetische System wird, entsprechend der These von Stiny und Gibs, aus der Analyse eines konkreten Werkes gewonnen.

Startpunkt für die Anwendung von regelbasierten Entwurfssystemen ist die Entwicklung eines Designalgorithmus von Stiny und Mitchell zur Erzeugung palladianischer Villen (Stiny, Mitchell 1978). Eine neuere Arbeit auf diesem Gebiet stellt der regelbasierte Entwurfalgorithmus von Duarte (Duarte 2001) dar, der aus der Analyse der Malagueira Häuser Sizas dessen Entwurstil extrahiert und diesen wiederum auf dieselbe Entwurfsaufgabe ansetzt. Duarte ergänzt die regelbasierte Methode um das Element der Bewertung zu einer, wie er es nennt, „diskursiven Grammatik“.

*"A grammar consists of a set of substitution rules that apply recursively to an initial assertion to produce a final statement. In description grammars, the assertions are symbolic descriptions, whereas in shape grammars, they consist of shape descriptions. In addition, description grammars deal with semantics, and shape grammars address form. The third constraint is satisfied with a set of heuristics. Heuristics are used to choose a rule for application at each step of the design generation or the constraint choice to a small number of rules. Other heuristics assess the designs that would result from the application of each of the available rules, and then choose the one that takes the evolving design closer to the goal description in the design brief. [...] I call this mathematical model a discursive grammar because it allows the generation of formally and semantically correct designs. Each house is like a piece of speech in the language that is appropriate for the context. In the following section, it will be shown how the approach proposed in this study fits into the context of approaches to mass housing." (Duarte 2001, S. 25)*

Das diskursive Element, also die Auswahl oder Suche anhand einer Bewertung, sieht Duarte entweder durch einen Algorithmus oder durch eine Benutzerinteraktion realisiert. Wobei er in einer Kombination von Interaktion und algorithmischen Bewertung den größten Nutzen sieht.

Für den erfolgreichen Einsatz von ‚shape grammars‘ ergänzt Duarte den Test von Mitchell durch ein weiteres Kriterium.

*"Thus, the test can be more accurately reformulated as follows:  
Descriptive test: can the grammar generate designs in the corpus?  
Analytic test: can the grammar generate existing designs not in the original corpus?  
Synthetic test: can the grammar generate new designs in the style?  
Goal test: can the grammar generate designs that match criteria?" (Duarte 2001, S. 37)*

Als wichtigstes Kriterium für den Erfolg seiner „shape grammar“ aber nennt Duarte den Erkennungstest des Autors der analysierten Häuser selbst. Siza

habe offenbar die von der ‚shape grammar‘ erzeugten Häuser nicht von seinen eigenhändig entworfenen unterscheiden können.

Duarte hat ein stabiles System entwickelt, welches die stilbildenden redundanten Informationen in den Regeln ausreichend formuliert, um mit den verbleibenden Variablen das System nicht aus der Stilbalance zu bringen.<sup>7</sup> Durch die Erweiterung zur diskursiven Grammatik, wird das Entwurfsproblem als ein Optimierungsproblem behandelt.

In der Anwendung regelbasierter Formfindungssysteme lassen sich beispielsweise die Eingangsbedingungen so definieren, dass die Ergebnisse des Formfindungsprozesses etwa immer Instanzen eines bestimmten Geometrietyps sind und dadurch signifikante Vorteile in der Dimensionierung und Produktion ergeben. (Rippmann, Block 2011)

#### **3.1.4. Kombinatorische Lösung von Planungsproblemen der Grundrissverteilung**

Ein Entwurfsproblem kann aber auch als kombinatorisches Problem aufgefasst werden. Ausgehend von der Frage, ob ein bestimmtes Raumprogramm in einem bestehenden Gebäude untergebracht werden kann, wird der Layout-Entwurf als ein kombinatorisches Problem behandelt. Bei der Lösungssuche müssen unterschiedliche räumliche Vorgaben und funktionale Konstellationen und Relationen der Räume zueinander beachtet werden. Lömker (2006) verwendet einen kombinatorischen Solver, der im Prinzip als „Black Box“ fungiert und für eine Problembeschreibung eine oder mehrere, im Sinne der Problem und Lösungsdefinition, optimale Lösungen hervorbringt. Es wird ein vorgegebenes Raumprogramm möglichst optimal, also entsprechend den funktionalen und räumlichen Relationen und Vorgaben, in einen vorhandenen Gebäudegrundriss eingepasst. Der Optimierungsvorgang kann insofern

---

<sup>7</sup> „Es ist ganz klar, daß Redundanz also den Betrag der ästhetischen Information im Prozeß ihrer Realisierung vermindert, die ursprüngliche Originalität also verringert, aber dadurch gerade diese ästhetische Information zu einem Stilprinzip entwickeln kann. Stil in der Kunst beruht auf den Redundanzen der ursprünglichen ästhetischen Information. Nur was an ihr redundant ist, kann überhaupt in Stil umgesetzt werden. In dieser Hinsicht, daß er die Unvorhersehbarkeit, die Unwahrscheinlichkeit in der Schöpfung vermindert, entspricht der Stil in der Kunst dem, was man in der Wissenschaft Methode nennt. Je mehr Methode, desto weniger Unvorhersehbares in der wissenschaftlichen Information.“ Bense 1960, S. 43



beeinflusst werden, als dass die Fehlertoleranz der Bedingungsüberschreitung verändert werden kann und sich dadurch die Anzahl der gültigen Lösungen verändert. Das System ist zur Abschätzung der Rentabilität von Revitalisierungsmaßnahmen entwickelt worden. Das Verfahren kann aber auch auf fiktive Randbedingungen und Raumprogramme, also somit als Entwurfswerkzeug Anwendung finden.

Je nachdem wie deterministisch die Gültigkeitsregeln formuliert werden, ist in der Lösungsmenge eine unterscheidbare Ergebnisvarianz vorhanden. Sind beispielsweise ausschließlich die Flächen als Quadratmeterangabe definiert, so werden sich erheblich mehr gültige Anordnungen finden, als wenn sämtliche Räume in ihren genauen Seitenabmessungen verwendet werden müssen.

Prinzipiell werden alle möglichen Anordnungen der möglichen Flächen nacheinander durchgespielt und auf Ihre Tauglichkeit gegenüber den Gültigkeitsbedingungen überprüft. Relativ gültige Lösungen werden am Ende durch eine Reparaturfunktion, welche die Raumvariablen manipuliert, nachträglich an die vorhandene Struktur angepasst.



Bild 5: Lömker: graphische Darstellung der Bestandsituation (Lömker 2006, S. 183)



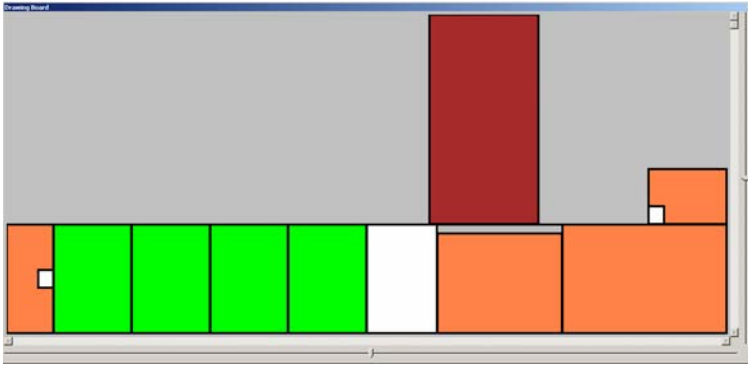


Bild 6: Lömker: Darstellung der Lösung durch den kombinatorischen Algorithmus (Lömker 2006, S. 183)

### 3.1.5. Parameter- und Strukturoptimierung

Bei Tragwerken, wie z.B. ebenen Fachwerken, ist eine rein kombinatorische Betrachtung des Entwurfsproblems aber nicht mehr ausreichend. Beim Entwurf eines effizienten Fachwerkträgers zum Beispiel, ist neben der Anordnung der Stäbe auch deren Dimension zu ermitteln. Hier liegt nun ein gemischt diskret-kontinuierliches Optimierungsproblem vor. Petzold (1998) schlägt zur Lösung dieser Art Probleme einen probabilistischen, evolutionären Algorithmus vor, da dieser mit der gemischten Charakteristik des Problems zurechtkommt und darüber hinaus nicht notwendigerweise einen mathematischen Konvergenzbeweis benötigt. Allein eine Zielfunktion ist nötig, um durch einen Algorithmus zu einer Lösung zu kommen. Petzold zeigt mit seiner Methode, dass evolutionäre Algorithmen in der Lage sind, eine als gemischtwertiges Optimierungsproblem formulierte Entwurfsaufgabe zu lösen. Seiner Erkenntnis nach, ist die Behandlung der Nebenbedingungen mit von entscheidender Bedeutung. Üblicherweise werden Individuen, die die Nebenbedingungen nicht erfüllen aussortiert. Durch eine graduelle, qualitative Bewertung der Erfüllung der Nebenbedingungen, anstatt der ausschließenden Letalmutation, kann die Performance des evolutionären Algorithmus erheblich gesteigert werden.<sup>8</sup> Die Nebenbedingungen werden in die Zielfunktion integriert und sorgen hierbei noch zusätzlich zur Beschränktheit (Finitheit) der Zielfunktion.

<sup>8</sup> "Die Behandlung von Spannungsrestriktionen mit der Methode der Letalmutationen wurde als Ursache für das vorzeitige Stagnieren der Evolutionsstrategien vor Erreichen des gesuchten Optimums identifiziert." Petzold 1998, S. 123

## 3.2. Kreative und ästhetische Systeme

### 3.2.1. Statistische Ästhetik

Die Frage nach den ästhetischen Auswirkungen der Anwendung der jeweils aktuellen Computertechnologie auf künstlerische Prozesse oder deren kreativen Fähigkeiten ist so alt wie der Computer selbst. Bereits in den 1960er Jahren beschäftigen sich Programmierer, Künstler und Philosophen mit der „Programmierung des Schönen“ (Bense 1960). Max Bense proklamiert eine ‚moderne Ästhetik‘: eine abstrakte mathematische Ästhetik, die an objektiven Problemen interessiert ist und nicht am Subjektiven. Für Bense manifestiert sich die Beschreibung des ästhetischen Zustandes in vier Phasen.

*"Die Beschreibung des «ästhetischen Zustandes» eines künstlerischen Objektes erfolgt in vier Phasen, und dementsprechend wird zwischen Numerischer Ästhetik, Semiotischer Ästhetik, Semantischer Ästhetik und Generativer Ästhetik unterschieden." (Bense 1967, S. 11)*

Die Methode der ‚Numerischen Ästhetik‘ ist die Selektion. Das künstlerische Objekt wird verstanden, als eine gegliederte Elemente Menge, der ein bestimmtes Repertoire zu Grunde liegt. In der zweiten Phase wird die Beziehung zwischen Mittel-, Objekt und Interpretant untersucht. Die ‚relationale Zeichenästhetik‘ mündet dann in die semantische Ebene, deren Methode aus den Codierungs- und Decodierungsfunktionen der Bedeutungen des künstlerischen Objektes besteht. Die letzte Phase, die ‚generative Ästhetik‘, besteht schließlich aus einem Programm mit endlich vielen konstruktiven Schritten, welches ein ästhetisches Objekt definiert. Diese vierte Phase könnte quasi als Konsequenz der vorhergehenden Phasen begriffen werden. Bense ist überzeugt, dass sich der ästhetische Zustand in jeder dieser Schichten manifestieren kann. Er sieht sogar vorzugsweise die erste, numerische Schicht als die grundlegende, objektbezogene Ebene, auf der sich ästhetische Zustände manifestieren.

*"Es ist notwendig, den «ästhetischen Zustand» eines künstlerischen Objektes als geschichtet anzusehen. Er erweist sich als repertoireabhängig. »Ordnungen« und »Komplexitäten« und damit natürlich auch das ästhetisch orientierte Verhältnis O/C können in der »materialen« Schicht, im Bereich der »Zeichen« und schließlich auch in der Ebene der »Bedeutungen« realisiert werden. Es ist daher sinnvoll, den ästhetischen Zustand eines künstlerischen Objektes als einen komplexen, geschichteten Zustand anzusehen und, so wie man in der Topologie gröbere und feinere Topologien unterscheidet, auch zwischen der »gröberen« und »feineren« Ästhetik eine »ästhetischen Zustandes« zu unterscheiden, je nachdem, welches Repertoire von »Elementen« man betrachtet und welchen Grad numerischer Charakteristik man für diese »Elemente« wählt. [...] [...] die Voraussetzungen für die erfolgreiche Programmierung »ästhetischer Zustände« also offensichtlich nur in einer ganz auf die Objekte gerichteten Numerischen Ästhetik liegen können." (Bense 1967, S. 15)*

Einen ästhetischen Zustand kann man als eine Ordnung relativ geringer Wahrscheinlichkeit begreifen. Die ästhetische Qualität steigt, je weniger wahrscheinlich der selektierte Zustand der Objekte der ‚numerischen Ästhetik‘ ist. Durch die Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines Zustandes erhöhen sich dessen Innovationsgehalt und damit die ästhetische Qualität. Die unerwarteten, also unwahrscheinlichen Ereignisse, sind für den ästhetischen Gehalt eines Objektes verantwortlich. Die wahrscheinlichen Zustände sind von geringerer ästhetischer Qualität.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass sich ästhetische Zustände nur über die fundamentale Kategorie des Machens erschließen. Ästhetische Zustände lassen sich nicht vorausdenken; man kann sie sich nicht vorstellen. Sie lassen sich ausschließlich in ihrer tatsächlichen Präsenz erkennen. Aus dieser Kategorie des Machens entsteht ein neuer Begriff des Stils, der sich aus der Idee der Realisation gründet und den Stil der Form-Inhalt Beziehung ablöst. (Bense 1960, S. 39)

Der Begriff des ästhetischen Zustandes ist, nach Bense, auch grundlegend mit der Idee der Innovation verbunden. Entsprechend der Kommunikationstheorie, in der redundante Information nicht als eigentliche Information klassifiziert wird, sondern als stilbildend, wird auch auf den ästhetischen Zustand die Notwendigkeit der Innovation übertragen. Nur innovative, also unerwartete ästhetische Information ist wirklich ästhetische Information.

*„Tatsächlich, Unvorhersehbarkeit, ja Unvorstellbarkeit gehören wesentlich zur Kunst; die überraschenden, unerwarteten, unwahrscheinlichen Züge eines Kunstwerks bestimmen offensichtlich seinen ästhetischen Charakter. Der Ausgang eines ästhetischen Prozesses ist immer ungewiss.“ (Bense 1960, S. 38)*

Da der ästhetische Zustand ein unwahrscheinlicher Zustand ist, ist er auch durch eine hohe Empfindsamkeit gegenüber Störungen geprägt. Der fragile Zustand kann durch kleinste Veränderungen oder Einwirkungen gestört und dadurch zerstört werden. Übertagen auf die Vorstellung einer Lösungslandschaft würde dies bedeuten, dass man sich eine Lösungslandschaft eines ästhetischen Prozesses eher als unstetige, diskrete Landschaft, denn als stetige, kontinuierliche Landschaft vorstellen muss.

Für einen räumlich-ästhetischen Formprozess kann die ‚numerische‘ Ebene des ästhetischen Zustandes, der ja eine materiale Ebene darstellt, in eine raummorphologische Beschreibung transponiert werden. Der materiale Zustand eines Raumes wird durch seine raummorphologischen Eigenschaften beschrieben. Durch eine statistische Beschreibung der Raumelemente und deren Verhältnissen zueinander, kann die Grundlage für ästhetische Prozesse entstehen.

*„Alle im Prinzip statistischen vorgehenden Prozesse, die sich an einem selektierbaren Material abspielen, die repertoirebezogen in der sogenannten "Schöpfung" und übertragungsabhängige in der sogenannten "Wirkung" sind, haben die Chance, ästhetischer Prozeß zu sein.“ (Bense 1960, S. 45)*

### **3.2.2. Evolutionäre Algorithmen als Kreativwerkzeuge**

*"Evolution is not a person. It is an unthinking, blind process, a relentless procedure, a harsh and unconscious fact of life. How can we possibly call something so inhuman, so brutal, creative?" (Bentley, Come 2002, S. 56)*

Eine umfassende Erörterung, was Kreativität ist und ob evolutionäre generative Algorithmen kreativ sein können, wie es im Zitat von Bentley anklingt, würde in einem philosophischen Diskurs enden, den die vorliegende Arbeit nicht führen will. Weibel(2003) diskutiert in seinem Aufsatz „Algorithmus und Kreativität“ das sich verändernde Verständnis von Kreativität innerhalb digitaler Methoden. Beginnend von der Literatur Edgar A. Poes, über musikalische und bildnerischer Algorithmen, bis hin zur generativen algorithmischen Architektur zeigt Weibel, dass anonyme digitale Prozesse als kreativ verstanden werden können. Ungeachtet dieser ausführlichen Diskurse, sollen aber hier nochmals die grundlegenden Elemente eines evolutionären generativen Algorithmus zu dem in Beziehung gesetzt werden, was von einer kreativen Entwurfslösung oder einem kreativen Prozess erwartet wird.

Ein wichtiges Kriterium für einen künstlerischen Prozess sieht Bense (1960, S. 38) in der Unvorhersehbarkeit und in der Unwahrscheinlichkeit eines erreichten Zustandes. Auch bei Bentley wird der Anspruch einer kreativen Lösung an den Begriff des Überraschenden<sup>9</sup> geknüpft. Das Überraschende und Unerwartete manifestiert sich nur dort, wo auch Spielraum für das Unerwartete vorhanden ist. So sind es nicht die vollständigen und korrekten Prozesse, die wir als kreativ bezeichnen, sondern jene, welche gewisse Vorgaben ignorieren oder gar bewusst übertreten. Denn durch die Ignoranz und Übertretung von Vorgaben oder Konventionen, eröffnen sich die notwendigen Spielräume für das Unerwartete.<sup>10</sup> Algorithmen, die einen kreativen Prozess abbilden sollen, müssen also nicht notwendigerweise korrekt oder vollständig sein, wie es eine informationswissenschaftliche Betrachtung verlangen würde. In der mathematischen oder informationstechnischen Unkorrektheit oder Ungenauigkeit eines Algorithmus liegt die Chance des Unerwarteten, des Kreativen.

Darüber hinaus manifestiert sich das Künstlerische notwendigerweise in einer konkreten Gestalt. Denn das Künstlerische kann nicht als Vorstellung existieren, sondern nur als Realität.<sup>11</sup> Für einen kreativen Prozess ist es also elementar, produktiv zu sein. Das Ergebnis eines kreativen Algorithmus ist also ein Produkt, eine Gestalt; sei es als Text, Lied, Tanz, Malerei, Skulptur, Architektur oder einer anderen gestalterischen Ausdrucksform. Nur wenn Gestalt tatsächlich erzeugt wurde, kann von einem kreativen Akt gesprochen werden.

In diesem Sinne können evolutionäre, generative Algorithmen kreativ sein. Sie können als kreativ betrachtet werden, auch wenn sie nicht der Ausdruck einer genialen, humanen Seele sind. Kreative Prozesse müssen nicht notwendigerweise, durch übersinnliche Eingebung, Teil eines kreativen oder gar transzendenten Handelns werden. Kreative Systeme können Werkzeuge

---

<sup>9</sup> Bentley, Corne 2002, S. 58–62

<sup>10</sup> Hovestadt 2009; de Bruyn, Reuter 2011

<sup>11</sup> Bense 1960, S. 38

sein, die einen kreativen Prozess unterstützen oder abbilden. Das System selbst verfügt also nicht über eine eigene subjektive Kreativität, sondern kann das Ergebnis oder das Abbild eines kreativen Prozesses sein. Durch diese „narzisstische Kränkung des Bildes des Menschen von sich als autonomes Subjekt in dessen Mittelpunkt noch immer die Fiktion von Autonomie und ursprünglicher Kreativität steht“ (Weibel, 2004) verlagert sich der Akt des kreativen Schaffens von der Erzeugung der Form oder Gestalt hin zum Entwerfen des Gestalt erzeugenden Prozesses. Das kreative Handeln, der Gestaltungswille manifestiert sich in der Formulierung des Problems, in der Abbildung der Problemlösung als Algorithmus, in der Auswahl der Parameter und durch deren Integration zu einem gestaltenden Prozess. Der Algorithmus selbst führt diesen Prozess mit geschlossenen Augen und ohne eigene Kreativität durch.

### **3.3. Komplexe Systeme**

#### **3.3.1. Problemarten**

Die Informatik, als Wissenschaft, beschäftigt sich mit der Lösung informationstechnischer Probleme. Dabei wird unterschieden zwischen Entscheidungsproblemen, Berechnungsproblemen und Optimierungsproblemen. Entscheidungsprobleme sind Probleme, bei denen die zu bewältigende Aufgabe darin besteht heraus zu finden, ob eine bestimmte Definition oder Aussage wahr ist oder falsch. Beispielsweise beim bekannten Rucksackproblem<sup>12</sup>: Gibt es für den Rucksack eine bestimmte Menge von Gegenständen, die einen bestimmten Gesamtwert und ein bestimmtes Gesamtgewicht aufweisen? Als Berechnungsproblem notiert lautet die Aufgabenstellung: Berechne eine Menge von Gegenständen, die ein bestimmtes Gesamtgewicht und einen bestimmten Wert haben. Das Problem als Optimierungsproblem formuliert lautet: Suche die Menge Gegenstände die ein bestimmtes Gesamtgewicht nicht überschreiten und den maximalen Gesamtwert aufweisen. Dabei wird eine Optimierung des Gesamtwertes (Maximum) gesucht, wobei gleichzeitig die Nebenbedingung eingehalten

---

<sup>12</sup> Eder 2001

werden soll, ein bestimmtes Gesamtgewicht nicht zu überschreiten. Es können also nicht einfach nur die Gegenstände mit dem höchsten Gegenwert in den Rucksack gepackt werden, sondern auch das Gewicht der Gegenstände trägt zur Qualität der Auswahl bei. Erst durch die Nebenbedingung ergibt sich der Optimierungscharakter der Aufgabe, da durch die Formulierung der Nebenbedingung der Ergebnisraum eingeschränkt wird. Es ist jetzt nicht mehr jede beliebige Zusammensetzung der Gegenstände eine Lösung, sondern nur diejenigen, die die Nebenbedingung einhalten. Eine Optimierungsaufgabe ist also eine Suche nach der besten Lösung innerhalb des Ergebnisraumes.

### 3.3.2. Problemkomplexität

Die Komplexität von Problemen oder Algorithmen wird in der Informatik anhand der sogenannten Zeitkomplexität beurteilt. Dabei werden die Schritte bzw. Zeiteinheiten, die zur Lösung des Problems oder zum Ablauf des Algorithmus notwendig sind, gezählt und in Relation zur Problemgröße bewertet. Probleme werden in folgende Zeitkomplexitätsklassen eingeteilt:

1. Konstante Probleme  $O(1)$
2. logarithmische Probleme  $O(\log n)$
3. lineare Probleme  $O(n)$
4.  $n \log n$  Probleme  $O(n \log(n))$
5. quadratisch Probleme  $O(n^2)$
6. kubische Probleme  $O(n^3)$
7. nichtdeterministische polynominelle Probleme (NP)
8. Exponentielle Probleme  $O(k^n)$

Die Zeitkomplexität  $O$  beschreibt also den maximalen Aufwand einer deterministischen Turing Maschine, der im schlechtesten Falle notwendig ist, um das vorliegende Problem zu lösen. Dabei wird die Komplexität in Relation zur Problemgröße oder Instanz Größe definiert. Sie ist somit auch ein Maß der Skalierbarkeit der Problemgröße. So kann beispielsweise der Aufwand für komplexe Probleme kleiner Größe noch in einem real zu bewältigenden Ausmaß liegen. Dieser Aufwand kann aber, durch die Erhöhung der Problemgröße, wie Tabelle 1: zeigt, zu einem nicht mehr zu bewältigenden Aufwand skalieren. Die Zeitkomplexität ist dabei unabhängig von der

technologischer Entwicklung der Computertechnologie, da bei komplexen Problemen schon bei relativ geringen Instanz Größen die tatsächliche Rechengeschwindigkeit der Maschine keine Rolle mehr spielt. Dies wird deutlich anhand der folgenden Tabelle 1:, in der die notwendigen Rechenschritte zur Problemkomplexität exemplarisch aufgeführt sind.

n	Log(n)	n <sup>2</sup>	2 <sup>n</sup>
1	0	1	2
2	1	4	2
4	2	16	16
8	3	64	256
16	4	256	65.536
32	5	1024	4.294.967.296
64	6	4096	18,4 *10 <sup>18</sup>
128	7	16384	3,4 *10 <sup>38</sup>

*Tabelle 1:* Liste des Rechenaufwands unterschiedlicher Komplexitätsklassen

Probleme der Klasse P sind Probleme deren Aufwand maximal polynomial zur Problemgröße wachsen. Algorithmen, die Probleme mit polynomialen Aufwand lösen, werden als effizient bezeichnet. Dies trifft auf Probleme zu, für die gilt<sup>13</sup>:

$$Time_A(n) \in O(n^c)$$

mit:

Time<sub>A</sub> = Zeitkomplexitätsfunktion des Algorithmus A

n = Instanz Größe des Problems

c = konstant

Neben diesen Problemen, die durch geeignete deterministische Algorithmen in Polynomialzeit lösbar sind, existieren aber auch Probleme, für die es bisher nicht gelungen ist entsprechende Algorithmen zu finden, die das Problem mit einer deterministischen Turing Maschine lösen können. Zu diesen Problemen

---

<sup>13</sup> Hromkovič 2011, S. 215–224



zählen, unter anderen, das Handlungsreisende-Problem<sup>14</sup> oder das Rucksackproblem. Für diese Probleme wurde nachgewiesen, dass es keine effizienten deterministischen Lösungsalgorithmen gibt. Das bedeutet, dass die korrekte Lösung nur durch das Betrachten aller möglichen Lösungen ermittelt werden kann. Dies ist aber nur bei extrem kleinen Probleminstanzen möglich. Denn wollte man beispielsweise für das Handlungsreisenden-Problem, den kürzesten Weg durch die 193 Länder der Welt ermitteln, so bräuchte ein 1 THz Rechner, um alle  $193!$  Möglichkeiten auszuprobieren,  $12,5 \cdot 10^9$  Jahre.

Bei exponentiellen Problemen  $O(k^n)$ , mit einer relativ kleinen Instanz Größe  $n=64$ , würde bei einer Rechenleistung von 1TFlops ( $10^{12}$  Rechenoperationen pro Sekunde) die Errechnung der Lösung,  $18,4 \cdot 10^6$  Sekunden oder 212 Tage dauern. Aktuelle Hochleistungsrechner wie z.B. der des DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory in den USA erreichen zwar Rechenleistungen bis zu 17590 TFlops (Top500 List - November 2012), es wird aber deutlich, dass nicht polynomiale, also beispielsweise exponentielle Probleme, mit deterministischen Verfahren ab bestimmten Instanz Größen, praktisch nicht zu lösen sind.

Um sich solchen Lösungen trotzdem annähern zu können, werden sogenannte nicht-deterministische Verfahren verwendet. Eine nicht-deterministische Turing-Maschine verfügt, entgegen der deterministischen Turing-Maschine, nicht nur über eine Möglichkeit der Zustandsänderung (deterministisch), sondern über zwei mögliche Zustandsänderungen (nicht-deterministisch). Die Maschine hat also nicht einen festgelegten Übergang zwischen zwei Zuständen (deterministisch), sondern kann zwischen mindestens zwei Möglichkeiten der Zustandsänderung wählen (nicht-deterministisch). Angenommen, die nicht-deterministische Maschine würde bei einem Durchlauf des Algorithmus zufällig immer die richtige Wahl der Zustandsänderung treffen, so würde dieser

---

<sup>14</sup> Das Problem des Handlungsreisenden oder Travelling Sales Man Problem ist ein Standardproblem der Informatik. Es gehört der Komplexitätsklasse NP (nichtdeterministisch Polynominal) an. Das Problem besteht darin, den kürzesten bzw. günstigsten Weg eines Handlungsreisenden zwischen einer bestimmten Anzahl von Städten zu finden, wobei jede Stadt nur einmal besucht werden soll. Theoretische Betrachtungen dazu und Lösungsansätze finden sich beispielsweise bei Weicker 2007

Durchlauf den minimalen Lösungsaufwand darstellen und er wäre in polynomialer Zeit abgelaufen. Der maximale Aufwand lässt sich, nach wie vor, anhand der Anzahl der maximalen Lösungsmöglichkeiten ablesen. Dadurch lässt sich die Komplexität des Problems eingrenzen.

Probleme, die nur durch die eben beschriebenen nicht-deterministischen Verfahren gelöst werden können, werden als NP-Probleme bezeichnet. NP Probleme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich durch nicht-deterministische (N) in polynomialer (P) Zeit lösen lassen. Bei der Lösung nicht-deterministischer polynomialer Probleme werden, in probabilistischen Verfahren, Zustandsänderungen zufällig gewählt. Bei der idealen Betrachtung zur Abschätzung des Aufwandes wird zwar angenommen, dass der Algorithmus immer die richtige Zustandsänderung wählt, dies ist aber in der praktischen Umsetzung keineswegs der Fall. Deshalb kann man von einer gefundenen Lösung nicht sagen, ob sie die beste Lösung darstellt; ja nicht einmal ob sie eine relativ gute Lösung ist, lässt sich sagen, denn die mit Sicherheit beste Lösung ist ja, aufgrund des hohen Aufwandes, nicht zuverlässig zu ermitteln. Aber immerhin lassen sich mit probabilistischen Verfahren korrekte Lösungen ermitteln, die zumindest besser sind, als manch andere Lösung im Ergebnisraum. Es gilt das Motto: Besser in absehbarer Zeit eine relativ schlechte Lösung, als eine sehr gute Lösung, die erst in mehreren hundert Jahren zur Verfügung steht.

NP-Probleme nehmen in der informationstechnischen Forschung einen wichtigen Platz ein, denn es gibt bisher keine effizienten deterministischen Algorithmen für deren Lösung. Wenn nachgewiesen werden kann, dass ein Problem vollständig der Klasse NP angehört, so ist es bisher aussichtslos einen deterministischen Lösungsansatz zu suchen. Für NP-Probleme bieten sich dann probabilistische Verfahren an, die zwar systematische Fehler bzw. ohne Garantie auf beste Lösungen agieren, aber eben wenigstens Lösungen ermitteln. Es ist daher wichtig nachzuweisen, ob Probleme in der Klasse NP liegen. Formal kann durch das Transformieren eines Problems in polynomialer Zeit in ein bekanntes NP-vollständiges Problem der Nachweis erbracht werden,

dass es sich um ein Problem handelt, dass NP schwer aber nicht schwerer als NP ist.

Lösungsansätze für NP schwere Probleme sind<sup>15</sup>:

1. Randomisierte (lokale) Suche
2. Approximation
3. Identifikation lösbarer Subklassen

### 3.3.3. „Bösartige“ und „schlecht definierte“ Probleme

Entwurfs- bzw. Planungsprobleme werden in der Literatur als „bösartige“<sup>16</sup> oder „schlecht-definierte“<sup>17</sup> oder „nicht-operationale“<sup>18</sup> Probleme bezeichnet. Dabei zielen die Bezeichnungen nicht auf eine qualitative Bewertung der Probleme, sondern vielmehr auf deren Charakteristik. Rittel (Rittel, Webber 1973) verwendet den Begriff „bösartig“, weil sich die Probleme in bösartiger Weise, der sonst so erfolgreichen und einfachen sequenziellen Bearbeitung durch eine, auf linearer Kausalität beruhender Lösungsmethode, entziehen. Die gemeinten Probleme sind nun nicht mehr durch die Bearbeitung und Lösung der Einzelteile zu lösen, sondern nur in Betrachtung ihrer Gesamtheit. Diese Probleme und auch deren Lösungen zeichnen sich durch die implizite Emergenz aus. Sie sind nicht mehr nur die Summe ihrer Einzelteile, sondern, durch die Relationen der Einzelteile im Gesamtsystem, entsteht etwas Neues, das über die einzelnen Teile des Gesamtsystems hinaus weist. Der Begriff schlecht-definiert meint, dass die Probleme nicht vollständig bzw. nicht ausreichend definiert sind, um sie mit eindeutigen, determinierten Methoden lösen zu können. Es handelt sich um offene Probleme, deren Darstellung nicht-eindeutig oder unvollständig ist und daher auch das Ergebnis möglicherweise nicht eindeutig zu identifizieren ist. Probleme, die beispielsweise unterschiedliche, sich entgegenstehende Zielvorgaben haben, oder deren Ziel oder Teilziele gar nicht benannt werden

---

<sup>15</sup> Eder 2001, S. 6, Hromkovič 2011, S. 263–291

<sup>16</sup> Rittel, Webber 1973, S. 160.

<sup>17</sup> Röpke 1977

<sup>18</sup> Kirsch 1997

können, was bei Entwurfsproblemen häufig der Fall ist, müssen als schlecht-definiert bezeichnet werden, da eben das Problem, zu dem die Zielvorgaben unweigerlich gehören, nicht eindeutig oder vollständig beschrieben werden können. Diese Probleme können nicht mit den Ursache – Wirkungs-Operationen linear bearbeitet werden. Es ist notwendig, rekursive und sich wiederholende, teilweise parallele, sich widersprechenden Lösungswege zu beschreiten, um zu einer adäquaten Lösung zu gelangen.

## **4. Raumakustik**

### **4.1. Grundtypen akustischer Räume**

Das System der Typologie ist eine retrospektive Betrachtung der Realität, um das Vorhandene besser zu verstehen und zu ordnen. Die Realität besteht nicht aus Typologien, sondern wir Menschen erzeugen Typologien aufgrund unterschiedlicher Kriterien und weisen den Objekten, entsprechend der Übereinstimmungen in den Typenkriterien, einen Typus zu. Umgekehrt werden bei der Planung Typologien wie Schablonen verwendet, um weitere Instanzen eines Typus zu entwickeln. Mit der Idee der individualisierten und kontextbezogenen Betrachtung von Objekten und auch im Sinne eines Performanz orientierten Entwurfsprozesses, sind diese Typen nicht mehr als starre Gebilde zu betrachten, sondern können einer gewissen Fluktuation unterliegen.<sup>19</sup> Die nachfolgende Typologie akustischer Räume ist eine Typologie, die die Einordnung der Räume aufgrund ihrer akustischen Funktionsweise vornimmt. Es ist augenfällig, dass diese Funktionsweise direkt an die Grundrissform gekoppelt ist, wobei aber die akustischen Effekte bei

---

<sup>19</sup> "Die heute übliche Typologie z.B. nach Nutzungen des Bauobjekts ist nun nur noch eine Möglichkeit unter den fast beliebig vielen Möglichkeiten, nach der die Typologie strukturiert werden kann. Über jedes vorhandene Kriterium bzw. über jede Eigenschaft, die an Objekten festgestellt wurde kann eine Auswahl festgelegt werden, auf der ein Typus konstituiert wird. Aus der Gesamtmenge der Objekte können einzelne Objekte typisiert werden. Dabei wird die Gruppenzugehörigkeit über das Vorhandensein von eindeutigen Merkmalen im Typus festgelegt und wenn diese abgefragt werden, bestimmt. Die Objekte, die die abgefragten Merkmalausprägungen eindeutig besitzen, sind somit die Typen, die der jeweilige Typus beinhaltet. Also werden bestimmte Typen nicht einem festgelegten Typus ständig zugeordnet, sondern der Typus generiert aufgrund seiner Kriterien gleichzeitig die zugehörigen Typen. Der Typ wird durch den Typus gefunden, der Typ ist daher in den abgefragten Merkmalausprägungen identisch, in allen weiteren Ausprägungen jedoch vom Typus tendenziell verschieden." Castorph 1999, S. 63

gleichen Grundrisstypen, hervorgerufen durch unterschiedliche Materialität, durchaus unterschiedlich sein können. Entsprechend der Idee, dass die Typisierung hilft die Realität zu verstehen und Information bereit zu stellen<sup>20</sup>, wird trotz des Wissens der Unzulänglichkeit der Typisierung eine solche vorgenommen, um die bisher gebauten akustischen Räume zu begreifen.

#### 4.1.1. Rechteckform: Musikvereinssaal, Wien

Architekt:	Theophil Edvard Hansen (1813-1891)
Akustik:	Unbekannt
Ort:	Wien, Österreich
Raummaße:	48,80m x 19,10m x 17,75m
Raumvolumen:	16.500 m <sup>3</sup>
Anzahl Plätze:	1744 (+ 300)
Volumenkennzahl:	8,09 m <sup>3</sup> /Platz
Nachhallzeit:	2,0 s <sup>21</sup>
Eröffnungsjahr:	1870

Der Musikvereinssaal ist einer der berühmtesten Vertreter der „Schuhschachtel“-Form. Der „goldene Saal“ gilt als einer der besten akustischen Räume der Welt. (Beranek 2004) Sein quaderförmiges Raumkonzept ist daher Vorbild für andere Konzerträume. Sein Aufbau ist symmetrisch. Entlang der Mittelachse liegen die Plätze mit der besten Qualität, da die seitlichen Reflexionen symmetrisch und zeitgleich auf den Empfänger treffen. Der Rechteckraum ist relativ leicht zu beherrschen, wenn bestimmte Seitenverhältnisse eingehalten werden und bestimmte Raumgrößen nicht überschritten werden. Das erklärt sicherlich seine weite Verbreitung.

---

<sup>20</sup> "Die weitere Wertung und Qualifizierung der einzelnen Typen untereinander obliegt dann den persönlichen oder gesellschaftlichen Systemen bzw. Konventionen usw., die ein ‚besser‘, ‚schlechter‘, ‚passend‘ oder ‚unpassend‘ festlegen. Das bedeutet in der Praxis, dass die Typologie des temporären, fluktuierenden Typus keine Anweisung zur Wertung beinhaltet, sondern lediglich alle Informationen allen Wertungssystemen zur Verfügung stellt." Castorph 1999, S. 65

<sup>21</sup> nach Fasold, Veres 2003, S. 198–199

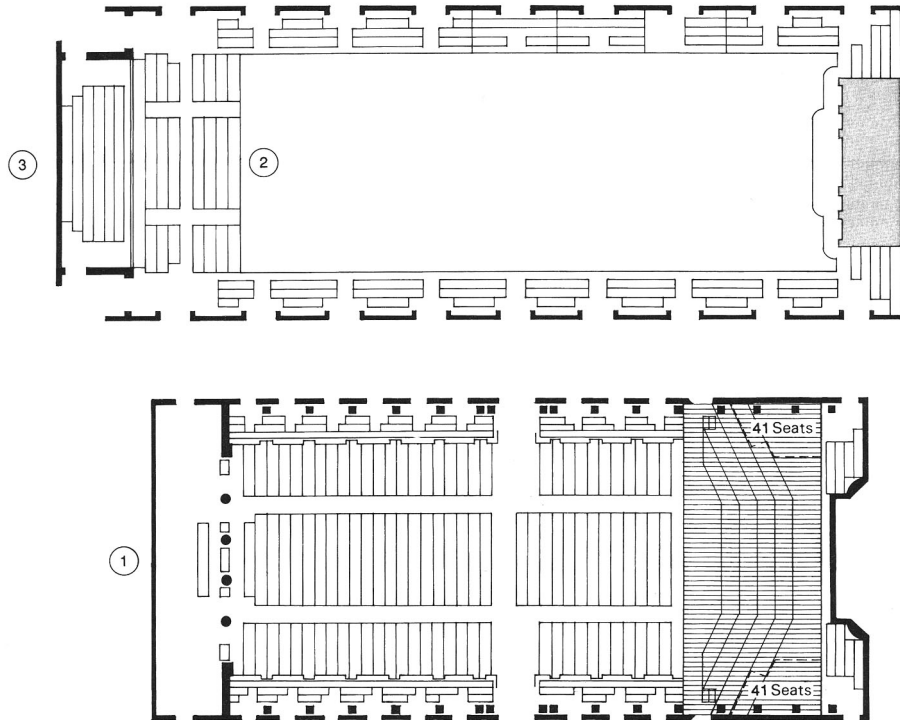


Bild 7: Grundrisse Wiener Musikvereinssaal (Beranek 2004, S. 175)

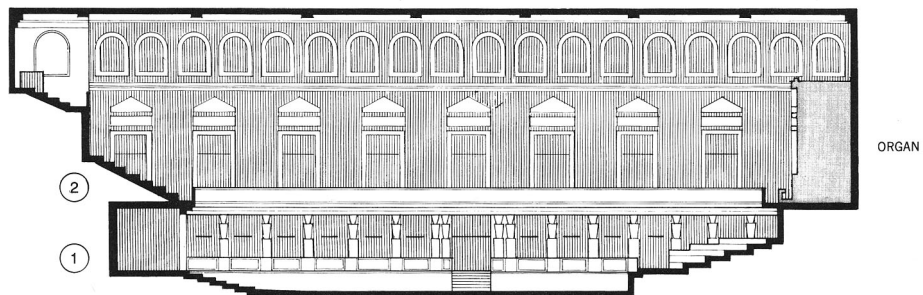


Bild 8: Schnitt Wiener Musikvereinssaal (Beranek 2004, S. 175)

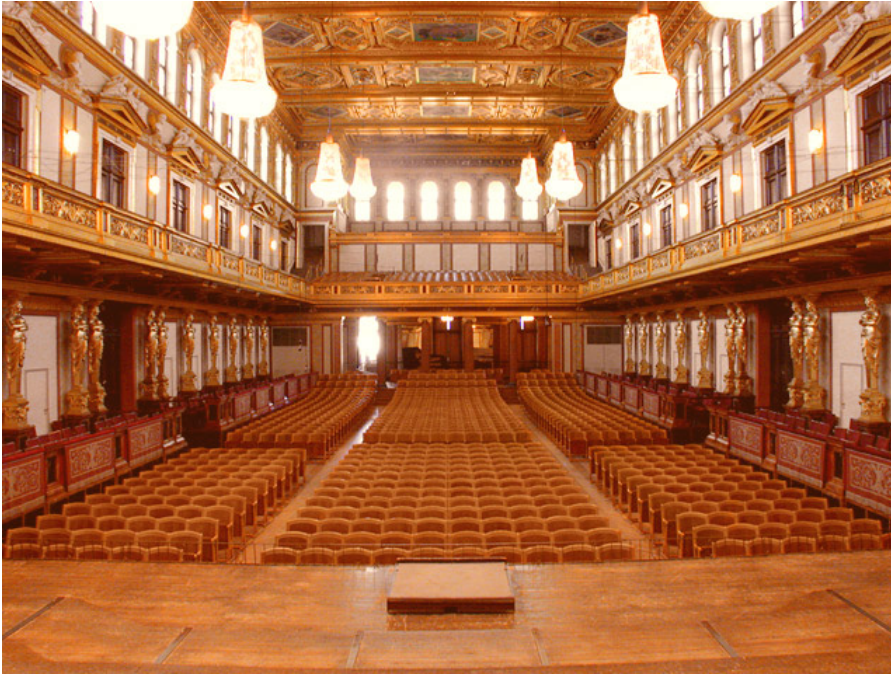


Bild 9: Blick in den Hauptsaal des Wiener Musikvereinssaal. (Wiener Musikverein)

#### 4.1.2. Hufeisenform: Semperoper, Dresden

Architekt:	Gottfried Semper (1813-1891)
Akustik:	Walter Reichardt, Wolfgang Schmidt
Ort:	Dresden, Deutschland
Raummaße:	siehe Plan
Raumvolumen:	12.000 m <sup>3</sup>
Anzahl Plätze:	1290
Volumenkennzahl:	9,30 m <sup>3</sup> /Platz
Nachhallzeit:	1,7 s <sup>22</sup>
Eröffnungsjahr:	1841 / 1984 (Wiedereröffnung)

Die Semperoper ist ein Saal für szenische Aufführungen. Ihr Grundriss beschreibt eine achsen-symmetrische Hufeisenform. Dadurch wird der Abstand des Besuchers zum Geschehen auf der Bühne verringert, was bei szenischen Darstellungen wichtiger ist als bei reinen Konzertveranstaltungen. Allein durch die Betrachtung des Grundrisses wird deutlich, dass sich die, für die Akustik wichtigen, frühen Reflexionen an den unterschiedlichen Plätzen deutlich

---

<sup>22</sup> Fasold, Veres 2003, S. 192

differenzieren lassen, da die Plätze im Parkett signifikant unterschiedliche Abstände zu den Seitenwänden haben.

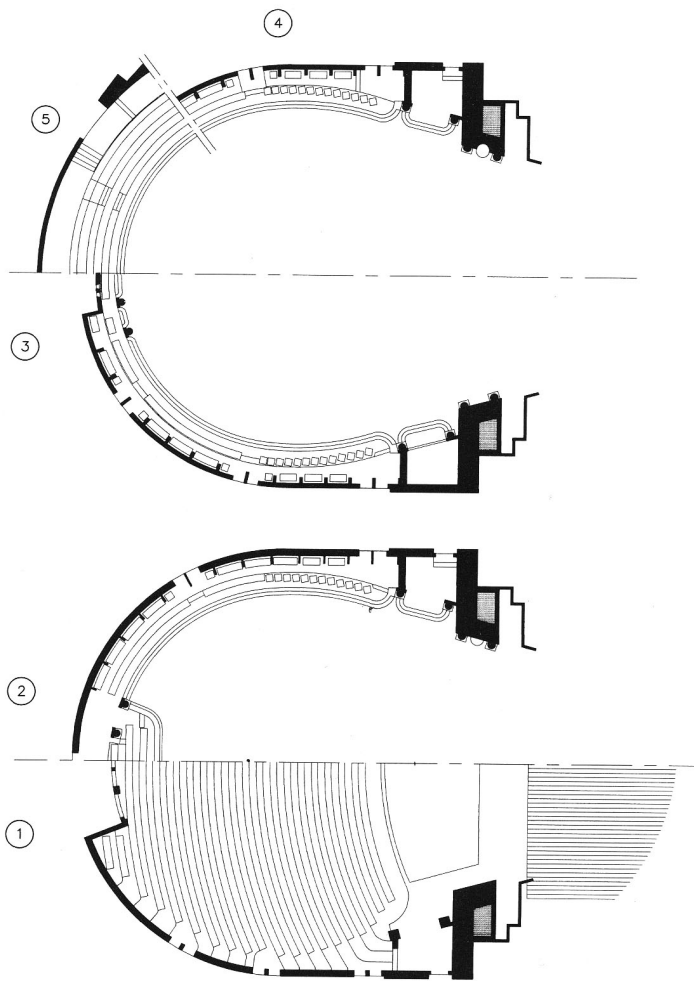


Bild 10: Grundrisse Semperoper Dresden (Beranek 2004, S. 307)

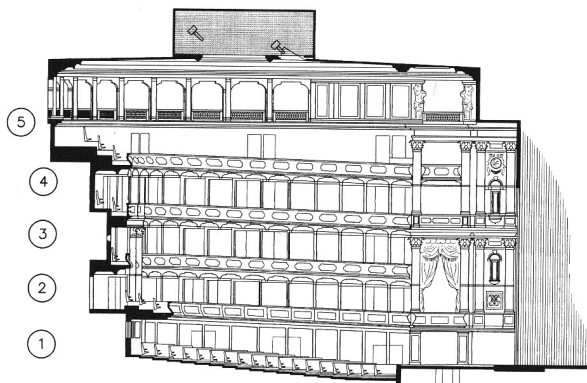


Bild 11: Schnitt Semperoper Dresden (Beranek 2004, S. 307)





Bild 12: Semperoper Dresden. Innenraum (Oper Dresden 19.10.2010)

#### 4.1.3. Hufeisenform Oper Oslo

Architekt:	Sønnetta architects, Oslo
Akustik:	Brekke & Strand, Oslo
Ort:	Oslo, Norwegen
Raummaße:	siehe Plan
Raumvolumen:	nicht bekannt
Anzahl Plätze:	1.100
Volumenkennzahl:	nicht bekannt
Nachhallzeit:	1,7s
Eröffnungsjahr:	2008

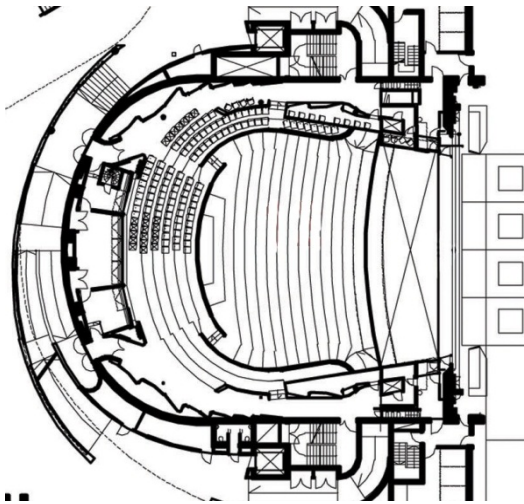


Bild 13: Grundriss Opera Oslo Ausschnitt (Staatsoper Oslo 01.12.2005)

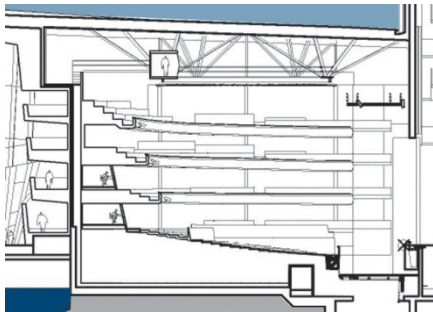


Bild 14: Schnitt Opera Oslo Ausschnitt (Staatsoper Oslo 08.12.2005)

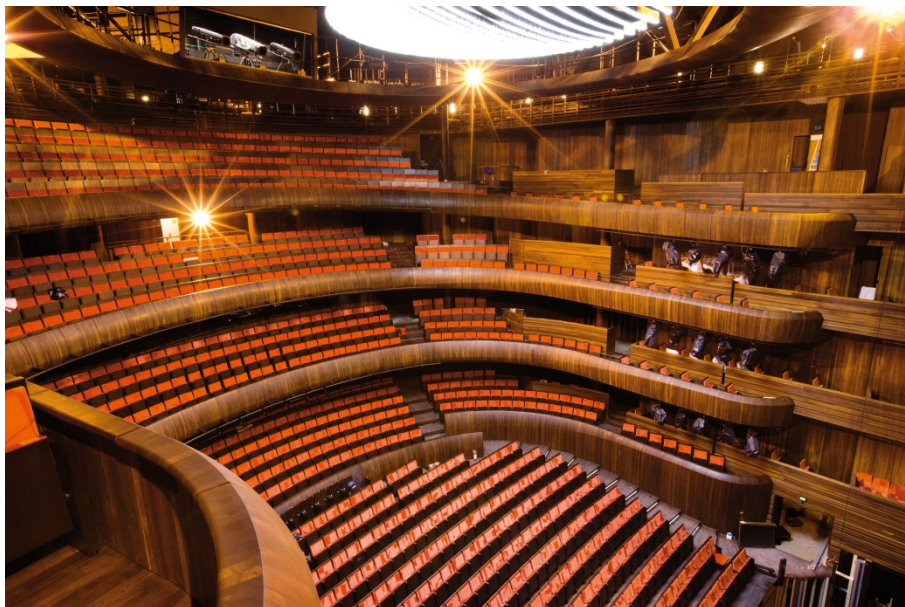


Bild 15: Oper Oslo Blick ins Publikum (Staatsoper Oslo 09.05.2008)

#### 4.1.4. Fächerform: Oper Sydney

Architekt:	Joern Utzon
Akustik:	V.L u. N.V. Jordan
Ort:	Sydney, Australien
Raummaße:	ca. 70m x 40 m x 20m
Raumvolumen:	24.600 m <sup>3</sup>
Anzahl Plätze:	2679
Volumenkennzahl:	9,2 m <sup>3</sup> /Platz
Nachhallzeit:	2,0 s <sup>23</sup>
Eröffnungsjahr:	1973

Durch die Umkehrung der Fächerform im Saal der Oper Sydney ist der Einfallswinkel der seitlichen Reflexionen beim Empfänger nicht so flach wie bei der originalen Fächerform. Die Reflexionen treffen also stärker von der Seite, als von vorne auf dem Empfänger. Durch die fächerförmige Anordnung der Zuhörer, soll die gleichmäßige Versorgung mit den für den guten Höreindruck wichtigen frühen Reflexionen verbessert werden.

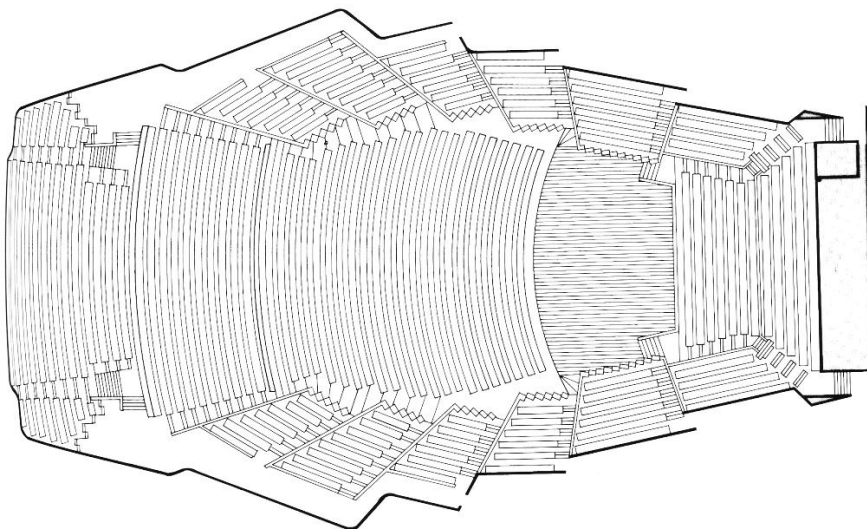


Bild 16: Grundriss Oper Sydney (Beranek 2004, S. 167)

---

<sup>23</sup> Beranek 2004, S. 166



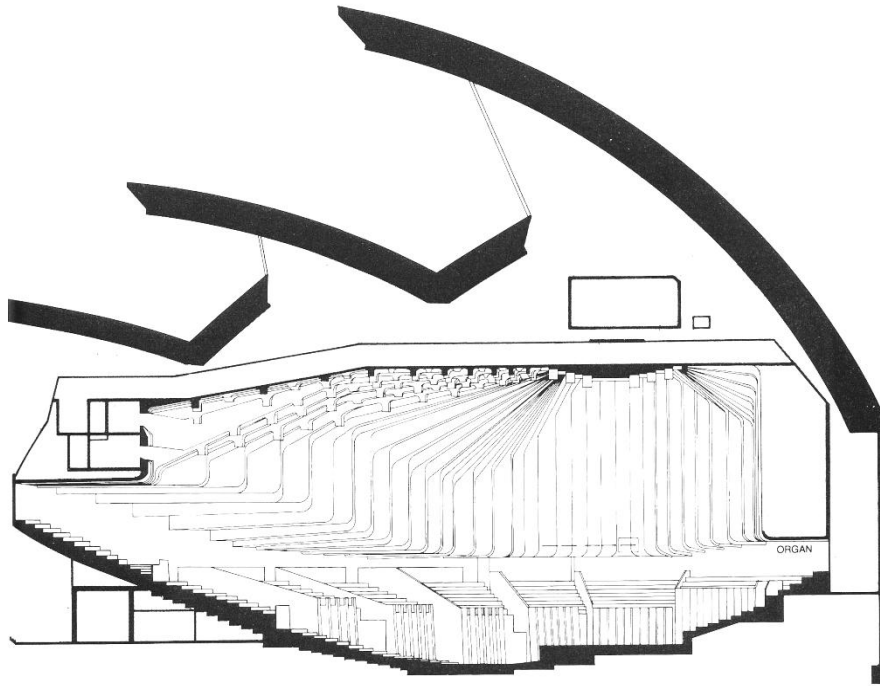


Bild 17: Schnitt Oper Sydney (Beranek 2004, S. 167)



Bild 18: Oper Sydney. Innenraum (Anonym 10.03.2010)

#### 4.1.5. Fächerform: Festspielhaus, Bayreuth

Architekt:	Otto Brückwald
Akustik:	Unbekannt
Ort:	Bayreuth, Deutschland

Raummaße:	ca. 34m x 35m x 16m(10m)
Raumvolumen:	10.300 m <sup>3</sup>
Anzahl Plätze:	1.800
Volumenkennzahl:	5,7 m <sup>3</sup> /Platz
Nachhallzeit:	1,6 s <sup>24</sup>
Eröffnungsjahr:	1876

Das Festspielhaus Bayreuth ist als Opernhaus auch unter Dirigenten sehr beliebt, obwohl es nicht unbedingt zu den führenden Opernhäusern in Bezug auf eine differenzierte Akustik zählt<sup>25</sup>. Es nimmt eher eine Sonderstellung ein, da die Akustik auf die speziellen Anforderungen der mystischen und romantisch geprägten Kompositionen Wagners abgestimmt ist. Die Sitzreihen sind fächerförmig in Bezug zur Bühne angeordnet. Eine Besonderheit besteht darin, dass die Wände nicht der fächerförmigen Anordnung der Sitzreihen folgt, sondern parallel sind und somit eigentlich ein quaderförmiger Grundriss der Hülle bilden. Orthogonal zur Mittelachse sind durch Säulen und Wände Nischen ausgebildet, die diesen Raum zwischen Hülle und Sitzreihen ausfüllen.

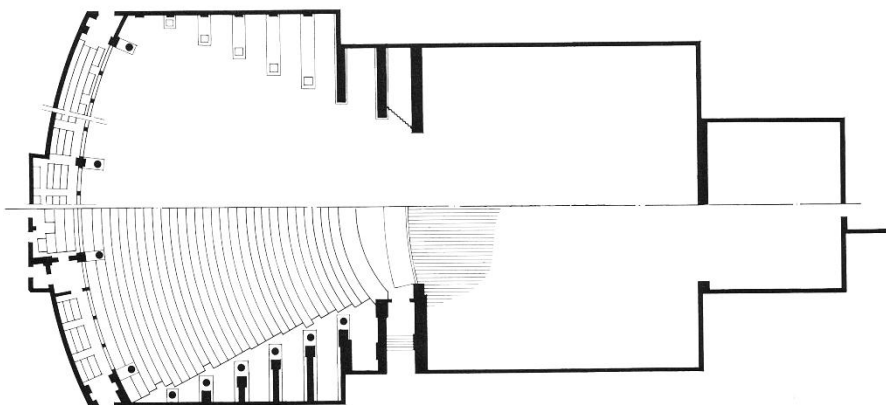


Bild 19: Grundriss Festspielhaus Bayreuth (Beranek 2004, S. 284)

<sup>24</sup> Fasold, Veres 2003, S. 192

<sup>25</sup> Bei Beranek (2004, S. 555) wird das Festspielhaus Bayreuth nicht auf der Liste der 21 von Dirigenten bewerteten Opernhäuser erwähnt. Grundlage der Befragung war nicht eine vorgegebene Liste, sondern eine eigene Auswahl basierend dem Erfahrungs- und Erinnerungsschatzes der 21 befragten Dirigenten.

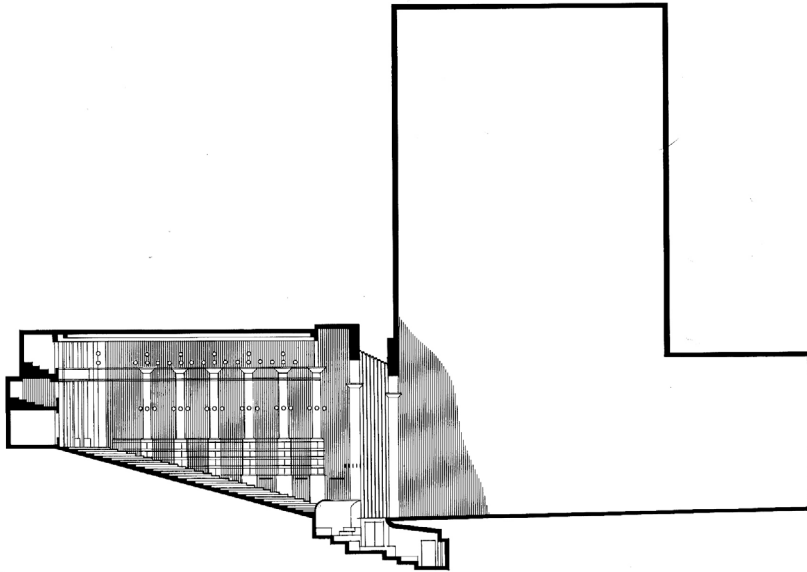


Bild 20: Schnitt Festspielhaus Bayreuth (Beranek 2004, S. 284)



Bild 21: Festspielhaus Bayreuth. Blick Richtung Bühne (Beranek 2004, S. 286)

#### 4.1.6. Weinbergterrassenform: Philharmonie Berlin

Architekt:	Hans Scharoun
Akustik:	Lothar Cremer (1950-1990)
Ort:	Berlin, Deutschland
Raummaße:	60m x 45m x 20m
Raumvolumen:	21.000 m <sup>3</sup>
Anzahl Plätze:	2.218 + 120
Volumenkennzahl:	9,5 m <sup>3</sup> /Platz
Nachhallzeit:	1,9 s <sup>26</sup>
Eröffnungsjahr:	1963

Mit der Berliner Philharmonie wird das Weinbergprinzip, welches erstmals im Mozartsaal der Liederhalle in Stuttgart als Konzeptstudie realisiert wurde, in größerem Maßstab umgesetzt. Grundlegende konzeptionelle Veränderungen, wie die Verlagerung der Spielstätte Richtung Raummitte und die sich daraus ergebende Bühne umschließende Anordnung des Publikums, sind einem veränderten Verständnis der Aufführungspraxis und natürlich einer veränderten Architektonischen Haltung in der Moderne. Durch die Spezialisierung des Saales als reiner Konzertsaal, kann die frontale Bühne-Publikum Relation aufgelöst werden. Die gestaffelten Publikumsgruppen mit ihren seitlichen Begrenzungen befördern die, für die Akustik wichtigen, frühen Reflexionen.

---

<sup>26</sup> Beranek 2004, S. 299

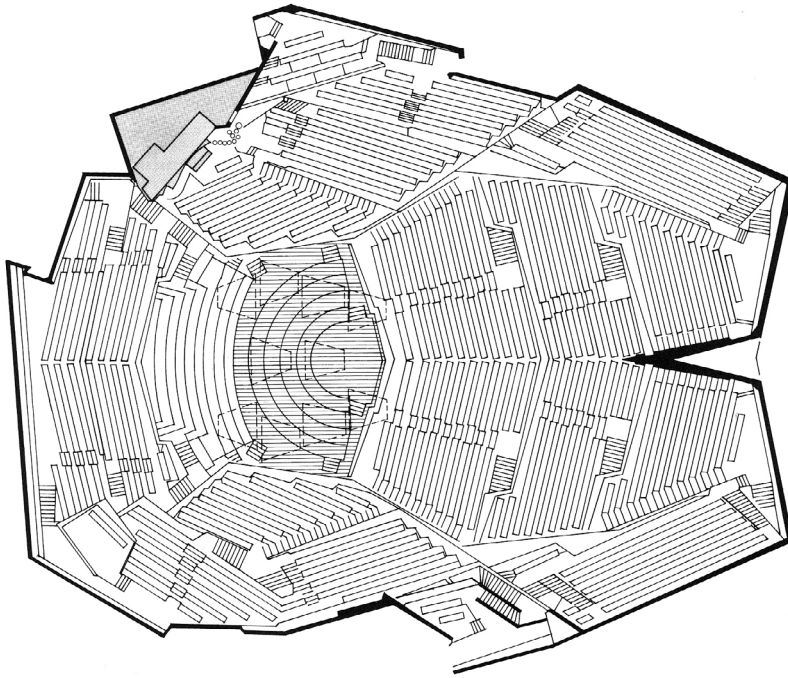


Bild 22: Philharmonie Berlin. Grundriss (Beranek 2004, S. 299)

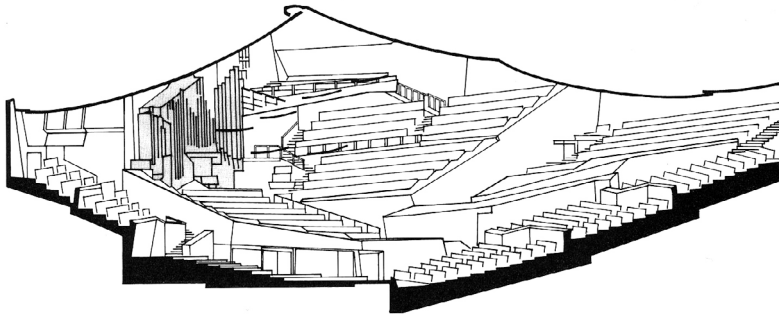


Bild 23: Philharmonie Berlin. Schnitt (Beranek 2004, S. 299)





Bild 24: Philharmonie Berlin Innenansicht (Anonym 04.01.2012)

## 4.2. Physikalische Grundlagen des hörbaren Schalls

### 4.2.1. Schallausbreitung

Bei einer Temperatur von 20°C breitet sich der Schall im Medium Luft mit einer Schallgeschwindigkeit ( $c$ ) von 343m/s aus. Die Schallausbreitung erfolgt, bei vorausgesetzt homogenem Medium, in alle Richtungen gleichförmig. (Barron 1993, S. 9) Schall breitet sich ausschließlich in einem elastischen Medium wie Wasser oder Luft durch Energieübertragung aus. Diese Übertragung geschieht nicht verlustfrei, was zur Folge hat, dass sich mit zunehmender Ausbreitungsdauer die Schallenergie verringert. Die Energieabnahme erfolgt exponentiell zur Ausbreitungsdauer und wird als Dämpfung bezeichnet. Unterschiedliche Medien haben unterschiedliche Dämpfungseigenschaften, welche anhand des Dämpfungsgrades ( $m$ ) beschrieben werden.

Bezeichnung	Energiedämpfungskonstante $m'$ [ $10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Luft 20C°/50% rel. Luftfeuchte	-	0,075	0,25	0,75	2,5	7,5	25

Tabelle 2: Frequenzabhängige Energiedämpfungskonstante  $m'$  von Luft

#### 4.2.2. Schallreflexion, Schallabsorption, Schallbeugung

Trifft der Schall auf ein Hindernis, so wird der Schall, entsprechend der Beschaffenheit des Hindernisses, zu unterschiedlichen Teilen reflektiert und absorbiert. Die Menge der reflektierten Schallenergie ergibt sich aus der einwirkenden Energiemenge abzüglich der Verluste durch Absorption. Das Maß für den nicht reflektierten Teil der Energie nennt man Absorptionsgrad  $\alpha$ . Das Maß für den reflektierten Anteil bezeichnet man als Reflexionsgrad  $\rho$ . In der Summe ergeben Absorptionsgrad und Reflexionsgrad die Zahl 1;

$$\alpha + \rho = 1$$

Der Absorptionsverlust wiederum ergibt sich aus der Summe des Dissipationsverlustes und des Transmissionsverlustes. Der Dissipationsgrad  $\delta$  ist das Maß für den Energieverlust, der durch Umwandlung der Schallenergie in Wärme hervorgerufen wird. Der transmittierte Energieanteil findet seinen Ausdruck im Transmissionsgrad  $\tau$ . Der Zusammenhang als Formel ausgedrückt lautet:

$$\alpha = \delta + \tau.$$

Die Absorption und Reflexion sind sowohl materialtypisch als auch von der Einbaukonstruktion des Bauteils abhängig. Die Angabe von Absorptionsgraden ist in der Literatur nicht immer eindeutig, da die äußeren Umstände der Betrachtung, wie z.B. die Einbausituation eine entscheidende Rolle spielen. Die Bestimmung von  $\alpha$  und  $\rho$  wird empirisch durch Messung ermittelt. Die Physikalisch Technische Bundesanstalt in Braunschweig stellt eine Sammeltabelle mit Absorptionswerten aus unterschiedlichen Quellen zur Verfügung (Physikalisch Technische Bundesanstalt).

Tabelle 3: zeigt einen Auszug typischer Absorptionsgrade  $\alpha$  für Materialien, wie sie im Bereich der akustischen Raumgestaltung verwendet werden. Es genügt die Absorptionsgrade  $\alpha$  eines Materials zu kennen, da über den Zusammenhang  $\alpha + \rho = 1$  der entsprechende Reflexionsgrad gegeben ist.

Bezeichnung	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Beton, Block Mauerwerk	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	
Beton, gestrichen	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	
Schwerer Teppich, gummiert	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	
Ölgemälde auf Leinwand, 5 cm Wandabstand	0,05	0,08	0,20	0,30	0,35	0,40	
Vorhangstoff, doppelt 20 cm Abstand	0,17	0,48	0,77	0,81	0,90	0,95	
Gipskartonplatte, 18 mm, 16 kg/m <sup>2</sup> , 400 mm vor starrer Wand	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,04	
Gipskarton-Lochplatte, 9,5 mm, 6 % Lochflächenanteil	0,66	0,69	0,45	0,47	0,28	0,23	
Auditorium, vollbesetzt	0,70	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81	

Tabelle 3: Typische Absorptionsgrade (Quelle: Physikalisch Technische Bundesanstalt)

Die akustischen Eigenschaften der Materialien müssen frequenzabhängig betrachtet werden. In unterschiedlichen Frequenzbereichen, kann sich der Absorptionsgrad eines Materials signifikant unterscheiden. In der Raumakustik sind die, für den Menschen wahrnehmbaren, Frequenzbereiche interessant. Diese liegen zwischen 16 Hz und 16kHz. Die Wertangabe in der Akustik wird typischerweise in sogenannten Frequenzbändern angegeben. Diese stellen einen Frequenzbereich dar, für den der Wert gilt. Frequenzbereiche, wie sie in Tabelle 3: aufgeführt sind, werden als Oktavband bezeichnet, da sich die Frequenzen jeweils verdoppeln; was einer Oktave entspricht.

Die Richtung einer akustischen Reflexion kann grundsätzlich nach dem geometrischen Satz: Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel bestimmt werden. Diese geometrische Reflexion gilt bei der idealisierten Annahme, dass keine Streuung die Reflektion beeinträchtigt und die Reflexionsfläche glatt und im Verhältnis zur Wellenlänge quasi unendlich ausgedehnt ist; die Reflexionsfläche wirkt dann wie ein Spiegel. Je nach Porosität und Struktur der Reflexionsfläche können unterschiedliche Streuungen in Erscheinung treten. Dabei kommt es wesentlich auf das Verhältnis von Wellenlänge und Strukturgröße der Reflexionsfläche an. Ist die Struktur der Reflexionsfläche im Verhältnis zur Wellenlänge sehr klein, tritt keine Streuung auf, es findet eine geometrische Reflexion statt. Ist die Strukturgröße aber deutlich größer als die eintreffende Wellenlänge, dann wirken die Elemente der Oberflächenstruktur jeweils selbst wie eine Reflexionsfläche. Liegt die Größe der Oberflächenstruktur in der Dimensionsgröße der Wellenlänge, so wird die Energie diffuse reflektiert. In Bild

26: ist schematisch das Reflexionsverhalten in Abhängigkeit zum Verhältnis der Wellenlänge und der Strukturgröße dargestellt. Die genaue Betrachtung der einzelnen Streuungsanteile ist sehr aufwändig. Deshalb wird die genaue Verteilung durch eine modellhafte Richtungsverteilung nach dem Lambert'schen Kosinusetz abstrahiert. (Kuttruff 2004, S. 130)

$$I(r, \theta) = B(1 - \alpha) \frac{\cos \theta}{r^2} dS$$

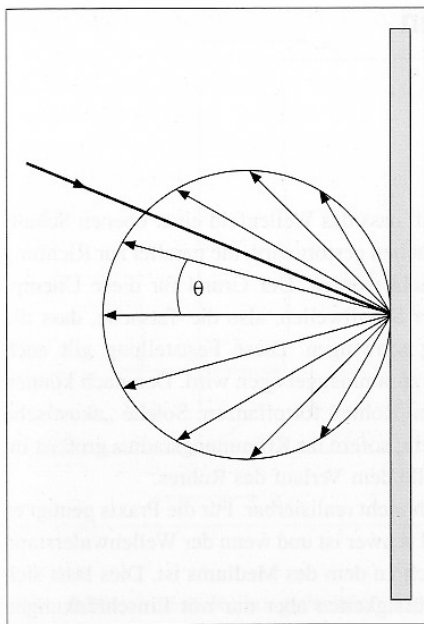


Bild 25: Richtungsverteilung des gestreuten Schalls nach dem Lambert'schen Gesetz (Kuttruff 2004, S. 131)

In der Praxis treten weder die geometrische noch die diffuse Reflexion in Reinform auf, sondern meist als Mischform.

Häufig wird bei akustischen Berechnungen eine individuelle Abschätzung des Streuungsgrades vorgenommen, zum einen weil verlässliche Werte für die Streuungsgrade fehlen und zum anderen, um der oft speziellen Situation der akustischen Betrachtung gerecht zu werden. Für eine Abschätzung des Streuungsgrades kann man das Verhältnis von Reflexionsfläche und Wellenlänge der betrachteten Frequenz betrachten. Entspricht die Reflexionsfläche ungefähr der Wellenlänge, so kann ein Streuungsgrad von 0,5 angenommen werden, wenn die Wellenlänge deutlich über den Ausmaßen der Reflexionsfläche liegt, kann ein Wert zwischen 0,5 und 1 und wenn die

Reflexionsflächengröße deutlich größer als die Wellenlänge ist, kann ein Wert zwischen 0 und 0,5 angenommen werden.

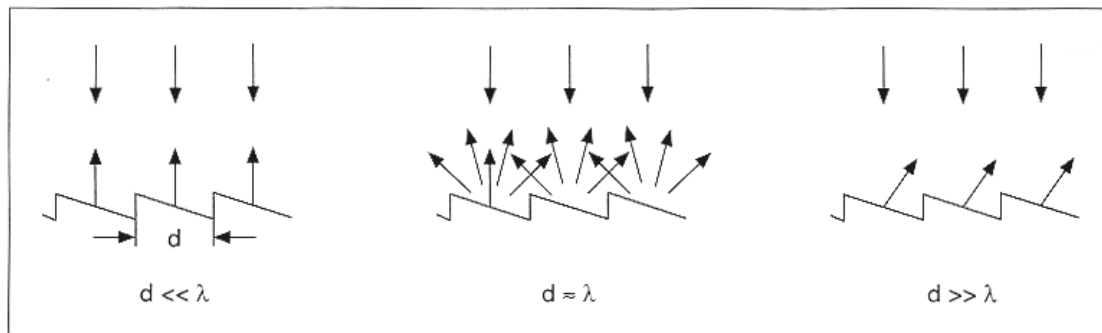


Bild 26: Schallstreuung bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturgrößen (Kuttruff 2004, S. 130)

Die Streuung hängt also direkt von der Wellenlänge ab und damit von der Frequenz des Schallereignisses. Der physikalische Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$c = \lambda \cdot f$$

Die Schallgeschwindigkeit ( $c$ ) ist das Produkt aus Frequenz ( $f$ ) und Wellenlänge ( $\lambda$ ). Anders ausgedrückt ist die Wellenlänge ( $\lambda$ ) der Quotient aus Schallgeschwindigkeit ( $c$ ) und Frequenz ( $f$ ).

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Betrachtet man die Wellenlänge im hörbaren Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz, so stellt man fest, dass sich die Wellenlänge im Dimensionsbereich von Bauteilen oder Raumobjekten befindet; zwischen 21 m und 2 cm.

$$\lambda = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16 \text{ Hz}} = 21,44 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{16000 \text{ Hz}} = 0,021 \text{ m}$$

Betrachtet man den in der Musik üblicherweise verwendete Frequenzbereich von 40 Hz bis 10 kHz ergibt sich eine für die Schallbeugung relevante Objektgröße von 8,58 m bis 3,4 cm.

$$\lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{40 \text{ Hz}} = 8,58 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{10000 \text{ Hz}} = 0,034 \text{ m}$$

Im Bereich, der für die Sprachverständlichkeit wichtigen Frequenzen von 1000Hz bis 5000 Hz, liegt die Objektgröße zwischen 34cm und 6,9 cm.

$$\lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{1000 \text{ Hz}} = 0,34 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{5000 \text{ Hz}} = 0,069 \text{ m}$$

Wie wir festgestellt haben wirken sich Objekte, die deutlich kleiner sind als die Wellenlänge nicht auf die Reflexion der Welle aus. Das liegt daran, dass sich die Schallwelle um das Objekt derart herum beugt, dass sich die Fläche des kleinen Objektes gar nicht als Reflexionsfläche bemerkbar macht. Bildlich kann man sich dies anhand eines dünnen Stockes vorstellen, der ins Wasser gehalten wird und beinahe widerstandslos von den Wasserwellen umgangen wird. Liegen Größen von Objekte, Raumteile oder Öffnungen, jedoch im Dimensionsbereich der Wellenlänge, so wirkt sich die Beugung auf die Schallwelle signifikant aus. Nach dem Huyghens'schen Gesetz werden die von der Schallwelle getroffenen Punkte selbst wieder zum Ausgangspunkt einer Punktquelle. Daher entsteht an einer Kante oder einem begrenzten Objekt wiedererwarten kein Schallschatten, sondern es kommt zur Beugung des Schalls. Öffnungen, deren Abmessungen ähnlich groß wie die Wellenlänge sind, durch die auftretende starke Beugung wie eine zusätzliche Schallquelle wirken. Das Phänomen der Beugung ist abhängig vom Verhältnis der Objektgröße zur Frequenz. Da ein Schallereignis aus unterschiedlichen Frequenzen besteht, wirkt sich ein Objekt einer bestimmten Größe unterschiedlich auf die Beugung der einzelnen Frequenzbereiche des Schallereignisses aus<sup>27</sup>.

---

<sup>27</sup> Eine exakte Betrachtung und Formulierung von Streu- bzw. Beugungsproblemen findet sich bei Kuttruff 2004, S. 130

### 4.3. DIN ISO 3382-1 und DIN 4109

Ein wichtiger Teil der Bauakustik ist der Lärmschutz. Schwerpunktmäßig spielt er in der praktischen Anwendung eine wichtige Rolle. Er ist in allen Bereichen der Bauakustik relevant; auch und mit großer Wichtigkeit in der Konzipierung von besonderen akustischen Räumen, wie Konzert- oder Opernsälen. Die Anforderungen an den Schallschutz im Allgemeinen werden in der DIN 4109-1 (DIN 4109) beschrieben. Der Lärmschutz ist hier aber nicht Gegenstand der Betrachtung, da der akustische Raum mit seinen Eigenschaften an sich und nicht der bauliche Raum in seiner Beziehung zu seiner baulichen und akustischen Umgebung betrachtet wird. In einer baupraktischen Betrachtung sind akustischen Einflüsse von außen z.B. durch Straßenlärm, Vibrationen oder andere störende Umgebungsgeräusche natürlich relevant und dürfen nicht vernachlässigt werden. Sie sind aber nicht relevant für die raumgestalterische Ausprägung des akustischen Raumkonzeptes, sondern für die konstruktive Umsetzung des Raumes. Daher wird der Schallschutz in dieser Arbeit nicht betrachtet.

In der DIN ISO 3382 Teil 1 ist die Messmethoden zur Bestimmung der Impulsantworten von Aufführungsräumen beschrieben. Daraus werden die sogenannten Gütemaße für den Zuhörerraum und Messgrößen für den Bühnenraum abgeleitet. Diese sind informativen Charakters. (DIN EN ISO 3382-1) D.h. die DIN schreibt nicht normativ vor welche Gütemaße für einen Raum einzuhalten sind, sondern gibt Empfehlungen. Wie später noch zu zeigen ist, entspricht dies dem Stand der Forschung, da diese Werte sehr stark von der akustischen Nutzung des Raumes und der jeweiligen Vorstellung und der akustische Anforderung der Nutzer abhängt. So gelten für unterschiedliche Nutzungen, wie beispielsweise Konzertsäle oder Opernhäuser unterschiedliche akustische Kennwerte als angemessen. Und Säle mit unterschiedlichen Kennwerten werden von unterschiedlichen Experten mit unterschiedlichen Qualitäten bewertet (Beranek 2002). Es lassen sich also keine allgemeingültigen Kennwerte für die Bewertung von akustischen Räumen ableiten. Eher können Bereich definiert werden, die aber in gewisser Weise von den Vorlieben der Hörer abhängig sind.

#### 4.4. Impulsantwort, Impulsdiagramm

Die Impulsantwort ist die differenzierte Beschreibung der akustischen Reaktion eines Raumes auf ein Schallereignis. Das Impulsdiagramm oder Reflektogramm, ist die graphische Repräsentation der Impulsantwort eines Raumes. Die reflektierten Schallpegel des impulsartigen Anregungsschall werden über den zeitlichen Verlauf aufgezeichnet. In der Impulsantwort manifestieren sich die Schallenergieverhältnisse an einem definierten Ort über die Zeit. Mit der Impulsantwort ist für entsprechende Stelle im Raum eine charakteristische Beschreibung der akustischen Situation möglich. Aus der Impulsantwort lassen sich verschiedene Energieverhältnisse ablesen, die als akustische Kenngrößen und Bewertungskriterien für die Raumakustik gelten. Teilweise werden für die Bewertung von Räumen für Sprache andere Energieverhältnisse betrachtet als für die Bewertung von Räumen für Musik. Im Folgenden werden hier nur die relevanten Kennwerte von Räumen für Musik betrachtet.

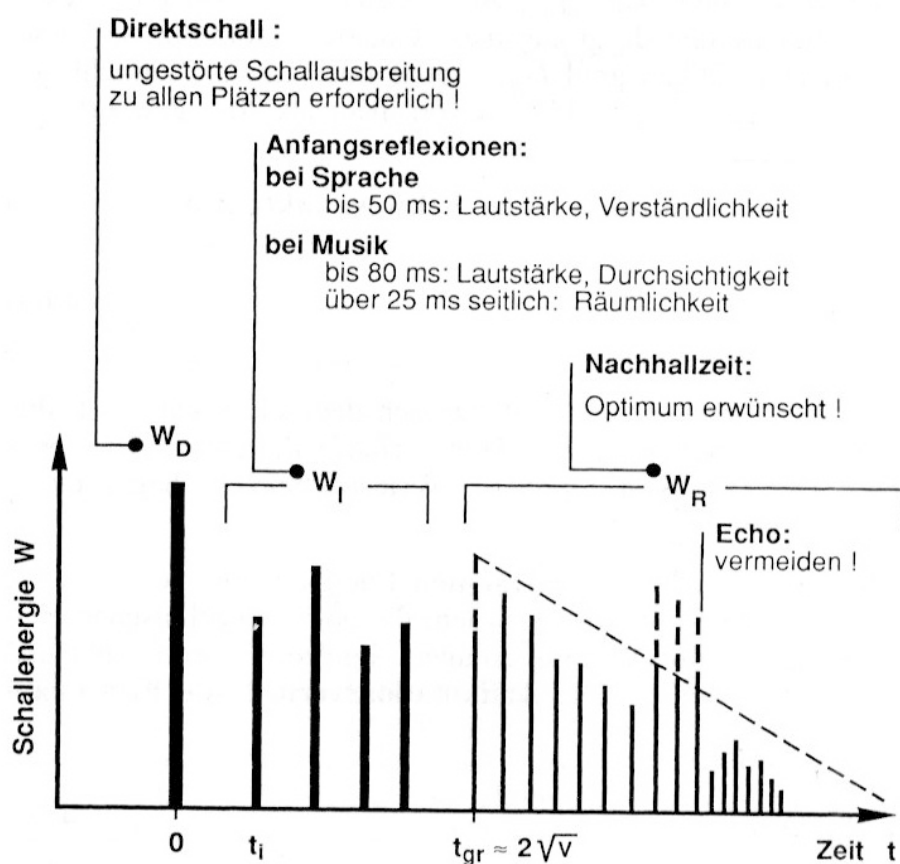


Bild 27: Schematische Darstellung der Impulsantwort (Fasold, Veres 2003, S. 149)



#### 4.5. Kennwerte der Raumakustik<sup>28</sup>

Für die Planung und Bewertung der Raumakustik stehen verschiedene Größen und Kennwerte zur Verfügung. Durch Messungen können objektive physikalische Werte an bestimmten Stellen des Raumes ermittelt werden. Aus den gemessenen Werten können unterschiedliche Verhältnisse dieser physikalischen Werte zu einander oder zu geometrischen Größen gebildet werden. Anhand dieser Kennwerte kann die akustische Qualität eines Raumes an bestimmten Stellen differenziert beschrieben werden. Die Kennwerte, die zeitliche und energetische Relationen der physikalischen Messwerte sind, beziehen sich auf die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit und intersubjektiv empfundene Empfindung und repräsentieren somit menschliches Hörempfinden in Bezug zu den gemessenen physikalischen Messgrößen. Im Prinzip sind diese Werte für jeden einzelnen Hörerplatz spezifisch und geben Auskunft über die Qualität der betrachteten Stelle. Im Folgenden werden energiebezogene akustische Kennwerte näher betrachtet.

##### 4.5.1. Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ( $RT_{60}$ ) ist die erste Größe die zur planerischen Bemessung von raumakustischen Eigenschaften herangezogen wurde. Die Nachhallzeit (engl.: reverberation time) beschreibt die Zeitspanne, die zwischen dem Ende der Signaleinwirkung und dem Erreichen des im Vergleich zum Ausgangspegel um 60 dB geringeren Schalldruckpegels liegt.

1898 wurde von W.C. Sabine erstmals der Zusammenhang zwischen Raumvolumen, Absorptionsfläche und Nachhallzeit beschrieben. Die nach ihm benannte Sabine'sche Formel lautet:

$$RT_{60} = k * \frac{V}{A} [s]$$

Die Nachhallzeit  $RT_{60}$  ist proportional zum Raumvolumen ( $V$ ) und umgekehrt proportional zur äquivalenten Absorptionsfläche ( $A$ ). Die

---

<sup>28</sup> Die Relevanz der Raumakustik für den architektonischen Entwurf und die „state of the art“ Werkzeuge zur Integration akustischer Performanz wurde im Aufsatz „Room Acoustics in the Architectural Design Process“ (Spaeth, 2008) auf der eCAADe 2008 in Antwerpen diskutiert und vorgestellt.

Proportionalitätskonstante (k) errechnet sich bei einer angenommenen Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 340m/s folgendermaßen.

$$k = \frac{24 * \ln 10}{343 \frac{m}{s}} = 0,161 \left[ \frac{s}{m} \right]$$

$$c_{20^{\circ}C} = 343m/s$$

Die äquivalenten Absorptionsfläche (A) berechnet sich aus der Summe der absorbierenden Flächen ( $A_i$ ) multipliziert mit dem jeweiligen Absorptionsgrad ( $\alpha_i$ ). Also:

$$A = \sum_{i=1}^N A_i * \alpha_i + 4mV$$

Da für die absorbierende Eigenschaft der Luft keine äquivalente Absorptionsfläche angegeben werden kann, diese aber bei großen Räumen eine nicht zu vernachlässigende Größe ist, wird ersatzweise eine äquivalente Absorptionsfläche der Luft  $A_L$  aus der Dämpfungsfaktor  $m$  und dem Raumvolumen  $V$  errechnet.

$$A_L = 4mV$$

Die Gleichung von Sabine wurde durch die Eyring'sche Nachhallformel präzisiert, da sich herausgestellt hat, dass die Sabine'sche Formel für stark absorbierende Räume, also für große  $\alpha$  nicht ausreichend zutreffend ist.

$$RT_{60} = k * \frac{V}{4m * V - S * \ln(1-\alpha)} [s]$$

S = gesamte Absorptionsfläche

V= Raumvolumen

k = Proportionalitätskonstante

$m$  = Dämpfungsgrad des Mediums

$\alpha$  = mittlerer Absorptionsgrad der Raumflächen (frequenzabhängig)

Sowohl in der Sabine'schen Formel, wie auch in der Eyring'schen Formel ist die messbare Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit durch den frequenzabhängigen Absorptionsgrad abgebildet. Die Nachhallzeit wird durch

eine statistische Berechnung aus Raumvolumen und Absorptionsflächen, ohne Berücksichtigung deren räumlich geometrischer Ausformung, ermittelt. Sie ist global, also für den Gesamtraum für den entsprechenden Frequenzbereich gültig. Zur Anschauung sind drei einfache Räume mit rechnerisch gleichen Nachhallzeiten, aber unterschiedlicher Raumgeometrie aufgelistet.

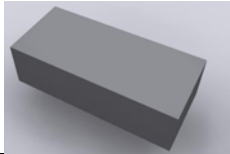

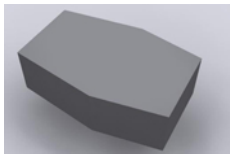
	$A_{\text{Wand}}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{\text{Decke}}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{\text{Boden}}$ [m <sup>2</sup> ]	$V_{\text{Gesamt}}$ [m <sup>3</sup> ]	$RT_{\text{S}}$ gerechnet <sup>29</sup> [s]	$RT_{\text{S}}$ simuliert <sup>30</sup> [s]
Absorptionsgrad $\alpha$	0,3	0,05	0,45	-	-	-
Raum 1 	1488	817	817	9804	1,87	1,85
Raum 2 	1446	795	795	9540	1,87	1,89
Raum 3 	1498	836	836	10032	1,89	1,94

Tabelle 4: Unterschiedliche Raumgeometrie mit annähernd gleichen Nachhallzeiten.

$A$  = Summe der Bauteilflächen

$V$  = Raumvolumen

$RT_{\text{S}}$  = Nachhallzeit nach Sabine (Luftabsorption unberücksichtigt)

$\alpha$  = mittlerer Absorptionsgrad (frequenzabhängig)

Es gibt nicht die eine optimale Nachhallzeit, die für jeden Raum gültig wäre. Je nach Zweck des Raumes werden unterschiedliche Nachhallzeitbereiche als geeignet betrachtet. So werden Räume für gesprochene Sprache mit einer  $RT_{60}$  zwischen 0,5 und 1,0 s angestrebt. In Konzerträumen gilt eine  $RT_{60}$  zwischen 1,4 und 2,0s als optimal. Zum Vergleich: In Kirchen wird häufig eine

<sup>29</sup> Berechnung nach der Formel von Sabine ohne Berücksichtigung der Luftabsorption

<sup>30</sup> Simulation in CATT Acoustics™ ohne Berücksichtigung der Luftabsorption

Nachhallzeit von 3 – 4s gemessen. (Metha, 1999) Die Nachhallzeit beschreibt das hörbare Volumen eines Raumes und ist nach wie vor ein sehr wichtiges Kriterium zur Bewertung von akustischen Räumen.

Mit der Formel nach Sabine lässt sich erstmals das akustische Verhalten eines Raumes in der Planungsphase abschätzen. Die Abschätzung der Nachhallzeit ist nach wie vor ein wichtiges Kriterium bei der Planung von akustischen Räumen. Nach Fasold ist die Anwendung der Sabine'schen Formel für die Abschätzung von Konzertsälen oder Opernsälen ausreichend. (Fasold, Veres 2003, S. 140)

Konzert- / Opernsaal	Mittlere Nachhallzeit [s]	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]
Philharmonie Berlin	1,8	24.500
Barbican Konzerthalle London	1,7	17.750
Musikvereinssaal Wien	2,0	15.000
Semperoper Dresden	1,7	12.500
Kammermusiksaal Konzerthaus Berlin	1,3	2.100

Tabelle 5: Mittlere Nachhallzeiten unterschiedlicher Räume (Fasold, Veres 2003, S. 192)

Die Anwendung der Nachhallzeit als akustisches Qualitätskriterium ist aber im Sinne einer geometrisch differenzierten Betrachtung des Raumes nicht ausreichend, da die Nachhallzeit, wie die Formel zeigt, eine statistische Größe ist, die lediglich die Summe und Wirksamkeit der absorbierenden Flächen ins Verhältnis zum Raumvolumen setzt. Die geometrische Ausprägung unterschiedlicher Räume wird durch die Nachhallzeit nicht abgebildet.

#### 4.5.2. Anfangszeit (Initial Time)

Die Zeitdifferenz zwischen dem Ankommen des Direktschalls und der ersten Reflexion bezeichnet man als Anfangszeit oder Initial Time oder Initial Time Gap ( $T_I$ ). Sie gilt als ein Maß für das Intimitätsempfinden eines Raumes. Hier werden Werte zwischen 10-25ms als ideal angesehen. (Fasold, Veres 2003, S. 153) Erreicht die erste Reflexion den Empfänger erst nach 50 oder 80 ms, so wird das ankommende Signal nicht mehr als Reflexion dem dazugehörigen Direktschall zu geordnet, sondern wird als eigenständiges Signal und im schlechtesten Fall als Echo wahrgenommen.

### 4.5.3. Anfangsnachhallzeit (Early Decay Time)

Die Anfangsnachhallzeit oder Frühe Nachhallzeit (EDT) trägt dem Umstand Rechnung, dass die subjektiv wahrgenommene Nachhallzeit nicht mit der gemessenen Nachhallzeit übereinstimmt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Pegelabfall um -60dB aufgrund sich kontinuierlich überlagernder Schallereignisse nicht differenziert messbar ist. Deshalb bedient man sich eines kleinen Umweges und betrachtet den Schallabfall um -10dB. Durch eine Normierung mit dem Wert 6, wird er mit der Nachhallzeit vergleichbar. Für die Ausprägung der EDT sind einzelne unterscheidbare frühe Reflexionen verantwortlich. Diese Tatsache macht die Messung der EDT empfindlich für die Raumgeometrie. Damit liefert die EDT einen subjektiven Eindruck der Halligkeit des Raumes, in dem die frühen Reflexionen noch nicht vom allgemeinen Hallfeld überlagert sind. Anders wie bei der Nachhallzeit  $RT_{60}$ , welche bei der Messung an unterschiedlichen Stellen eines Raumes meist das gleiche Ergebnis liefert, ist die EDT an unterschiedlichen Stellen im Raum unterschiedlich ausgeprägt und kann daher für die differenzierte Bewertung von Empfängerplätzen herangezogen werden. (Mehta, Johnson, Rocafort 1999, S. 262) Bei Tempelton (1993, S. 58) wird eine für Konzerthallen eine geeignete EDT von 1,8 -2,3 Sek. angegeben.

### 4.5.4. Klarheitsmaß C (Clarity)

$$C_{80} = 10 \lg \frac{W_{0...80ms}}{W_{80ms...∞}} [dB]$$

Für das Klarheitsmaß wird die Energiemenge der ersten 80ms ins Verhältnis zur Restenergiemenge gesetzt. Dadurch wird messbar wie viel Energieanteil der Gesamtenergie in den ersten 80ms beim Empfänger ankommt. Untersuchungen zeigen, dass Reflexionen in den ersten 80ms die Verständlichkeit und differenzierte Wahrnehmung von Musik unterstützen. Fasold empfiehlt ein Klarheitsmaß für Orchestermusik von -1 bis +3 dB (Fasold, Veres 2003, S. 151) bei Tempelton wird ein Wert zwischen 0 und +3 dB angegeben (Templeton 1993, S. 55)

#### 4.5.5. Hallmaß H

Durch das Hallmaß H ist das Verhältnis der Energiemenge des Direktschalls zum reflektierten Schall an einer bestimmten Stelle abgebildet.

$$H = 10 \lg \frac{W_d}{W_r} = 20 \lg \frac{p_d}{p_r} \text{ [dB]}$$

$W_d$ = Energiemenge Direktschall

$W_r$ = Energiemenge der gesamten Reflexionen

$p_d$ =Schalldruckpegel Direktschall

$p_r$ =Schalldruckpegel Reflexionen

Ähnlich wie bei der Nachhallzeit drückt das Hallmaß ein Maß für die Intensität der Gesamtheit der Raumreflexionen aus.

#### 4.5.6. Schwerpunktzeit TS (Center Time)

Die Schwerpunktzeit TS kennzeichnet die Zeit des Energiemaximums an einem Empfängerplatz. Dabei unterscheidet man nicht zwischen nützlichen oder unnützen Reflexionen. Sie ist ein Maß für die Sprachverständlichkeit. Bei Werten unter 80ms kann man von einer guten Sprachverständlichkeit ausgehen, die beispielsweise für Sprechräume angemessen ist. Geeignete Werte für Konzerträume liegen bei 100 -150 ms. (Fasold, Veres 2003, S. 151) Je kleiner die Schwerpunktzeit, desto durchsichtiger wird das Schallereignis wahrgenommen.

$$TS = \frac{1}{W_{ges}} \int_0^{\infty} t * W(t) dt \text{ [s]}$$

#### 4.5.7. Seitenschallgrad / Seitenschallmaß LF / LFC (Lateral Fraction Coefficient)

Das Seitenschallmaß beschreibt das Verhältnis der Energie früher seitlicher Reflexionen zur Gesamtenergie der Reflexionen innerhalb der ersten 80ms unter Berücksichtigung ihres Einfallwinkels. Der Winkel  $\theta$  beschreibt die Abweichung zwischen der zur Blickrichtung orthogonalen Ohr-Achse des Zuhörers. Trifft die Reflexion auf den Empfänger aus dessen Blickrichtung so beträgt  $\theta$  90°. Der Reflexionsanteil wird dann in der Gleichung mit dem Faktor

$\cos(90^\circ) = 0$  in Anrechnung gebracht, trifft die Reflexion orthogonal zu dessen Blickrichtung, also in Richtung der Ohr-Achse auf den Empfänger, so beträgt  $\theta$   $0^\circ$  und der Anrechnungsfaktor beträgt folglich  $\cos(0^\circ) = 1$ . Je seitlicher die Reflexion detektiert wird, desto stärker wird sie in der Gleichung berücksichtigt. Bei Messverfahren werden Mikrofone verwendet, welche die Richtungscharakteristik der eintreffenden Reflexionen bauartbedingt schon berücksichtigen und deshalb eine abweichende Notation, ohne den Richtungsfaktor  $\cos \theta$ , bevorzugt wird. Um bei Messverfahren die Verzerrung durch Direktschall zu minimieren, wird ein Zeitintervall von 5-80ms verwendet. Bei der rechnerischen Ermittlung kann darauf verzichtet werden, da die Schallereignisse nach Direktschall und Reflexion differenzierbar sind.

$$LF = \frac{W_{0...80ms} |\cos \theta|}{W_{80ms...∞}}$$

Das Seitenschallmaß ist als  $10 \lg LF$  definiert also:

$$LFC = 10 \lg \frac{W_{0...80ms} |\cos \theta|}{W_{80ms...∞}}$$

$\theta$  = Winkel zwischen Ohr-Achse und Reflexionsrichtung

Der angestrebte Wert für Konzerträume liegt für LF zwischen 25 und 40 % und für LFC zwischen -6 und -4 dB (Fasold, Veres 2003, S. 153)

#### 4.5.8. Echokriterium

Wichtig für die Hörsamkeit eines Raumes ist die Vermeidung von Echos. Als Echo bezeichnet man signifikante Reflexionen, die mit einer Verzögerung von ca. 80-100ms nach dem auslösenden Direktschall und meist ohne begleitende schwächere Reflexionen, beim Empfänger eintreffen. Erkennbar sind Echos im Reflektogramm durch einen im Verhältnis zu den umgebenden Reflexionen deutlichen Ausschlag der Reflexionsenergie (siehe Bild 27:.) Rechnerisch kann ein Echo durch ein Differenzkriterium der Schwerpunktzeit eines bestimmten Zeitintervalls und einer des Signalcharakters entsprechenden Teilers beschrieben werden. Bei musikalischen Darbietungen wird ein  $\Delta \tau$  von 14ms empfohlen.

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau}$$

Anhand von Versuchen werden Grenzwerte für EK zwischen 1,5 und 1,8 angegeben. Das Echokriterium ist nicht absolut gültig, sondern ist vom Charakter der Musik abhängig. Bei sehr rhythmischer und akzentuierter Musik oder Sprache ist der Wert für das Echokriterium eher niedrig anzusetzen. Periodisches Überschreiten des Echokriteriums in einem Zeitintervall zwischen 50 und 100ms kann als sogenanntes Flatterecho interpretiert werden.

#### 4.5.9. Schallquellenverstärkung G (sound strength)

Durch die Schallpegeladdition der Reflexionen entsteht eine Verstärkung des Schallquellenpegels. Als Bezugsgröße der Verstärkung wird die Schalleistung der gleichen Quelle in 10m Abstand im Freifeld, also ohne Reflexion und damit ohne Verstärkung, herangezogen.

$$G = 10 \lg \frac{W_{ges}}{W_{ges_{10}}}$$

$W_{ges}$  = gesamte detektierte Schalleistung am Empfänger

$W_{ges_{10}}$  = Bezugsschalleistung der gleichen Quelle bei freier Schallausbreitung im Abstand von 10m

In Konzertsälen werden für G Werte zwischen 5 – 8,5 dB gemessen (Beranek 2004, S. 514).

#### 4.5.10. Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient (IACC)

Ein weiteres Kriterium für die Hörsamkeit eines Hörplatzes ist der Interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient. Er beschreibt die Gleichheit der beiden Ohrsignale in einem bestimmten Zeitintervall an einem Empfängerplatz unter Berücksichtigung der Kopfeigenschaften. D.h. er ist ein Maß für die räumlich-zeitliche Signalverteilung am Kopf und ist in hohem Maße von der Raumgestalt abhängig. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Zeitintervalle fällt die Interpretation der IACC unterschiedlich aus. So ist die Betrachtung des IACC im Zeitintervall von 0-80ms ein Maß dafür wie gleichmäßig die frühen nützlichen Reflexionen am Hörerplatz verteilt sind und korreliert nach Beranek (2002) mit der Empfindung der Schallquellenbreite. Der IACC im Zeitintervall vom Beginn



des Nachhalls bis zum Verklingen der Reflexionen liefert eine Aussage über die Gleichmäßigkeit des Hallfeldes am Empfängerplatz und korreliert mit der Empfindung des „Umhüllt Seins“. In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zu den geeigneten Zeitintervallen, da der Zeitpunkt für das einsetzen des Nachhalls nicht einheitlich definiert wird.

Der IACC kann wie folgt berechnet werden.

$$IACF_{t_1,t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) * p_R(t + \tau) dt}{\left[ \int_{t_1}^{t_2} p_L(t) dt * \int_{t_1}^{t_2} p_R(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}}$$

IACF = interaurale Korrelationsfunktion

$p_L/p_R$  = binaurale Impulsantwort linkes / rechtes Ohr

oktavfrequenzgefiltert

mit  $-1 < \tau < +1$  [ms]

Der Maximalbetrag der interauralen Korrelationsfunktion im betrachteten Zeitintervall ergibt dann das interaurale Korrelationsmaß.

$$IACC_{t_1,t_2} = \max |IACF_{t_1,t_2}(\tau)|$$

Gängige Betrachtungsintervalle sind:

$IACC_E=0-80$ ms (early)

$IACC_L=80-500$ ms (late)

$IACC_A=0-500$ ms (all)

Bei Beranek(2002) werden Wertebereiche wie folgt definiert.

$IACC_{E;500,1k,2k}=0,28-0,38$ : Excellent to Superior

$IACC_{E;500,1k,2k}=0,39-0,54$ : Good to Excellent

$IACC_{E;500,1k,2k}=0,55-0,59$ : Fair to Good

Anders formuliert kann der Wert  $\rho=(1-IACC_E)$  als Maß für die Schallquellenbreite gesehen werden und der Wert  $\varepsilon=(1-IACC_L)$  als Maß für das „Umhüllt Sein“. Wobei 1 den beste Wert und 0 den schlechtesten Wert darstellt.

#### 4.6. Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieverteilung

Die räumlich-zeitliche Einwirkung der Schallenergie auf einen Empfänger kann graphisch dargestellt werden. Dabei werden für jeden Empfänger die, in einem bestimmten Zeitraum eintreffenden Signale akkumuliert, in ihrer Raumrichtung in Grundriss, Aufriss und Ansicht dargestellt. Die Darstellung berücksichtigt vor allem die frühen Schallereignisse, also den Direktschall und die frühen Reflexionen. Auch diese Darstellung berücksichtigt die Frequenzabhängigkeit des Schallereignisses und ist nur für einen bestimmten Frequenzbereich gültig. Anhand der Diagramme kann die Symmetrie der Schalleinwirkung auf den Empfänger und die Ausbildung des Halffeldes qualitativ abgeschätzt werden.

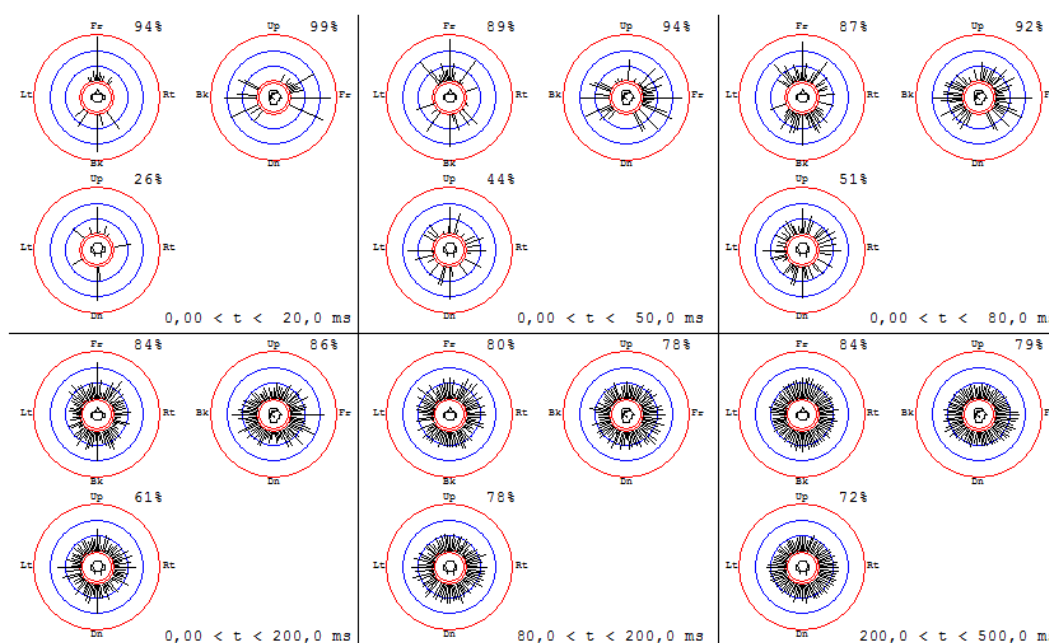


Bild 28: Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieeinwirkung auf einen Empfängerplatz. (Raumvariante 2 Empfänger 1, 1kHz, CATT Acoustics™) Relativ symmetrische Einwirkung der Signale.

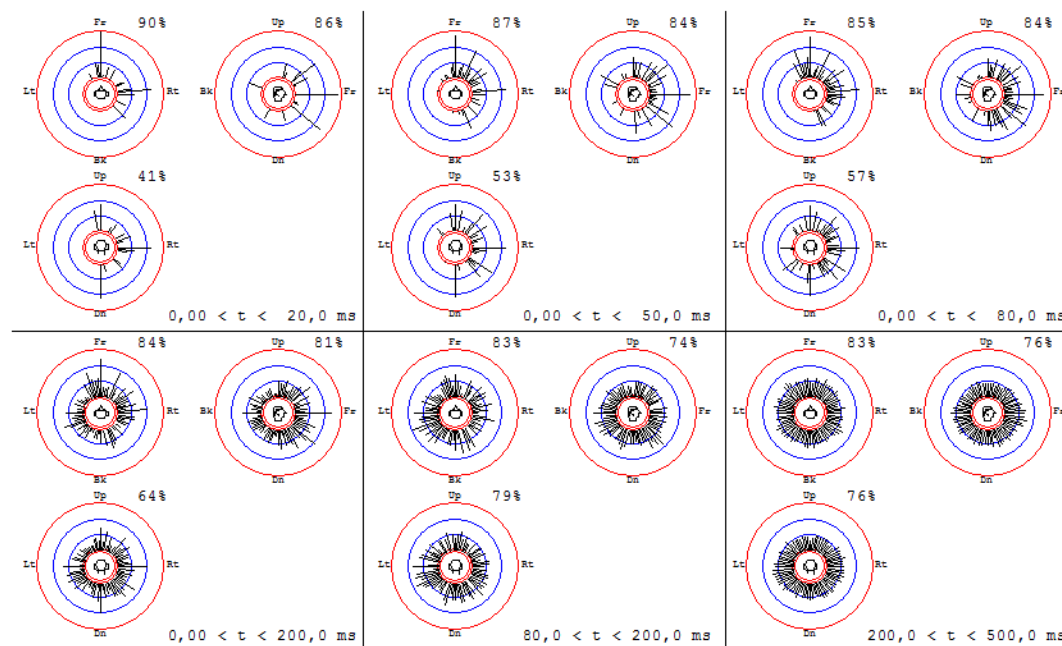


Bild 29: Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieeinwirkung auf einen Empfängerplatz. (Raumvariante 2 Empfänger 4,1kHz, CATT Acoustics™) Deutlich zu sehen das asymmetrische Einwirken der Signale im Zeitintervall bis 200ms.

## 4.7. Analyseverfahren der Raumakustik

### 4.7.1. Physische Modelle

Akustische Raumsituationen können mit Hilfe von Messgeräten vor Ort im Raum aufgenommen werden. Anhand der Messwerte können über, die oben beschriebenen Kenngrößen, objektive Bewertungen der raumakustischen Qualität abgeleitet werden. Um diese Aussagen schon im Planungsstadium und nicht erst nach Fertigstellung des Raumes treffen zu können, macht man sich die Eigenschaft der Skalierbarkeit der Schallwellen zu nutze. Akustische Messungen in maßstabsgerechten Raummodellen lassen Rückschlüssen auf die Raumakustik zu. Voraussetzung dafür ist die entsprechend maßstabsgerechte Skalierung der einwirkenden Schallfrequenzen und die maßstabsgerechte Modellierung der akustischen Materialeigenschaften. Nachbildungen im physischen Modell sind mit erheblichem Aufwand verbunden. Grundlegende Änderungen des Raumkonzeptes verlangen einen grundlegenden Umbau des Modells, so dass sich diese Methode bevorzugt zur Überprüfung und Optimierung einer festgelegten Raumsituation im Endstadium des Entwurfsprozesses eignet.

Neben der Messung der Schallsignale, kann man, unter der vereinfachenden Abstraktion des Schalls als Schallstrahl, mit Hilfe von Lichtstrahlen abschätzen welche Bereiche des Raumes gut ausgeschallt werden und in welchen Bereichen mit Schallschatten zu rechnen ist. Dabei wird die Welleneigenschaft des Schalls ignoriert und angenommen, dass sich die Schallausbreitung analog der kurzwelligen Lichtausbreitung strahlenförmig abstrahieren lässt. Die Schallquelle wird durch eine Lichtquelle simuliert. Die akustischen Reflexionseigenschaften der Raumobjekte werden als Lichtreflexionseigenschaften interpretiert und dargestellt. Damit kann eine solche Abschätzung über die Schallverteilung im Raum getroffen werden. Natürlich können Phänomene wie die Schallbeugung und die Frequenzabhängigkeit von Reflexion und Absorption in der Lichtsimulation nicht berücksichtigt werden. Auch findet die zeitliche und energetische Komponente der Schallausbreitung in der Simulation keine Entsprechung.



Bild 30: Akustisches Raummodell im Maßstab 1:10. Philharmonie Hamburg (Spaeth, 2011)

#### 4.7.2. Graphische Analyse

Analog der Betrachtung der Lichtstrahlen und deren Weg im Modell, kann eine Strahlenverfolgung graphisch erstellt werden. In Grundriss und Schnitt werden,

ausgehend von der Schallquelle, die Strahlenwege des Schalls aufgezeichnet und analysiert. Diese Art der Darstellung ist stark vereinfacht, da die Schallausbreitung in einer Ebene betrachtet wird und nicht in ihrer tatsächlich räumlichen Ausdehnung. Natürlich ist auch eine entsprechende räumliche Darstellung möglich. Diese wird aber schon bei einer relativ geringen Anzahl von Strahlen unübersichtlich. Wie auch bei der Darstellung durch Licht fehlen die energetischen und zeitlichen Aspekte des Schalls. Die Darstellung als Graphik ist eine sehr anschauliche und verdeutlicht den Einfluss der geometrischen Ausprägung des Raumes auf die Schallausbreitung.

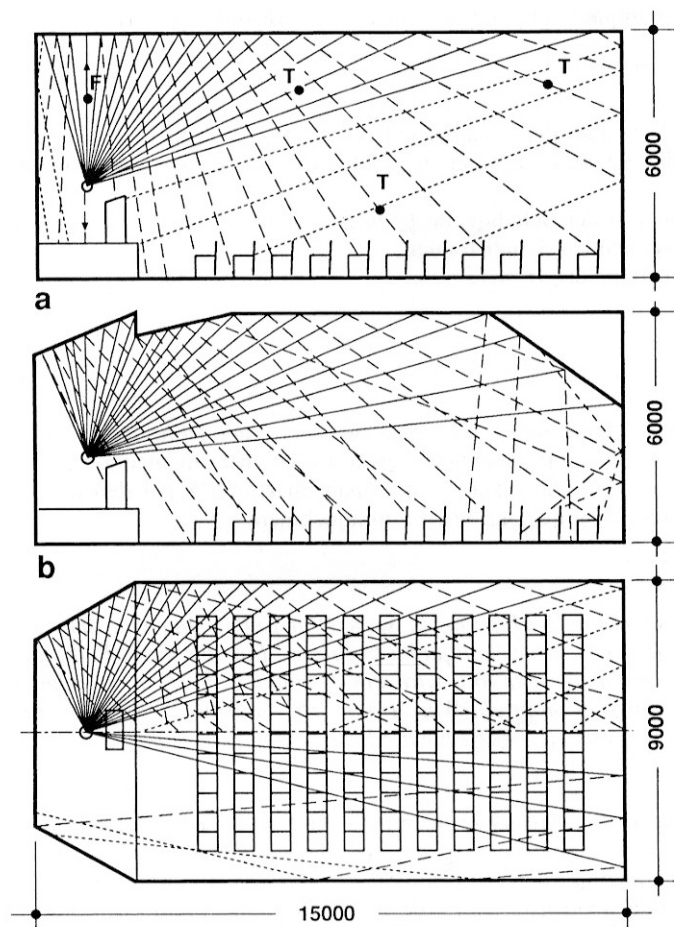


Bild 31: Graphische Strahlenverfolgung in Schnitt und Grundriss (Fasold, Veres 2003, S. 158)

### 4.7.3. Numerische Analyse

Angeregt durch die Entwicklung von Rechnersystemen und Anwendungen wird seit den 1960er Jahren auch an der Entwicklung von numerischen

Simulationen zur Analyse und Vorhersage von Raumakustik geforscht.  
(Schröder 15.09.2011, S. 47)

Die numerische Analyse versucht die maßgeblichen Zusammenhänge der Raumakustik abzubilden und in unterschiedlichen Darstellungen widerzugeben. Ziel ist es an jeder Stelle des Raumes die akustische Situation zu jeder Zeit möglichst genau abbilden zu können. Dabei wird der Raum als 3-dimensionales Modell abgebildet und die Wechselwirkungen von Raum, Material und Schall differenziert in ihrem räumlichen Kontext berücksichtigt.<sup>31</sup> Unterschiedliche Modellvorstellungen, Wellen basiert oder Teilchen basiert, dienen als Grundlage für die Berechnungen.

Eine ausreichend genaue Berechnung, d.h. eine Berechnung, die der Genauigkeit der menschlichen Hörfähigkeit entspricht und eine Darstellung der Raumakustik von einfachen Räumen, ist mit aktueller handelsüblicher Hardware und Software heute möglich. Stellvertretend für kommerzielle akustische Simulations- und Vorhersageprogramme werden hier CATT acoustics (Dahlenbäck 1998) oder Odeon (Christensen, Rindel 2010) genannt.

---

<sup>31</sup> Kouzeleas 2002 stellt ein Werkzeug zur Transformation von architektonischen CAD Modellen in akustisch simulierbare Modelle vor. Die Modelle werden teils manuell teils automatisiert vereinfacht und für eine Berechnung angepasst.

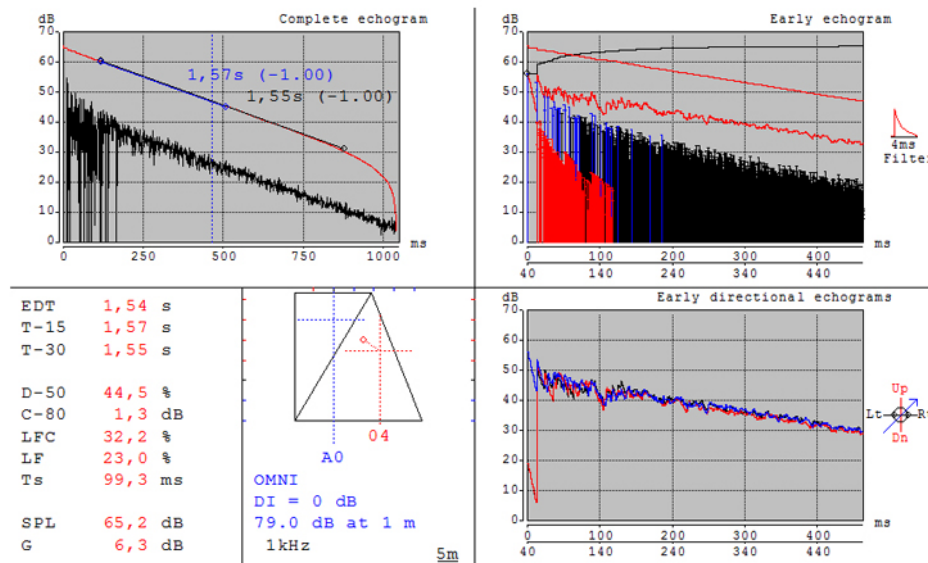


Bild 32: Ergebnis einer numerischen Analyse mit der Anwendung Catt Acoustics (Dahlenbäck 1998) mit Darstellung der Echogramme und der akustischen Kennwerte

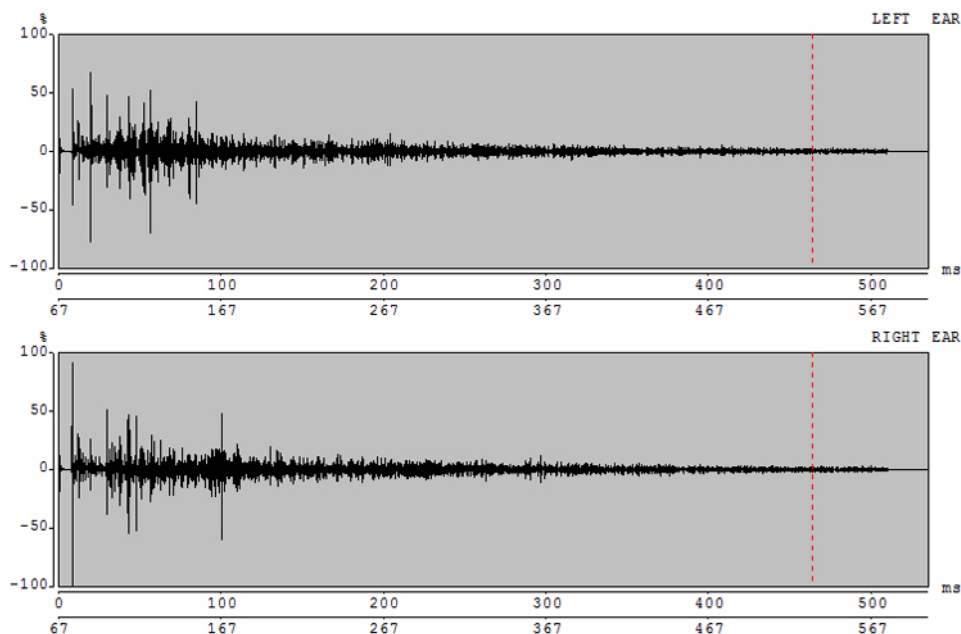


Bild 33: Darstellung der Analyse aus Bild 32: als binaurale Impulsantwort

Am Institut für technische Akustik der RWTH Aachen wird, unter der Leitung von Michael Vorländer, derzeit an einer echtzeitfähigen virtuellen Raumakustiksimulation und Auralisation unter der Bezeichnung RAVEN/VA geforscht. (Vorländer 1988 ; Lentz u. a. 2007 ; Schröder 15.09.2011 ; Heinz



1994) Bereits heute ist RAVEN/VA auf handelsüblicher Hardware benutz- und anwendbar.

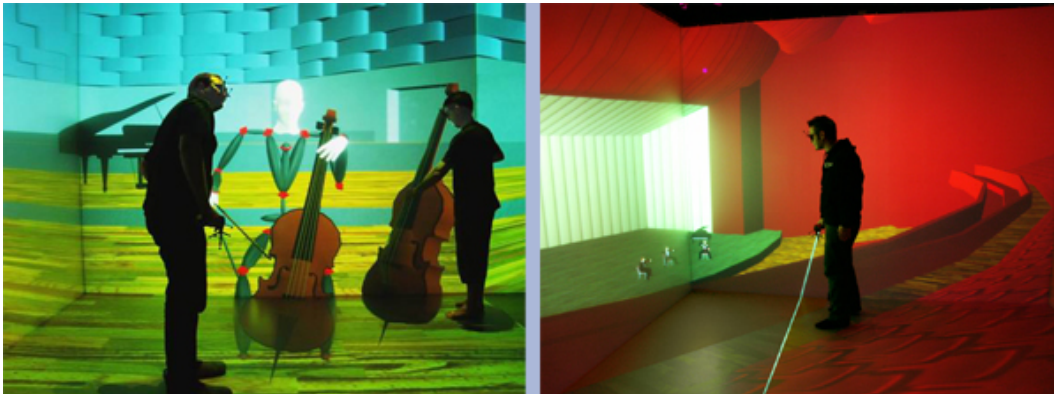


Bild 34: Virtuelle Akustik (VA) am Institut für Technische Akustik RWTH Aachen (Vorländer)

#### 4.7.4. Auralisierung

Neben der Berechnung und graphischen Darstellung der Berechnungsergebnisse kann das Ergebnis der numerischen Simulation auch akustisch wahrnehmbar dargestellt, auralisiert werden. Aus den Ergebnissen der Simulation wird eine für die Raumstelle typische Übertragungsfunktion erstellt. Ein Eingangssignal wird mit der raumakustischen Information der binauralen Impulsantwort und einer kopfbezogenen Übertragungsfunktion gefaltet. Damit entsteht die virtuelle akustische Abbildung der räumlichen Situation; die Auralisation. Über Ausgabegeräte wie Lautsprecher oder Kopfhörer wird die Raumakustik hörbar. Eine Bewertung der Raumakustik durch Hören erfordert ein sehr differenziert gebildetes Gehör. Der Vergleich unterschiedlicher Raumsituationen ist äußerst schwierig und selbst für trainierte Fachleute eine Herausforderung. Die Auralisierung bietet aber die Möglichkeit Räume individuell in ihrer akustischen Ausprägung wahrzunehmen.<sup>32</sup>

---

<sup>32</sup> Beispiele für architektonische und experimentelle Auralisierungen und deren wissenschaftliche Analyse sind in „raum.art“ (Spaeth 2003), „Concert Halls in Cooperative Virtual Environments“ (Spaeth 2011), „Modelling the Invisible“ (Spaeth 2011) und „Virtual Concert Hall“ (Spaeth 2012) zu finden.



## 4.8. Planungsmethoden der Raumakustik

### 4.8.1. Planungsgrößen in der Raumakustik

Für die Planung von akustischen Räumen existieren Faustformeln, die bei der Konzeptionierung hilfreich sind<sup>33</sup>. Eine wichtige Größe ist hier beispielsweise die Volumenkenzahl, mit deren Hilfe ein geeignetes Raumvolumen in Relation zur angestrebten Zuhörerzahl abgeschätzt werden kann. Darüber hinaus sind Maxima und Minima für Zuhörerplätze und Entfernungen der Zuschauer von der Schallquelle oder den Seitenwänden bekannt, durch deren Einhaltung mit einer soliden Akustik zu rechnen ist. Darüber hinaus gibt es geometrische Empfehlungen für die Unterschneidungen bzw. Auskragungen von Balkonen und deren Überhöhungen. Diese Planungsgrößen werden hier nicht detailliert aufgelistet, da es das Ziel des Formgebungsalgorithmus ist, genau dieses aufgrund der akustischen Werte sozusagen selbst herauszufinden.

### 4.8.2. Raumakustische Planung aus dem Lehrbuch

Bei der raumakustischen Planung wird zwischen primärer und sekundärer Struktur unterschieden. Die Primärstruktur bildet sich aus der Raumgröße, der Raumgrundform und der Anordnung und Größe der Bühnen und Zuschauerbereiche. Als Sekundärstruktur bezeichnet man Oberflächen und deren Beschaffenheit, also die Verteilung und Anordnung der absorbierenden und reflektierenden Flächen auf Grundlage der Primärstruktur. Diese Unterteilung in Primär- und Sekundärstruktur spiegelt sich auch im Planungsprozess wieder.

„Nach Festlegung der akustischen Funktion eines Raumes und seiner Zuhörerzahl beginnt jeder Planungsprozess mit den grundsätzlichen Entscheidungen zu Volumen und Form. [...] Im Gegensatz zur Festlegung des Raumvolumens läßt sich für die Raumform kein Optimum angeben. Sie wirkt sich aber entscheidend auf die Energiekriterien aus, denn durch die Form eines Saales werden die Direktschallversorgungen und die zeitliche und räumliche Verteilung der Anfangsreflexionen bestimmt.“ (Fasold, Veres 2003, S. 155).

Die hier zitierte Anweisung schlägt also vor, nach der Festlegung des Volumens eine grundsätzliche Entscheidung zur Form zu treffen, ohne aber weder eine optimale Form noch eine Methode zur Findung einer optimalen Form an die

---

<sup>33</sup> Planungsgrößen und Hilfen zur Konzeption von Raumakustik finden sich in Beranek 2004; Templeton 1993; Fasold, Veres 2003; Mehta, Johnson, Rocafort 1999

Hand zu geben. Gewissermaßen wird eine willkürliche Festlegung der Form, ohne Bezug zur daraus resultierenden Performanz, empfohlen.

Ein ähnliches Vorgehen wird bei Mehta vorgeschlagen. Nach der Abschätzung von Grundriss und Volumen wird die Festlegung des Raumquerschnittes empfohlen. Sichtlinien und Balkone und Rückwände sind nun zu integrieren. Nachdem die Primärstruktur festgelegt ist, wird das Interieur durch Materialisation der Oberflächen entwickelt. Nachgeordnet werden technische Belange wie Schallschutzmaßnahmen zur eventuell störenden Umgebung angeführt. Als sechster und letzter Punkt werden Maßnahmen zur Diffusität erwähnt. (Mehta, Johnson, Rocafort 1999, S. 279–283)

Es wird also zuerst die Primärstruktur des Raumes festgelegt. Zwar wird der Form des Raumes (Primärstruktur) ein entscheidender Einfluss auf die Raumakustik zu gewiesen, eine optimale Form wird aber nicht genannt. Selbst die Kriterien, von welchen die Wahl oder Entwicklung der primären Raumstruktur abhängt, werden nicht näher erläutert. Für die Entwicklung der Sekundärstruktur allerdings werden dann unterschiedliche Kriterien genannt. Durch die Forschung sind Kenngrößen bekannt, anhand derer sich die akustische Qualität eines Raumes abschätzen lässt. Diese sind in Kapitel 4.5 wiedergegeben und werden dort näher erläutert. Mit Hilfe dieser Kriterien können die notwendigen Eigenschaften der Wandoberflächen (Sekundärstruktur) bestimmt werden.

#### **4.8.3. Primärstruktur aus Vorbildern**

Ein gängiges und nach wie vor in der Praxis angewendetes Vorgehen, um zu einer plausiblen Primärstruktur zu kommen, ist es diese aus Vorbildern zu übernehmen. Bekanntermaßen funktionierende akustische Räume werden vorbildhaft in Teilaspekten oder im Ganzen als Planungsgrundlage für neue Räume übernommen. Der Annahme folgend, dass die primäre Raumform einen entscheidenden Einfluss auf die Akustik hat, macht es Sinn, sich einen guten akustischen Raum mit zur Planungsaufgabe ähnlichen Anforderungen auszusuchen und dessen Primärstruktur als Planungsgrundlage zu übernehmen. Ein Beispiel hierfür ist die Oper in Oslo, die 2008 fertiggestellt wurde. Bei der Ausprägung und Größe hat den Architekten und

Akustikingenieuren die Semperoper in Dresden als Vorbild gedient. (vgl. Meyer 2008 ) Die Frage, ob das Implantieren von historischen Raumkonfigurationen in ein zeitgenössisches Gebäude, die Antwort auf eine aktuelle Bauaufgabe ist, ist nicht zu Letzt eine Motivation für diese Arbeit.

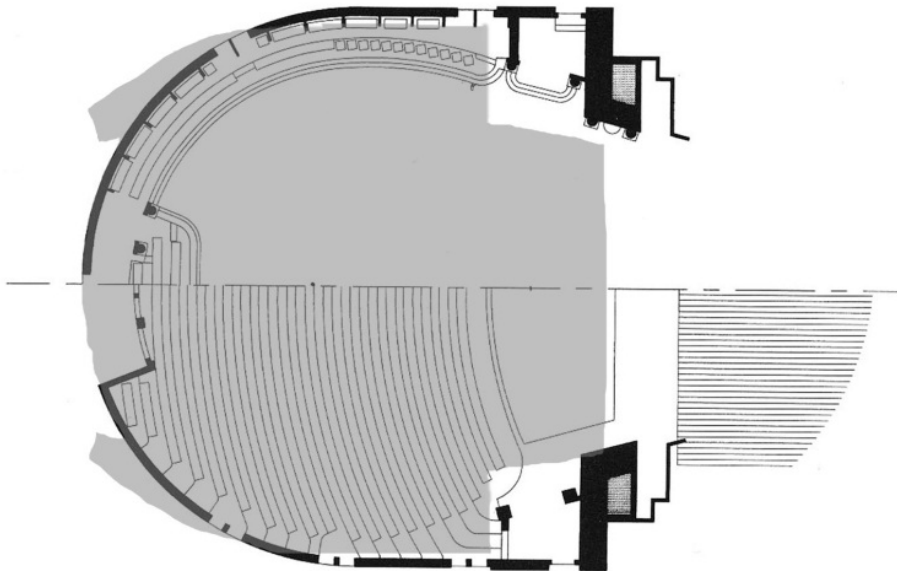


Bild 35: Grundriss der Oper Oslo. Grau markiert das akustische Volumen der Semperoper Dresden. Die akustischen Raumvolumina der beiden Säle stimmen weitgehend überein.

## 4.9. Aktuelle Tendenzen

### 4.9.1. Veränderte Anforderungen an die Raumakustik

Die Verwendung von bereits erfolgreichen Vorbildern ist ein probates Mittel, um eine komplexe Planungsaufgabe, wie zum Beispiel den Entwurf eines Konzertraumes, zu lösen. Dabei ist aber zu beachten, dass diese gebauten Vorbilder durch die Aufführungspraxis der Musikdarbietungen ihrer Zeit geprägt sind. In den klassischen Konzerträumen, wie z.B. im Wiener Musikvereinsaal, befinden sich die Zuhörer und Aufführende in frontaler räumlicher Opposition. Es gibt eine Bühne, die den dem Zuschauerraum zugewendet ist. Durch ein verändertes Verständnis der Aufführungspraxis und durch veränderte Relationen zwischen Zuhörer und Aufführenden werden neue Raumkonzepte für Konzerträume notwendig. In der Berliner Philharmonie manifestiert sich ein neues Aufführungskonzept in einem neuen Raumkonzept. Die Bühne ist

zentraler im Raum angeordnet und von den Zuhörern umgeben. Die Musiker sitzen gleichermaßen gleichberechtigt inmitten der Zuschauer. Neue Musikkonzepte können zu neuen Anforderungen an den Aufführungsraum führen. In der neuen Musikrichtung der Raummusik, wie beispielsweise „*Gruppen* Nr. 6 für 3 Orchestergruppen“ 1955-57 von Karlheinz Stockhausen komponiert, ist eine U-förmige Anordnung der Musiker vorgesehen, oder der „*Gesang der Jünglinge* Nr. 8, 1955-56“ sieht gar 5 Aufführungsstellen vor. (Wikipedia 16.11.2010) Um für die beschriebenen Beispiele der Raummusik akustische Räume zu entwerfen, sind aber die bekannten Vorbilder nicht mehr geeignete Lösungswege, um Raumkonzepte aufzuzeigen.

#### **4.9.2. Aktuelle Planungsansätze**

In den letzten Jahren arbeitet die Forschung daran, einen Ansatz für die akustische Planung zu finden, die der komplexen Anforderung der Raumakustik mit der Anwendung von computergestützten Entwurfsmethoden gerecht wird. Zum einen gibt es Ansätze, die das Thema von der akustischen Seite her angehen, und die Integration von objektivierbaren Evaluationskriterien in den Planungsprozess anstreben (Kouzeleas 2002). Dabei steht vor allem die Integration der unterschiedlichen Prozesse und Modelle von Architekten und Akustikern auf einer technischen Ebene im Vordergrund. Für die Optimierung von konventionell entwickelten Entwurfsvorschlägen in Bezug auf akustische Kriterien, gibt es bereits Ansätze evolutionäre Algorithmen einzusetzen (Sato u. a. 2004). Ausgehend von der idealen akustischen Hülle einer Schuhschachtel<sup>34</sup> werden die Hüllflächen in Teilflächen unterteilt und dann innerhalb eines evolutionären Prozess auf die akustische Performanz optimiert.

---

<sup>34</sup> Although it is true that a simple shoebox form is one of the best and most efficient shapes for a theatre, a form that has often been employed as the beginning basic form of a hall (in order to avoid mistakes within the limited knowledge of acoustic design), there remains a large search domain for the possibility of making totally new acoustical spaces. Sato u. a. 2004, S. 41

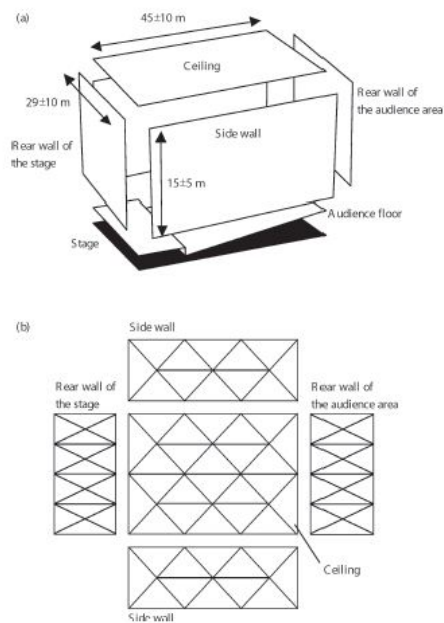


Bild 36: Unterteilung der Ausgangshülle (Sato u. a. 2004, S. 45)

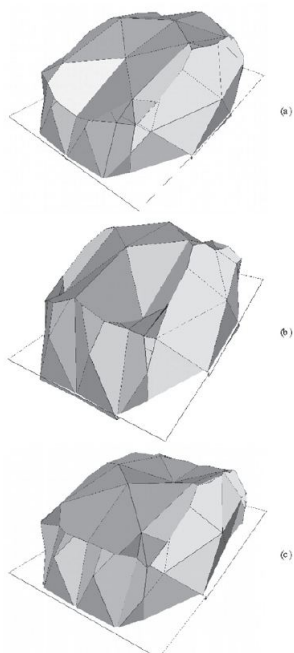


Bild 37: Darstellung der Optimierungsergebnisse durch den evolutionären Prozess (Sato u. a. 2004, S. 47)

Im Optimierungsprozess bei Sato (2004) wird ausschließlich die Geometrie optimiert, ohne die materiale Eigenschaft der Hülle zu betrachten. Für die Evaluation der Ergebnisse wird aber eine präzise akustische Analyse verwendet.

## Raumakustik

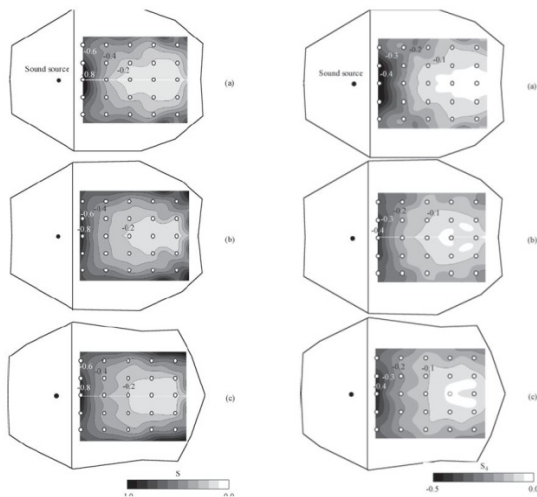


Bild 38: Darstellung der akustischen Qualität der Individuen (Sato u. a. 2004, S. 47)

Ein anderer Forschungsschwerpunkt, der zu beobachten ist, ist die Entwicklung parametrischer Entwurfswerkzeuge, die die Akustik als sogenannten „design driver“ im Zusammenhang mit parametrischem Entwerfen verwendet. Akustische Werte dienen als Eingabe oder Zielparameter für parametrisierte Entwurfssysteme (Bonwetsch, Ralph Baertschi, Silvan Oesterle 2008; Peters, Olesen 2010; Peters 2010).

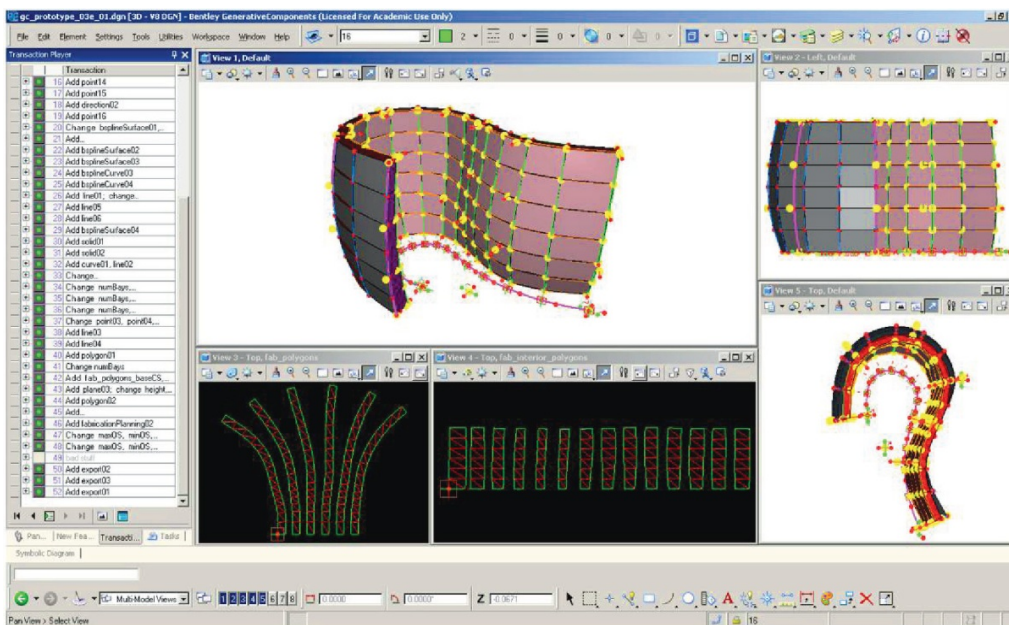


Bild 39: Parametrisches Modell (Peters 2010, S. 348)

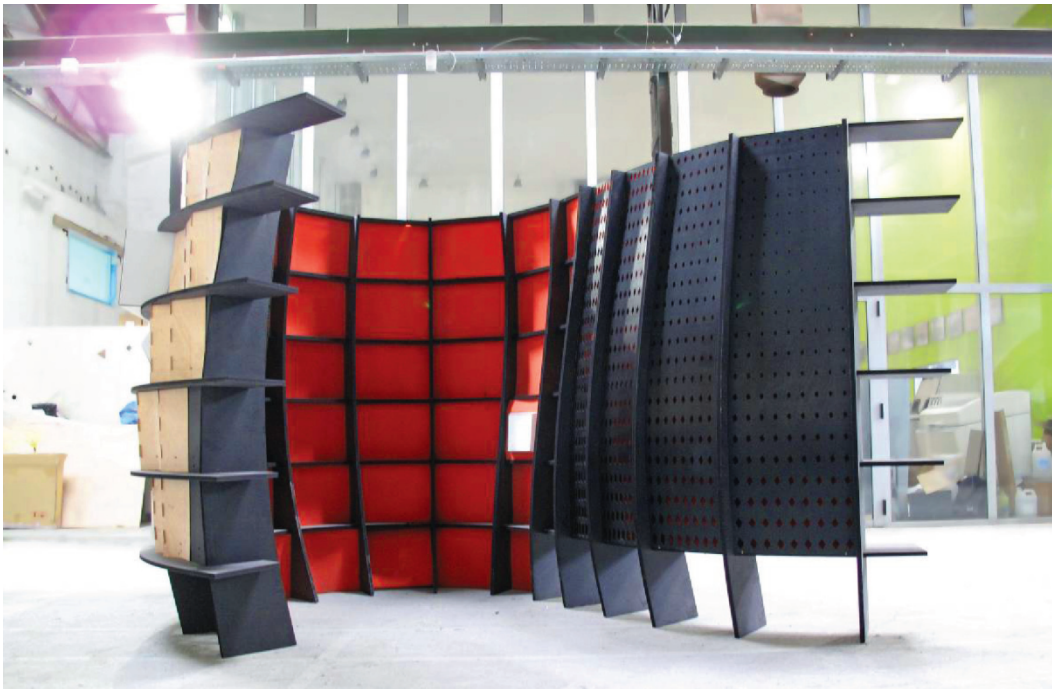


Bild 40: Akustisches optimiertes Objekt (Peters 2010, S. 354)

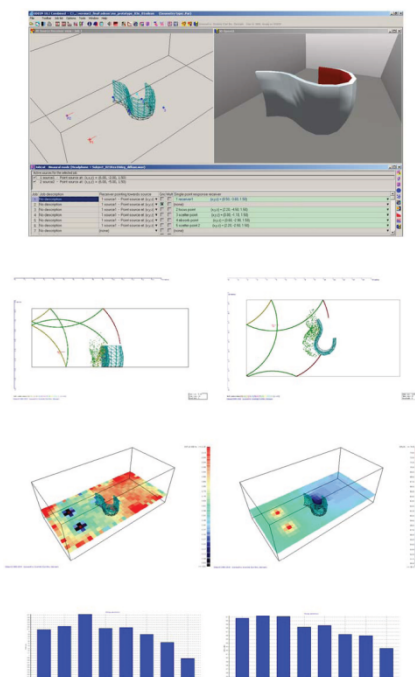


Bild 41: Analyse des akustischen Objektes (Peters 2010, S. 350)

Meist bleibt die Betrachtung und Integration der Akustik relativ simpel, indem lediglich die Nachhallzeit des Raumes betrachtet wird oder gar nur Teilsysteme berücksichtigt sind und reflektiert daher nicht die komplexen Wechselwirkungen zwischen Geometrie, Material und Akustik.



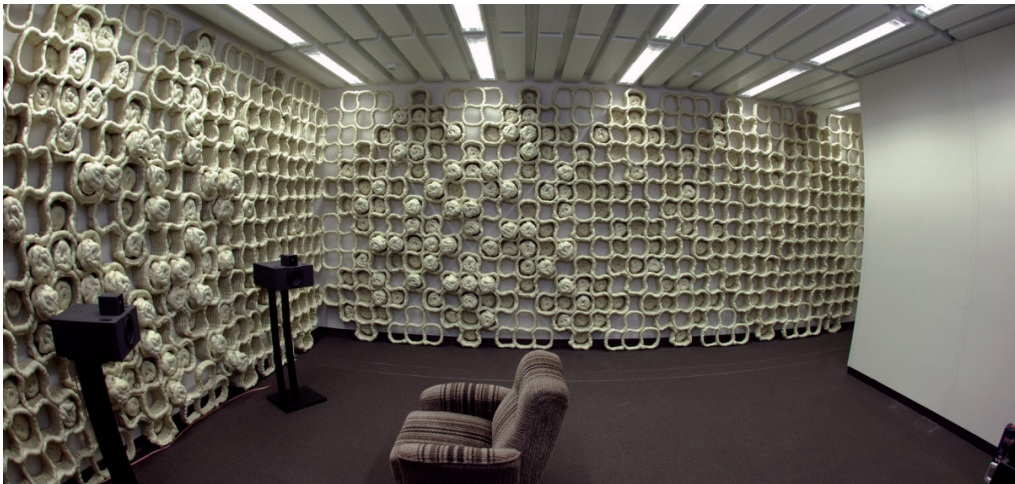


Bild 42: Ergebnis der Optimierung eines Hörerplatzes mit Hilfe eines parametrischen Entwurfssystems (Bonwetsch, Ralph Baertschi, Silvan Oesterle 2008, S. 366)

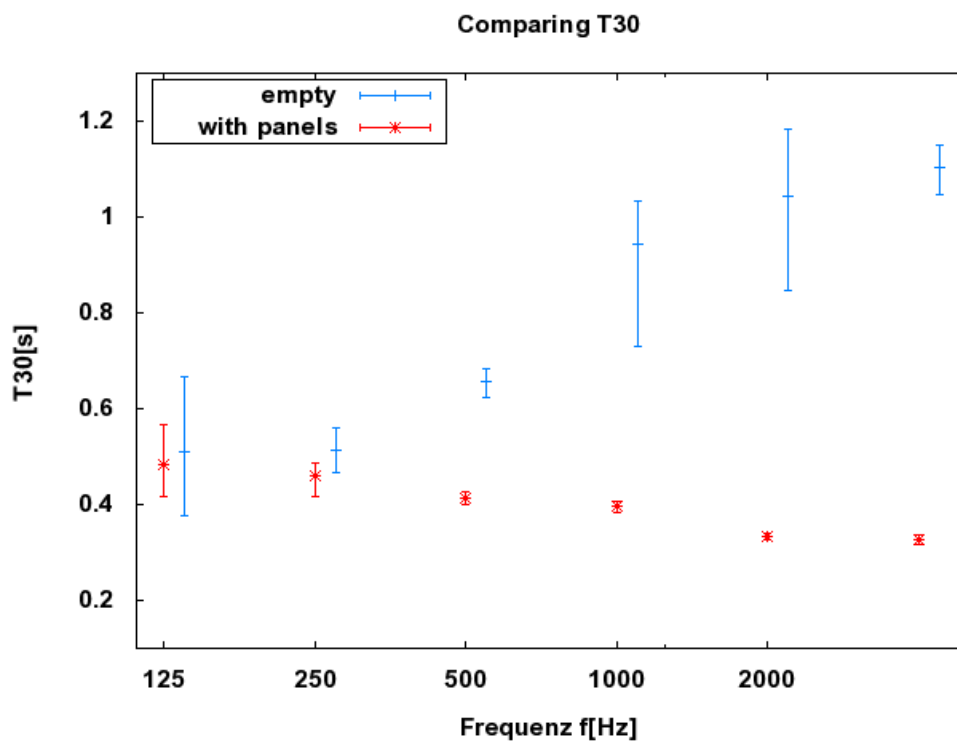


Bild 43: Vergleich der [frühen] (Anmerkung des Autors) Nachhallzeit mit und ohne Paneel (Bonwetsch, Ralph Baertschi, Silvan Oesterle 2008, S. 368)

Die zögerliche Beschäftigung mit der Integration der Akustik in den architektonischen Entwurfsprozess von Seiten der Akustiker hat vermutlich damit zu tun, dass der Entwurf keine wissenschaftliche Disziplin im eigentlichen Sinne ist und eine gewisse systematische Unsicherheit und Ungenauigkeit erfordert. Die Architekten ihrerseits haben Schwierigkeiten mit der Integration



der Akustik, da sie eine komplexe und sehr genaue Wissenschaft ist, die auf den ersten Blick nicht visuell begreifbar und unmittelbar verwertbar ist.

## 4.10. Zusammenfassung

### 4.10.1. Relevante akustische Größe und Wertebereiche

Interessant für die Formgebung sind vor allem die akustischen Größen, welche differenziert in Abhängigkeit zur Raumgeometrie stehen. Neben den Kenngrößen, die sich aus den frühen Einzelreflexion und deren Energieverhältnisse ergeben, sind aber auch die späteren diffusen Reflexionen und die sich daraus ergebenden Energieverhältnisse relevant. Die Tabelle 5 listet die relevanten akustischen Kenngrößen, die im Formfindungsalgorithmus zur Anwendung kommen, zusammenfassend auf.

Kenngröße	Symbol	Formel	Wertebereich (Konzert raum)	Einheit
Nachhallzeit (Reverberation Time)	$RT_{60}$	$RT_{60} = k * \frac{V}{4m * V - S * \ln(1-\alpha)}$	1,4 bis 2,0	s
Klarheitsmaß (Clarity)	$C_{80}$	$C_{80} = 10 \lg \frac{W_{0...80ms}}{W_{80ms...∞}} \text{ dB}$	-1 bis +3	dB
Frühe Nachhallzeit (Early Decay Time)	$RT_{10}$	$RT_{10} = 6 * T_{-10dB} - T_0 \text{ [s]}$	1,8 -2,3	s
Anfangszeit (Initial Time)	$T_i$		10-25 (20)	ms
Seitenschallgrad	LFC	$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} [p(t)]^2 \cos \theta dt}{\int_0^{80ms} [p(t)]^2 dt}$	25-40	%
Schwerpunktzeit	$T_s$	$TS = \frac{1}{W_{ges}} \int_0^{\infty} t * W(t) dt$	100 -150	ms
Echokriterium	EK	$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau}$	1,5-1,8	
Schallquellenverstärkung (sound strength)	G	$G = 10 \lg \frac{W_{ges}}{W_{ges(10m)}}$	4 – 5,5	dB

Tabelle 6: Relevante akustische Kenngrößen für den Formfindungsalgorithmus

Schalleigenschaften sind frequenzabhängig. Die Objektgröße architektonischer Elemente liegt teilweise im Bereich der Wellenlängen hörbaren Schalls. Das bedeutet, dass die Welleneigenschaften bei der Betrachtung prinzipiell relevant sind. Die aufgelisteten Kriterien sind sogenannte

Energiekriterien, bei deren Betrachtung man sich auf einen mittleren Frequenzbereich (1000Hz) beschränken kann (Fasold, Veres 2003, S. 149). Für die vorliegende Arbeit werden die Berechnungen ausschließlich auf die Frequenz 1kHz beschränkt.

#### **4.10.2. Analyse Methoden / Planungsmethoden**

Die beschriebenen Analyse und Planungsmethoden sind Expertensysteme, die ein erhebliches Fachwissen im Bereich der Akustik erfordern. Der Aufbau der Systeme spiegelt die allgemeine Planungsabfolge von vorgelagerter Primär- und nachgelagerter Sekundärstruktur wider. Die Methoden können hervorragend und zuverlässig die zu erwartende Akustik eines Raumes darstellen. Sie sind aber kaum in der Lage, den Entwerfer bei der konzeptionellen Formgebung der Räume zu unterstützen, da sie eher Werkzeuge zur Überprüfung der erreichten Eigenschaften sind als Entwurfswerkzeuge.<sup>35</sup>

#### **4.10.3. Geometrische Ableitungen**

Aus den Beobachtungen zur Streuung und Beugung lassen sich relevante Bauteil- oder Geometrie Größen ableiten, die für die akustische Ausprägung von Räumen relevant sind. Wenn der, in der Musik wahrgenommenen, Frequenzbereich als Grundlage voraussetzt wird, so ergeben sich relevante Geometrieabmessungen, die im Bereich von 3,4 cm bis 8,58 m liegen. Geometrieelemente, die sich unterhalb der unteren Grenze befinden, haben keinen Einfluss auf die betrachtete Akustik und können daher im Formgebungsalgorithmus vernachlässigt werden.

#### **4.10.4. Einschränkung numerischer Simulationen**

Numerische Simulationen der Raumakustik, wie andere Simulationen auch, sind immer abstrakte Modelle der Wirklichkeit. Das bedeutet, dass in den Modellen Vereinfachungen getroffen werden, um sie mit angemessenem

---

<sup>35</sup> Vgl. Formfindungswerkzeug Easy-Form Technet GmbH für Membrantragwerke. Das Modell integriert Verhalten von Material und Konstruktion und ermöglicht somit eine interaktive Formfindung unter impliziter Einhaltung der Kräftebalance von Zug und Druckelementen.

Aufwand berechenbar oder darstellbar zu machen. So beschränken sich raumakustischen Simulationen vor allem auf die energetische Betrachtung der Schallausbreitung zu Lasten der Welleneigenschaft des Schalls. Kontinuierliche Frequenzen werden vereinfacht zu diskreten Frequenzbereichen, den sogenannten Oktavbändern, zusammengefasst. Geometrie wird vereinfacht, indem konkav oder konvex gekrümmte Flächen durch gegliederte polygonale ebene Flächen dargestellt und berechnet werden. Die Berechnungstiefe ist begrenzt und berücksichtigt nicht alle auftretenden Reflexionen. Meist werden die frühen Reflexionen einzeln durch eine Strahlenverfolgung betrachtet und nachfolgende Reflexionen vereinfacht statistisch in Anrechnung gebracht. Durch die Bewegung des Musikers dynamische und durch die Richtcharakteristik eines Instruments differenzierte Schallquellen werden stark vereinfacht durch statische kugelförmige Schallenergiequelle dargestellt.

Durch die Verwendung der numerischen Simulationen in einem Formgebungsalgorithmus, übertragen sich die beschriebenen Einschränkungen auf diesen vollständig. Daraus folgt, dass den entwickelten Raumkonzeptionen die Schwächen und Einschränkungen der verwendeten Simulation inhärent sind. Anschaulich dargestellt, heißt dies, wenn die Simulation auf Grund seiner Vereinfachungen kein Flatterecho berechnen und darstellen kann, so kann auch für die, mit Hilfe dieser Simulation gefundene Raumkonzeption, nicht erwartet werden, dass kein Flatterecho auftreten wird. Die entwickelten Raumkonzepte sind also höchstens so gut und präzise wie die verwendeten Simulationen.

## **5. Evolutionäre Algorithmen**

### **5.1. Algorithmen**

Der Begriff Algorithmus beschreibt im Grunde einen relativ simplen Vorgang, nämlich lediglich ein sequenzielles Vorgehen, bei dem eine definierte Eingabe in eine definierte Ausgabe umgewandelt wird. Dabei besteht sowohl die Eingabe als auch die Ausgabe aus mindestens einem Wert. Eingabe oder Ausgabe können jedoch auch aus mehreren Werten bestehen. Die Werte können im Prinzip aus beliebigen Symbolen oder Zeichen oder deren

Kombination bestehen. Ein korrekter Algorithmus ist immer eine eindeutige und vollständige Beschreibung der auszuführenden Umwandlung. Das bedeutet, dass der Algorithmus für jeden Eingabesatz mit einem eindeutigen Ausgabesatz terminiert. Wenn Algorithmen gar nicht oder mit falschen Ausgaben terminieren, werden sie als inkorrekt bezeichnet. Doch inkorrekte Algorithmen sind keines Falls nutzlos, auch sie können unter Umständen durch die Dokumentation und Interpretation ihrer Fehlerausgaben sinnvoll eingesetzt werden. Korrekte Algorithmen sollten aber den unkorrekten vorgezogen werden.

Für korrekte Algorithmen lassen sich, in Anlehnung an die Definition des Mathematikers Turing, folgende Eigenschaften festlegen (Cormen u. a. 2007):

- Finitheit: die Rechenvorschrift muss durch einen endlichen Text beschreibbar sein.
- Ausführbarkeit: Jeder einzelne Schritt der Rechenvorschrift muss tatsächlich ausführbar sein.
- Dynamische Finitheit: die Rechenvorschrift darf zu jedem Zeitpunkt nur endlich viel Speicherplatz benötigen.
- Terminierung: die Rechenvorschrift darf nur endlich viele Schritte für die Lösung benötigen.

Dabei beschränken sich Algorithmen nicht nur auf die Verwendung als Computerprogramme. Algorithmen sind auch denkbar, als Beschreibung in einer natürlichen Sprache, oder als Hardwareentwurf. In diesem Sinne können auch, wie oben schon beschrieben, die Formfindungsmethoden, die am Institut für Leichte Flächentragwerke unter Leitung von Frei Otto (Otto 1988) entwickelt wurden, als analoge Formfindungsalgorithmen betrachtet werden. Dieser Algorithmus kann als korrekter Algorithmus bezeichnet werden, da für dieselbe Eingabe (Drahtschleife) immer genau dieselbe Ausgabe (Seifenhaut) zu erwarten ist, vorausgesetzt die Seifenhaut hält.

## **5.2. Natürliche Evolution**

Der Begriff der Evolution entstammt aus der Biologie und beschreibt die Entstehung von Gestalt durch Selektions-, Mutations- und

Reproduktionsmechanismen. Die Individuen einer Generation sind, aufgrund individueller Eigenschaften, mehr oder weniger in Lage, sich erfolgreich zu reproduzieren. Beim Erzeugen von Nachkommen werden Merkmale der Elterngeneration nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten an die Kindergeneration weiter vererbt. Bei der Weitergabe des Erbguts an die Nachkommen kommt es zu Veränderungen des genetischen Codes. Diese sogenannten Mutationen sind einer der Hauptoperatoren der Evolution; also der Entwicklung der Individuen. Ein weiterer Operator ist die Rekombination. Durch die geschlechtliche Vermehrung werden Genome zweier Elternteile neu zusammengesetzt. Dadurch entsteht ein neues Genom. Genaugenommen ist dieser Vorgang kein Evolutionsoperator, da keine Veränderung der eigentlichen genetischen Information stattfindet, sondern lediglich eine veränderte Zusammensetzung vorhandener Elemente von statten geht. Da durch das Zusammenspiel von Mutation und Rekombination neue Gensequenzen und damit neue Individuen mit unterschiedlichen Genomen entstehen, wird auch die Rekombination zu den Evolutionsoperatoren gezählt. Neben den Operatoren spielt auch die Selektion, der an der Evolution beteiligten Individuen, eine entscheidende Rolle. Die biologische Selektion, der an einer Fortpflanzung beteiligten Eltern, ist ein überaus komplexer Vorgang, der noch nicht vollständig verstanden ist. Wichtige Auswahlkriterien für potentielle Eltern sind die Fortpflanzungsfähigkeit und die Überlebensfähigkeit des jeweiligen Individuums. Aber auch die Umgebung und die sich daraus ergebenden Lebensumstände, in der sich die Population befindet, spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle im natürlichen evolutionären Prozess. Die Beeinflussung der Evolution durch Umwelteinflüsse und konkurrierende Arten im gleichen Lebensraum wird als Koevolution bezeichnet. Wobei es zwei unterschiedliche Auffassungen über den Mechanismus der Beeinflussung gibt. Die Baldwin'sche Theorie geht davon aus, dass der Einfluss der Umwelt und des daraus Lernens sich direkt in der Veränderung der Gene auswirkt. Diese Theorie ist in der biologischen Fachwelt weitestgehend von der Lamarck'schen Theorie abgelöst. Diese sieht den Einfluss der Umwelt und des Lernens im Verhalten der Art und im Besonderen im Fortpflanzungsverhalten. Durch das

veränderte Fortpflanzungsverhalten wird ein indirekter Einfluss auf das Genom ausgeübt.

Die biologische Evolution ist im eigentlichen Sinne nicht zielgerichtet. D.h. die Natur versucht nicht, Individuen zu erschaffen, die möglichst gut schwimmen oder möglichst gut fliegen können. Die Fähigkeiten des Schwimmens oder Fliegens dienen ausschließlich dem eigentlichen Ziel, sich möglichst erfolgreich zu reproduzieren. Dabei kann erfolgreich bedeuten, sich möglichst oft in kurzer Zeit zu reproduzieren; ein anderes Modell kann darin bestehen, sich nicht so häufig dafür aber möglichst robust zu reproduzieren. Die natürliche Evolution ist überaus komplex und wir sind noch weit davon entfernt, sie in ihrer Ganzheit zu verstehen. Dennoch gibt es seit den 1950 Jahren Ansätze, die Mechanismen der Evolution mit denen der Rechneralgorithmen für Problemlösungen in der Technik, Wirtschaft oder Mathematik zu kombinieren und einzusetzen.<sup>36</sup>

### **5.3. Simulierte Evolution**

Die simulierte Evolution unternimmt nicht den Versuch, die biologische Evolution in ihrer gesamten Komplexität abzubilden oder anzunähern, sondern entlehnt sich Konzepte und Prinzipien, um spezifische Probleme effizient zu lösen. In der technischen Anwendung von Evolution wird der überaus komplexe und bisher nicht in Gänze durchdrungene Vorgang der Selektion durch die Verwendung einer Bewertungsfunktion abgebildet. In der Bewertungsfunktion findet eine präzise und eindeutige Bewertung eines Individuums statt. Diese Eindeutigkeit ist für die algorithmische Ausführbarkeit unverzichtbar, in der Natur so aber, nicht anzutreffen. Sie stellt somit eine erste Vereinfachung gegenüber dem natürlichen Vorbild dar. Darüber hinaus kann die natürliche Evolution nicht als zielgerichtet betrachtet werden. Die simulierte technische Evolution will aber selbstverständlich zielgerichtete Lösungen erarbeiten. Auch hier besteht eine Abweichung zum natürlichen Vorbild.

---

<sup>36</sup> Eine ausführliche Beschreibung der natürlichen Evolution mit Bezug zu evolutionären Algorithmen findet sich bei Weicker 2007

#### 5.4. Allgemeiner evolutionärer Algorithmus (EA)

Es gibt vielfältige Ausprägungen evolutionärer Algorithmen. Im Folgenden werden grundlegende Konzepte und Begriffe, die unter der Beschreibung evolutionären Algorithmen subsumiert werden und für die vorliegende Arbeit relevant sind, näher erläutert.

Grundsätzlich kann ein evolutionärer Algorithmus wie folgt dargestellt werden.<sup>37</sup>

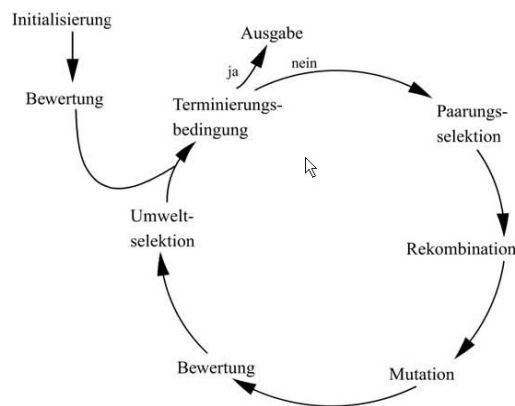


Bild 44: Allgemeine Darstellung eines evolutionären Algorithmus (Weicker 2007, S. 25)

Der Algorithmus wird durch die Erzeugung einer Ausgangspopulation initialisiert. Die Ausgangspopulation wird meist zufällig erzeugt, kann aber auch durch eine nichtzufällige Auswahl von Individuen gebildet werden. Die Individuen dieser Population werden einer Bewertung unterzogen. Wie in den Anforderungen an einen korrekten Algorithmus bereits definiert, muss der Algorithmus terminiert sein. Es muss also eine eindeutige Bedingung geben, die den Algorithmus beendet. Zum einen kann ein bestimmter Qualitätswert eines Individuums zur Terminierung des Algorithmus führen, oder eine im Voraus festgelegte Anzahl an Zyklen. Dies ist dann sinnvoll, wenn z.B. die Dimension eines möglichen Qualitätswertes nicht bekannt ist. Falls die Terminierungsbedingung schon bei der Erzeugung der Initialpopulation erfüllt ist, würde der Algorithmus beendet sein und eine entsprechende Ausgabe

<sup>37</sup> Vgl. Weise 26.06.2009, S. 96, Gerdes, Klawonn, Kruse 2004, S. 2–3, Bentley, Corne 2002, S. 6–9

erfolgen. Ist dies nicht der Fall, also entspricht keines der Individuen der Initialpopulation den Anforderungen, welche in der Bewertungsfunktion definiert sind, beginnt der eigentliche evolutionäre Optimierungszyklus. Aus der bestehenden Population werden nun potentielle Eltern gewählt. Die Anzahl der ausgewählten Eltern und die Art und Weise der Auswahl kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die selektierten Eltern werden sich anschließend paaren. Diese Paarung erfolgt durch eine Rekombination der Elternteile. D.h. von den erfolgreichen, ausgewählten Eltern entstehen Nachkommen, die jeweils aus Elementen der erfolgreichen Eltern bestehen. Anschließend werden die Individuen der neu entstanden Population einer Mutation unterzogen. Im Mutationsprozess werden Individuen einer definierten Manipulation unterzogen. Durch diese Manipulation wird es möglich neue Bereiche des Suchraumes zu erforschen. Denn nur durch die Rekombination, der in der Initialpopulation vorhandenen Elemente, wäre die Suche auf die initialen Elemente begrenzt. Mit der Mutation ist nun eine neue Generation von Individuen entstanden, die einer erneuten Bewertung unterzogen werden können. Jedem Individuum wird anhand der Bewertungsfunktion ein Qualitätswert zugewiesen. Anhand dieses Wertes erfolgt eine Umweltselektion, welche aus der bestehenden Population eine bestimmte Anzahl von Individuen auswählt, welche die aktuelle Generation bilden und Grundlage für die nächste Generation sein werden. Die Individuen der aktuellen Generation werden nun erneut auf die Erfüllung der Terminierungsbedingung untersucht. Der Zyklus der evolutionären Optimierung beginnt von vorne. Nicht alle evolutionären Standardalgorithmen verwenden alle dargestellten Elemente. So gibt es beispielsweise Algorithmen, die ohne Rekombination oder ohne Mutation auskommen.

### **5.1. Evolutionäre Strategie**

Die Evolutionäre Strategie kann als eine Sonderform des evolutionären Algorithmus angesehen werden. Die Grundform einer einfachen evolutionären Strategie besteht aus einer Population der Größe 1. Es ist ersichtlich, dass an dieser Stelle eine Rekombination keinen Sinn machen würde. Daher wird das Individuum kopiert und einer Mutation unterzogen. Nun besteht die Population



aus der Anzahl der Eltern ( $\mu$ ) plus der Anzahl der Nachkommen ( $\lambda$ ); in diesem speziellen Fall aus 2 Individuen. Dieser Algorithmus wird daher als  $(\mu+\lambda)$ -ES bezeichnet. Bei der elitären evolutionären Strategie wird nun in der Umweltselektion das besser bewertete Individuum überleben und auf die Einhaltung der Terminierungsbedingung überprüft. Wird diese nicht erfüllt, erfolgt wieder das Kopieren des Individuums, die Mutation und die Auswahl anhand des Qualitätswertes. Grundlage für die Entstehung unterschiedlicher Individuen ist die Variabilität oder Zufälligkeit der Mutation. Die Mutation findet entweder an unterschiedlichen Stellen des Individuums oder mit unterschiedlichen Schrittweiten oder mit einer Kombination beider statt. Anhand der simplen elitären evolutionären Strategie werden die grundsätzlichen Schwierigkeiten deutlich. Durch die geringe Populationsgröße erfolgt die Suche sehr spezialisiert an einer oder falls die Populationsgröße größer 1 ist, an ein paar wenigen Stellen. Die Schrittweite der Suche ist durch die Mutationsschrittweite definiert. Ist innerhalb der Schrittweite keine Verbesserung in der Bewertung möglich, so stagniert der Algorithmus, da immer das Elter gegenüber dem Nachkommen bevorzugt wird. Ist die Mutationsschrittweite sehr klein, so werden relativ viele Generationen benötigt, bis eine signifikante Verbesserung der Qualität eintritt.

### **5.1. Genetischer Algorithmus**

Der genetische Algorithmus wird als eine robuste Form der evolutionären Algorithmen angesehen. Das bedeutet, dass er selbst dann brauchbare Ergebnisse liefert, wenn die Implementierung und Verwendung nicht ganz ideal ist. Daher ist der genetische Algorithmus weit verbreitet und wird für viele Probleme eingesetzt, auch wenn er vielleicht nicht der geeignetste ist. (Bentley, Corne 2002, S. 11) Grundlegendes Merkmal des genetischen Algorithmus ist die Differenzierung in einen Suchraum und einen Ergebnisraum. Der Ergebnisraum ist dabei die phänotypische Entsprechung oder Abbildung des Suchraums. Im Suchraum befinden sich die durch einen genetischen Code repräsentierten Individuen. Die Evolutionsoperatoren werden auf den Suchraum, also die Genotypen angewendet. Die Bewertung der Qualität und die darauf aufbauende Selektion werden an den Phänotypen des

Ergebnisraums vorgenommen. Der Suchraum und der Ergebnisraum stehen durch eine Transformationsfunktion in Verbindung, die aus jedem Genotyp, anhand des genetischen Codes, einen entsprechenden Phänotyp erzeugt oder zuordnet. Der Vorteil besteht darin, dass im Suchraum die Eigenschaften der Individuen abstrakt dargestellt werden können und somit auch die Evolutionsoperatoren auf abstrakter Ebene angewendet werden können. Im genetischen Code können einzelne oder mehrere Gene ausgetauscht, ersetzt mutiert werden, ohne dass dabei auf die „Anschlussstelle“ geachtet werden müsste, denn durch die Anwendung des Transformationsalgorithmus werden die neuen Gene in den Phänotypen integriert.

## **5.2. Elemente des evolutionären Algorithmus**

### **5.2.1. Population / Populationsgröße**

Eine Population wird aus den Individuen einer Generation gebildet, wobei die Anzahl der Individuen die Populationsgröße bestimmen. Das Konzept der Population wurde entwickelt, um einen Lösungsraum effizienter absuchen zu können. Jedes Individuum einer Population repräsentiert einen möglichen Suchpunkt innerhalb des Lösungsraumes. D.h. durch das Populationskonzept wird gleichzeitig an mehreren Stellen nach Lösungen gesucht. Darüber hinaus wird es möglich, innerhalb von Populationen Individuen zu vergleichen und durch Rekombination mit einander zu kombinieren. Die Mindestgröße einer Population ist 1 und stellt damit die Sonderform einer evolutionären Strategie dar. Die maximale Größe einer Population ist im Prinzip nur durch die Rechenleistung begrenzt; muss aber eine endliche Zahl sein, um der Anforderung der Finitheit zu genügen.

### **5.2.2. Bewertung oder Güte**

Die Güte ( $q$ ) eines Individuums wird durch eine Bewertungs- oder Gütefunktion ( $Q$ ) berechnet. Diese Funktion muss so beschaffen sein, dass für jedes Individuum ein eindeutiger Gütewert oder Qualitätswert ermittelt werden kann. Häufig wird der Güte oder Qualitätswert mit dem Begriff Fitness gleichgesetzt. Bei präziser Betrachtung ist dies nicht korrekt, da die Güte eines Individuums nicht zwangsläufig der Fitness entspricht. Da aber die Fitness meist Gütewert-

proportional bestimmt wird meint die Bezeichnung meist dasselbe, obwohl sie begrifflich unscharf ist.<sup>38</sup>

### 5.2.3. Selektionswert oder Fitnesswert

Durch den Selektionswert kann die Selektion gemessen werden. Der Selektionswert ist eine relative Größe, die sich auf das aktuelle Umfeld bezieht. Die Selektion wird also nicht absolut gemessen, sondern relativ. Der relative Selektionswert eines Individuums berechnet sich als Verhältnis der überlebenden Nachkommen zur Anzahl der Nachkommen des Individuums mit den meisten Nachkommen. Formal:

$$F(I) = \frac{\text{Anzahl Nachkommen (I)}}{\text{Anzahl Nachkommen(I')}}$$

F(I): Selektionswert des Individuums I

I': Individuum mit den meisten Nachkommen

Die Fitness oder der Selektionswert bezieht sich also, im Gegensatz zur Güte, nicht ausschließlich auf die Qualität eines Individuums, sondern auf alle Kriterien, die die Wahrscheinlichkeit für zur weiteren Fortpflanzung beeinflussen. Die Fitness beschreibt also das Fortpflanzungspotenzial.

### 5.2.4. Selektionsdruck

Um innerhalb einer Population eine gerichtete Auswahl treffen zu können, wird anhand von Auswahlkriterien ein Selektionsdruck erzeugt. Je höher der Selektionsdruck, desto schwerer ist es für Individuen im Rahmen einer Selektion, ausgewählt zu werden, sprich zu überleben. Durch eine zufällige Auswahl, beispielsweise, wird kein Selektionsdruck erzeugt, da eine Auswahl für alle Individuen gleichwahrscheinlich ist, wohingegen durch die Ersetzung des schlechtesten Individuums einer Population ein Selektionsdruck erzeugt wird; wenn dieser auch relativ gering ist.

---

<sup>38</sup> Weicker 2002

### **5.2.5. Elitäre Selektion / Trunkierungsselektion**

Die elitäre Selektion ist ein sehr einfaches Selektionsprinzip. Nur die Elite einer Population, also nur die Individuen mit den besten Evaluationswerten, wird der Reihe nach ausgewählt. Die elitäre Selektion birgt die Gefahr der Monotonisierung der Population. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die besten Individuen innerhalb einer Population wenig unterscheiden ist relativ groß, was eben eine schnelle Fokussierung des Algorithmus auf einen Ergebnistyp bewirken kann. Die Gefahr der frühzeitigen Konvergenz ist bei der Eliteselektion relativ groß.

### **5.2.6. Fitnessproportionale Selektion / Roulette-Selektion**

Die fitnessproportionale Selektion zeichnet sich dadurch aus, dass entsprechend dem Evaluationswert jedem Individuum eine Auswahlwahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Dadurch werden gut bewertete Individuen bevorzugt ausgewählt, aber auch für schlechter bewertete Individuen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, als Elter ausgewählt zu werden, da auch ein Ereignis mit geringer Wahrscheinlichkeit eintreffen kann. Dies führt in der Regel zu einer erhöhten Diversität der Population und dadurch meist zu besseren Ergebnissen.

### **5.2.7. Turnierselektion**

Bei der Turnierselektion werden zufällig zwei Individuen aus der Population ausgewählt, und sozusagen in einem Turnier, das Bessere der beiden für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Schwache, wie auch starke Individuen haben gleichermaßen die Möglichkeit der Selektion, wobei aber die Gefahr besteht, dass relative schwache Individuen überleben, weil sie sich mit noch Schwächeren messen und relativ starke Individuen ausgesondert werden, weil sie sich mit noch Stärkeren messen müssen.

### **5.2.8. Stochastic universal sampling Selektion nach J. Baker**

Die SUS-Methode ist eine Weiterentwicklung der fitnessproportionalen Selektion. Die Gesamtfitness der Population wird durch die Anzahl der Individuen dividiert. Zufällig wird nun ein Wert zwischen 0 und diesem Quotienten, der das Auswahlintervall und zugleich den Startpunkt repräsentiert,

ausgewählt. Ausgehend vom Startpunkt, wird nun das Intervall aufaddiert, das Individuum mit der entsprechenden Fitness ausgewählt, solange bis die gewünschte Anzahl von Individuen erreicht ist. Diese Methode ist effizienter, da nur einmal eine Zufallszahl gezogen werden muss und damit alle notwendigen Individuen ausgewählt sind. Außerdem wird dadurch das statistische Rauschen beim Ziehen der Zufallszahl minimiert.

### **5.2.9. Paarungsselektion oder Elternselektion**

Die Elternselektion hat die Aufgabe, die Eltern für die Reproduktion der Kindindividuen zusammen zu stellen. Um die Aufwand für die Verwaltung großer Populationen zu rechtfertigen, sollten bei der Elternselektion alle Individuen die Möglichkeit besitzen Elter zu werden.

### **5.2.10. Umweltselektion**

Die Umweltselektion hat die Aufgabe, aus den vorhandenen Individuen (Eltern und Kinder) eine neue Elternpopulation für den neuen Zyklus zusammen zu stellen. Dabei können entweder die Kinder die Eltern komplett ersetzen, vorausgesetzt es wurden genügen Kinder erzeugt. Dann handelt es sich um eine sogenannte Komma-Selektion  $(\mu, \lambda)$ . Oder aber es wird nur ein Teil der Elternpopulation durch die Kinder ersetzt. Dann spricht man von einer Plus-Selektion  $(\mu + \lambda)$ , beziehungsweise von einer überlappenden Population.

### **5.2.11. Mutation**

Die Mutation ist der wichtigste Evolutionsfaktor. Bei der Erzeugung der Kindgeneration, entweder durch Rekombination oder durch einfaches Reproduzieren, werden einzelne Individuen verändert, also mutiert. Diese Veränderung kann zufällig erfolgen oder bei einer gerichteten Mutation auch an bestimmte Bedingungen geknüpft werden. Die Art und Weise der Mutation muss nicht über den gesamten Evolutionsprozess konstant gehalten werden. Moderne Evolutionssysteme versuchen, die Mutation in Schrittweite und Richtung innerhalb des Prozesses dynamisch anzupassen. Die Mutation kann man sich bildlich, als die Suchschritte auf der Ergebnislandschaft vorstellen. Wenn man also die Ergebnislandschaft kennt, bzw. aufgrund von bekannten Ergebnissen interpretieren kann, so kann man die Schrittweiten und die

Suchrichtung je nach den zu erwartenden Erfolgsaussichten anpassen. Wenn aber die Ergebnislandschaft nicht ausreichend bekannt ist, es also schwierig ist, abzuschätzen welche Veränderung des Individuums ein besseres Ergebnis erwarten lässt, dann ist eine zufällige Mutation das Mittel der Wahl. Die Schrittweiten der Mutation sind ein wichtiger Faktor in Bezug auf die Erfolgsaussichten des Gesamtalgorithmus. Die Mutationsschrittweite muss, im Verhältnis zur Ergebnislandschaft, groß genug sein, um eine ausreichende Fläche absuchen zu können, muss aber auf der anderen Seite klein genug sein, um den Ergebnisraum differenziert genug abtasten zu können. Durch die Mutationshäufigkeit oder Mutationswahrscheinlichkeit wird die Anzahl der zu mutierenden Individuen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Individuen bestimmt.

### **5.2.12. Rekombination**

Bei der Rekombination werden unterschiedliche Teile unterschiedlicher Individuen mit einander kombiniert. Dadurch entstehen neue Individuen, die die DNA aus an der Rekombination beteiligter Eltern beinhalten. Es gibt unterschiedliche Arten von Rekombination.

Bei der Crossover-Rekombination werden die Eltern an einer bestimmten Stelle der DNA geschnitten und dann die jeweiligen Teile überkreuz mit einander getauscht. Bei einer Ein-Punkt-Crossover-Rekombination werden die DNA-Stränge an einer Stelle aufgetrennt, bei einer Mehrpunkt-Crossover-Rekombination entsprechend an mehreren Stellen. Entsprechend können an einer Mehrpunkt-Crossover-Rekombination auch entsprechend mehrere Eltern teilnehmen. Die Crossover-Rekombination lässt sich sowohl auf binär-codierte Individuen, wie auch auf reell-codierte Individuen anwenden.

Die Rekombination ist streng genommen kein Evolutionsfaktor, da sich die einzelnen Bestandteile der DNA eigentlich nicht ändern, wie dies bei der Mutation der Fall ist. Sie ist geeignet, um lokale Minima oder Maxima zu überwinden und die Varianz der Individuen ausreichend hoch zu halten, da eine Rekombination meist eine relativ große Veränderung des Individuums bewirkt.

Darüber hinaus zeigt das folgende Schema, dass die Rekombination nicht ganz unproblematisch ist, was die Genomlänge der unterschiedlichen Individuen

betrifft. Wenn in einer Population unterschiedlich lange Genome möglich sind, ist es notwendig die Rekombinationsmöglichkeiten entweder auf eine 1 Punkt Rekombination einzuschränken, oder geeignete Maßnahmen zu finden, die die Gültigkeit der Rekombinationsergebnisse sichert.

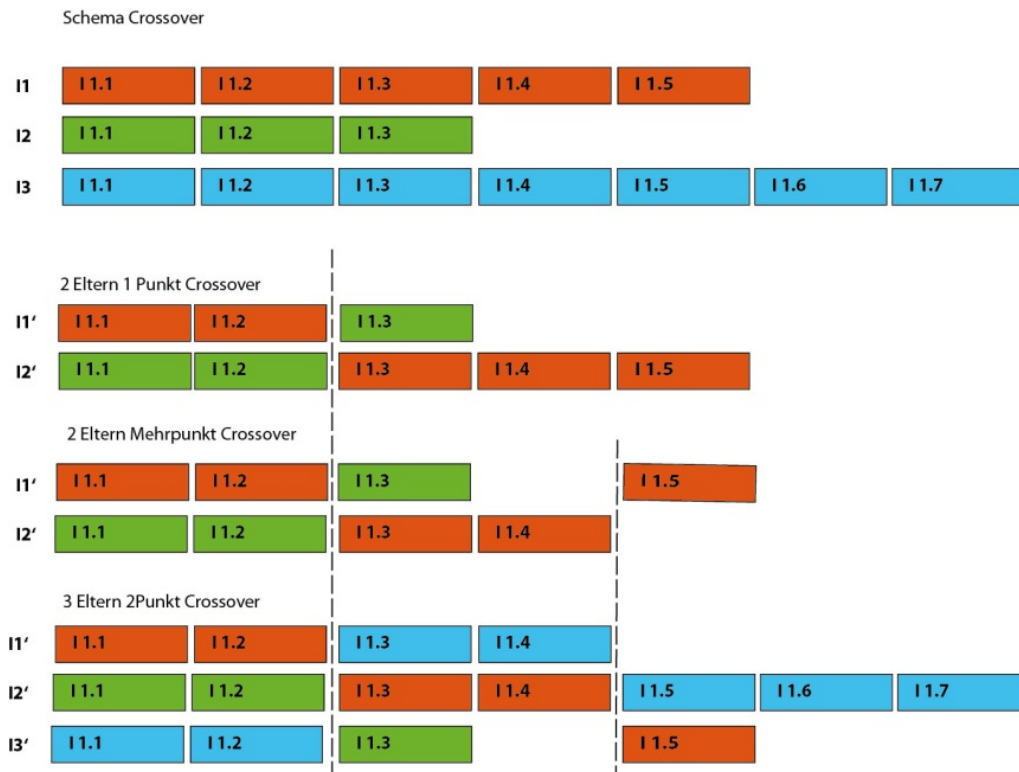


Bild 45: Schemata unterschiedlicher Crossover-Rekombinationen

### 5.3. Nebenbedingungen

Nebenbedingungen können formuliert werden, um den Suchraum stärker einzugrenzen und oder, um die formale Finitheit eines Algorithmus, zu gewährleisten. Sie sind also, im engeren Sinne, nicht teil der Optimierung, sondern stellen Grundbedingungen dar, die von den Individuen generell zu erfüllen sind. Darüber hinaus ist es sinnvoll, verfahrenstechnische Nebenbedingungen zu formulieren, die den Ablauf des Algorithmus insgesamt störungsfrei halten. Prinzipiell werden Nebenbedingungen auf zwei unterschiedliche Art und Weisen behandelt. Entweder werden Individuen, die einer oder mehreren Nebenbedingungen nicht genügen aussortiert oder sie können, trotz des Verstoßes gegen Nebenbedingungen, in der Population überleben, werden aber differenziert behandelt.

### **5.3.1. Behandlung von Nebenbedingungen als Letalmutation**

Wird von einem Individuum eine Nebenbedingung nicht erfüllt, so wird das entsprechende Individuum so lange verändert, bis es gültig ist, oder es wird aussortiert und durch ein neues Gültiges ersetzt. Der Einsatz von Letalmutationen birgt die Gefahr der frühzeitigen Konvergenz des evolutionären Algorithmus (Petzold 1998, S. 123) Das Ersetzen kann durch Erzeugen eines zufällig neuen Individuums erfolgen, oder durch die Manipulation des ungültigen, durch geeignete Maßnahmen, bis es sich im gültigen Bereich befindet. Für geeignete Maßnahmen ist die möglichst genaue Kenntnis der Grenze zwischen gültigen und ungültigen Bereich von großer Bedeutung. Dies stellt zugleich aber auch die größte Herausforderung dar. Daher werden Letalmutationen im vorliegenden Algorithmus nur eingesetzt wo die Einhaltung der Nebenbedingung unverzichtbar für die Durchführung der Analysealgorithmen ist.

### **5.3.2. Tolerante Behandlung von Nebenbedingungen**

Wenn Individuen zwar prinzipiell, also in dem Sinne, dass sie den Algorithmus durchlaufen können, gültig sind, aber bestimmte Nebenbedingungen wie z.B. eine Mindestgröße nicht erfüllen, so haben sie durch die Anwendung toleranter Selektionsmethoden die Möglichkeit, sich innerhalb der Population entwickeln zu können. Individuen werden der normalen Bewertungsfunktion unterzogen. Zusätzlich werden sie aber entsprechend den Verstößen gegen die Nebenbedingungen markiert. Die Anzahl und Schwere der Verstöße kann als weiteres Selektionsmerkmal verwendet werden. Dadurch ist gewährleistet, dass Individuen, die Nebenbedingungen verfehlen, erkannt werden können und sich die Population nicht nur aus Individuen zusammensetzt, die die geforderten Nebenbedingungen nicht erfüllen.

### **5.3.3. Behandlung von Nebenbedingungen in der Zielfunktion**

Häufig werden Nebenbedingungen durch eine sogenannte Straffunktion behandelt. Dabei werden Individuen, die Nebenbedingungen nicht erfüllen, durch einen Malus bei der Bewertung belegt. Dadurch können Individuen, die Nebenbedingungen nicht erfüllen, zwar überleben, haben aber durch die schlechtere Bewertung eine geringere Chance bei der Selektion. Individuen, die



die Nebenbedingung bereits nicht erfüllen, werden durch eine sogenannte äußere Straffunktion behandelt. Individuen, die zwar noch innerhalb des gültigen Bereiches sind, sich aber auf die Gültigkeitsgrenze zu bewegen, werden durch eine sogenannte innere Straffunktion behandelt. Für die Verwendung der inneren Straffunktion muss natürlich die Grenze der Nebenbedingung möglichst genau bekannt sein, um eine Straffunktion sinnvoll einsetzen zu können.

Die Straffunktion kann sich zum einen nur auf das entsprechende Kriterium in der Bewertungsfunktion beziehen, oder kann einen Gesamtergebniswert für die Bewertungsfunktion bestimmen. Die Gefahr bei der Zuweisung eines Gesamtergebniswertes, besteht darin, dass dieser willkürlich zu wählen ist, sich aber in der Größenordnung der aktuellen Population befinden sollte, da ansonsten die Straffunktion das Selektionsergebnis außerordentlich stark beeinflusst: entweder durch eine extreme Bevorzugung oder durch eine extreme Diskriminierung.

#### **5.4. Interaktion und Kontrolle**

Computersysteme oder evolutionäre Algorithmen verfolgen per se keine Absichten. Sie haben keinen Gestaltungswillen, der sie veranlassen würde Gestalt zu erzeugen. (Bentley, Corne 2002, S. 56) Programme führen Arbeitsanweisungen aus. Sie agieren nach vorgegebenen Algorithmen und reagieren auf Eingaben von außen. Anlass für Aktionen eines Algorithmus sind Gestaltungsabsichten von Menschen. Diese Gestaltungsabsichten finden per Benutzerschnittstellen Eingang in den Algorithmus. Der Benutzer definiert eine Ausgangssituation und entsprechende Rahmenbedingungen, unter denen der Algorithmus abläuft. Dabei kann der Zeitpunkt dieses Eingreifens sehr unterschiedlich sein. Manche Systeme erlauben ein Eingreifen während der Laufzeit des Programms, andere wiederum verlangen vom Benutzer, dass er seine Vorgaben, Parameter und Bedingungen vor Beginn des eigentlichen Programmablaufes festlegt. Kombinationen aus beiden Methoden sind selbstverständlich auch denkbar. Häufig wird dieses Eingreifen durch einen Benutzer oder einer Benutzerin als Interaktion mit dem System bezeichnet. Wenn man den Begriff Interaktion aber aus dem Blickwinkel der Kybernetik

betrachtet, so ist zwischen Interaktion und Kontrolle oder Eingreifen zu unterscheiden. Im kybernetischen Sinne ist eine Interaktion dann gegeben, wenn die Elemente eines Systems nicht mehr danach zu unterscheiden sind, ob sie kontrollieren oder kontrolliert werden, bzw. beides tun: jedes Element übt in gleicher Weise Kontrolle aus, wie es auch von anderen Elementen kontrolliert wird. Dies ist dann der Fall, wenn z.B. zwei Elemente eines Systems die gleiche Diversität besitzen. Gleiche Diversität zwischen den Elementen besteht dann, wenn die Anzahl der möglichen Zustände der Elemente und die Anzahl der Aktionsmöglichkeiten übereinstimmen. Ein beliebtes Beispiel für die Darstellung dieses Zusammenhanges ist die Interaktion innerhalb eines Thermostat-Heizungssystems. Gegeben sind ein System aus einem Heizkörper und ein Thermostat. Der Heizkörper hat genau zwei Zustände: Heizen oder nicht Heizen. Das Thermostat hat ebenfalls zwei Zustände: Temperatur größer-gleich Zielwert oder Temperatur kleiner Zielwert. Die Zustände sind nun miteinander zu einem System verbunden und zwar in der Form, dass wenn die Temperatur gleich oder größer der Zieltemperatur liegt das Thermostat den Heizkörper anweist, nicht mehr zu heizen. Liegt die Temperatur unterhalb der Zieltemperatur, so weist das Thermostat den Heizkörper an, zu heizen. Genauso gut kann das System aber auch in der anderen Richtung betrachtet werden. Nämlich in der Form, dass der Heizkörper durch das Heizen oder nicht Heizen das Thermostat kontrolliert. Das System ist symmetrisch und ist zirkulär. Die Elemente des Systems beeinflussen sich gegenseitig; sie interagieren. Schließt das Thermostat, weil die Heizung den Raum erwärmt hat oder erwärmt die Heizung den Raum weil das Thermostat geöffnet ist? Wenn die möglichen Zustände der Systemelemente nicht übereinstimmen, also kein symmetrisches System vorliegt, so herrscht entweder Chaos, weil ein Element mit den vielen Zuständen des anderen Elements nichts anfangen kann und somit beliebig reagiert, oder das Element mit den vielen Zuständen wird durch das mit den wenigen Zuständen dominiert und kontrolliert.

#### **5.4.1. Interaktion durch Evaluationskriterien**

Interaktion innerhalb eines Systems kann erreicht werden, wenn die möglichen Zustände der Elemente in ihrer Zahl übereinstimmen, bzw. wenn die Aktionen

und Reaktionen eindeutig definiert sind und ein zirkulärer Bezug zwischen den Elementen besteht. Durch die Vorgabe von Evaluationskriterien zu Beginn des evolutionären Prozesses, werden diese integrativer Bestandteil des Systems. Ihre möglichen Zustände sind bekannt und sind Teil des Systems. Während des evolutionären Prozesses, werden die Zustände der Evaluationskriterien durch den Erzeugungsalgorithmus beeinflusst und vice versa der Zustand des Erzeugungsalgorithmus wird durch die Zustände der Evaluationskriterien beeinflusst. Es entsteht eine Interaktion im kybernetischen Sinne.

#### **5.4.2. Kontrolle durch Auswahl**

Im Alltagsverständnis wird der Begriff Interaktion häufig mit dem manuellen Eingreifen in einen Prozess, zum Beispiel durch Auswahl von geeigneten Individuen, verwendet. Im kybernetischen Verständnis aber müsste hier eher von Kontrolle oder von Chaos die Rede sein. Denn es ist nicht zu erwarten, dass die Systeme in der Anzahl der möglichen Zustände übereinstimmen. Trotzdem kann durch das mehr oder weniger intuitive manuelle Auswählen von Individuen durch einen Benutzer Einfluss auf ein System genommen werden. Die Kontinuität und Konsistenz der Bewertungskriterien unterliegt dabei der Verantwortung des jeweiligen Benutzers. Die Leistungsfähigkeit der Auswahl, bezogen auf die Geschwindigkeit wie auch auf die Anzahl der betrachteten Kriterien, ist begrenzt durch die mentale Kapazität des Benutzers. Durch die permanente Teilhabe am Entstehungsprozess kann der Benutzer aber direkt und kontinuierlich auf die Entwicklung der Ergebnisse Einfluss nehmen.

#### **5.4.3. Kontrolle durch Manipulation**

Neben der Selektion als Interaktionsprinzip, können auch manipulative Verfahren ein Eingreifen in das Entwurfssystem ermöglichen. Zum einen können Individuen direkt durch manuelles Einwirken verändert werden. Durch diese Veränderungen verändern sich mittelbar die Bewertungen der Individuen und dadurch der gesamte Entstehungsprozess. Zum anderen können aber auch die Rahmenbedingungen des Systems, wie beispielsweise Evaluationskriterien, manipuliert werden.

#### **5.4.4. Kollaborative und autarke Systeme:**

Im Prinzip lassen sich generative Systeme aufgrund ihrer Benutzerinteraktionsmöglichkeiten in zwei unterschiedliche Kategorien einordnen. Auf der einen Seite, gibt es sogenannte kollaborative Systeme, bei denen der Benutzer unmittelbar und während des Erzeugungsprozesses in das System eingreift. Und auf der anderen Seite, gibt es autarke Systeme, bei denen sämtliche Information, Parameter und Veränderungsmöglichkeiten zu Beginn des Prozesses festgelegt werden und der generative Prozess an sich ohne Einwirkung durch den Benutzer stattfindet.

Im direkten Eingriff des menschlichen Benutzers in den Erzeugungsprozess, durch subjektive Auswahl oder intuitive Manipulation, sieht mancher die einzige Möglichkeit sinnvolle Ergebnisse zu erzielen, die nicht der Beliebigkeit preisgegeben sind. Von Vorteil bei der direkten Interaktion ist, dass die Kriterien für Auswahl oder Manipulation entsprechend den einzelnen Populationen intuitiv angepasst werden können. Dadurch können Konvergenzen effektiv verhindert werden und es entsteht eine große Bandbreite innerhalb den Bewertungskriterien und, als Konsequenz daraus, auch unter den möglichen Ergebnissen. Es können selbst Probleme behandelt werden, deren Beschreibung in der Fitnessfunktion nur unzureichend gelingt, da formal fehlende Kriterien, die eigentlich für eine signifikante Bewertung notwendig wären, informell durch den Benutzer intuitiv und vielleicht sogar unterbewusst in Betracht gezogen werden. Nachteilig für den Algorithmus wirkt sich sicherlich die begrenzte Kapazität des menschlichen Gehirns, sowohl in Bezug auf Geschwindigkeit, als auch Speicherkapazität, aus<sup>39</sup>. Durch die intuitive Bewertung, sind die zu Grunde liegenden Kriterien nicht immer gleich gewichtet und beachtet; die Bewertungsbasis ist nicht konsistent, was als Konsequenz für die Ergebnisse bedeutet, dass sie nicht unbedingt vergleichbar sind.

Autarke Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sämtliche Kriterien, die der Algorithmus zur Erzeugung der Gestalten benötigt, zu Beginn des Prozesses definiert und formal beschrieben sind. Dadurch kann der Algorithmus

---

<sup>39</sup> vgl. Bentley, Corne 2002, S. 41

sehr effizient ausgeführt werden. Während der Laufzeit kann der Algorithmus nicht durch intuitive Eingriffe geleitet werden. Nur formal definierte Kriterien finden Eingang in den Entstehungsprozess. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien und deren vollständige Berücksichtigung werden gewährleistet. Die häufig geäußerte Kritik der Beliebigkeit ist bei den autarken Systemen weit weniger gegeben als bei den kollaborativen Systemen, da die Entstehungsprozesse präzise definiert und nachvollziehbar sind. Autarke Systeme sind durch Interaktion zwischen den Systemkomponenten gekennzeichnet und weniger durch die Dominanz und situative Beliebigkeit und Vorlieben eines Benutzers.

## **6. Methode zur Entwicklung eines evolutionären Algorithmus**

Es existiert kein Standardrezept für den Entwurf für evolutionäre Algorithmen. Zur Lösung eines bestimmten Problems muss jeweils die passende Methode gefunden werden. Ein übliches und weitverbreitetes Verfahren besteht darin, einen bereits bekannten Algorithmus für ein dem vorliegenden Problem ähnliches Problem zu finden und diesen den Anforderungen anzupassen. (Weicker 2007, S. 232)

Darüber hinaus gibt es einen weiteren Ansatz, über eine formale Ableitung aus dem sogenannten Forma- / Schematheorem, Entwurfsregeln abzuleiten (Cardiffe-Surry-Methode). Diese sind aber nur auf einen begrenzten Bereich von Problemen anwendbar, bei denen Teilbereiche der Genome durch den Vergleich mit „wertvollen“ Schemata bewertet werden können. Dieser Ansatz setzt die genaue Kenntnis des Ergebnisraumes voraus. Da dies bei der vorliegenden „kreativen“ Entwurfsaufgabe nicht gegeben ist, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Einen offenen Ansatz, den man als Fahrplan für den Entwurf von evolutionären Algorithmen verstehen kann, liefert der analysebasierte Entwurfsansatz. Er besteht aus 3 Phasen. In der ersten Phase werden die Anforderungen definiert. Die zweite Phase dient dazu, das Problem genauer zu betrachten und den zu erwartenden Erfolg des Algorithmus abzuschätzen. In der dritten und letzten

Phase wird das Problem als logische Repräsentation formuliert und die Qualität des Algorithmus bewertet.

Basierend auf dem vorgeschlagenen Modell von Weicker (2007, S. 236) werden die Phasen für das vorliegende Problem näher erläutert.

### **6.1. Anforderungsanalyse (Phase1)**

Die Anforderungsanalyse dient vor allem der Beschreibung des Problems und der genauen Definition des phänotypischen Suchraumes. Es wird definiert, wie die Raumgeometrie eindeutig beschrieben werden kann und welche Parameter geeignet sind, um die Geometrie zu verändern. Es müssen die Grenzen festgelegt werden, innerhalb derer sich die Raumgeometrie manifestiert. Darüber hinaus wird festgelegt, welche Optimierungsziele verfolgt werden. Es wird entschieden, ob der Algorithmus ein einziges Ergebnis liefern soll, oder eine Reihe von möglichen Lösungen. Alle Kriterien, nach denen die Lösungen bewertet werden soll, müssen festgelegt werden. Im vorliegenden Fall bedeutet dies die Auswahl aus den geometrieabhängigen akustischen Kennwerten und darüber hinaus eine „architektonisch-ästhetische“ Bewertung der Geometrie. Diese Kriterien müssen abschließend in einer Funktion formuliert werden, damit sie im EA Verwendung finden kann. In dieser Funktion sind bereits die Gewichtungen der einzelnen Kriterien zu einander definiert. Bereits vorhandenes Wissen über das Problem wird dokumentiert und als Nebenbedingungen formuliert. Im vorliegenden Fall können z.B. bekannte akustische Räume der Bewertungsfunktion unterzogen werden und daraus Benchmarks abgeleitet werden. Auf die Formulierung von Nebenbedingungen, aufgrund von Planungsempfehlungen, wie z.B. die max. Tiefe eines Balkons oder das als ideal betrachtete Raumseitenverhältnis, wird im vorliegenden Fall ausdrücklich und bewusst verzichtet, da das Entwurfssystem konzipiert ist, um neue Raumkonzepte zu finden. Dies würde durch die Formulierung von solchen Randbedingungen unterbunden.

### **6.2. Problemanalyse und Risikobewertung (Phase 2)**

Die Phase 2 des analysebasierten Ansatzes zum Entwurf von evolutionären Algorithmen sieht vor, das Problem dahingehend zu untersuchen, ob es nicht auch auf andere Weise zu lösen ist. So ist zu untersuchen, ob die definierte

Bewertungsfunktion nicht effizienter, z.B. durch Differenzierung, zu lösen ist. Ist dies nicht der Fall, sollte man sich auf die Suche machen, und bereits erfolgreiche Algorithmen zu suchen, die vielleicht ein ähnliches Problem, wie das vorliegende, bereits lösen können. Die Analyse des Problems kann durch die folgenden Stichworte charakterisiert werden:

- Möglichkeit der Lösung durch anderer Verfahren (Differenzierbarkeit, usw.)
- Bestimmung der Suchraumgröße
- Überprüfung des Problems auf NP-Vollständigkeit
- Ermittlung der Anzahl der lokalen Optima
- Verteilung der Lösungen im Suchraum (Nadel-im-Heuhaufen)
- Erkennung spezieller Problemanforderungen (verrauscht, kostspielige Bewertung, Zeitabhängigkeit der Problemerkennung)

Neben der Charakterisierung des Problems, sollte eine Abschätzung, ob das Problem überhaupt eine Chance hat, mit der beabsichtigten Methode gelöst werden zu können, durchgeführt werden. Ist das Risiko einer vergeblichen Lösungssuche zu hoch, sollte der Entwurfsversuch entweder abgebrochen werden, oder das Problem in anderer Form definiert werden. Als Abbruchkriterien werden folgende genannt:

- Nadel-im-Heuhaufen-Problem mit großem Suchraum,
- hinreichende Schwierigkeit und Problemgröße verbunden mit der Forderung nach der Lieferung des globalen Optimums als Ergebnis,
- ungünstige Relation der Zeit für die Bewertung eines Lösungskandidaten zur insgesamt erlaubten Optimierungszeit oder
- das Vorhandensein eines klassischen Optimierungsalgorithmus.

Das vorliegende Problem erfüllt durchaus einige der Abbruchkriterien. So liegt bei der Entwurfsaufgabe ein Nadel-im-Heuhaufen Problem mit einem sehr großen Suchraum vor, da für die formulierten Anforderungen sicherlich viele schlechte Lösungen und wenige gute Lösungen zu erwarten sind. Auch die

Bewertungszeit der Lösungskandidaten ist, durch die Anwendung einer raumakustischen Simulation, vergleichsweise hoch. Wohingegen die Komplexität des Problems durchaus als hinreichend bezeichnet werden kann. Auch die Suche nach dem globalen Maximum wird angestrebt. Durch den Vergleich der Güterwerte der Lösungskandidaten mit den Güterwerten bereits bekannter konventioneller Raumkonzepte, können Erwartungswerte für die Bewertungsfunktion definiert werden.

### 6.3. Repräsentationsalternativen (Phase 3)

Letzter Schritt ist nun die logische Darstellung der Lösungskandidaten. Weicker (2007) empfiehlt eine Darstellung, die sich möglichst nahe am Phänotyp orientiert. Für den vorliegenden Fall ist also eine Repräsentation gesucht, die eine Geometrie und deren akustische Materialität beschreibt. Der Einfluss der unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten lässt sich am besten anhand eines Beispiels zeigen. Das klassische Problem des Handlungsreisenden (TSP) lässt sich entweder als Reihenfolgen von besuchten Städten (Knotendarstellung) definieren, oder alternativ als Reihenfolge von Strecken (Kantendarstellung), die absolviert werden.

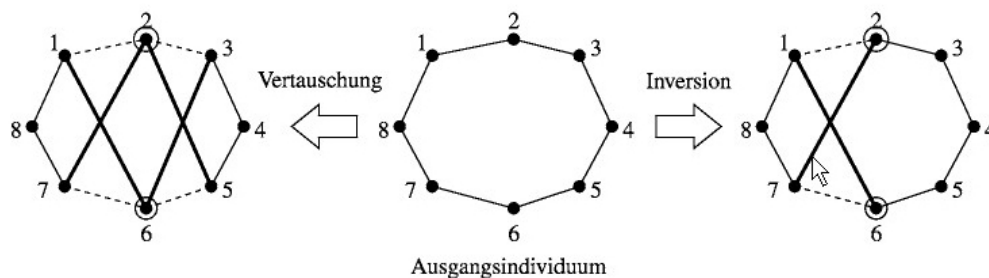


Bild 46: Logische Repräsentationsalternativen TSP (Weicker 2007, S. 28)

Der Unterschied in der logischen Darstellung zeigt sich bei der Anwendung von Evolutionsparameter wie z.B. der Mutation. Durch eine 2,6 Mutation in der Knotendarstellung werden die Städte 2 und 6 gegeneinander ausgetauscht (austauschende Mutation). Das Ergebnis ist in Bild 46: auf der linken Seite dargestellt (1,6,3,4,5,2,7,8). Bei der Vorstellung einer Kantenrepräsentation, in der die Kantenreihenfolge mutiert werden soll, werden bei einer Mutation 2 Kanten getauscht. Erreicht wird dies durch eine invertierende Mutation, bei der



die Städte 2 und 6 ausgetauscht und die verbleibenden Stationen in invertierter Reihenfolge angehängt werden (1,6,5,4,3,2,7,8). Die Gen-Notation als Permutation von Städten (1,2,3,4,5,6,7,8) bleibt von der logischen Repräsentation unberührt. Durch die unterschiedliche Art der Mutation findet die logische Repräsentation ihren Ausdruck.

Die Betrachtung der graphischen Darstellung macht den Unterschied der alternativen logischen Repräsentationen deutlich. Durch die Kantendarstellung bleibt der rechte Teil des Pfades erhalten, d.h. durch die Mutation wird nur ein kleiner Teil des Pfades verändert. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass sich „gute“ Pfade in der Bewertung besser durchsetzen können. Die logische Repräsentation folgt dem Grundsatz, dass eine kleine Änderung im Genotyp eine kleine Änderung im Phänotyp hervorgerufen wird.

Zur dritten Phase gehört auch der Vergleich der Forma-Güte-Varianz der unterschiedlichen Repräsentationsalternativen. Dabei wird die Suchdynamik des Algorithmus untersucht. Durch die Definition von Schemata in der Gencodierung, die bestimmte Eigenschaften repräsentieren, kann die erwartete Vermehrung dieser Schemata durch die Anwendung von Evolutionsoperatoren (Mutation, Rekombination) abgeschätzt werden. Durch den Vergleich dieser Abschätzung unterschiedlicher logischer Repräsentationen, kann die Qualität der Algorithmen verglichen werden. Dies setzt aber voraus, dass sinnvolle Schemata formuliert werden können, also das Problem in Unterbereiche, die unabhängig voneinander bewertet werden können, unterteilt werden kann. Die Raumakustik ist aber als Gesamtsystem zu betrachten und nicht entsprechend unterteilbar, darüber hinaus ist bei der Notation der Gencodierung durch reelle Zahlen die Formulierung von sinnvollen Schemata nahezu unmöglich. Daher erscheint die Schema-Güte-Varianz im vorliegenden Fall nicht zielführend.

## **7. Aufbau des Algorithmus zur Formgebung akustischer Räume**

### **7.1. Problemdefinition**

Das vorliegende Problem ist ein multi-kriterielles oder multivariablen Problem. Das Problem wird als Optimierungsproblem formuliert, da die obere Gütegrenze des Problems nicht abgeschätzt oder gar genau benannt werden kann. Dieses

wäre die Voraussetzung dafür, das Problem z.B. als Entscheidungsproblem oder als Berechnungsproblem definieren zu können. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Lösung des Problems darin besteht, einen möglichst hohen Gütewert zu finden, ohne zu wissen wie hoch dieser Wert überhaupt für die jeweilige Problem Instanz werden könnte. Bekannt ist nur der absolute definitionsgemäße Gütehöchstwert von 1. Das bedeutet für die gefundenen Lösungen aber auch, dass deren Qualität nur in Relation zu anderen gefundenen Lösungen beurteilt werden kann und nicht als absolute Qualität, es sei denn der Gütewert würde tatsächlich 1 sein. Was aber nicht zu erwarten ist.

Umgangssprachlich formuliert besteht das vorliegende Optimierungsproblem darin, ausgehend von einer räumlichen Quellen / Empfänger Konstellation eine geometrisch materiale Hülle zu (er)finden, die definierten akustischen Eigenschaften genügt. Davon ausgehend, dass beliebige Hüllen durch die Verwendung von Dreiecken ausreichend angenähert werden können, kann das Problem weiter präzisiert werden. Gesucht wird eine Anordnung von beliebig vielen Dreiecksflächen beliebiger Größe mit beliebigen akustischen Eigenschaften, so dass an den vorgegebenen räumlich verteilten Empfängerplätzen, durch die vorgegebenen räumlich verteilten Quellen, eine vorgegebene akustische und architektonisch-ästhetische Qualität erreicht wird. Die gesuchten Parameter sind also die Anzahl ( $n$ ) und die Geometrie ( $g$ ) der Dreiecksflächen und deren akustische Eigenschaft ( $p$ ). Das Problem besteht also aus 3 unbekanntem Parametern  $n$ ,  $g$ ,  $p$ . Formal kann das gesuchte Ergebnis durch folgendes Triple beschrieben werden:

$$x = (n, g, p)$$

Die Anzahl der möglichen Zustände des Triples ergeben sich durch Multiplikation der einzelnen Elemente. Die Anzahl der Dreiecke ( $n$ ) wird durch eine beliebige natürliche Zahl dargestellt. Diese ist erst einmal und aus theoretischer Sicht nicht begrenzt und kann daher unendlich groß sein. Die Darstellung der Geometrie der Dreiecke erfolgt durch eine Punkteliste, welche die  $x$ ,  $y$  und  $z$  Koordinaten der Punkte als Fließkommawerte enthält. Dadurch besteht auch dieses Element des Triples theoretisch aus unendlich vielen Elementen, da auch durch eine Begrenzung des „Bauvolumen“ unendlich viele

Werte für  $x$ ,  $y$  und  $z$  möglich sind. Gleiches gilt für die Darstellung der akustischen Eigenschaften der Dreiecke, da diese durch einen Absorptions-, bzw. Diffusionsgrad der jeweils zwischen 0 und 1 liegt, in Fließkommaschreibweise beschrieben werden und dadurch unendliche viele mögliche Werte annehmen kann. Die Anzahl der möglichen Zustände des Triple  $x(n,g,p)$  ist also unendlich groß.

Zum Optimierungsproblem wird das vorliegende Problem dadurch, dass für die Unbekannten  $n$ ,  $g$  und  $p$  eine Lösung gesucht wird, die bestimmten Qualitätsanforderungen möglichst nahe kommt. Durch diese Einschränkung, bzw. Anforderung, dass eben eine möglichst optimale, d.h. eine Lösung mit möglichst hohem Qualitätswert gesucht wird, wird das Problem beschränkt und zum Optimierungsproblem. Diese Qualitätsanforderungen bestehen selbst aus mehrere Einzelkriterien, die sich wiederum wesentlich unterscheiden, indem sie nämlich akustischer, morphologischer oder funktionaler Natur sind. Daraus lässt sich ableiten, dass das vorliegende Problem ein multi-kriterielles Problem ist.

## **7.2. Komplexität des Problems**

Wie in Kapitel 3.3.2 bereits beschrieben, wird die Komplexität eines Problems in Abhängigkeit der Instanzgröße  $n$  des Problems beschrieben. Damit lässt sich die theoretische und praktische Berechenbarkeit abschätzen. Vereinfachend wird das vorliegende Problem auf ein Teilproblem reduziert. Angenommen die Materialeigenschaften der Dreiecke werden jeweils in zehn gleiche Teile unterteilt. Sodass der Absorptions-, bzw. Diffusionsgrad 11 Werte zwischen 0,0 bis 1,0 annehmen kann. Ein Polyeder, bestehend aus  $n$  Flächen, hätte dann  $11^{2n}$  mögliche Materialkombinationen. Es besteht also ein mindestens exponentielles Verhältnis zwischen den möglichen Zuständen der Materialwerte und der Größe der Problem Instanz. Der Gesamtqualitätswert besteht, neben anderen, aus einem akustischen Qualitätswert. Dieser lässt sich nur durch eine

Simulation ermitteln und ist nicht deterministisch zu berechnen.<sup>40</sup> Aus dem Simulationsergebnis einer bestimmten Konfiguration lässt sich aber nicht vorhersagen, wie die sich eine bestimmte Veränderung z.B. eines Absorptionswertes auf die akustische Qualität der nächsten Konfiguration auswirkt, da die Raumakustik als Gesamtsystem zu betrachten ist und deterministisch nicht effizient berechenbar ist. Daher müssen sozusagen alle Möglichkeiten ausprobiert, also einer raumakustischen Simulation unterzogen werden, um die wirklich beste Lösung zu finden. Da aber schon bei einer dezimalen Unterteilung der Materialeigenschaften ein mindestens exponentielles Anwachsen der möglichen Lösungen in Abhängigkeit der Anzahl der Flächen besteht, ist das Problem praktisch, also mit einer realistischen Problemgröße  $n$ , nicht durch eine brute-force Methode, d.h. ein Methode, die alle Möglichkeiten in Betracht zieht, zu bewältigen.

Für einen Quader, der durch 12 Dreiecksflächen begrenzt wird, bedeutet dies, dass es  $11^{24}$  mögliche Materialkombinationen gibt. Angenommen wir könnten jede Sekunde eine Simulation und anschließend eine Bewertung vornehmen, würde das 99.518 Jahre dauern. Und dabei ist eine veränderliche Geometrie noch nicht berücksichtigt.

Der formale Nachweis über die Zugehörigkeit des Problems zur Klasse  $k^n$  oder NP ist damit nicht erbracht. Aufgrund der eben beschriebenen Herleitung wird aber angenommen, dass das Problem im informationswissenschaftlichen Sinne nicht effizient zu lösen ist. Aufgrund der praktischen Undurchführbarkeit einer brute-force Methode und der Anwendung der raumakustischen Simulation zur Ermittlung der akustischen Qualität, wird eine heuristische Suche in Form eines evolutionären Algorithmus vorgeschlagen.

---

<sup>40</sup> Die Arbeiten von Vorländer (1988), Heinz (1994) und Schröder (15.09.2011) machen deutlich, dass eine deterministische Berechnung der Raumakustik nicht effizient möglich ist. Dieser Umstand ist der Grund für die Entwicklung der Simulation wie sie dort beschrieben ist. Daher lässt sich eine Raumakustik nicht errechnen, sondern nur mit Hilfe der Simulation vorhersagen und damit bewerten. Es muß also eine Lösung erzeugt werden und für das konkrete Beispiel eine Vorhersage gemacht werden.

### 7.3. Suchraum

Der Suchraum  $\mathbb{S}$  besteht aus allen Individuen, die eine gültige Lösung für das vorliegende Problem darstellen. Gültige Lösungen sind alle Elemente  $\mathbf{x}$ , die bestimmte Gültigkeitsbedingungen  $\mathbb{G}^n$  erfüllen.

Formal:

$$\mathbb{S} = \mathbf{x} \subseteq \mathbb{G}^n$$

$n$ = Anzahl der Gültigkeitsbedingungen

Bei genetischen Algorithmen wird zwischen Such- und Ergebnisraum unterschieden. Im Suchraum befinden sich die Genotypen; der Ergebnisraum wird aus den zugehörigen Phänotypen gebildet.

### 7.4. Ergebnisraum

Der Ergebnisraum besteht aus den phänotypischen Individuen, die durch Transformation aus den genetischen Codes des Suchraumes gebildet werden. Der Ergebnisraum besteht aus Gestalten mit konkreten Eigenschaften wie Geometrie und Materialeigenschaften. Wohingegen der Suchraum durch die abstrakten genetischen Codes gebildet wird.

### 7.5. Zielfunktion

Eine Zielfunktion wird formal entweder als Maximierungs- oder als Minimierungsfunktion der Bewertungsfunktion beschrieben. Die Zielfunktion versucht den Güte- oder Qualitätswert  $q$  zu maximieren oder zu minimieren.

$$q = f(\mathbf{o}) = \max\{f(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbb{S} \subseteq \mathbb{G}\}$$

oder

$$q = f(\mathbf{o}) = \min\{f(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbb{S} \subseteq \mathbb{G}\}$$

$\mathbb{S}$  = Suchraum

$\mathbf{o}$  = gefundenes Optimum

Die Bewertungsfunktion macht die Individuen untereinander vergleichbar. Jedem Individuum wird durch die Bewertungsfunktion ein eindeutiger Gütewert zugewiesen. Das vorliegende Problem beinhaltet mehrere unterschiedliche Kriterien, die für die Lösung relevant sind. So sollen, neben den akustischen

Kriterien, auch architektonisch ästhetische Kriterien Eingang in die Bewertung der Individuen finden. Die unterschiedlichen Kriterien haben für das Problem unterschiedliche Relevanz, welche sich durch unterschiedliche Gewichtung  $w_i$  innerhalb der Bewertungsfunktion  $f(\mathbf{x})$  widerspiegelt.

Formal:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sum w_i} * \sum_i^n w_i * f_i(x) | w_i, f_i \in \mathbb{R}_+ \{0 \leq w_i, f_i \leq 1\}$$

wobei:

$n$  = Anzahl der Kriterien

$w$  = Gewichtung des Kriteriums

$f_i$  = Bewertungsfunktion des Kriteriums

Wenn  $w_i$  und  $f_i$  zwischen 0 und 1 liegen, dann liegt auch  $f(\mathbf{x})$  zwischen 0 und 1. Die einzelnen Kriterienfunktionen  $f_i$  werden also so formuliert, dass sie zwischen den Werten 0 und 1 liegen.

Für das vorliegende Problem wird die Zielfunktion formal als eine Maximierungsfunktion festgelegt. Daraus folgt, dass der Gütewert 1 zugewiesen wird, wenn das Kriterium erfüllt wird. Wird das Kriterium nicht erfüllt, so wird ein positiver Wert kleiner 1 zugewiesen. Die Zuweisung gradueller Gütewerte ermöglicht eine differenzierte Bewertung, in welchem Maße Kriterien erfüllt sind oder nicht. Dadurch erhöht sich die Möglichkeit, dass sich einzelne Individuen im Laufe der Zeit entwickeln können und nicht von vorneherein durch eine Entweder-Oder-Bewertung diskriminiert werden.

Die Qualität eines architektonischen, akustischen Raumes wird vereinfacht in drei Bereiche differenziert. Der erste Bereich ist die akustische Qualität, der zweite Bereich ist die ästhetische Qualität und der dritte Qualitätsbereich ist durch die Nutzbarkeit des Raumes definiert.

$$Q_{\text{gesamt}} = Q_{\text{akustisch}} + Q_{\text{ästhetisch}} + Q_{\text{Nutzbarkeit}}$$

## 7.6. Nebenbedingungen

Im vorliegenden Fall soll die erzeugte Geometrie vor allem durch eine akustische Simulation bewertet werden. Eine Simulation ist softwarebedingt nur bei geschlossener Geometrie, die sich nicht selbst durchdringt, möglich.

Der Geometriesynthesealgorithmus erzeugt ausschließlich geschlossene Geometrie. Es ist aber nicht auszuschließen, es ist sogar relativ wahrscheinlich, dass die Geometrie selbstdurchdringend ist. Auch bei der Rekombination von gültigen Individuen können Individuen entstehen, deren Teilflächen sich schneiden. Daher werden Individuen einer entsprechenden Prüfung unterzogen und bei Nichteinhaltung dieser Nebenbedingung per Letalmutation aus der Population entfernt und durch neue Individuen ersetzt, die die Nebenbedingungen erfüllen.

Eine weitere Nebenbedingung besteht darin, dass alle Empfänger und alle Quellen vollständig in der erzeugten Geometrie eingeschlossen sein sollen. Darüber hinaus wird erwartet, dass alle Empfänger einen direkten Sichtkontakt zu allen Quellen haben. Dadurch wird gewährleistet, dass der Empfänger Direktschall aus der jeweiligen Quelle empfangen kann.

Beide genannten Nebenbedingungen sind technisch notwendige Bedingungen für die Durchführung der akustischen Simulation. Das bedeutet, dass Individuen, die eine dieser beiden Bedingungen nicht erfüllt, nicht zur akustischen Simulation zugelassen werden können.

Aus technischen Gründen ist auch der Bauraum oder Aktionsvolumen des evolutionären Algorithmus zu beschränken. Computersysteme können nur mit endlichen Zahlenwerten agieren. Diese können zwar verhältnismäßig groß oder klein sein, sie sind aber Teil des endlichen Zahlenraumes. Aber auch aus praktischer Sicht, es wird ja eine Raumhülle gesucht, in der sich Menschen aufhalten sollen, macht es Sinn die Auswahl der möglichen Eckpunkte der Polyeder auf einen bestimmten Bauraum zu begrenzen.

### **7.7. Optimierungsziel**

Die vorliegende Problemdefinition ist im mathematischen Sinne nicht sehr präzise, da sie sehr viele Unbekannte enthält und die Ränder des Suchraumes nicht definiert sind. Darüber hinaus ist kein Qualitätswert als Terminierungskriterium bekannt, da das globale Maximum unbekannt ist. Es ist sozusagen ein schlecht definiertes Problem<sup>41</sup>. Folge des schlecht definierten Problems ist eine wahrscheinlich relative hohe Anzahl von moderat guten Lösungen und eine zwar geringere aber dennoch relativ hohe Anzahl von guten Lösungen. Durch die schlechte Problemdefinition wird der Suchraum wahrscheinlich durch viele lokale Maxima geprägt sein. Ein globales Maximum wird im sehr großen Suchraum schwer auszumachen sein. Das Optimierungsziel ist also nicht, eine beste Lösung des Problems zu finden, sondern einige gute Lösungen, die einer bestimmten Güte entsprechen. Daher ist es sinnvoll ein Populationskonzept mit einer relativ hohen Populationsgröße und hoher Variabilität einzusetzen, um den Suchraum möglichst weitverteilt, untersuchen zu können.

### **7.8. Benutzerkontrolle**

Eingriffe durch einen Benutzer sind vor allem geeignet, um intuitiv, spontan und subjektiv auf den Entwicklungsprozess einzuwirken. Da sich die Bewertung beim vorliegenden Problem sehr stark auf die akustische Bewertung stützt und diese nur schwer intuitiv, sondern eher über die raumakustische Simulation, einigermaßen präzise zu bewältigen ist, wird die Benutzeraktion auf den Beginn des Prozesses begrenzt. Der Nutzer kann individuelle Festlegungen vor dem Start in das System eingeben, danach aber den Prozess an sich nicht mehr beeinflussen. Durch die Definition von Bewertungskriterien und deren Wichtigung, kann der Benutzer das Entwurfssystem kontrollieren. Ein Eingreifen während des Generierungsprozesses wird nicht realisiert, da dieses, bedingt durch das Populationsprinzip mit relativ großer Anzahl an Individuen, für den Nutzer nicht überschaubar und nicht sinnvoll beeinflussbar erscheint.

---

<sup>41</sup> Rittel beschreibt 10 Merkmale für schlecht-definierte Probleme (wicked problems), wobei er Planungsprobleme explizit in dieser Problemklasse verortet Rittel, Webber 1973, S. 161–167.



## 8. Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

Das grundlegende Konzept für den Formfindungsalgorithmus wurde in Spaeth und Menges (2011) auf der eCAADe Konferenz in Ljubljana vorgestellt, um den Modus Operandi einem wissenschaftlichen Diskurs auszusetzen. Die Überarbeitung und Weiterführung mündet in den hier vorgestellten Algorithmus.

### 8.1. Geometrie und Materialsynthese

Damit Elemente in einem evolutionären Algorithmus sinnvoll behandelt werden können, müssen sie so dargestellt werden, dass die Anwendung der gewünschten Evolutionsparameter möglich ist. Die dargestellten Elemente sollten eine möglichst zusammenhängende Ergebnislandschaft bilden. Das bedeutet, dass sich im Ergebnisraum benachbarte Elemente möglichst nur durch kleine Veränderungen in einander überführen lassen sollten (vgl. Kapitel 6.3). Die sogenannte Hamming-Klippe sollte möglichst klein sein, damit ein effizientes Absuchen des Ergebnisraumes möglich wird. Die Darstellung der Elemente muss eindeutig sein. Im konkreten Fall sind die Elemente des Ergebnisraumes Raumhüllen, die aus Flächen bestehen, denen bestimmte akustische Eigenschaften zugeordnet sind. Die Elemente des Suchraumes sind genetische Codes, Genotypen, die phänotypischen Elementen zugeordnet oder aus entsprechend erzeugt werden können.

#### 8.1.1. Darstellung der Geometrie

Um den Ergebnisraum möglichst wenig einzuschränken, ist es notwendig, die Geometrie möglichst universell darzustellen. Die Darstellung der Elemente sollte so gewählt sein, dass möglichst viele unterschiedliche Raumhüllen als potentielle Ergebnisse möglich sind. Es soll vermieden werden, dass bereits durch die Darstellung der Raumhülle, potentielle Lösungskandidaten ausgeschlossen werden. Darüber hinaus gibt es Anforderungen verfahrenstechnischer Natur, die sich aus der Anwendung der akustischen Simulation ableiten. Damit eine akustische Simulation, die partiell ein Teilchenverfolgungsmodell verwendet, durchgeführt werden kann, muss die Raumhülle „wasserdicht“, also zusammenhängend und geschlossen sein. Um eine entsprechende 3-dimensionale Hüllform möglichst universal abbilden zu

können, wird diese durch die Verwendung verschiedener Instanzen des 3-dimensionalen Simplex Tetraeder angenähert.

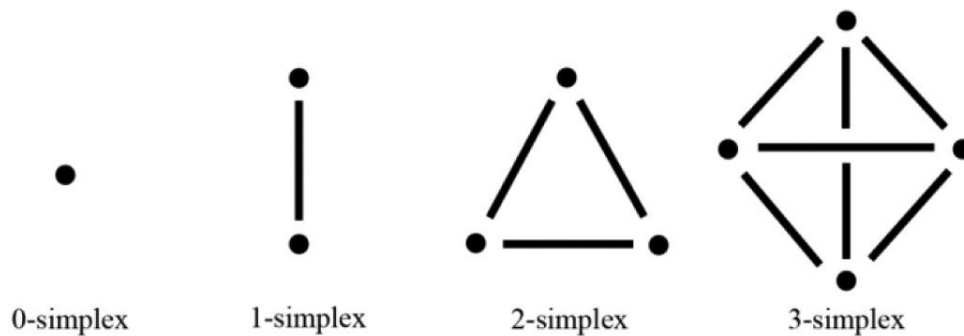
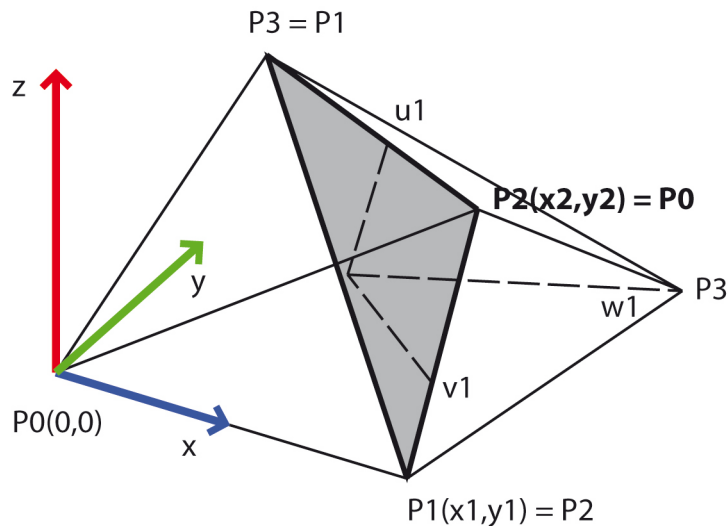


Bild 47: Darstellung von 0 bis 3-dimensionalen Simplizia (Attar u. a. 2009, S. 233)

So, wie beliebige 2-dimensionale Formen durch Instanzen von unterschiedlichen 2-dimensionalen Simplizia (Dreiecke) nahezu beliebig genau angenähert werden können, so können 3-dimensionale Volumina durch Instanzen von unterschiedlichen unregelmäßigen 3-dimensionalen Simplizia (Tetraeder) angenähert werden. Durch diese Form der Annäherung entstehen unstrukturierte Tetraeder Gitter deren äußere Hülle aus unterschiedlichen Dreiecken besteht, die gemeinsam eine zusammenhängen Fläche ergeben. Vice versa kann, durch das Aneinanderfügen von Tetraedern, entsprechend ein Volumen gebildet werden, welches eine geschlossene Oberfläche aus Dreiecken bildet.



**triangle 3:** P1,P2,P3  
 origin: P0  
 triangle 0: P0,P1,P2  
 triangle 1: P0,P1,P3  
 triangle 2: P0,P2,P3  
 triangle3: P1,P2,P3

Bild 48: Generierung von geschlossenen Volumina durch Aneinanderfügen von Tetraedern

Eine Möglichkeit der formalen Definition eines Tetraeders, ist die Notation von 4 Punkten zwischen denen sich die Kanten und Flächen des Tetraeders aufspannen. Durch die Kenntnis der Koordinaten von 4 Raumpunkten, ist das Tetraeder eindeutig bestimmt. Die Reihenfolge der Punkte ist beliebig; es entsteht immer ein kongruentes Tetraeder. Um nun ein weiteres Tetraeder an das Bestehende anzufügen muss lediglich ein weiterer Raumpunkt bestimmt werden. Zusammen mit drei Punkten des bereits bestehenden Tetraeders und des neuen vierten Punktes lässt sich ein zusätzliches Tetraeder über einer Fläche des bestehenden errichten. Die gemeinsame Fläche der beiden Tetraeder wird gelöscht. Somit besteht die neue Geometrie nur aus Flächen, die die Hüllform bilden. Liegt der neue Punkt innerhalb des bestehenden Tetraeders, so entsteht eine konkave Hüllform. Liegt der neue Punkt genau auf einer Fläche oder Kante so wird diese entsprechend geteilt; das neue Tetraeder liegt dann genau in der Fläche. Um eine Selbstverschneidung der Geometrie zu vermeiden, wird zur Errichtung des Tetraeders idealerweise die nächstliegende Dreiecksfläche zum neuen Punkt gewählt.

### 8.1.2. Genetische Geometrienotation

Der angestrebte evolutionäre Algorithmus verwendet ein Populationskonzept, um eine parallele Suche des Ergebnisraumes zu ermöglichen. Deshalb muss die Darstellung der Elemente in eine genetische Notation transformiert werden. Diese Transformation ergibt sich sehr direkt aus der Definition der Tetraeder und der beschriebenen Möglichkeit, diese aneinander zu fügen. Durch eine einfache geordnete Liste, in der die Koordinaten der Punkte definiert sind, kann entsprechend den beschriebenen Bildungsgesetzen eine eindeutige Hüllform generiert werden.

P0			P1			P2			P3			P4			Pn		
x0	y0	z0	x1	y1	z1	x2	y2	z2	x3	y3	z3	x4	y4	z4	xn	yn	zn
0.0	0.0	0.0	0.2	0.9	0.8	0.1	0.3	0.5	0.2	0.9	0.1	0.6	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8

Tabelle 7: Genetische Notation der Hüllform als geordnete Punktliste

### 8.1.3. Darstellung der akustischen Materialeigenschaften

Neben der Geometrie benötigt der evolutionäre Algorithmus Information über die akustischen Materialeigenschaften der Elemente. Wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, ist die akustische Eigenschaft einer Fläche durch den Absorptionsgrad  $\alpha$  und den Diffusionsgrad  $d$  beschreibbar. Der Wertebereich beider Koeffizienten bewegt sich zwischen 0 und 1. Sämtliche Flächen, die die Hüllform bilden, sollen einen differenzierten Wert für Absorptions- und Diffusionseigenschaft erhalten.

### 8.1.4. Genetische Materialnotation

Entsprechend der Geometrienotation werden auch die akustischen Eigenschaften in eine genetische Notation transformiert. Um eine einheitliche Notation der Geometrie und der akustischen Eigenschaften zu erreichen, werden die Absorptions- und Diffusionswerte nicht direkt den Flächen zugeordnet, sondern den Punkten. Dies führt zur folgenden gemeinsamen Notation der notwendigen Eigenschaften der dargestellten Elemente.

P <sub>0</sub>					P <sub>1</sub>					P <sub>n</sub>				
x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	z <sub>0</sub>	α <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	z <sub>1</sub>	α <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	x <sub>n</sub>	y <sub>n</sub>	z <sub>n</sub>	α <sub>n</sub>	d <sub>n</sub>
0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.2	0.9	0.8	0.1	0.6	0.1	0.3	0.5	0.7	0.3

*Tabelle 8:* Genetische Notation der Geometrie und Materialeigenschaften als geordnete Liste

Die Teilflächen der Hüllform sind jeweils durch drei Punkte definiert. Den Punkten sind jeweils Werte für  $\alpha$  und  $d$  zugewiesen. Aus den dreipunktebezogenen Werten, die die Ecken einer Teilfläche bilden, können nun Werte für die zugehörige Teilfläche gebildet werden. Es bieten sich drei einfache Verfahren an:

1. Arithmetisches Mittel aus den drei Punktwerten
2. Auswahl des Minimum oder Maximum
3. Zufällige Auswahl

Bevorzugte Methode ist die Ermittlung des Wertes aus dem arithmetischen Mittel der drei zugeordneten Absorptions- und Diffusionswerte. Die Verwendung dieser Methode leitet sich von der Charakteristik der betroffenen Werte ab. Extreme Absorptions- und Diffusionswerte sind in der Realität nur sehr aufwändig zu realisieren, sodass sich die Bestrebungen eher auf den mittleren Wertebereichen richten. Eine Minimum Maximum Auswahl erscheint wenig zielführend. Bei einer zufälligen Auswahl der Werte aus den zugeordneten Werten wäre die Eindeutigkeit der Wertebildung nicht gewährleistet, was bedeuten würde, dass der Erzeugungsalgorithmus bei gleichem genetischen Code zu unterschiedlichen Gestalten führen würde. Da eine eindeutige Transformation zwischen Genotyp und Phänotyp gefordert ist, ist die Methode der zufälligen Auswahl nur bedingt geeignet.

### 8.1.5. Anwendung des Evolutionsparameters Mutation

Die dargestellten Elemente werden innerhalb des evolutionären Prozesses einer Mutation unterzogen. Diese Mutation wird auf die Genotypen angewendet. Dabei wird das Genom an einer oder mehreren Stellen verändert. Durch, die in den vorherigen Kapiteln 8.1.2 und 8.1.4 beschriebenen genetischen Notation, kann eine einfache Art der Manipulation durchgeführt werden. Die

entsprechenden Werte im Genom können durch Addition oder Subtraktion eines definierten Wertes verändert werden. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Werte unterschiedliche Dimensionen besitzen. Die Koordinatenwerte der Punkte befinden sich innerhalb des vordefinierten Wertebereichs des Maximal- bzw. Minimalvolumens und sind als reale Meterdimension repräsentiert, wogegen sich die akustischen Materialkoeffizienten zwischen 0 und 1 bewegen. Da die Stellen mit unterschiedlichen Dimensionen innerhalb des Chromosoms bekannt sind, können die Mutationsparameter entsprechend angewendet werden. Die Veränderungen, die durch die Mutation hervorgerufen werden sind vergleichsweise gering, da sie sehr direkt an die Ausprägung des Phänotyps angelehnt sind. Im Zusammenhang mit der Ergebnislandschaft betrachtet erreicht man durch die Mutation eine lokale Exploration des aktuellen Suchortes. Die Phänotypen unterscheiden sich nicht strukturell, sondern lediglich in wenigen punktuellen Ausprägungen, wie der etwas veränderten Koordinate eines Punktes. Durch die Mutation werden unterschiedliche Varianten einer Struktur erzeugt.

#### **8.1.6. Anwendung des (Pseudo-) Evolutionsparameters Rekombination**

Neben der Mutation wird der Pseudoevolutionsparameter Rekombination angewendet. Dabei werden von unterschiedlichen Individuen unterschiedliche Teile mit einander kombiniert und zu einem neuen Individuum zusammengeführt. Durch die Darstellung der Elemente als Punkte- und Materialliste und die Anwendung des Synthesealgorithmus zur Erzeugung der Phänotypen ist gewährleistet, dass die jeweiligen Teilbereiche in ihrer ursprünglichen Form erhalten bleiben und sich die notwendige Verbindung zwischen den unterschiedlichen phänotypischen Teilbereichen quasi automatisch bildet. Durch die verwendete Codierung ist es möglich, das Genom an jedem beliebigen Chromosom (Gruppe aus Punkt und Material) beliebig oft zu trennen und mit beliebigen Partnern zu kombinieren, ohne dass dabei die formale Gültigkeit des Genoms beschädigt würde.

Die Anzahl der Schnittstellen wird durch den Benutzer als Evolutionsparameter zu Beginn des Prozesses manuell bestimmt. Die konkreten Stellen, an denen

das jeweilige Individuum kombiniert wird, werden gleichverteilt zufällig, ohne Einfluss durch den Benutzer, durch den Algorithmus bestimmt.

Davon unberührt bleibt die Möglichkeit, dass die Anwendung des gültigen Genotyps zu einem ungültigen Phänotyp, der sich beispielsweise selbstdurchdringt, oder sich außerhalb des gültigen Maximalvolumens befindet, führt.

Im Gegensatz zur Mutation ruft die Rekombination in den meisten Fällen eine strukturelle Veränderung des Phänotyps hervor. Durch das Kombinieren zweier Teilstrukturen unterschiedlicher Individuen, können sich die Phänotypen in der Anzahl der Flächen zu ihren Ausgangsindividuen deutlich unterscheiden, da es möglich ist, dass die Längen der ausgetauschten Genomteile unterschiedlich groß sind. Durch die Anwendung der Rekombination, wird eine große Diversität der Population erzeugt, die potentiell zu substantiellen Alternativlösungen führt. Wenn die Mutation einen lokalen Bereich des Ergebnisraumes absucht, so ist die Rekombination für das Überwinden größerer Strecken im Ergebnisraum verantwortlich.

## **8.2. Raumakustische Simulation**

Um eine akustische Bewertung innerhalb des evolutionären Algorithmus realisieren zu können, wird eine raumakustische Simulation integriert. Basierend auf den Forschungen von Kuttruff (2004) und Vorländer (1988, 1989) hat Heinz (1994) eine computergestützte Methode zur binauralen Raumsimulation entwickelt. Diese Methode zur echtzeitfähigen raumakustischen Simulation wurde durch die Forschung von Schröder (Schröder 2011) ergänzt. Die Methode orientiert sich an der dreigeteilten Ausprägung der Raumimpulsantwort und ordnet diesen Teilen jeweils effiziente Simulationsmethoden zu.

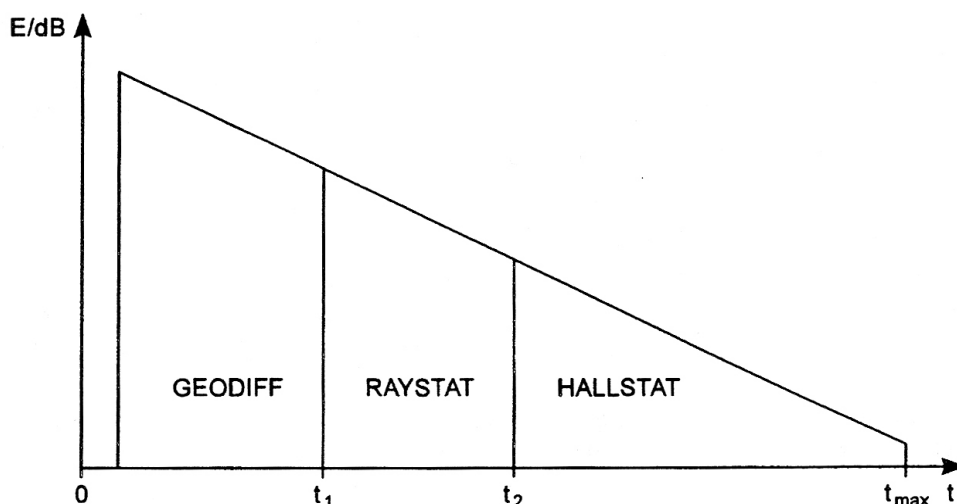


Bild 49: Aufteilung der Simulation in drei verschiedene Modellvorstellungen (Heinz 1994, S. 119)

Das GEODIFF-Verfahren (Heinz 1994; Schröder 2011) wird eingesetzt, um den Direktschall und die frühen Reflexionen in Räumen abzubilden. Begrenzt durch die beschränkte zeitliche und räumliche Auflösung des menschlichen Gehörs, sind es vor allem die frühen diskreten Reflexionen, die einen entscheidenden Beitrag zur differenzierbaren Impulsantwort leisten, da sie richtungs- und zeitbezogen wahrgenommen werden können. Sie stehen in direkter Abhängigkeit zur Raumgeometrie und dem zeitlichen Verlauf und werden daher auch entsprechend differenziert betrachtet. Die späteren Anteile sind für das menschliche Gehör nicht mehr räumlich und zeitlich differenzierbar, weshalb sie häufig durch statistische Modellierungen (RAYSTAT) angenähert werden. Für den architektonischen Formfindungsprozess, der auf einer geometrischen Betrachtung basiert, konzentriert sich die Analyse daher nur auf den ersten Teil der Raumimpulsantwort, die durch die differenzierte Simulationsmethode GEODIFF dargestellt wird.

Grundlage des GEODIFF-Verfahrens ist wiederum eine zweigeteilte Modellierung des Schalles. Dabei werden der spekulare und der diffuse Teil des Schalls getrennt betrachtet. Der spekulare oder geometrische Teil wird durch die sogenannte Spiegelquellenmethode modelliert, wohingegen der diffuse Teil durch eine Schallteilchenmethode abgebildet wird. Beide Betrachtungen werden unabhängig voneinander durchgeführt. Für eine Gesamtbetrachtung



des Schallfeldes werden beide Teilbetrachtungen zusammengeführt. Die verwendeten reflektierten Energieanteile ergeben sich entsprechend aus den zugeordneten Materialeigenschaften, welche durch den Diffusionsgrad  $d$  und Absorptionsgrad  $\alpha$  repräsentiert werden.

### **8.2.1. Simulation geometrischer Reflexionen mittels Spiegelschallquelle**

Die spekularen Reflexionen, die durch einen Schallimpuls in einem beliebigen geschlossenen Raum auftreten, können durch das sogenannte Spiegelschallquellenverfahren (Borish 1984) dargestellt werden. Diese Betrachtung basiert auf der Vorstellung, dass die schallreflektierenden Wandelemente glatte und ebene Flächen sind, die die auftreffende Schallwellen idealerweise nach dem Snell'schen Gesetz, Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel, reflektieren. Die Reflexion des Schalls an einer Wand wird nun durch eine sogenannte Spiegelschallquelle dargestellt, indem die ursprüngliche Schallquelle an der reflektierenden Wand gespiegelt wird. Die Verbindung der Spiegelschallquelle mit dem Empfänger repräsentiert den, auf den Empfänger eintreffenden Schall. Diese Repräsentation bezieht sich auf die Einstrahlrichtung und auf die Lauflänge des Schalls, die in dem Vektor Spiegelschallquelle – Empfänger abgebildet ist. Für Reflexionen höherer Ordnung werden die Spiegelschallquellen ihrerseits an der reflektierenden Wand in Spiegelschallquellen nächster Ordnung gespiegelt.

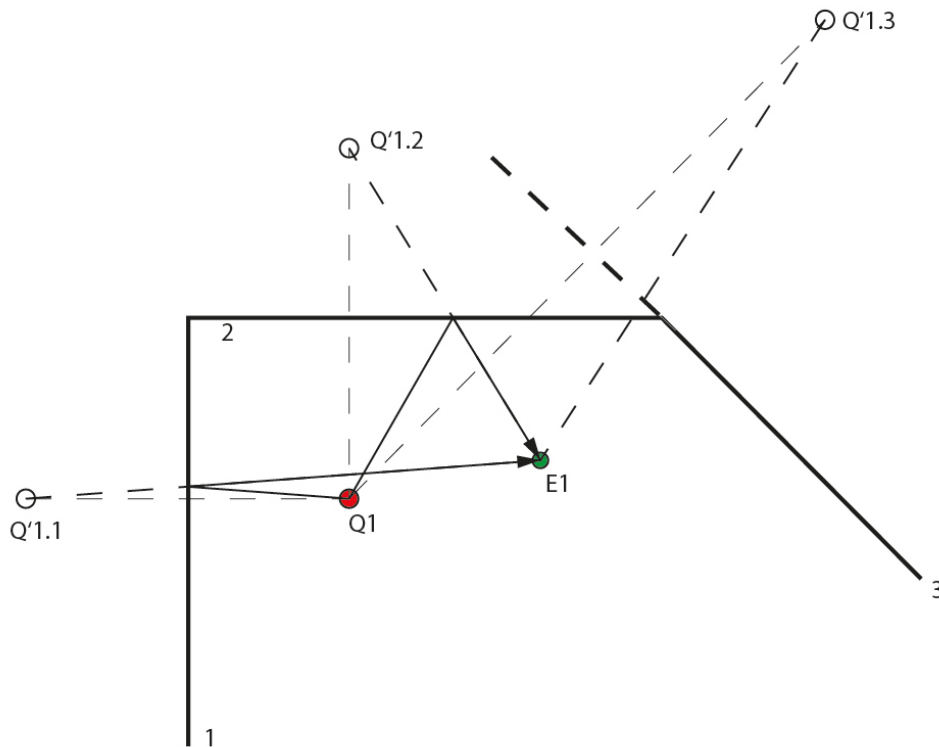


Bild 50: Reflexionen mittels Spiegelschallquellenverfahren (Reflexionsgrad 1)

Nicht jede erzeugte Hilfsschallquelle liefert einen hörbaren Beitrag beim Empfänger. Durch eine umgekehrte Strahlenverfolgung (Vorländer 1989) ist die Hörbarkeit der Spiegelschallquelle in Bezug zum jeweiligen Empfänger zu überprüfen. Ist die Überprüfung erfolgreich, liegt also kein Hindernis im Strahlengang zwischen Quelle und Empfänger und wird der Schallstrahl auch tatsächlich von der vorliegenden Geometrie reflektiert, so wird die Reflexion in ihrer zeitlichen, räumlichen und energetischen Ausprägung vom Empfänger registriert. Beim Verfahren nach Borish (1984) werden der Betrag und die Laufzeit mittels Vektorgeometrie ermittelt. Vorländer schlägt in seiner RAYSSQ Methode (Vorländer 1988) die Ermittlung von Energiegehalt und Laufzeit mittels eines Teilchenmodells vor.

Die zeitliche Ausprägung der Reflektion wird durch die Geschwindigkeit des Schalls im vorliegenden Medium und durch die Strecke, die der Schall zurücklegen muss bestimmt. Vereinfacht wird für den architektonischen

Formfindungsprozess eine mittlere Schallgeschwindigkeit von 343 m/s<sup>42</sup> angenommen. Daraus lässt sich die Laufzeit durch folgenden Zusammenhang ermitteln:

$$t = \frac{s}{c}$$

mit:

s = vom Schall zurückgelegte Strecke

t = Laufzeit des Schalls

c = mittlere Schallgeschwindigkeit (343m/s)

Die Berechnungen der Simulation werden auf energetischer Basis ausgeführt. Grundlage hierfür sind folgende Zusammenhänge und Annahmen. Sämtliche Schallquellen innerhalb der Simulation werden als ideale Kugelquellen ohne Richtungscharakteristik angenommen. Schalldruckpegel zur Charakterisierung der Quellen werden in dB in einem Meter Entfernung angegeben. Daraus ergeben sich für die Umrechnung aus Schalldruckpegel ( $L_P$ ) in Schalleistungspegel ( $L_W$ ) in Schalleistung ( $W$ ) folgende Zusammenhänge.

$$L_W = L_P + 11$$

$$W_{ini} = 10^{-12} * 10^{0,1L_W}$$

Die Energie, mit welcher der Schall auf den Empfänger trifft, ist abhängig von den Absorptionseigenschaften der reflektierenden Wand, des Mediums in dem sich der Schall ausbreitet und von der Entfernung des Empfängers vom Sender bzw. den Reflexionspunkten. Die Absorptionseigenschaft der reflektierenden Wand durch den Absorptionsgrad  $\alpha$  angegeben. Neben der Absorption der reflektierenden Wand, wird die Energie der geometrischen Reflexion zusätzlich durch den Anteil gemindert, der nicht spekulär, sondern diffus reflektiert wird. Der Anteil der diffusen Reflexion wird durch den Diffusionsgrad  $d$  gekennzeichnet.

---

<sup>42</sup> Schallgeschwindigkeit bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit. Bei exakter Betrachtung müssten die tatsächlich zu erwartenden Werte eingesetzt werden. Diese Genauigkeit ist aber für einen konzeptionellen Formfindungsprozess nicht relevant.

$$d = \frac{W_{diffus}}{W_{Gesamt}}$$

Die Absorptionseigenschaften des Mediums, im vorliegenden Fall Luft werden durch folgenden laufzeitabhängigen Zusammenhang abgebildet.<sup>43</sup>

$$W_L = W^{-mct}$$

mit:

$W_L$  = durch Luftabsorption geminderte Energie

$W$  = initiale Energie

$m$  = Energiedämpfungs-konstante

$c$  = mittlere Schallgeschwindigkeit

$t$  = Laufzeit des Schalls

Die beim Empfänger eintreffende Energie errechnet sich damit unter Anwendung der Energieverminderungsmethode folgendermaßen:

$$W_i = W_0(1 - \alpha)(1 - d) - W_L$$

mit

$W_i$  = eintreffende Energie

$W_0$  = Energie des Schallteilchens ( $W_0 = \frac{W_{ini}}{n}$ )

$W_{ini}$  = Energie der Schallquelle

$n$  = Anzahl der Schallteilchen (=Anzahl der gültigen Strahlenwege)

$\alpha$  = Absorptionsgrad

$d$  = Diffusionsgrad

$W_L$  = Energieanteil Luftabsorption

Die Schnittstellen der Vektoren Spiegelschallquelle – Empfänger mit den begrenzenden Wandflächen können als Reflexionspunkte von Schallstrahlen interpretiert werden. Durch die Ermittlung der Spiegelquellen und der Gültigkeitsuntersuchung, sind der Strahlengang und die Anzahl der gültigen

---

<sup>43</sup>nach Heinz 1994

Strahlen bekannt. Um die Reflexionen in zeitlicher und energetischer Ausprägung zu erhalten, werden von der Schallquelle die bekannten und gültigen Strahlen nachverfolgt und deren Energie wie folgt berechnet:

$$W_i = \frac{W_0}{n} e^{-mL} \prod_{j=1}^J (1 - \alpha_j)(1 - d_j)$$

mit:

$W_i$  = Energie des betrachteten Strahls  $i$

$W_0$  = Energie der Schallquelle

$m$  = Luftabsorptionskoeffizient

$L$  = gesamte Lauflänge des Strahls

$J$  = absolvierte Reflexionen des betrachteten Strahls

$\alpha_j$  = Absorptionsgrad der betrachteten  $j$ -ten Fläche

$d_j$  = Diffusionsgrad der betrachteten  $j$ -ten Fläche

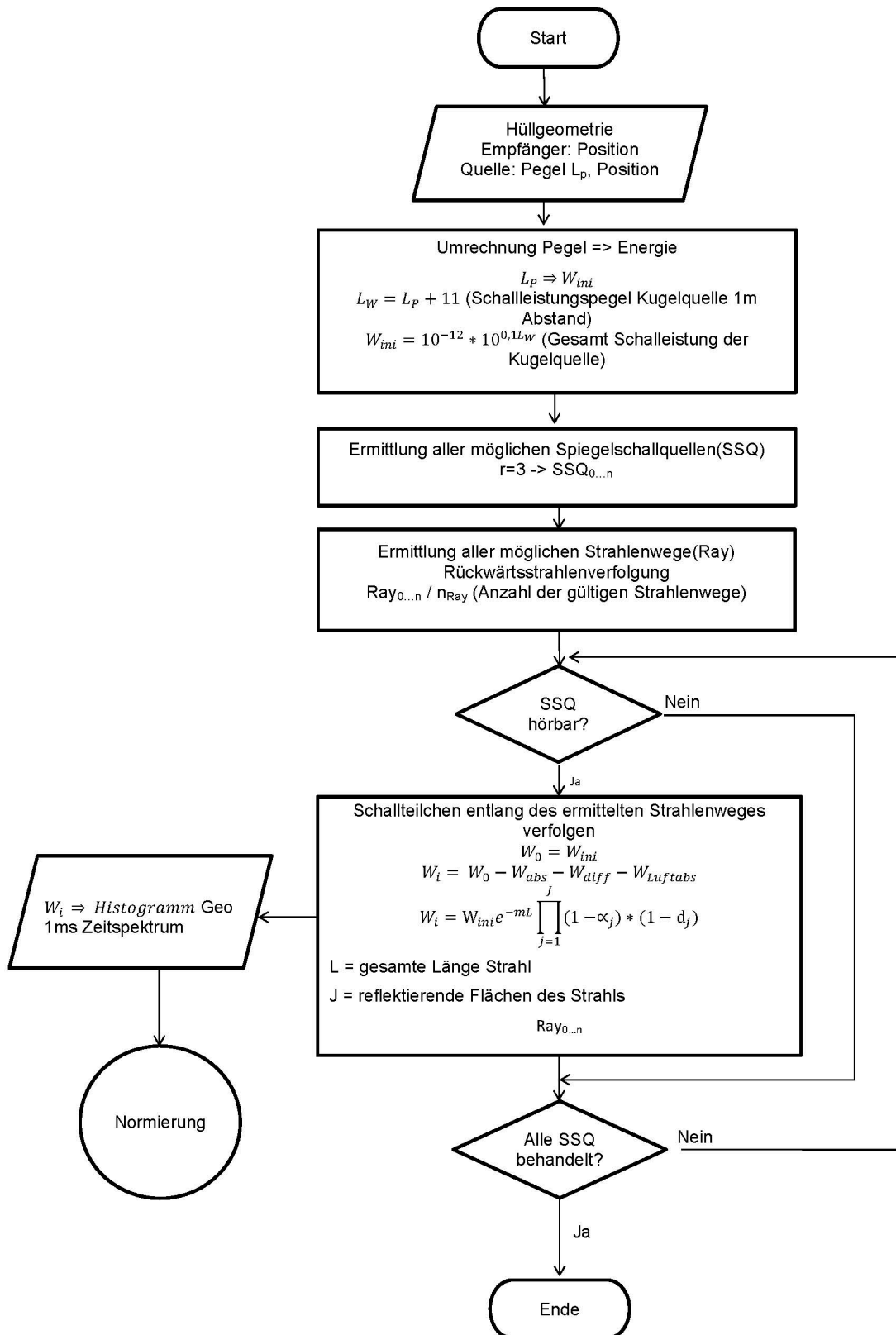


Bild 51: Ablaufdiagramm Simulation des geometrischen Anteils der Schallreflexion in Anlehnung an (Schröder 2011 ; Heinz 1994 ; Vorländer 1988)

Die originale Berechnung nach Borish Spiegelquellenmethode unter der Voraussetzung einer kugelförmigen Quelle ohne Luftabsorption erfolgt auf Basis des Schalldruckpegels in Bezug des Quotienten der Abstände zwischen Empfänger und Quelle bzw. Spiegelschallquelle:

$$g_i = \frac{R_0}{R_i} \prod_{i \in S} \alpha_i$$

mit:

$g_i$  = Koeffizient Amplitude am Empfänger zur Amplitude der Quelle

$R_0$  = Abstand Empfänger - Quelle

$R_i$  = Abstand des Empfängers zur Spiegelschallquelle

Die Schallteilchen werden nun nach Ankunftszeit am Empfänger und der enthaltenen Restenergie  $W_i$  in ein energetisches Impulsdiagramm eingetragen.

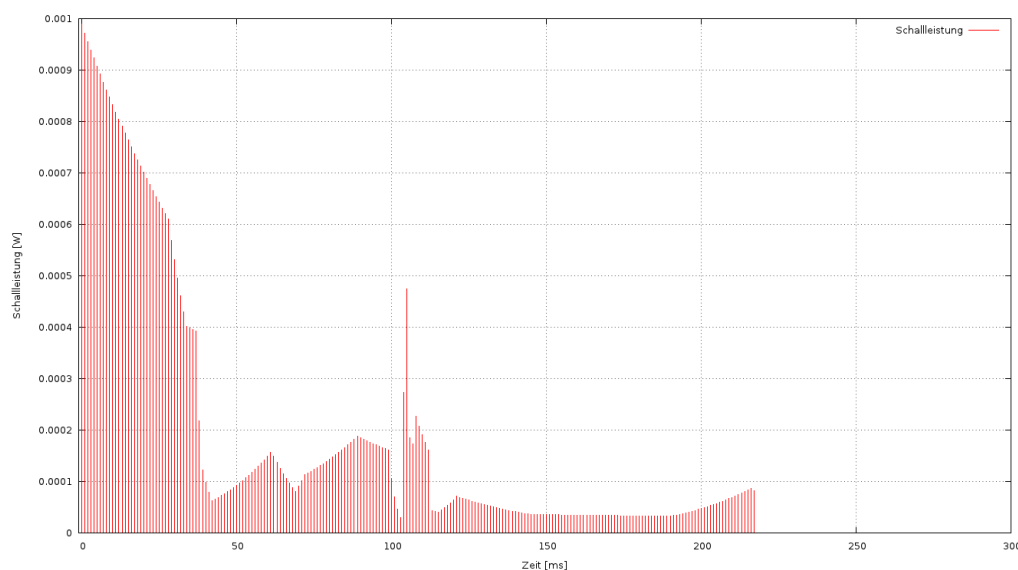


Bild 52: Energetische Impulsantwort nach der RAYSSQ Methode begrenzt auf 3 Reflexionen.

Das energetische Histogramm kann in ein Histogramm auf Schallpegelbasis in Abhängigkeit des Abstands zwischen Quelle und Empfänger ( $r$ ) umgerechnet werden.

$$W_{ini} = 10^{-12} * 10^{0,1L_W}$$

$$L_W = L_P + 11$$

$$L_P = W_{ini} - 11 - 20 \log_{10}(r)$$

### 8.2.2. Abschätzung des Berechnungsaufwands der geometrischen Reflexion

Bei  $n$  Begrenzungsflächen,  $q$  Signalquellen und der einer  $r$ -fachen Reflexionsordnung ergibt sich eine maximale Anzahl von  $q'$  Spiegelschallquellen:

$$q' = n * q^r$$

Für jede Spiegelquelle wird nun untersucht, ob sie von einem der Empfänger sichtbar, also hörbar ist. Dies geschieht durch einen Vektor  $EQ'$ , der im Falle der Hörbarkeit die Spiegelfläche schneidet oder diese eben nicht schneidet. Der Aufwand für die Sichtbarkeitsberechnung beträgt demnach:

$$q' * e$$

oder

$$e * n * q^r$$

Für die potentiell sichtbaren Spiegelschallquellen, muss anschließend nun noch in einer umgekehrten Strahlenverfolgung geprüft werden, ob nicht ein Hindernis im Strahlengang liegt. Jede Begrenzungsfläche wird nun geprüft, ob sie einen Schnittpunkt mit den  $r+1$  Strahlenabschnitten der  $r$ -ten Reflexion hat. Ist dies der Fall kommt der Strahl nicht beim Empfänger an. Der Aufwand beträgt damit:

$$(r + 1) * n * e * n * q^r$$

Der Aufwand für die Erzeugung der Spiegelschallquellen und die Sichtbarkeitsberechnung steigt also exponentiell mit der Reflexionsordnung und quadratisch mit der Anzahl der Begrenzungsflächen. Da keine effizienteren Algorithmen für eine sich ständig veränderte Begrenzungsgeometrie bekannt sind, wird die Spiegelquellenmethode auf maximal drei Reflexionen beschränkt.



### 8.2.3. Simulation des diffusen Anteils mittels Schallteilchenverfahren

Der diffuse Anteil der frühen Reflexionen wird mittels eines Schallteilchenmodells beschrieben. Eine Schallquelle sendet eine große aber bestimmte Anzahl von Schallteilchen aus, die in ihrer Summe die Abstrahlenergie der Schallquelle repräsentiert. Beim Auftreffen auf einer Wandfläche wird nun der durch den Diffusionsgrad  $d$  definierte Energieanteil dieses Teilchens diffus reflektiert. Der spekulare Energieanteil ist bereits durch die geometrische Spiegelquellenmethode behandelt worden und darf, um die Energiebilanz nicht zu verfälschen, nicht nochmals angesetzt werden. Schallteilchen, die auf ihrem Weg direkt auf eine Zählkugel(ZK) treffen werden detektiert und im Histogramm verzeichnet.

Ob das auftreffende Schallteilchen diffus reflektiert wird oder nicht wird anhand einer statistischen Methode entschieden. Trifft ein Schallteilchen auf eine Begrenzungsfläche, wird eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gezogen. Ist diese größer als der Diffusionsgrad  $d$ , so wird eine spekulare Reflexion angenommen; ist die Zufallszahl kleiner als  $d$ , so wird die Reflexion als diffus berechnet. Im Verlauf mehrere Reflexionen können bei der zufallsgesteuerten Auswahl der Reflexionsart entweder rein spekulare Reflexionsgänge, gemischte oder rein diffuse Reflexionsgänge ermittelt werden. Rein spekulare Reflexionsvorgänge werden durch den „diffusen Regen“ ignoriert, da diese eine spekulare Reflexion darstellen und die Energie dieser Teilchen bereits durch die Spiegelschallquellenmethode detektiert wird. Alle anderen werden Fälle werden durch den „diffusen Regen“ behandelt. Die spekularen Reflexionen, die eine diffuse „Vergangenheit“ haben werden nach dem geometrischen Reflexionsprinzip Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel behandelt. Trifft ein spekulär reflektiertes Schallteilchen eine Zählkugel wird dessen Energieanteil im Histogramm energetisch zeitbasiert registriert.

Um den diffusen Anteil der Reflexionsenergie durch die Verfolgung der Schallteilchen, die in großer Zahl und in sämtliche Richtungen in den Raum gesendet und reflektiert werden, korrekt abbilden zu können, müsste jedes Teilchen solange nachverfolgt werden bis die Energie des Teilchens Null ist. Darüber hinaus müsste, so die Modellvorstellung, jeder Reflexionspunkt wieder

die gleiche Anzahl an Teilchen aussenden. Dabei ist die Lambert'sche Verteilung der Reflexionsenergie in Abhängigkeit der Winkeldifferenz zwischen Flächennormalen und Abstrahlwinkel zu berücksichtigen. Dies würde die Anzahl der Teilchen exponentiell mit der Anzahl der Wandflächen steigen lassen und würde einen enormen Rechenaufwand bedeuten. Darüber hinaus ist die Wahrscheinlichkeit, dass zufällig in den Raum entsendete Teilchen einen Empfänger, der eigentlich nur aus einem theoretischen Punkt besteht quasi Null. Um den damit verbundenen großen Rechenaufwand zu vermeiden und dennoch eine hochwertige Modellierung der diffusen Wandabstrahlung zu erhalten schlägt (Heinz 1994 ; Schröder 15.09.2011) die Methode des „diffusen Regens“ vor, die folgend in groben Zügen erläutert wird.

Die grundlegende Idee dabei ist, nicht alle ausgesendeten Schallteilchen zu verfolgen, sondern eine auf die voluminöse Zählkugel mit einem bestimmten Radius  $r$  gerichteten „diffusen Regen“ zu betrachten. Der Vorteil der Methode besteht darin, dass durch die Volumeneigenschaft der Zählkugel eine realistische und berechenbare Wahrscheinlichkeit besteht, dass Teilchen auf die Zählkugel treffen. Durch die Beschränkung der Betrachtung auf einen festgelegten Winkel, nämlich des Abstrahlkegels vom Reflexionspunkt zur Zählkugel kann die Energieverteilung nach Lambert effizient berechnet werden. Es werden also nur die Teilchen betrachtet und verfolgt, die auch eine Zählkugel treffen. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit mit der die Abstrahlung in Richtung der Zählkugel erfolgt ermittelt und ihr Energieanteil im Histogramm berücksichtigt. Um ein exponentielles Ansteigen der Teilchen zu verhindern wird nach der energetischen Betrachtung der Reflexion in der Zählkugel ein Teilchen mit der nach der Reflexion an der Wandfläche gesamten restlichen Energie in eine zufällige Richtung in den Raum reflektiert und so lange weiterverfolgt, bis es die Terminierungsbedingung erfüllt hat.

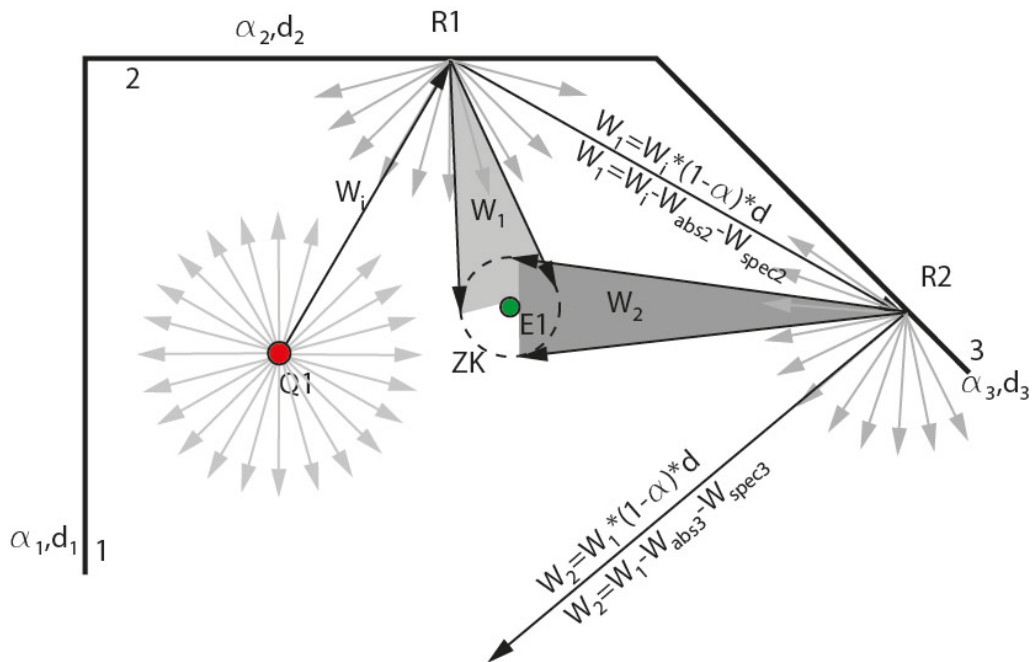


Bild 53: Schema des "diffusen Regens"

Unter Berücksichtigung der Luftabsorption und des Lambert'schen Kosinusetzes, wodurch die energetische Verteilung der Abstrahlung in Abhängigkeit der Winkeldifferenz der Flächennormalen zur Zählkugel ausgedrückt wird, kann die detektierte Energie wie folgt angenähert werden (Schröder 2011, S. 63):

$$W_s = W_t (1 - \alpha) * d * \left(1 - \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right) * 2 * \cos(\theta) * e^{-m * r}$$

$\alpha$  = Absorptionsgrad

$d$  = Diffusionsgrad

$\Theta$  = Winkel zwischen Flächennormalen und Zählkugel

$\gamma$  = Öffnungswinkel des Kegels zwischen Reflexionspunkt und Zählkugelhülle

$r$  = Abstand des Zählkugelmittelpunkt zum Reflexionspunkt

Die graphische Darstellung der geometrischen Verhältnisse verdeutlicht die Idee des diffusen Regens.

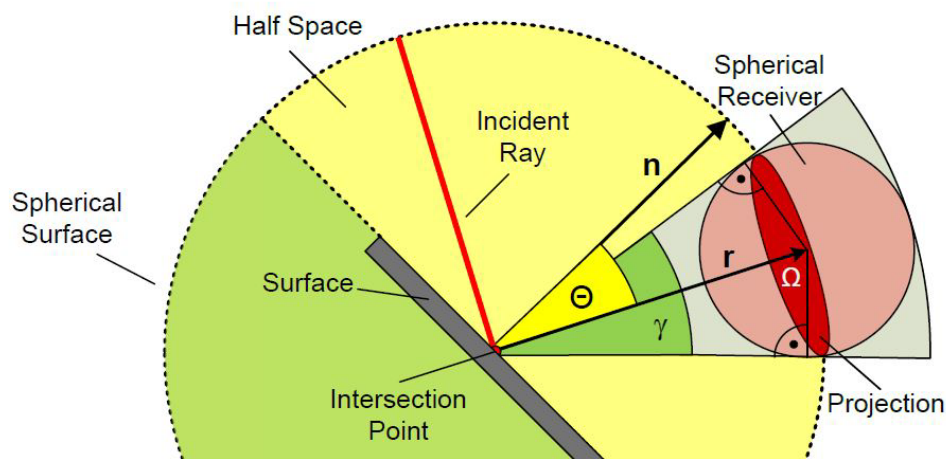


Bild 54: Geometrische Verhältnisse bei der Detektion mittels diffusem Regen (Schröder 15.09.2011, S. 63)

Die Fläche  $\Omega$  entspricht dem abgestrahlten diffusen Energieteil, der die Zählkugel (ZK) trifft. Diese ist abhängig von der Entfernung und Größe der Zählkugel und damit vom Öffnungswinkel  $\gamma$ . Die Energiemenge wird mit der Richtungswahrscheinlichkeit, die sich durch die Anwendung des Lambert'schen Kosinusetzes in Abhängigkeit der Winkelabweichung  $\Theta$  zur Flächennormalen der reflektierenden Fläche ergibt gewichtet und mit der Teilfläche  $\Omega$ , die den Anteil der detektierten Energie zur Gesamtenergie (gelbe Halbkugel) darstellt, ins Verhältnis gesetzt.

Nachdem die Energie des „diffusen Regens“ im Histogramm der Zählkugel zeitlich und betragsmäßig registriert wurde, wird die weitere Ausbreitung des diffusen Schalls bestimmt. Um die exponentielle Vervielfachung der Schallteilchen bei einer diffusen Reflexion zu vermeiden, wird der Diffusenergieanteil komplett auf ein einziges Schallteilchen übertragen, das vom Reflexionspunkt in eine zufällige Richtung abgestrahlt wird. Trifft das Schallteilchen auf eine Begrenzungsfläche, beginnt die Betrachtung wieder mit der zufallsgesteuerten Entscheidung, ob eine diffuse oder spekulare Reflexion stattfindet und wird dann, entsprechend dem gerade beschriebenen Verfahren, weiterbehandelt.

Schallteilchen, bei denen eine geometrische, also spekulare, Reflexion ermittelt wird, werden nach dem Snell'schen Gesetz reflektiert und mit der Energie  $W_i =$

$W_0 * e^{-mL} * (1-\alpha)$  wieder in den Raum zurückgeworfen. Trifft ein geometrisch reflektiertes Teilchen ein Zählkugel, so wird dieser Energieanteil zeitlich und betragsmäßig registriert. Eine Ausnahme hiervon stellen die Teilchen dar, deren Reflexionen ausschließlich geometrisch sind, also eine reine geometrische Historie haben. Diese sind nicht dem diffusen Anteil zu zurechnen, sondern exklusiv dem geometrischen Anteil. Da der geometrische Anteil aber durch die Spiegelquellenmethode detektiert wird, werden diese Anteile mit rein geometrischer Historie bei der „diffusen Regen“ Methode vernachlässigt und nicht im Histogramm gespeichert.

# Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

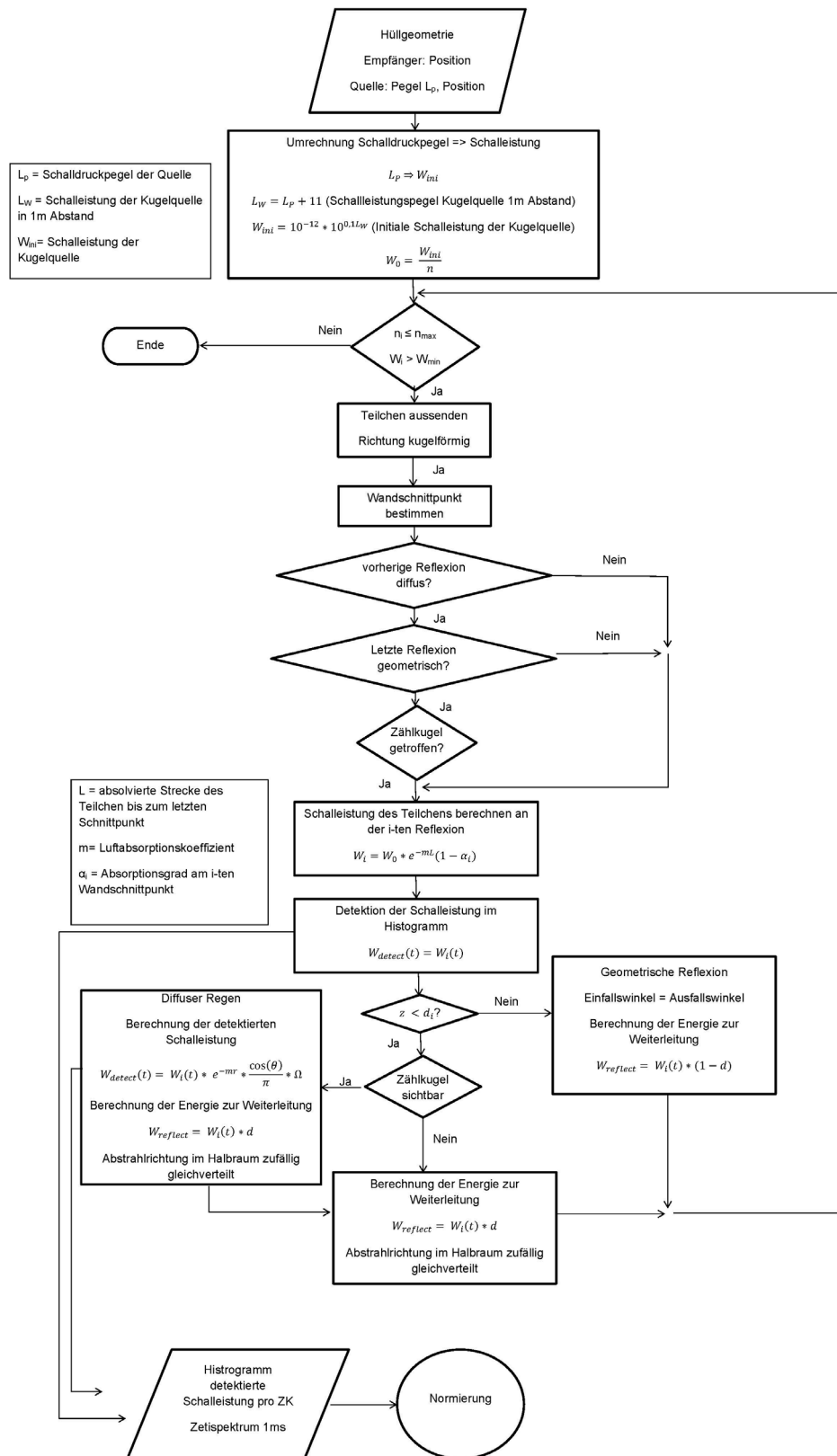


Bild 55: Ablaufdiagramm Simulation des diffusen Anteil der Schallreflexion in Anlehnung an (Schröder 15.09.2011 ; Heinz 1994 ; Vorländer 1988)

### 8.2.4. Anpassung des hybriden Energiemodells

Für die Verwendung der raumakustischen Simulation, im hier beschriebenen Formfindungsalgorithmus, wird auf die Erzeugung einer binauralen Impulsantwort verzichtet. Das hat zur Folge, dass einige akustische Kennwerte wie z.B. der Seitenschallgrad nicht bestimmt werden können. Die binaurale Impulsantwort ist aber nur sinnvoll unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Frequenzen eines Schallereignisses. Denn wenn eine richtungsbezogene Detektion der Reflexionen angestrebt wird, dann muss die frequenzbezogene Transformation durch den menschlichen Hörapparat mit berücksichtigt werden. Da aber die Materialeigenschaften und die Quelle der Einfachheit halber nur in einer gemittelten Frequenz von 1kHz betrachtet wird, ist es nicht sinnvoll eine richtungsorientierte und frequenzabhängige Detektion der Reflexionen durchzuführen.

Für die Erzeugung des Gesamtenergiediagramms müssen die Energieanteile der diffusen und geometrischen Reflexionen überlagert werden. Aus dem Gesamtenergiediagramm lassen sich dann die benötigten akustischen energiebasierten Kennwerte errechnen und in den Evaluationsalgorithmus integrieren.

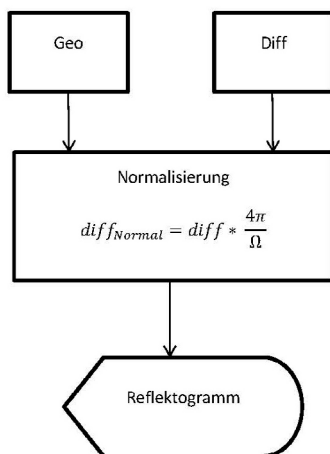


Bild 56: Schaubild Überlagerung der reflektierten Energieanteile aus der geometrischen und diffusen Modellvorstellung

Die unterschiedlichen Reflexionsanteile werden durch unterschiedliche Modellvorstellungen erzeugt. Deshalb sind sie nicht ohne Weiteres addierbar. Eine Normalisierung der verschiedenen Anteile kann erreicht werden, indem die

beiden Energieanteile auf eine gemeinsame Basis gestellt werden. Die gemeinsame Basis kann der Direktschalls bilden, denn er stimmt betragsmäßig in beiden Modellen überein. Der Direktschall ergibt sich für das jeweilige Modell folgendermaßen:

Berechnung des Direktschalls basierend auf dem Modell zur geometrischen Reflexion:

$$W_{geo,direkt} = \frac{C}{l^2} e^{-ml}$$

$$W_{geo,direkt} = \frac{W_0}{n} e^{-mL}$$

Berechnung des Direktschalls basierend auf dem Modell zur diffusen Reflexion:

$$W_{diff,direkt} = \frac{W_0}{n} * e^{-ml} * \frac{\Omega}{4\pi}$$

Durch Umformulierung und gleichsetzen der Direktschallberechnungen erhält man:

$$C = l^2 * n * W_0 * \frac{\Omega}{4\pi}$$

$$W_{geo,direkt} = W_{diff,direkt}$$

und daraus abschließend den Umrechnungsfaktor, um die Reflexionsanteile aus der Modellvorstellung der diffusen Reflexionen normalisieren zu können

$$W_{diff_{normal}} = W_{diff} * \frac{4\pi}{\Omega}$$

bzw.

$$W_{geo_{normal}} = W_{geo}$$

### 8.2.5. Experimenteller Vergleich der Simulations-Methode im Formfindungsalgorithmus und einer kommerziellen Raumsimulationssoftware

Die akustische Simulationsmethode im Formfindungsalgorithmus basiert auf der GEODIFF-Methode, deren Präzision durch Mess- und Hörvergleiche nachgewiesen ist. (Heinz 1994, S. 111)



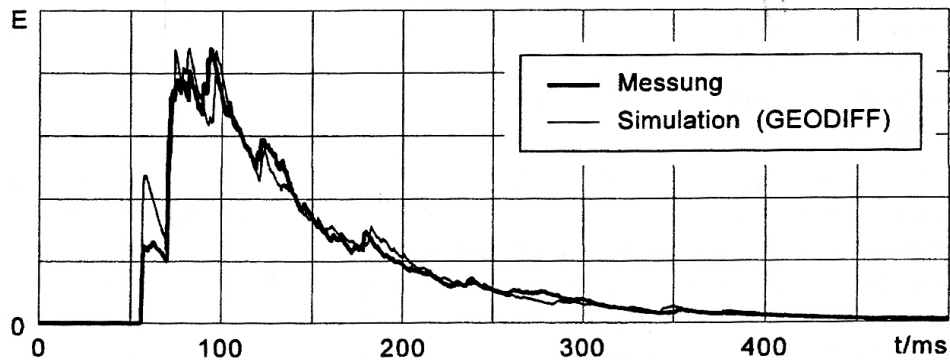


Bild 57: Vergleich des GEODIFF-Verfahrens und der Messung eines Raumes (Heinz 1994, S. 111)

Die Plausibilität der Funktionsweise, der für den Formfindungsalgorithmus adaptierten akustischen Simulation, soll in einem experimentellen Vergleich mit der kommerziellen Software CATT Acoustics (Dahlenbäck 1998) anhand einfacher Räume nachgewiesen werden. Für die geometrischen Reflexionen wird ein Quaderraum mit den identischen Material- und Geometrieeigenschaften, sowohl mit der kommerziellen Software CATT Acoustics, wie auch mit der Simulation, die im Design System angewendet wird, simuliert. Der Vergleich der Reflektogramme aus beiden Simulationen zeigt die Plausibilität der Anpassung.

Bezeichnung	Absorption ( $\alpha$ )	Diffusion (d)
Quaderraum	0,40	0,2

Tabelle 9: Verwendete Materialeigenschaften für den Simulationsvergleich

Der Vergleich der Simulationsergebnisse erfolgt von der 1. zur 3. Reflexionsordnung um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

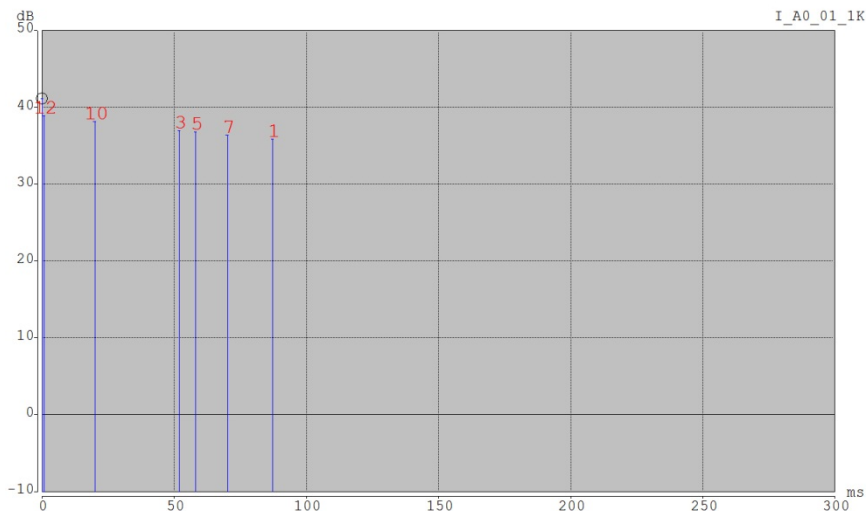


Bild 58: Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 1. Ordnung

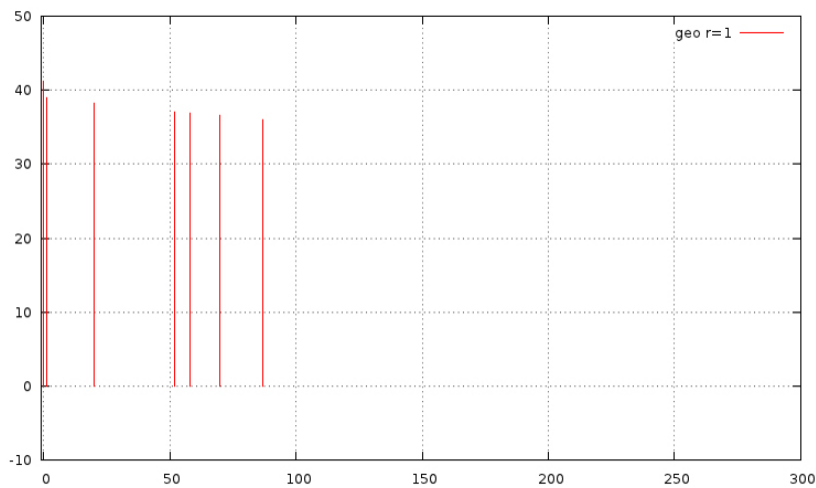


Bild 59: Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 1. Ordnung.

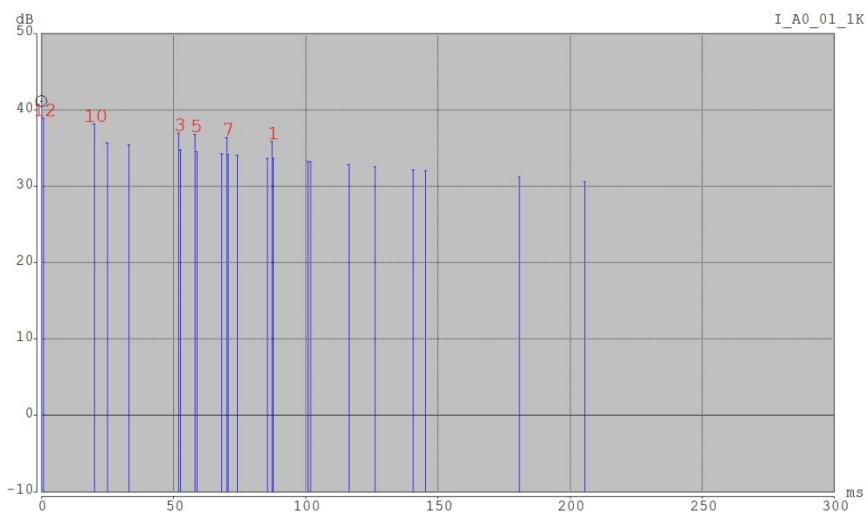


Bild 60: Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 2. Ordnung

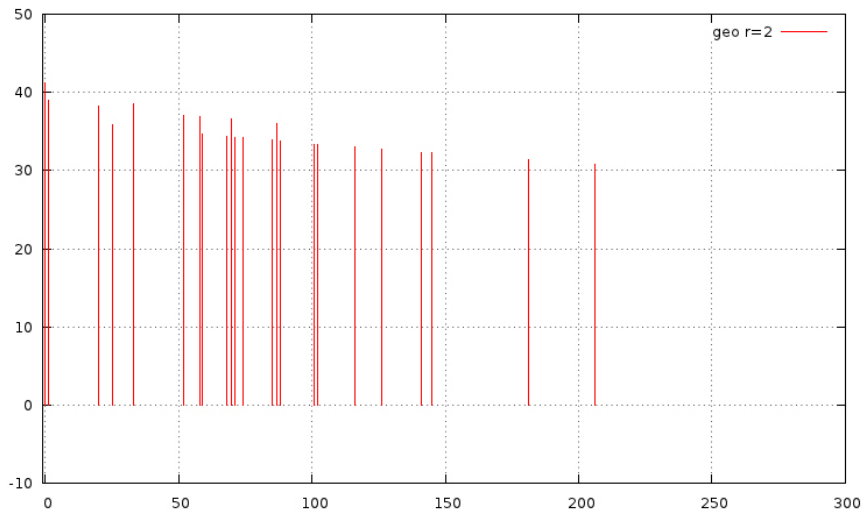


Bild 61: Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 2. Ordnung

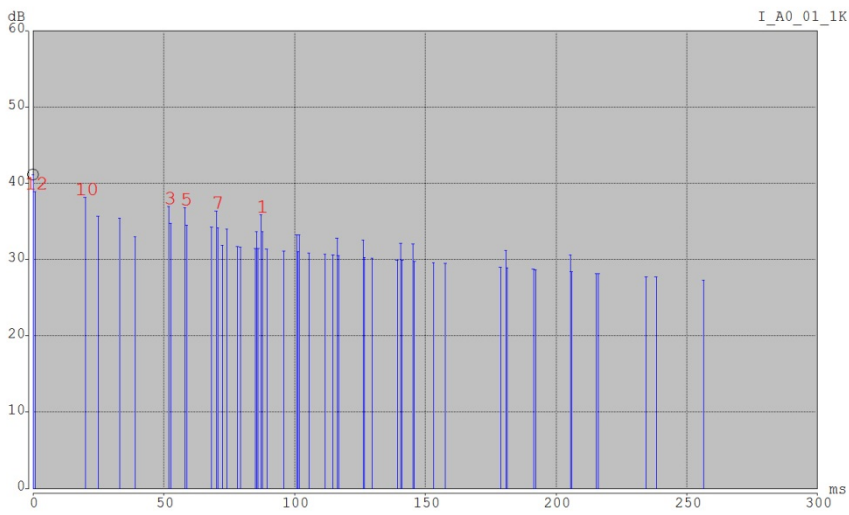


Bild 62: Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 3. Ordnung

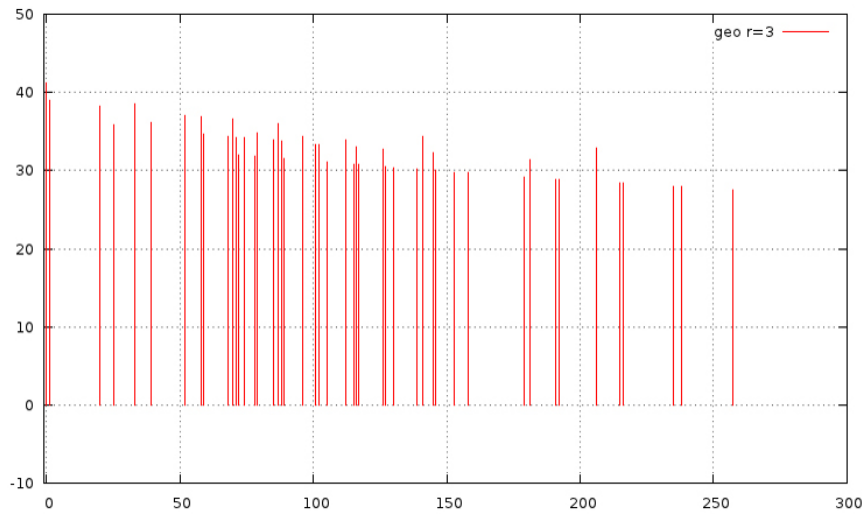


Bild 63: Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 3. Ordnung

Der Vergleich, der spekularen Reflexionen erster bis dritter Ordnung, zeigt eine exakte Übereinstimmung der Ergebnisse, sowohl was das zeitliche Ankommen der Reflexionen beim Empfänger, wie auch die Pegelgröße betrifft.

Für den Vergleich der diffusen Anteile werden die akustischen Kennwerte eines Raumes gewonnen; in diesem Fall die Berliner Philharmonie mit einheitlichen Absorption- und Diffusionswerten von 0,4 bzw. 0,2.

Kenngröße	Symbol	Simulation Formfindungsalgorithmus	Simulation Catt Acoustics™	Idealwertbereich	Differenz
Klarheitsmaß (Clarity)	$C_{80}$	4.5	4.08	-1 bis +3	0.42
Frühe Nachhallzeit (Early Decay Time)	$RT_{10}$	1.04	0.78	1,8 -2,3	0.26
Schwerpunktzeit	$T_s$	54.4	56.85	100 -150	-2.45

*Tabelle 10:* Darstellung ausgewählter akustischen Kenngrößen aus den Simulationsergebnissen für die Berliner Philharmonie mit einheitlichen Absorption- und Diffusionswerten von 0,4 bzw. 0,2

### 8.3. Akustische Bewertungskriterien

Die akustischen Bewertungskriterien ergeben sich wie in den Grundlagen bereits beschrieben aus der einschlägigen Forschung. Die akustische Bewertung des Raumes erfolgt durch den Vergleich von Soll und Ist-Werten des erzeugten Raumes bezogen auf seine akustische Verwendung, z.B. als Konzertsaal, oder Theatersaal. Die Ist-Werte werden mit Hilfe einer raumakustischen Simulation ermittelt. Die raumakustische Simulation liefert als Ergebnis die notwendigen und anerkannten raumakustischen Kennwerte für die eingegebene Geometrie-Material Kombination. Die Dimensionen der raumakustischen Kennwerte sind unterschiedlich und werden auf einen entsprechenden Qualitätswert zwischen 0 und 1 normalisiert damit sie in der Gesamtzielfunktion eingesetzt werden können.

Für die Transformation der akustischen Kennwerte in einen für die Evaluationsfunktion verwertbaren Gütewert (Q) wird folgende Funktion verwendet.

$$Q(x) = \begin{cases} 1, & L_u \leq x \leq L_o \\ \frac{k(L_o - L_u)}{x - L_o + k(L_o - L_u)}, & x > L_o \\ \frac{k(L_o - L_u)}{L_u - x + k(L_o - L_u)}, & x < L_u \end{cases}$$

mit

$Q(x)$ : Gütewert

$k$ : Faktor für die Steilheit der Kurve. Je größer  $k$  desto flacher wird die Kurve

$L_o / L_u$ : Grenze oben / unten

$x$ : akustischer Kennwert

Der Graph der Transformationsfunktion veranschaulicht deren Wirkungsweise. Liegt der Kennwert zwischen den Grenzen  $L_u$  und  $L_o$  dann wird der Gütewert  $Q=1$  zugewiesen, entfernt sich der Wert von den Grenzen, die den idealen akustischen Kennwertbereich begrenzen nimmt der Gütewert ab.

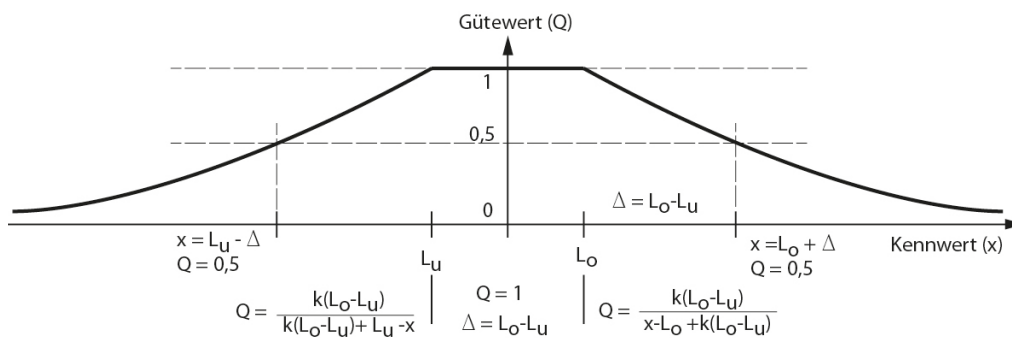


Bild 64: Graph der Transformationsfunktion der Gütewerte

Kenngröße	Zielbereich (Konzertraum)	L <sub>o</sub> -L <sub>u</sub>	Gütwerttransformation
RT <sub>60</sub>	1,4 bis 2,0	0,6	$1,4 \leq RT_{60}(x) \leq 2,0 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 0,6}$ $RT_{60}(x) < 1,4 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,6 + 2,0 - RT_{60}(x)}{k * 0,6}$ $RT_{60}(x) > 2,0 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,6 + RT_{60}(x) - 2,0}{k * 0,6}$
C <sub>80</sub>	-1 bis +3	4	$-1 \leq C_{80}(x) \leq 3 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 4}$ $C_{80}(x) < -1 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 4 + (-1 - C_{80}(x))}{k * 4}$ $C_{80}(x) > 3 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 4 + (C_{80}(x) - 3)}{k * 4}$
RT <sub>10</sub>	1,8 -2,3	0,5	$1,8 \leq RT_{10}(x) \leq 2,3 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 0,5}$ $RT_{10}(x) < 1,8 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,5 + 1,8 - RT_{10}(x)}{k * 0,5}$ $RT_{10}(x) > 2,3 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,5 + RT_{10}(x) - 2,3}{k * 0,5}$
T <sub>I</sub>	10-25 (20)	15	$10 \leq T_I(x) \leq 25 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 15}$ $T_I(x) < 10 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 15 + 10 - T_I(x)}{k * 15}$ $T_I(x) > 25 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 15 + T_I(x) - 25}{k * 15}$
LF	25-40	15	$25 \leq LF(x) \leq 40 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 15}$ $LF(x) < 25 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 15 + 25 - LF(x)}{k * 15}$ $LF(x) > 40 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 15 + LF(x) - 40}$
T <sub>s</sub>	100 -150	50	$100 \leq T_s(x) \leq 150 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 50}$ $T_s(x) < 100 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 50 + 100 - T_s(x)}{k * 50}$ $T_s(x) > 150 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 50 + T_s(x) - 150}{k * 50}$
EK	1,5-1,8	0,3	$1,5 \leq EK(x) \leq 1,8 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 0,3}$ $EK(x) < 1,5 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,3 + 1,5 - EK(x)}{k * 0,3}$ $EK(x) > 1,8 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,3 + EK(x) - 1,8}{k * 0,3}$
IACC <sub>E;500,1k,2k</sub>	0,28-0,59	0,31	$0,28 \leq IACC(x) \leq 0,59 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 0,31}$ $IACC(x) < 0,28 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,31 + 0,28 - IACC(x)}{k * 0,31}$ $IACC(x) > 0,59 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 0,31 + IACC(x) - 0,59}{k * 0,31}$
G	4 – 5,5	1,5	$4 \leq G(x) \leq 5,5 \rightarrow Q(x) = \frac{1}{k * 1,5}$ $G(x) < 4 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 1,5 + 0,28 - G(x)}{k * 1,5}$ $G(x) > 5,5 \rightarrow Q(x) = \frac{k * 1,5 + G(x) - 0,59}{k * 1,5}$

Tabelle 11: Transformationstabelle der Wertebereiche x in Gütwerte Q(x) {0,1}

Die Reduktion des Gütwertes wird in Relation zur Größe des Idealbereiches gesetzt. Ist der Idealbereich relativ groß, ist also die Toleranz des menschlichen Gehörs gegenüber diesem Wert groß, so wird auch die Kurve, die die Reduktion des Gütwertes repräsentiert etwas flacher. Ist der Idealbereich relativ klein, reagiert also das Gehör empfindlich auf diesen Wert, so wird die

Gütekurve steiler abfallen. Konkret wird die Relation so formuliert: Ist der zu betrachtende akustische Kennwert ( $x$ ) von der Grenze des Idealbereichs ( $L_o / L_u$ ) genau so weit entfernt wie die Größe  $\Delta$  des Idealbereichs, so wird der Gütewert  $Q = \frac{1}{2}$  zugewiesen. Durch einen zusätzlichen Faktor  $k$  kann die Steilheit der Kurve darüber hinaus manuell beeinflusst werden.

Die unterschiedlichen akustischen Kennwerte werden gleichgewichtet in den akustischen Qualitätswert integriert.

$$q_{akustisch} = \frac{1}{n} * \sum_i^n q_i \mid q_i \in \mathbb{R}_+ \{q_i \leq 1\}$$

$$q_{akustisch} = \frac{1}{9} (q_{RT60} + q_{C80} + q_{RT10} + q_{Ti} + q_{LF} + q_{Ts} + q_{EK} + q_{IACC} + q_G)$$

#### 8.4. Ästhetisch architektonische Bewertungskriterien

Die akustische Qualität eines Raumes kann durch geeignete Kriterien beschrieben werden. Diese Kriterien wurden durch Hörexperimente mit Probanden und durch die Intersubjektivierung der Wahrnehmungsergebnisse festgelegt<sup>44</sup>. Entsprechende formale Kriterien, die die ästhetisch-architektonische Qualität eines Raumes allgemeingültig beschreiben würden, sind derzeit nicht bekannt. Genau wie die akustische Qualität unterliegt auch die Gesamttraumwahrnehmung einer individuellen Bewertung. Eine allgemeine Übereinkunft über die Messgrößen eines Raumes und deren Bewertung entsprechend der akustischen Raumqualität ist bisher nicht bekannt. Dennoch ist auch für die visuelle Wahrnehmung von Räumen das Verfahren der Intersubjektivierbarkeit von Raumerfahrung in Verbindung mit objektiven Kriterien anwendbar, wie erste Untersuchungen im Bereich der intersubjektivierten Raumwahrnehmung zeigen (Franz 29.08.2005). Von einer umfassenden und detaillierten Beschreibung der Raumqualität, wie sie für die Raumakustik bereits vorhanden ist, kann man bei der visuellen oder gar ganzheitlichen Raumwahrnehmung nicht sprechen. Ungeachtet dessen, dass die Qualität eines Raumes nicht allgemeingültig formal beschrieben werden

---

<sup>44</sup> Beranek 2004 beispielsweise vergleicht und dokumentiert die Meinung bekannter Dirigenten über verschiedene Konzerthäuser und Opernsäle mit den gemessenen physikalischen Werten.

kann, ist es aber möglich morphologische Eigenschaften eines Raumes zu analysieren. Aufgrund morphologischer Untersuchungen lassen sich Objekte mit einander vergleichen oder voneinander differenzieren. Dabei bleibt eine qualitative Bewertung erst einmal außen vor. Die Biologie beispielsweise wendet das Verfahren der morphometrischen Analyse (Bookstein 1997; Zelditch u. a. 2004) an, um evolutionsbedingte Entwicklungen differenzieren zu können und, um Individuen entsprechenden Familien und Klassen zuordnen zu können. Die Morphologie beschreibt also die Gestalt der Individuen anhand ausgewählter Kriterien, sodass sie dadurch voneinander unterscheidbar oder vergleichbar werden. Durch den oben beschriebenen Geometriesynthesealgorithmus wird aus dem genetischen Code eine relativ universelle und wenig spezifische Struktur aus Dreiecken erzeugt. Der Algorithmus an sich erzeugt ein willkürliches Objekt. Die erzeugten Hüllen bestehen aus Dreiecken, die miteinander verbunden sind, aber in Ihrer Größe, Ausprägung und Anordnung zu einander unabhängig sind. Die spezifische Gestalt eines Raumes wird also durch die spezifische Ausprägung der Dreiecke und deren Relation zu einander geprägt. Durch die Formulierung und Vorgabe gestaltprägender Kriterien, nach denen sich die Räume ausbilden, entstehen Objekte die ihrer Morphologie beschränkt sind und daher so etwas wie eine morphologische Familie oder Klasse bilden. Basierend auf den ästhetischen Überlegungen Benses (siehe 3.2.1), werden ästhetische Zustände dadurch provoziert, dass relativ unwahrscheinliche Ausprägungen innerhalb eines festgesetzten Rahmens erzeugt werden. Wenn also Ausprägungen sich nicht mehr rein zufällig bilden können, sondern sich entsprechend bestimmter Vorgaben nur unwahrscheinlich ausbilden, dann beinhalten diese unwahrscheinlichen Zustände ästhetisches Potential. Bense sieht in allen statistischen Prozessen ästhetisches Potential, da eben der Entstehungsprozess nicht willkürlich ist, sondern einer bestimmten (Un-)Wahrscheinlichkeit unterliegt. Differenzierte Bedingungen dieser (Un-)Wahrscheinlichkeit schaffen unterschiedliche ästhetische Klimata, in denen sich unterschiedliche Gestalten entwickeln. Im Folgenden werden einzelne morphologischen Kriterien beschrieben, die im evolutionären Algorithmus angewendet werden können.



#### 8.4.1. Anzahl der Dreiecke

Das Kriterium „Anzahl der Dreiecke“ beschreibt die gewünschte Anzahl von Dreiecken, aus denen die Raumbülle gebildet werden soll. Das Kriterium ist ein relativ triviales, welches aber ein grundsätzliches Kriterium der morphologischen Betrachtung ist. Zur Bewertung des Kriteriums wird die Anzahl der Dreiecksflächen mit einem Vorgabebereich (min./max.) abgeglichen und in die globale Bewertungsfunktion integriert. Wie in allen Bewertungstransformationen wird auch hier die in Kapitel 8.3 beschriebene Transformationsfunktion der Güterwerte für eine Normierung zwischen den Werten 0 und 1 verwendet.

#### 8.4.2. Innenwinkel der Dreiecke

Die Gestalt der einzelnen Dreiecksflächen, aus denen die Hülle gebildet wird, kann anhand der Innenwinkel des jeweiligen Dreiecks analysiert werden. Durch die Vorgabe eines Maximal und Minimalwertes für die Winkelgröße wird die Gestalt der Dreiecksflächen eingegrenzt. Würden beispielsweise für beide Werte also max. und min  $60^\circ$  vorgeben, dann würden gleichseitige Dreiecke mit dem Güterwert 1 bewertet werden. Bei min =  $30^\circ$  und max =  $60^\circ$  würden spitzere Dreiecke auch mit 1 bewertet werden können, jedoch würden Dreiecke, die spitzere Winkel als  $30^\circ$  einschließen schlechter bewertet.

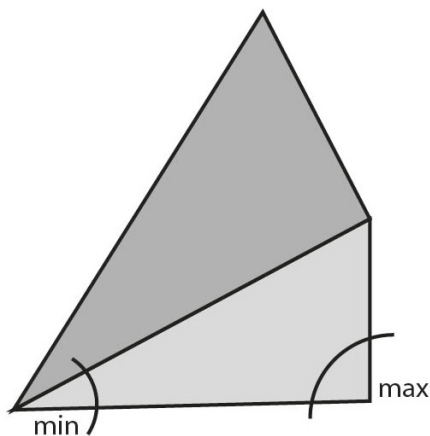


Bild 65: Darstellung der Innenwinkel der Flächenkanten

### 8.4.3. Eingeschlossener Winkel

Ein weiteres morphologisches Merkmal, das in die Bewertungsfunktion einfließt ist der durch zwei Dreiecksflächen eingeschlossene Winkel. In dieser Funktion wird, ebenso wie bei den Innenwinkeln der einzelnen Dreiecke, ein Wertebereich (min/max) vorgegeben, in welchem sich der eingeschlossene Winkel idealerweise befinden sollte. Bei Übereinstimmung mit dem Vorgabebereich wird der Gütewert 1 zugewiesen, Abweichungen werden entsprechend der Transformationsfunktion behandelt.

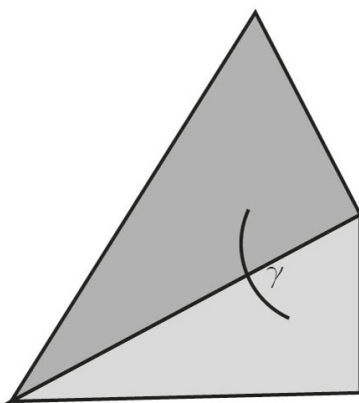


Bild 66: Darstellung des eingeschlossenen Winkels  $\gamma$ .

### 8.4.4. Größe der Dreiecksflächen

Wichtiges morphologisches Merkmal, insbesondere in Zusammenhang mit den materiellen Eigenschaften, ist die Größe der Einzelflächen. Aus dem Vergleich mit einem vorgegebenen Wertebereich wird wiederum die durchschnittliche Abweichung errechnet und in eine Bewertung transformiert.

### 8.4.5. Achsenausrichtung der Flächen

Grundlage für die Entwicklung der Hülle ist die Quellen-Empfänger-Konstellation. In ihr ist, neben anderen Eigenschaften, die räumliche Lage der Quellen und Empfänger in Bezug zum globalen Koordinatensystem gegeben. Das bedeutet entgegen der morphologischen Betrachtungsweise, in der die Orientierung außer Betracht bleibt, kann im vorliegenden Fall die globale Orientierung der Flächen als Kriterium herangezogen werden, da sich die Gestalt durch eine räumlich fixierte Konstellation ausprägt und somit im

Koordinatensystem verortet ist. Wie in den meisten oben beschriebenen Kriterien wird auch hier eine mittlere Abweichung der Flächen von den globalen Koordinatenachsen in einen Gütewert transformiert.

#### **8.4.6. Vertex- Ordnung**

Die Vertex-Ordnung beschreibt die Anzahl der Dreiecksflächen, die sich in einem Punkt (Vertex) treffen. Da sich die polyederartigen Hüllen aus Tetraedern zusammensetzen sind immer mindestens 3 Dreiecke in einem Eckpunkt kumuliert.

#### **8.4.7. Gesamtoberfläche**

In der morphometrischen Analyse wird die reine Gestalt ohne Einbeziehung der Größe betrachtet. Zwei Objekte können in ihrer Gestalt übereinstimmen, ohne über dieselbe Größe zu verfügen. Die hier betrachteten Hüllen stehen aber in Relation zur vorgegebenen Empfänger-Quelle-Konstellation, die eine definierte räumliche Ausprägung besitzt und dadurch eine definierte Größe. Daher kann auch die absolute Größe der Hülle als morphologisches Kriterium herangezogen werden.

#### **8.4.8. Gesamtvolumen**

Neben der Oberfläche ist auch das Gesamtvolumen im Zusammenhang mit der Empfänger-Quellen-Konstellation als morphologisches Kriterium im erweiterten Sinne hilfreich. Denn im Verhältnis zur vorgegebenen Empfänger-Quellen-Konstellation ist ein unterschiedliches Volumen im morphologischen Sinne durchaus ein Unterscheidungskriterium. Obwohl in einer strengen Morphologie unterschiedliche Größen kein Unterscheidungsmerkmal sind.

#### **8.4.9. Zusammenfassung Bewertung**

Eine konkrete Aussage über die zu erwartende Gesamtform kann aus diesen morphologischen Kriterien nicht getroffen werden. Das würde auch der Idee der Formfindung entgegenstehen. Es ist aber im Sinne Benses sicherlich zu erwarten, dass durch das Anwenden dieser statistischen Verfahren in Bezug auf die morphologische Ausprägung „unwahrscheinliche“ und damit signifikante

und mit ästhetischem Potential ausgestattete Ergebnisse erzielt werden können, die nicht der Beliebigkeit ausgesetzt sind.

Die statistischen Verfahren werden angewendet, um keine deterministische Vorgabe zu machen, sondern innerhalb der Festlegungen gewisse Abweichungen zu zulassen.

## 8.5. Kriterien für die Nutzbarkeit

### 8.5.1. Sichtverbindungen

Ein wichtiges programmatisches Kriterium ist das Bestehen der Sichtverbindung zwischen Empfänger und Quelle. Durch die Einhaltung dieses Kriteriums, ist nicht nur eine gute Sicht auf die Aufführenden gewährleistet, sondern auch die notwendige Voraussetzung für den Erhalt des Direktschalls am Empfänger. Nur bei Einhaltung dieser Bedingung ist auch eine zuverlässige raumakustische Simulation möglich. So sind also die Sichtbeziehungen essentieller Bestandteil der qualitativen Bewertung, als auch technische Voraussetzung für die raumakustische Berechnung.

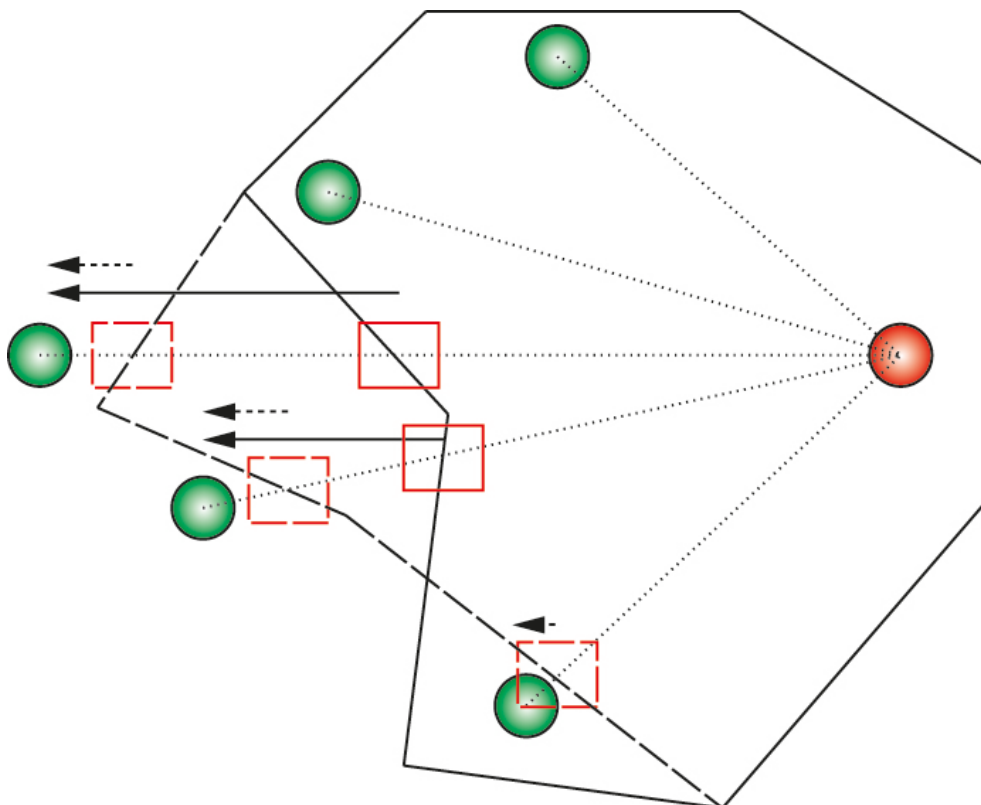


Bild 67: Schema der Berücksichtigung von Sichtverbindungen. Das gestrichelte Individuum ist besser zu bewerten, da die Summe der Abstände kleiner ist.

Aus technischer Sicht ist die Verletzung der Sichtverbindungsbedingung nicht zu tolerieren, da eine raumakustische Simulation nicht sinnvoll durchgeführt werden kann. Aus Sicht des Entwerfers aber kann es durchaus sinnvoll sein, Individuen weiter zu verfolgen, die zwar die Sichtverbindungsbedingung verletzen, dies aber in einer Art und Weise tun, die bei weiterer Entwicklung eine Einhaltung der Sichtverbindungsbedingung erwarten lassen. So unterliegt die Sichtverbindungsbedingung nicht über eine Entweder-Oder-Bewertung, sondern einer Wieviel-Bewertung. Wenn die Sichtverbindung durch Flächen unterbrochen ist, so werden die Abstände der Schnittpunkte der Sichtverbindungsline mit den Flächen addiert und ergeben in ihrer Summe einen Bewertungswert. Da keine raumakustische Simulation durchgeführt werden kann wird das Individuum entsprechend des Bewertungswertes aus der Sichtlinienverbindungsprüfung mit einer Straffunktion entsprechend 5.3.2 behandelt, aber nicht aus der Population entfernt.

Um sinnvolle Ergebnisse im architektonischen Sinne zu erhalten, sollte das generierte Volumen in seiner Gesamtausdehnung begrenzt sein. Hierfür wird ein Maximalvolumen vorgeschlagen, das über die Kantenlänge eines Würfels vorgegeben werden kann. Diese Variante wird einer Berechnung des tatsächlichen Volumens vorgezogen, da die Schnittprüfung von Flächen zur Einhaltung der Selbstdurchdringungsbedingung an anderer Stelle schon eingesetzt wird. Und außerdem kann durch eine alternative Formulierung des Maximalvolumens auf Anforderungen, die sich aus der Einbindung in die architektonische Umgebung ergeben, eingegangen werden. Das erzeugte Volumen wird also auf Schnittpunkte mit dem vorgegebenen Maximalvolumen untersucht. Mit jeder Verschneidung mit dem Maximalvolumen wird dem Individuum eine Strafbewertung zugewiesen. Die Definition eines Minimalvolumens ist nicht notwendig, da durch die Einhaltung der Sichtverbindungsbedingung schon eine entsprechende Beschränkung vorhanden ist.

### **8.5.2. Neigung der Flächen**

Das gesuchte Volumen ist gedacht als ein räumliches Konzept für eine akustische Hülle. Folglich sollte das Volumen in der Lage sein, Platz für Zuhörer

zur Verfügung zu stellen. In der Simulation sind die Empfänger durch Zählkugeln repräsentiert. An diesen Stellen wird die zu erwartende Raumakustik vorhergesagt. D.h. an diesen Stellen kann eine Aussage über die akustische Qualität des Raumes gemacht werden. Daher wird das Volumen an diesen Stellen dahingehend untersucht, ob dort nutzbare Plätze für Zuhörer möglich sind. Um Flächen darauf hin zu prüfen, ob sie als Aufenthaltsflächen dienen können, wird die Neigung der Flächen, die sich im Bereich der Zählkugeln befinden betrachtet. Durch die Vorgabe der räumlichen Empfänger / Quelle Konstellation besteht ein Bezug zu einem Koordinatensystem. Die Neigung der Flächen können also in Beziehung zu diesem Koordinatensystem ermittelt werden. Durch die Vorgabe einer maximalen Raumwinkelabweichung zur horizontalen Achsenrichtung kann in Verbindung mit der Sichtlinienprüfung davon ausgegangen werden, dass nutzbare Flächen in Bereich der Zählkugeln entstehen. Der Raumwinkel der Teilflächen wird anhand der Flächennormalen ermittelt.

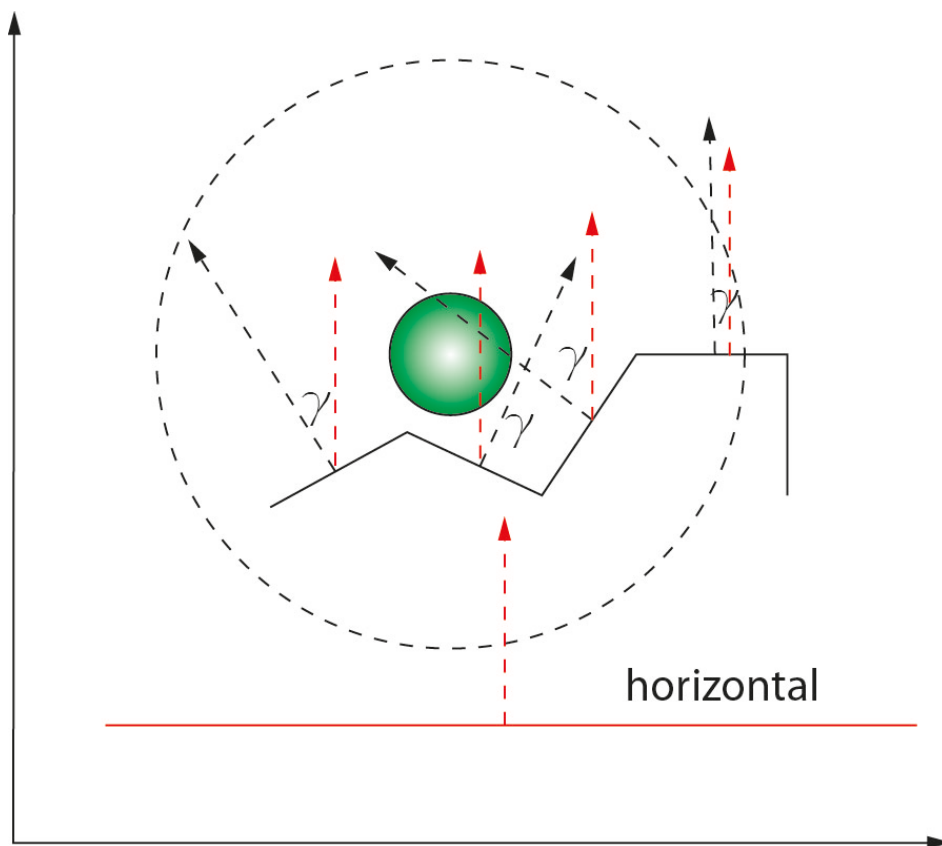


Bild 68: Vereinfachtes 2D-Schema für die Erläuterung der Abweichung des Raumwinkels von der globalen Horizontalen

Als Bewertungsmaß kann die durchschnittliche Abweichung der Flächen zum maximalen Vorgabewert herangezogen werden.

#### **8.5.1. Kopffreiheit**

Um einen Hörerplatz bereitstellen zu können, ist es notwendig, dass sich dort Menschen komfortabel aufhalten können. Das bedingt, dass über der Zählkugel, die Zuhörer repräsentiert, ausreichend Platz, also Abstand zur Raumhülle, gegeben ist. Dies wird durch eine einfache Abstandsanalyse zwischen Mittelpunkt der Zählkugel und des sich über der Zählkugel befindlichen Dreiecks bewerkstelligt. Die durchschnittliche Abweichung aller Abstände wird zur Bewertung herangezogen

#### **8.5.2. Abstand Bodenfläche**

Ergänzend zur Kopffreiheit wird auch der Abstand der Dreiecksfläche unterhalb der Zählkugel analysiert, mit einem Vorgabewert verglichen und als Kriterium in der Bewertungsfunktion zur Verfügung gestellt. Wie bei der Flächenneigung und der Kopffreiheit, wird auch beim Bodenabstand die durchschnittliche Abweichung als Bewertungsgröße betrachtet.

#### **8.5.3. Akustisch transparente Konstruktion**

Eine grundsätzlich andere Herangehensweise stellt die Nichtbeachtung der horizontalen Ausrichtung und des Abstandes der Flächen unterhalb der Empfänger dar. Durch eine akustisch transparente Konstruktion zusätzlicher Flächen kann die Funktionalität der Betrachtungsbereiche gewährleistet werden. Diese würde nur der Herstellung der Funktionsfähigkeit dienen und würde aber auch die akustische Situation keinen Einfluss haben. Solche Konstruktionen werden beispielsweise in reflexionsarmen Räumen verwendet.

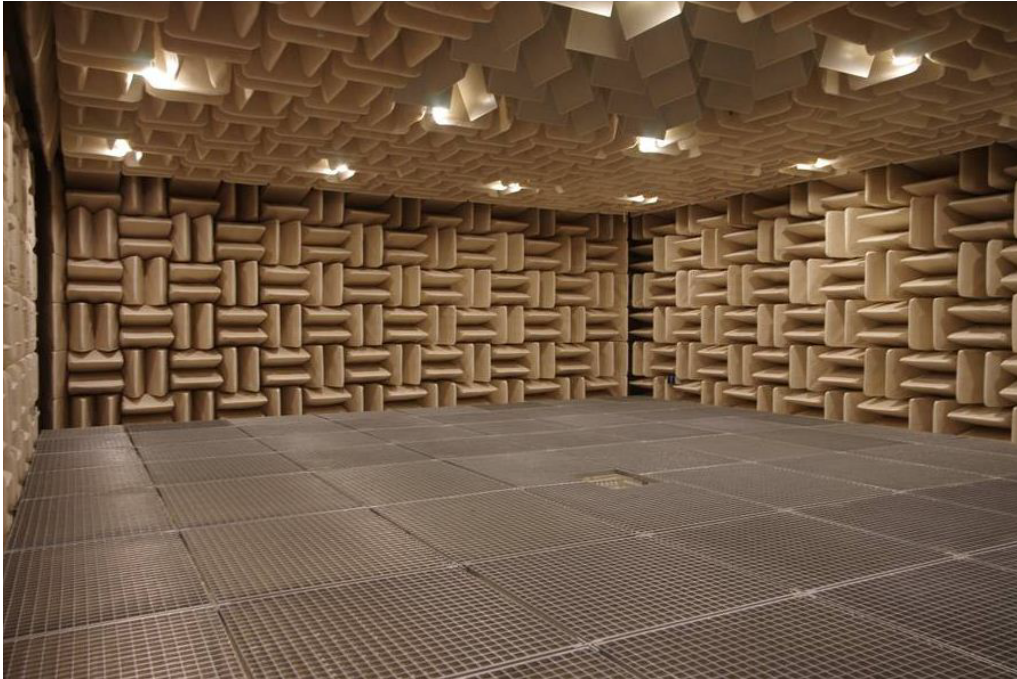


Bild 69: Reflexionsarmer Raum an der FU Berlin (Paschereit)

Erreicht werden kann die akustische Transparenz, durch eine sehr offene Struktur, wie beispielsweise eine Gitterstruktur, mit verhältnismäßig großen Öffnungsanteilen und im Verhältnis zur Wellenlänge sehr kleinen Reflexionsflächen.

Durch eine solche Struktur kann die Entwicklung der akustischen Hülle, ohne die funktionale Anforderung eines horizontalen Bodens entwickelt werden. Durch die bewusste Ignoranz gegenüber dieser funktionalen Anforderung eröffnet sich eine neue Kategorie von Lösungsmöglichkeiten, die im akademischen Kontext und in der Entwicklung von Raumkonzepten seine Berechtigung findet. Es werden dadurch im Prinzip schwebende Zuhörerplätze möglich, die durch die Konstruktion von akustisch transparenten Ebenen realisierbar werden.

### **8.6. Populationskonzept**

Die Entwicklung von parallelen Individuen innerhalb einer Population verspricht eine höhere Diversität während des Evolutionsvorganges. Bei einem Evaluationsprozess, der in einem sehr inhomogenen Ergebnisraum nach Lösungen sucht, ist eine hohe Diversität der Individuen von Nöten, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. Das Populationsprinzip entspricht einer



parallelen Suche an verschiedenen Orten im Ergebnisraum. Diese Orte sind dann im Ergebnisraum breit gestreut verteilt, wenn die Diversität der einzelnen Individuen möglichst unterschiedlich ist. Um einen zielstrebigem Prozess zu erhalten, wird die Auswahl zur Zusammensetzung der Populationen mit einem gewissen Selektionsdruck ausgestattet. Das bedeutet, dass Individuen nicht rein zufällig für die Population ausgewählt werden, sondern die Auswahl sich nach bestimmten Kriterien richtet. Diese Kriterien sind vom Nutzer zu bestimmen und wurden bereits unter 5.2.3 aufgeführt und näher erläutert. Neben den Kriterien ist auch die Methode der Selektion, vom Nutzer zu definieren. Die unterschiedlichen Selektionsmethoden haben auch Einfluss auf die Diversität der Population.<sup>45</sup> Da sich die Elite- oder Trunkierungsselektion in Ihrem Ergebnis nur geringfügig von der fitnessproportionalen Selektion unterscheidet, wird im konkreten Fall die Eliteselektion, neben der rein zufälligen Auswahl der Population, der Turnierselektion und die SUS-Selektionsmethode im evolutionären Algorithmus verwendet.

Neben der Selektion spielt auch die Integrationsmethode der Nachkommen in die neue Generation eine Rolle. Im Algorithmus kann zwischen der ersetzenden und überlappenden Methode<sup>46</sup> unterschieden werden.

---

<sup>45</sup> Die unterschiedlichen Selektionsmethoden und deren Einfluß sind in den Kapiteln 0, 5.2.6, 5.2.7 und 5.2.8 bereits erläutert worden.

<sup>46</sup> Erläuterung zur überlappenden bzw. ersetzenden Integration sind im Kapitel 5.2.10 zu finden.

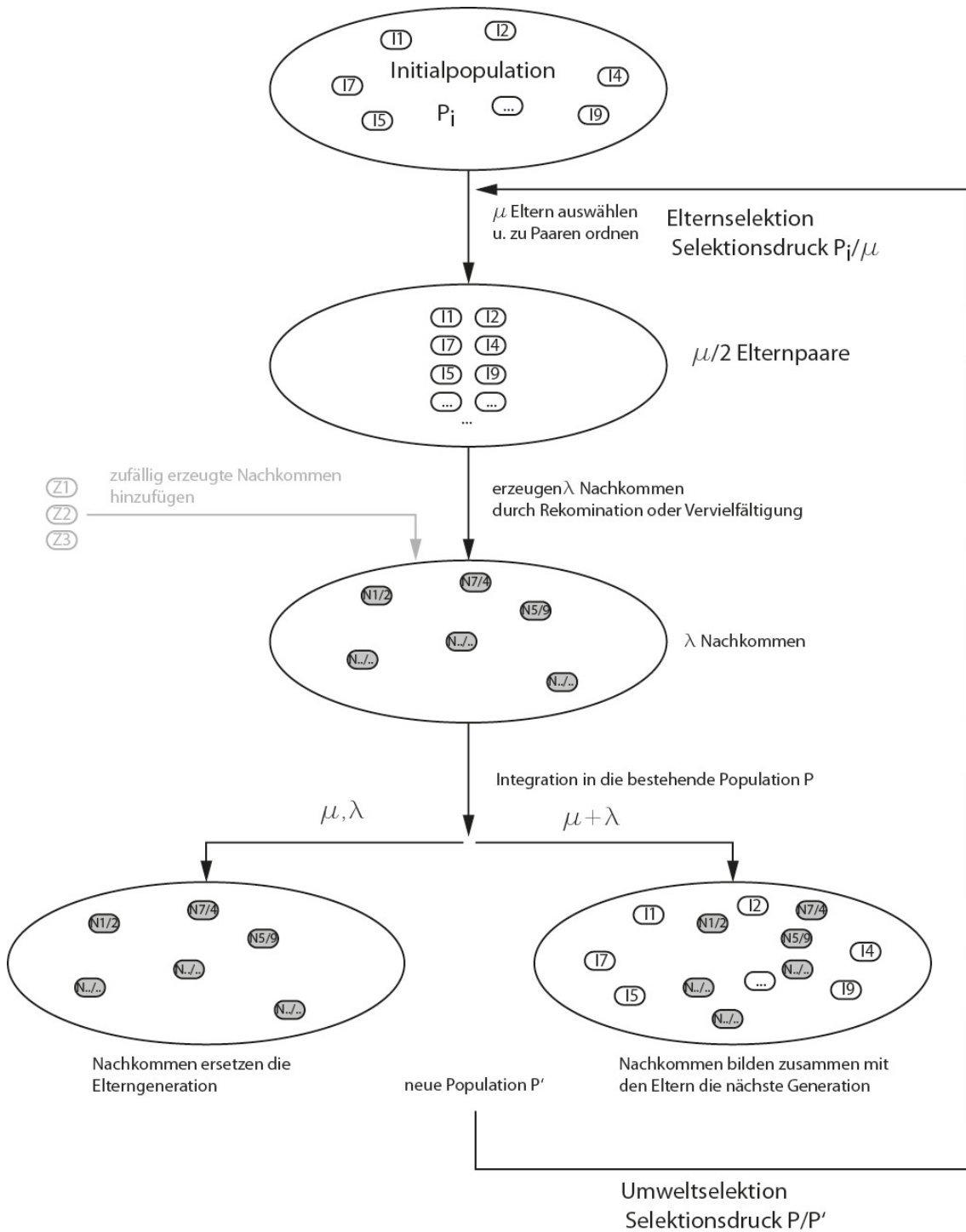


Bild 70: Schema der Populationsentwicklung im Evolutionären Algorithmus

Für das Verhältnis von  $\mu$  zu  $\lambda$  wird mit Werten zwischen 1:3 und 1:7 experimentiert. Das bedeutet, dass der evolutionäre Prozess drei bis siebenmal so viele Nachkommen wie Eltern erzeugt. Entsprechend dem Integrationskonzept werden dann entweder alle Kinder und Eltern ( $\mu + \lambda$ ) oder nur die Kinder ( $\mu, \lambda$ ) in die nächste Generation integriert.

## **8.7. Randbedingungen**

### **8.7.1. Bauraum**

Formale Bedingung für Algorithmen ist ihre Finitheit; sie müssen im theoretischen Sinne über eine Grenze verfügen damit sie nicht in der Unendlichkeit verloren gehen. Auch im praktischen Sinne ist es sinnvoll das Volumen, in dem das akustische Raumkonzept entstehen soll, in seinen Ausmaßen zu begrenzen. Die Punkte, aus denen die Geometriesynthese die Tetraeder für die Raumhülle erzeugt, liegen also in diesem durch den Benutzer vorgegebenen Volumen. Dadurch ist implizit eine Nebenbedingung für den Algorithmus eingeführt.

### **8.7.2. Kontext (Quellen Empfänger)**

Das Entwerfen ist ein kontextueller und situativer Prozess. Deshalb ist es notwendig einen Kontext vorzugeben. Durch die Vorgabe der Empfänger-Quellen-Konstellation wird der Kontext der Entwurfsaufgabe vorgegeben. In dieser räumlichen Konstellation spiegelt sich die Entwurfsabsicht wider. Es sind durchaus andere Kontexte denkbar, wie beispielsweise eine Art Tabuvolumen, das von der Hülle und den Quellen und Empfängern ausgespart werden muss. Der Bezug auf einen akustischen Kontext ist bewusst gewählt. Zum einen ermöglicht er den Vergleich mit bereits bestehenden Hüllen und zum anderen scheint es plausibel, als Entwurfsgrundlage eine räumliche Vorgabe zu machen, in der das räumliche Verhältnis der Zuschauer zu den Aufführenden vorgegeben ist. Anhand dieser Vorgabe sind dann auch die Ergebnisse zu kategorisieren, da sie die Grundlage, den Kontext, der Gestalterzeugung darstellen.

### **8.7.3. Raummodelle importieren**

Das vorgelegte Programm ist in der Lage Raummodelle zu importieren.<sup>47</sup> Die importierten Modelle sind nicht mit einem genetischen Code korreliert, weshalb

---

<sup>47</sup> Modelle mit Materialzuweisung können aus dem kommerziellen Programm Autodesk 3ds Max mit Hilfe eines vom Autor verfassten Skriptes in ein lesbares Datenformat exportiert und eingelesen werden (Anhang 15.1). Die Beschreibung des Datenformates befindet sich im Anhang 15.2.

sie sich nicht in den evolutionären Algorithmus eingliedern lassen. Die Möglichkeit zum Import von Modellen wurde geschaffen, um Vergleichsuntersuchungen zwischen den akustischen Simulationsergebnissen anstellen zu können und, um die Korrektheit der akustischen Kalkulation nachweisen zu können.

### **8.8. Zusammenfassende graphische Darstellung des genetischen evolutionären Algorithmus**

Zusammenfassend können die Hauptelemente des genetischen evolutionären Algorithmus in einem graphischen Ablaufdiagramm Bild 71: dargestellt. Die Vorgabeparameter in grüner Farbe dargestellt definieren die Rahmenbedingungen indem der evolutionäre Prozess abläuft. Diese Rahmenbedingungen unterliegen der Verantwortung und Entscheidungsprämisse des Benutzers. Die in orangener Farbe dargestellten Parameter sind Entwurfparameter, die zu Beginn die Unbekannten im System sind und am Ende das Ergebnis des evolutionären Prozesses darstellen.

Im Bild 72: ist der Bewertungsalgorithmus ausführlich mit den verwendeten Bewertungskriterien graphisch dargestellt. Die strikten Randbedingungen sind Bedingungen, die eingehalten werden müssen, um eine raumakustische Simulation überhaupt durchführen zu können. Alle Bewertungskriterien werden in gradueller Bewertung durch die Transformationsfunktion und eine justierbare Gewichtungsfunktion in die den Gesamtgütewert integriert.

Neben den hier dargestellten Elementen enthält das vorgestellte Programm noch zusätzliche Einstellungsmöglichkeiten. Diese beziehen sich auf die computertechnische Durchführbarkeit z.B. Anzahl der verwendbaren Prozessorkerne oder auf spezifische raumakustische Randbedingungen wie beispielsweise Schallgeschwindigkeit, welche aber zum besseren Verständnis nicht in den Diagrammen reflektiert sind, da sie für eine bestimmte Entwurfsaufgabe als konstant oder nicht relevant sind.

# Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

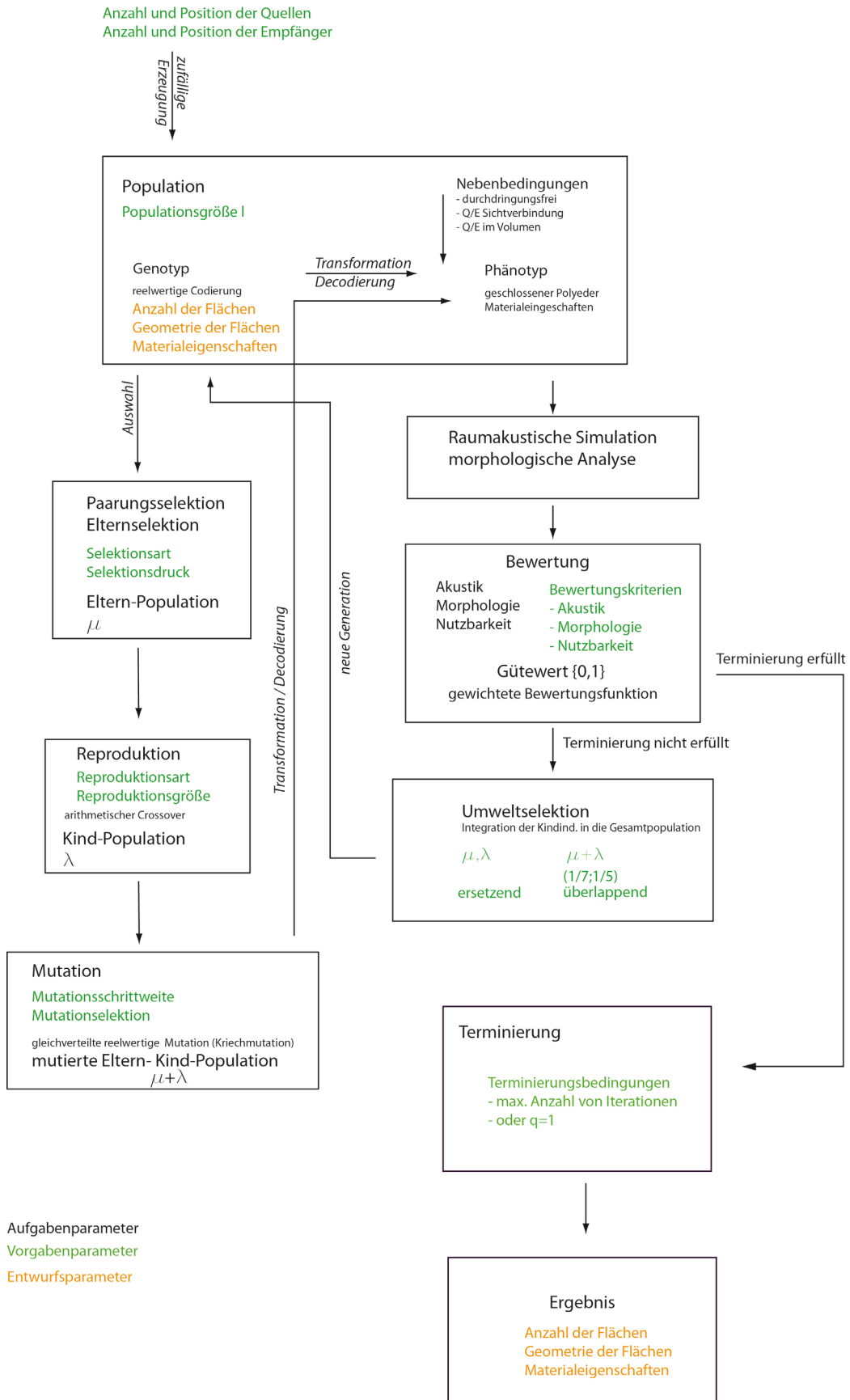


Bild 71: Ablaufdiagramm des genetischen evolutionären Algorithmus zur Erzeugung akustischer Räume

# Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

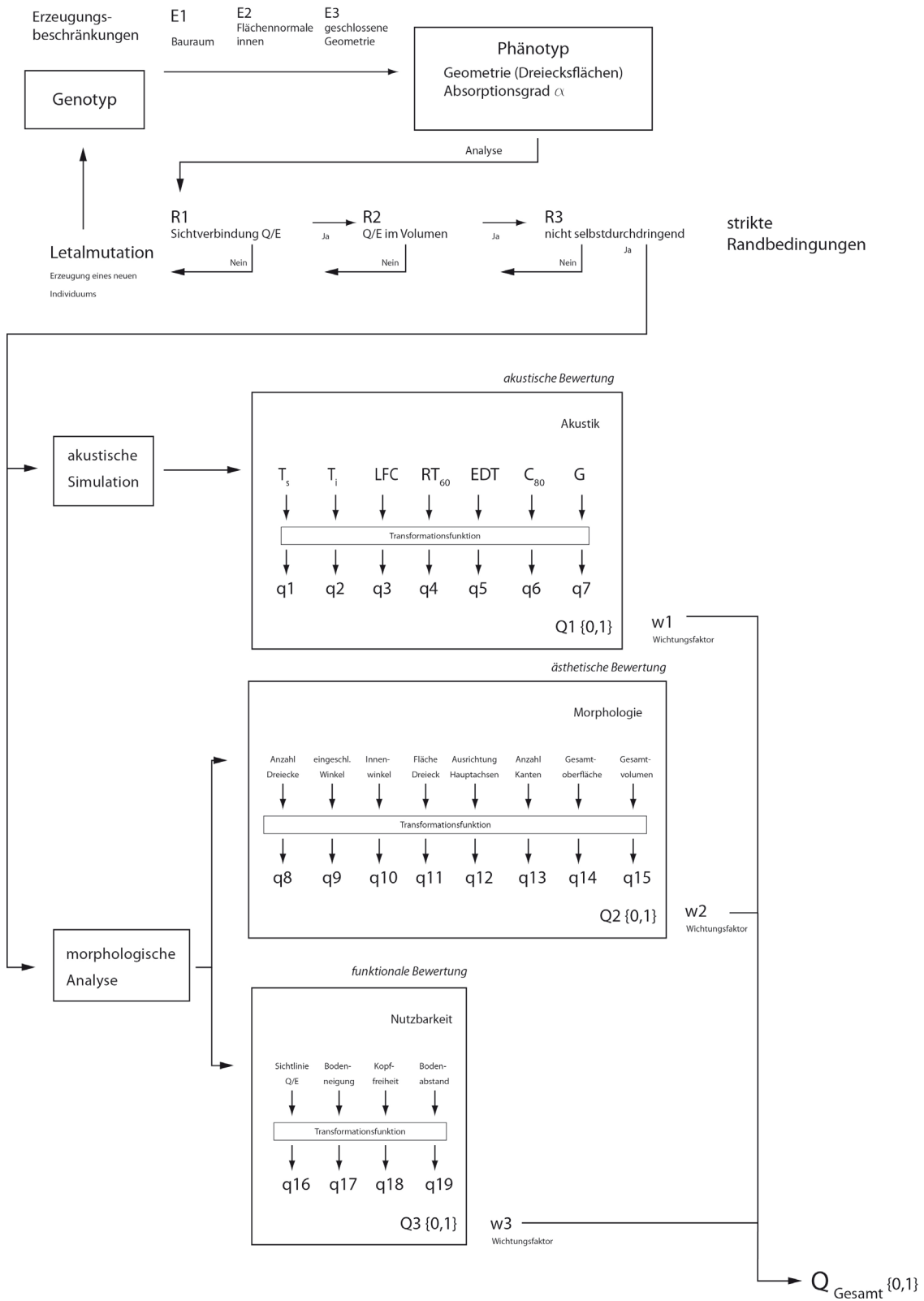


Bild 72: Ablaufdiagramm des Bewertungsalgorithmus

## **8.9. Graphische Benutzeroberfläche**

In den folgenden Abschnitten werden die Benutzeroberfläche und die einzelnen Funktionen und Einstellungsmöglichkeiten des Programms erläutert. Das Programm hat zwei Sprachversionen: deutsch und englisch, welche auf Grundlage der verwendeten Sprachversion des Betriebssystems automatisch geladen wird. Das Programm ist in C++ geschrieben und ist als Linux wie auch als Windows 32-bit Version verfügbar. Die folgenden Screenshots sind aus der Windows-Version 0.1-297 entnommen. Die oben beschriebenen Konzepte und Algorithmen wurden von einer wissenschaftlichen Hilfskraft in eine lauffähiges Programm und eine graphische Benutzeroberfläche implementiert. Die Erstellung des Programms wird vom Autor nicht als seine eigene wissenschaftliche Leistung betrachtet. Um aber eine Evaluierung der Methode vornehmen zu können, war die Umsetzung in eine Software notwendig, damit Ergebnisse produziert und evaluiert werden konnten.

Prinzipiell ist die Software so aufgebaut, dass man schrittweise die einzelnen Reiter bzw. Seiten der Reihe nach abhandelt und damit zum Ergebnis der Formfindung gelangt. Zuerst werden die Grund- und Voreinstellungen definiert, danach die Randparameter für den evolutionären Algorithmus. Nach dem die Kriterien für die Bewertung festgelegt, sind können die Ergebnisse der Bewertung, Simulation und Gestalterzeugung eingesehen und zur weiteren Verarbeitung exportiert werden.

### **8.9.1. Einstellungen**

Sowohl der evolutionäre Algorithmus, wie auch die akustische Simulation werden unter bestimmten Randbedingungen durchgeführt. So sind für die akustische Simulation beispielsweise Temperatur, Luftdruck, Anzahl der Strahlen und ähnliche Informationen festzulegen, die für die korrekte Berechnung der Raumakustik notwendig sind. Darüber hinaus wird der entwerferische Kontext durch die Definition der räumlichen Quellen und

Empfänger Konstellation festgelegt. Die Benutzeroberfläche sieht vor, entweder Elemente zu importieren<sup>48</sup> oder numerisch einzugeben.

Darüber hinaus wird hier der mögliche Wertebereich für Absorptions- und Diffusionswerte, die der Algorithmus vergeben kann, festgelegt. Der maximale Wertebereich liegt zwischen 0 und 1. Aus pragmatischer Sicht, kann der Wertebereich eingeschränkt werden, um realistisch herstellbare Absorptions- und Diffusionswerte abzubilden.

Weitere Grundeinstellung, die vorab festzulegen ist, ist der Bauraum. Zur einfacheren Handhabung kann ein Abstandswert definiert werden, der den Bauraum als Offset zur Bounding-Box der Quellen-Empfänger-Konstellation erstellt. Der Bauraum ist technisch notwendig und muss daher definiert werden.

Unter dem Begriff „Sonstiges“ besteht die Möglichkeit akustische Zielwerte aus einer Datei zu importieren<sup>49</sup>, welche dann bei der Bewertung als Standardwerte aufgerufen werden können. Darüber hinaus kann an dieser Stelle ein Modell importiert werden, welches zu Vergleichszwecken der akustischen Simulation unterzogen werden kann. Importierte Modelle können nicht in den evolutionären Algorithmus integriert werden.

Darüber hinaus kann die Anzahl der gleichzeitig benutzten Threads zur Berechnung der Ergebnisse limitiert werden. Dies kann notwendig werden, wenn im System nicht ausreichend Arbeitsspeicher zur Verfügung steht, um alle parallel errechneten Ergebnisse der Empfänger im Speicher zu halten. Durch den Wert 1 werden alle Empfänger nacheinander berechnet, was den geringsten Speicherverbrauch, aber die längste Rechenzeit zur Folge hat.

Für jede definierte Quelle kann eine Horizontalebene mit einem bestimmten Abstand eingeblendet werden, um die Orientierung im Raum zu erleichtern. Die Ebene erscheint als blaues Gitter. Darüber hinaus kann festgelegt werden, ob

---

<sup>48</sup> Datenformat für den Import von Quellen und Empfängern ist im Anhang 15.2.1 näher spezifiziert.

<sup>49</sup> Datenformat für den Import von akustischen Kennwerten ist im Anhang 15.2.1 näher spezifiziert.



der Bauraum, die Empfänger und Quellen, die Absorption oder Diffusion in Form von Farbe angezeigt werden sollen.

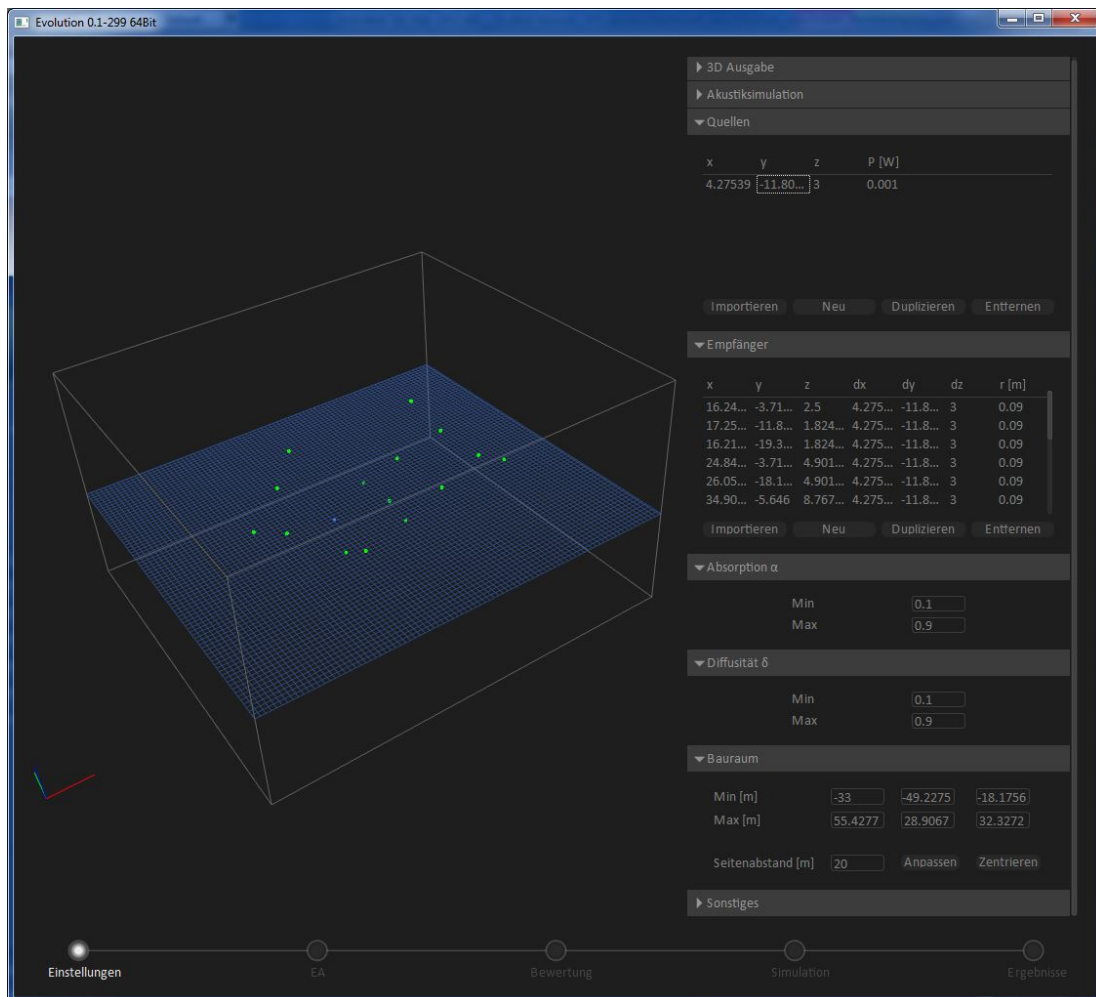


Bild 73: Bildschirmansicht Version 0.1-299 Einstellungen

### 8.9.2. EA (evolutionärer Algorithmus)

Unter diesem Reiter befinden sich die Einstellungen bezüglich des evolutionären Algorithmus. Hier werden die Populationsgröße, die Selektionsverfahren, die Verfahren zur Rekombination und zur Populationsintegration festgelegt. Mutationsschrittweiten und deren Wahrscheinlichkeiten für die, den Evolutionsprozeduren unterliegenden, Parameter werden definiert.

Der Bereich „Sonstiges“ hält Einstellungen bereit, mit Hilfe derer die Erzeugung der Polyeder manuell etwas gesteuert werden kann. So wird hier die Möglichkeit geboten, Flächen oder Punkte, die einen zu bestimmenden Abstand

unterschreiten, miteinander zu verschmelzen oder zu löschen. Dadurch können sehr zerklüftete Räume von vorneherein vermieden werden. Um die Diversität der Population steuern zu können, besteht die Möglichkeit zusätzliche Scheitelpunkte zu erzeugen. Dabei kann für die Erzeugung von Scheitelpunkten die Option zufällig, linear oder kubisch ausgewählt werden. Bei zufälliger Erzeugung wird ein zufälliger Punkt innerhalb des Bauraumes gewählt. Bei der zufälligen Erzeugung von Scheitelpunkten ist eine relativ geringe Wahrscheinlichkeit von gültigen Punkten zu erwarten. Deshalb wurden zwei Optionen entwickelt, mit denen eine höhere Wahrscheinlichkeit für gültige Individuen zu erwarten ist. Bei linearer Erzeugung werden zufällig zwei bestehende Punkte der Hülle gewählt und linear mit einander verbunden. Der Mittelpunkt dieser Line bildet den neuen Scheitelpunkt. Die kubische Variante wählt auch 2 Punkte aus der bestehenden Hülle und verbindet die Punkte mit einer Parabel (kubisch Funktion), deren Scheitel dann den zusätzlichen Hüllpunkt bildet. Neben der Erzeugung von Punkten, kann auch die Löschung von Punkten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit definiert werden.

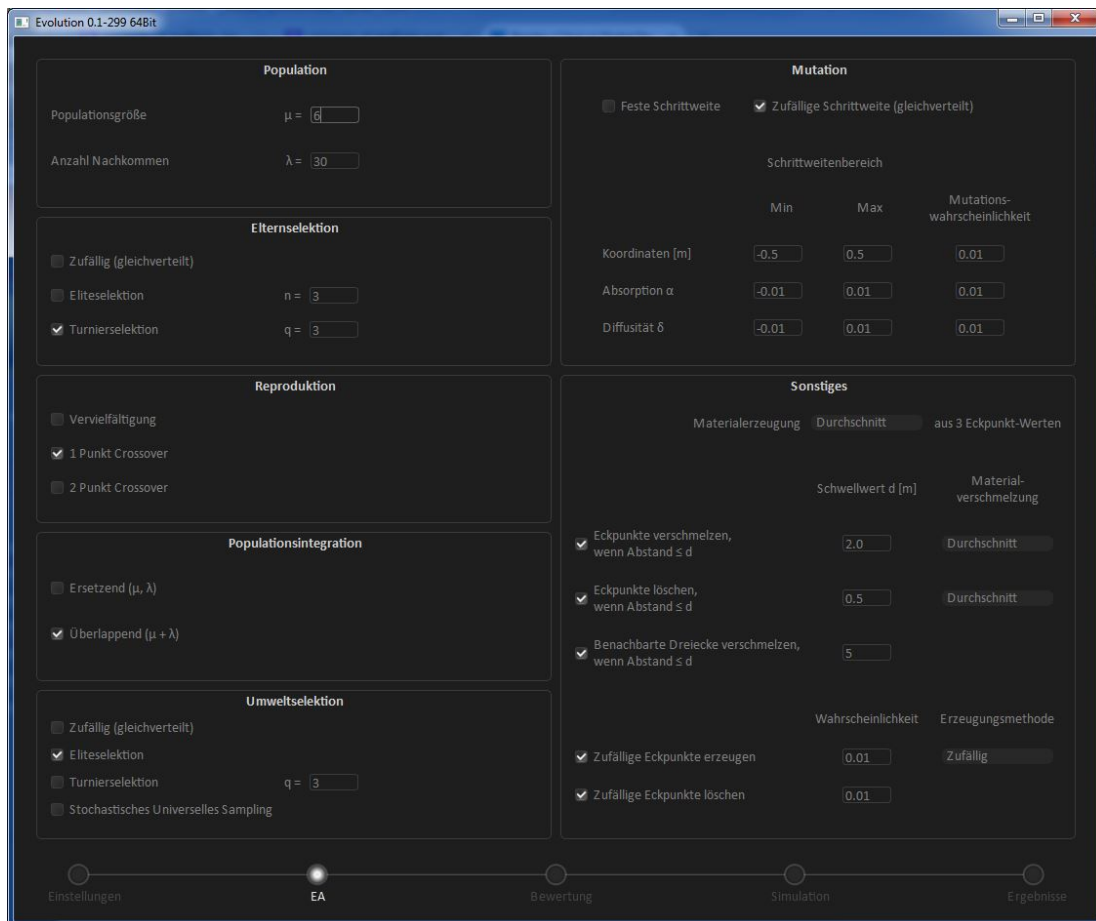


Bild 74: Bildschirmansicht Version 0.1-299 EA (Evolutionärer Algorithmus)

### 8.9.3. Bewertung

Auf der Bewertungsseite werden die verschiedenen Kriterien und deren Wichtung zur Bewertung der Individuen festgelegt. Aus den gewichteten Einzelkriterien wird die Gütewertfunktion zusammengestellt. Sie ist das Instrument zur Bewertung der Gesamtgüte der Individuen. Die Kriterien sind in 3 Hauptkategorien eingeteilt: Akustik, Morphologie und Nutzbarkeit. Im vierten Bereich „Hauptkategorien“ kann eine Wichtung der Hauptkategorien untereinander vorgenommen werden.

Wurden auf der Einstellungsseite Standardwerte für bestimmte akustische Anforderungen, wie beispielsweise ein Konzertsaal importiert, so können diese nun als Standardwerte in der Kriterienliste aufgerufen werden. Diese Werte können einzeln durch eigene Werte ersetzt werden. Einzelne Kriterien können ein oder ausgeschaltet werden. Ein Normierungsfaktor ( $k$ ) bestimmt die Steilheit der Transformationsfunktion, wie sie in Bild 64: abgebildet ist.

Ebenso können einzelne Kriterien der Morphologie für die Gütewertfunktion aktiv oder inaktiv geschaltet werden. Für die morphologischen Bewertungskriterien sind keine allgemeingültigen Standardwerte, vergleichbar den Standardwerten aus der Akustik bekannt, daher gibt es hier keine Möglichkeit, Standardwerte zu hinterlegen und einzuladen. Die Wichtung der Kriterien untereinander ist durch Schieberegler einstellbar.

Für die Nutzbarkeit gilt ähnliches wie für die Morphologie. Individuelle Einstellungen sind durch den Benutzer oder Benutzerin zu treffen, da keine allgemeingültigen Werte vorhanden sind. Auch hier ist eine Wichtung der Einzelkriterien zueinander und die Aktivierung bzw. Deaktivierung möglich.

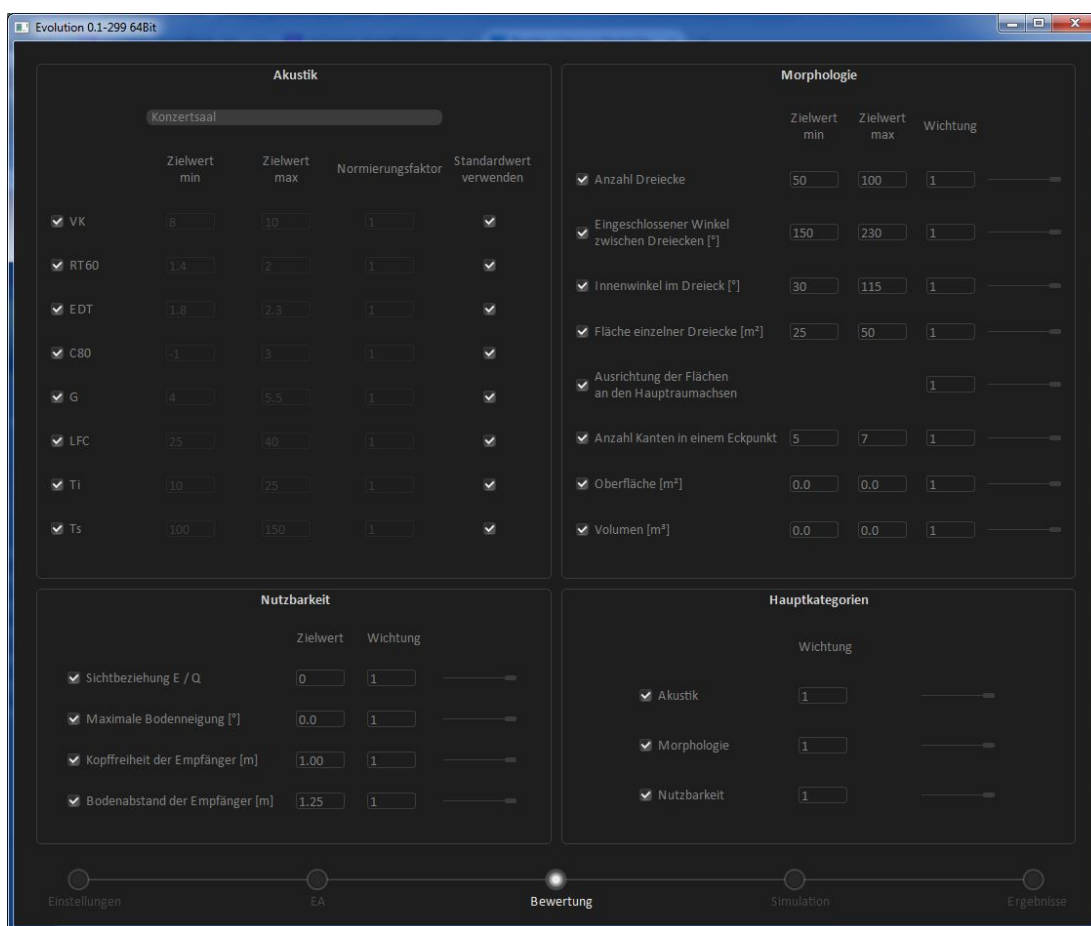


Bild 75: Bildschirmansicht Version 0.1-299 Bewertung

### 8.9.4. Simulation

Nachdem alle Parameter definiert sind, kann die Simulation gestartet werden. Die Seite „Simulation“ bietet die Möglichkeit, die evolutionäre Entwicklung

während der Laufzeit zu verfolgen. Die Seite bildet die durchschnittlichen, maximalen und minimalen Gütwerte der einzelnen Hauptbewertungskategorien und der Gesamtgüte in Schaubildern ab. Immer das aktuell beste Individuum wird als 3d Modell angezeigt. Das Modell zeigt, neben der Geometrie, auch die materiale Gestalt, repräsentiert durch Farbwerte von blau(0) bis rot(1), wahlweise Absorption oder Diffusion repräsentierend, an. Zu Beginn der Evolution wird eine Initialpopulation erzeugt. Die Dreiecksanzahl für die Individuen der Initialpopulation wird aus einem, durch einen maximalen und minimalen Wert bestimmten Bereich, zufällig ausgewählt.

Durch Doppelklick auf das 3D Modell wird jeweils zwischen der Darstellung des Modells im Hauptfenster oder in der rechten oberen Ecke gewechselt.

Die laufende Simulation kann durch das Betätigen des Stopp-Buttons abgebrochen werden. Eine Wiederaufnahme ist nicht mehr möglich; bei erneutem Betätigen des Start-Buttons wird ein neuer Evolutionsvorgang gestartet.

Falls während eines evolutionären Prozesses nach 1000 Versuchen nicht ausreichend gültige Individuen erzeugt werden können, wird der Vorgang abgebrochen. Weiteres Abbruchkriterium ist das Erreichen des Gütwertes 1 oder das Erreichen der vorgegebenen maximalen Anzahl von Generationen.

# Umsetzung des evolutionären genetischen Algorithmus

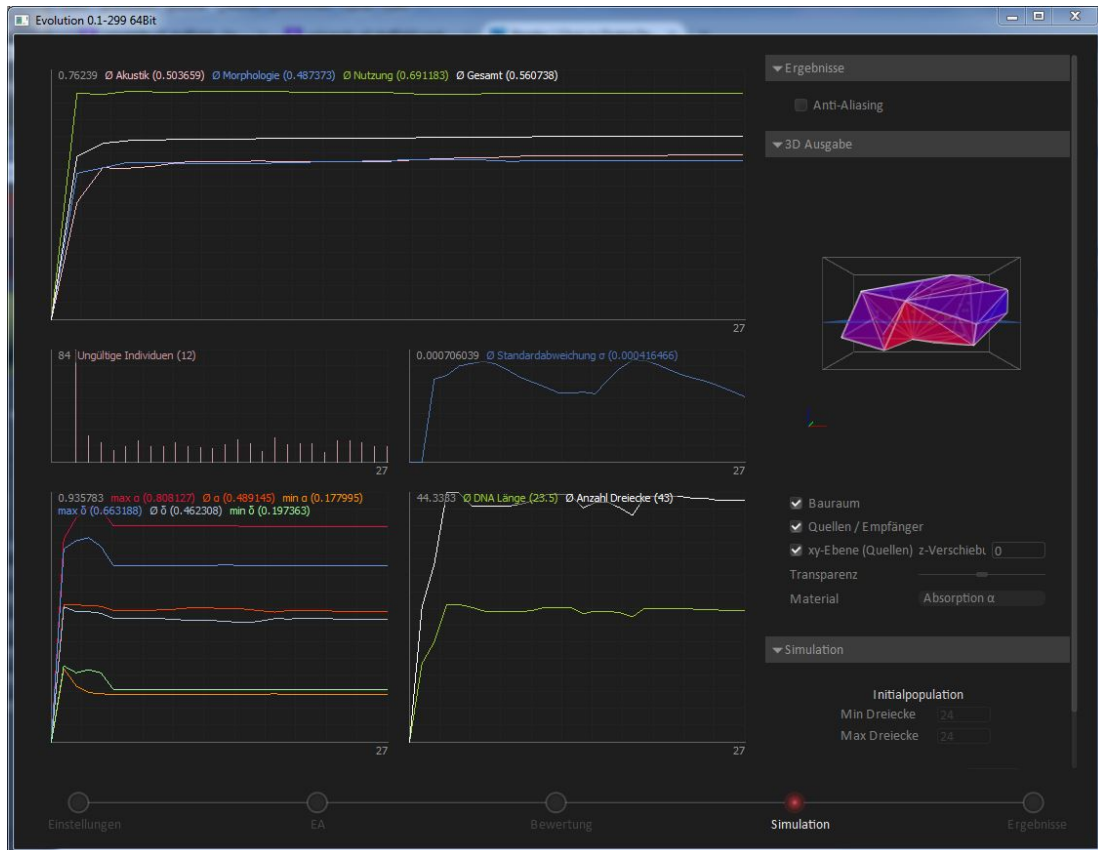


Bild 76: Bildschirmansicht Version 0.1-299 Simulation mit Bewertungsstatistik im Hauptfenster

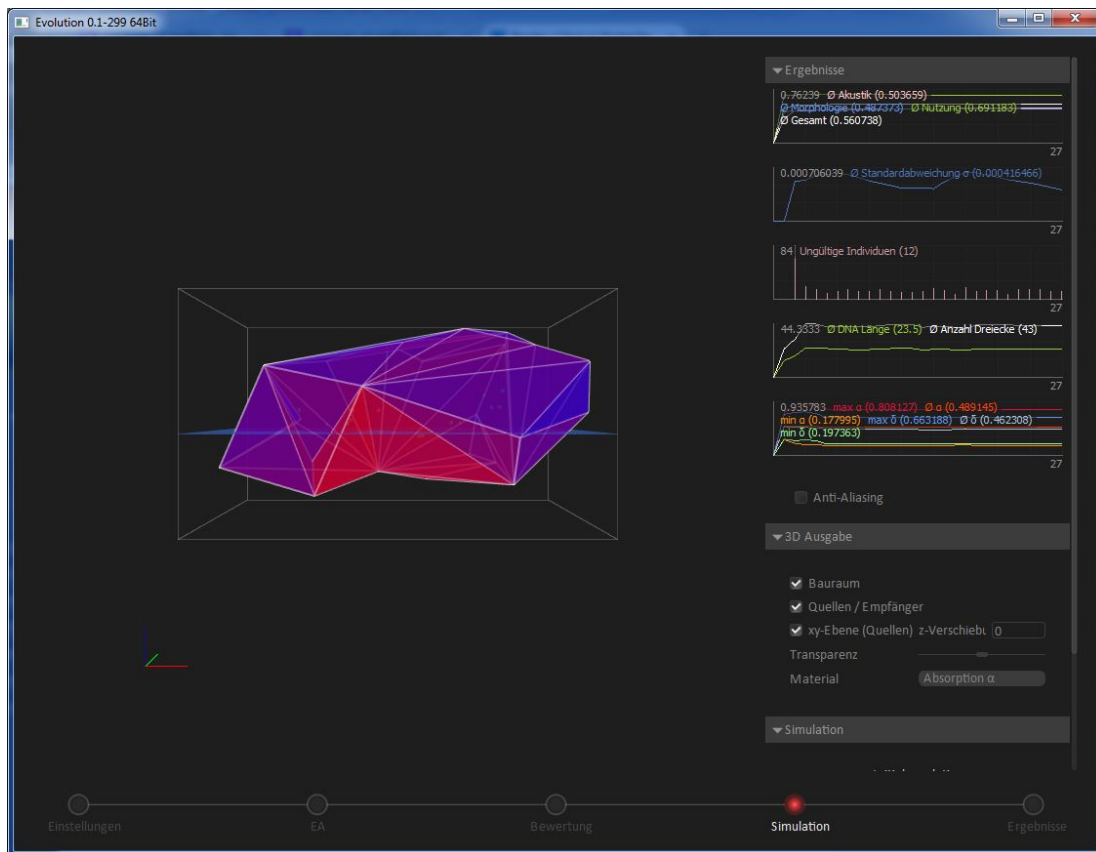


Bild 77: Bildschirmansicht Version 0.1-299 Simulation mit 3D Modell im Hauptfenster

### 8.9.5. Ergebnisse

Der letzte Reiter liefert die Ergebnisse. Jedes einzelne Ergebnis wird aufgelistet und kann als 3D Modell mit den entsprechenden Ergebnissen aufgerufen werden. Dabei sind die einzelnen Werte der Simulation, die entsprechend angewendeten Wichtung und die daraus in der Gütewertfunktion errechneten Teilbewertungen ersichtlich. Zum Vergleich ist auch der jeweilige Zielwert des Parameters aufgeführt. Werte die im Vorgabebereich liegen werden grün angezeigt, Werte außerhalb des Vorgabebereichs in rot.

Die numerischen Werte können einzeln oder als Ganzes im .csv Format exportiert werden. Geometrie und Material können entweder einzeln oder als Ganzes im Format vrml<sup>50</sup> exportiert werden. Dabei werden die Werte für die Absorption bzw. Diffusion der einzelnen Flächen als Transparenzwert der .WRL

<sup>50</sup> VRML (Virtual Reality Modeling Language ISO/IEC 14772-1:1997 und ISO/IEC 14772-2:2004web3D consortium.

Fläche angegeben. Da nur eine Transparenz in einer Fläche angegeben werden kann, muss jeweils ein Export Modell erzeugt werden.

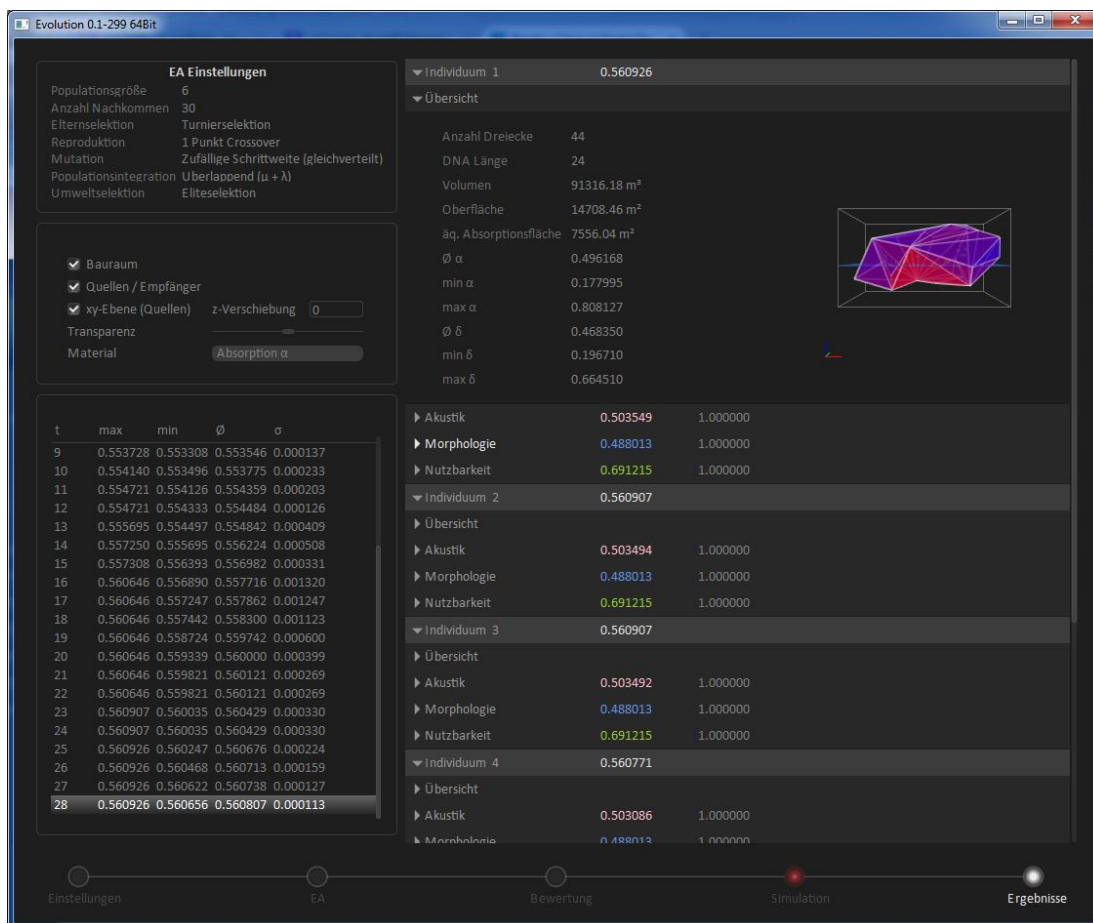


Bild 78: Bildschirmsicht Version 0.1-299 Ergebnisse

## 9. Anwendung des EA auf unterschiedliche Szenarien

### 9.1. Pareto-Kriterium Vergleich mit bestehenden akustischen Räumen

Ein Ergebnis ist zu einem anderen Ergebnis pareto-optimal wenn eines oder mehrere Bewertungskriterien sich verbessern, aber im Gegenzug kein Kriterium sich verschlechtert. Durch die Vorabauswahl eines bestimmten Ergebnisses kann der Ergebnisraum geteilt werden. In Ergebnisse, die pareto-schlechter oder pareto-besser sind als das gewählte Ergebnis. Es entsteht eine Paretogrenze. Bestehende Konzertsäle können als solche Paretogrenze verstanden werden. Ausgehend von derselben Empfänger-Quellen-Konstellation können die vom Algorithmus erzeugten Individuen auf ihre



akustische Pareto-Qualität bezüglich des bestehenden Konzertsaaes untersucht werden.

Obwohl es nicht beabsichtigt ist bestehende Raumkonzepte im ingenieurstechnischen Sinne zu optimieren, sondern neue Raumkonzepte zu finden, wird ein Vergleich mit bestehenden Raumkonzepten angestellt. Dieser Vergleich soll dazu dienen empirisch heraus zu finden, ob der Algorithmus in der Lage ist, mit Inputdaten, die aus einem bestehenden Raumkonzept extrahiert wurden ein vergleichbar gutes Raumkonzept zu entwickeln. Im Prinzip wird das bereits bestehende Raumkonzept als eine Paretogrenze begriffen, wobei sich der Vergleich lediglich auf die akustische Qualität bezieht.

Dazu werden die bereits vorgestellten vier Vertreter der akustischen Grundtypen modelliert, analysiert und anschließend mit Ergebnissen aus dem Formgebungsalgorithmus verglichen. Die Ergebnisse werden detailliert im Kapitel 10.1 diskutiert und in Tabelle 17:vergleichend aufgelistet.

## **9.2. Aufgabenstellung mit neuen Konfigurationen (Raummusik)**

Ursprünglicher Anwendungszweck des Formgebungsalgorithmus ist aber die Formerzeugung auf Grundlage von innovativen Quellen-Empfänger-Konstellationen, wie sie beispielsweise für zeitgenössische Raummusik notwendig sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine fiktive Konstellation aus 2 gegenüberliegenden Quellen, die die Zuschauer einzurahmen versuchen, als Ausgangskonstellation entwickelt. Diese Konstellation stellt sozusagen das Gegenstück zur zentrierten Orchesterposition der Berliner Philharmonie dar. Im Folgenden wird das Ergebnis eines Formerzeugungsprozesses dargestellt. Die Konstellation aus 2 Quellen, rot dargestellt, und 8 Empfängern, grün dargestellt, wendet sich in zwei nicht symmetrischen Gruppen jeweils einer Quelle zu. Akustische Bewertungsgrundlage sind Standardwerte für einen Konzertsaal. Die Formerzeugung ist mit Ihren Einstellungen in 15.6.1 dokumentiert.

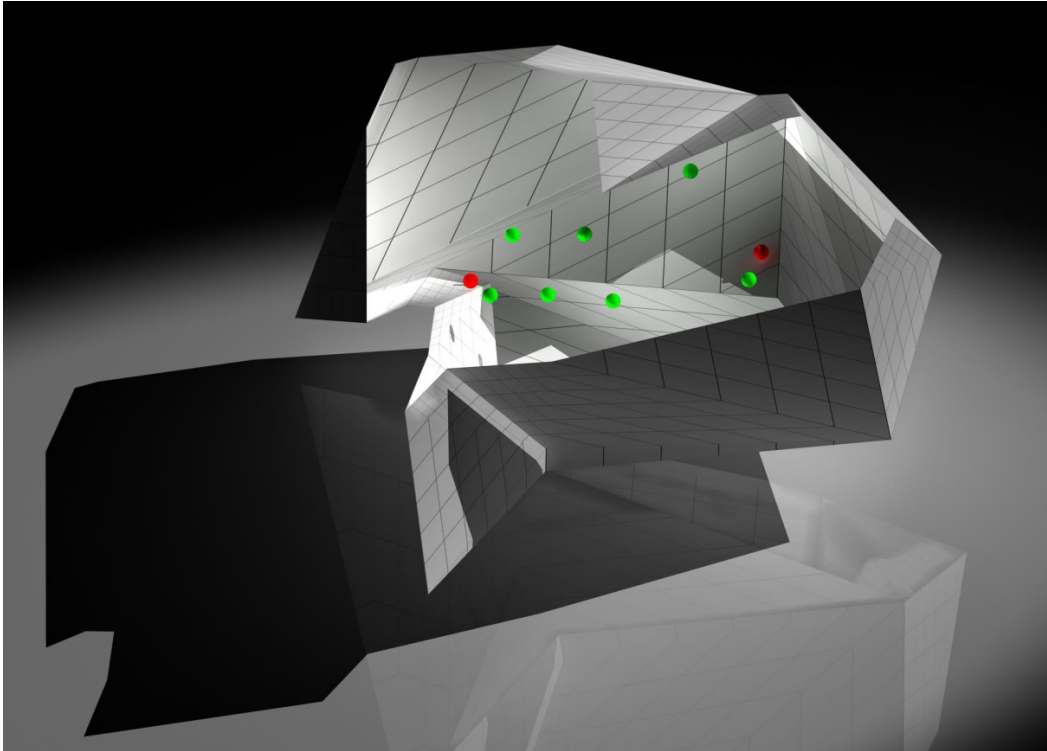


Bild 79: Ergebnis eines Formerzeugungsprozesses. Geschnittene Darstellung<sup>51</sup>

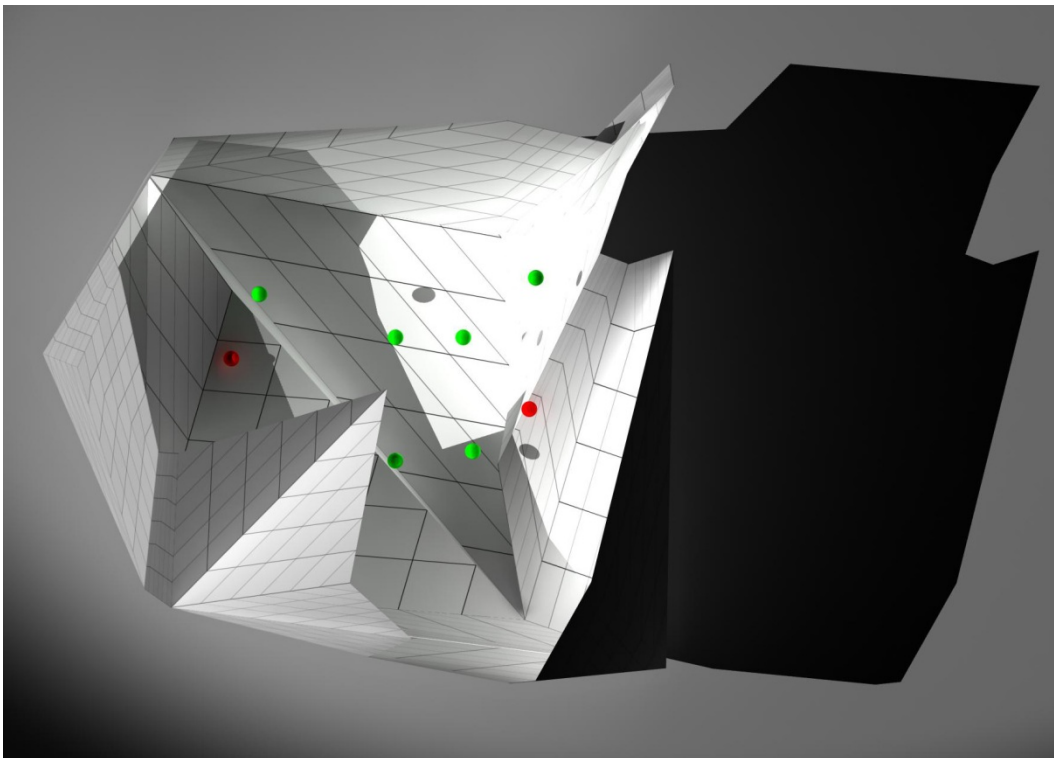


Bild 80: Orthogonale Grundrissprojektion des akustischen Raumes

<sup>51</sup> Die Untergliederung der Oberfläche dient ausschließlich zum besseren Verständnis der Raumgeometrie und ist keine gestalterische Aussage über das Material

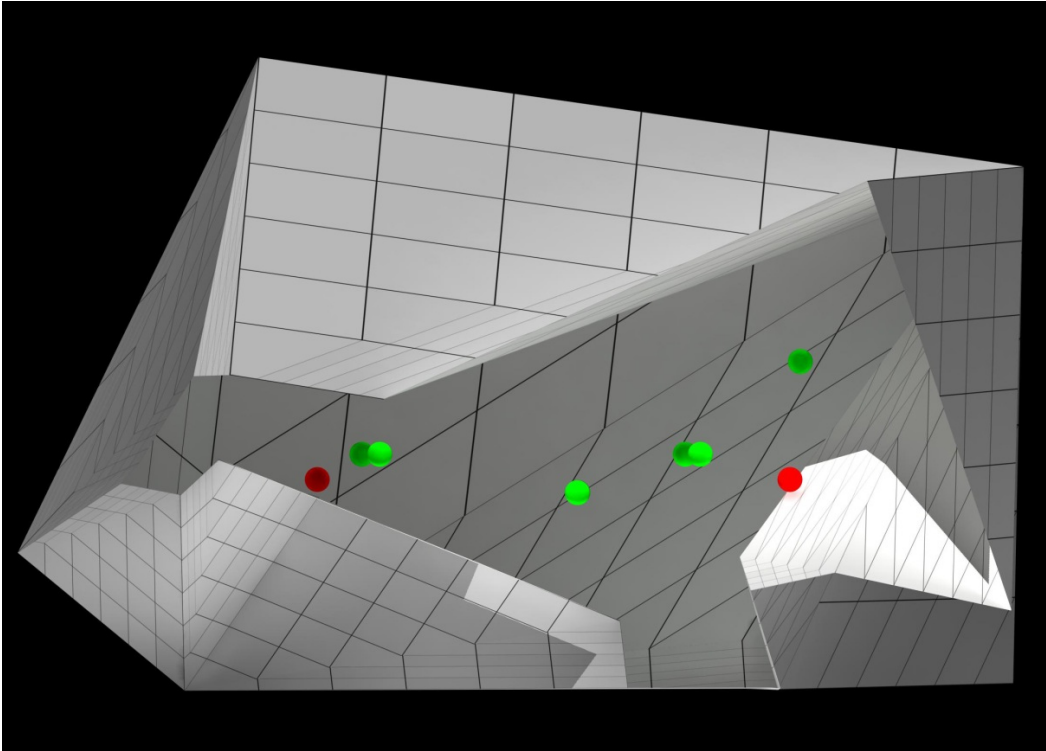


Bild 81: Orthogonale Schnittprojektion (längs) des akustischen Raumes

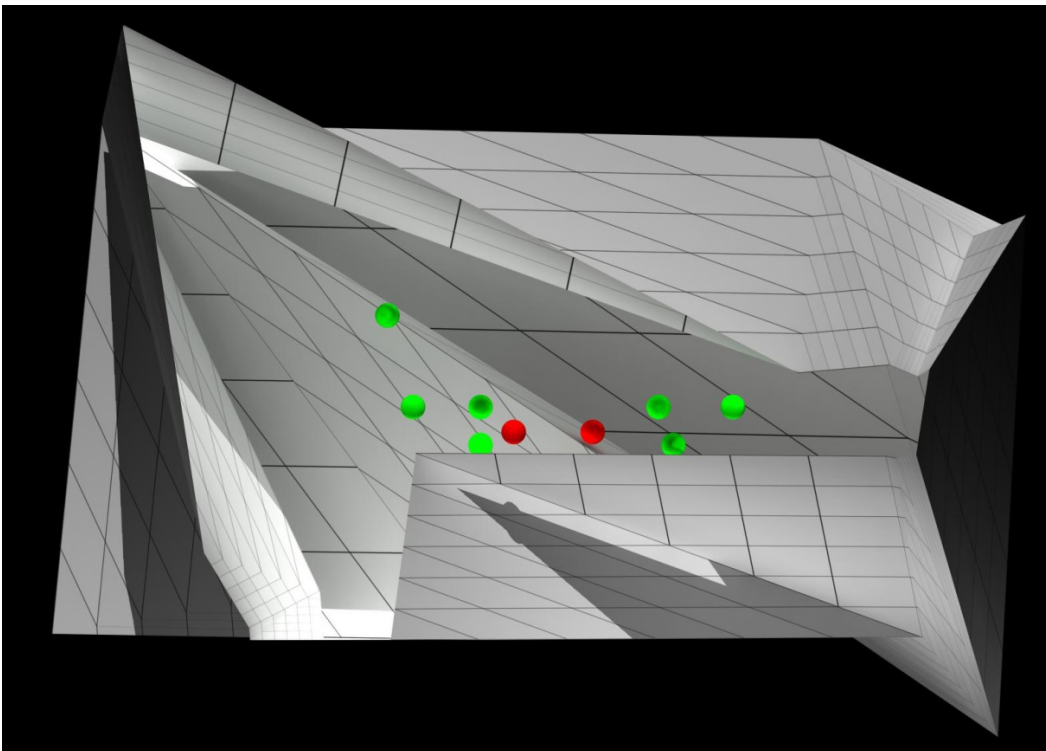


Bild 82: Orthogonale Schnittprojektion (quer) des akustischen Raumes

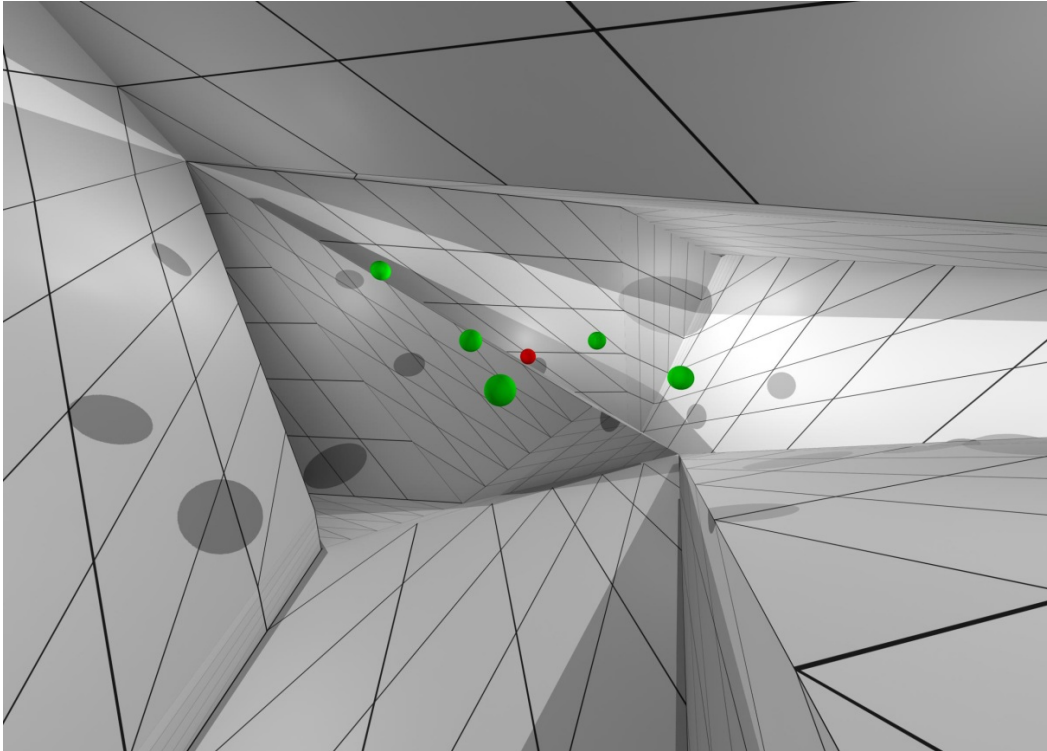


Bild 83: Innenraumperspektive eines Hörerplatzes

## 10. Schlussfolgerung und Ausblick

### 10.1. Bewertung der Ergebnisse

Die aus der Genese entstandenen Raumhüllen sind auf ihre Tauglichkeit im Kontext des architektonischen Entwurfs zu bewerten. Der Versuch, die Ergebnisse in den Kategorien „Schönheit“ oder „gute Architektur“ einzuteilen, wird hier nicht unternommen; auch soll hier nicht die (inter-)subjektive Raumempfindung als Bewertungsgrundlage dienen. Vielmehr wird die Bewertung auf einer beschreibenden und experimentellen Morphologie entwickelt, die Aufschluss darüber gibt, ob die gefundenen Ergebnisse als signifikante Raumkonzepte gewertet werden können. Die Diversität der gefundenen Ergebnisse kann als Innovationsfähigkeit des Systems interpretiert werden.

Im folgenden Abschnitt werden morphologische Kriterien entwickelt, anhand derer sich die Phänotypen vergleichen lassen. Diese unterscheiden sich von den morphologischen Kriterien des Algorithmus. Denn, zum einen soll die Gesamtgestalt in einem phänomenologischen Sinne verglichen werden und zum anderen wäre die Bewertung anhand derselben Kriterien, die zur

Konstruktion dienen, ein offensichtlich nutzloses Unterfangen. Bildlich gesprochen wäre es nicht überraschend, wenn Geometrie, die mit einem Zirkel gezeichnet wurde, bei einer anschließenden Untersuchung, bezüglich der Kreiseigenschaft der produzierten Elemente, eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt würde. Daher werden morphologische Kriterien entwickelt, die sich von der konstruktiven Morphogenese im Algorithmus unterscheiden.

### 10.1.1. Geometrische Morphometrik in der Biologie

In der Biologie ist es sehr wichtig Unterschiede in Form und Gestalt von Individuen erkennen und messen zu können. Diese morphologischen Unterschiede bilden die Grundlage für die biologische Systematik. Dabei bedienen sich die Biologen der geometrischen Morphometrik. Sie ist Teil der Morphologie (Lehre der Form) und beschäftigt sich mit der Bestimmung der formalen geometrischen Differenz von Organismen oder deren Teile (Zelditch u. a. 2004; Bookstein 1997). In der mathematischen und statistischen Analyse der Form und der quantitativen Vergleichbarkeit liegt das zentrale Anliegen der geometrischen Morphometrik. Die Morphologie, um den Begriff von der geometrischen Morphometrik abzugrenzen, zielt eher im Allgemeinen auf die qualitative Unterscheidbarkeit der Gestalt<sup>52</sup> und wird hier auch als Oberbegriff für die Formanalyse verwendet. Die Methoden schließen sich gegenseitig nicht aus, sondern können als sich ergänzend angesehen werden, wobei zu beachten ist, dass die Methoden zu unterschiedlichen Zuordnungen bezüglich der Bewertung von Gestalt und Formunterscheidung kommen können (Zelditch u. a. 2004, S. 3).

---

<sup>52</sup> "Morphometrics is simply a quantitative way of addressing the shape comparisons that have always interested biologists. This may not seem to be the case because conventional morphological approaches typical of the qualitative literature and traditional morphometric studies appear to produce quite different kinds of results. [...] In one sense that perception is entirely accurate: morphometrics *is* a branch of mathematical shape analysis. [...] Nevertheless, morphometrics can be a branch of morphology as much as it is a branch of statistics." Zelditch u. a. 2004, S. 1–2

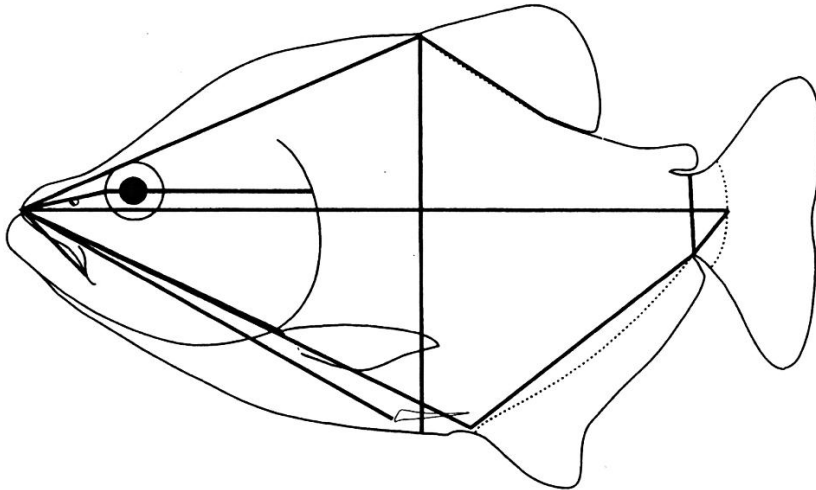


Bild 84: Darstellung der traditionellen morphometrischen Messgrößen (Zelditch u. a. 2004, S. 3)

In der morphometrischen Analyse werden Landmarken verwendet, deren räumliche Beziehung zu einander Aufschluss über die Formunterschiede geben. Die Verwendung der Landmarken setzt eine übereinstimmende Topologie und darauf aufbauend eine eindeutige und übereinstimmende Bestimmung dieser Punkte auf dem Organismus oder Objekt voraus.

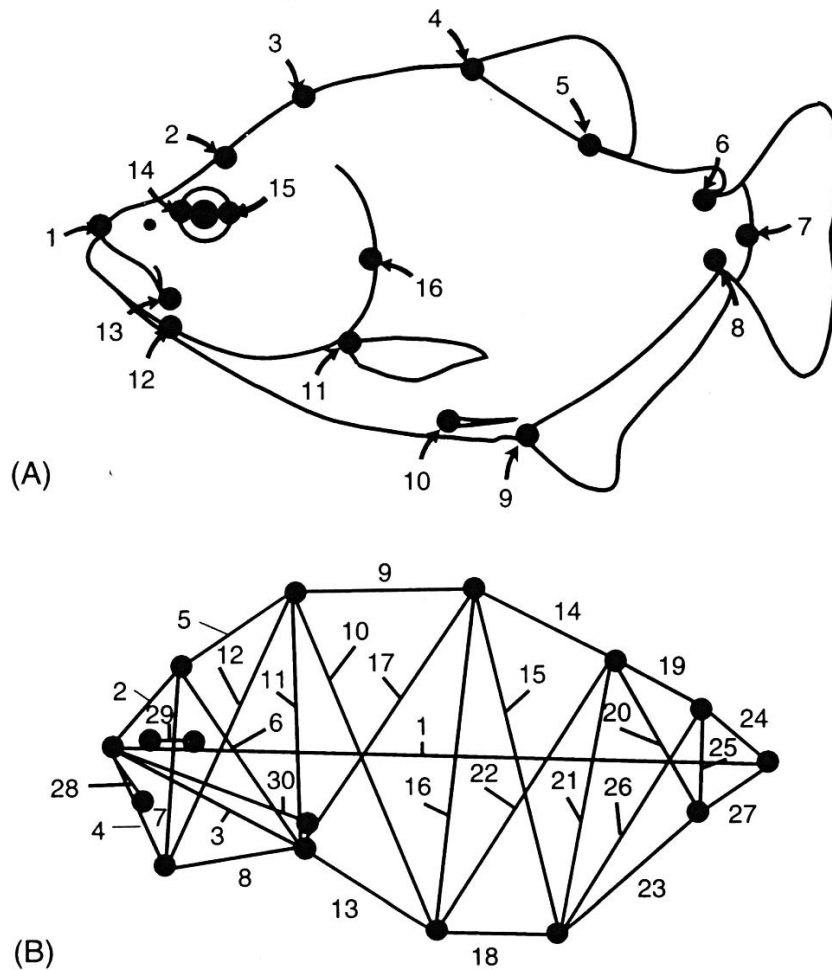


Bild 85: Darstellung der (A) topologisch genau definierten Landmarken und (B) der daraus abgeleiteten 30 Messgrößen (fachwerkartig) (Zelditch u. a. 2004, S. 4)

Der Vorteil der Verwendung von Landmarken liegt darin, dass wenn die Landmarken bestimmt sind, unterschiedliche Messgrößen im Nachhinein bestimmt werden können. Im Fall des im Bild 85: gezeigten Piranhas sind aus den 16 Landmarken 120 Messgrößen ableitbar.

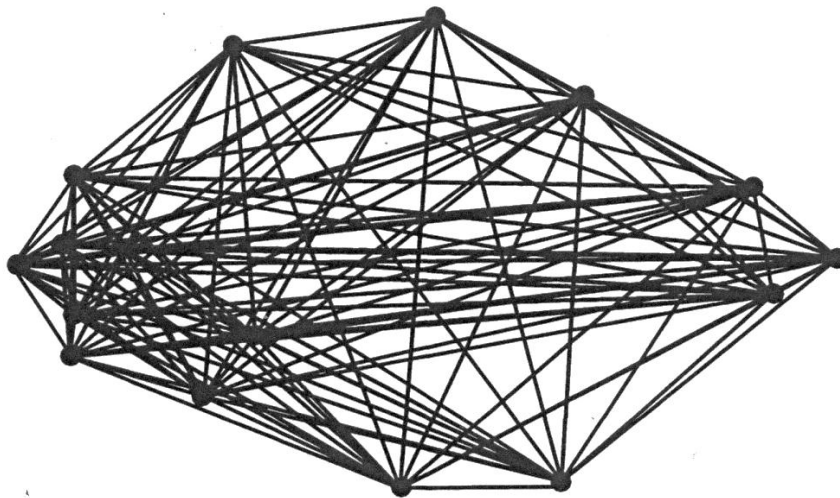


Bild 86: Darstellung der 120 Messgrößen aus den 16 Landmarken (Zelditch u. a. 2004, S. 5)

Die Landmarken stehen untereinander in räumlicher Beziehung. Diese Beziehung ist direkt abhängig von der Form, oder umgekehrt die Form ist direkt Ergebnis dieser räumlichen Abhängigkeit der Landmarken untereinander. Für die Formanalyse bedeutet dies, dass einzelne Verhältnisse von Landmarken nicht getrennt voneinander betrachtet und bewertet werden können, sondern immer die Gesamtkonfiguration der betrachteten Landmarken Aufschluss über die Form geben.

Die Betrachtung der Form ist unabhängig von der Größe, der Rotation und der Lokalisation. D.h. Objekte oder Organismen können die gleiche Form haben, obwohl sie unterschiedlich groß sind, sich in einer anderen räumlichen Lage oder Rotation befinden.

Um die Größe unabhängig von der Form bestimmen zu können, wird in der geometrischen Morphometrik die Schwerpunktgröße (centroid size) eingeführt. Sie berechnet sich aus der Quadratwurzel der quadrierten Summe der Längen zwischen den Landmarken und des Schwerpunktes des Organismus oder Objektes.

$$S_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n l_i^2}$$

mit



$S_C$  = Schwerpunktgröße

$L_i$  = Länge zwischen i-ter Landmarke und Schwerpunkt

$n$  = Anzahl der Landmarken

Wie weiter oben schon bemerkt, macht die Ermittlung morphometrischer Größen auf Grundlage von Landmarken nur Sinn, wenn auf den zu untersuchenden Objekten die Landmarken eindeutig, vergleichbar, korrespondierend und in übereinstimmender Zahl bestimmt werden können. Schon die Formel für die Schwerpunktgröße gibt einen Hinweis darauf, dass deren Ermittlung mit einer Unterschiedlichen Anzahl von Landmarken die Ergebnisse für einen Vergleich unbrauchbar machen.

Die Genese zur Findung eines akustischen Raumes erzeugt Raumbüllen, die zwar vergleichbar konstruiert sind, sich aber in ihrer Struktur deutlich, z.B. durch eine deutliche Differenz in der Anzahl der Hüllteilflächen, unterscheiden. Naheliegender wäre die Verwendung der Endpunkte der Teilflächenbegrenzungen als Landmarken. Es ist aber nicht zu erwarten, dass es zu vergleichende Ergebnisse mit annähernd ähnlicher Zahl von Landmarken geben wird.

Die geometrische Morphometrie ist eine Methode zur sehr differenzierten Betrachtung und Analyse von Formunterschieden innerhalb ähnlicher Strukturen. Sie dient zur spezifischen Ermittlung von Formveränderungen von Organismen die z.B. durch evolutionäre Prozesse hervorgerufen werden. Die geometrische Morphometrie zeigt, dass sich anhand der Betrachtung von geometrischen Verhältnissen (z. B. Längen) Formunterschiede feststellen lassen. Zu beachten ist dabei, dass die Feststellung von Unterschieden vergleichsweise eindeutig ist. Übereinstimmungen in bestimmten Messgrößen lassen aber nicht immer eindeutig auf tatsächliche Übereinstimmungen in der Form schließen, vor allem dann, wenn nicht mit Landmarken oder mit nicht ausreichend vielen Landmarken gearbeitet wird.

### 10.1.2. Morphologische Kriterien zur Unterscheidung der Raumhüllen

Um Elemente oder Dinge auf morphologischer Ebene vergleichen zu können, kann man auch deren Aufbau, also deren Konstruktionsprinzip zu einander in Beziehung setzen. Aus konstruktionsmorphologischer Sicht macht es einen Unterschied, ob ein kreisförmiges Element als echter Kreis, also mit Mittelpunkt und Radius, oder als Polygonzug konstruiert wird. Das Konstruktionsprinzip ist unterschiedlich und dadurch auch die Morphologie der beiden Gebilde, selbst wenn sie phänomenologisch eine hohe Übereinstimmung aufweisen. In diesem Sinne ist der annähernd kreisförmige Polygonzug konstruktionsmorphologisch dem Rechteck näher als dem Kreis, da er sich strukturell und konstruktiv signifikant vom Mittelpunkt-Radius-Prinzip unterscheidet, das Rechteck aber auch ein Polygonzug ist.

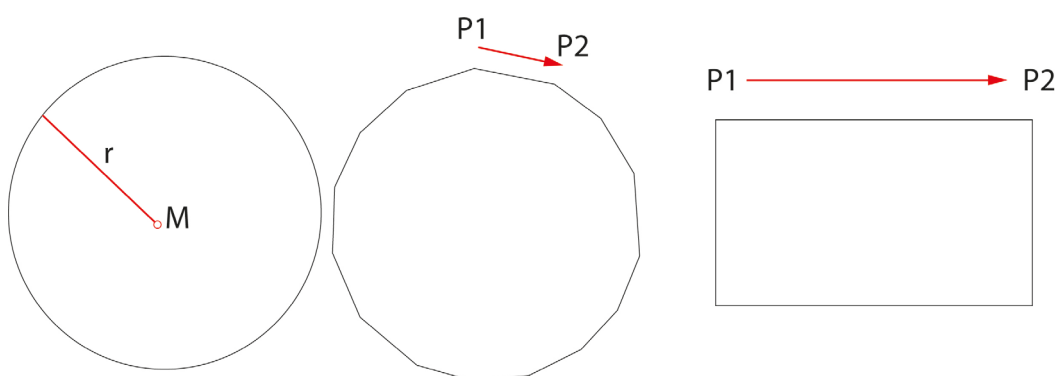


Bild 87: Unterschiedliche bzw. ähnliche konstruktive Morphologie von Kreis, Polygonzug, Rechteck

Die im vorliegenden Fall generierten Individuen unterscheiden sich konstruktionsmorphologisch nicht, da sie alle nach demselben Prinzip hergestellt werden. Der Aufbau des Genoms ist bei allen gleich; sie unterscheiden sich lediglich in der Länge des Genoms und durch die einzelne Ausprägung. Insofern liefert die konstruktionsmorphologische Betrachtung der unterschiedlichen Individuen, aller Voraussicht nach, keine verwertbaren Erkenntnisse.

Neben der konstruktiven bietet auch die Betrachtung funktionaler Aspekte einzelner Elemente eine Möglichkeit zur morphologischen Unterscheidung. Da aber die Teilelemente (Flächen), wie auch die Gesamtgebilde (akustischer

Raum) funktional übereinstimmen ist auch hier der vergleichende Ansatz nicht erfolgversprechend.

Die beschreibende oder vergleichende Morphologie bezieht sich auf die äußere direkte Erscheinung der zu vergleichenden Elemente. Anhand von festgelegten vergleichbaren Kriterien lässt sich eine Unterschiedlichkeit oder Übereinstimmung feststellen. Innerhalb bestimmter Grenzwerte, können dann Elemente in Gruppen oder Kategorien zusammengefasst und entsprechend benannt werden. Um noch einmal das oben genannte Beispiel zu bemühen, ist nun der kreisförmige Polygonzug unter der beschreibenden oder vergleichenden Morphologie näher mit dem Kreis verwandt als mit dem Rechteck. Da die offensichtliche Erscheinungsform besser übereinstimmt.

In der morphologischen Betrachtung fließen die unterschiedlichen Teilaspekte in eine ganzheitliche Bewertung der Unterschiedlichkeit oder Vergleichbarkeit ein. Wie das simple Beispiel zeigt, lässt sich eine morphologische Übereinstimmung nicht ausschließlich an nur einem Kriterium festmachen. Denn selbst wenn einzelne Kriterien übereinstimmen, könnten andere doch noch einen Unterschied aufweisen. Anders verhält es sich jedoch im Umkehrschluss: Wenn ein morphologisches Kriterium eine Differenz ausweist, dann kann man von einer morphologischen Differenz ausgehen. Da es im vorliegenden Fall lediglich darum geht, eine Differenz oder Nicht-Differenz festzustellen, wird darauf verzichtet ein hierarchisches System der Morphologie, wie es in der Biologie gebräuchlich ist mit Haupt- und Untergruppen (Gattung, Art, Spezies) aufzubauen.

### **10.1.3. raumakustische Typologien**

Typologie ist in der Architektur eine gebräuchliche Methode der Einteilung von Architektur in unterscheidbare Gruppen. Der Begriff Typologie leitet sich vom Griechischen „typos“ (Urbild, Vorbild) und „logos“ (Wort, Lehre, Vernunft) ab. Wie die etymologische Herleitung vermuten lässt, fasst man unter einer bestimmten Typologie Architekturen zusammen, die eine signifikante Übereinstimmung mit eine Urbild oder Urtyp aufweisen und damit untereinander über Übereinstimmungen verfügen. Typologien sind nicht unbedingt universell und endgültig, sondern sind ein dynamisches System, welches neue Typen

entwickeln kann oder vorhandene Typologien weiterentwickelt. Typologien können phänomenologisch (gerichtet, un-gerichtet, Atriumhaus, Reihnhaus, Hochhaus, Turm, etc.) und oder funktional (Laubengang, zentral erschlossen, 2-spänniges Büro, Großraumbüro, Museum, Bahnhof, etc.) und oder konstruktiv (Bogenbrücke, Hängebrücke, Fachwerkhaus, etc.) begründet sein.<sup>53</sup> Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, sind im Bereich der akustischen Räume vier Grundtypen gebräuchlich, die sowohl phänomenologisch, als auch funktional typologisiert werden können.

Die aus der Genese produzierten Raumkonzepte werden in Grundriss und Schnitt und in Bezug auf raumakustische Konzepte mit den Grundtypologien auf Übereinstimmung geprüft. Der Vergleich wird visuell, durch Betrachten der Grundrisse und Schnitte und durch eine Einschätzung des akustischen Prinzips vorgenommen und dem entsprechenden Typus zugeordnet. Ist keine Zuordnung möglich so wird dies als eine eigene Typologie gewertet. Im Sinne einer dynamischen Typologie werden die folgenden Raumhüllen auch mit dem neu gefundenen Typ verglichen.

Typologie	Beschreibung	Beispiel	Ausrichtung
Schuhschachtel	quaderförmiger Raum	Musikvereinssaal Wien	frontal ausgerichtet
Hufeisen	im Grundriss Hufeisenförmiger Raum	Semperoper	frontal ausgerichtet
(umgekehrter) Fächer	im Grundriss fächerförmiger Raum	Oper Sydney	frontal ausgerichtet
Weinberg	terrassenförmig angeordnete Gruppen	Philharmonie Berlin	zentral ausgerichtet

*Tabelle 12:* Typologische Ordnung akustischer Räume

<sup>53</sup> Typologie als architekturtheoretischer Begriff findet sich bei Castorph 1999. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff des Typus auf Grundlage einer signifikanten Übereinstimmung phänomenologischer und oder funktionaler Eigenschaften verwendet. Eine weitergehende Differenzierung wird in dem vorliegenden Zusammenhang nicht vorgenommen.

#### **10.1.4. Kriterien zur Beschreibung von Architektur**

Die emotionale Wirkung architektonischer Räume auf Betrachter in Bezug zu quantifizierbaren raumgeometrischen Kriterien kann empirisch nachgewiesen werden (Franz 29.08.2005). Anhand von Intersubjektivitätsmethoden, also einer Verallgemeinerung anhand ausreichend vieler subjektiver Bewertungen, werden Raumwahrnehmungen und Raumwirkungen in Zusammenhang mit der physischen Ausprägung des Raumes gebracht und dadurch qualifizierbar gemacht. Basierend auf historischen Maßsystemen von Vitruv über Palladio und Alberti bis hin zu modernen Proportionssystemen wie von LeCorbusier extrahiert Franz tektonische Kriterien, die es ermöglichen architektonische Räume mit einander in Relation zu stellen. Diese Vergleichbarkeit der physischen Gestalt von Raum ermöglicht es, die Auswirkungen von Veränderungen der Gestalt messbar zu machen. Dabei unterscheidet er zwei grundlegende Betrachtungsweisen. Einerseits untersucht er Kriterien, die auf einen bestimmten Standort bezogen, also lokal, sind. Diese Betrachtungsweise leitet sich direkt von seinem Anliegen ab, Räume auf ihre unterschiedliche Wirkung auf einen Betrachter hin zu bewerten und können somit auch als individual oder subjektiv bezeichnet werden. Die zweite Betrachtungsweise kann als globale Betrachtungsweise angesehen werden, in der die tektonischen Kriterien unabhängig vom Betrachtungsstandort definiert werden, also somit objektiv oder universal sind.

basic spatial quality	tendential emotional influence			isovist and visibility graph based descriptor variables	calculation method
	P	A	D		
spaciousness	/		∩	isovist area	neighborhood size
				free near (medium) space	n visible graph vertices at 2 (4) m distance
openness	/	\	\	isovist openness	$\text{length}_{\text{open edges}} / \text{length}_{\text{closed edges}}$
				jaggedness	isovist perimeter <sup>2</sup> /area
				revelation	$(\sum \text{area adjacent isovists} - \text{isovist area}) / \text{isovist area}$
complexity	∩	/		number of vertices	n isovist vertices, n segments
				vertex density	n vertices / area
				roundness	isovist area/perimeter <sup>2</sup>
				jaggedness	isovist perimeter <sup>2</sup> /area
				clustering coefficient	see Turner et al., 2001
order	/	\	\	symmetry	n symmetry axes
				redundancy	$n_{\text{segments}} / n_{\text{unique segments}} + 1$

Bild 88: Hypothetische Beziehung zwischen den emotionalen Antworten und der physischen Ausprägung des Raumes. In der rechten Spalte sind die Berechnungen der entsprechenden tektonischen Kriterien vermerkt. (Franz 29.08.2005, S. 138)

Anhand der Untersuchung von Franz und seinen raumbeschreibenden Kriterien kann die potentielle Wahrnehmung des Raumes durch einen Probanden abgeschätzt werden. Umgekehrt kann man daraus schließen, dass auch die Raumbeschreibung, die er verwendet geeignet sein muss, um Räume differenziert beschreiben zu können. Wären seine Kriterien zur Raumbeschreibung nicht geeignet, so würde seine Datenerhebung zur Raumwahrnehmung keine interpretierbaren Ergebnisse liefern. In der folgenden Tabelle sind, basierend auf den Kriterien zur Raumbeschreibung von Franz (29.08.2005), Parameter zum Vergleich von Räumen, zur Verwendung für die Bewertung der Unterschiedlichkeit der Ergebnisse, aufgelistet. Es werden hauptsächlich die universalen oder objektiven Kriterien destilliert, da diese eine Beschreibung des Raumes und nicht die Beschreibung einer speziellen individuell wahrnehmbaren Raumsituation darstellen. Diese Kriterien können, im weiteren Sinne, als morphometrische Parameter betrachtet werden. Es werden zwar keine Landmarken verwendet, dennoch werden spezifische Formparameter zur Messung der Differenz herangezogen.

Zerklüftung / Kompaktheit	Oberfläche / Volumen
Komplexität	Anzahl Knotenpunkte / Volumen
Symmetrie	Anzahl Symmetrieachsen

*Tabelle 13:* Parameter zur Unterscheidung von Raumkonzepten basierend auf den Untersuchungen von Franz (Franz 29.08.2005).

Die Kriterien „Geräumigkeit“ (spaciousness) und „Offenheit“ (openness) sind stark auf den Standpunkt des Betrachters bezogen und deshalb für eine Beschreibung des Raumes im Gegensatz zur Beschreibung eines Raumeindrucks weniger geeignet. In diesen Kriterien, die Größe oder besser gesagt das Volumen des Raumes beinhalten wird im nächsten Abschnitt 10.1.5 Rechnung getragen. Die Zerklüftung oder Kompaktheit beschreibt das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen, das in der Architektur auch als AV-Verhältnis in der Energieeffizienzberechnung seine Anwendung findet. Dieses Verhältnis ist Ausdruck der Kompaktheit eines Raumes. Anders als die Kompaktheit beschreibt die Komplexität den inneren Aufbau der Hülle nach Anzahl der verwendeten Knotenpunkte. Denn im vorliegenden Algorithmus interessiert uns nicht nur die phänomenologische Komponente des Ergebnisses sondern auch die strukturelle. Dadurch können wir Ergebnisse differenzieren, die beispielsweise das gleiche Verhältnis von Oberfläche zu Volumen aufweisen, aber sich in der Anzahl ihrer Knotenpunkte unterscheiden, was ein signifikanter Unterschied bezüglich des strukturellen Aufbaus darstellt. Die Symmetrie von Räumen spielt in der Wahrnehmung von Raumgebilden eine wesentliche Rolle, da Prinzipien der Ordnung die Erfassung des Objektes oder Raumes erleichtern und daher ein starkes Unterscheidungsmerkmal für die Raumbetrachtung sind.

Auf die Korrelation zu den emotionalen Begriffen, die zur semantischen Klassifizierung der Räume notwendig wäre wird hier verzichtet, denn nicht die Bewertung und Wirkung auf den Betrachter ist von Interesse sondern die Möglichkeit der signifikanten Unterscheidung von Räumen.

### **10.1.5. Proportionen und Maßverhältnisse**

Die Betrachtung der Raumproportionen lässt einen Schluss auf die Unterschiedlichkeit von Raumkonzepten zu. Proportionsverhältnisse der

Grundriss-Extreme, die sich signifikant voneinander unterscheiden, lassen sich als differenzierbare Raumkonzepte interpretieren. Ebenso kann die Proportionsbetrachtung auf das Verhältnis der projizierten Grundfläche zur Höhe betrachtet und als Vergleichsmerkmal herangezogen werden. Aus streng morphologischer Sicht sind Proportionsverhältnisse von 1:2 und 2:1 identisch, da sich aber die Hülle auf eine fixierte Quellen-Empfänger-Konstellation bezieht, ist die Figur auf im Raum verortet und daher ist die Proportion eines Grundrisses mit dem Verhältnis 1:2 ein signifikant anderer als einer mit dem Verhältnis 2:1. Die genannten Proportionsverhältnisse sind im engeren morphometrischen Sinne nicht formspezifisch. Da beispielsweise die maximale Länge oder Breite an unterschiedlichen Stellen gemessen werden kann, oder unterschiedliche formale Ausprägungen die gleichen Maximalwerte aufweisen. Trotzdem kann die Unterschiedlichkeit nachgewiesen werden, auch wenn dadurch keinen Rückschluss auf Übereinstimmung gezogen werden kann.

Ein weiteres Maß zur Vergleichbarkeit der Hüllen liefert die Anzahl der Teilflächen der Hülle. In sehr seltenen Ausnahmefällen wäre es zwar durchaus denkbar, dass die äußere Erscheinung durch eine unterschiedliche Anzahl von Teilflächen erzeugt werden kann, dass dies aber sehr unwahrscheinlich ist, stellt die Anzahl der Flächen eine durchaus adäquate Unterscheidungsmöglichkeit der Raumkonzepte.

Da sich die Raumkonzepte auf eine konkrete Quellen-Empfänger-Konstellation beziehen, ist auch das Raumvolumen als ein Unterscheidungsmerkmal geeignet. Um zu einer Unterscheidungsrelation zu gelangen, wird ein Koeffizient aus Raumvolumen und Ausdehnungsvolumen der Quellen-Empfänger-Konstellation (QE-Volumen) gebildet.

Grundrissproportion	max. Länge / max. Breite
Höhenproportion	Grundfläche / max. Höhe
Anzahl der Teilflächen	Anzahl der Teilflächen
Raumvolumenkoeffizient	Raumvolumen/ Volumen QE-Volumen

*Tabelle 14:* Proportionen und Maßverhältnisse zur Unterscheidung von Raumkonzepten

Bei der Untersuchung der Raumhüllen ist zu erwarten, dass es kaum exakte Übereinstimmungen bei den Bewertungskriterien geben wird. Vielmehr müssen



Gruppen oder Klassen gebildet werden, denen eine Hülle zugeordnet werden kann. Die gewählten Gruppen orientieren sich an der problematisierten Aufgabe eines akustischen Raumes. So werden beispielsweise keine Türme oder extrem flache Hüllen erwartet, weshalb die Proportionsverhältnisse eher im mittleren Bereich spezifiziert sind und die sehr schlanken und sehr flachen Proportionen am Rand zusammenfasst.

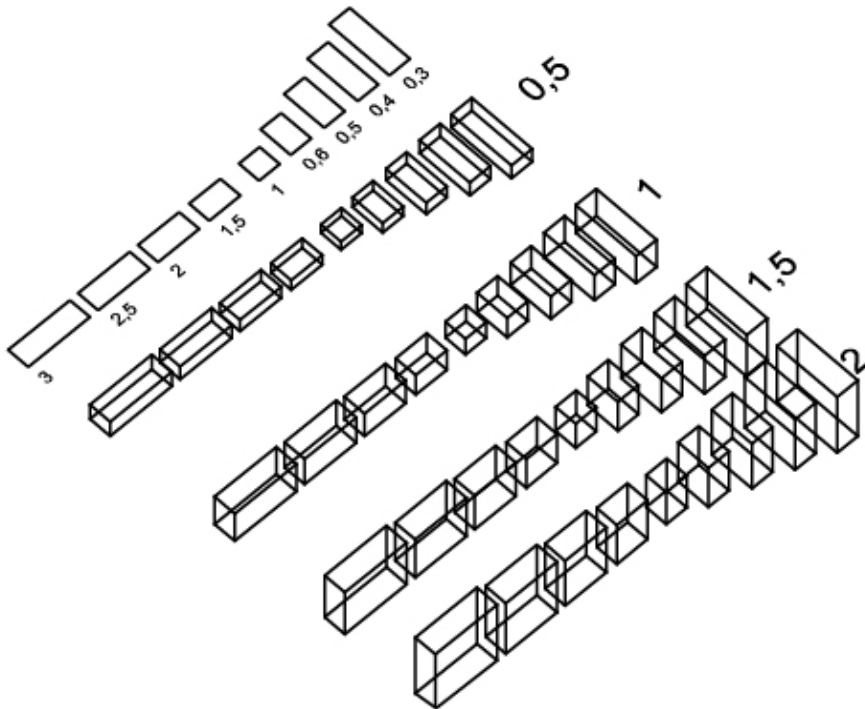


Bild 89: Reihe der gewählten Proportionsverhältnisse zur Unterscheidung von Raumhüllen. 1. Reihe: Grundrissproportionen ( $x/y$ ), 2.- 5. Reihe: Grundriss-Höhen-Proportionen  $\frac{\sqrt[3]{x \cdot y}}{h}$

Daraus ergeben sich im Prinzip für die Grundrissbetrachtung 10 Klassen ( $<0,3$ ;  $0,3$  bis  $<0,4$ ;  $0,4$  bis  $<0,5$ ;  $0,5$  bis  $<0,6$ ;  $0,6$  bis  $<1$ ;  $1$  bis  $<1,5$ ;  $1,5$  bis  $<2$ ;  $2$  bis  $<2,5$ ;  $2,5$  bis  $3$ ;  $>3$ ) und für die Grundriss-Höhen-Betrachtung 5 Klassen ( $<0,5$ ;  $0,5$  bis  $<1$ ;  $1$  bis  $<1,5$ ;  $1,5$  bis  $<2$ ;  $>2$ ).

Es bleibt festzuhalten, dass die Übereinstimmung der Grundriss-Höhen-Relation nicht auf eine Übereinstimmung der Form schließen lässt, aber durch eine Nichtübereinstimmung untersuchter Formen kann geschlossen werden, dass diese sich in ihrer Form, nämlich Grundriss-Höhen-Relation, unterscheiden.

### 10.1.6. Materialität

Ein raumakustisches Konzept ist neben der geometrischen Struktur auch maßgeblich von der materiellen Struktur beeinflusst. Deshalb würde man selbst wenn eine phänomenologische oder geometrisch strukturelle Übereinstimmung vorhanden ist, aber ein signifikanter Unterschied in der akustischen Materialisierung zu erkennen ist von einem unterscheidbaren Konzept sprechen können. Die akustische Materialisierung macht sich wie bereits in 8.1.3 beschrieben an den Absorptions- und Diffusionswerten fest. Die Unterschiedlichkeit der verwendeten Materialwerte lässt sich anhand der Spannweite, also der Differenz des Minimal- und Maximalwertes und am durchschnittlichen Wert des Absorptions- bzw. Diffusionsgrades messen.

Spannweite Absorption	$S\alpha$
durchschnittliche Absorption	$D\alpha$
Spannweite Diffusion	$Sd$
durchschnittliche Diffusion	$Dd$

*Tabelle 15:* Materiale Unterscheidungsmerkmale der Raumhüllen

Auch hier gilt, dass eine Differenzierung aufgrund der betrachteten Größen möglich ist, aber nicht zwingend auf eine Übereinstimmung bei identischer Betrachtungsgröße geschlossen werden kann.

### 10.2. Zusammenfassung der Kriterien zur Bewertung der Unterschiedlichkeit der erzeugten Raumkonzepte

Die morphologische Unterscheidung der einzelnen Individuen, also die gestaltbezogene Unterscheidung kann anhand unterschiedlicher Kriterien festgemacht werden. Die hier gesammelten Kriterien und Grenzwerte, die eine unterscheidbare Kategorie definieren, sind ganz konkrete Parameter, die sich auf die generierten Individuen im Zusammenhang mit der Formfindung von akustischen Räumen bezieht. Daher erhebt die folgende Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Universalität, im Gegenteil sie ist als problemspezifisch zu betrachten.

Grundrissproportion	max. Länge / max. Breite	1-10
Höhenproportion	Grundfläche / max. Höhe	1-5
Anzahl der Teilflächen	Anzahl der Teilflächen	
Raumvolumenkoeffizient	Raumvolumen/ Volumen QE-Volumen	
Zerklüftung / Kompaktheit	Oberfläche / Volumen	
Komplexität	Anzahl Knotenpunkte / Volumen	
Spannweite Absorption	Spannweite Absorption	
durchschnittliche Absorption	durchschnittliche Absorption	
Spannweite Diffusion	Spannweite Diffusion	
durchschnittliche Diffusion	durchschnittliche Diffusion	

*Tabelle 16:* Zusammenfassung der morphologischen Kriterien zur Bewertung der Unterschiedlichkeit der gefundenen Raumhüllen.

### 10.3. Bewertung des Formfindungsprozess für akustische Räume

Der vorgeschlagene Formfindungsprozess wird anhand der oben beschriebenen Ergebnisse und Beobachtungen auf seine Wirksamkeit als Formfindungssystem und auch in seiner Funktionsweise als evolutionärer Algorithmus betrachtet und bewertet. Nur wenn der Algorithmus auch in der Lage ist signifikant unterschiedliche Räume zu erzeugen, ist er prinzipiell als Entwurfswerkzeug brauchbar.

#### 10.3.1. Vergleichbarkeit der akustischen Qualität

Grundlegende Motivation für das vorgeschlagene Entwurfssystem ist die Unterstützung bei der Findung von Raumkonzepten für akustische Räume. Die in Grundtypen akustischer Räume vorgestellten Typen bestehender akustischer Räume sind in ihrer akustischen Qualität anerkannt. Sie können als Vergleich für die akustische Qualität der gefundenen Raumkonzepte dienen. Es stellt sich also die Frage, ob der vorgeschlagene Algorithmus in der Lage ist mit den gleichen Inputdaten Raumkonzepte zu finden, die mindestens die gleiche akustische Qualität als die beschriebenen Grundtypen aufweisen.

Um diese Frage beantworten zu können, müssen die 4 Grundtypen einer raumakustischen Analyse unterzogen werden. Es wird das Analyseverfahren verwendet, das auch im Entwurfssystem eingebunden ist. Die verwendeten Modelle basieren auf Recherchen eines akustischen Seminars am CAAD Labor der Fakultät Architektur und Stadtplanung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauphysik, Baustofflehre, Technischen Ausbau und Entwerfen. Es sind

vereinfachte Modelle deren Materialität (Absorptions- und Diffusionswerte) in Relation zur vereinfachten Geometrie abgeschätzt und entsprechend adaptiert werden. Die Ergebnisse sind daher nicht als realitätsnahe Voraussage der Raumakustik zu interpretieren, sondern müssen als eine simulationsbasierte Abschätzung betrachtet werden, um die vom Algorithmus generierten Räume mit den Vertretern der vier Grundtypen vergleichen zu können. Selbst wenn die Werte einem objektiven Vergleich, mit aus den realen Räumen gewonnenen Messungen, nicht standhalten kann, so sind die, aus der Simulation gewonnenen akustischen Werte, Teil eines geschlossenen Systems und daher vergleichbar. Die folgende Tabelle 17: zeigt die akustische Qualität von generierten Individuen im Vergleich zu den vier zu Beginn beschriebenen Grundtypen.

Bezeichnung	Gesamtqualität	Akustische Qualität	Anzahl Dreiecke	Generationen	Quelle-Empfänger Konstellation
Wien	0.562	0.371	184	1(Analyse)	Wien
Berlin	0.676	0.411	236	1(Analyse)	Berlin
Bayreuth	0.552	0.380	372	1(Analyse)	Bayreuth
Semper	0.685	0.467	766	1(Analyse)	Semper
S01-G-20_50-1000	0.546	0.433	240	1000	Semper
B02-G-500	0.550	0.488	66	500	Berlin
B01-A-24-500	n/a	0.505	18	500	Berlin
W01-A-24 500	n/a	0.498	16	500	Wien
W02-G-100-1000	0.629	0.538	98	1000	Wien
Ba01-G-24-500	0.590	0.593	24	500	Bayreuth

*Tabelle 17:* Vergleich der akustischen Qualitäten der 4 Grundtypen und generierter Individuen.

Die generierten Individuen zeigen eine mindestens genauso gute oder bessere akustische Qualität wie die analysierten Grundtypen. Die Anzahl der Generationen, hier zwischen 500 und 1000, haben dabei keinen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der akustischen Qualität der Individuen.

### **10.3.2. Innovationsfähigkeit der Genese**

Ein weiteres Kriterium zu Bewertung des Entwurfssystems ist dessen Innovationsfähigkeit. Konkret wird die Frage der Innovation an der Erzeugung von divergenten Raumkonzepten festgemacht: Ist das Entwurfssystem in der Lage ausgehend von Entwurfsparemtern aus vorhandenen Räumen (Grundtypen) innovative, also von den bekannten Räumen divergente Raumkonzepte, zu generieren? Die Divergenz der Raumkonzepte wird anhand der in Tabelle 16: ausgeführten morphologischen Unterscheidungskriterien bewertet. Ausgehend von einer ausgewählten Empfänger – Quellenkonstellation werden unterschiedliche Versuche mit den gleichen Genese-Einstellungen durchgeführt, um festzustellen, ob die Geometrie-Genese und die akustische Bewertungsfunktion in der Lage sind, unterscheidbare Raumgestalten zu erzeugen. Diese Untersuchung wird exemplarisch an der Quellen-Empfänger-Konstellation des Wiener Musikvereinssaals durchgeführt.

		<b>Wiener Musikvereins- -saal</b>	<b>W03-MN- 24-500</b>	<b>W07-MN- 50-500</b>	<b>W10-G- 100-500</b>	<b>W02-G- 100-1000</b>
Anzahl Start Dreiecke			24	50	100	100
Bounding BOX (l*b*h)		53.47,19.10,1 7.75	58.12,42. 39,29.85	67.98,38. 89,23.56	56.29,40. 20,38.55	64.66,40. 78,30.70
Anzahl Knotenpunkte		94	13	16	22	52
Anzahl Teilflächen		184	22	28	40	100
Volumen [m <sup>3</sup> ]		15934.60	17331.00	26563.80	19259.00	22493.2
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]		5244.94	5972.78	6405.60	6120.08	6318.4
Grundriss- proportion	max. Länge / max. Breite	2.79	1.38	1.76	1.40	1.6
Höhen-proportion	Grundfläche / max. Höhe	1.79	1.65	1.52	1.23	1.65
Anzahl der Teilflächen		184	22	28	40	100
Raumvolumen- koeffizient	Volumen / Raumvol. QE	1.91	2.08	3.19	2.31	2.70
Zerklüftung / Kompaktheit	Oberfläche / Volumen	0.33	0.34	0.24	0.32	0.28
Komplexität	Anzahl Knoten / Volumen/1000m <sup>3</sup>	11.55	0.75	0.60	1.14	2.31
Spannweite Absorption		0.65	0.317	0.481	0.442	0.563
Durchschnittliche Absorption		0.449	0.554	0.615	0.348	0.396
Spannweite Diffusion		0.70	0.351	0.430	0.565	0.714
durchschnittliche Diffusion		0.427	0.587	0.610	0.451	0.444

*Tabelle 18:* Auszug aus der morphologischen Vergleichstabelle zur Untersuchung der Diversität der generierten Raumgestalten.

Bei der Untersuchung wurden unterschiedliche Startbedingungen, sprich eine unterschiedliche Anzahl von Initialdreiecken gewählt. Der Algorithmus zeigt die Tendenz bei einer größeren Anzahl von Startdreiecken auch im Endergebnis eine größere Anzahl von Dreiecken anzustreben. Jedoch kann wenn man die beiden letzten Spalten betrachtet nicht generell von der Zahl der Initialdreiecke auch die Zahl der Enddreiecke geschlossen werden. Dies zeigt, dass der Algorithmus in der Lage ist, selbst mit ähnlichen Ausgangssituationen deutlich unterschiedliche Ergebnisse zu erzielen.

Beim Vergleich der Volumina und der Oberflächen wird deutlich, dass der Algorithmus tendenziell größere Raumgestalten erzeugt, als das Volumen des Wiener Musiksaals. Auch das Verhältnis des erzeugten Volumens zum

virtuellen Volumen der Quellen-Empfänger-Konstellation ist konsequenterweise gegenüber dem Vergleichsraum signifikant größer.

Die Ausprägung der Grundrissproportion ist relativ homogen. Der beschreibende Koeffizient befindet sich im Bereich zwischen 1.38 und 1.76. Wenn wir die unter Bild 89: erarbeitete Gruppierung anwenden, kann hier keine signifikante Unterscheidung statiert werden. Lediglich im Verhältnis zur Grundrissproportion des Wiener Musikvereinssaals lässt sich ein deutlicher Unterschied feststellen. Betrachtet man die Grundrissproportion der Quellen-Empfänger-Konstellation (2.41) so lässt sich feststellen, dass diese wohl nicht für die Ähnlichkeit der Grundrissproportion der Geometriegenese verantwortlich ist. Auch die Höhenproportion (2.27) deckt sich nicht mit den erzeugten Gestalten, was zur Annahme führt, dass die Empfänger-Quellen-Konstellation nicht ursächlich für die erzeugten Proportionen ist.

Ausgehend von den untersuchten Beispielen lässt sich auch erkennen, dass die Komplexität des Musikvereinssaals deutlich höher ist als die der entsprechend generierten Gestalten. Insgesamt zeigt der Algorithmus eine Tendenz, die Zahl der Dreiecke und damit die Komplexität eher zu verringern als zu erhöhen.

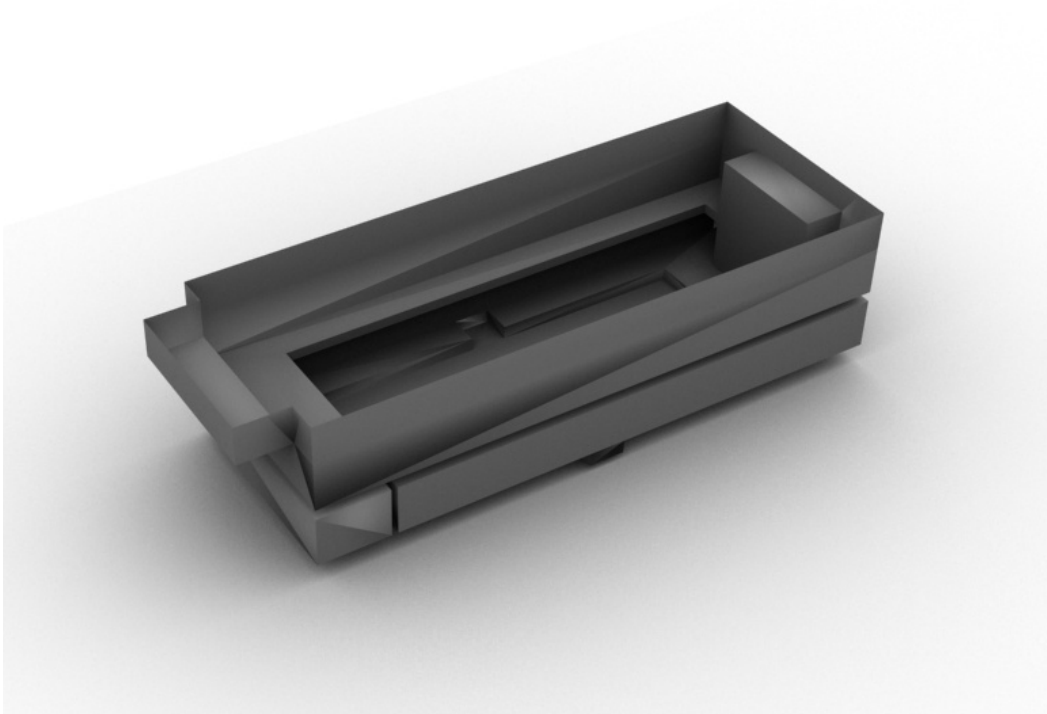


Bild 90: Darstellung der Geometrie des analysierten Raummodells Musikvereinssaal Wien.

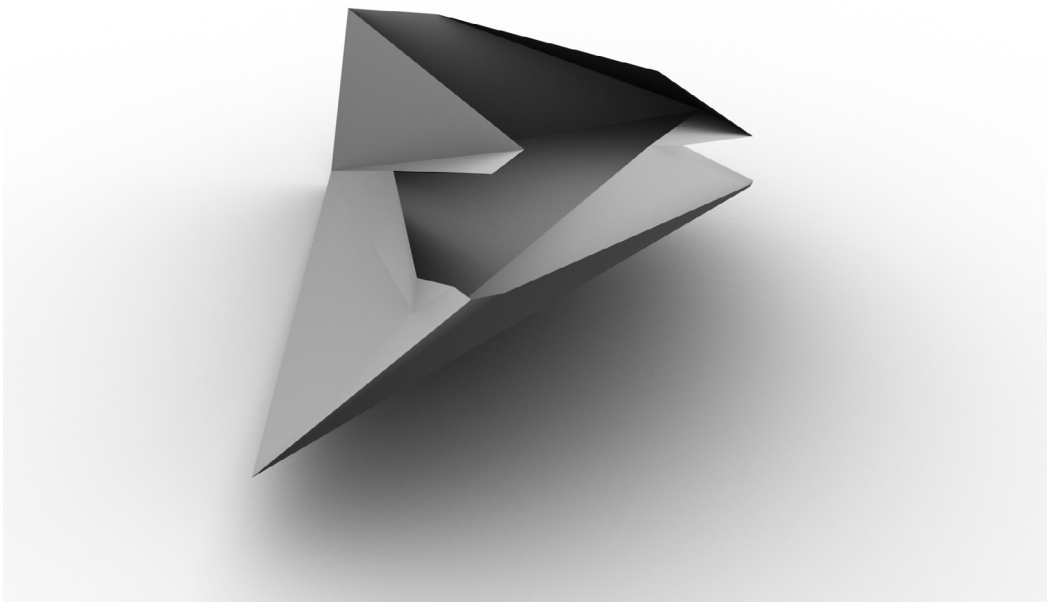


Bild 91: Darstellung des generierten Raummodells W03-MN-24-500



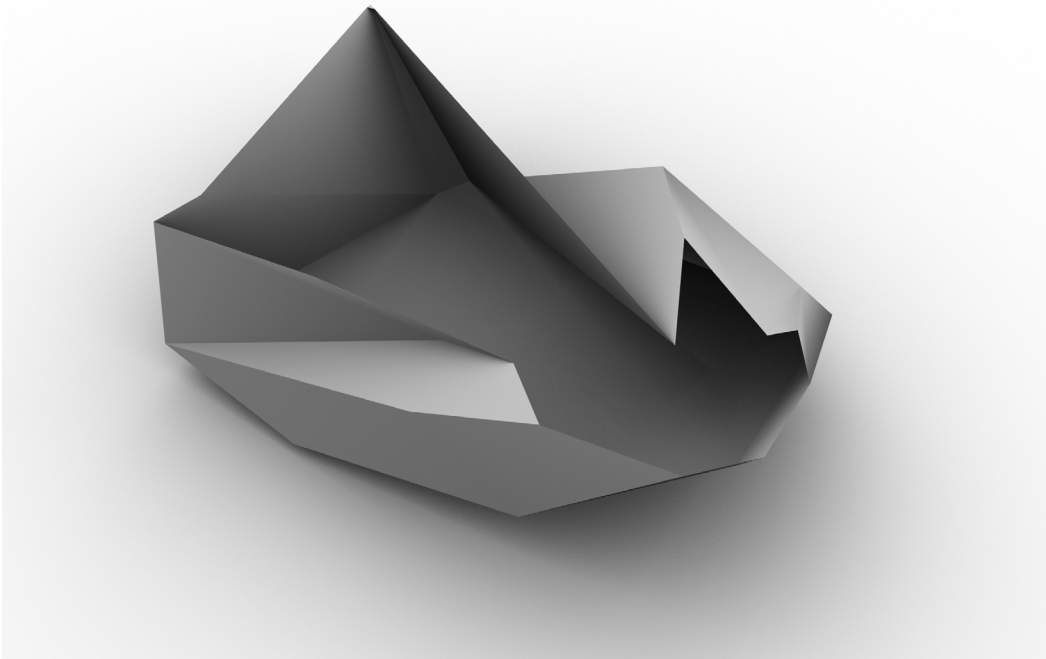


Bild 92: Darstellung des generierten Raummodells W07-MN-50-500

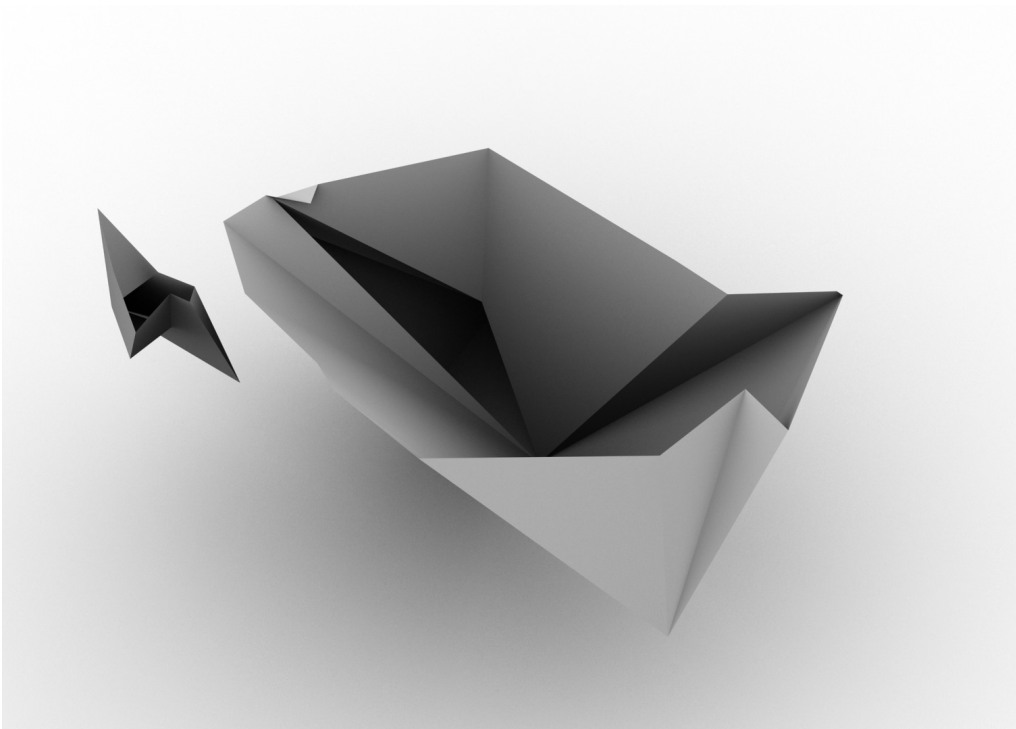
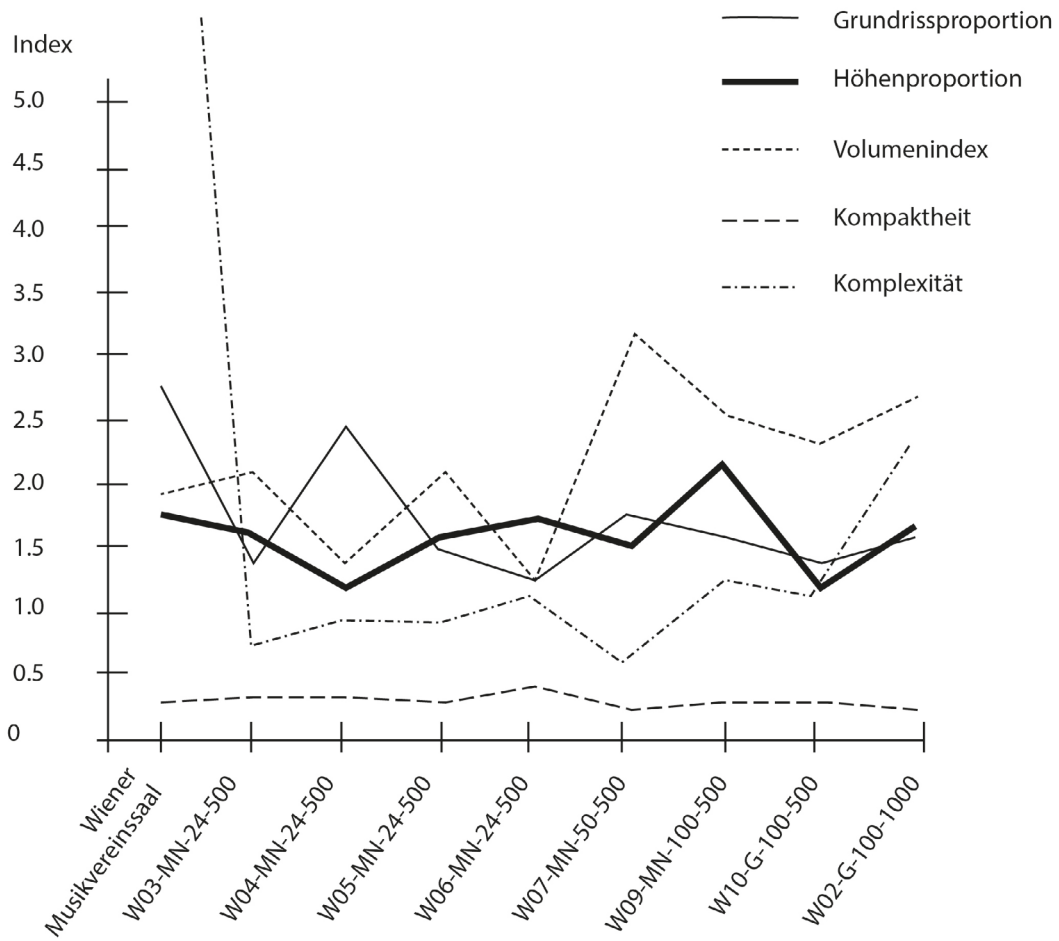


Bild 93: Darstellung des generierten Raummodells W10-G-100-500



Bild 94: Darstellung des generierten Raummodells W02-G-100-1000

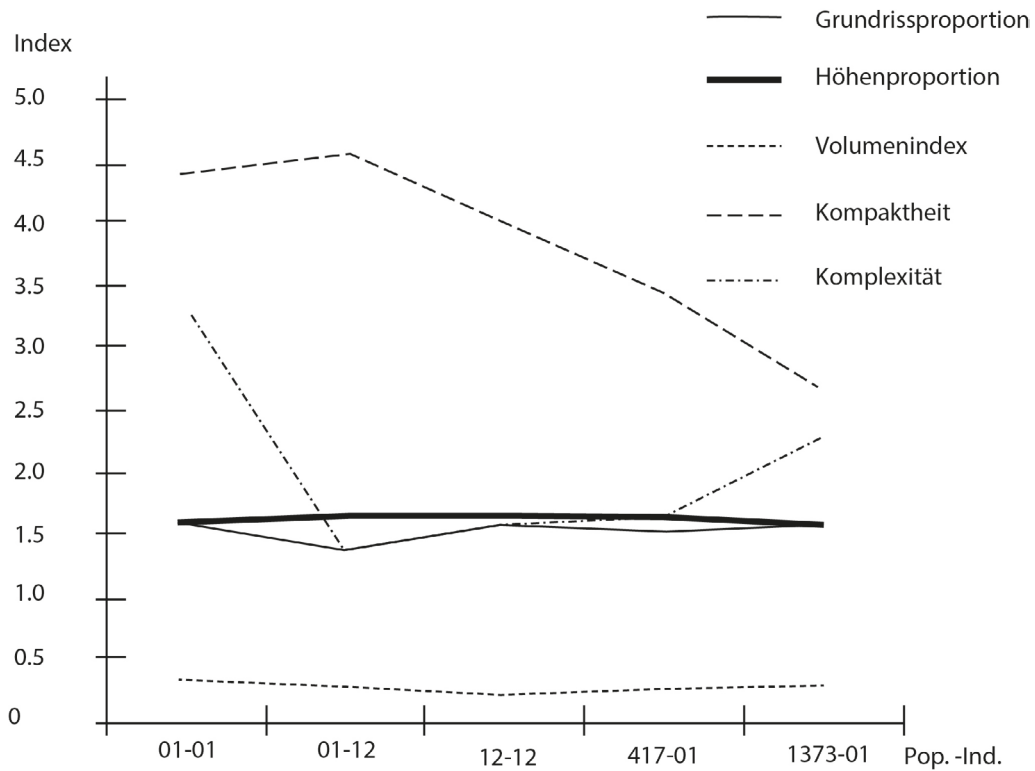


**Tabelle 19:** Entwicklung der morphologischen Kriterien bei unterschiedlicher Genesis mit gleicher Quellen-Empfängerkonfiguration aber unterschiedlichen Initial- und Bewertungskriterien.

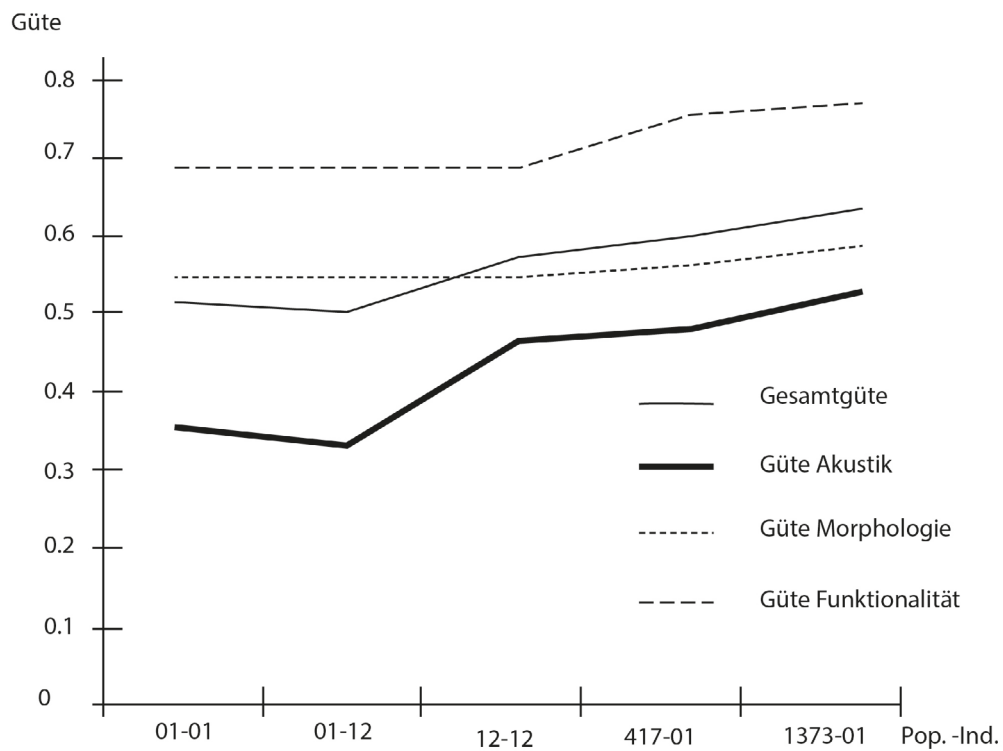
**10.3.3. Konvergenz des evolutionären Prozesses (W02-G-100-1000)**

	Pop1 Ind 01	Pop1 Ind 12	Pop12 Ind 12	Pop417 Ind 01	Pop1373 Ind 01	
Gesamt Güte	0.509	0.499	0.568	0.601	0.628	
Güte Akustik	0.359	0.336	0.469	0.485	0.538	
Güte Morphologie	0.547	0.540	0.543	0.565	0.587	
Güte Nutzbarkeit	0.685	0.688	0.692	0.753	0.761	
Anzahl Start Dreiecke	100	100	100	100	100	
Generation	1	2	12	417	1373	
Bounding BOX (l*b*h)	68.79,44.6 6,39.31	68.41,43.0 0,36.76	64.66,40.7 8,30.70	66.76,43.5 8,32.36	64.39,40.5 9,31.03	
Anzahl Knotenpunkte	52	52	52	48	51	
Anzahl Teilflächen	100	100	100	92	98	
Volumen [m <sup>3</sup> ]	36551.80	37962.70	33586.8	28496.8	22493.2	
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	13222.20	11169.10	8152.79	7920.81	6318.4	
Grundriss- proportion	max. Länge / max. Breite	1.55	1.38	1.60	1.53	1.6
Höhenproportion	Grundfläche / max. Höhe	1.39	1.65	1.65	1.65	1.63
Anzahl der Teilflächen		100	100	100	92	98
Raumvolumenko- effizient	Volumen / Raumvol. QE	4.39	4.56	4.03	3.42	2.70
Zerklüftung / Kompaktheit	Oberfläche / Volumen	0.36	0.29	0.24	0.28	0.28
Komplexität	Anzahl Knoten / Volumen/1000m <sup>3</sup>	3.26	1.37	1.55	1.68	2.27

*Tabelle 20:* Morphologische Vergleichskriterien ausgewählter Individuen unterschiedlicher Generationen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000)



**Tabelle 21:** Generative Entwicklung der Morphologie ausgewählter Individuen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000).



**Tabelle 22:** Generative Entwicklung der Güten ausgewählter Individuen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000).

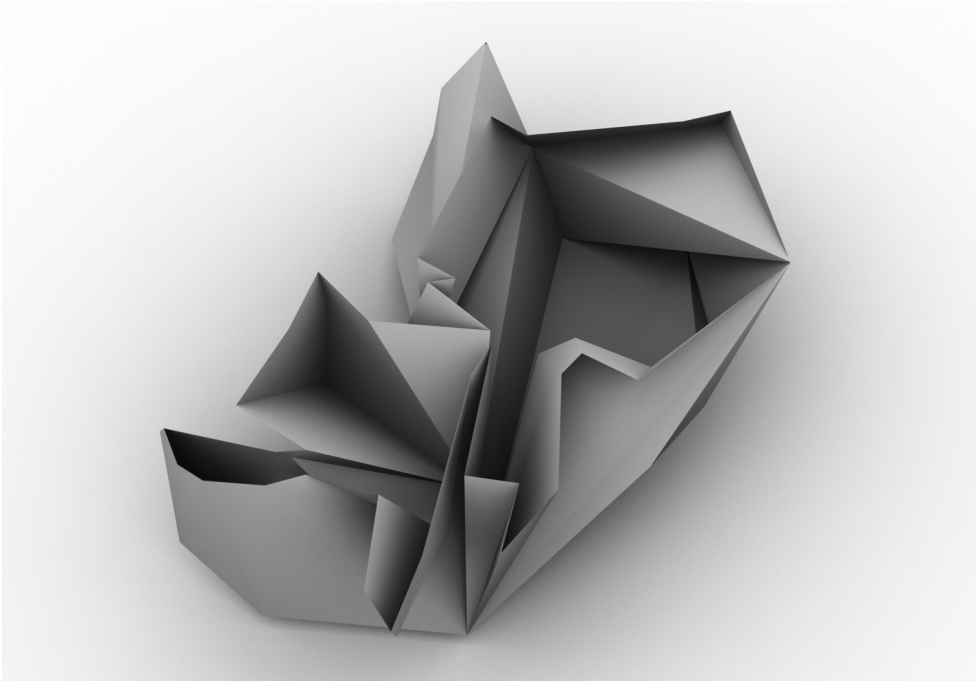


Bild 95: Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 1. Generation der Genese. (Pop1 Indv.01)

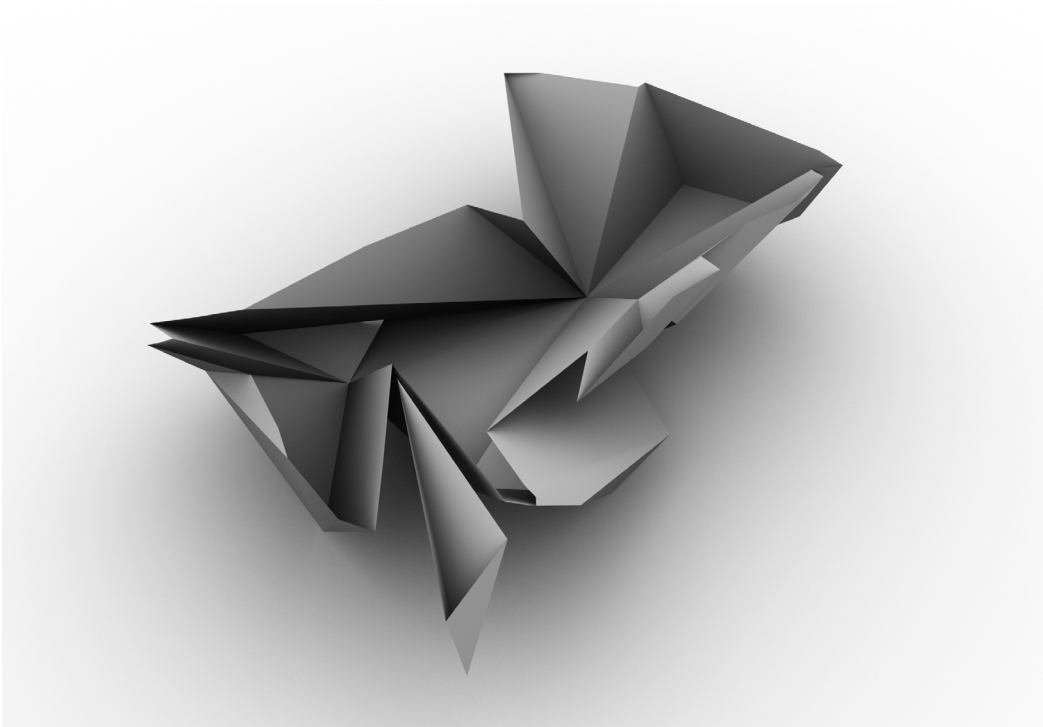


Bild 96: Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 12 aus der 1. Generation der Genese. (Pop1 Indv.12)

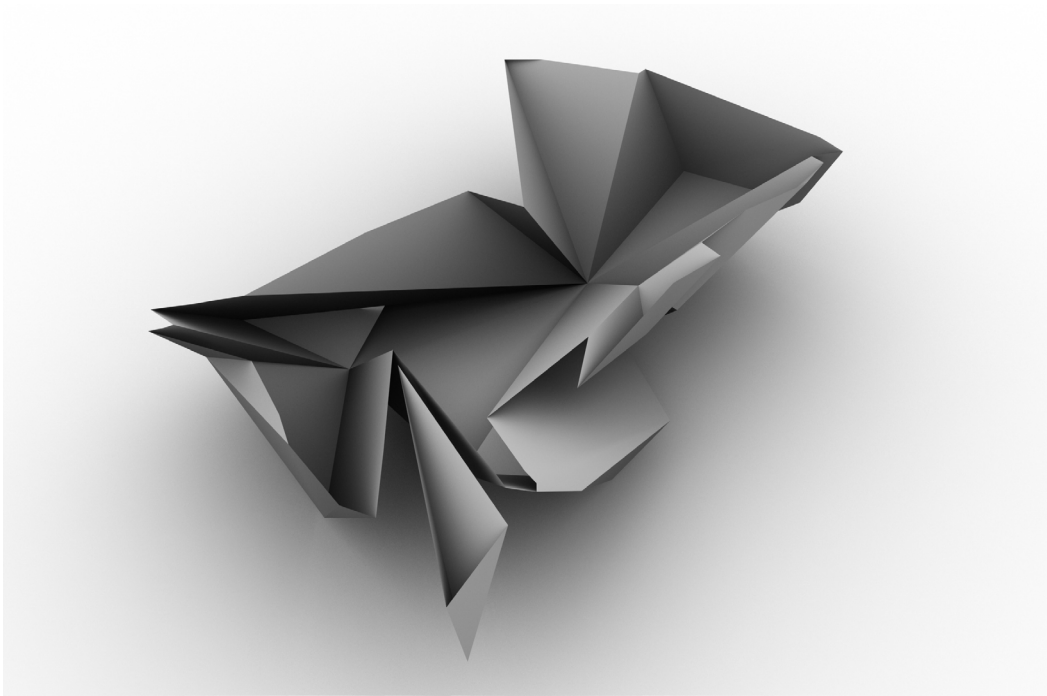


Bild 97: Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 12 aus der 2. Generation der Genese. (Pop2 Indv.12)



Bild 98: Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 417. Generation der Genese. (Pop417 Indv.01)



Bild 99: Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 1373. Generation der Genese. (Pop1373 Indv.01)

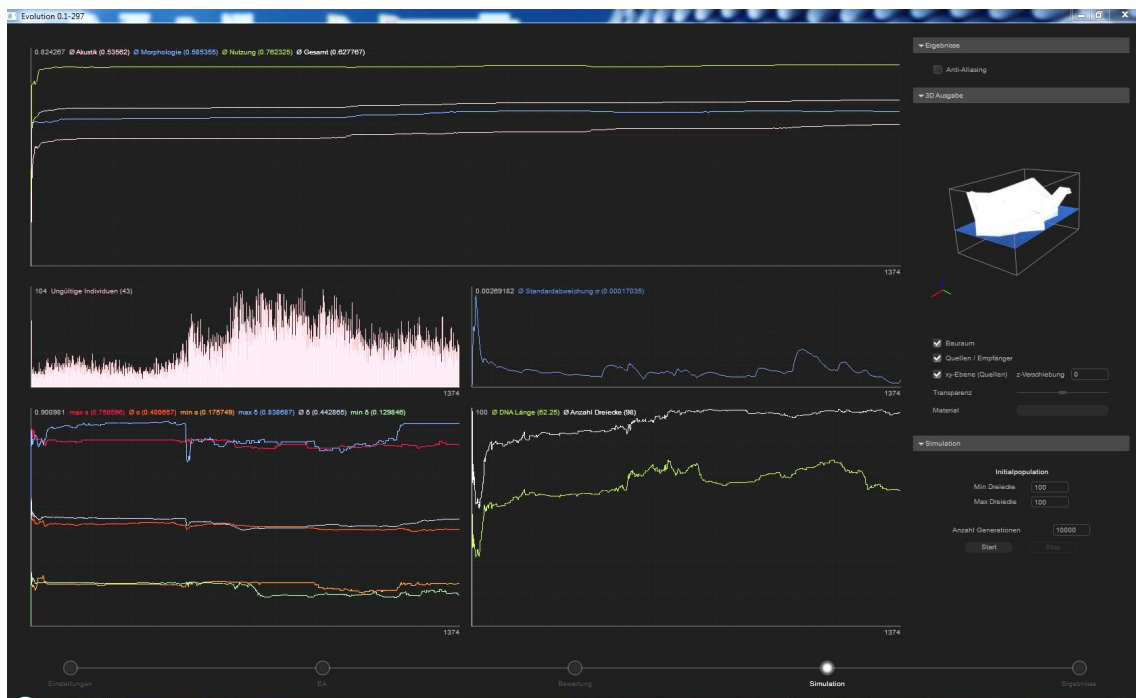


Bild 100: Statistik des genetischen Algorithmus

Beim Vergleich der erzeugten Individuen über die Generationen hinweg zeigt sich, dass der Algorithmus zur frühzeitigen Konvergenz neigt. Der Algorithmus



verharrt dann bildlich gesprochen an einer Stelle des Ergebnisraumes und ist nicht mehr in der Lage an anderer Stelle evtl. noch bessere Lösungen zu finden. Die Darstellung der Statistik macht dies noch deutlicher. Im Kopfbereich von Bild 100: ist die Entwicklung der Güterwerte des jeweils besten Individuums aus jeder Generation abgetragen. Man erkennt, dass zu Beginn ein Anstieg zu verzeichnen ist, der aber dann stark abflacht.

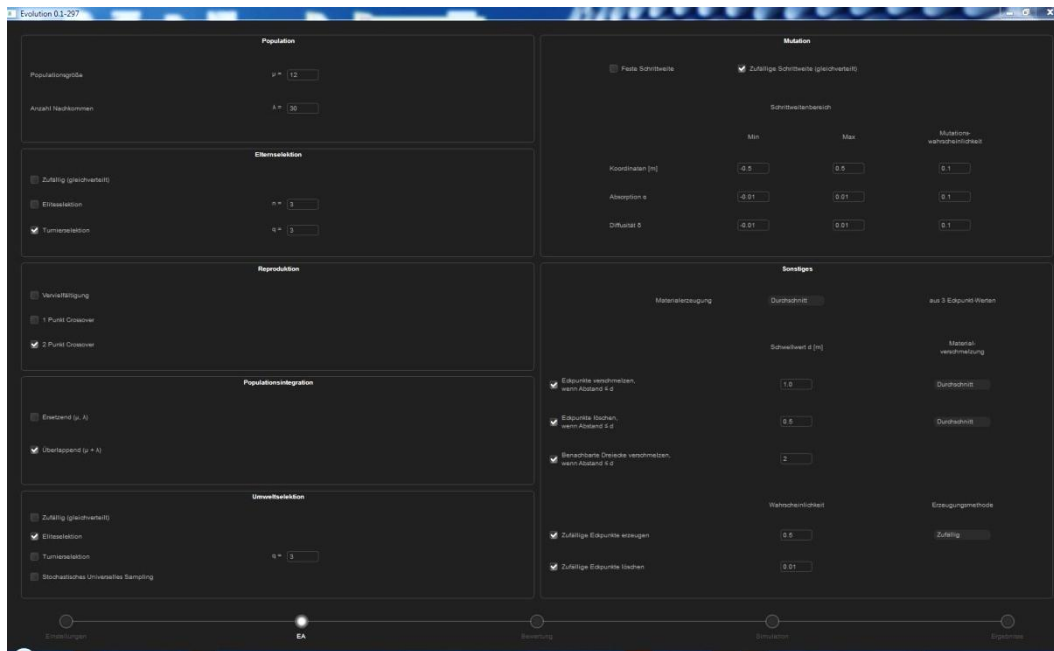


Bild 101: Verwendete Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Obwohl der evolutionäre Algorithmus mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% neue Knotenpunkte erzeugt und auch die Mutationsrate mit 10% und die Mutationsschrittweite von 0,5m relativ hoch ist, neigt der Algorithmus stark zu konvergieren.

Diese Beobachtung deckt sich mit der zu Beginn geäußerten Vermutung, dass der Ergebnisraum relativ flach und homogen mit wenigen prägnanten Spitzen ausgeprägt ist. Es gibt also viele einigermaßen gute Lösungen, die relativ leicht zu finden sind und nur wenige herausragende Spitzenlösungen, die kaum auszumachen sind.

Vermutlich ist die Homogenität bzw. fehlende Diversität der Generationen durch die technische Nebenbedingung der Sichtbeziehung zwischen Empfänger und Quelle und der nicht erlaubten Selbstdurchdringung zu erklären. Im Verlaufe

des evolutionären Prozesses nimmt die Anzahl der ungültigen Individuen stark zu. Das lässt die Vermutung zu, dass diese Nebenbedingungen, die keine tolerante Verarbeitung erlauben, für die wenig ausgeprägte Diversität mitverantwortlich sind.

#### **10.3.4. Konvexität der Gestalten**

Die durch den Algorithmus erzeugten Gestalten sind Hüllen, die häufig konvexer Natur sind. So sind während der Experimente kaum Raumphüllen entstanden, die Formen oder Einstülpungen ausbildeten, die als Balkone oder ähnliches interpretiert werden können. Vermutlich liegt dies an der Sichtlinienrestriktion, die simulationsbedingt Flächen verbietet, die sich auf der Sichtlinie zwischen der Quelle und einem Empfänger befinden. Eine tolerante Verarbeitung dieser Bedingungen ist aufgrund des zugrundeliegenden raumakustischen Simulationsmodells nicht möglich. Durch die Eliminierung der entsprechenden Individuen wird vermutlich die Entwicklung von Einstülpungen und ähnlichen Formen unterbunden. Diese Vermutung wird gestützt durch die Beobachtung, dass durch eine große Anzahl von Initialflächen der Algorithmus kaum in der Lage ist, gültige Individuen zu produzieren. Die wenigen Einstülpungen, die zu beobachten sind, entstehen meist außerhalb der Bereiche der direkten Verbindungslinien zwischen Quelle und Empfängern.

#### **10.3.5. Universalität der Gestaltsynthese**

Die genetische Gestaltsynthese ist sehr universell angelegt. Durch die Erzeugung von Tetraeder aufgrund einer Raumpunktliste ist die Struktur der Gestalten maximal universell. Eingeschränkt wird diese Universalität lediglich durch technische Anforderungen des zugrunde liegenden Simulationsmodells. Diese Universalität bringt aber den Nachteil mit sich, dass der Suchraum nicht abschätzbar oder vorhersehbar ist, was eine gezielte Modifikation der evolutionären Prozesse verhindert. Diese Universalität der Gestaltsynthese erhält aber die Möglichkeit zu unerwarteten Lösungen. Durch die Erweiterung des Bewertungssystems über die akustischen Kriterien hinaus zu einem Bewertungssystem, das die Morphologie und die Nutzbarkeit der Raumgestalten in Betracht zieht, wird der Suchraum spezifiziert. Eine gestalterische Vorhersehbarkeit dieser Spezifikationen im Ergebnis ist

systemgemäß nicht gegeben. Dies widerspricht der gestaltprägenden Tradition des Architekten und mag deshalb unbefriedigend wirken. Jedoch ist dies die Voraussetzung, um noch nicht (vor-)gedachte Lösungen zu finden.

#### **10.4. Gesamtbewertung**

Die vorliegende Arbeit zeigt einen Ansatz zur Integration einer raumakustischen Simulation in ein entwurfsunterstützendes Designsystem. Grundlage ist dabei ein evolutionärer Algorithmus, der, die aus einer genetischen Gestaltsynthese gewonnenen Individuen, mittels einer raumakustischen Simulation auf einer wissenschaftlichen Basis bewertet. Dieser Ansatz ist eine grundsätzliche Neuerung, da er zum einen eine sehr universell angelegte Geometriesynthese verwendet und zum anderen ein komplexes Bewertungssystem aus akustischen, morphologischen und nutzungsspezifischen Kriterien in einem evolutionären Prozess anwendet. Die Vorstellung, dass der Architekt nicht mehr als Formgeber tätig ist, sondern die Verantwortung für die Definition der Zielwerte trägt ist in der vorgestellten Methode konsequent umgesetzt. Mit dem Programm zur architektonischen Formgebung akustischer Räume wird ein experimenteller Ansatz zur Erforschung von kategorisch differenzierten Bewertungskriterien vorgestellt. Möglichkeiten zur Erprobung unterschiedlicher evolutionärer Prozesse und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse wurden im Programm konsequent umgesetzt.

Entsprechend der integrierten raumakustischen Simulation liefert das Programm Ergebnisse, die innerhalb der systemimmanenten Bewertung eine mindestens vergleichbare akustische Qualität mit den ausgewählten Referenzprojekten aufweist. Der Evaluationsalgorithmus nimmt eine summarische Bewertung der Kriterien und der untersuchten Hörerplätze vor, was eine signifikante Vereinfachung der raumakustischen Bewertung darstellt.

Die generierten Raumgestalten können sicherlich nicht als Architektur bezeichnet werden. Sie liefern aber Konzepte für Räume, die aufgrund von Empfänger-Quellen Konstellationen entstehen und als Arbeitsgrundlage für Entwürfe dienen können. Die Beobachtung, dass selbst bei symmetrischen Ausgangskonstellationen keine symmetrischen Raumgestalten entstehen, lässt

ein Potential zur Überwindung der bisher üblichen symmetrischen Konzeption von akustischen Räumen erkennen.

## **10.5. Ausblick für weiterführende Arbeiten**

### **10.5.1. Dilemma simulationsbasierter Entwurfssysteme**

Der Versuch den Entwurf eines akustischen Raumes mit Hilfe einer raumakustischen Simulation zu unterstützen hat ein grundlegendes Dilemma verdeutlicht. Das Dilemma von Präzision und Ungenauigkeit. Der Entwurf als „wicked problem“ verlangt nach Ungenauigkeit und Offenheit, wohingegen die Simulation nach größtmöglicher Präzision verlangt. Obwohl die Arbeit dieses Dilemma von Beginn an thematisiert und im Entwurf des Algorithmus durch eine tolerante Bewertungsstrategie berücksichtigt hat, muss doch festgestellt werden, dass aufgrund von nicht zuletzt technischen Bedingungen, die zur Durchführung der Simulation notwendig sind, die „Kreativität“ des Algorithmus relativ eingeschränkt bleibt. Die Herausforderung einen Algorithmus zu entwerfen, der auf einer technisch-wissenschaftlich belastbaren Ebene den Entwurf von akustischen Raumkonzepten unterstützt, verlangt aber diese Präzision. Das Dilemma zwischen Präzision und Ungenauigkeit stellt die grundlegende Herausforderung für die Lösung entwerferischer Probleme innerhalb simulationsbasierter Systeme dar. Die Balance zwischen Determiniertheit und Offenheit ist der Schlüssel zu „kreativen“ Entwurfssystemen, die sich simulationsbasierter Bewertungssysteme bedienen wollen. Im vorliegenden Fall scheint die Sichtlinienrestriktion die Möglichkeiten der Formerzeugung entscheidend einzuschränken. Eine tolerante Verarbeitung dieser Restriktion verspricht eine höhere Qualität der erzeugten Gestalten.

### **10.5.2. Spezifikation der Geometrie**

Die Integration der Bewertungskriterien zur Morphologie beabsichtigt die universale Geometrieerzeugung von Beliebigkeit zu befreien und einem „Gestaltungswillen“ der über die Akustik als determinierendes Element hinausgeht. Die im vorliegenden Programm verwendeten morphologischen Kriterien führen nur bedingt zu einer architektonischen Formensprache. Eine Erweiterung des morphologischen Kriterienkatalogs birgt Potential, um eine

differenzierte Formensprache auf der Grundlage der universalen Geometrieerzeugung zu entwickeln. Basierend auf dem Vorbild der akustischen Kennwerte könnten, wie von Franz bereits begonnen weitere intersubjektivierte Kennwerte für die Raumwahrnehmung entwickelt werden. Diese Kennwerte einer architektonischen-ästhetischen Raumwahrnehmung könnten dann als Bewertungskriterien für die Raumqualität verwendet werden.

### **10.5.3. Weitere Evaluationskriterien**

Die vorliegende Arbeit ist inspiriert von der Idee, akustische Qualität als entwurfsbestimmenden Parameter einzusetzen. Darüber hinaus sind auch andere berechenbare oder simulierbare Größen denkbar. Eine Erweiterung der Evaluationskriterien auf beispielsweise raumklimatische Kenngrößen, Belichtung oder raumsyntaktische Betrachtungen bergen weiteres Potential. Prinzipiell ist die Integration von belastbaren Entwurfsgrößen, die die Performanz eines Entwurfs maßgeblich bestimmen denkbar und wünschenswert. Dadurch wird der Entwurf auf eine nachvollziehbare und transparente Basis gestellt und würde nicht zufällig, sondern gezielt die angestrebte Performanz erreichen.

**11. Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1:</i>	Liste des Rechenaufwands unterschiedlicher Komplexitätsklassen	48
<i>Tabelle 2:</i>	Frequenzabhängige Energiedämpfungskonstante $m$ von Luft	65
<i>Tabelle 3:</i>	Typische Absorptionsgrade (Quelle: Physikalisch Technische Bundesanstalt)	67
<i>Tabelle 4:</i>	Unterschiedliche Raumgeometrie mit annähernd gleichen Nachhallzeiten.	75
<i>Tabelle 5:</i>	Mittlere Nachhallzeiten unterschiedlicher Räume (Fasold, Veres 2003, S. 192)	76
<i>Tabelle 6:</i>	Relevante akustische Kenngrößen für den Formfindungsalgorithmus	97
<i>Tabelle 7:</i>	Genetische Notation der Hüllform als geordnete Punkteliste	132
<i>Tabelle 8:</i>	Genetische Notation der Geometrie und Materialeigenschaften als geordnete Liste	133
<i>Tabelle 9:</i>	Verwendete Materialeigenschaften für den Simulationsvergleich	153
<i>Tabelle 10:</i>	Darstellung ausgewählter akustischen Kenngrößen aus den Simulationsergebnissen für die Berliner Philharmonie mit einheitlichen Absorptions- und Diffusionswerten von 0,4 bzw. 0,2	156
<i>Tabelle 11:</i>	Transformationstabelle der Wertebereiche $x$ in Gütewerte $Q(x) \{0,1\}$	158
<i>Tabelle 12:</i>	Typologische Ordnung akustischer Räume	196
<i>Tabelle 13:</i>	Parameter zur Unterscheidung von Raumkonzepten basierend auf den Untersuchungen von Franz (Franz 29.08.2005).	199
<i>Tabelle 14:</i>	Proportionen und Maßverhältnisse zur Unterscheidung von Raumkonzepten	200
<i>Tabelle 15:</i>	Materiale Unterscheidungsmerkmale der Raumhüllen	202
<i>Tabelle 16:</i>	Zusammenfassung der morphologischen Kriterien zur Bewertung der Unterschiedlichkeit der gefundenen Raumhüllen.	203
<i>Tabelle 17:</i>	Vergleich der akustischen Qualitäten der 4 Grundtypen und generierter Individuen.	204
<i>Tabelle 18:</i>	Auszug aus der morphologischen Vergleichstabelle zur Untersuchung der Diversität der generierten Raumgestalten.	206
<i>Tabelle 19:</i>	Entwicklung der morphologischen Kriterien bei unterschiedlicher Genesis mit gleicher Quellen-Empfängerkonfiguration aber unterschiedlichen Initial- und Bewertungskriterien.	211
<i>Tabelle 20:</i>	Morphologische Vergleichskriterien ausgewählter Individuen unterschiedlicher Generationen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000)	212

<i>Tabelle 21:</i> Generative Entwicklung der Morphologie ausgewählter Individuen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000).	213
<i>Tabelle 22:</i> Generative Entwicklung der Güten ausgewählter Individuen innerhalb einer Genese (W02-G-100-1000).	213
<i>Tabelle 23:</i> Übersicht Simulationsergebnisse Simulation Musikvereinssaal Wien	254
<i>Tabelle 24:</i> Simulationsergebnisse Akustik Musikvereinssaal Wien	254
<i>Tabelle 25:</i> Detaillierte Simulationsergebnisse per Empfänger Musikvereinssaal Wien	255
<i>Tabelle 26:</i> Simulationsergebnisse Morphologie Musikvereinssaal Wien	255
<i>Tabelle 27:</i> Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Musikvereinssaal Wien	255
<i>Tabelle 28:</i> Übersicht Simulationsergebnisse Philharmonie Berlin	256
<i>Tabelle 29:</i> Simulationsergebnisse Akustik Philharmonie Berlin	257
<i>Tabelle 30:</i> Detaillierte Simulationsergebnisse Akustik je Empfänger Philharmonie Berlin	257
<i>Tabelle 31:</i> Simulationsergebnisse Morphologie Philharmonie Berlin	257
<i>Tabelle 32:</i> Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Philharmonie Berlin	258
<i>Tabelle 33:</i> Übersicht Simulationsergebnisse Festspielhaus Bayreuth	259
<i>Tabelle 34:</i> Simulationsergebnisse Akustik Festspielhaus Bayreuth	259
<i>Tabelle 35:</i> Detaillierte Simulationsergebnisse per Empfänger Festspielhaus Bayreuth	259
<i>Tabelle 36:</i> Simulationsergebnisse Morphologie Festspielhaus Bayreuth	260
<i>Tabelle 37:</i> Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Festspielhaus Bayreuth	260
<i>Tabelle 38:</i> Übersicht Simulationsergebnisse Semperoper	261
<i>Tabelle 39:</i> Simulationsergebnisse Akustik Semperoper	261
<i>Tabelle 40:</i> Detaillierte Simulationsergebnisse Akustik per Empfänger Semperoper	261
<i>Tabelle 41:</i> Simulationsergebnisse Morphologie Semperoper	262
<i>Tabelle 42:</i> Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Semperoper	262
<i>Tabelle 43:</i> Vergleich EDT Catt Acoustics und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus	263
<i>Tabelle 44:</i> Vergleich C80 Catt Acoustics und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus	264
<i>Tabelle 45:</i> Vergleich Ts Catt Acoustics und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus	264
<i>Tabelle 46:</i> Vergleich Volumen Kennzahl aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	265
<i>Tabelle 47:</i> Vergleich Nachhallzeit aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	265
<i>Tabelle 48:</i> Vergleich frühe Nachhallzeit aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	266
<i>Tabelle 49:</i> Vergleich Klarheitsmaß aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	266

<i>Tabelle 50:</i> Vergleich Stärkemaß aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	267
<i>Tabelle 51:</i> Schwerpunktzeiten aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen	267
<i>Tabelle 52:</i> Vergleichende Übersicht der akustischen Werte unterschiedlicher Raumtypen aus der Analyse der 4 akustischen Grundtypen.	268
<i>Tabelle 53:</i> Vergleich der Gütwerte unterschiedlicher Raumtypen aus der Analyse der 4 akustischen Grundtypen.	268
<i>Tabelle 54:</i> NR01-G-100-500 Empfänger Quellen Konstellation (frei gewählt)	269
<i>Tabelle 55:</i> NR01-G-100-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	270
<i>Tabelle 56:</i> NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Akustik	271
<i>Tabelle 57:</i> NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Morphologie	271
<i>Tabelle 58:</i> NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	272
<i>Tabelle 59:</i> NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	272
<i>Tabelle 60:</i> Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500	273
<i>Tabelle 61:</i> Analyse Akustik des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500	273
<i>Tabelle 62:</i> Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500	274
<i>Tabelle 63:</i> Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500	274
<i>Tabelle 64:</i> Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500	274
<i>Tabelle 65:</i> W01-A-24-500 Empfänger Quellen Konstellation (entsprechend Musikvereinssaal Wien)	275
<i>Tabelle 66:</i> W01-A-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	276
<i>Tabelle 67:</i> W01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik	277
<i>Tabelle 68:</i> W01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	277
<i>Tabelle 69:</i> Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W01-A-24-500	279
<i>Tabelle 70:</i> Analyse Akustik des besten Individuums der Genese W01-A-24-500	279
<i>Tabelle 71:</i> Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese W01-A-24-500	279
<i>Tabelle 72:</i> W02-G-100-1000 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	281
<i>Tabelle 73:</i> W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Akustik	282
<i>Tabelle 74:</i> W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Morphologie	282
<i>Tabelle 75:</i> W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	282



<i>Tabelle 76:</i> W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	282
<i>Tabelle 77:</i> Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000	285
<i>Tabelle 78:</i> Analyse der Akustik des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000	285
<i>Tabelle 79:</i> Detaillierte Analyse der Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000	285
<i>Tabelle 80:</i> Analyse der Morphologie des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000	286
<i>Tabelle 81:</i> Analyse der Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000	286
<i>Tabelle 82:</i> W03-MN-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	287
<i>Tabelle 83:</i> W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Morphologie	288
<i>Tabelle 84:</i> W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	288
<i>Tabelle 85:</i> W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	288
<i>Tabelle 86:</i> Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500	290
<i>Tabelle 87:</i> Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500	290
<i>Tabelle 88:</i> Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500	290
<i>Tabelle 89:</i> W07-MN-50-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	292
<i>Tabelle 90:</i> W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Morphologie	293
<i>Tabelle 91:</i> W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	293
<i>Tabelle 92:</i> W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	293
<i>Tabelle 93:</i> Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500	294
<i>Tabelle 94:</i> Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500	294
<i>Tabelle 95:</i> Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500	295
<i>Tabelle 96:</i> W10-MN-100-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese	296
<i>Tabelle 97:</i> W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Akustik	297
<i>Tabelle 98:</i> W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Morphologie	297
<i>Tabelle 99:</i> W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	298
<i>Tabelle 100:</i> W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	298
<i>Tabelle 101:</i> Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W10-G-100-500	299
<i>Tabelle 102:</i> Analyse Akustik des besten Individuums der Genese W10-G-100-500	299

<i>Tabelle 103:</i>	Detaillierte Analyse per Empfänger des besten Individuums der Genese W10-G-100-500	300
<i>Tabelle 104:</i>	Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W10-G-100-500	300
<i>Tabelle 105:</i>	Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W10-G-100-500	300
<i>Tabelle 106:</i>	S01-G-20_50-1000 Quellen-Empfänger Konstellation	303
<i>Tabelle 107:</i>	S01-G-20_50-1000 Einstellungen der Evolutionparameter	303
<i>Tabelle 108:</i>	S01-G-20_50-1000 Evaluationseinstellungen Akustik	304
<i>Tabelle 109:</i>	S01-G-20_50-1000 Evaluationseinstellungen Morphologie	304
<i>Tabelle 110:</i>	S01-G-20_50-1000 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	305
<i>Tabelle 111:</i>	S01-G-20_50-1000 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	305
<i>Tabelle 112:</i>	Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese S01-G-20_50-1000	306
<i>Tabelle 113:</i>	Analyse Akustik des besten Individuums der Genese S01- G.20_50-1000	306
<i>Tabelle 114:</i>	Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese S01-G-20_50-1000	307
<i>Tabelle 115:</i>	Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese S01-G-20_50-1000	307
<i>Tabelle 116:</i>	Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese S01-G-20_50-1000	308
<i>Tabelle 117:</i>	B01-A-24-500 Quellen-Empfänger Konstellation	309
<i>Tabelle 118:</i>	B01-A-24-500 Einstellungen der Evolutionparameter	310
<i>Tabelle 119:</i>	B01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik	311
<i>Tabelle 120:</i>	B01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	311
<i>Tabelle 121:</i>	Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese B01-A-24-500	313
<i>Tabelle 122:</i>	Analyse Akustik des besten Individuums der Genese B01-A-24-500	313
<i>Tabelle 123:</i>	Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese B01-A-24-500	314
<i>Tabelle 124:</i>	BA01-G-24-500 Quellen-Empfänger Konstellation	315
<i>Tabelle 125:</i>	BA01-G-24-500 Einstellungen der Evolutionparameter	316
<i>Tabelle 126:</i>	BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik	317
<i>Tabelle 127:</i>	BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Morphologie	317
<i>Tabelle 128:</i>	BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit	317
<i>Tabelle 129:</i>	BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien	317
<i>Tabelle 130:</i>	Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500	319

<i>Tabelle 131:</i>	Analyse Akustik des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500	319
<i>Tabelle 132:</i>	Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500	319
<i>Tabelle 133:</i>	Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500	320
<i>Tabelle 134:</i>	Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500	320

## 12. Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	A. Gaudí: Hängemodell Sagrada Famillia (Rudy 2008)	33
Bild 2:	Frei Otto: Seifenhautmodell zur Formfindung eines Zeltes (Schanz, Otto 1995, S. 44)	34
Bild 3:	Frei Otto: Seifenhautmodell eines Seilnetz Kühlturms (Schanz, Otto 1995, S. 111)	35
Bild 4:	Schema Design Algorithmus nach Stiny u. Gips (Stiny, Gips 1978, S. 13)	37
Bild 5:	Lömker: graphische Darstellung der Bestandsituation (Lömker 2006, S. 183)	40
Bild 6:	Lömker: Darstellung der Lösung durch den kombinatorischen Algorithmus (Lömker 2006, S. 183)	41
Bild 7:	Grundrisse Wiener Musikvereinssaal (Beranek 2004, S. 175)	54
Bild 8:	Schnitt Wiener Musikvereinssaal (Beranek 2004, S. 175)	54
Bild 9:	Blick in den Hauptsaal des Wiener Musikvereinssaal. (Wiener Musikverein)	55
Bild 10:	Grundrisse Semperoper Dresden (Beranek 2004, S. 307)	56
Bild 11:	Schnitt Semperoper Dresden (Beranek 2004, S. 307)	56
Bild 12:	Semperoper Dresden. Innenraum (Oper Dresden 19.10.2010)	57
Bild 13:	Grundriss Opera Oslo Ausschnitt (Staatsoper Oslo 01.12.2005)	58
Bild 14:	Schnitt Opera Oslo Ausschnitt (Staatsoper Oslo 08.12.2005)	58
Bild 15:	Oper Oslo Blick ins Publikum (Staatsoper Oslo 09.05.2008)	58
Bild 16:	Grundriss Oper Sydney (Beranek 2004, S. 167)	59
Bild 17:	Schnitt Oper Sydney (Beranek 2004, S. 167)	60
Bild 18:	Oper Sydney. Innenraum (Anonym 10.03.2010)	60
Bild 19:	Grundriss Festspielhaus Bayreuth (Beranek 2004, S. 284)	61
Bild 20:	Schnitt Festspielhaus Bayreuth (Beranek 2004, S. 284)	62
Bild 21:	Festspielhaus Bayreuth. Blick Richtung Bühne (Beranek 2004, S. 286)	62
Bild 22:	Philharmonie Berlin. Grundriss (Beranek 2004, S. 299)	64
Bild 23:	Philharmonie Berlin. Schnitt (Beranek 2004, S. 299)	64
Bild 24:	Philharmonie Berlin Innenansicht (Anonym 04.01.2012)	65

Bild 25:	Richtungsverteilung des gestreuten Schalls nach dem Lambert'schen Gesetz (Kuttruff 2004, S. 131)	68
Bild 26:	Schallstreuung bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturgrößen (Kuttruff 2004, S. 130)	69
Bild 27:	Schematische Darstellung der Impulsantwort (Fasold, Veres 2003, S. 149)	72
Bild 28:	Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieeinwirkung auf einen Empfängerplatz. (Raumvariante 2 Empfänger 1, 1kHz, CATT Acoustics™) Relativ symmetrische Einwirkung der Signale.	82
Bild 29:	Graphische Darstellung der räumlich-zeitlichen Energieeinwirkung auf einen Empfängerplatz. (Raumvariante 2 Empfänger 4,1kHz, CATT Acoustics™) Deutlich zu sehen das asymmetrische Einwirken der Signale im Zeitintervall bis 200ms.	83
Bild 30:	Akustisches Raummodell im Maßstab 1:10. Philharmonie Hamburg (Spaeth, 2011)	84
Bild 31:	Graphische Strahlenverfolgung in Schnitt und Grundriss (Fasold, Veres 2003, S. 158)	85
Bild 32:	Ergebnis einer numerischen Analyse mit der Anwendung Catt Acoustics (Dahlenbäck 1998) mit Darstellung der Echogramme und der akustischen Kennwerte	87
Bild 33:	Darstellung der Analyse aus Bild 32: als binaurale Impulsantwort	87
Bild 34:	Virtuelle Akustik (VA) am Institut für Technische Akustik RWTH Aachen (Vorländer)	88
Bild 35:	Grundriss der Oper Oslo. Grau markiert das akustische Volumen der Semperoper Dresden. Die akustischen Raumvolumina der beiden Säle stimmen weitgehend überein.	91
Bild 36:	Unterteilung der Ausgangshülle (Sato u. a. 2004, S. 45)	93
Bild 37:	Darstellung der Optimierungsergebnisse durch den evolutionären Prozess (Sato u. a. 2004, S. 47)	93
Bild 38:	Darstellung der akustischen Qualität der Individuen (Sato u. a. 2004, S. 47)	94
Bild 39:	Parametrisches Modell (Peters 2010, S. 348)	94
Bild 40:	Akustisches optimiertes Objekt (Peters 2010, S. 354)	95
Bild 41:	Analyse des akustischen Objektes (Peters 2010, S. 350)	95
Bild 42:	Ergebnis der Optimierung eines Hörerplatzes mit Hilfe eines parametrischen Entwurfssystems (Bonwetsch, Ralph Baertschi, Silvan Oesterle 2008, S. 366)	96
Bild 43:	Vergleich der [frühen] (Anmerkung des Autors) Nachhallzeit mit und ohne Paneel (Bonwetsch, Ralph Baertschi, Silvan Oesterle 2008, S. 368)	96

Bild 44:	Allgemeine Darstellung eines evolutionären Algorithmus (Weicker 2007, S. 25)	103
Bild 45:	Schemata unterschiedlicher Crossover-Rekombinationen	111
Bild 46:	Logische Repräsentationsalternativen TSP (Weicker 2007, S. 28)	120
Bild 47:	Darstellung von 0 bis 3-dimensionalen Simplizia (Attar u. a. 2009, S. 233)	130
Bild 48:	Generierung von geschlossenen Volumina durch Aneinanderfügen von Tetraedern	131
Bild 49:	Aufteilung der Simulation in drei verschiedene Modellvorstellungen (Heinz 1994, S. 119)	136
Bild 50:	Reflexionen mittels Spiegelschallquellenverfahren (Reflexionsgrad 1)	138
Bild 51:	Ablaufdiagramm Simulation des geometrischen Anteils der Schallreflexion in Anlehnung an (Schröder 2011 ; Heinz 1994 ; Vorländer 1988)	142
Bild 52:	Energetische Impulsantwort nach der RAYSSQ Methode begrenzt auf 3 Reflexionen.	143
Bild 53:	Schema des "diffusen Regens"	147
Bild 54:	Geometrische Verhältnisse bei der Detektion mittels diffusem Regen (Schröder 15.09.2011, S. 63)	148
Bild 55:	Ablaufdiagramm Simulation des diffusen Anteil der Schallreflexion in Anlehnung an (Schröder 15.09.2011 ; Heinz 1994 ; Vorländer 1988)	150
Bild 56:	Schaubild Überlagerung der reflektierten Energieanteile aus der geometrischen und diffusen Modellvorstellung	151
Bild 57:	Vergleich des GEODIFF-Verfahrens und der Messung eines Raumes (Heinz 1994, S. 111)	153
Bild 58:	Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 1. Ordnung	154
Bild 59:	Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 1. Ordnung.	154
Bild 60:	Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 2. Ordnung	154
Bild 61:	Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 2. Ordnung	155
Bild 62:	Simulationsergebnis CATT-Acoustics spekulare Reflexionen 3. Ordnung	155
Bild 63:	Simulationsergebnis spekulare Reflexionen 3. Ordnung	155
Bild 64:	Graph der Transformationsfunktion der Gütewerte	157
Bild 65:	Darstellung der Innenwinkel der Flächenkanten	161
Bild 66:	Darstellung des eingeschlossenen Winkels $\gamma$ .	162
Bild 67:	Schema der Berücksichtigung von Sichtverbindungen. Das gestrichelte Individuum ist besser zu bewerten, da die Summe der Abstände kleiner ist.	164

Bild 68:	Vereinfachtes 2D-Schema für die Erläuterung der Abweichung des Raumwinkels von der globalen Horizontalen	166
Bild 69:	Reflexionsarmer Raum an der FU Berlin (Paschereit)	168
Bild 70:	Schema der Populationsentwicklung im Evolutionären Algorithmus	170
Bild 71:	Ablaufdiagramm des genetischen evolutionären Algorithmus zur Erzeugung akustischer Räume	173
Bild 72:	Ablaufdiagramm des Bewertungsalgorithmus	174
Bild 73:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 Einstellungen	177
Bild 74:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 EA (Evolutionärer Algorithmus)	179
Bild 75:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 Bewertung	180
Bild 76:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 Simulation mit Bewertungsstatistik im Hauptfenster	182
Bild 77:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 Simulation mit 3D Modell im Hauptfenster	183
Bild 78:	Bildschirmansicht Version 0.1-299 Ergebnisse	184
Bild 79:	Ergebnis eines Formerzeugungsprozesses. Geschnittene Darstellung	186
Bild 80:	Orthogonale Grundrissprojektion des akustischen Raumes	186
Bild 81:	Orthogonale Schnittprojektion (längs) des akustischen Raumes	187
Bild 82:	Orthogonale Schnittprojektion (quer) des akustischen Raumes	187
Bild 83:	Innenraumperspektive eines Hörerplatzes	188
Bild 84:	Darstellung der traditionellen morphometrischen Messgrößen (Zelditch u. a. 2004, S. 3)	190
Bild 85:	Darstellung der (A) topologisch genau definierten Landmarken und (B) der daraus abgeleiteten 30 Messgrößen (fachwerkartig) (Zelditch u. a. 2004, S. 4)	191
Bild 86:	Darstellung der 120 Messgrößen aus den 16 Landmarken (Zelditch u. a. 2004, S. 5)	192
Bild 87:	Unterschiedliche bzw. ähnliche konstruktive Morphologie von Kreis, Polygonzug, Rechteck	194
Bild 88:	Hypothetische Beziehung zwischen den emotionalen Antworten und der physischen Ausprägung des Raumes. In der rechten Spalte sind die Berechnungen der entsprechenden tektonischen Kriterien vermerkt. (Franz 29.08.2005, S. 138)	198
Bild 89:	Reihe der gewählten Proportionsverhältnisse zur Unterscheidung von Raumhüllen. 1. Reihe: Grundrissproportionen (x/y), 2.- 5. Reihe: Grundriss-Höhen-Proportionen $2x * yh$	201
Bild 90:	Darstellung der Geometrie des analysierten Raummodells Musikvereinsaal Wien.	208

Bild 91:	Darstellung des generierten Raummodells W03-MN-24-500	208
Bild 92:	Darstellung des generierten Raummodells W07-MN-50-500	209
Bild 93:	Darstellung des generierten Raummodells W10-G-100-500	209
Bild 94:	Darstellung des generierten Raummodells W02-G-100-1000	210
Bild 95:	Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 1. Generation der Genese. (Pop1 Indv.01)	214
Bild 96:	Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 12 aus der 1. Generation der Genese. (Pop1 Indv.12)	214
Bild 97:	Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 12 aus der 2. Generation der Genese. (Pop2 Indv.12)	215
Bild 98:	Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 417. Generation der Genese. (Pop417 Indv.01)	215
Bild 99:	Perspektivische Schnitt-Darstellung des Individuums Nr. 01 aus der 1373. Generation der Genese. (Pop1373 Indv.01)	216
Bild 100:	Statistik des genetischen Algorithmus	216
Bild 101:	Verwendete Einstellungen des evolutionären Algorithmus	217
Bild 102:	Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Wiener Musikvereinssaal.	256
Bild 103:	Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Berliner Philharmonie	258
Bild 104:	Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Bayreuther Festspielhaus.	260
Bild 105:	Rendering analysiertes raumakustisches Raummodell Semperoper Dresden.	262
Bild 106:	NR01-G-100-500 allgemeine Einstellungen	269
Bild 107:	NR01-G-100-500 Einstellungen evolutionärer Algorithmus	270
Bild 108:	NR01-G-100-500 Einstellungen Evaluation	271
Bild 109:	NR01-G-100-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	272
Bild 110:	NR01-G-100-500 graphische Darstellung der Entwicklung der Genese	273
Bild 111:	W01-A-24-500 allgemeine Einstellungen	275
Bild 112:	W01-A-24-500 Einstellungen evolutionärer Algorithmus	276
Bild 113:	W01-A-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	277
Bild 114:	W01-A.24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	278
Bild 115:	W01-A-24-500 Darstellung der Statistik der Genese	278
Bild 116:	W02-G-100-1000 allgemeine Einstellungen	280
Bild 117:	W02-G-100-1000 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	280
Bild 118:	W02-G-100-1000 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	281
Bild 119:	W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	283

Bild 120:	W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Absorptionsgrade	283
Bild 121:	W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Diffusionsgrade	284
Bild 122:	W02-G-100-1000 Darstellung der Statistik der Genese	284
Bild 123:	W03-MN-24-500 allgemeine Einstellungen	286
Bild 124:	W03-MN-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	287
Bild 125:	W03-MN-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	288
Bild 126:	W03-MN-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	289
Bild 127:	W03-MN-24-500 Darstellung der Statistik der Genese	289
Bild 128:	W07-MN-50-500 allgemeine Einstellungen	291
Bild 129:	W07-MN-50-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	291
Bild 130:	W07-MN-50-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	292
Bild 131:	W07-MN-50-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	293
Bild 132:	W07-MN-50-500 Darstellung der Statistik der Genese	294
Bild 133:	W10-G-100-500 allgemeine Einstellungen	295
Bild 134:	W10-G-100-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	296
Bild 135:	W10-G-100-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	297
Bild 136:	W10-G-100-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	298
Bild 137:	W10-G-100-500 Darstellung der Statistik der Genese	299
Bild 138:	S01-G-20_50-1000 allgemeine Einstellungen	301
Bild 139:	S01-G20_50-1000 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	303
Bild 140:	S01-G-20_50-1000 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	304
Bild 141:	S01-G-20_50-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Absorptionsgrade.	305
Bild 142:	S01-G-20_50-1000 Darstellung der Statistik der Genese	306
Bild 143:	B01-A-24-500 allgemeine Einstellungen	308
Bild 144:	B01-A-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	310
Bild 145:	B01-A-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	311
Bild 146:	B01-A-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	312
Bild 147:	B01-A-24-500 Darstellung der Statistik der Genese	312
Bild 148:	BA01-G-24-500 allgemeine Einstellungen	314
Bild 149:	BA01-G-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus	315
Bild 150:	BA01-G-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus	316
Bild 151:	BA01-G-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums	318
Bild 152:	BA01-G-24-500 Darstellung der Statistik der Genese	318



### 13. Literaturverzeichnis

- AC3D : *3D Design Software* : inivis limited, 2010. URL <http://www.inivis.com/> –  
Überprüfungsdatum 2011-05-30
- ACHTEN, Henri: *Experimental Design Methods - A Review*. In: *International Journal of Architectural Computing* 07, Nr. 04, S. 505–535 –  
Überprüfungsdatum 2011-03-30
- ACHTEN, Henri: *Generic representations: An approach for modelling procedural and declarative knowledge of building types in architectural design*, 1997
- AHLQUIST, Sean; MENGES, Achim: Methodological Approach for the Integration of Material Information and Performance in the Design Computation for Tension-Active Architectural Systems, Bd. 29. In: ZUPANCIC, Tadeja (Hrsg.): *Respecting fragile places: Proceedings of the 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe: September 21-24, 2011, Ljubljana, Slovenia, University of Ljubljana Faculty of Architecture*. 1. Aufl. Ljubljana, Slovenia: eCAADe; UNI Ljubljana, Faculty of Architecture, 2011, S. 800–807
- AHNERT, Wolfgang: *EASE* : SDA Software Design Ahnert, 2010. URL <http://www.ada-acousticdesign.de/set/setsoft.html>
- AHNERT, Wolfgang; TENNHARDT, Hans-Peter: Raumakustik. In: WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer, 2008, S. 182–263
- ALEXANDER, Christopher: *Notes on the synthesis of form*. 17. Ausgabe. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 2002
- ALFARIS, Anas; MERELLO, Riccardo: The Generative Multi-Performance Design System. In: KUDLESS, Andrew; OXMAN, Neri; SWACKHAMER, mard (Hrsg.): *Silikon + Skin : Biological Processes and Computation*. Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 2008 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 28), S. 448–457
- ALTHOFF, Johannes: *Die Philharmonie*. 1. Aufl. Berlin : Berlin-Ed., 2002
- ANDO, Y.; SATO, S.; SAKAI, H: Fundamental subjective attributes of sound fields based on the model auf auditory-brain system. In: J.J. SENDRA (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 63–100
- ANONYM: *Reisebericht Australien, 12. Teil, Sydney, Kings Cross Car Market, George Street, Sydney Opera, Harbour Bridge, Rocks, Botanischer Garten, Bondi Beach*. URL [http://www.oztrailia.de/teil12\\_sydney.html](http://www.oztrailia.de/teil12_sydney.html). –  
Aktualisierungsdatum: 2010-03-10 – Überprüfungsdatum 2011-03-29
- ANONYM: *DSC\_4164.jpg (JPEG-Grafik, 1247x831 Pixel)*. URL [http://fxaguessy.fr/wp-content/uploads/2012/01/DSC\\_4164.jpg](http://fxaguessy.fr/wp-content/uploads/2012/01/DSC_4164.jpg). –  
Aktualisierungsdatum: 2012-01-04 – Überprüfungsdatum 2012-02-29

- ASHBY, William Ross; BAUER, Wilhelm L.: *Einführung in die Kybernetik*. 2. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1985
- ACADIA: *Smart architecture: Integration of digital and building technologies*. 1st ed. Champaign IL: Martin Graphics & Printing services, 2005 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture 25)
- ACADIA: *Silikon + Skin: Biological Processes and Computation*, 2008 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture 28)
- ACADIA: *Life in:formation : on responsive information and variations in architecture*. New York: ACADIA, 2010 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture 30)
- ACADIA: *Integration through Computation*, 2011 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture 31)
- ATTAR, Ramtin; AISH, Robert; STAM, Jos; BRINSMEAD, Duncan; TESSIER, Alex; GLUECK, Michael; KHAN, Azam: Physic-Based Generative Design. In: TIDAFI, T.; DORTA, T. (Hrsg.): *Joining Languages, Cultures and Visions*, 2009 (Proceedings of CAADFutures), S. 231–244
- AUTODESK: *Ecotect Analysis: Sustainable Building Design Software*. 2011, o.J.
- BACH, Klaus; HILDEBRANDT, Stefan: *Seifenblasen: E. Forschungsarbeit d. Inst. für Leichte Flächentragwerke über Minimalflächen = Forming bubbles*. Stuttgart : Krämer [u.a.], 1988
- BÄCK, Thomas: *Evolutionary Algorithm in Theory and Practice*. Oxford : Oxford University Press, 1994
- BAN, Shigeru; OLAFUR ELIASSON; GEIMER, Peter; KITTLER, Friedrich; BECKEL, Inge: *Reflexion und Abbild*. Zürich: gta, 2007
- BANDA, Pablo: Parametric Propagation of Acoustical Absorbers. In: SPRECHER, Aaron; YESHAYAHU, Shai; LORENZO-EIROA, Pablo (Hrsg.): *Life in:formation : on responsive information and variations in architecture*. New York: ACADIA, 2010 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 30), S. 313–319
- BARRON, Michael: *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. London: Chapman & Hall, 1993
- BEGAULT, D R: 3-D Sound and auralization. In: J.J. SENDRA (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 47–62
- BENOUDJIT, Mohamed Amine; COATES, Paul S: *Artificial networks for spatial analysis*. In: *International Journal of Architectural Computing* 6 (2008), Nr. 1, S. 59–78
- BENSE, Max: *Programmierung des Schönen : Allgemeine Texttheorie und Textästhetik*. Baden-Baden und Krefeld : Agis-Verl., 1960 (aesthetica IV)
- BENSE, Max: Ästhetik und Programmierung, Bd. 5. In: SIMMAT, William E. (Hrsg.): *Exakte Ästhetik : Methoden und Ergebnisse empirischer und*

- experimenteller Ästhetik*. Stuttgart : nadolski, 1967 (Kunst aus dem Computer, 5), S. 11–15
- BENSE, Max: *Die Unwahrscheinlichkeit des Ästhetischen und die semiotische Konzeption der Kunst*. Baden-Baden : Agis-Verl., 1979 (Internationale Reihe Kybernetik und Information 9)
- BENSE, Max: *Aesthetica : Einführung in die neue Aesthetik*. 2., erw. Ausg. Baden-Baden : Agis-Verl., 1982 (Internationale Reihe Kybernetik und Information 13)
- BENSE, Max ; WALTHER, Elisabeth: *Ausgewählte Schriften : in vier Bänden*. Stuttgart: Metzler, 1998
- BENTLEY, P. J.; KUMAR, S.: Three Ways to Grow Designs. : A Comparison of Embryogenies for an Evolutionary Design Problem. In: BANZAF, Wolfgang (Hrsg.): *GECCO-99*. Orlando: Academic Press/Morgan Kaufmann, 1999 (Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference).
- BENTLEY, Peter J: *Evolutionary design by computers*. San Francisco, Calif.: Kaufmann, 1999
- BENTLEY, Peter J ; CORNE, David W: *Creative evolutionary systems*. San Francisco, Calif. : Morgan Kaufmann, 2002
- BERANEK, Leo Leroy: *Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture*. 2. ed., [repr.] // 2. New York : Springer, 2004
- BERKA, Walter: *Woher kommt das Neue? : Kreativität in Wissenschaft und Kunst; [die Beiträge dieses Bandes beruhen auf den überarbeiteten Vorträgen des ... im Oktober 2002 veranstalteten Österreichischen Wissenschaftstages]*. Wien : Böhlau, 2003 (Wissenschaft - Bildung - Politik 6)
- BESSERUD, Keith; COTTEN, Joshua: Architectural Genomics. In: KUDLESS, Andrew; OXMAN, Neri; SWACKHAMER, mard (Hrsg.): *Silikon + Skin: Biological Processes and Computation*. Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 2008 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 28), S. 238–245
- BONWETSCH, Tobias; RALPH BAERTSCHI ; SILVAN OESTERLE: Adding Performance Criteria to Digital Fabrication: Room-Acoustical Information of Diffuse Responent Panels. In: KUDLESS, Andrew; OXMAN, Neri; SWACKHAMER, mard (Hrsg.): *Silikon + Skin: Biological Processes and Computation*. Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA). Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 2008 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 28), S. 364–369
- BOOKSTEIN, Fred Leon: *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology*. [Reprinted]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997

- BORISH, Jeffrey: *Extension of the image model to arbitrary polyhedra*. In: *Journal Acoustical Society America* (1984), Nr. 75
- BRADLEY, J.S.: The sound field for listeners in concert halls and auditoria. In: SENDRA, J.J. (Hrsg.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 101–132
- BREHLER, Sian: *Die Neue Liederhalle Stuttgart: Daten und Fakten zur Baugeschichte*. Karlsruhe, Fakultät Architektur, Institut für Gebäudeplanung. Dissertation. 19.06.2006. URL <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000007333> – Überprüfungsdatum 2010-12-06
- BURRY, Jane; BURRY, Mark: *The new mathematics of architecture*. London: Thames & Hudson, 2010
- CAADFUTURES: *Joining Languages, Cultures and Visions*, 2009 (Proceedings of CAADFutures)
- CASTORPH, Matthias: *Gebäudetypologie als Basis für Qualifizierungssysteme: Grundlagen einer Theorie zu Gattungen und Typen, entwickelt anhand systematischer Untersuchungen von industriell gefertigten Waschbeton-Minimal-Baukörpern als Verwahräume für Entsorgungsgüter in der Bundesrepublik Deutschland*. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Architektur / Raum und Umweltplanung / Bauingenieurwesen. Dissertation. 1999 – Überprüfungsdatum 2011-11-22
- CHAHROUR, Racha: *Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau*. Kassel: Kassel Univ. Press, 2007
- CHOLLET, Laurence B.; GEHRY, Frank O: *The essential Frank O. Gehry*. New York, NY: Harry N. Abrams [u.a.], 2001
- CHRISTENSEN, Claus Lynge; RINDEL, Jens Holger: *Odeon: Odeon A/S*, 2010. URL [www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)
- CHRISTOPH BAUDSON, Edgar Klein: *Berechnung und Visualisierung von Voronoi-Diagrammen in 3D*. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. Diplomarbeit. 04.04.2006. URL <http://www.voronoi3d.com/DiplomaThesis.pdf> – Überprüfungsdatum 2009-12-14
- CIAO, Quinsan: *Hearing Architectural Design: Simulation and Auralization for Generating Better Acoustic Spaces*. In: *Generative Art*, 2000 (Proceedings of the Generative Art Conference).
- COATES, Paul: *Programming.architecture*. 1st ed. London: Routledge, 2010
- CORMEN, Thomas H. ; LEISERON, Charles E. ; RIVEST, Ronald ; STEIN, Clifford: *Algorithmen- Eine Einführung*. 2. Auflage. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007
- COWAN, James P.: *Architectural acoustics design guide*. New York: McGraw-Hill, 2000
- CZAJA WOJCIECH: *nextroom.at - Oper Oslo*. URL <http://www.nextroom.at/building.php?id=508> – Überprüfungsdatum 2009-12-10

- DAHLENBÄCK, Bengt-Inge: *Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection*. In: *Journal Acoustical Society America* 100 (1996), Nr. 2, S. 899–909. URL Downloaded 24 Oct 2011 to 141.58.65.234. Redistribution subject to ASA license or copyright; see <http://asadl.org/journals/doc/ASALIB-home/info/terms.jsp> – Überprüfungsdatum 2011-10-25
- DAHLENBÄCK, Bengt-Inge: *CATT-Acoustic*. Gothenburg, 1998. URL <http://www.catt.se>
- DAVEY, Peter: *Grand Opera: Oslos new Opera*. URL <http://www.arplus.com/broch/articles/JUNE%2008%20PDFS/arjun08snohetta.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2008-05-17 – Überprüfungsdatum 2008-07-05
- DAVID, Elorza, Oliva: *Room acoustics modeling using the raytracing method: Implementation and evaluation*. Finland, University Turku, Department of Physics. Diplom. 2005 – Überprüfungsdatum 2011-03-23
- DE BRUYN, Gerd ; REUTER, Wolf: *Das Wissen der Architektur : Vom geschlossenen Kreis zum offenen Netz*. Bielefeld: Transcript, 2011 (ArchitekturDenken 5)
- DIAZ, C., PEDRERO, A.: Sound absorbing materials and sound absorbers in enclosures. In: J.J. SENDRA (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 11–40
- DIN EN ISO 3382-1. *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume*
- DIN 4109. *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen*
- DUARTE, José Pinto: *Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses*. Boston, Massachusetts Institute of Technology. Dissertation. 2001
- DUE SCHMIDT, Anne Marie ; KIRKEGAARD, Poul Henning: Navigating towards digital tectonic tools. In: ATAMAN, Osman (Hrsg.): *Smart architecture: Integration of digital and building technologies*. 1st ed. Champaign IL: Martin Graphics & Printing services, 2005 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 25), S. 114–127
- ECAADE: *Architectural information management*. Helsinki, Norway: Helsinki Univ. of Technology, 2001 (Proceedings of eCAADe conference 19)
- ECAADE: *Architecture 'in computero': Integrating Methods and Techniques*. Antwerp, Belgium, 2008 (Proceedings of eCAADe conference 26)
- ECAADE: *Computation: The new realm of architectural design*. 1. Aufl. Istanbul, Turkey: ITU/YTU, 2009 (Proceedings of eCAADe conference 27)
- ECAADE: *Future cities*. 1. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2010 (Proceedings of eCAADe conference 28)
- ECAADE: *Digital Physicality, Prague Czech Republic*: 2012 (Proceedings of eCAADe conference 30)

- EDER, Hannes: *NP-vollständige Probleme : Ein Artikel für das PS Wissenschaftliches Arbeiten WS 201/02*. URL <http://hanneseder.net/stud/ws01/wa-effalg/>. – Aktualisierungsdatum: 2007-10-14 – Überprüfungsdatum 2011-08-23
- EISENMAN, Peter ; OECHSLIN, Werner: *Die formale Grundlegung der modernen Architektur*. Berlin : gta-Verlag; Mann Gebr., 2005
- ESAM RAGAB ESAMIL ABOU-ELLEAL: *Raumakustik - Interaktion visueller und auditiver Wahrnehmungen*. Aachen, RWTH Aachen. Dissertation. 03.06.2003
- EUROPEAN GROUP FOR INTELLIGENT COMPUTING IN ENGINEERING: *Intelligent computing in engineering and architecture: 13th EG-ICE Workshop, EG-ICE 2006, Ascona, Switzerland, June 25 - 30, 2006 ; revised selected papers*. Berlin : Springer, 2006 (Springer-11645 /Dig. Serial] 4200)
- FASOLD, Wolfgang ; VERES, Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis : Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*. 2. Auflage. Berlin : Verlag für Bauwesen, 2003
- FISCHER, Günther: *Vitruv NEU oder was ist Architektur?* Gütersloh : Bauverlag [u.a.], 2009
- FOGED, Isak Worre ; PASOLD, Anke ; JENSEN, Mads Brath ; POULSEN, Esben Skouboe: *Acoustic Environments: Applying Evolutionary Algorithms for Sound Based Morphogenesis*, Bd. 1. In: ACHTEN, Henri; PAVLICEK, Jiri; HULIN, Jaroslav; MATEJDAN, Dana (Hrsg.): *Digital Physicality*, 2012 (Proceedings of eCAADe conference, 30).
- FOUAD, Nabil (Hrsg.): *Bauphysik Kalender // Bauphysik-kalender : Schallschutz und Akustik // Schwerpunkt: Schallschutz Und Akustik*. Berlin : Ernst & Sohn; John Wiley & Son Ltd, 2009
- FRAMPTON, Kenneth: *Modern architecture: A critical history*. 4. Aufl. London, New York: Thames & Hudson, 2007
- FRANCK, Georg ; ELEZKURTAJ, Tomor: *VU Design Methods und computergestützte Grundrissentwicklung*. – Aktualisierungsdatum: 2008-06-13 – Überprüfungsdatum 2010-01-13
- FRANCK, Georg ; FRANCK, Dorothea: *Architektonische Qualität*. München : Hanser, 2008 (Edition Akzente)
- FRANCK, Georg; VAN LIESHOUT, Joep ; ZACHEO, Daniela: *What moves architecture? : (in the next five years)*. Zürich: gta-Verl., 2006 (Architekturvorträge der ETH Zürich 1)
- FRANZ, Gerald: *An empirical approach to the experience of architectural space*. Weimar, Bauhausuniversität Weimar, Fakultät Architektur. Dissertation. 29.08.2005. URL [http://www.kyb.mpg.de/fileadmin/user\\_upload/files/publications/attachments/dissertation\\_web\\_3464%5b0%5d.pdf](http://www.kyb.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/attachments/dissertation_web_3464%5b0%5d.pdf) – Überprüfungsdatum 2011-11-16
- FRAZER, John: *An evolutionary architecture*. London: Architectural Association, 1995 (Themes / Architectural Association, London 7)

- FRITZ OLIVER: *Generatives Entwerfen: Programmierendes Entwerfen*. In: *ARCH+ (Zeitschrift für Architektur und Städtebau)* 189 (2008), Nr. 189, S. 60–65
- GECCO: *GECCO-99*. Orlando: Academic Press/Morgan Kaufmann, 1999 (Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference)
- GENERATIVE ART: *Generative Art*, 2000 (Proceedings of the Generative Art Conference)
- GENGNAGEL, Christoph (Hrsg.): *Computational design modelling: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011*. Berlin ;, New York : Springer, 2011
- GERDES, Ingrid ; KLAWONN, Frank ; KRUSE, Rudolf: *Evolutionäre Algorithmen : Genetische Algorithmen - Strategien und Optimierungsverfahren - Beispielanwendungen ; [mit Online-Service zum Buch] /*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2004 (Computational intelligence)
- GIPS, James: *Shape grammars and their uses: Artificial perception, shape generation and computer aesthetics*. Basel: Birkhäuser, 1975 (Interdisciplinary systems research 10)
- GOULTHORPE, Mark: Scott points: Exploring principles of digital creativity. In: KOLAREVIC, Branko (Hrsg.): *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. New York: Taylor & Francis, 2003, S. 164–180
- GRAU, Oliver: *Virtual Art: From Illusion to Immersion*: MIT Press, 2004
- GROSZ, Elisabeth: *Architecture from the outside: Essays on Virtual and Real Space*. Massachusetts: MIT Massachusetts Institute of Technology, 2001
- GRUENEISEN, Peter: *Soundspace : Architektur für Ton und Bild*. Basel: Birkhäuser, 2003
- HASEGAWA, Takeshi; TANGE, Kenzo ; HENNICKE, Jürgen: *Gitterschalen : Bericht über das japanisch-deutsche Forschungsprojekt S.T.I., durchgeführt von 1971 bis 1973 am Institut für leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart = Grid shells*. Stuttgart : Institut für leichte Flächentragwerke, 1974 (IL 10)
- HASSENEWERT, Frank: *Lehren des Entwerfens : Eine Untersuchung über den Diskurs des Entwerfens in Entwurfslehrbüchern der Architektur von 1945-2004*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät VI. Dissertation. 30.03.2006 – Überprüfungsdatum 2009-12-21
- HEINZ, Renate: *Entwicklung und Beurteilung von computergestützten Methoden zur binauralen Raumsimulation*. Aachen, RWTH Aachen. Dissertation. 1994
- HELLENIC INSTITUTE OF ACOUSTICS (HELINA): *Acoustics 2004*. Thessaloniki, 2004
- HENSEL, Michael ; MENGES, Achim: *Am Anfang einer neuen Architektur des Performativen*. In: *ARCH+ (Zeitschrift für Architektur und Städtebau)* Juli 2008 (2008), Nr. 188, S. 16
- HENSEL, Michael ; MENGES, Achim: *Form und Materialwerdung : Das Konzept der Materialsysteme*. In: *ARCH+ (Zeitschrift für Architektur und Städtebau)* 188 (2008)

- HENSEL, Michael ; MENGES, Achim: *Manufacturing Performance*. In: *Architectural Design* 78 (2008), Nr. 2
- HENSEL, Michael ; MENGES, Achim: *Performance als Forschungs- und Entwurfskonzept : Begriffe und Bezugssysteme*. In: *ARCH+ (Zeitschrift für Architektur und Städtebau)* Juli 2008 (2008), Nr. 188, S. 31–39
- HENSEL, Michael; MENGES, Achim ; WEINSTOCK, Michael: *Emergent technologies and design*. Oxon, [U.K.] ;, New York, NY : Routledge, 2010
- HINGSTON, Philip F.; BARONE, Luigi C.; MICHALEWICZ, Zbigniew ; FOGEL, David B: *Design by evolution : Advances in evolutionary design*. Berlin: Springer, 2008 (Natural computing series)
- HOVESTADT, Ludger: *Beyond the grid: Architecture and information technology*. 1. Aufl. Boston MA : Birkhaeuser Verlag AG, 2009
- HROMKOVIČ, Juraj: *Theoretische Informatik : Formale Sprachen, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kommunikation und Kryptographie*. 4., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- INSTITUTE OF ACOUSTICS: *Architectural acoustics-Opera house acoustics: Proceedings of the International Congress on Acoustics*. Rome: ICA, 2001 (III)
- INSTITUTE OF ACOUSTICS: *Auditorium Acoustics: Historical and contemporary design and performance*. 2002 (Imperial College Proceedings 25)
- JAEGGI, Annemarie; HILDEBRAND, Sonja ; EIERMANN, Egon: *Egon Eiermann (1904 - 1970) : Die Kontinuität der Moderne*. Ostfildern-Ruit: Hatje, 2004
- JORMAKKA, Kari ; SCHÜRER, Oliver ; KUHLMANN, Dörte: *Methoden der Formfindung*. Basel : Birkhäuser, 2008
- JOSWIG, Michael ; THEOBALD, Thorsten: *Algorithmische Geometrie : Polyedrische und algebraische Methoden ; [Bachelor geeignet!]*. 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2008 (Vieweg StudiumAufbaukurs Mathematik)
- KIEFERLE, Joachim B. (Hrsg.); EHLERS, Karen (Hrsg.): *Predicting the future: Proceedings of the 24th conference on education in computer aided design in Europe, September 26 - 29, 2007, Frankfurt am Main; FH Wiesbaden and FH Frankfurt*. 2. Aufl. Frankfurt/Main: eCAADe, 2007
- KIEFERLE, Joachim B. ; WÖSSNER, Uwe: Showing the invisible : Seven rules for a new approach of using immersive virtual reality in architecture. In: PENTTILÄ, Hannu; ECAADE CONFERENCE 19, 2001 Helsinki (Hrsg.): *Architectural information management : Proceedings of the 19th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe ; 29-31.8.2001*. Helsinki: Helsinki Univ. of Technology, 2001, S. 376–381
- KILIAN, Axel: *Design Exploration through Bidirectional Modeling of Constraints*. Boston, Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture. Dissertation. 13.01. 2006



- KINAYOĞLU, Gökçe: Using Audio-Augmented Reality to Assess the Role of Soundscape in Environmental Perception: An Experimental Case Study at UC Berkeley Campus: An Experimental Case Study on the UC Berkeley Campus, Bd. 1. In: ÇOLAKOĞLU, Birgül (Hrsg.): *Computation: The new realm of architectural design*. 1. Aufl. Istanbul, Turkey: ITU/YTU, 2009 (Proceedings of eCAADe conference, 27), S. 639–648
- KIRSCH, W.: *Die Handhabung von Entscheidungsproblemen : Einführung in die Theorie der Entscheidungsprozesse*. 5. Aufl. München: Barbara Kirsch, 1997
- KOLAREVIC, Branko (Hrsg.): *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. New York: Taylor & Francis, 2003
- KOLAREVIC, Branko ; KLINGER, Kevin R.: *Manufacturing material effects : Rethinking design and making in architecture*. New York, NY: Routledge, 2008
- KOLAREVIC, Branko ; MALKAWI, Ali M.: *Performative architecture : Beyond instrumentality ; [emerged out of the Symposium on "Performative Architecture" held at the University of Pennsylvania in October 2003]*. New York : Spon Press, 2005
- KÖNIG, Reinhard ; BAURIEDEL, Christian: *Entwurfsgenerator Teil IIb.FH11*. URL <http://www.entwurforschung.de/Entwurfsgenerator/bilder/Entwurfsgenerator.pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2003-04-25 – Überprüfungsdatum 2011-08-23
- KOULERMOS, Panos ; STEELE, James: *20 th century European Rationalism*. London : Academy Ed., 1995
- KOUZELEAS, Stelios: Computational process of a hall cad modelisation for acoustic simulation according to accepted geometry format via acoustic software.
- KOUZELEAS, Stelios: Architectural translation of the acoustical results. In: *Auditorium Acoustics : Historical and contemporary design and performance.*, 2002 (Imperial College Proceedings, 25).
- KOUZELEAS, Stelios: *Development of a help tool in architectural acoustics simulation adaptable in a modelisation cad system*. Bordeaux, L'Université Bordeaux 1, École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingenieur. Dissertation. 2002. URL [http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?diss\\_kouzeleas](http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?diss_kouzeleas)
- KOUZELEAS, Stelios: Applications of acoustic and geometric simulation of halls with the aid of acoustic simulation plate-form adaptable in cad system. In: *Acoustics 2004*. Thessaloniki, 2004
- KOUZELEAS, Stelios ; SEMIDOR, Catherine: The influence of the simplified architectural model on the acoustical simulation results. In: *Architectural acoustics-Opera house acoustics: Proceedings of the International Congress on Acoustics*. Rome: ICA, 2001 (III), S. 46–47
- KRIJNEN, Thomas ; BEETZ, Jakob ; VOORTHUIS, Jacob ; VRIES, Bauke de: Explauralisation: The experience of exploring architecture made audible,

- Bd. 1. In: ACHTEN, Henri; PAVLICEK, Jiri; HULIN, Jaroslav; MATEJDAN, Dana (Hrsg.): *Digital Physicality*, 2012 (Proceedings of eCAADe conference, 30), S. 593–598
- KUTTRUFF, H.: *Room Acoustics*. 4th Edition. London : Applied Science Publishers, 2000
- KUTTRUFF, H.: *Akustik - Eine Einführung*. Stuttgart : Hirzel, 2004
- LANG, Hans Werner: *Algorithmen in Java*. 2. Aufl. München : Oldenbourg, 2006
- LEHMKÜHLER, Uwe: *Der optimierte Entwurf und seine Berechnung : Strategien zur computergestützten Entwurfsoptimierung von Gebäuden im Rahmen der ganzheitlichen Architekturgenerierung am Beispiel von Einfamilienhäusern*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für öffentliche Bauten und Entwerfen. Dissertation. 01.12.2009
- LENTZ, Tobias ; SCHRÖDER, Dirk ; VORLÄNDER, Michael ; ASSENMACHER, Ingo: *Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction*. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2007 (2007). URL <http://www.hindawi.com/GetArticle.aspx?doi=10.1155/2007/70540>
- LEUPEN, Bernard: *Time-based architecture*. Rotterdam: 010 Publ., 2006
- LEWONTIN ; RICHARD: *The Genotype/Phenotype Distinction (Stanford Encyclopedia of Philosophy)*. URL <http://plato.stanford.edu/entries/genotype-phenotype/>. – Aktualisierungsdatum: 2009-08-06 – Überprüfungsdatum 2009-08-06
- LEYTON, Michael: *A Generative Theory of Shape: Lecture Notes in Computer Science*. Tutorial. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001
- LIM, Jason: Let's Work Together: A stigmergic approach to acoustic design. In: TARON, Joshua M (Hrsg.): *Integration through Computation*, 2011 (Proceedings of the Association for Computer Aided Design in Architecture, 31), S. 396–403
- LÖMKER, Thorsten: *Plausibilität im Planungsprozess : Umbau und Umnutzung als Optimierungsaufgabe*. Weimar, Bauhausuniversität Weimar, Fakultät für Architektur. Dissertation. 2006. URL [http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2006/832/pdf/diss\\_loemker.pdf](http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2006/832/pdf/diss_loemker.pdf) – Überprüfungsdatum 2008-07-30
- LUO, Y. (Hrsg.): *CDVE 2011*. Heidelberg : Springer, 2011 (LNCS 6874)
- LYNN, Greg: *Animate form*. New York: Princeton Architectural Press, 1999
- LYNN, Greg; RASHID, Hani: *Architectural Laboratories*. Rotterdam: NAI Publ., 2002
- MATTHECK, Claus: *Engineering Components Grow like Trees*. Karlsruhe, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Material- und Festkörperforschung. Forschungsreihe KFK 4648. 1989
- MATTHECK, Claus: *Verborgene Gestaltgesetze der Natur : Optimalformen ohne Computer*. 1. Aufl. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2006

- MEHTA, Madan; JOHNSON, James ; ROCAFORT, Jorge: *Architectural Acoustics : Principles and Design*. New Jersey : Prentice-Hall, 1999
- MENGER, Karl ; DIERKER, Egbert ; SIGMUND, Karl ; DAWSON, John W.: *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums*. Wien ;, New York : Springer, 1998
- MEYER, Frederike: *Oper in Oslo*. In: *Bauwelt* 21.08 (2008), Nr. 21, S. 38
- MEZGER, Christine: *Wechselwirkung : komplexe adaptive Systeme im Gestaltungsprozess*. Stuttgart, Universität Stuttgart, IDG 1 / IGMA. Diplomarbeit. 2006
- MITCHELL, William John: *The Logic of Architecture- Design, Computation, and Cognition*. Berkeley : MIT Press, 1990
- MOELLE, Herbert: *Rechnergestützte Planungsprozesse der Entwurfsphasen des Architekten auf Basis semantischer Modelle*. München, Technische Universität München, Institut für Entwerfen und Bautechnik. Dissertation. 27.09.2006
- NAKE, Frieder: Computer-Grafik. In: SIMMAT, William E. (Hrsg.): *Exakte Ästhetik : Methoden und Ergebnisse empirischer und experimenteller Ästhetik*. Stuttgart: nadolski, 1967 (Kunst aus dem Computer, 5).
- OOSTERHUIS, Kas: *Architecture goes wild*. Rotterdam: 010 Publishers, 2002
- OOSTERHUIS, Kas; FEIREISS, Lukas: *GameSetandMatch II: The architecture co-laboratory on computer games, advanced geometries and digital technologies ; [International Conference The Architecture Co-Laboratory, GameSetand Match II, On Computer Games, Advanced Geometries and Digital Technologies, from 29 March - 1 April 2006, Delft University, Faculty of Architecture]*. Rotterdam : Episode Publ., 2006
- OPER DRESDEN: *Zuschauerraum-voll.jpg (JPEG-Grafik, 850x565 Pixel)*. URL <http://www.semperoper.de/uploads/pics/Zuschauerraum-voll.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2010-10-19 – Überprüfungsdatum 2012-02-29
- OTTO, Frei: *IL 9 Pneus in Natur und Technik: Interdisziplinäre Forschungsarbeit von Biologen und dem IL. Darstellung der Formbildungsgesetze des Konstruktionssystems Pneu mit Beispielen aus Natur und Technik*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Leichte Flächentragwerke. 1977
- OTTO, Frei: *Selbstbildung: physikalische u. konstruktive Entscheidungsprozesse in Architektur und Natur*. Stuttgart [u.a.] : Univ, 1984 (Konzepte SFB 230 2)
- OTTO, Frei: *Gestaltwerdung: Zur Formentstehung in Natur, Technik u. Baukunst*. Köln: Müller, 1988
- OXMAN, Rivka: *Performance-based Design: Current Practices and Research Issues*. In: *International Journal of Architectural Computing* 6 (2008), Nr. 1, S. 1–17
- OXMAN, Rivka; OXMAN, Robert: *The new structuralism: Design, engineering and architectural technologies*. Hoboken, N.J, Chichester: Wiley; John Wiley, 2010 (Architectural design 80.2010,4)

- PASCHEREIT, C. O.: *Reflexionsarmer Raum*. URL <http://fd.tu-berlin.de/einrichtungen/reflexionsarmer-raum/> – Überprüfungsdatum 2011-11-07
- PETERS, Brady: *Acoustic Performance as a Design Driver: Sound Simulation and Parametric Modelling using SmartGeometry*. In: *International Journal of Architectural Computing* 8 (2010), Nr. 3, S. 337–358
- PETERS, Brady; OLESEN, Tobias S.: Integrating Sound Scattering Measurements in the Design of Complex Architectural Surfaces: Informing a parametric design strategy with acoustic measurements from rapid prototype scale models. In: SCHMITT, Gerhard; HOVESTADT, Ludger; VAN GOOL, Luc; BOSCHÉ, Frédéric; BURKHARD, Remo; COLEMAN, Suzanne; HALATSCH, Jan; HANSMEYER, Michael; KONSORSKI-LANG, Silke; KUNZE, Antje; SEHMI-LUCK, Martina (Hrsg.): *Future cities*. 1. Aufl. Zürich : vdf Hochschulverlag, 2010 (Proceedings of eCAADe conference, 28), S. 481–491
- PETZOLD, Thomas: *Ein Beitrag zur Entwurfsoptimierung ebener Fachwerke mit Evolutionsstrategien*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen. Dissertation. 1998
- PHYSIKALISCH TECHNISCHE BUNDESANSTALT: *Datensammlung - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)*. URL [http://www.ptb.de/de/org/1/17/173/abstap\\_wf.xls](http://www.ptb.de/de/org/1/17/173/abstap_wf.xls) – Überprüfungsdatum 2010-03-16
- RADCLIFFE, Nicolas J.: *Non-Linear Genetic Representations*. – *Aktualisierungsdatum: 2003-01-17* – Überprüfungsdatum 2010-07-22
- RICHTER, Peter G.: *Architekturpsychologie : Eine Einführung*. 2., durchges. und korr. Aufl. Lengerich : Pabst Science Publ., 2004
- RIPPMANN, Matthias; BLOCK, Philippe: New Design and Fabrication Methods for Freeform Stone Vaults Based on Ruled Surfaces. In: GENGNAGEL, Christoph (Hrsg.): *Computational design modelling: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011*. Berlin ;, New York : Springer, 2011, S. 181–189
- RITTEL, Horst W. J.: *Planen, Entwerfen, Design : Ausgewählte Schriften zu Theorie und Methodik*. Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer, 1992
- RITTEL, Horst; WEBBER, Melvin: *Dilemmas in a General Theory of Planning*. In: *Policy Sciences* 4 (1973), S. 155–169
- RÖPKE, Jochen: *Die Strategie der Innovation : Eine systemtheoretische Untersuchung der Interaktion von Individuum Organisation und Markt im Neuerungsprozess*. Tübingen : Mohr Siebeck, 1977
- RUDY, M.: *architectura: Lehrmedien zur Tragwerkslehre*. URL [http://www.architectura.net/study/course/TWL/media/TWL\\_221/img\\_foto\\_gaudi\\_00.html](http://www.architectura.net/study/course/TWL/media/TWL_221/img_foto_gaudi_00.html). – Aktualisierungsdatum: 2008-10-16 – Überprüfungsdatum 2010-12-07
- RUELLE, David ; BEIGLBOCK, Wolf: *Zufall und Chaos*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1994

- SALINGAROS, Nikos A. (Hrsg.): *A theory of architecture*. Solingen: Umbau-Verl, 2006
- SATO, S. ; HAYASHI, T. ; TAKIZAWA, A. ; TANI, A. ; KAWAMURA, H. ; ANDO, Y.: *Acoustic Design of Theatres Applying Genetic Algorithms*. In: *Journal of Temporal Design in Architecture* 4 (2004), Nr. 1, S. 41–51
- SENDRA, J.J. (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*
- SENDRA, J.J.; T. ZAMARRENO ; J. NAVARRO: Acoustic in Churches. In: SENDRA, J.J. (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 133–165
- SCHANZ, Sabine; OTTO, Frei: *Frei Otto, Bodo Rasch: Gestalt finden : Auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen ; der Werkbund zeigt Frei Otto, Frei Otto zeigt Bodo Rasch ; anlässlich der Preisverleihung des Deutschen Werkbundes Bayern 1992 an Frei Otto und Bodo Rasch*. München : Menges, 1995
- SCHEIN, Markus; TESSMANN, Oliver: *Structural Analysis as Driver in Surface-Based Design Approaches*. In: *International Journal of Architectural Computing* 6 (2008), Nr. 1, S. 19–39
- SCHILL-FENDL, Monika: *Planungsmethoden in der Architektur: Grundlagen von Planungs- und Entwurfsmethoden für Architekten komplexer Aufgabenstellungen in interdisziplinären Gruppen, dargestellt am Bereich Sozial- und Gesundheitsbauten*. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2004
- SCHILLING, Steffi: *Beitrag zur Lösung ingenieurtechnischer Entwurfsaufgaben unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen*. Weimar, Bauhausuniversität Weimar. Dissertation. 18.06.2004
- SCHLIENZ, Kristian: *Einsatzmöglichkeiten von Planungsmethoden bei der Bearbeitung komplexer Bauaufgaben*. Zürich, ETH. Dissertation. 1975
- SCHMIDT, Petra: *Patterns : Muster in Design, Kunst und Architektur*. 1., unveränd. Nachdr. Basel : Birkhäuser, 2006 (Patterns 1)
- SCHRICKER, Rudolf: *Kreative Raum-Akustik für Architekten und Designer*. Stuttgart, München : Deutsche Verlags-Anstalt, 2001
- SCHRÖDER, Dirk: *Physical-based real-time auralization of interactive virtual environments*. Aachen, RWTH Aachen, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation. 15.09.2011 – Überprüfungsdatum 2011-09-19
- SCHROEDER, M.R.: Reverberation and diffusion. In: J.J. SENDRA (HRSG.): *Computational Acoustics in Architecture*, S. 1–7
- SCHULTE-FORTKAMP, Brigitte: *Geräusche beurteilen im Labor: Entwicklung interdisziplinärer Forschungsmethoden un ihre forschungssoziologische Analyse*. Düsseldorf : VDI, 1994 (Biothechnik 100)
- SCHUMACHER, Patrick: *Parametricism as Style - Parametric Manifesto: Presented and discussed at the Dark Side Club1 , 11th Architecture Biennale, Venice 2008*. London 2008. URL <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style>.

htm. – Aktualisierungsdatum: 2008-11-05 – Überprüfungsdatum 2009-03-31

- SCHWARZ, Jovincen: *Ansatz zur computergesteuerten Generierung von Architekturstilen und der Abbildung von Entscheidungsprozessen eines Architekten*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für öffentliche Bauten und Entwerfen. Dissertation. 2007/ In Arbeit
- SIFFLING, Markus: *Ansatz zur ganzheitlichen Entwurfsoptimierung am Beispiel von Bürogeschossbauten*. Braunschweig, TU Braunschweig, Bauingenieurwesen. Dissertation. 04.02.2000
- SIGRADI: *Sigradi 2009*. Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. Sao Paulo : Sigradi, 2009
- SIMMAT, William E. (Hrsg.): *Exakte Ästhetik : Methoden und Ergebnisse empirischer und experimenteller Ästhetik*. Stuttgart: nadolski, 1967 (Kunst aus dem Computer 5)
- SoundPLAN Acoustics* : Braunstein + Berndt GmbH. URL <http://www.soundplan.eu/start.php?Spr=eng>
- SPAETH, Achim Benjamin: raum.art : Ein virtuelles Museum. In: STOCKER, Gerfried; SCHÖPF, Christine (Hrsg.): *Code - The Language of Our Time : Code=law, code=art, code=life ; [Ars Electronica 2003, Linz]*. Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz, 2003
- SPAETH, Achim Benjamin; SCHWÄGERL, Klaus (Mitarb.); STAMM, Isolde (Mitarb.) : Parameters in the Design Process. In: KIEFERLE, Joachim B.; EHLERS, Karen (Hrsg.): *Predicting the future: Proceedings of the 24th conference on education in computer aided design in Europe, September 26 - 29, 2007, Frankfurt am Main; FH Wiesbaden and FH Frankfurt*. 2. Aufl. Frankfurt/Main: eCAADe, 2007, S. 869–878
- SPAETH, Achim Benjamin: Room acoustics in the architectural design process. In: MUYLLE, Marc (Hrsg.): *Architecture 'in computero': Integrating Methods and Techniques*, 2008 (Proceedings of eCAADe conference), S. 367–374
- SPAETH, Achim Benjamin: Rethinking Egon Eiermann's Horten Tile - A new Structuralism? In: *Sigradi 2009*. Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. Sao Paulo: Sigradi, 2009, S. 18–20
- SPAETH, Achim Benjamin: Concert Halls in Cooperative Virtual Environments. In: LUO, Y. (Hrsg.): *CDVE 2011*. Heidelberg: Springer, 2011 (LNCS, 6874), S. 1–6
- SPAETH, Achim Benjamin: Modelling the invisible: Experiences with a virtual room acoustics simulation system in architectural design practice. In: GENGNAGEL, Christoph (Hrsg.): *Computational design modelling: Proceedings of the Design Modelling Symposium Berlin 2011*. Berlin, New York: Springer, 2011, S. 201–208
- SPAETH, Achim Benjamin: *Akustisches Modell 1:10 Philharmonie Hamburg. fotografiert am 14.10.2011*

- SPAETH, Achim Benjamin: *virtual concert hall: a project in the caad-laboratory at University of Stuttgart*. In: *Architecture Interior Technical Solution 5* (2012), 5-2012
- SPAETH, Achim Benjamin; MENGES, Achim: Performative design for spatial acoustics: Concept for an evolutionary design algorithm based on acoustics as design driver. In: ZUPANCIC, Tadeja (Hrsg.): *Respecting fragile places: Proceedings of the 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe: September 21-24, 2011, Ljubljana, Slovenia, University of Ljubljana Faculty of Architecture*. 1. Aufl. Ljubljana, Slovenia: eCAADe; UNI Ljubljana, Faculty of Architecture, 2011, S. 461–468
- STATSBYGG: *Plan01*. URL <http://www.statsbygg.no/System/4333/webplan1.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2005-12-01 – Überprüfungsdatum 2010-12-30
- STATSBYGG: *Operasnitt*. URL <http://www.statsbygg.no/System/4330/Operasnitt.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2005-12-08 – Überprüfungsdatum 2010-12-30
- STATSBYGG: *StoreSal2.jpg (JPEG-Grafik, 4992x3328 Pixel) - Skaliert (21%)*. URL <http://www.statsbygg.no/System/21155/StoreSal2.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2008-05-09 – Überprüfungsdatum 2010-12-30
- STATSBYGG: *Plan- og snittegninger - Statsbygg*. URL <http://www.statsbygg.no/Byggeprosjekter/Opera/Bilder/Plantegninger/> – Überprüfungsdatum 2010-12-30
- STATSBYGG: *Hovedscenen.jpg (JPEG-Grafik, 3872x2592 Pixel) - Skaliert (27%)*. URL <http://www.statsbygg.no/System/21038/Hovedscenen.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2008-03-27 – Überprüfungsdatum 2010-12-30
- STINY, George; MITCHELL, William. J.: *The Palladian grammar*. In: *Environment and Planning B 5* (1978), Nr. 1, S. 5–18
- STINY, George: *Pictorial and formal aspects of shape and shape grammars*. Basel, Stuttgart: Birkhaeuser, 1975 (Interdisciplinary systems research 13)
- STINY, George: *Shape: Talking about seeing and doing*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2006
- STINY, George; GIPS, James: *Algorithmic aesthetics. Computer models for criticism and design in the arts*. Berkeley: Univ. of California P., 1978
- STOCKER, Gerfried (Hrsg.); SCHÖPF, Christine (Hrsg.): *Code - The Language of Our Time: Code=law, code=art, code=life ; [Ars Electronica 2003, Linz]*. Ostfildern-Ruit: Hatje Cantz, 2003
- SZALAPAJ, Peter: *CAD principles for architectural design : Analytical approaches to computational representation of architectural form*. Reprint. Oxford : Architectural Press, 2001
- TECHNET GMBH: *Easy.Form*. URL <http://www.technet-gmbh.de/index.php?id=651&L=1%2C> – Überprüfungsdatum 2011-03-29

- TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN / FACHBEREICH ARCHITEKTUR / FACHGEBIET  
PLANUNGSMETHODEN: *Planungsmodelle in der Architektur*. Berlin : Univ.-  
Bibl. d. Techn. Univ.; UB d. TU [Vertrieb], 1981
- TEMPLETON, Duncan: *Acoustics in the built environment: Advice for the design  
team* /. Oxford: Butterworth Architecture, 1993
- Top500 List - November 2012 | TOP500 Supercomputer Sites*. URL  
<http://www.top500.org/list/2012/11/> – Überprüfungsdatum 2012-11-13
- TRINT, Karsten: *Strukturoptimierung mit geschachtelten Evolutionsstrategien*.  
Berlin, Technische Universität Berlin, Fachbereich Verfahrenstechnik,  
Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften. Dissertation. 1997
- VORLÄNDER, Michael: *Forschungsgebiete: RAVEN - A framework for dynamic  
real-time auralization of virtual environments*. URL  
<http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Projekte/raven> –  
Überprüfungsdatum 2011-10-27
- VORLÄNDER, Michael: *Ein Strahlenverfolgungs-Verfahren zur Berechnung von  
Schallfeldern in Räumen*. In: *Acustica* (1988), Nr. 65, S. 138–148
- VORLÄNDER, Michael: *Simulation of the transient and steady-state sound  
propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source  
algorithm*. In: *Journal Acoustical Society America* (1989), Nr. 86, S. 172–  
178
- VORLÄNDER, Michael: *Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation,  
Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin Heidelberg: Springer,  
2008
- VORLÄNDER, Michael: *RAVEN - A framework for dynamic real-time auralization  
of virtual environments*. URL [http://www.akustik.rwth-  
aachen.de/Forschung/Projekte/raven](http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Projekte/raven) – Überprüfungsdatum 2011-10-27
- VORLÄNDER, Michael ; WITEW, I.: *Raumakustik und Beschallungstechnik, Bd. 9*.  
In: FOUAD, Nabil (Hrsg.): *Bauphysik Kalender // Bauphysik-kalender :  
Schallschutz und Akustik // Schwerpunkt: Schallschutz Und Akustik*.  
Berlin: Ernst & Sohn; John Wiley & Son Ltd, 2009, S. 469–514
- WEB3D CONSORTIUM: *VRML97 and related specification*. URL  
<http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/>
- WEIBEL, Peter: *Algorithmus und Kreativität, Bd. 6*. In: BERKA, Walter; BRIX, Emil;  
SMEKAL, Christian (Hrsg.): *Woher kommt das Neue? : Kreativität in  
Wissenschaft und Kunst*. Wien : Böhlau, 2003 (6), S. 85–97
- WEIBEL, Peter: *Die algorithmische Revolution* In: Zentrum für Kunst und  
Medientechnologie(ZKM) (Hrsg.): *Die Demokratische Revolution :  
Broschüre zur Ausstellung*. Karlsruhe: Eingenvverlag,2004, S. 1–5
- WEICKER, Karsten: *Evolutionäre Algorithmen. 2., überarbeitete und erweiterte  
Auflage*. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH  
Wiesbaden, 2007 (Springer-11774 /Dig. Serial])
- WEINZIERL, Stefan: *Beethovens Konzerträume : Raumakustik und  
symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen*



- Konzertwesen*. Frankfurt am Main : Bochinsky, 2002 (Fachbuchreihe Das Musikinstrument 77)
- WEINZIERL, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin : Springer, 2008
- WEISE, Thomas: *Global Optimization Algorithms - Theory and Application*. – Aktualisierungsdatum: 2009-06-26 – Überprüfungsdatum 2010-07-21
- WHITE, Stephen F.: *White\_Dune : graphical VRML97 Editor and animation tool*. URL <http://vrml.cip.ica.uni-stuttgart.de/dune/> – Überprüfungsdatum 2011-05-30
- WIENER MUSIKVEREIN: *Der Musikverein - Galerie*. URL <http://www.musikverein.at/dermusikverein/galerie/musikvereinssaal.asp> – Überprüfungsdatum 2012-02-29
- WIKIMEDIA: *Berlin\_Philharmonic\_rehearsing.jpg (JPEG-Grafik, 1280x960 Pixel) - Skaliert (73%)*. URL [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Berlin\\_Philharmonic\\_rehearsing.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Berlin_Philharmonic_rehearsing.jpg). – Aktualisierungsdatum: 2006-07-15 – Überprüfungsdatum 2010-11-17
- WIKIPEDIA: *RSB\_Philharmonie.jpg (JPEG-Grafik, 1024x768 Pixel) - Skaliert (91%)*. URL [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/RSB\\_Philharmonie.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/RSB_Philharmonie.jpg). – Aktualisierungsdatum: 2007-06-15 – Überprüfungsdatum 2010-11-17
- WIKIPEDIA: *On the Origin of Species - Wikipedia, the free encyclopedia*. URL [http://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Origin\\_of\\_Species](http://en.wikipedia.org/wiki/The_Origin_of_Species). – Aktualisierungsdatum: 2010-07-20 – Überprüfungsdatum 2010-07-21
- WIKIPEDIA: *Karlheinz Stockhausen – Wikipedia*. URL [http://de.wikipedia.org/wiki/Karlheinz\\_Stockhausen](http://de.wikipedia.org/wiki/Karlheinz_Stockhausen). – Aktualisierungsdatum: 2010-11-16 – Überprüfungsdatum 2010-11-17
- WIKIPEDIA: *Opernhaus Oslo*. URL <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=98918807>. – Aktualisierungsdatum: 2012-02-02 – Überprüfungsdatum 2012-02-29
- WISNIEWSKI, Edgar: *Die Berliner Philharmonie und ihr Kammermusiksaal : Der Konzertsaal als Zentralraum*. Berlin : Gebr. Mann, 1993
- WÖSSNER, Uwe: *Virtuelle und Hybride Prototypen in Kooperativen Arbeitsumgebungen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik. Dissertation. 06.05.2009 – Überprüfungsdatum 2011-01-19
- ZELDITCH, Miriam; SWIDERSKI, Donald; SHEETS, David ; FINK, William: *Geometric morphometrics for biologists : A primer*. Amsterdam, Boston : Elsevier Academic Press, 2004
- ZUPANCIC, Tadeja (Hrsg.): *Respecting fragile places: Proceedings of the 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe: September 21-24, 2011, Ljubljana, Slovenia, University of Ljubljana Faculty of Architecture*. 1. Aufl. Ljubljana, Slovenia: eCAADe; UNI Ljubljana, Faculty of Architecture, 2011

## 14. Lebenslauf

Achim Benjamin Spaeth

01.03.1973	Geboren in Ravensburg
1992	Abitur am Gymnasium Bad Waldsee
1992-1993	Zivildienst Schloßparkkliniken Bad Waldsee
1993-1995	Ausbildung zum Zimmerer Fa. Adi Hummel Heiligenberg
1995-2002	Studium der Architektur an der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart
1998-1999	Erasmusstipendium und Studium der Architektur an der école d'architecture de Paris Belleville / Frankreich
23.01.2002	Diplom der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart (Prof. Dr. habil. Erwin Herzberger)
12/2004-01/2012	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am CAAD Labor der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart
seit 02/2012	Lecturer am Department of Architecture der Xi'an Jiaotong Liverpool University in Suzhou / China
seit 01/2002	Selbständige Tätigkeit als Architekt in Stuttgart und Shanghai (seit 2012)

Wissenschaftlicher Gutachter der eCAADe, CAADRIA, cadfutures und SIGRADI

Eingetragen als freier Architekt in der Architektenkammer Baden-Württemberg

## 15. Anhang

### 15.1. Erstellung der Modelle für den Import in die Simulation

Damit die Modelle von der Simulation verarbeitet werden können, müssen bestimmte technische Randbedingungen eingehalten werden. Für die Erstellung eines geeigneten Modells wurde das Modellierungsprogramm Autodesk 3D Studio Max in der Version 2011 verwendet. Der Autor hat ein Export Programm entwickelt, das das 3D Studio Max Modell in ein für die Anwendung lesbares Datenformat exportiert.

#### 15.1.1. Triangulierung

Die Modelle müssen als geschlossenes Dreiecksnetz vorliegen. Das Netz darf keine offenen Kanten oder Punkte aufweisen. Dreiecke berühren sich an ihren Kanten und an ihren Punkten. Punkte berühren nicht die Kanten. Die Normalen der Dreiecksflächen zeigen alle in eine Richtung. Die Richtung, ob innen oder außen, ist ohne Relevanz, da sie von der Anwendung entsprechend verrechnet wird. Es dürfen im Modell keine Punkte doppelt vorkommen. Das Modell muss also zu einem Objekt verschmolzen werden. Das exportierte Datenformat ist in 15.2 beschrieben.

#### 15.1.2. Akustische Materialeigenschaften

Die akustische Materialeigenschaft wird den Flächen über den 3D Studio Max internen Material Editor zugewiesen. Die akustischen Eigenschaften werden durch die Benennung des Materials übergeben.

*Materialbezeichnung\_aAbsorptionskoeffizient\_dDiffusionskoeffizient*

Das Material muss als sogenanntes Multimaterial in 3d Studio Max vorliegen.

Beispiel für die Zuweisung der Eigenschaften für eine Publikumsfläche mit einem Absorptionskoeffizienten von 0,85 und einem Diffusionskoeffizienten von 0,35:

Publikum\_a0.85\_d0.35

### 15.1.3. Definition von Quellen und Empfängern

Quellen und Empfänger werden in 3D Studio Max als Zielkamas dargestellt. Enthält der Name der Zielkamas die Schlüsselbegriffe „source“ oder „rec“ so werden die Zielkamas vom Exportprogramm entweder als Quellen (source) oder Empfänger (rec) erkannt. Die Zielrichtung der Empfängerkamas wird als Blickrichtung des Empfängers interpretiert. Die Zielrichtung der Quellen wird ignoriert, da die Quellen immer als Kugelquellen interpretiert werden und in alle Richtungen gleichförmig abstrahlen. Die Signalstärke ist im Exportprogramm mit 0,001 W vordefiniert. Quellen und Empfänger werden gemeinsam in einer Datei im Format xml abgespeichert und von der Anwendung beim Import entsprechend erkannt. Das Datenformat der XML Datei ist in 15.2 beschrieben.

## 15.2. Datenformate akustische Simulation

### 15.2.1. Datenformat der geometrischen Hülle für den Import

Die Hüllgeometrie wird in einer Punkt-Flächenliste in einer .txt Datei notiert.

[geometry]

[points]

[x,y,z]

[triangles]

[NrP1,NrP2,NrP3] [xNormal,yNormal,zNormal]

*Materialname\_aKoeffAbsorb\_dKoeffDiffus*

### 15.2.1. Datenformat der Empfänger und Quellen für den Import

Die Quellen und Empfänger werden im XML Format notiert.

```
<?xml version="version" encoding="UTF-8"?>
```

```
<evolution version="version">
```

```
<sources version="version">
```

```
<x="x" y="y" z="z" source power="sourcepower">
```

```
</sources>
```

```
<receivers version="1.0">
```

```
<x="x" y="y" z="z" radius="radius" dx="dx" dy="dy" dz="dz" >
```

```
</receivers>>
```

```
</evolution>
```

Die Voreinstellungen der akustischen Kennwerte zur Verwendung im Abschnitt Bewertung.

```
<?xml version=" version " encoding="UTF-8"?>
<evolution version="version">
<presettings version=" version ">
<acoustics>
<room type="Name">
<vk min="vkmin" max="vkmax" k="k"/>
<rt60 min="rt60min" max="rt60max" k=" k "/>
<edt min="edtmin" max="edtmax" k=" k "/>
<c80 min="c80min" max="c80max" k=" k "/>
<g min="gmin" max="gmax" k=" k "/>
<lfc min="lfcmin" max="lfcmax" k=" k "/>
<ti min="timin" max="timax" k=" k "/>
<ts min="tsmin" max="tsmax" k=" k "/>
</room>
</acoustics>
</presettings>
</evolution>
```

### 15.2.1. Datenformat der Vorgabewerte der akustischen Kennwerte

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<evolution version="1.0">
<presettings version="1.0">
<acoustics>
<room type="Konzertsaal">
<vk min="8" max="10" k="1.0"/>
<rt60 min="1.4" max="2.0" k="1.0"/>
<edt min="1.8" max="2.3" k="1.0"/>
<c80 min="-1.0" max="3.0" k="1.0"/>
<g min="4.0" max="5.5" k="1.0"/>
<lfc min="25.0" max="40.0" k="1.0"/>
```

```
<ti min="10.0" max="25.0" k="1.0"/>
<ts min="100.0" max="150.0" k="1.0"/>
</room>
</acoustics>
</presettings>
</evolution>
```

### 15.3. Ergebnisse integrierte raumakustischen Simulation

#### 15.3.1. Musikvereinssaal Wien

##### Übersicht

Gesamtbewertung	0,683
Anzahl Dreiecke	184
DNA Länge	0
Volumen [m³]	15934,6
Oberfläche [m²]	5244,94
äq. Absorptionsfläche [m²]	2149,96
Ø a	0,449457
min a	0,25
max a	0,9
Ø d	0,427717
min d	0,2
max d	0,9

Tabelle 23: Übersicht Simulationsergebnisse Simulation Musikvereinssaal Wien

##### Akustik

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungs- faktor	Güte	Gewichteter Gütewert
VK	8,00	10,00	7,97	1,00	0,98	0,12
RT60	1,40	2,00	1,21	1,00	0,76	0,09
EDT	1,80	2,30	0,44	1,00	0,27	0,03
C80	-1,00	3,00	41,23	1,00	0,09	0,01
G	4,00	5,50	-29,32	1,00	0,04	0,01
LFC	25,00	40,00	-22,59	1,00	0,24	0,03
TI	10,00	25,00	69,89	1,00	0,25	0,03
TS	100,00	150,00	0,54	1,00	0,33	0,04

Tabelle 24: Simulationsergebnisse Akustik Musikvereinssaal Wien

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0,30	34,63	-25,17	-22,33	45,00	0,27
Empfänger 2	0,27	56,50	-26,92	-22,65	41,36	0,23
Empfänger 3	0,71	55,12	-29,83	-25,49	116,73	0,39
Empfänger 4	0,65	51,69	-28,14	-25,25	105,23	0,32
Empfänger 5	0,62	38,01	-29,83	-24,63	102,20	0,46
Empfänger 6	0,42	23,15	-32,48	-20,16	67,35	1,13
Empfänger 7	0,28	27,61	-29,72	-21,45	45,96	0,62
Empfänger 8	0,23	43,13	-32,50	-18,77	35,28	0,87

*Tabelle 25:* Detaillierte Simulationsergebnisse per Empfänger Musikvereinssaal Wien

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abwei- chung	Güte- wert	Wicht- ung	Gewichteter Gütewert
Anzahl Dreiecke	50	100	84,00	0,37	1	0,07
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	24,46	0,77	1	0,15
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	5,06	0,94	1	0,19
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	25	50	22,12	0,53	1	0,11
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0,49	0,80	1	0,16

*Tabelle 26:* Simulationsergebnisse Morphologie Musikvereinssaal Wien

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Güte	Wichtung	Gewichteter Güte
Sichtbeziehung E / Q	0	0,00	1,00	1	0,25
Maximale Boden­neigung [°]	0	157,50	0,27	1	0,07
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0,00	1,00	1	0,25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	2,90	0,26	1	0,06

*Tabelle 27:* Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Musikvereinssaal Wien

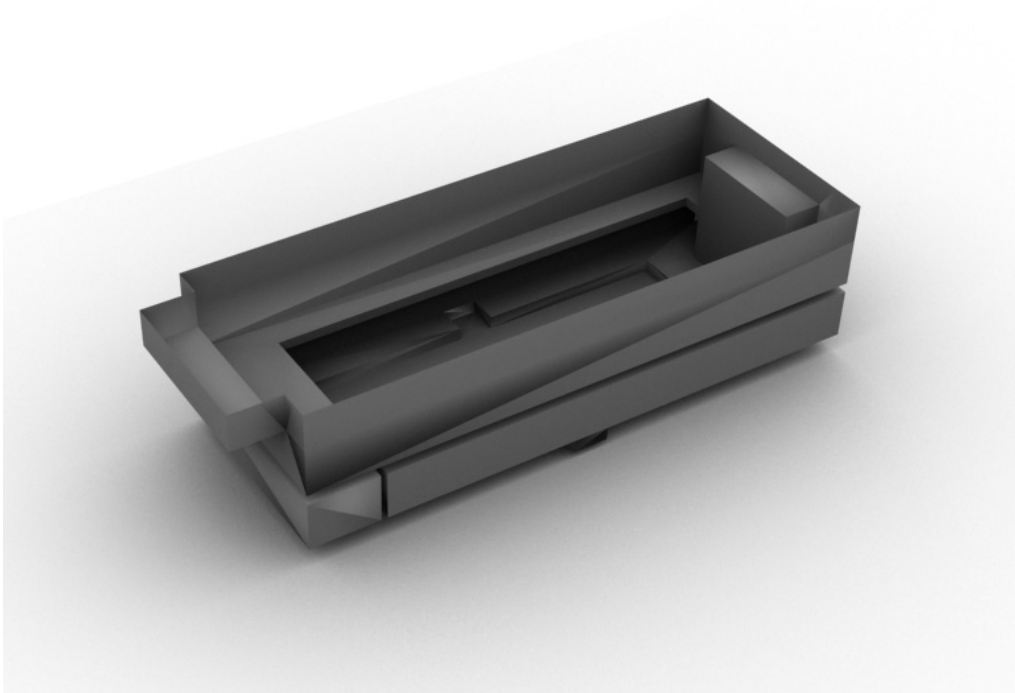


Bild 102: Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Wiener Musikvereinsaal.

### 15.3.2. Philharmonie Berlin

#### Übersicht

Gesamtbewertung	0,677
Anzahl Dreiecke	236
DNA Länge	0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	17832,7
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	5894
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	2733
Ø a	0,36
min a	0,1
max a	0,6
Ø d	0,51
min d	0,2
max d	0,75

Tabelle 28: Übersicht Simulationsergebnisse Philharmonie Berlin



**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Güte	Gewichtete Güte
VK	8	10	8,10	1	1	0,12
RT60	1,4	2	1,06	1	0,64	0,08
EDT	1,8	2,3	0,51	1	0,27	0,03
C80	-1	3	7,60	1	0,46	0,05
G	4	5,5	-21,98	1	0,05	0,01
LFC	25	40	-3,86	1	0,34	0,04
TI	10	25	61,73	1	0,28	0,03
TS	100	150	41,13	1	0,45	0,05

Tabelle 29: Simulationsergebnisse Akustik Philharmonie Berlin

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0,50	3,49	-25,16	-2,10	42,15	64,99
Empfänger 2	0,32	9,32	-18,59	-6,36	38,00	28,83
Empfänger 3	0,33	7,98	-19,17	-4,40	41,36	41,30
Empfänger 4	0,56	8,69	-22,02	-3,36	64,69	44,49
Empfänger 5	0,61	5,67	-21,56	-3,58	66,40	51,95
Empfänger 6	0,76	7,54	-21,93	-3,34	92,62	43,73
Empfänger 7	0,81	4,69	-20,09	-2,51	94,16	52,21
Empfänger 8	0,74	8,30	-23,30	-4,26	101,56	37,62
Empfänger 9	0,73	7,61	-21,70	-5,51	103,56	34,36
Empfänger 10	0,47	6,33	-22,12	-3,69	62,39	36,88
Empfänger 11	0,41	6,73	-22,69	-5,20	53,49	41,52
Empfänger 12	0,41	10,94	-22,66	-3,15	43,12	31,87
Empfänger 13	0,34	11,33	-23,72	-3,17	39,05	23,53
Empfänger 14	0,42	3,99	-22,35	-3,82	52,50	57,18
Empfänger 15	0,27	11,52	-22,71	-3,53	31,00	26,58

Tabelle 30: Detaillierte Simulationsergebnisse Akustik je Empfänger Philharmonie Berlin

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Gütewert	Wichtung	Gewichtete Güte
Anzahl Dreiecke	50	100	136	0,27	1	0,05
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	18,63	0,81	1	0,16
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	5,03	0,94	1	0,19
Fläche einzelner Dreiecke [m²]	25	50	19,91	0,56	1	0,11
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0,35	0,85	1	0,17

Tabelle 31: Simulationsergebnisse Morphologie Philharmonie Berlin

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Güte	Wichtung	Gewichtete Güte
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0,25
Maximale Bodenneigung [°]	0	13,62	0,81	1	0,20
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0,25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	0,25	0,80	1	0,20

*Tabelle 32:* Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Philharmonie Berlin

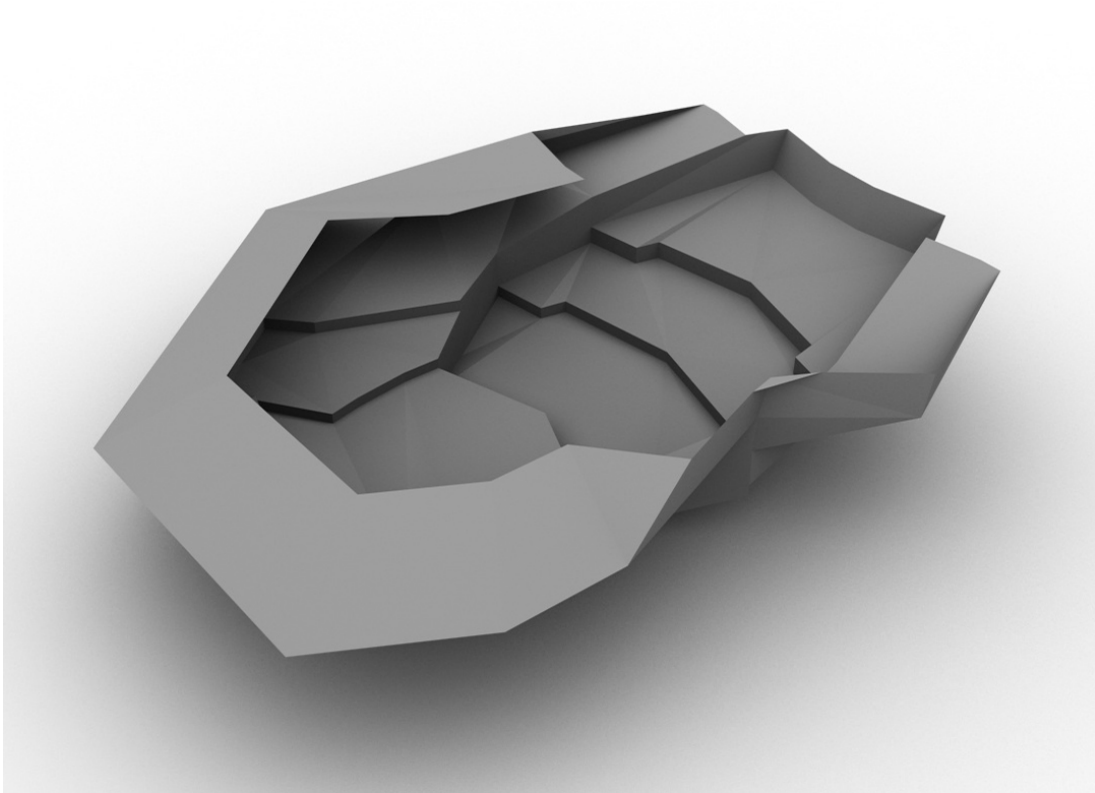


Bild 103: Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Berliner Philharmonie

### 15.3.3. Festspielhaus Bayreuth

#### Übersicht

Gesamtbewertung	0,552
Anzahl Dreiecke	372
DNA Länge	0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	21462
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	7601
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	3355
Ø a	0,38
min a	0
max a	0,9
Ø d	0,65
min d	0
max d	0,9

*Tabelle 33:* Übersicht Simulationsergebnisse Festspielhaus Bayreuth

#### Akustik

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Güte	Gewichtete Güte
VK	8	10	10,73	1	0,73	0,09
RT60	1,4	2	1,04	1	0,63	0,08
EDT	1,8	2,3	0,44	1	0,27	0,03
C80	-1	3	33,24	1	0,12	0,01
G	4	5,5	-28,10	1	0,04	0,01
LFC	25	40	-8,48	1	0,31	0,04
TI	10	25	63,80	1	0,28	0,03
TS	100	150	4,86	1	0,34	0,04

*Tabelle 34:* Simulationsergebnisse Akustik Festspielhaus Bayreuth

#### Akustik Details

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0,65	45,40	-28,70	-9,40	95,76	5,29
Empfänger 2	0,47	32,09	-28,62	-9,40	71,26	4,82
Empfänger 3	0,48	31,85	-28,65	-9,19	71,48	4,86
Empfänger 4	0,34	30,46	-27,02	-8,06	49,83	3,82
Empfänger 5	0,32	31,43	-26,87	-7,32	47,92	4,10
Empfänger 6	0,36	28,19	-28,72	-7,50	46,53	6,24

*Tabelle 35:* Detaillierte Simulationsergebnisse per Empfänger Festspielhaus Bayreuth

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Güte	Wichtung	Gewichtete Güte
Anzahl Dreiecke	50	100	272	0,16	1	0,03
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	20,41	0,80	1	0,16
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	6,75	0,93	1	0,19
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	25	50	17,62	0,59	1	0,12
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0,66	0,75	1	0,15

*Tabelle 36:* Simulationsergebnisse Morphologie Festspielhaus Bayreuth

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Güte	Wichtung	Gewichtete Güte
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0,25
Maximale Bodenneigung [°]	0	166,91	0,26	1	0,06
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0,25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1,32	0,43	1	0,11

*Tabelle 37:* Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Festspielhaus Bayreuth

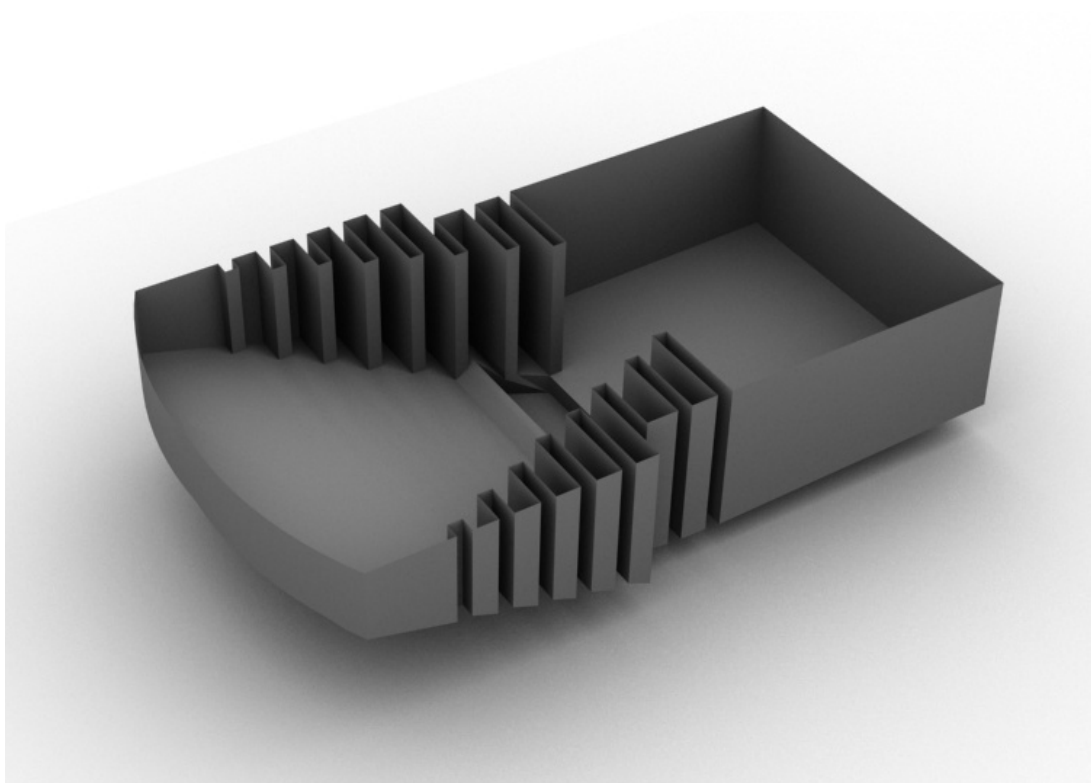


Bild 104: Rendering des analysierten raumakustischen Raummodells Bayreuther Festspielhaus.

### 15.3.4. Semperoper

#### Übersicht

Anzahl Dreiecke	766
DNA Länge	0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	17142.9
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	5787.99
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	2328.3
Ø a	0.364556
min a	0.2
max a	0.75
Ø d	0.644974
min d	0.3
max d	0.85

*Tabelle 38:* Übersicht Simulationsergebnisse Semperoper

#### Akustik

	Zielwert min.	Zielwert max.	Ergebnis	Wichtung	Güte	Gewichtete Güte
VK	8	10	8.57	1	1.00	0.13
RT60	1.4	2	1.20	1	0.75	0.09
EDT	1.8	2.3	0.52	1	0.28	0.04
C80	-1	3	6.81	1	0.51	0.06
G	4	5.5	-22.12	1	0.05	0.01
LFC	25	40	-5.76	1	0.33	0.04
TI	10	25	56.34	1	0.32	0.04
TS	100	150	48.16	1	0.49	0.06

*Tabelle 39:* Simulationsergebnisse Akustik Semperoper

#### Akustik Details

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.70	11.74	-20.41	-3.73	84.34	36.95
Empfänger 2	0.31	8.80	-23.89	-7.01	42.04	26.62
Empfänger 3	0.55	-0.10	-22.07	-6.55	42.65	80.92

*Tabelle 40:* Detaillierte Simulationsergebnisse Akustik per Empfänger Semperoper

**Morphologie**

	Zielwert min.	Zielwert max.	Ø Abweichu ng	Gütes wert	Wicht ung	Gewichtete Güte
Anzahl Dreiecke	50	100	666	0.07	1	0.01
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	18.51	0.81	1	0.16
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	2.57	0.97	1	0.19
Fläche einzelner Dreiecke [m²]	25	50	19.21	0.57	1	0.11
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0.21	0.91	1	0.18

*Tabelle 41:* Simulationsergebnisse Morphologie Semperoper

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Güte	Wichtung	Gewichtete Güte
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Boden­neigung [°]	0	4.88	0.92	1	0.23
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	0.30	0.77	1	0.19

*Tabelle 42:* Simulationsergebnisse Nutzbarkeit Semperoper

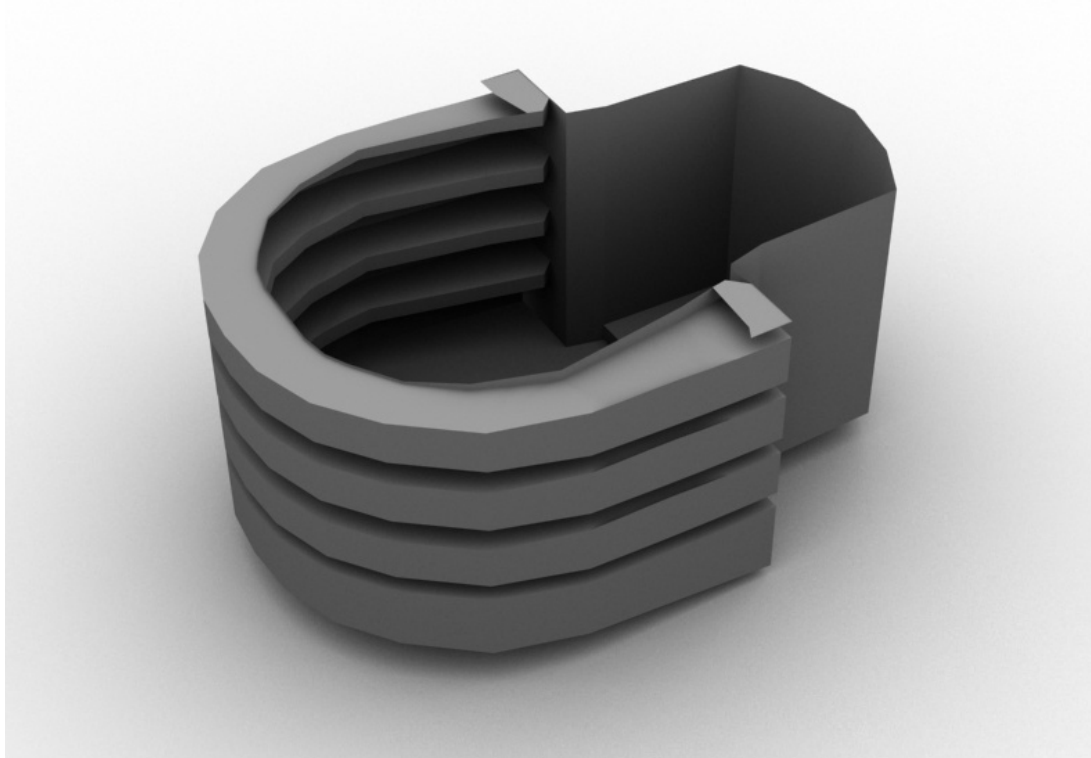


Bild 105: Rendering analysiertes raumakustisches Raummodell Semperoper Dresden.

## **15.4. Beschreibung des Quaderraumes für den Plausibilitätsvergleich**

### **15.4.1. Beschreibung der Geometrie**

Abmessung des Raumes: 100x60x20 l x b x h

Flächennormalen zeigen nach innen

Receiver 5,35,2 ohne Richtcharakteristik

Source 0,-40,5 Kugelquelle Schallpegel 79dB in 1m Abstand

Untersuchtes Szenario

$\alpha=0,4$   $d=0,2$

Spiegelquellenordnung 3; Truncation time 300ms

Anzahl Strahlen 100.000; Truncation time 5000ms

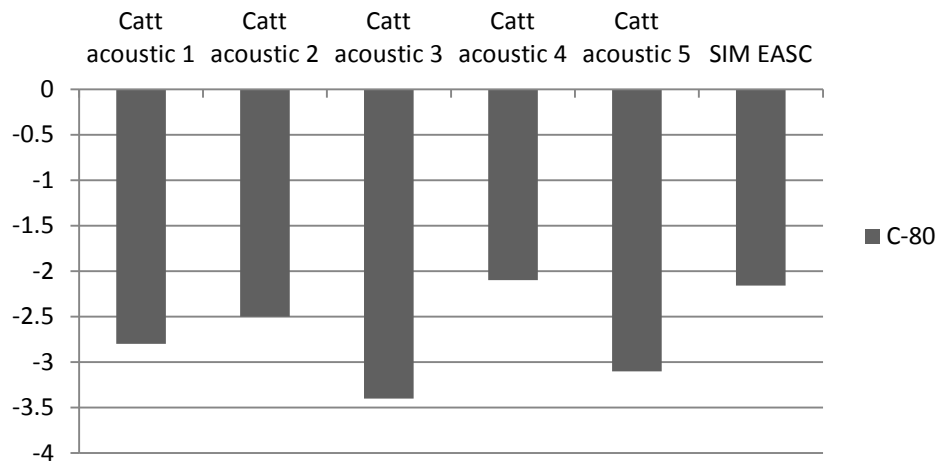
Luftabsorption berücksichtigt

Betrachtet wird nur die Frequenz 1kHz

### **15.4.2. Ergebnisse aus den verschiedenen Analysen des Quaderraumes**

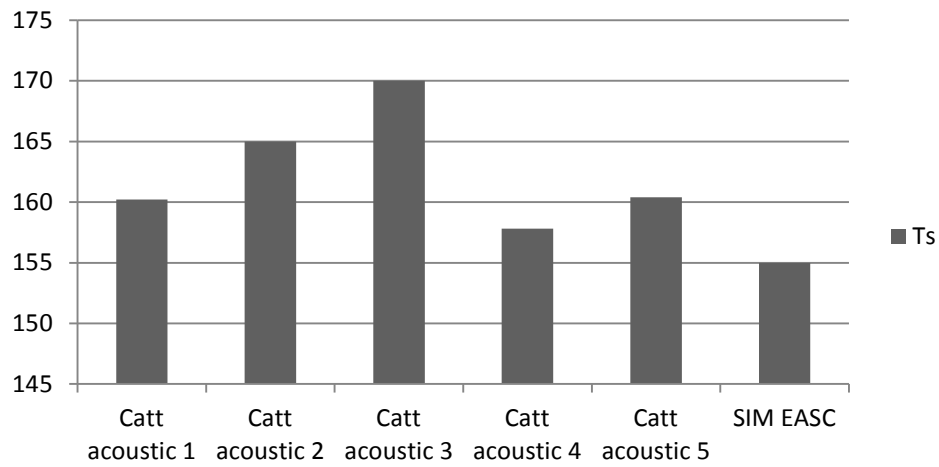
*Tabelle 43:* Vergleich EDT Catt Acoustics(CA) und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus (SIM EASC)

### C-80



**Tabelle 44:** Vergleich C80 Catt Acoustics und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus

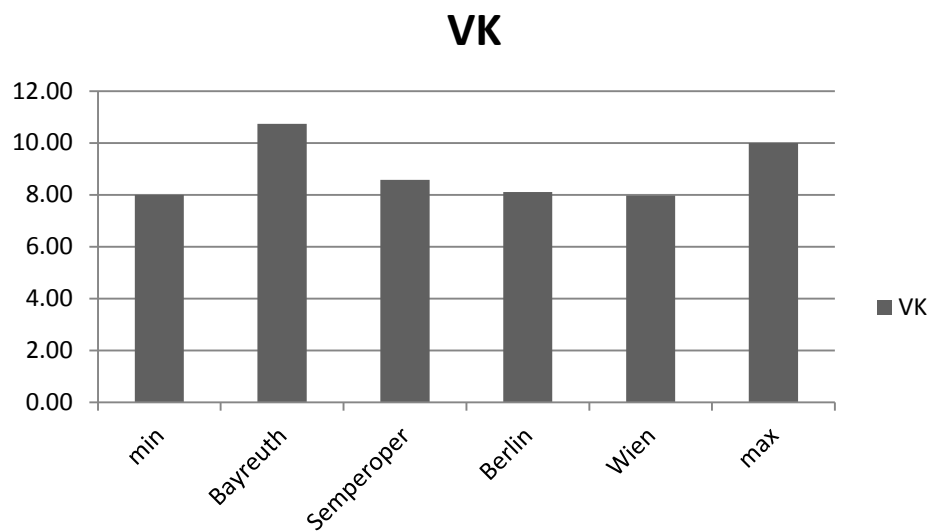
### Ts



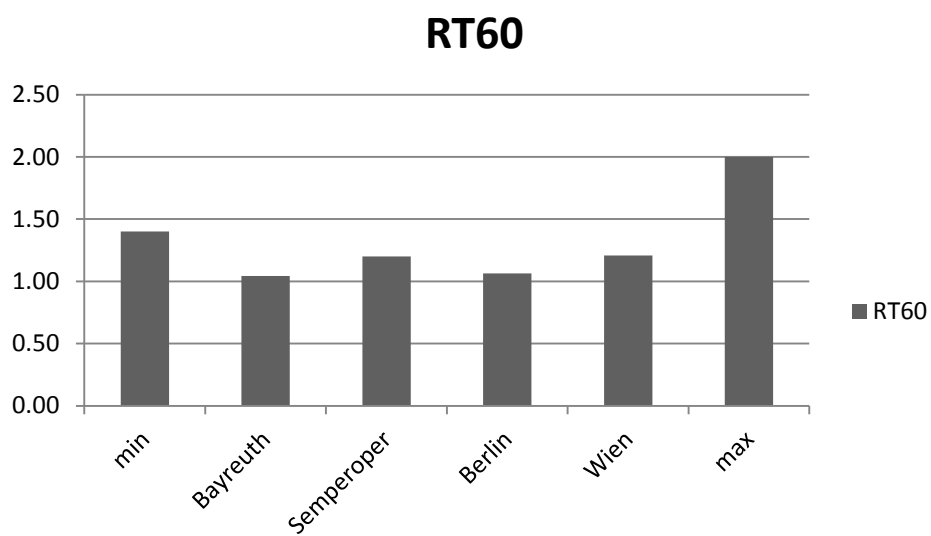
**Tabelle 45:** Vergleich Ts Catt Acoustics und integrierte Simulation des Formerzeugungsalgorithmus



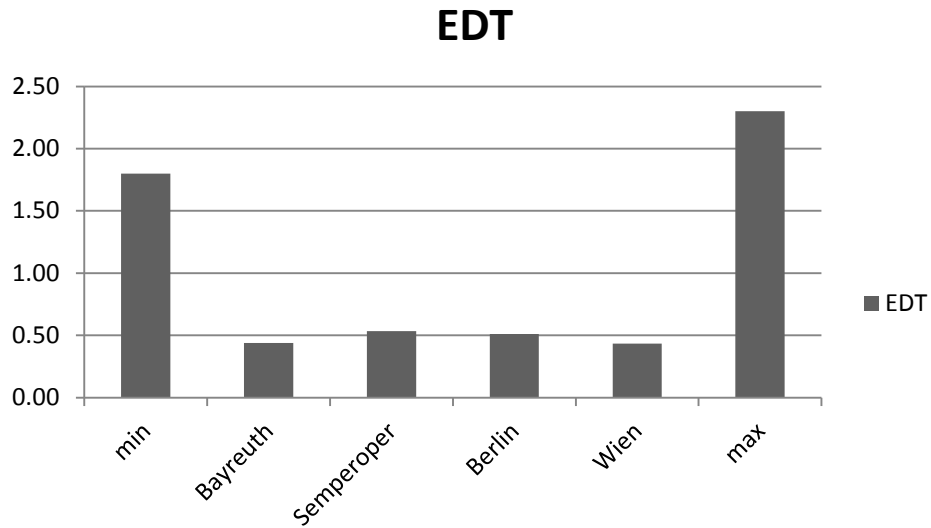
### 15.5. Vergleich der akustischen Kennzahlen der Grundtypen aus der integrierten Simulation



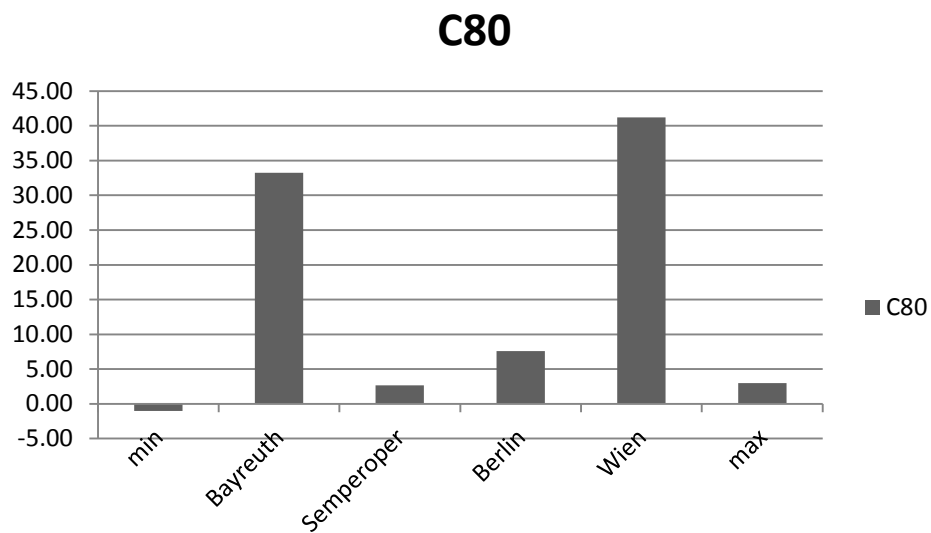
*Tabelle 46:* Vergleich Volumen Kennzahl aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen



*Tabelle 47:* Vergleich Nachhallzeit aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen



*Tabelle 48:* Vergleich frühe Nachhallzeit aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen



*Tabelle 49:* Vergleich Klarheitsmaß aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen

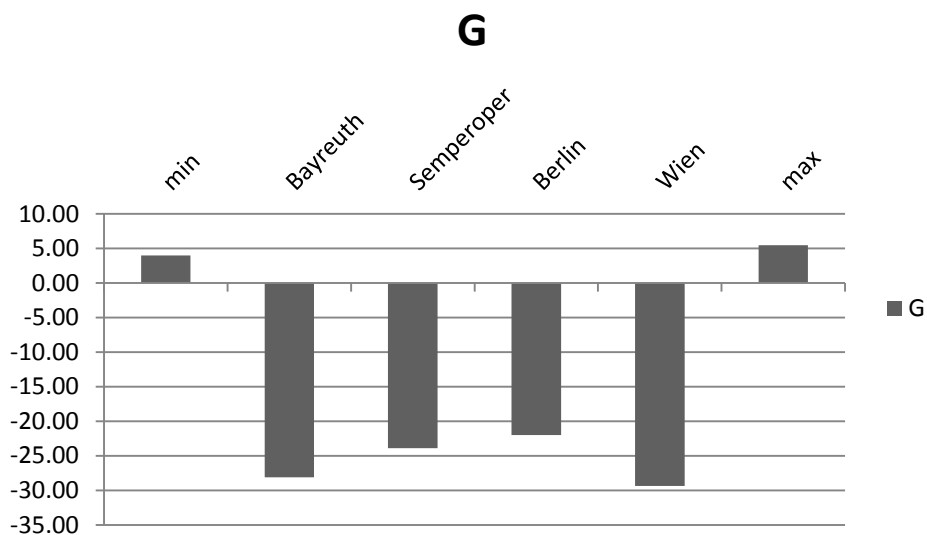


Tabelle 50: Vergleich Stärkemaß aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen

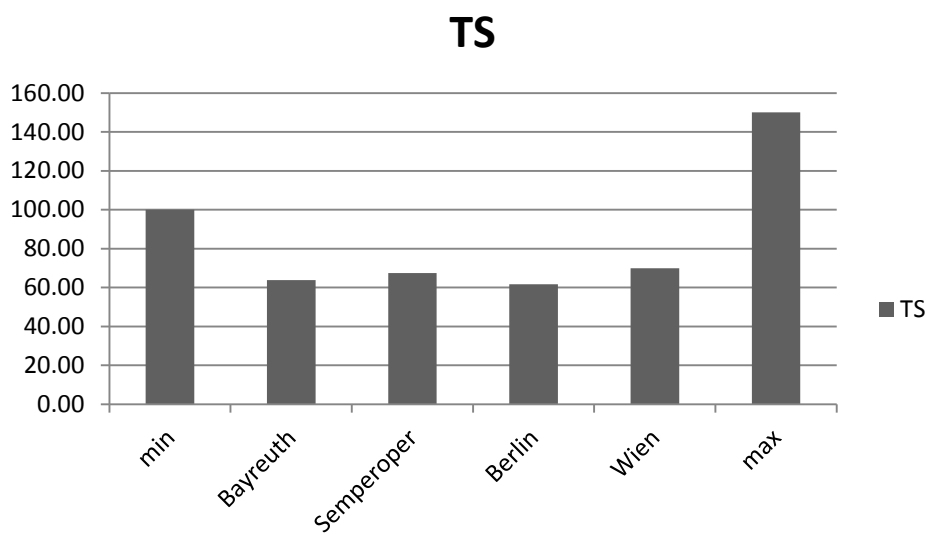


Tabelle 51: Schwerpunktzeiten aus der akustischen Analyse der vier Grundtypen

Anhang

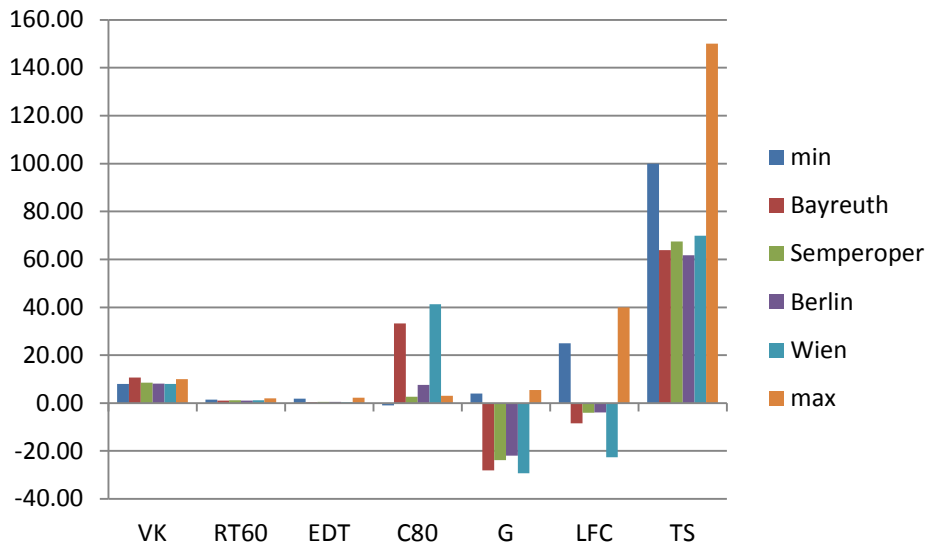


Tabelle 52: Vergleichende Übersicht der akustischen Werte unterschiedlicher Raumtypen aus der Analyse der 4 akustischen Grundtypen.

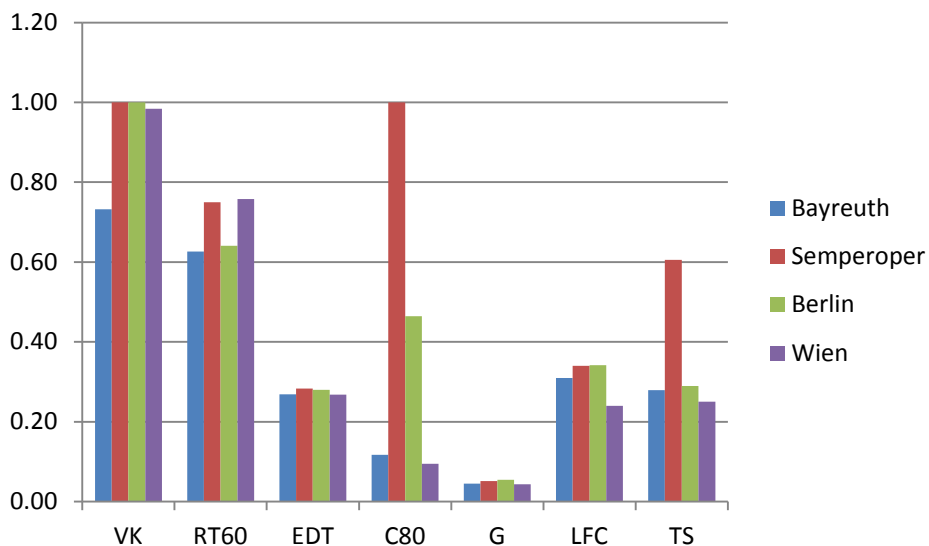


Tabelle 53: Vergleich der Güterwerte unterschiedlicher Raumtypen aus der Analyse der 4 akustischen Grundtypen.

## 15.6. Dokumentation der durchgeführten Experimente mit dem evolutionären Algorithmus

### 15.6.1. NR1-G-100-500<sup>54</sup>

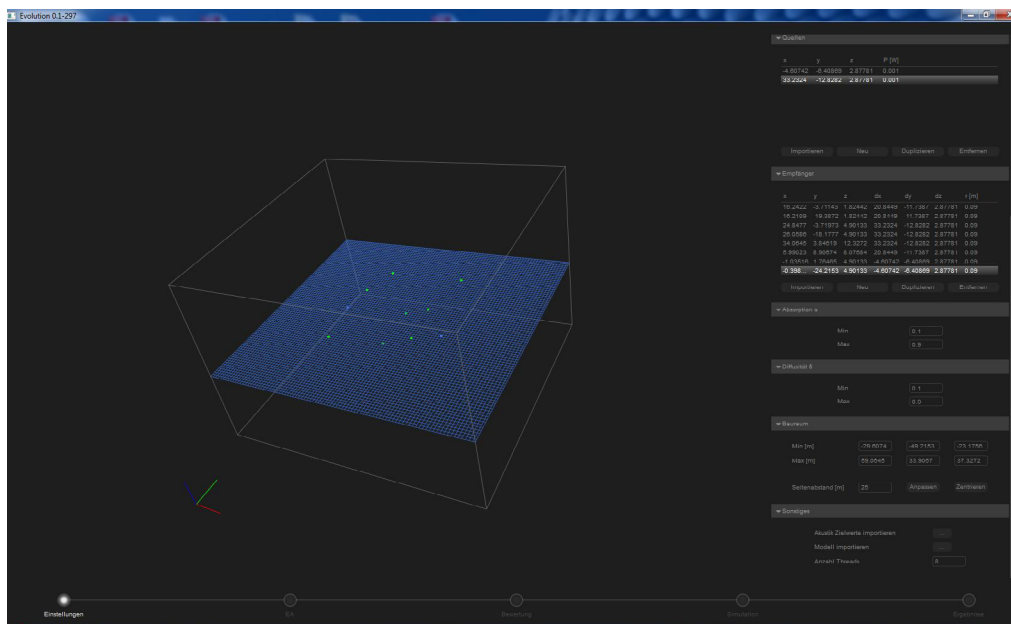


Bild 106: NR01-G-100-500 allgemeine Einstellungen

#### Empfänger -Quellen Konstellation

Quelle 1 <source power ="0.001" x="-4.60742" y="-6.40869" z="2.87781" />  
 Quelle 2 <source power ="0.001" x="33.2324" y="-12.8282" z="2.87781" />  
 Empfänger 1 <receiver x="16.2422" y="-3.71143" z="1.82442" dx="20.8449" dy="-11.7387" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 2 <receiver x="16.2109" y="-19.3872" z="1.82442" dx="20.8449" dy="-11.7387" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 3 <receiver x="24.8477" y="-3.71973" z="4.90133" dx="33.2324" dy="-12.8282" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 4 <receiver x="26.0586" y="-18.1777" z="4.90133" dx="33.2324" dy="-12.8282" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 5 <receiver x="34.0645" y="3.84619" z="12.3272" dx="33.2324" dy="-12.8282" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 6 <receiver x="5.99023" y="8.90674" z="8.07684" dx="20.8449" dy="-11.7387" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 7 <receiver x="-1.03516" y="1.76465" z="4.90133" dx="-4.60742" dy="-6.40869" dz="2.87781" radius="0.09" />  
 Empfänger 8 <receiver x="-0.398438" y="-24.2153" z="4.90133" dx="-4.60742" dy="-6.40869" dz="2.87781" radius="0.09" />

Abstand Bauraum zur E/Q Boundingbox 25m

Tabelle 54: NR01-G-100-500 Empfänger Quellen Konstellation (frei gewählt)

<sup>54</sup> NR01-G-100-500: Neuer Raum 1(Empfänger – Quellenkonstellation frei gewählt, G (Gesamtevaluation) 100 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

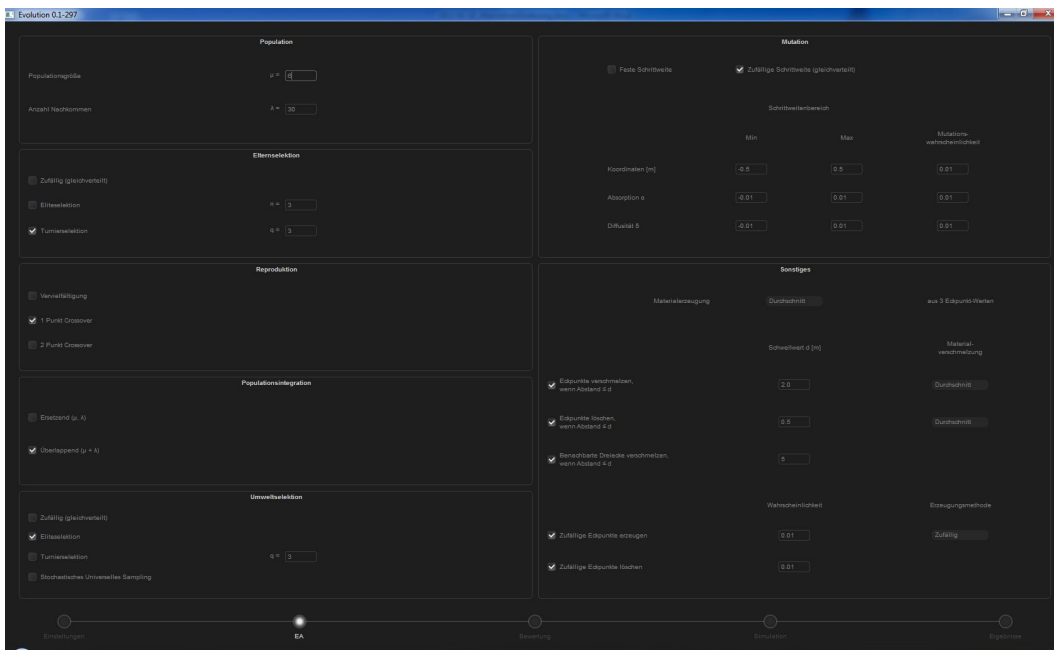


Bild 107: NR01-G-100-500 Einstellungen evolutionärer Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,5
Schrittweitenbereich Absorptionsindex $\alpha$	min=-0,05;max=0,05; P=0,1
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,05;max=0,05; P=0,1
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,01
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 55: NR01-G-100-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese

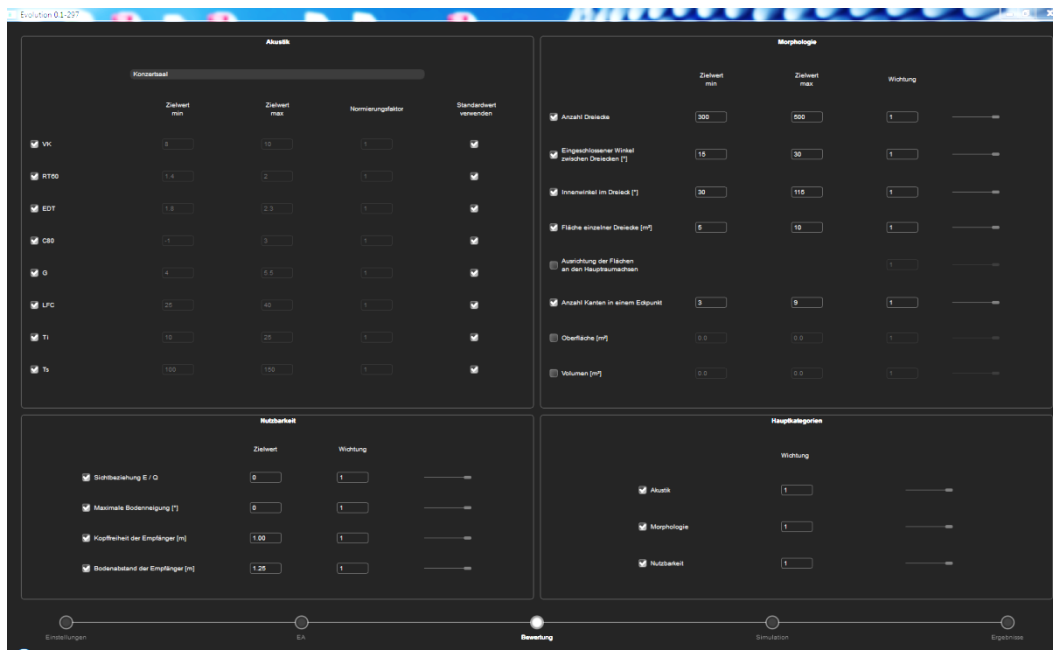


Bild 108: NR01-G-100-500 Einstellungen Evaluation

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

Tabelle 56: NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Akustik

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	300	500	1
Eingeschlossener Winkel	15	30	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m]	5	10	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	3	9	1
Oberfläche [m²]	Nicht aktiv		0
Volumen [m³]	Nicht aktiv		0

Tabelle 57: NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Morphologie

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Bodenneigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

Tabelle 58: NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Wichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

Tabelle 59: NR01-G-100-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

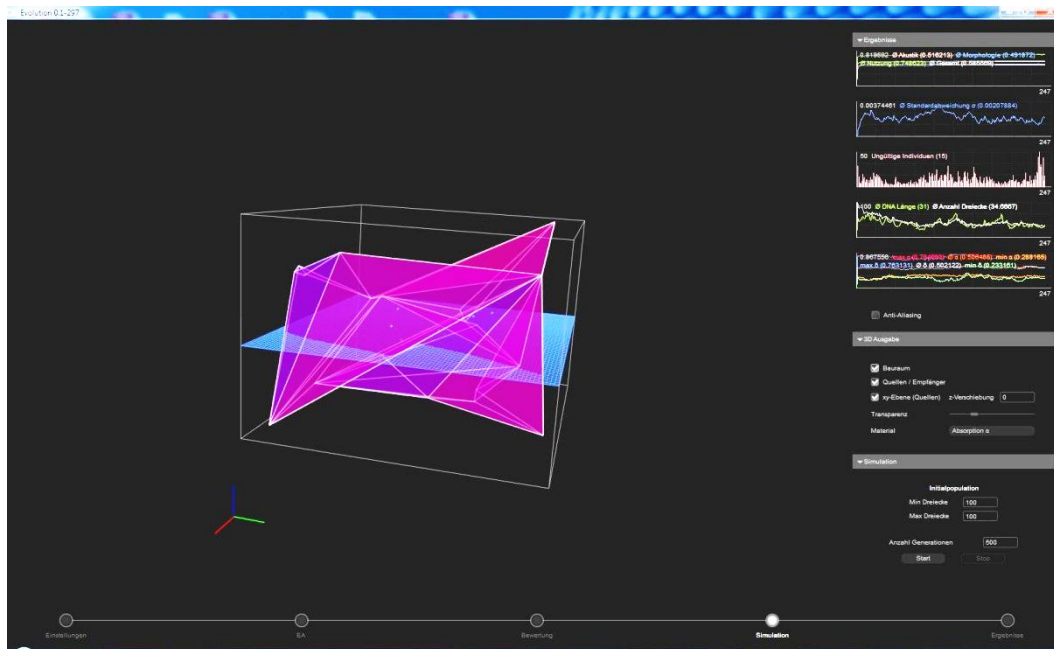


Bild 109: NR01-G-100-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums





Bild 110: NR01-G-100-500 graphische Darstellung der Entwicklung der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	36
DNA Länge	29
Volumen [m³]	112918
Oberfläche [m²]	18877.1
äq. Absorptionsfläche [m²]	9891.18
Ø a	0.496369
min a	0.263344
max a	0.777939
Ø d	0.488019
min d	0.21433
max d	0.760041

Tabelle 60: Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500

**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	56.4591	1	0.0412719	0.00515899
RT60	1.4	2	1.86082	1	1	0.125
EDT	1.8	2.3	0.54975	1	0.285673	0.0357092
C80	-1	3	-0.883594	1	1	0.125
G	4	5.5	-23.2647	1	0.0521472	0.0065184
LFC	25	40	-4.19586	1	0.339398	0.0424248
TI	10	25	45.6914	1	0.42027	0.0525337
TS	100	150	113.893	1	1	0.125

Tabelle 61: Analyse Akustik des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.39	1.36713	-21.8505	-4.95935	56.2986	75.9033
Empfänger 2	0.642	-1.1987	-23.9838	-2.62859	53.2708	112.037
Empfänger 3	0.738	-3.15243	-23.6404	-2.61111	36.5726	144.731
Empfänger 4	0.21	1.55425	-22.9819	-3.95146	26.7484	109.782
Empfänger 5	0.864	-1.72955	-24.0925	-2.05901	55.9295	123.516
Empfänger 6	0.714	0.202758	-22.7522	-5.3401	56.3748	99.6991
Empfänger 7	0.21	-3.17116	-23.3003	-8.90365	26.6663	127.593
Empfänger 8	0.63	-0.941035	-23.5163	-3.11364	53.6701	117.878

*Tabelle 62:* Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Gütewert	Wichtung	Gewichteter Gütewert
Anzahl Dreiecke	300	500	264	0.431034	1	0.0862069
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	15	30	127.454	0.105297	1	0.0210594
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	7.09479	0.922962	1	0.184592
Fläche einzelner Dreiecke [m²]	5	10	514.804	0.009619	1	0.0019238
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	3	9	0.05	0.991736	1	0.198347

*Tabelle 63:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütewert	Wichtung	Gewichteter Gütewert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Boden­neigung [°]	0	3.33601	0.944979	1	0.236245
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	16.5118	0.0571043	1	0.0142761

*Tabelle 64:* Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese NR01-G-100-500

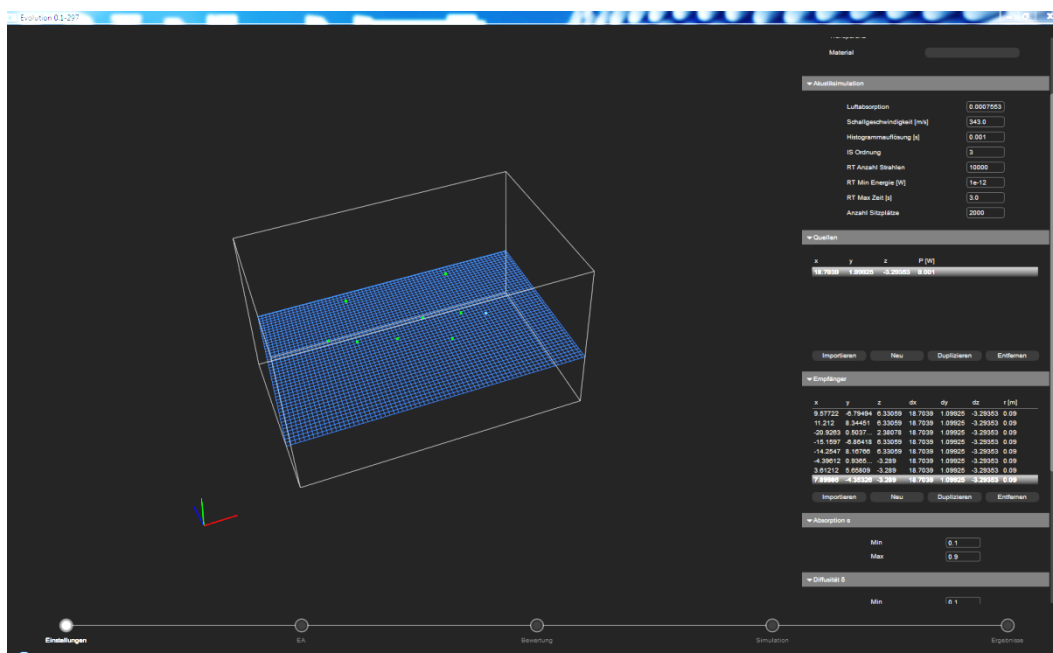
15.6.2. W01-A-24-500<sup>55</sup>

Bild 111: W01-A-24-500 allgemeine Einstellungen

Quelle 1	<sources version="1.0" yzswapped="false">
Quelle 2	<source power="0.001" x="18.7039" y="1.09925" z="-3.29353" />
Empfänger1	<receivers version="1.0" yzswapped="false">
Empfänger2	<receiver x="9.57722" y="-6.79494" z="6.33059" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger3	<receiver x="11.212" y="8.34451" z="6.33059" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger4	<receiver x="-20.9263" y="0.503753" z="2.38078" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger5	<receiver x="-15.1597" y="-6.86418" z="6.33059" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger6	<receiver x="-14.2547" y="8.16766" z="6.33059" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger7	<receiver x="-4.39612" y="0.936519" z="-3.289" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger8	<receiver x="3.61212" y="5.65809" z="-3.289" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Empfänger9	<receiver x="7.89986" y="-4.35326" z="-3.289" dx="18.7039" dy="1.09925" dz="-3.29353" radius="0.09" />
Abstand Bauraum zur E/Q Boundingbox	10m

Tabelle 65: W01-A-24-500 Empfänger Quellen Konstellation (entsprechend Musikvereinsaal Wien)

<sup>55</sup> W01-A-24-500: W01(Empfänger – Quellenkonstellation entsprechend Musikvereinsaal Wien, A (Evaluationskriterium Akustik) 24 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

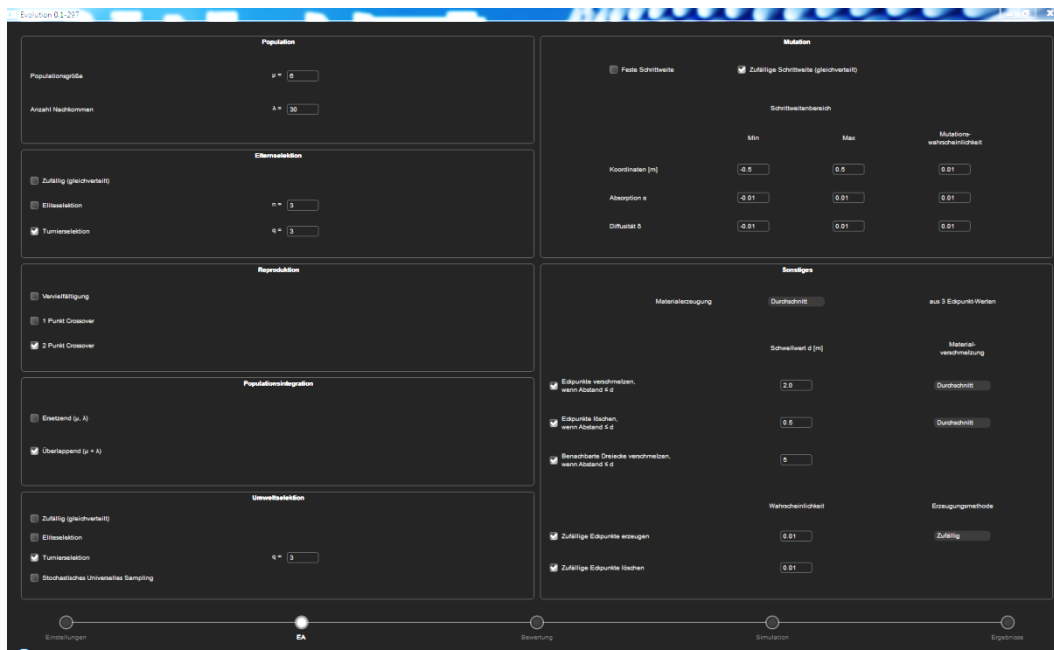


Bild 112: W01-A-24-500 Einstellungen evolutionärer Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten [m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,01
Schrittweitenbereich Absorptionsindex $\alpha$	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,01
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 66: W01-A-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese

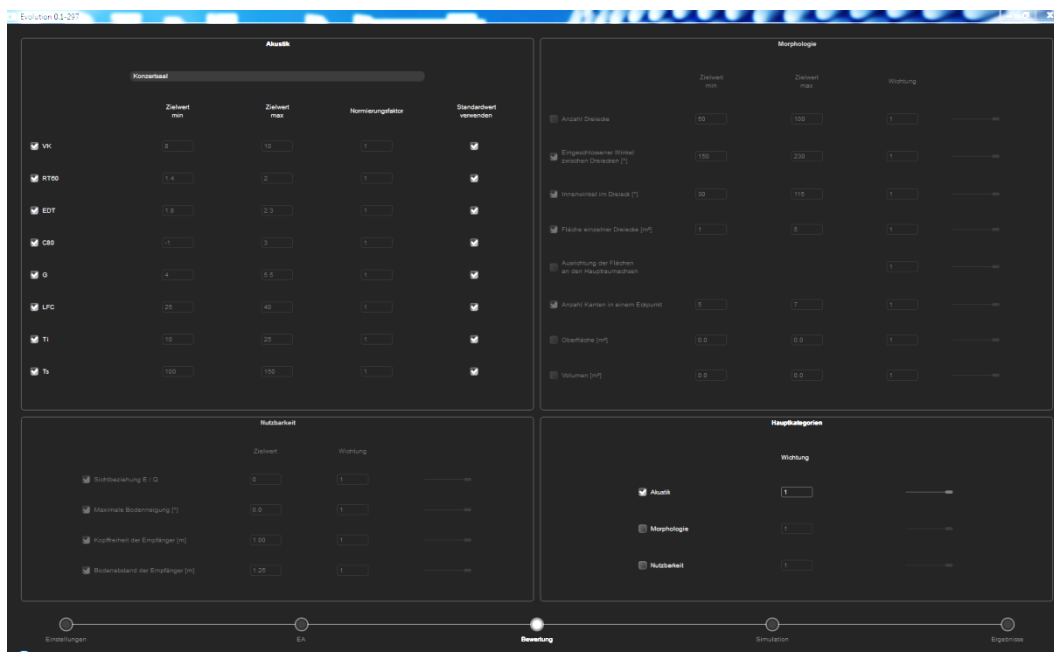


Bild 113: W01-A-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

Tabelle 67: W01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik

	aktiv	Wichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	nein	0
Nutzbarkeit	nein	0

Tabelle 68: W01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

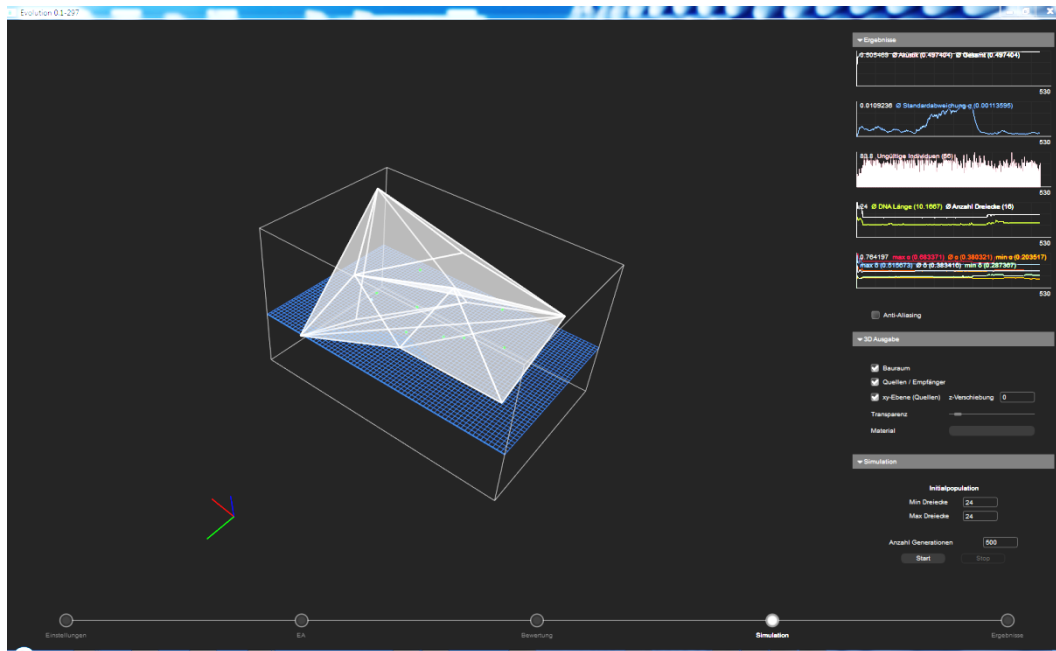


Bild 114: W01-A.24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums



Bild 115: W01-A-24-500 Darstellung der Statistik der Genese

Übersicht	
Anzahl Dreiecke	16
DNA Länge	11
Volumen [m <sup>3</sup> ]	25117
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	6455.89
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	2364.29
Ø a	0.380213
min a	0.203301
max a	0.683371
Ø d	0.383416
min d	0.287366
max d	0.515673

*Tabelle 69:* Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W01-A-24-500

#### Akustik

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungs faktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	12.5585	1	0.438741	0.0548426
RT60	1.4	2	1.73162	1	1	0.125
EDT	1.8	2.3	0.7005	1	0.312598	0.0390747
C80	-1	3	2.41792	1	1	0.125
G	4	5.5	-21.3985	1	0.0557652	0.00697065
LFC	25	40	-4.04817	1	0.340536	0.042567
TI	10	25	71.037	1	0.245753	0.0307191
TS	100	150	63.0206	1	0.574849	0.0718561

*Tabelle 70:* Analyse Akustik des besten Individuums der Genese W01-A-24-500

#### Akustik Details

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.33	5.72232	-18.4835	-6.58291	44.9999	38.4302
Empfänger 2	0.324	5.88926	-19.0072	-6.20994	41.359	41.3128
Empfänger 3	1.002	5.65909	-22.4874	-3.13192	116.731	49.9404
Empfänger 4	0.99	5.55882	-22.0139	-3.00639	105.231	56.8274
Empfänger 5	0.966	1.90558	-22.7335	-3.43267	102.201	60.9598
Empfänger 6	0.912	0.588979	-23.751	-1.03934	76.5286	84.7932
Empfänger 7	0.63	-3.24404	-21.8324	-3.95149	45.963	87.8176
Empfänger 8	0.45	-2.73666	-20.8791	-5.03068	35.2826	84.0836

*Tabelle 71:* Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese W01-A-24-500

15.6.3. W02-G-100-1000<sup>56</sup>

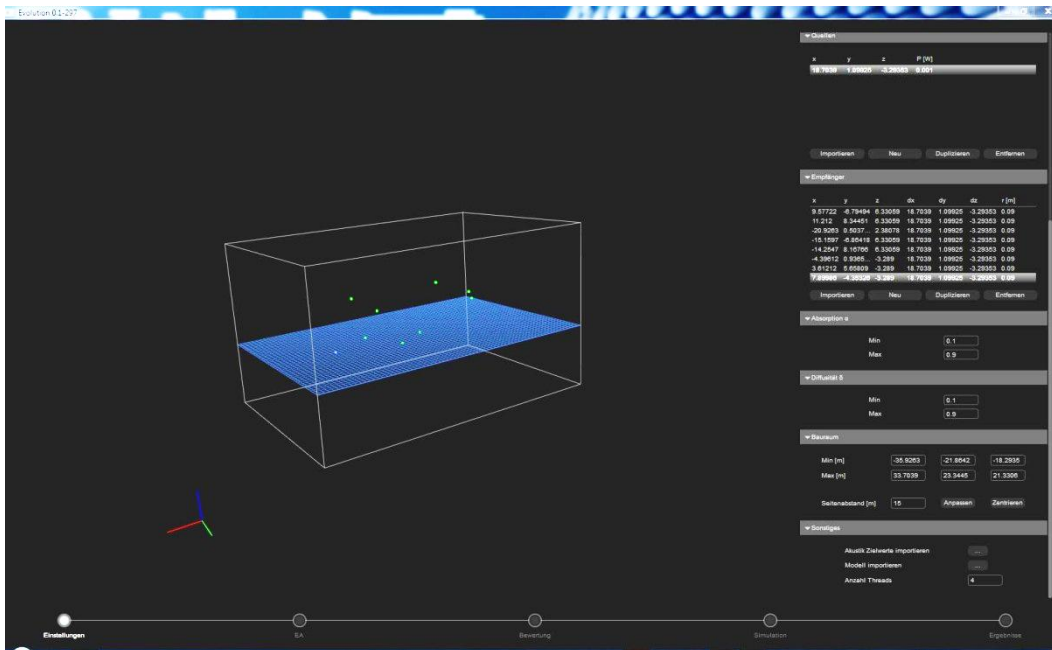


Bild 116: W02-G-100-1000 allgemeine Einstellungen

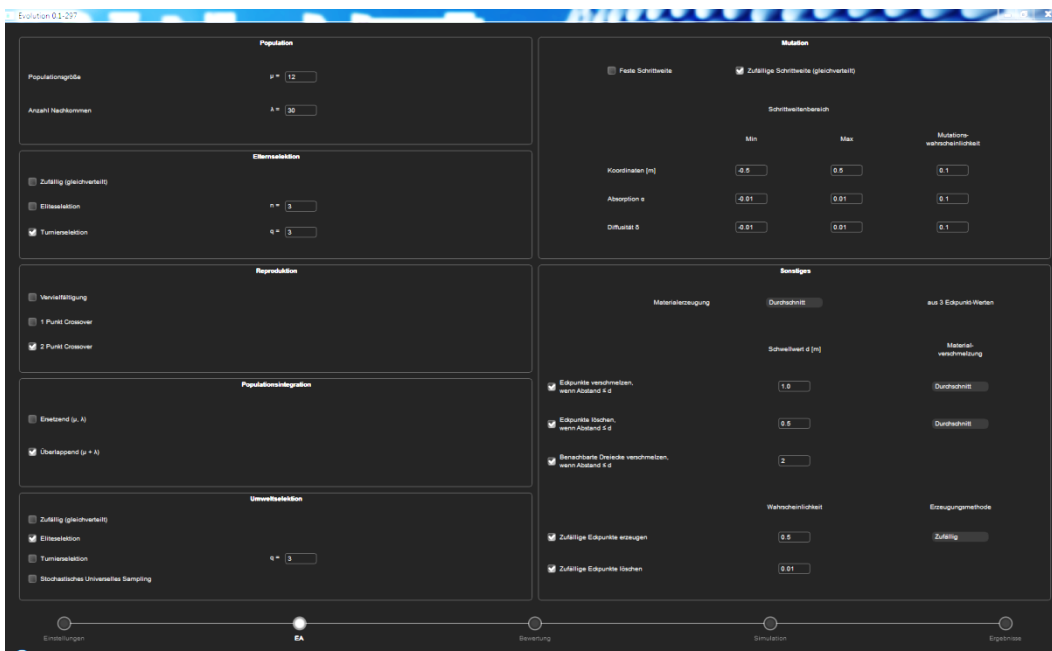


Bild 117: W02-G-100-1000 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

<sup>56</sup> W02-G-100-1000: W02(Empfänger – Quellenkonstellation entsprechend Musikvereinsaal Wien, G (Gesamtevaluation) 100 (Anzahl der Start Dreiecke), 1000 (Anzahl der max. Generationen)



Populationsgröße	$\mu=12$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,1
Schrittweitenbereich Absorptionsindex $\alpha$	min=-0,01;max=0,01; P=0,1
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,01;max=0,01; P=0,1
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	1,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,5
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 72: W02-G-100-1000 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese

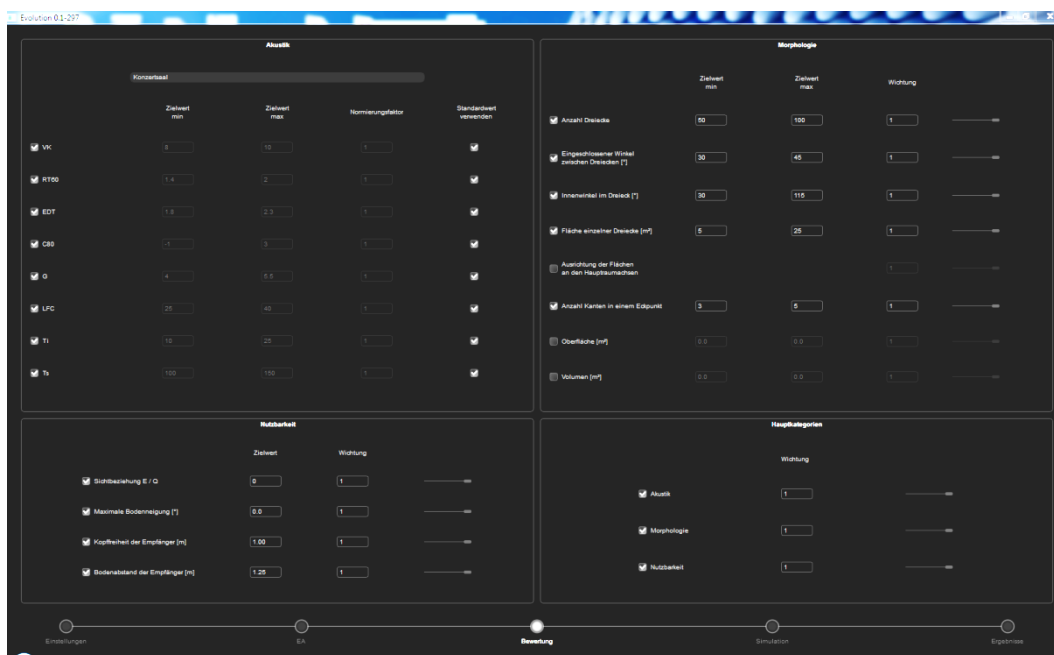


Bild 118: W02-G-100-1000 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

Anhang

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

*Tabelle 73:* W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Akustik

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	50	100	1
Eingeschlossener Winkel	30	45	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m]	5	25	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	3	5	1
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	Nicht aktiv		0

*Tabelle 74:* W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Morphologie

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Bodenneigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

*Tabelle 75:* W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Wichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

*Tabelle 76:* W02-G-100-1000 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

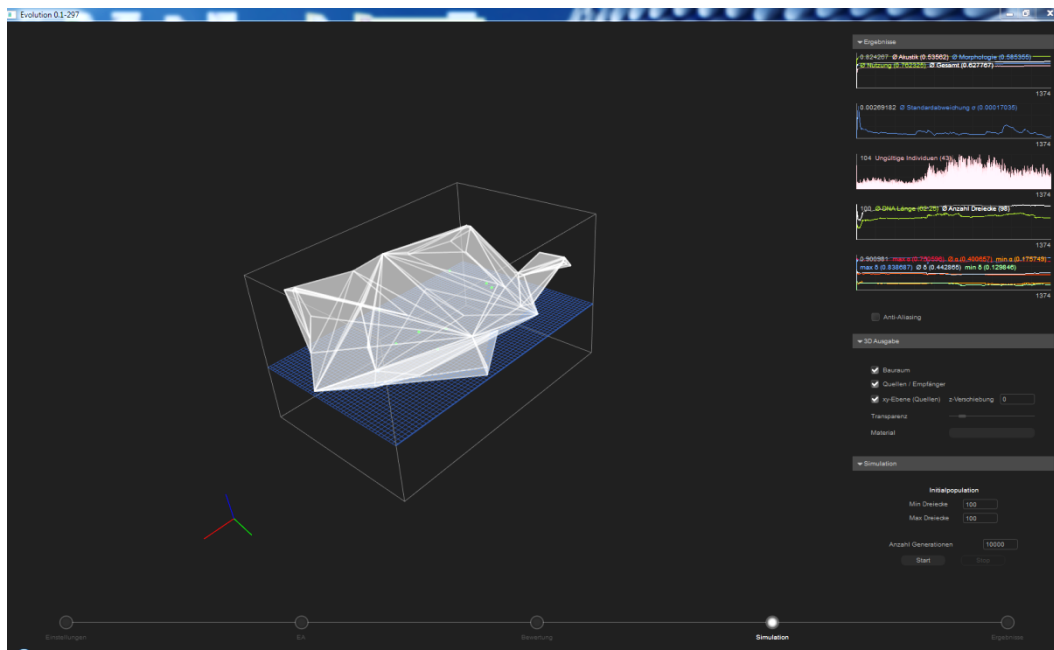


Bild 119: W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums

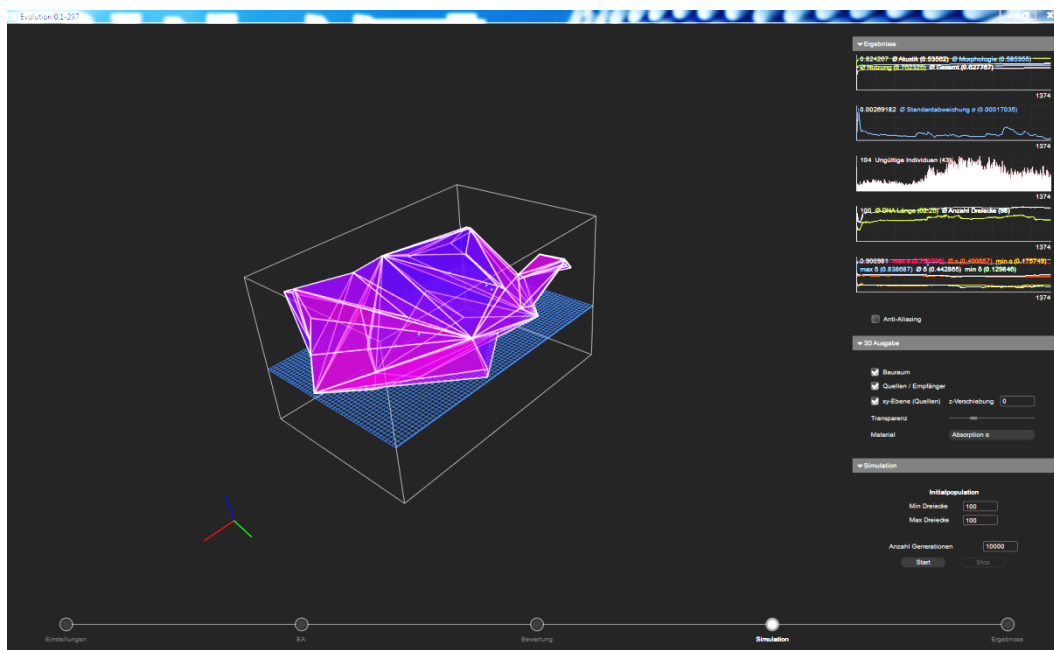


Bild 120: W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Absorptionsgrade

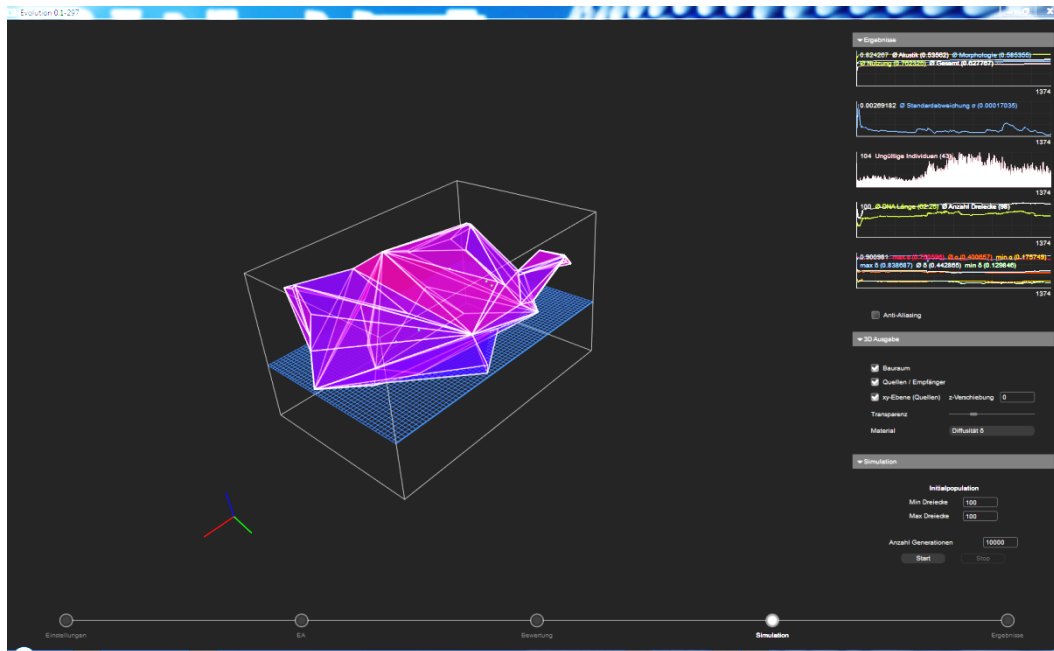


Bild 121: W02-G-100-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Diffusionsgrade

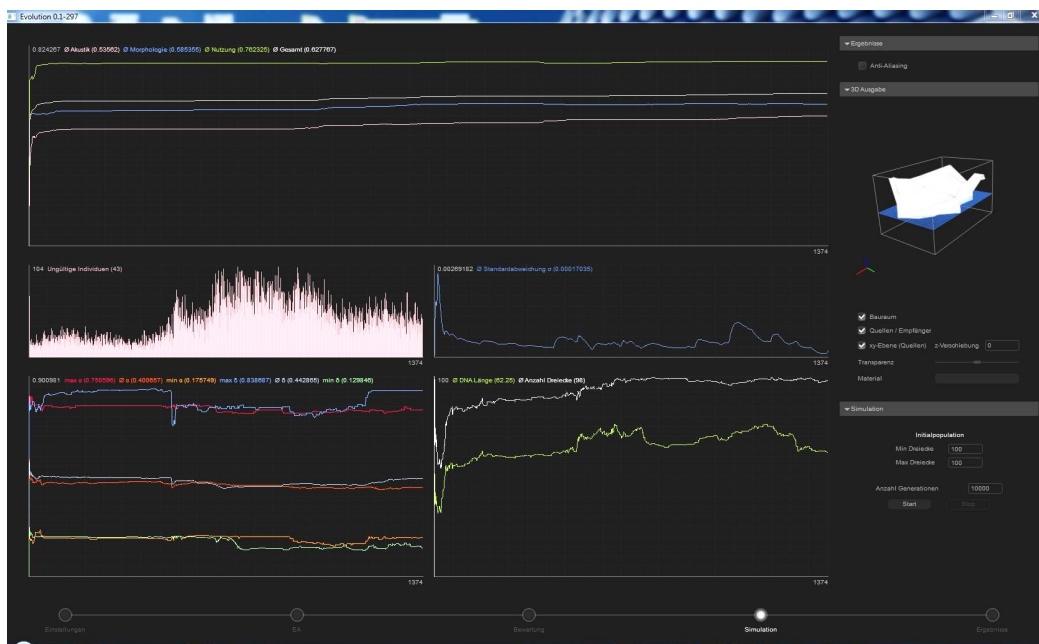


Bild 122: W02-G-100-1000 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	98
DNA Länge	64
Volumen [m <sup>3</sup> ]	22493.2
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	6318.4
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	2469.8
Ø a	0.395919
min a	0.17773
max a	0.740706
Ø d	0.444237
min d	0.122083
max d	0.836568

*Tabelle 77:* Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000

**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungs faktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	11.2466	1	0.616034	0.0770042
RT60	1.4	2	1.48448	1	1	0.125
EDT	1.8	2.3	0.654	1	0.303767	0.0379708
C80	-1	3	1.78074	1	1	0.125
G	4	5.5	-20.3913	1	0.0579346	0.00724182
LFC	25	40	-3.51623	1	0.344699	0.0430874
TI	10	25	69.8895	1	0.250461	0.0313076
TS	100	150	81.5564	1	0.730528	0.091316

*Tabelle 78:* Analyse der Akustik des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.384	5.82467	-20.1032	-4.85607	44.9999	54.3191
Empfänger 2	0.354	0.0870087	-21.8682	-4.01463	41.359	94.6257
Empfänger 3	0.93	7.30307	-19.8013	-3.1112	116.731	42.952
Empfänger 4	0.846	5.19773	-19.6387	-3.32308	105.231	52.5641
Empfänger 5	0.834	3.31465	-19.2153	-3.41299	102.201	64.0912
Empfänger 6	0.732	-0.809003	-19.973	-2.17688	67.3487	89.686
Empfänger 7	0.624	-1.07946	-21.1618	-2.82096	45.963	112.377
Empfänger 8	0.528	-5.59271	-21.3687	-4.41403	35.2826	141.836

*Tabelle 79:* Detaillierte Analyse der Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Anzahl Dreiecke	50	100	0	1	1	0.2
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	30	45	115.059	0.115332	1	0.0230665
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	8.57227	0.908389	1	0.181678
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	5	25	47.0658	0.298215	1	0.0596429
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	3	5	1.27451	0.610778	1	0.122156

Tabelle 80: Analyse der Morphologie des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Boden­neigung [°]	0	3.12359	0.948301	1	0.237075
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	9.26513	0.0974172	1	0.0243543

Tabelle 81: Analyse der Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W02-G-100-1000

**15.6.4. W03-MN-24-500<sup>57</sup>**

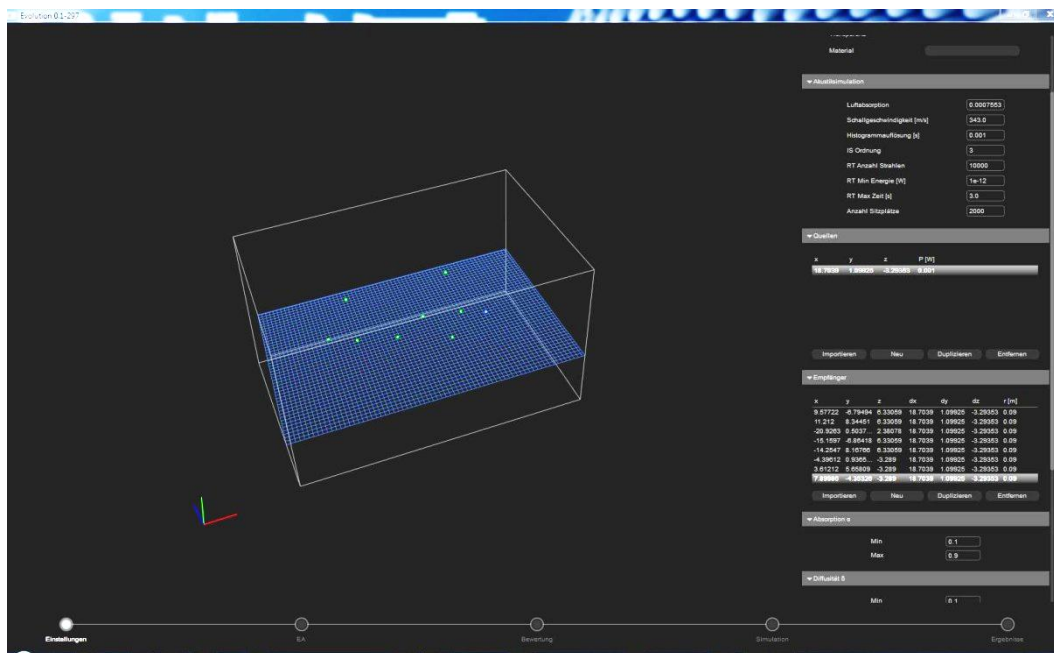


Bild 123: W03-MN-24-500 allgemeine Einstellungen

<sup>57</sup> W03 MN 24 500: W03(Empfänger – Quellenkonstellation entsprechend Musikvereinsaal Wien, MN (Evaluationskriterien Morphologie u. Nutzbarkeit) 24 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

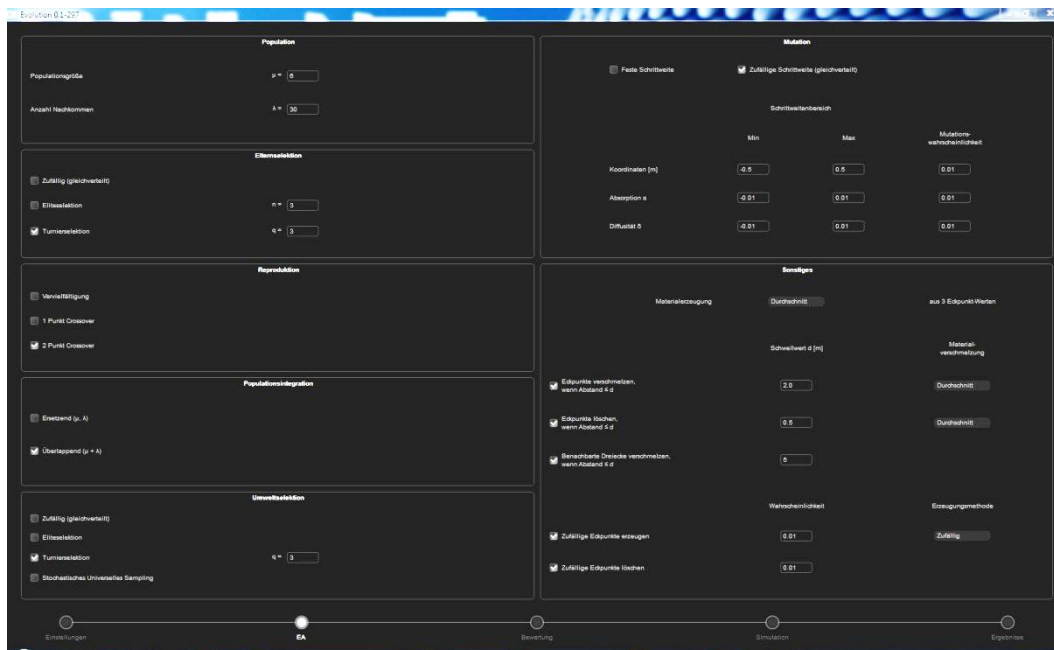


Bild 124: W03-MN-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $m+1$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten [m]	$\text{min}=-0,5; \text{max}=0,5; P=0,1$
Schrittweitenbereich Absorptionsindex $a$	$\text{min}=-0,01; \text{max}=0,01; P=0,01$
Schrittweitenbereich Diffusionsindex $d$	$\text{min}=-0,01; \text{max}=0,01; P=0,01$
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	$P=0,01$
Zufällige Eckpunkte löschen	$P=0,01$

Tabelle 82: W03-MN-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese

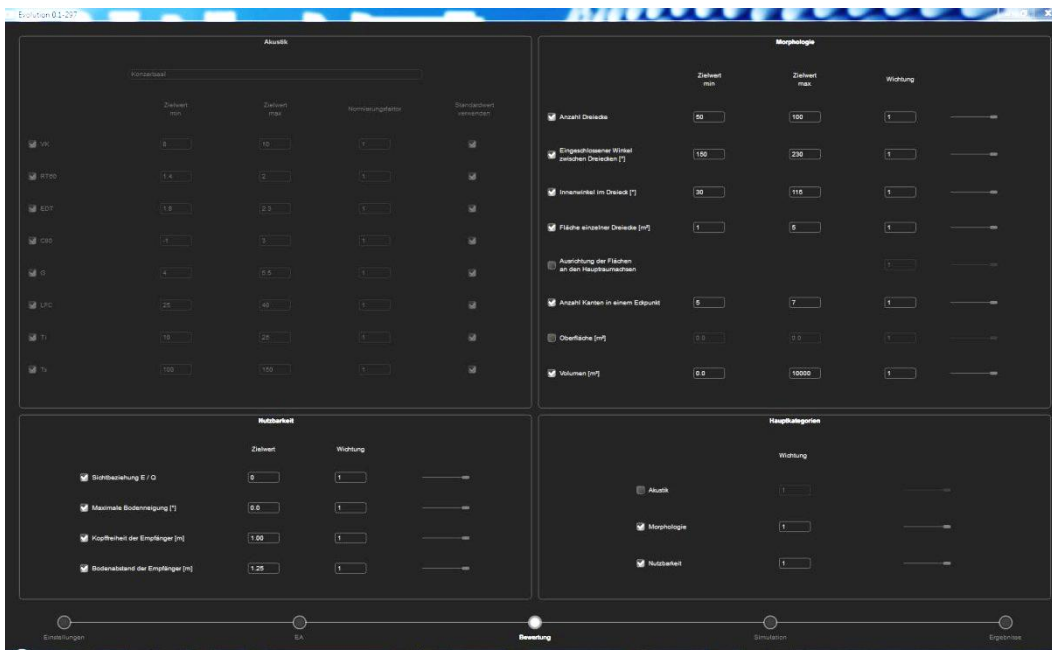


Bild 125: W03-MN-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	150	230	1
Eingeschlossener Winkel	30	45	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	1	5	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	5	7	1
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	10000	1

Tabelle 83: W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Morphologie

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Boden­neigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

Tabelle 84: W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Wichtung
Akustik	nein	0
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

Tabelle 85: W03-MN-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien



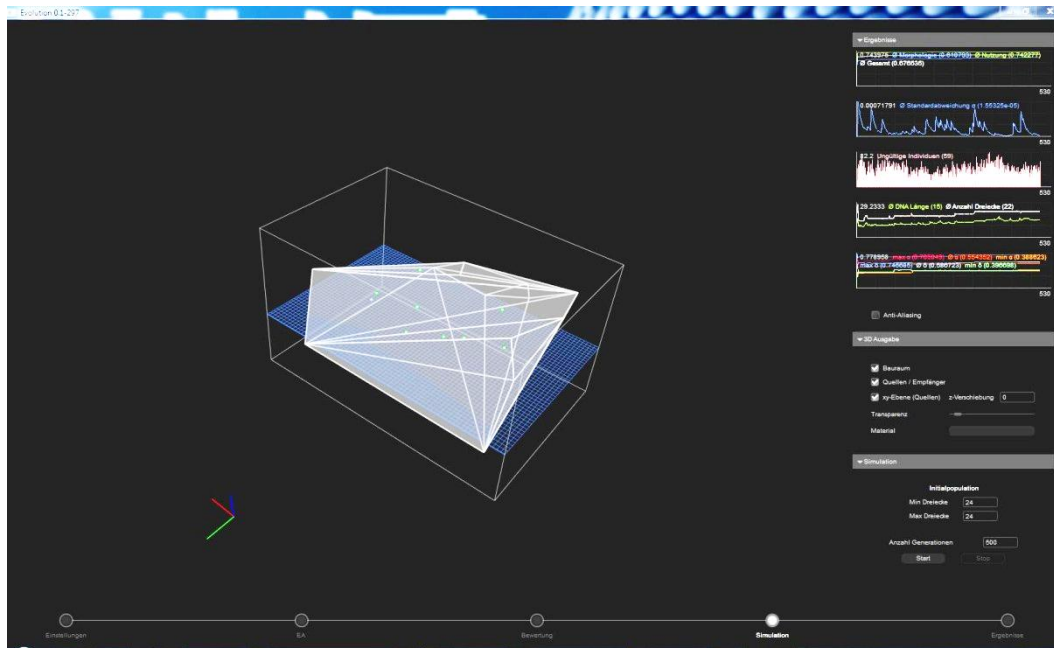


Bild 126: W03-MN-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums



Bild 127: W03-MN-24-500 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	22
DNA Länge	15
Volumen [m³]	17331
Oberfläche [m²]	5972.78
äq. Absorptionsfläche [m²]	3101.73
Ø a	0.554306
min a	0.387675
max a	0.705318
Ø d	0.586678
min d	0.395864
max d	0.746955

*Tabelle 86:* Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Gütwert	Wich- tung	Gewichteter Gütwert
Anzahl Dreiecke Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	50	100	28	0.641026	1	0.106838
Innenwinkel im Dreieck [°]	150	230	26.4272	0.751687	1	0.125281
Fläche einzelner Dreiecke [m²]	30	115	7.84013	0.915552	1	0.152592
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	1	5	266.49	0.014788	1	0.00246466
Volumen [m³]	5	7	0.615385	0.764706	1	0.127451
	0	10000	7331	0.577001	1	0.0961668

*Tabelle 87:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Boden- neigung [°]	0	15.8269	0.783557	1	0.195889
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	4.3893	0.185553	1	0.0463883

*Tabelle 88:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W03-MN-24-500

### 15.6.5. W07-MN-50-500<sup>58</sup>

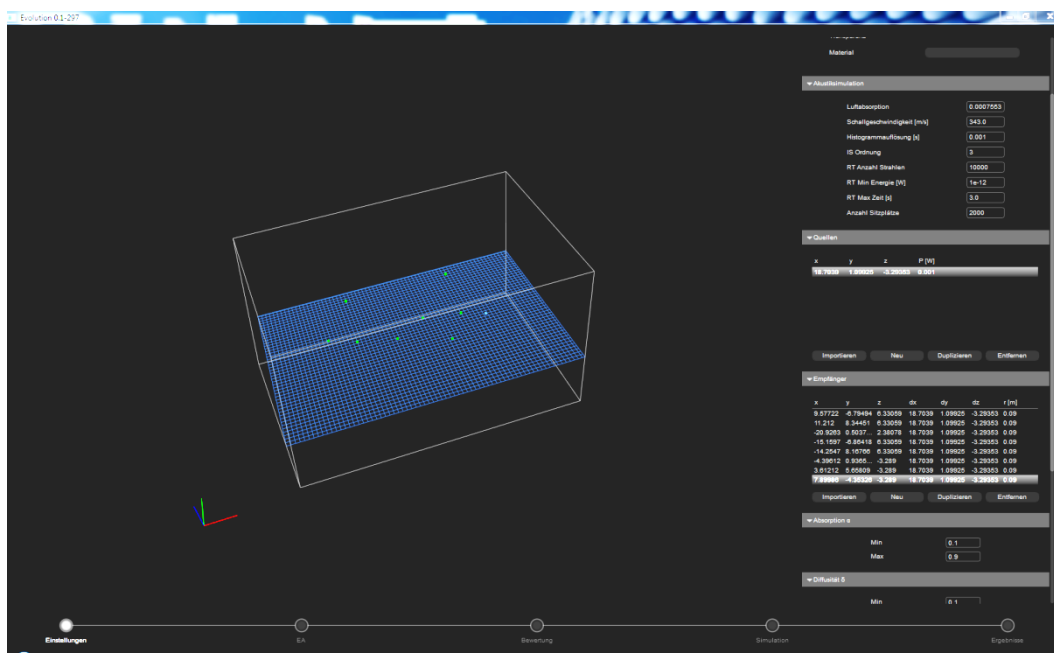


Bild 128: W07-MN-50-500 allgemeine Einstellungen

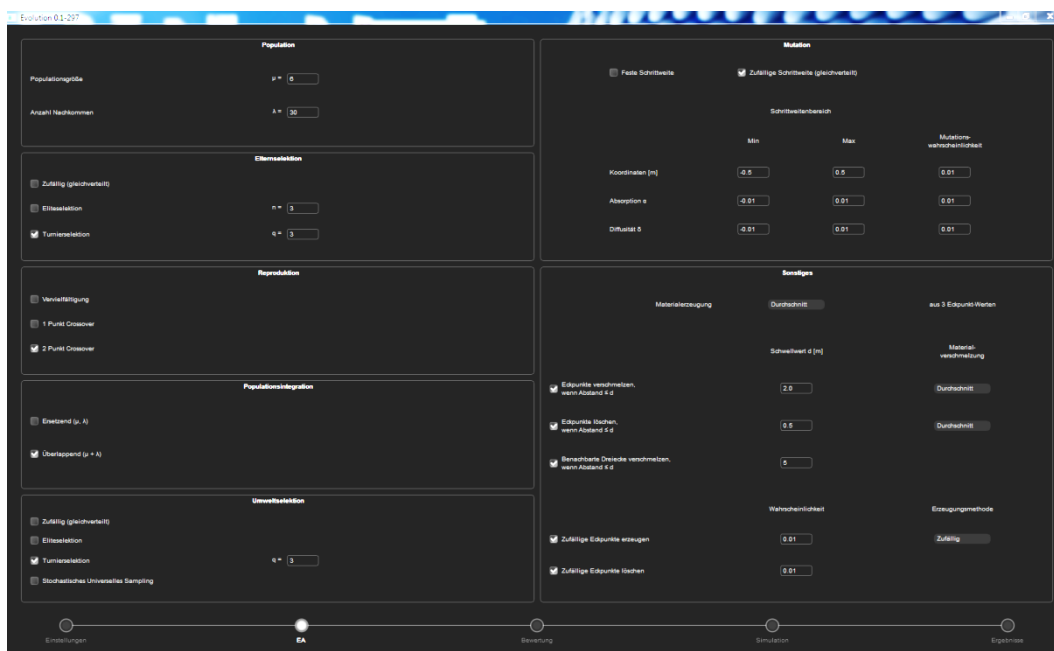


Bild 129: W07-MN-50-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

<sup>58</sup> W07 MN 50 500: W07(Empfänger – Quellenkonstellation entsprechend Musikvereinsaal Wien, MN (Evaluationskriterien Morphologie u. Nutzbarkeit) 50 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

Anhang

Populationsgröße	m=6
Anzahl der Nachkommen	l=30
Selektion Eltern	Turnierselektion q=3
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion q=3
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,01
Schrittweitenbereich Absorptionsindex a	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,01
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 89: W07-MN-50-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese

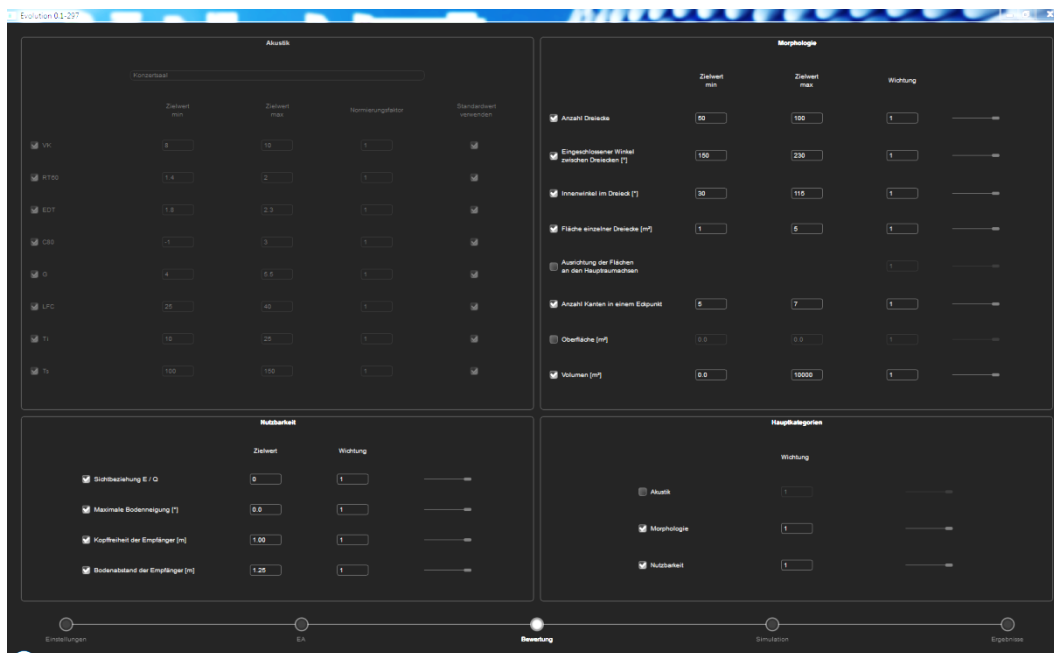


Bild 130: W07-MN-50-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	50	100	1
Eingeschlossener Winkel	150	230	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m]	1	5	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	5	7	1
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	10000	1

Tabelle 90: W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Morphologie

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Boden­neigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

Tabelle 91: W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Wichtung
Akustik	nein	0
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

Tabelle 92: W07-MN-50-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

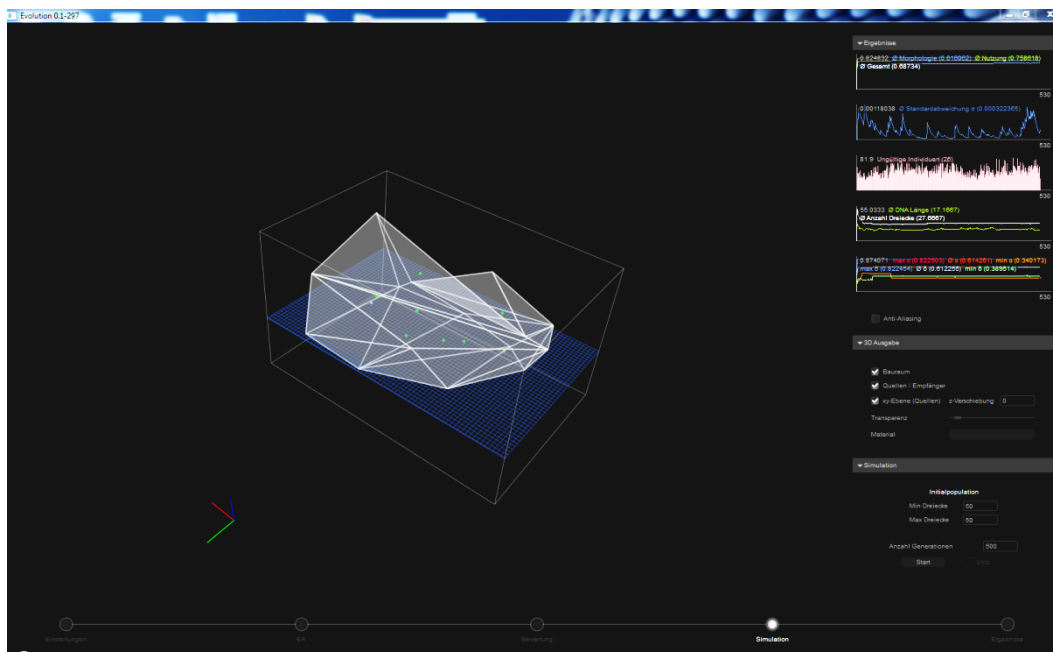


Bild 131: W07-MN-50-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums



Bild 132: W07-MN-50-500 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	28
DNA Länge	17
Volumen [m³]	26563.8
Oberfläche [m²]	6405.6
äq. Absorptionsfläche [m²]	3893.87
Ø a	0.614916
min a	0.340173
max a	0.821549
Ø d	0.610896
min d	0.389514
max d	0.82136

Tabelle 93: Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abwei- chung	Gütwert	Wich- tung	Gewichteter Gütwert
Anzahl Dreiecke	50	100	22	0.694444	1	0.115741
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	19.4043	0.804794	1	0.134132
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	4.93966	0.945078	1	0.157513
Fläche einzelner Dreiecke [m²]	1	5	223.772	0.0175615	1	0.00292691
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0.3125	0.864865	1	0.144144
Volumen [m³]	0	10000	16563.8	0.376452	1	0.062742

Tabelle 94: Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wich- tung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Boden­neigung [°]	0	7.04483	0.890507	1	0.222627
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	5.94609	0.143966	1	0.0359915

Tabelle 95: Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W07-MN-50-500

**15.6.6. W10-G-100-500<sup>59</sup>**

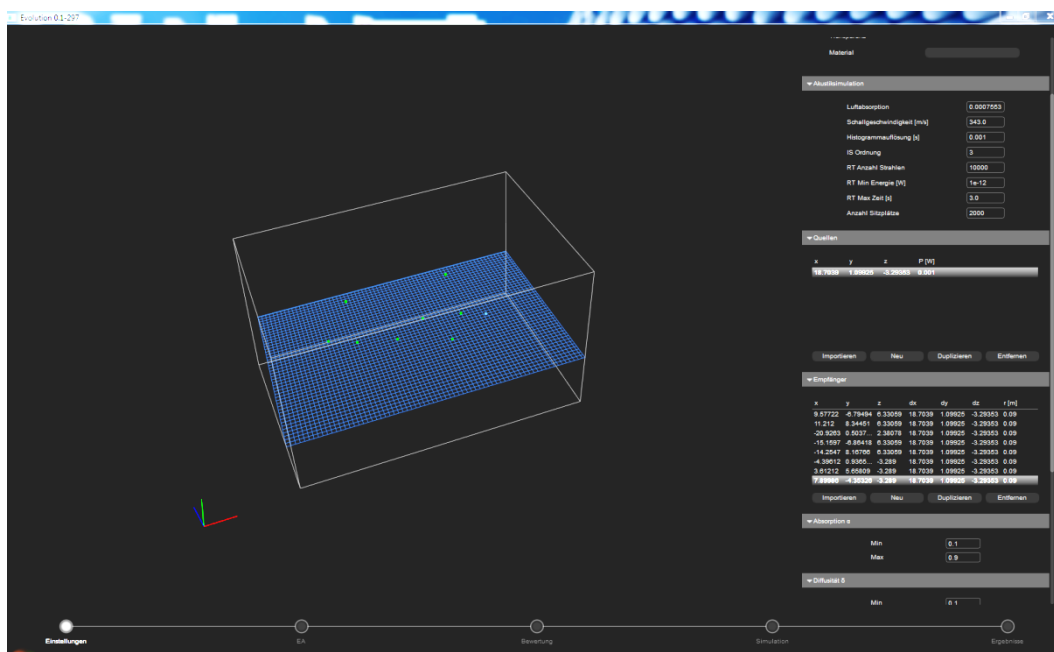


Bild 133: W10-G-100-500 allgemeine Einstellungen

<sup>59</sup> W10 G 100 500: W10(Empfänger – Quellenkonstellation wie Musikvereinsaal Wien, G (Gesamtevaluation) 100 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

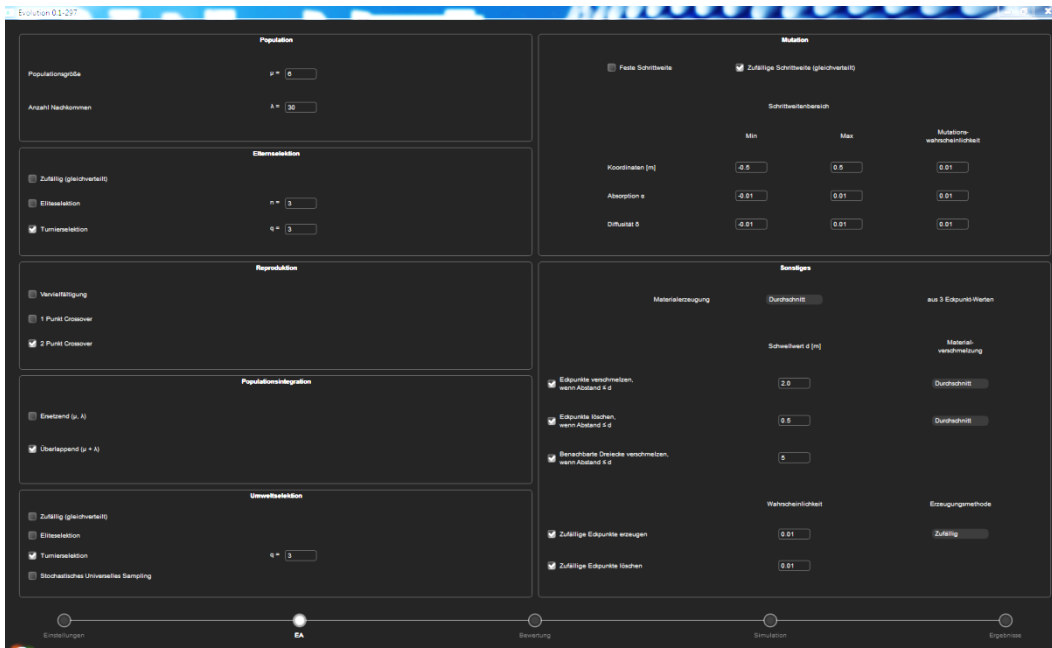


Bild 134: W10-G-100-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,01
Schrittweitenbereich Absorptionsindex a	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Materialerzeugung	Durschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,01
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 96: W10-MN-100-500 Einstellungen der Evolutionsparameter der Genese



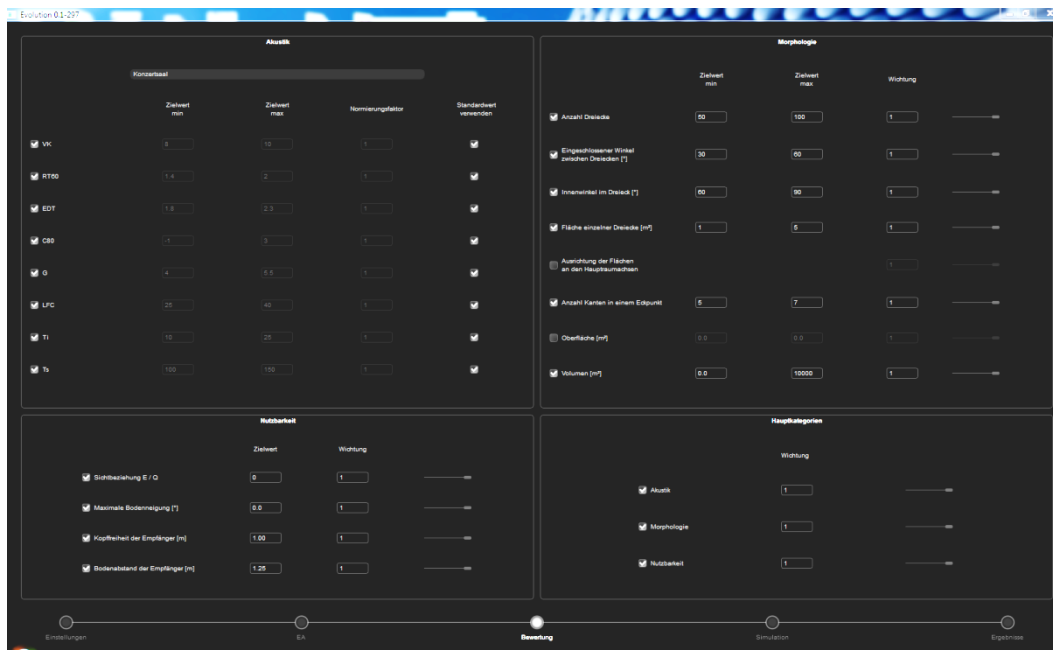


Bild 135: W10-G-100-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

Tabelle 97: W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Akustik

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	50	100	1
Eingeschlossener Winkel	150	230	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	1	5	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	5	7	1
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	10000	1

Tabelle 98: W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Morphologie

Anhang

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Bodenneigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

Tabelle 99: W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Wichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

Tabelle 100: W10-G-100-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

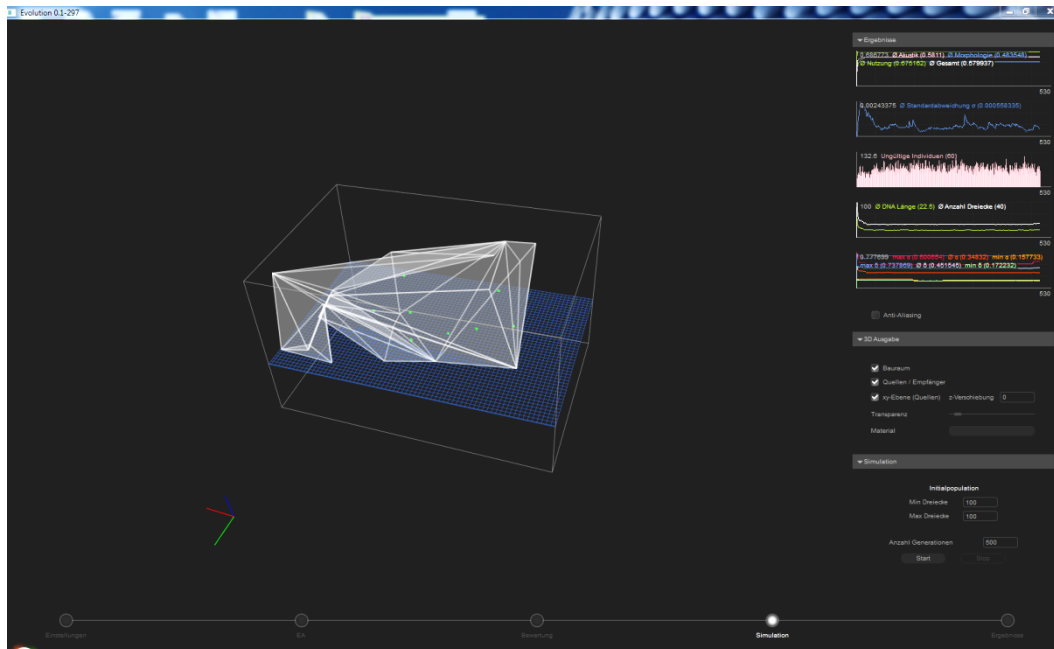


Bild 136: W10-G-100-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums



Bild 137: W10-G-100-500 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	40
DNA Länge	23
Volumen [m³]	19259
Oberfläche [m²]	6120.08
äq. Absorptionsfläche [m²]	2245.04
Ø a	0.348128
min a	0.157733
max a	0.600654
Ø d	0.451393
min d	0.170771
max d	0.737809

Tabelle 101: Übersicht Analyse des besten Individuums der Genese W10-G-100-500

**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	9.62948	1	1	0.125
RT60	1.4	2	1.39829	1	0.997156	0.124644
EDT	1.8	2.3	0.61725	1	0.297133	0.0371416
C80	-1	3	2.40675	1	1	0.125
G	4	5.5	-24.1949	1	0.0505137	0.00631421
LFC	25	40	-4.05248	1	0.340503	0.0425629
TI	10	25	72.6002	1	0.239616	0.029952
TS	100	150	79.4974	1	0.709193	0.0886492

Tabelle 102: Analyse Akustik des besten Individuums der Genese W10-G-100-500

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.504	-3.3136	-28.7409	-2.11151	55.8234	127.868
Empfänger 2	0.486	-6.81935	-27.5165	-6.24588	45.7337	151.206
Empfänger 3	0.87	12.4575	-21.1776	-3.54461	116.731	32.4272
Empfänger 4	0.846	7.82289	-22.9877	-2.37984	105.231	40.5845
Empfänger 5	0.786	10.843	-22.0842	-4.47501	102.201	28.7139
Empfänger 6	0.582	1.4278	-21.0005	-4.63824	67.3487	60.1359
Empfänger 7	0.516	-3.74954	-27.3725	-5.43872	52.4501	105.855
Empfänger 8	0.348	0.585274	-22.6796	-3.586	35.2826	89.1878

*Tabelle 103:* Detaillierte Analyse per Empfänger des besten Individuums der Genese W10-G-100-500

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abwei- chung	Gütwert	Wich- tung	Gewichteter Gütwert
Anzahl Dreiecke	50	100	10	0.833333	1	0.138889
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	30	60	92.91	0.244081	1	0.0406802
Innenwinkel im Dreieck [°]	60	90	20.8012	0.590538	1	0.0984229
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	1	5	148.002	0.0263154	1	0.00438591
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0.909091	0.6875	1	0.114583
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	10000	9258.96	0.519239	1	0.0865398

*Tabelle 104:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese W10-G-100-500

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Bodenneigung [°]	0	54.6757	0.5117	1	0.127925
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	4.29602	0.188821	1	0.0472053

*Tabelle 105:* Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese W10-G-100-500

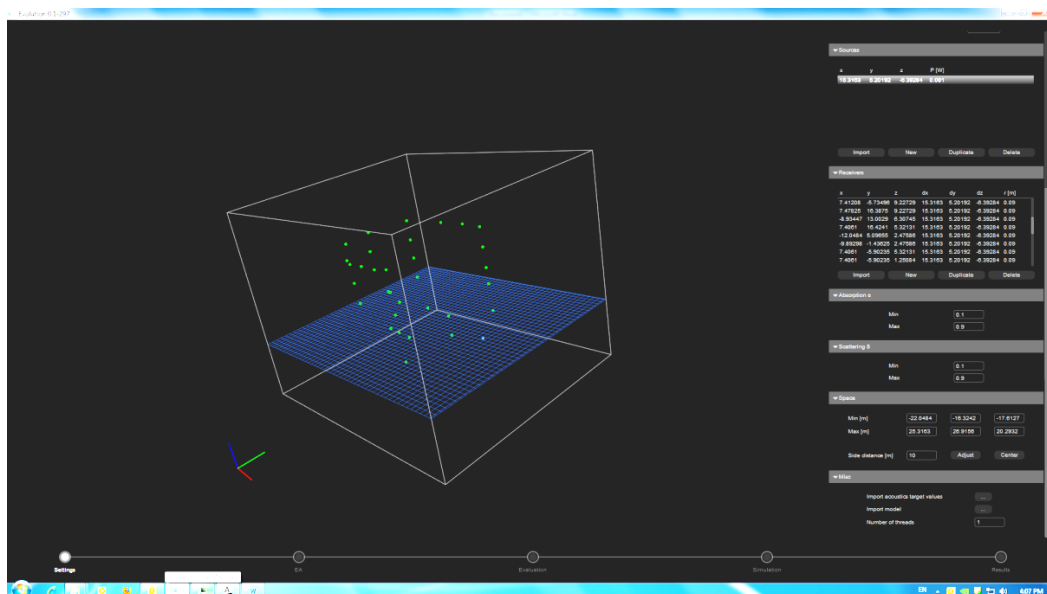
15.6.7. S01-G-20\_50-1000<sup>60</sup>

Bild 138: S01-G-20\_50-1000 allgemeine Einstellungen

<sup>60</sup> S01 G 20\_50 1000: S01(Empfänger – Quellenkonstellation wie ‚Semperoper, G (Gesamtevaluation) 20\_50 (Anzahl der Start Dreiecke zwischen 20 und 50), 1000 (Anzahl der max. Generationen)

Anhang

Quelle 1 <source power ="0.001" x="15.3163" y="5.20192" z="-6.39284" />  
Empfänger 1 <receiver x="-10.1866" y="7.72536" z="-10.4196" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 2 <receiver x="-12.5042" y="-0.190636" z="-10.4196" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 3 <receiver x="-11.1423" y="-6.56106" z="-10.4196" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 4 <receiver x="-5.40017" y="-10.6844" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 5 <receiver x="0.109407" y="-11.6114" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 6 <receiver x="-4.28691" y="11.2565" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 7 <receiver x="1.22266" y="11.6284" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 8 <receiver x="-13.3708" y="-0.190636" z="-14.4054" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 9 <receiver x="-11.1351" y="-6.72305" z="-14.4054" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 10 <receiver x="6.08961" y="-11.0221" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 11 <receiver x="6.15577" y="11.1003" z="-11.4856" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 12 <receiver x="-10.2569" y="7.71574" z="-14.4054" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 13 <receiver x="6.08363" y="11.1369" z="-15.3915" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 14 <receiver x="-13.3708" y="-0.190636" z="-18.237" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 15 <receiver x="-11.2155" y="-6.72344" z="-18.237" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 16 <receiver x="6.08363" y="-11.1895" z="-15.3915" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 17 <receiver x="6.08363" y="-11.1895" z="-19.462" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 18 <receiver x="6.08363" y="-11.1895" z="-22.7036" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 19 <receiver x="6.08363" y="11.1369" z="-19.462" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 20 <receiver x="6.08363" y="11.1369" z="-22.7036" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 21 <receiver x="6.08363" y="11.1369" z="-28.2715" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 22 <receiver x="-11.0593" y="-6.57806" z="-22.4583" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 23 <receiver x="-10.2651" y="-0.190636" z="-22.4583" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 24 <receiver x="-12.6788" y="3.63806" z="-26.7729" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 25 <receiver x="-5.15329" y="-5.0194" z="-27.1699" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 26 <receiver x="0.330133" y="-5.27032" z="-27.7358" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 27 <receiver x="6.08363" y="-11.1895" z="-28.2715" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 28 <receiver x="-5.32242" y="4.74149" z="-27.1699" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
Empfänger 29 <receiver x="0.506891" y="4.71211" z="-27.7358" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />

Empfänger 30 <receiver x="6.09433" y="-0.0852661" z="-28.3256" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
 Empfänger 31 <receiver x="-10.2581" y="7.63527" z="-18.237" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
 Empfänger 32 <receiver x="-10.4183" y="7.71416" z="-22.4583" dx="13.9939" dy="-0.0852661" dz="-27.1057" radius="0.09" />  
 Abstand Bauraum zur E/Q Boundingbox 10m

Tabelle 106: S01-G-20\_50-1000 Quellen-Empfänger Konstellation

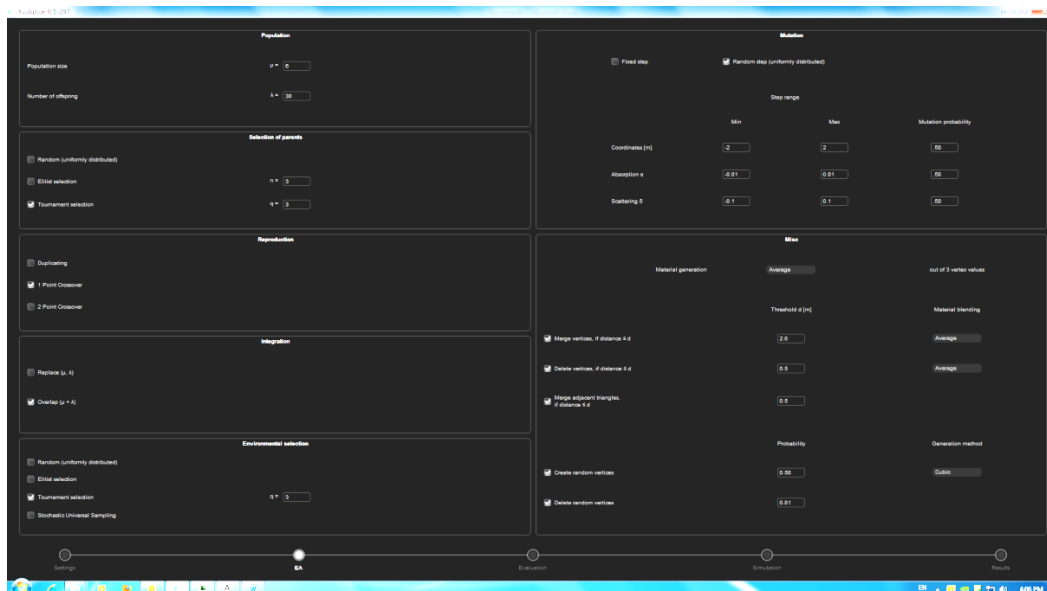


Bild 139: S01-G20\_50-1000 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	1 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-2;max=2; P=0,5
Schrittweitenbereich Absorptionsindex a	min=-0,01;max=0,01; P=0,5
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,1;max=0,1; P=0,5
Materialerzeugung	Durchschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,5
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 107: S01-G-20\_50-1000 Einstellungen der Evolutionsparameter

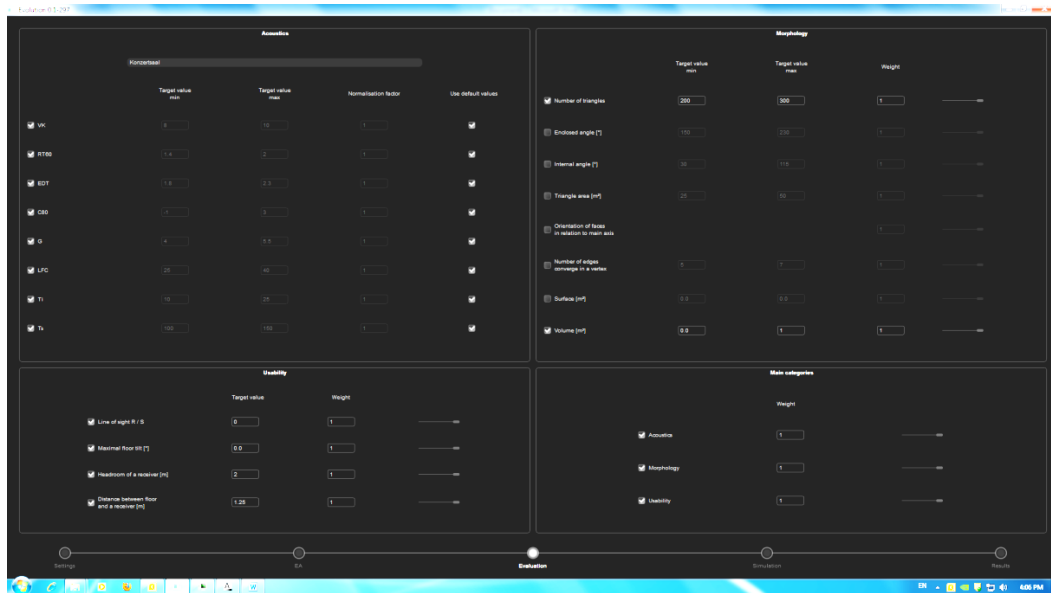


Bild 140: S01-G-20\_50-1000 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

Tabelle 108: S01-G-20\_50-1000 Evaluationseinstellungen Akustik

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	200	200	1
Eingeschlossener Winkel	Nicht aktiv		0
Innenwinkel Dreieck	Nicht aktiv		0
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	Nicht aktiv		0
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Nicht aktiv		0
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	1	1

Tabelle 109: S01-G-20\_50-1000 Evaluationseinstellungen Morphologie



	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Bodenneigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	2,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

Tabelle 110: S01-G-20\_50-1000 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Gewichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

Tabelle 111: S01-G-20\_50-1000 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

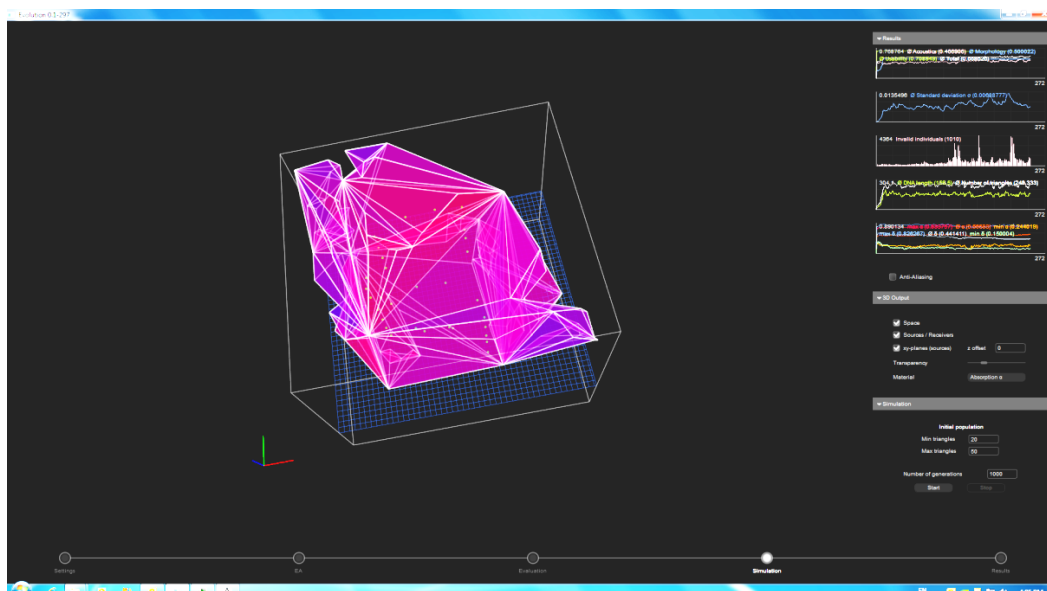


Bild 141: S01-G-20\_50-1000 Darstellung der Geometrie des besten Individuums mit farbiger Darstellung der Absorptionsgrade.

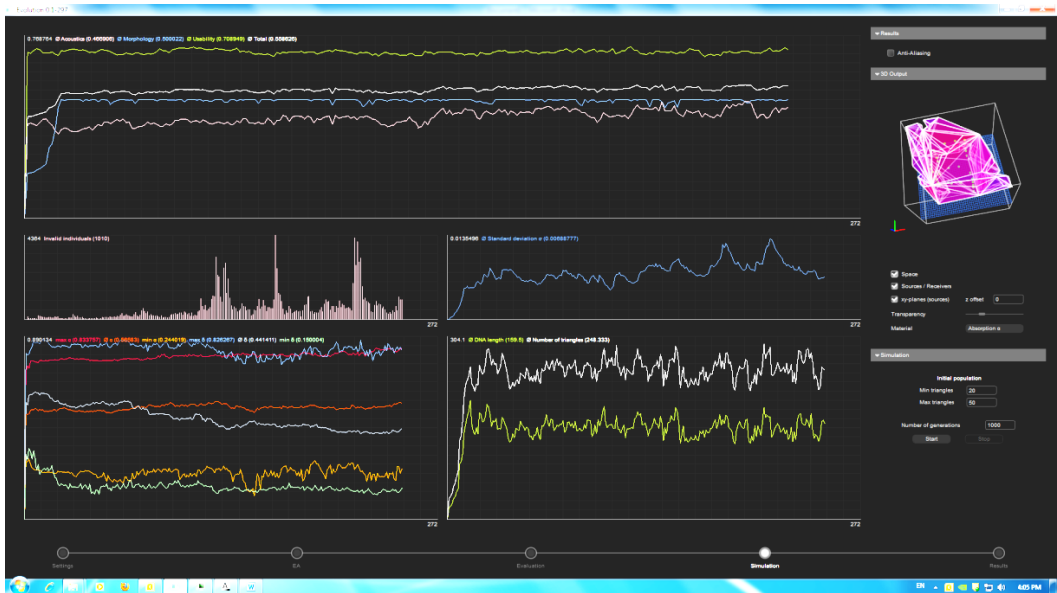


Bild 142: S01-G-20\_50-1000 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	244
DNA Länge	156
Volumen [m³]	22006.5
Oberfläche [m²]	8129.05
äq. Absorptionsfläche [m²]	4754.14
Ø a	0.571476
min a	0.256546
max a	0.83708
Ø d	0.448688
min d	0.156981
max d	0.844531

Tabelle 112: Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese S01-G-20\_50-1000

**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungs faktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	9.56806	1	1	0.125
RT60	1.4	2	0.754514	1	0.48174	0.0602174
EDT	1.8	2.3	0.675	1	0.307692	0.0384615
C80	-1	3	3.66893	1	0.856727	0.107091
G	4	5.5	-29.5349	1	0.0428144	0.0053518
LFC	25	40	-3.53108	1	0.344581	0.0430727
TI	10	25	70.8374	1	0.246559	0.0308199
TS	100	150	62.5315	1	0.571634	0.0714543

Tabelle 113: Analyse Akustik des besten Individuums der Genese S01-G-20\_50-1000

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.702	11.2902	-25.6505	-3.9219	88.628	28.2199
Empfänger 2	0.768	14.1138	-26.4558	-4.6531	91.295	28.0207
Empfänger 3	0.738	10.1008	-26.059	-3.68004	89.9636	30.3061
Empfänger 4	0.642	10.4532	-27.7179	-2.95511	81.862	33.2709
Empfänger 5	0.588	8.89978	-29.3909	-2.92738	74.7665	38.3997
Empfänger 6	0.648	5.61005	-25.919	-4.3778	77.5099	42.998
Empfänger 7	0.594	2.61007	-27.2315	-3.52225	68.0183	49.4234
Empfänger 8	0.684	18.6114	-26.6478	-4.42269	87.9547	22.7404
Empfänger 9	0.666	12.2691	-25.7024	-5.14893	84.3378	25.4421
Empfänger 10	0.576	0.699929	-31.7863	-3.95953	68.6433	74.5948
Empfänger 11	0.528	2.27929	-27.5117	-4.46941	60.4941	56.1203
Empfänger 12	0.72	12.3435	-24.8028	-4.50058	82.9881	30.6425
Empfänger 13	0.516	5.69485	-27.1429	-5.28168	52.618	53.2256
Empfänger 14	0.732	11.1038	-26.4428	-2.5667	86.3977	41.7891
Empfänger 15	0.696	12.6868	-27.6202	-3.37995	80.2797	30.1408
Empfänger 16	0.504	4.70673	-30.9531	-2.69448	59.8366	50.3161
Empfänger 17	0.396	2.44663	-30.2847	-4.27964	51.3791	59.505
Empfänger 18	0.36	1.6967	-28.6092	-4.68624	45.7407	66.9382
Empfänger 19	0.666	1.64124	-34.6075	-3.74037	49.0823	101.434
Empfänger 20	0.744	-5.59244	-32.3337	-5.05313	49.0685	128.829
Empfänger 21	1.14	-14.3213	-37.4707	-0.7077	93.5141	109.082
Empfänger 22	0.69	15.0536	-28.5486	-2.06764	78.7579	44.5018
Empfänger 23	0.834	3.11683	-31.7586	-2.09297	75.7128	76.9634
Empfänger 24	0.834	3.57572	-33.1978	-2.76869	83.8465	59.9466
Empfänger 25	0.654	-8.01222	-32.274	-2.45449	61.2426	112.877
Empfänger 26	0.48	-3.55397	-31.4623	-3.31127	46.0524	89.7175
Empfänger 27	0.3	5.95369	-25.8856	-9.09519	39.8933	35.6514
Empfänger 28	0.75	-1.47005	-32.3332	-5.96044	64.7729	81.0538
Empfänger 29	0.882	-14.2344	-35.1759	-1.43273	53.7894	139.396
Empfänger 30	0.978	-19.5792	-34.4633	-0.386155	75.7475	124.449
Empfänger 31	0.768	8.18259	-29.6545	-0.459733	81.9033	65.9188
Empfänger 32	0.822	-0.970987	-30.0235	-2.03673	80.6986	69.0921

*Tabelle 114:* Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese S01-G-20\_50-1000

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Anzahl der Dreiecke	200	300	0	1	1	0.5
Volumen [m3]	0	1	22005.5	45400	1	22700

*Tabelle 115:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese S01-G-20\_50-1000

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Bodenneigung [°]	0	16.0084	0.781617	1	0.195404
Kopffreiheit der Empfänger [m]	2	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	10.0744	0.0902987	1	0.0225747

Tabelle 116: Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese S01-G-20\_50-1000

**15.6.8. B01-A-24-500<sup>61</sup>**

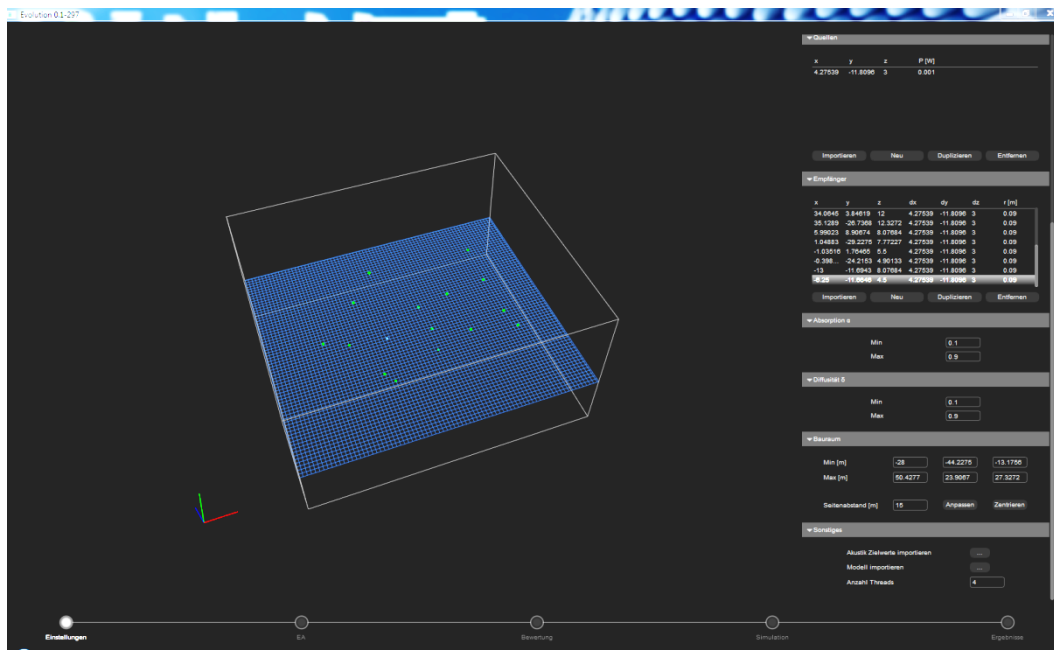


Bild 143: B01-A.24-500 allgemeine Einstellungen

<sup>61</sup> B01 A 24 500: B01(Empfänger – Quellenkonstellation wie Philharmonie Berlin, A (Evaluationskriterium Akustik) 24 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

Quelle 1	<source x="4.27539" y="-11.8096" z="3" power="0.001"/>
Quelle 2	<source x="-4.60742" y="-6.40869" z="4" power="0.001"/>
Quelle 3	<source x="-3.74609" y="-17.6387" z="4.1" power="0.001"/>
Empfänger 1	<receiver x="16.2422" y="-3.71143" z="2.5" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 2	<receiver x="17.2559" y="-11.8784" z="1.82442" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 3	<receiver x="16.2109" y="-19.3872" z="1.82442" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 4	<receiver x="24.8477" y="-3.71973" z="4.90133" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 5	<receiver x="26.0586" y="-18.1777" z="4.90133" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 6	<receiver x="34.9004" y="-5.646" z="8.76711" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 7	<receiver x="35.4277" y="-18.0835" z="8.76711" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 8	<receiver x="34.0645" y="3.84619" z="12.0" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 9	<receiver x="35.1289" y="-26.7368" z="12.3272" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 10	<receiver x="5.99023" y="8.90674" z="8.07684" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 11	<receiver x="1.04883" y="-29.2275" z="7.77227" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 12	<receiver x="-1.03516" y="1.76465" z="5.5" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 13	<receiver x="-0.398438" y="-24.2153" z="4.90133" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 14	<receiver x="-13" y="-11.6943" z="8.07684" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Empfänger 15	<receiver x="-6.25" y="-11.6646" z="4.5" dx="4.27539" dy="-11.8096" dz="3" radius="0.09"/>
Abstand Bauraum zur E/Q Boundingbox	15m

**Tabelle 117:** B01-A-24-500 Quellen-Empfänger Konstellation

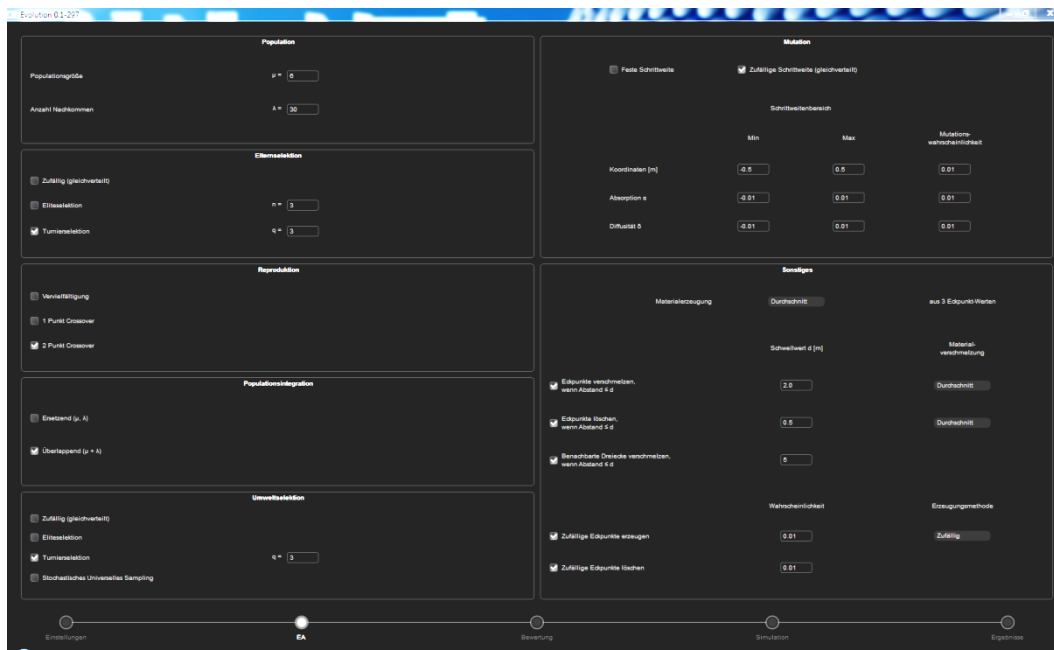


Bild 144: B01-A-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	$\text{min}=-0,5;\text{max}=0,5; P=0,01$
Schrittweitenbereich Absorptionsindex a	$\text{min}=-0,01;\text{max}=0,01; P=0,01$
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	$\text{min}=-0,01;\text{max}=0,01; P=0,01$
Materialerzeugung	Durchschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	$P=0,01$
Zufällige Eckpunkte löschen	$P=0,01$

Tabelle 118: B01-A-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter

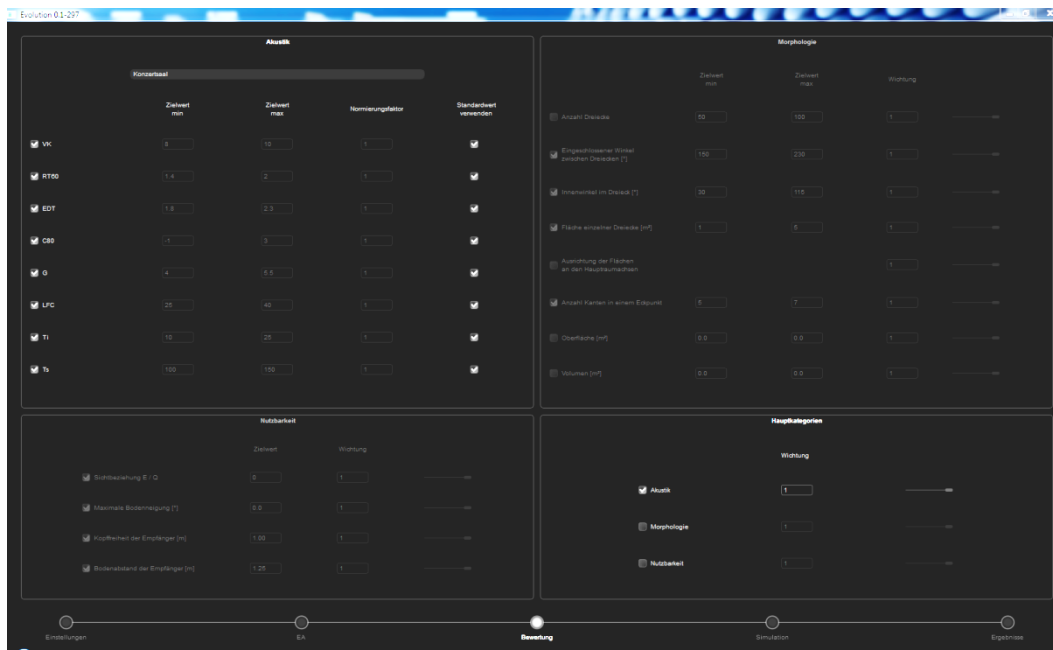


Bild 145: B01-A-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

Tabelle 119: B01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik

	aktiv	Wichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	nein	0
Nutzbarkeit	nein	0

Tabelle 120: B01-A-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

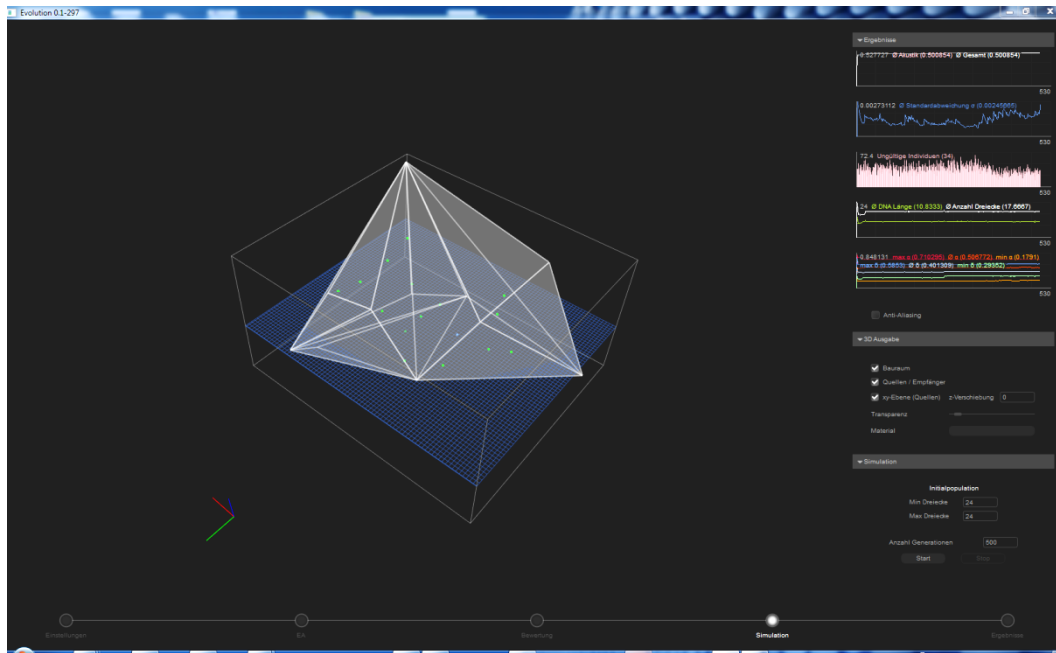


Bild 146: B01-A-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums



Bild 147: B01-A-24-500 Darstellung der Statistik der Genese



Übersicht	
Anzahl Dreiecke	18
DNA Länge	11
Volumen [m <sup>3</sup> ]	54956.7
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	9982.84
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	4915.24
Ø a	0.5054
min a	0.1791
max a	0.706569
Ø d	0.402943
min d	0.29352
max d	0.5853

*Tabelle 121:* Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese B01-A-24-500

### Akustik

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	27.4784	1	0.102678	0.0128347
RT60	1.4	2	1.82249	1	1	0.125
EDT	1.8	2.3	0.6988	1	0.312266	0.0390332
C80	-1	3	-0.992493	1	1	0.125
G	4	5.5	-22.1563	1	0.0542372	0.00677965
LFC	25	40	-4.17876	1	0.33953	0.0424412
TI	10	25	61.7347	1	0.289941	0.0362426
TS	100	150	95.7259	1	0.921249	0.115156

*Tabelle 122:* Analyse Akustik des besten Individuums der Genese B01-A-24-500

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.792	-5.90297	-23.5686	-4.67607	42.1517	139.372
Empfänger 2	0.78	-8.29689	-23.6779	-10.9893	37.9995	146.023
Empfänger 3	0.732	-3.98117	-22.4678	-2.20246	41.3602	116.939
Empfänger 4	0.942	-4.28123	-23.2926	-3.67385	64.6863	126.458
Empfänger 5	0.852	-2.95133	-21.9346	-3.34091	66.3978	99.2607
Empfänger 6	1.026	-0.468752	-22.24	-3.17737	92.6151	99.8655
Empfänger 7	1.05	-2.76936	-21.5106	-3.08749	94.16	88.4936
Empfänger 8	0.894	0.656778	-22.0273	-2.27478	101.561	87.8506
Empfänger 9	0.924	1.33478	-20.3787	-3.75567	103.56	63.4426
Empfänger 10	0.636	-3.2016	-25.3131	-5.74891	62.3853	125.193
Empfänger 11	0.414	7.04241	-20.491	-4.77957	53.4863	42.5639
Empfänger 12	0.462	-1.11097	-22.7694	-2.04324	43.1164	104.971
Empfänger 13	0.318	2.97202	-21.0806	-4.62012	39.0454	64.8296
Empfänger 14	0.414	4.5768	-20.5458	-3.3037	52.4965	57.5282
Empfänger 15	0.246	1.49408	-21.0462	-5.00798	30.9992	73.0984

*Tabelle 123:* Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese B01-A-24-500

**15.6.9. BA-G-24-500 <sup>62</sup>**

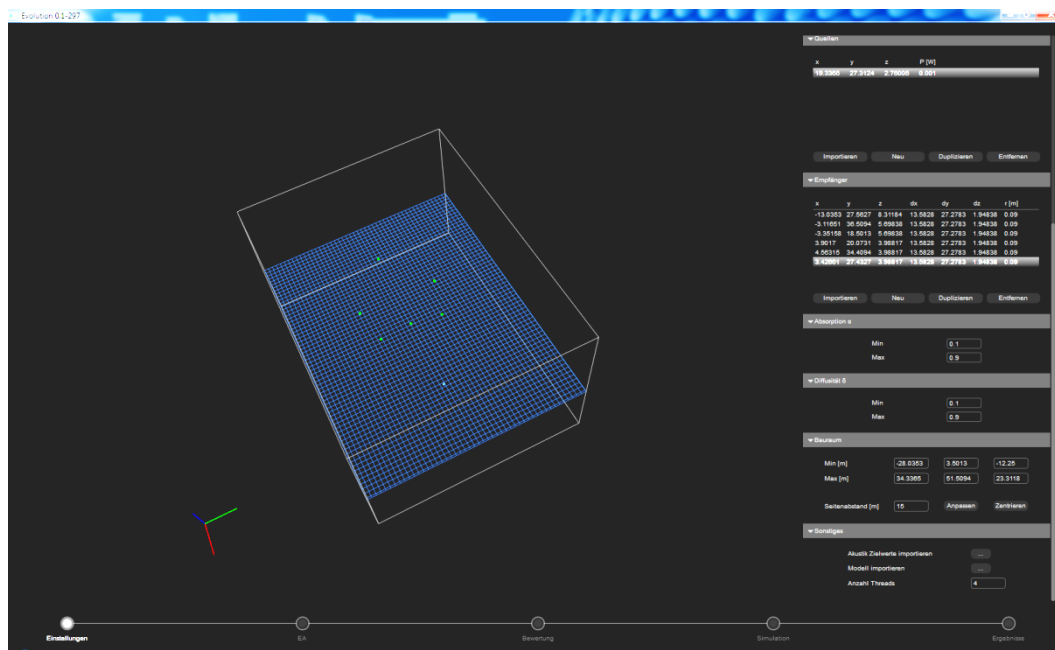


Bild 148: BA01-G-24-500 allgemeine Einstellungen

<sup>62</sup> B01 A 24 500: B01(Empfänger – Quellenkonstellation wie Festspielhaus Bayreuth, G (Gesamtevaluation) 24 (Anzahl der Start Dreiecke), 500 (Anzahl der max. Generationen)

Quelle 1 <source power = "0.001" x="19.3365" y="27.3124" z="2.75005" />  
 Empfänger 1 <receiver x="-13.0353" y="27.5627" z="8.31184" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />  
 Empfänger 2 <receiver x="-3.11651" y="36.5094" z="5.69838" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />  
 Empfänger 3 <receiver x="-3.35158" y="18.5013" z="5.69838" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />  
 Empfänger 4 <receiver x="3.9017" y="20.0731" z="3.98817" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />  
 Empfänger 5 <receiver x="4.56315" y="34.4094" z="3.98817" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />  
 Empfänger 6 <receiver x="3.42661" y="27.4327" z="3.98817" dx="13.5828" dy="27.2783" dz="1.94838" radius="0.09" />

Abstand Bauraum zur E/Q Boundingbox 15m

Tabelle 124: BA01-G-24-500 Quellen-Empfänger Konstellation

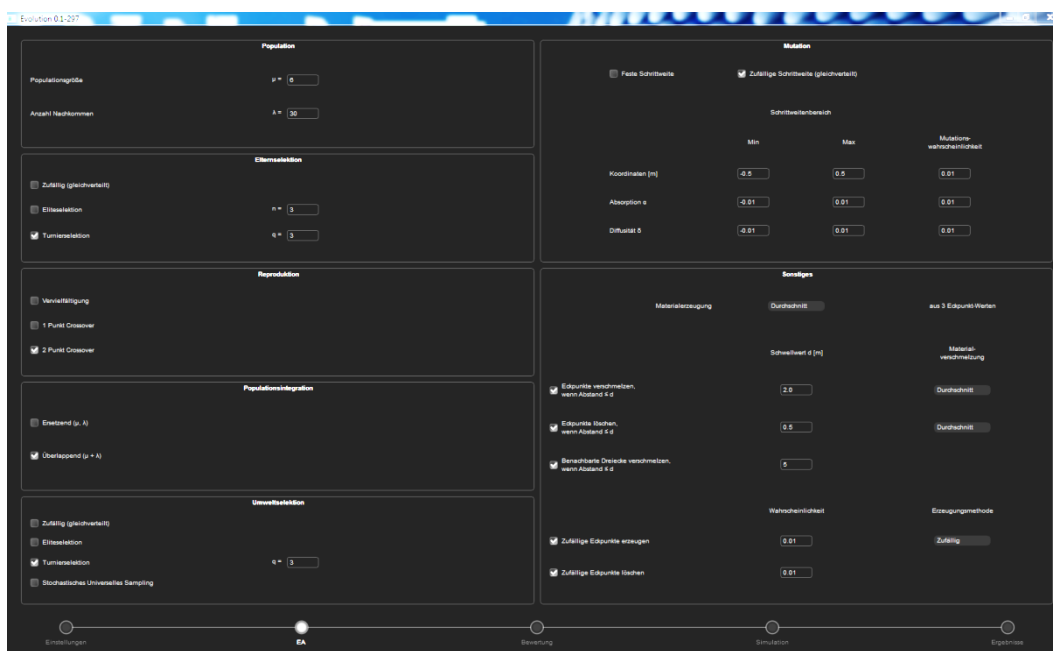


Bild 149: BA01-G-24-500 Einstellungen des evolutionären Algorithmus

Anhang

Populationsgröße	$\mu=6$
Anzahl der Nachkommen	$\lambda=30$
Selektion Eltern	Turnierselektion $q=3$
Reproduktion	2 Punkt Crossover
Populationsintegration	Überlappend ( $\mu+\lambda$ )
Umweltselektion	Turnierselektion $q=3$
Mutationsschrittweite	zufällig gleichverteilt
Schrittweitenbereich Koordinaten[m]	min=-0,5;max=0,5; P=0,01
Schrittweitenbereich Absorptionsindex a	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Schrittweitenbereich Diffusionsindex d	min=-0,01;max=0,01; P=0,01
Materialerzeugung	Durchschnitt aus 3 Eckpunkten
Eckpunkte verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	2,0
Eckpunkte löschen wenn Abstand kleiner [m]	0,5
Benachbarte Dreiecke verschmelzen wenn Abstand kleiner [m]	5
Zufällige Eckpunkte erzeugen	P=0,01
Zufällige Eckpunkte löschen	P=0,01

Tabelle 125: BA01-G-24-500 Einstellungen der Evolutionsparameter

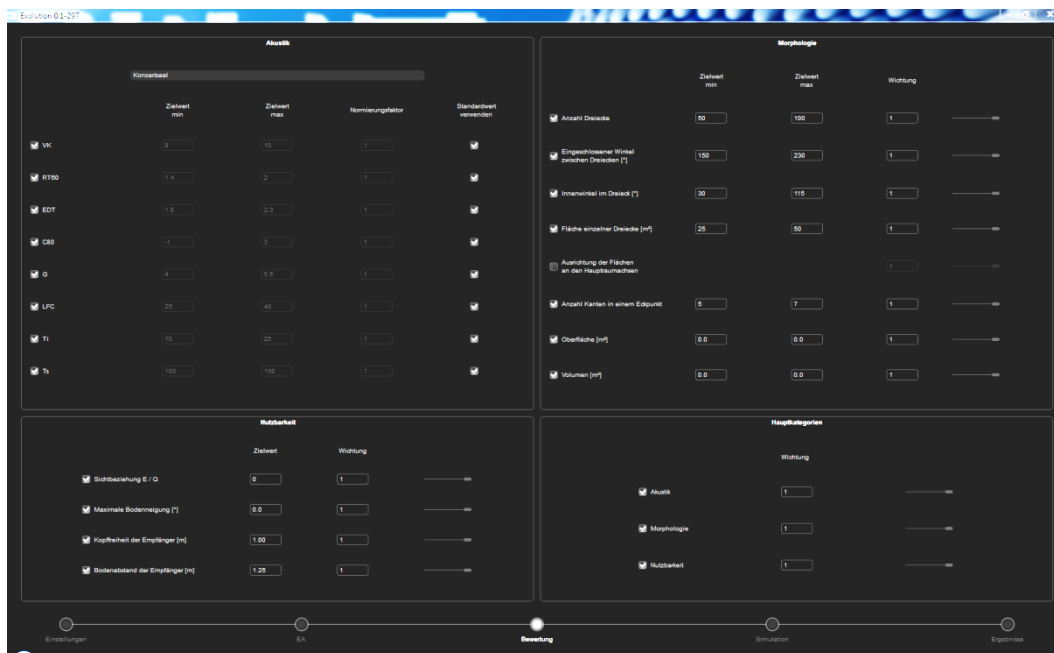


Bild 150: BA01-G-24-500 Einstellungen des Evaluationsalgorithmus

	min	max	Gewichtung
vk	8	10	1
rt60	1,4	2,3	1
edt	1,8	2,3	1
c80	-1,0	3,0	1
g	4,0	5,5	1
lfc	25,0	40	1
ti	10,0	25,0	1
ts	100	150	1

*Tabelle 126:* BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Akustik

	min	max	Gewichtung
Anzahl der Dreiecke	50	100	1
Eingeschlossener Winkel	150	230	1
Innenwinkel Dreieck	30	115	1
Fläche einzelner Dreiecke [m]	25	50	1
Ausrichtung der Flächen an den Hauptachsen	Nicht aktiv		0
Anzahl der Kanten an einem Eckpunkt	5	7	1
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	0	0	1
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	0	1

*Tabelle 127:* BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Morphologie

	Zielwert	Gewichtung
Sichtbeziehung E/Q	0	1
Maximale Bodenneigung [°]	0	1
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1,0	1
Bodenabstand der Empfänger [m]	1,25	1

*Tabelle 128:* BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Nutzbarkeit

	aktiv	Gewichtung
Akustik	ja	1
Morphologie	ja	1
Nutzbarkeit	ja	1

*Tabelle 129:* BA01-G-24-500 Evaluationseinstellungen Hauptkategorien

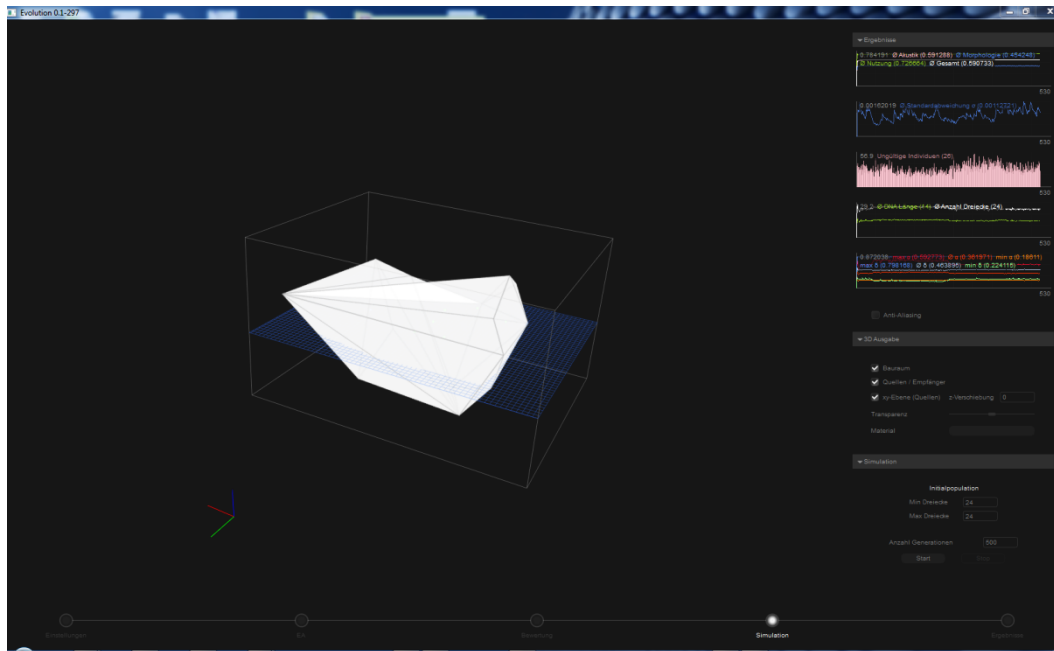


Bild 151: BA01-G-24-500 Darstellung der Geometrie des besten Individuums

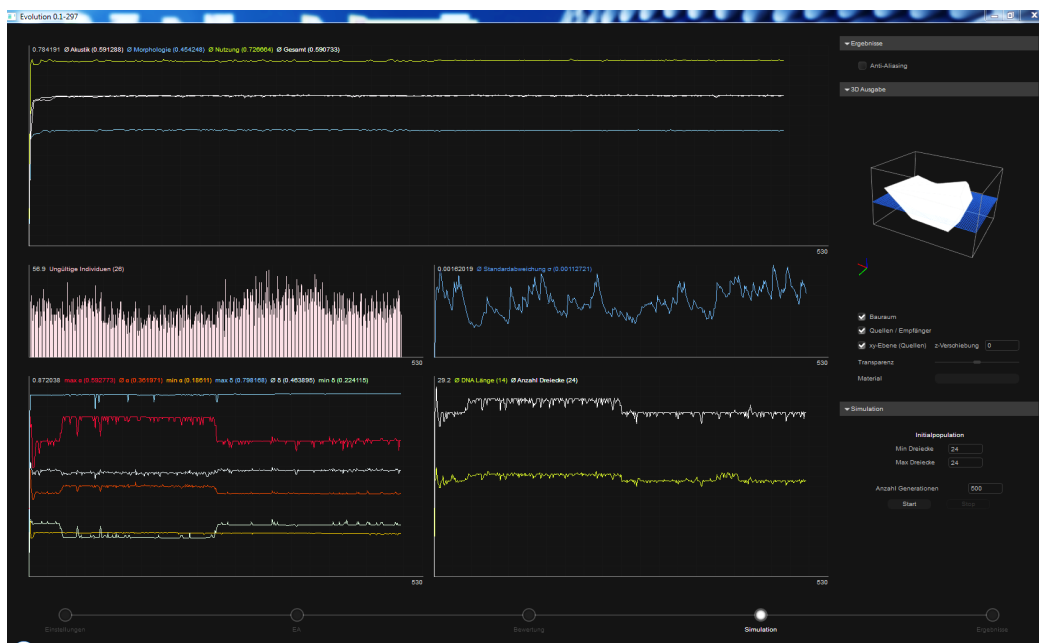


Bild 152: BA01-G-24-500 Darstellung der Statistik der Genese

**Übersicht**

Anzahl Dreiecke	24
DNA Länge	14
Volumen [m <sup>3</sup> ]	17957.9
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	5512.88
äq. Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]	1828.34
Ø a	0.362002
min a	0.186257
max a	0.592773
Ø d	0.463832
min d	0.224115
max d	0.798168

*Tabelle 130:* Übersicht der Analyse des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500

**Akustik**

	Zielwert min	Zielwert max	Ergebnis	Normierungsfaktor	Gütwert	Gewichteter Gütwert
VK	8	10	8.97895	1	1	0.125
RT60	1.4	2	1.60098	1	1	0.125
EDT	1.8	2.3	0.731	1	0.318674	0.0398343
C80	-1	3	-0.964485	1	1	0.125
G	4	5.5	-23.0733	1	0.0524965	0.00656206
LFC	25	40	-4.24209	1	0.339044	0.0423805
TI	10	25	65.0368	1	0.272545	0.0340681
TS	100	150	83.3542	1	0.750235	0.0937794

*Tabelle 131:* Analyse Akustik des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500

**Akustik Details**

	EDT [s]	C80 [dB]	G [dB]	LFC	TI [ms]	TS [ms]
Empfänger 1	0.882	8.09799	-22.5246	-2.74263	95.764	50.2506
Empfänger 2	0.69	5.38387	-22.1035	-3.07864	71.2597	48.328
Empfänger 3	0.948	-8.05002	-22.3705	-6.68047	72.5396	114.231
Empfänger 4	0.708	-8.37382	-25.3269	-4.13155	51.9104	130.786
Empfänger 5	0.432	3.86677	-21.0066	-4.98007	47.9193	57.4928
Empfänger 6	0.726	-6.7117	-25.1078	-3.83917	50.8279	99.0374

*Tabelle 132:* Detaillierte Analyse Akustik per Empfänger des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500

**Morphologie**

	Zielwert min	Zielwert max	Ø Abweichu ng	Gütwert	Wic htu ng	Gewichteter Gütwert
Anzahl Dreiecke	50	100	26	0.657895	1	0.093985
Eingeschlossener Winkel zwischen Dreiecken [°]	150	230	32.7685	0.709418	1	0.101345
Innenwinkel im Dreieck [°]	30	115	6.0744	0.933303	1	0.133329
Fläche einzelner Dreiecke [m <sup>2</sup> ]	25	50	179.703	0.122128	1	0.0174469
Anzahl Kanten in einem Eckpunkt	5	7	0.642857	0.756757	1	0.108108
Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	0	0	5512.88	0.0001813	6	0.000259
Volumen [m <sup>3</sup> ]	0	0	17957.9	0.0000557	1	0.0000795

*Tabelle 133:* Analyse Morphologie des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500

**Nutzbarkeit**

	Zielwert	Ø Abweichung	Gütwert	Wichtung	Gewichteter Gütwert
Sichtbeziehung E / Q	0	0	1	1	0.25
Maximale Bodenneigung [°]	0	18.7603	0.753336	1	0.188334
Kopffreiheit der Empfänger [m]	1	0	1	1	0.25
Bodenabstand der Empfänger [m]	1.25	5.5224	0.153318	1	0.0383294

*Tabelle 134:* Analyse Nutzbarkeit des besten Individuums der Genese BA01-G-24-500





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

2014  
Universität Stuttgart  
Institut für computerbasiertes Entwerfen (ICD)