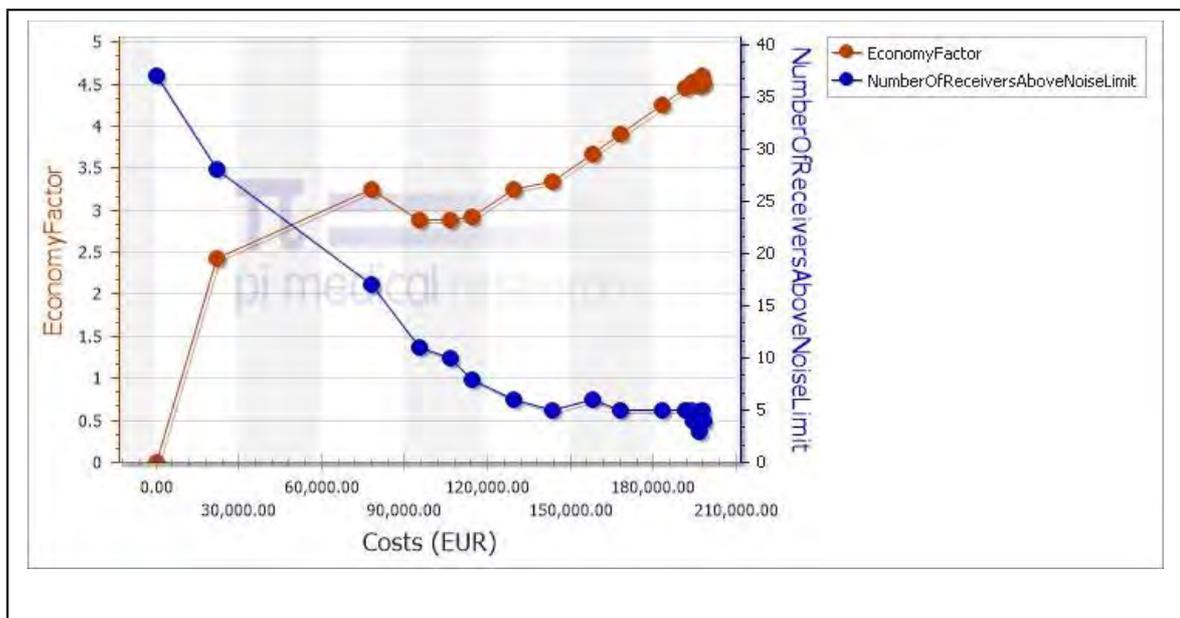


Inverse Optimierung von Lärmschutzwanddimensionen OPTIWAND

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2011
(VIF2011)

August 2013



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Renngasse 5
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Ziviltechnikerbüro DI Dr. Christian Kirisits,
Ingenieurkonsulent für Technische Physik
Kolpinggasse 10
A – 7423 Pinkafeld



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Inverse Optimierung von Lärmschutzwanddimensionen OPTIWAND

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2011)

AutorInnen:

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Christian Kirisits¹, Géza Horváth¹

Dr.-Ing. Ilias Sachpazidis²

Dipl.-Ing. Thomas Drewes³

für das Projektkonsortium von OPTIWAND

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

1 ZT Büro Dr. Kirisits, 7423 Pinkafeld, Österreich

2 Pi-Medical, 106 76 Athen, Griechenland

3 Wölfel Meßsysteme Software GmbH + Co.KG, 97201 Höchberg, Deutschland

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung.....	5
1.1 Ziele laut Ausschreibung.....	5
1.2 Stand der Technik.....	6
1.3 Inverse Optimierung.....	8
1.4 Begriffsdefinitionen.....	9
2 Theorie.....	13
2.1 Multikriterielle Optimierung.....	13
2.1.1 Pareto Optimaler Punkt, Pareto Front.....	14
2.2 L-BFGS-B Algorithmus.....	15
2.3 Simulated Annealing (SA) Algorithmus.....	16
2.4 Kostenfunktion.....	17
2.5 Gradient der Kostenfunktion.....	18
2.6 Startwertberechnung x_0^{init}	19
3 Schallausbreitung und Schnittstelle.....	20
3.1 Schallausbreitungsrechnung.....	20
3.1.1 Von der Abschirmkante abhängige Parameter.....	21
3.1.2 Schallausbreitungsweg.....	21
3.1.3 Abschnittsweise Berechnung.....	22
3.2 Vorausberechnung.....	23
3.2.1 Kontrolle.....	26
3.3 .IOW.....	27
3.4 .OWR.....	29
4 Applikationsdokumentation.....	30
4.1 IMMI Optiwand Vorausberechnungsmodul.....	30
4.2 Matlab Prototyp.....	36
4.3 OPTIWAND Applikation.....	42
5 Resultate.....	43
5.1 Beispiel A.....	44
5.1.1 Startwertvergleich und x_0^{init}	50
5.1.2 Vergleich mit manueller Planung.....	51
5.2 Beispiel B.....	52
5.2.1 Startwertvergleich.....	63
5.3 Beispiel C.....	65
5.3.1 Maximalhöhenvergleich.....	70
5.4 Beispiel D.....	72
5.5 Beispiel E.....	76
5.6 Simulated Annealing.....	79
5.7 Runden auf verfügbare Wandsegmenthöhen.....	82
6 Zusammenfassung.....	83
7 Literaturverzeichnis.....	86

1 EINFÜHRUNG

1.1 Ziele laut Ausschreibung

Das Projekt OPTIWAND basiert auf dem Ausschreibungstext des Themas 3.3.2.1 aus dem Ausschreibungsleitfaden VIF 2011 in Verbindung mit der offiziellen Anfragebeantwortung der FFG vom 15. Dezember 2011. Die Ausschreibung gibt dabei vor:

„Ziel dieser Fragestellung ist die Entwicklung eines EDV-Programmes welches in die lärmtechnischen Berechnungsprogramme implementiert wird und die wirtschaftlichste und optimalste Größe (Abmessung) einer Lärmschutzwand nach den geltenden österreichischen Richtlinien sowie im speziellen für die ASFINAG geltenden Vorgaben (Dienstanweisung Lärmschutz des BMVIT) ermittelt. Derzeit erfolgt dies durch iterative mehrmalige Berechnung mit optimierten Wandabmessungen. Erwartet werden Einsparung beim Bau von Lärmschutzmaßnahmen (Einhausungen, Wänden etc.) und eine Reduktion der Planungskosten.

Daher ist es unbedingt erforderlich, dass in diesem Forschungsvorhaben neben lärmtechnisch Sachkundigen und erfahrenen Personen auch Anbieter und Programmierer der gängigen Berechnungsprogramme für Schallausbreitungsmodelle eingesetzt werden.

Das Forschungsergebnis muss von allen Anbietern von Berechnungsprogrammen für Schallausbreitungsmodelle leicht nutzbar und ins jeweilige Programm implementierbar sein.“

Nach der offiziellen Anfragebeantwortung durch die FFG wurden zusätzliche Punkte konkretisiert:

„Das Ergebnis des Forschungsprojekt ist kein vollständiges EDV-Programm, sondern eine detaillierte Anleitung aller Methoden und Algorithmen welche von allen Programmanbietern leicht implementierbar sind. Zur Demonstration der Funktionsweise soll ein Programmprototyp ohne vollständige Quellcodeveröffentlichung vorgestellt werden.“

Zu entwickeln war daher eine detaillierte Anleitung von Methoden und Algorithmen, um die wirtschaftlichste und optimale Größe einer Lärmschutzwand nach geltenden österreichischen Richtlinien zu ermitteln. Dabei wurden insbesondere die für die ASFINAG geltenden Vorgaben gemäß der Dienstanweisung Lärmschutz des BMVIT berücksichtigt. Das Ergebnis des Forschungsprojektes ist eine detaillierte Anleitung aller

Methoden und Algorithmen, welche von allen am Markt vertretenen Programmanbietern leicht implementierbar ist.

Im vorliegenden Projekt wurde ein Verfahren auf Basis der inversen Optimierung entwickelt, für die Fragestellung im Detail adaptiert sowie deren prinzipielle Funktionsweise mithilfe der Prototypsoftware OPTIWAND und konkreten Beispielen demonstriert.

Die gegenständliche Ausschreibung hebt die Problematik für den Straßenverkehr hervor (Hinweis auf die diesbezügliche Dienstanweisung des BMVIT). In diesem Projekt wird aber auch die Problematik für Schienenverkehrslärm berücksichtigt, da der gewählte Ansatz für Erweiterungen leicht adaptierbar ist.

1.2 Stand der Technik

Zur Planung von abschirmenden Lärmschutzeinrichtungen (Wänden, Erdwällen, Gebäudeteilen u.a.) an Autobahnen, Straßen, Schienenwegen und Gewerbe- und Industrieanlagen werden heute durchwegs Softwareprodukte verwendet, mit denen die zu erwartenden Lärmimmissionsverhältnisse rechnerisch simuliert werden. Dazu wird zunächst aus Vermessungsdaten ein digitales Geländemodell erstellt, in das die Projektdaten und emissionsrelevanten Betriebsdaten (Verkehr, Geschwindigkeiten, Schalleistung etc.) einfließen. Die Ermittlung der Immissionen erfolgt nach entsprechenden länderspezifischen standardisierten Rechenvorschriften für die Emissionen und die Schallausbreitung. Die Immissionspunkte werden in der Regel an den Gebäudefassaden im Untersuchungsgebiet positioniert. Zunächst erfolgt die Berechnung für eine Variante ohne Lärmschutzmaßnahmen. Durch Vergleich mit definierten Immissionsgrenzwerten für Lärmindizes (z.B. L_{den} oder L_{night}) und weiteren rechtlichen Voraussetzungen ergeben sich die schutzwürdigen Wohngebäude. Für diese ist vom Sachbearbeiter eine Lärmschutzwand zu planen. In der Regel erfolgt dies empirisch und iterativ mit dem Ziel, möglichst bei allen schutzwürdigen Gebäuden die geforderten Schutzziele (Einhaltung der Immissionsgrenzwerte) zu erreichen. Die Qualität der gewonnenen Ergebnisse im Hinblick auf den schalltechnischen Nutzen für die Anrainer und die damit verbundenen Kosten für den Bauherrn hängen allerdings stark von der Kreativität und fachlichen Erfahrung der planenden Techniker ab. In den meisten Fällen wird der Planungsvorgang bereits nach dem ersten, im Hinblick auf die gesteckten Schutzziele zufriedenstellendem Ergebnis abgebrochen, ohne zu prüfen, ob es eine

wirkungs- und vor allem kostengünstigere Lösung gäbe. Der iterative Planungsprozess kann aber auch zu früh zum falschen Schluss führen, dass mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln kein ausreichender Schutz erreichbar wäre.

Für eine einzelne emittierende Punktquelle oder eine einfache Linienquelle (gerade Straßenachse) und einen einzeln betrachteten Immissionspunkt (z.B.: Fensteröffnung eines zu schützenden Objektes) ergibt sich noch eine einfache Gegenüberstellung von Lärmschutzwandhöhe und -breite, der damit verbundenen Kosten und der zu erzielenden Lärmpegelsenkung. Für realistische Schallquellengeometrien und mehrere gleichzeitig zu betrachtende Immissionsorte gibt es jedoch kein analytisches Lösungsverfahren. Das derzeit übliche schrittweise Verfahren von Betrachtungen einzelner Abschirmvarianten ist stark benutzerabhängig. Es ist anzunehmen, dass bei vielen bisherigen Lärmschutzplanungen wirtschaftlich und technisch optimalere Lösungen möglich gewesen wären.

Die in Österreich geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Planung von Lärmschutzmaßnahmen, wie die Dienstanweisung Lärmschutz des BMVIT für Straßen [1] und die Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung (SchIV) [2][3], enthalten aber nicht nur eine einfache Gegenüberstellung von geschützten Objekten versus Wandkosten. Eine Vielzahl von Randbedingungen wie Wirtschaftlichkeit, Berücksichtigung der Möglichkeit passiver Maßnahmen (Lärmschutzfenster), minimale Einfügungsdämpfung, maximale Wandhöhen etc... müssen in den Planungsprozess einfließen.

Auch wenn einzelne kommerzielle Softwareprodukte automatische Wandoptimierungen aufgrund einstellbarer Parameter anbieten, hat sich diese Methode bis jetzt nicht weitläufig in der Praxis bewährt. Dazu soll nun, ausgehend von der VIF 2011 Ausschreibung, eine praktikable und für die Auftraggeber ASFINAG und ÖBB nützliche Variante entwickelt werden.

1.3 Inverse Optimierung

Das gewünschte Verfahren kann mit der inversen Optimierung oder inversen Planung umgesetzt werden. Diese wird unter anderem bereits sehr erfolgreich in der medizinischen Strahlentherapie von Tumoren eingesetzt. Dort besteht die konventionelle Bestrahlungsplanung ebenfalls in einer iterativen Variation von Strahlenfeldgröße, Feldform, Einstrahlwinkel und Einstrahldosis einzelner Strahlen. Ziel ist die optimale Behandlung eines Tumors unter gleichzeitiger Schonung der gesunden Organe. Als Zielparameter werden die maximalen bzw. minimalen Dosiswerte für den Tumor bzw. die Risikoorgane festgelegt. Randbedingungen sind die technischen Spezifikationen der Bestrahlungseinrichtungen. Die inverse Planung und daraus folgende intensitätsmodulierte Strahlentherapie ermöglichte in den letzten Jahren eine Erhöhung der Tumordosis und Reduktion der Belastung umliegender Organe (z.B.[4]:*Trnková P, Pötter R, Baltas D, Karabis A, Fidarova E, Dimopoulos J, Georg D, Kirisits C. New inverse planning technology for image-guided cervical cancer brachytherapy: description and evaluation within a clinical frame*) Sie gilt als eine der bedeutendsten technischen Entwicklungen der Strahlentherapie der letzten 10 Jahre. Die methodische Problemstellung weist starke Ähnlichkeiten zur Lärmschutzoptimierung auf. Auch hier ist eine Modellierung der Schallausbreitung zur Reduktion der Immissionen notwendig, welche gleichzeitig von den Randbedingungen (technisch, juristisch, wirtschaftlich) abhängt und optimiert werden kann.

Tatsächlich zeigt eine 2009 aus Korea erschienene Arbeit [5] die Möglichkeiten von inverser Planung für Lärmschutzplanungen auf. Die interessante wissenschaftliche Arbeit beschränkt sich jedoch auf das „simulated annealing“ Verfahren und zeigt beispielhaft die prinzipielle Durchführbarkeit der inversen Planung.

Die bis jetzt umfangreichste Grundlagenstudie zu dieser Thematik erfolgte im Rahmen des FFG Projektes „Inverse Optimierung von Lärmschutzmaßnahmen“, durchgeführt vom Ziviltechnikerbüro Kirisits. Erste Ergebnisse dazu wurden mit einer Arbeit auf der internationalen Konferenz Internoise 2011 in Osaka, Japan präsentiert [6]. Das Projekt resultierte in einem Prototyp in der Skriptsprache Matlab (The MathWorks Corporation Natick, MA, USA) zur prinzipiellen Demonstration der Funktionsweise.

1.4 Begriffsdefinitionen

Für diesen Bericht werden folgende Begriffsdefinitionen verwendet. Dabei finden sich bei den mathematischen Ableitungen und Grafiken der Prototypsoftware ebenfalls die englischsprachigen Begriffe. Zur vereinfachten Lesbarkeit werden manche Begriffe in verkürzter Form verwendet:

Schutzwürdige Wohngebäude, Wohngebäude, Objekte, *objects*

Dies sind allgemeine Wohngebäude, bei der zumindest eine maßgebliche Gebäudeöffnung über dem Grenzwert liegt. Darüberhinaus müssen weitere rechtliche Randbedingungen zutreffen wie sie beispielsweise in der Dienstanweisung BMVIT definiert sind.

Maßgebliche Gebäudeöffnung, Gebäudeöffnung

In der Regel Fenster und Türen von Wohn- oder Schlafräumen bzw. erweiterten Kriterien nach Dienstanweisung BMVIT. In diesem Bericht werden grundsätzlich nur maßgebliche Gebäudeöffnung, kurz Gebäudeöffnungen betrachtet.

Immissionsgrenzwert, Grenzwert, *noise limit*

Wert für zulässige Schallimmissionen im jeweils charakteristischen Zeitraum (L_{den} , L_{night})

Grenzwertüberschreitung

Zustand, bei dem Immissionspegel > Grenzwert auftritt.

Aktive Lärmschutzmaßnahmen, straßenseitige bzw. bahnseitige Maßnahmen

Aktive Lärmschutzmaßnahmen sind direkt am Straßenbauwerk gesetzte Maßnahmen (wie z.B. Dämme oder Wände).

L_{night}

Entsprechend der Richtlinie 2002/49/EG stellt der Nacht-Lärmindex L_{night} die Belastung im Nachtzeitraum (22 bis 6 Uhr) dar. L_{night} ist ein Immissionsschallpegel und wird durch den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel am maßgebenden Immissionsort beschrieben.

L_{den}

Entsprechend der Richtlinie 2002/49/EG stellt der Tag-Abend-Nacht Lärmindex L_{den} die allgemeine Belastung dar. L_{den} ist ein Immissionsschallpegel und wird durch den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel am maßgebenden Immissionsort beschrieben.

Passive Lärmschutzmaßnahmen, *passive costs*

Passive oder objektseitige Lärmschutzmaßnahmen sind direkt am schutzwürdigen Wohngebäude gesetzte Maßnahmen (wie z.B. Schallschutzfenster, Schallschutztüren, Schalldämmlüfter).

Kosten der aktiven Lärmschutzmaßnahmen, Wandkosten, *real barrier costs*

Prinzipiell können dafür beliebige Berechnungsmethoden verwendet werden. Die tatsächlichen Kosten werden von Fläche, statischen Bedingungen, Ausführung und auch Lage abhängen. Zur Berechnung des Wirtschaftlichkeitsfaktors als auch in den Darstellungen der Kosten in diesem Bericht werden dafür die von den entsprechenden Dienstanweisung bzw. Verordnung festgesetzten Werte verwendet: 200 € pro m² Projektionsfläche für Bundesstraßen bzw. 180 € pro m² Ansichtsfläche entlang von Schienenstrecken.

Kosten der passiven Lärmschutzmaßnahmen

Wie für die aktiven Maßnahmen werden entsprechend der Definition in Dienstanweisung und Verordnung die standardisierten Werte verwendet. Während für Schienenverkehrslärm ein Standardbetrag (derzeit 910 €) je maßgeblicher Öffnung angesetzt wird, wird nach der Dienstanweisung nach der Höhe der Grenzwertüberschreitung unterschieden und demnach 500 €, 1000 € (über 5 dB Überschreitung im Nachtzeitraum) bzw. 2000 € eingesetzt.

Wirtschaftlichkeitsfaktor, *economy factor*

Der Wirtschaftlichkeitsfaktor ist das Verhältnis der Kosten der aktiven Lärmschutzmaßnahmen zu den Kosten der kompensierten passiven Lärmschutzmaßnahmen (Cost Passive Compensated) an schutzwürdigen Wohngebäuden. Kompensiert bezieht sich dabei auf eine Immissionspegelreduktion kleiner/gleich dem Grenzwert oder keiner Grenzwerteinhaltung aber einer Reduktion um mindestens eine definierte Pegelreduktion (derzeit 5 dB nach Dienstanweisung für Bundesstraßen bzw. 8 dB nach der Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung).

Ob aktive Maßnahmen wirtschaftlich vertretbar sind, wird derzeit mit dem Wirtschaftlichkeitsfaktor geprüft. Dabei gelten die Wandkosten bis zum Dreifachen der Kosten der kompensierten passiven Maßnahmen als vertretbar.

Immissionspunkt, *Receiver*

Punkt im 3D Koordinatensystem, welcher zur Beurteilung der Immission an schutzwürdigen Wohngebäuden dient. Liegt in der Regel als Fassadenpunkt vor einer maßgeblichen Gebäudeöffnung. In diesem Bericht werden in den Beispielen aber auch vereinfacht Fassadenpunkte an einer maßgeblichen Gebäudefassade je vorhandenem Stockwerk (Erdgeschoß, Obergeschoß) verteilt und diesen eine mittlere Anzahl an Gebäudeöffnungen für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zugewiesen..

Kosten-Nutzen Diagramm, *Pareto Plot*

In diesem Bericht werden für eine Vielzahl an optimierten Wandgeometrien die Parameter der Kosten und Wirkung in Grafiken aufgetragen. Diese Grafiken entsprechen Kosten-Nutzen Diagrammen, allerdings bedeuten diese auch die Darstellung der Pareto-Front. Die Bezeichnungen sind in der deutschsprachigen und englischsprachigen Literatur nicht völlig einheitlich. In diesem Bericht werden beide Formulierungen gleichwertig verwendet.

2 THEORIE

2.1 Multikriterielle Optimierung

Die Ziele der Wandoptimierung liegen im optimalen Schutz der schutzwürdigen Wohnobjekte mit dem geringsten Einsatz an Wandflächen. Das Problem liegt in der Bestimmung der Position und Höhe einzelner Wandsegmente entlang der Emissionsachsen. Da eine analytische Lösung nicht bestimmt werden kann, wird die Lösung mit Inverser Optimierung oder Inverser Planung bestimmt. Mit dem Ausdruck „Invers“ grenzt sich das Verfahren grundsätzlich von der Vorwärtsplanung ab; der iterativen Berechnung von Immissionswerten für eine bestimmte Wandgeometrie.

Die inverse Planung berücksichtigt mehrere Kriterien und ist daher ein multikriterielles Optimierungsproblem [7]. Es liegen mehrere konkurrierende Ziele vor. Erhöhte Schutzwirkung (Immissionsreduktion) führt generell zu einem erhöhten finanziellen Aufwand. Zusätzlich gibt es weitere Kriterien aufgrund der vorliegenden Dienstanweisung und Verordnung. Eine Lösung dieses Problems liegt in der Formulierung einer einzelnen Kostenfunktion (objective function). Die Optimierung einer Lösung wird dann mit verschiedenen Wichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien wiederholt bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht wird. Die optimalen Wichtungsfaktoren sind *a priori* unbekannt. In der multifaktoriellen Optimierung werden mehrere Lösungen in einer globalen Ansicht vorgeschlagen. Der Optimierungs- und Entscheidungsprozess sind voneinander getrennt.

2.1.1 Pareto Optimaler Punkt, Pareto Front

Für ein multikriterielles Optimierungsproblem (MO) mit M Kriterien wird eine vektorielle Kostenfunktion gegeben:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ f_M(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Manche der einzelnen Kriterien konfliktieren miteinander und einige müssen minimiert werden, während andere maximiert werden. Das Problem den Vektor zu finden,

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

der die vektorielle Kostenfunktion (2.1) optimiert, wird nun als MO definiert. Üblicherweise existiert nie eine Situation, wo alle Werte $f_i(\mathbf{x})$ in einem gemeinsam Punkt \mathbf{x} optimal sind. Wir müssen also Bedingungen entwickeln, um zu bestimmen, welche Punkte \mathbf{x} als *optimale* Lösung akzeptiert werden. Eine mögliche Bedingung ist jene des *Pareto optimalen Punktes*. [7]

Eine Lösung \mathbf{x}_1 dominiert eine Lösung \mathbf{x}_2 nur dann, wenn die beiden folgenden Bedingungen gelten:

\mathbf{x}_1 ist nicht schlechter als \mathbf{x}_2 in allen Kriterien:

$$f_j(\mathbf{x}_1) \leq f_j(\mathbf{x}_2) \quad \forall \quad j = 1, \dots, M \quad (2.3)$$

\mathbf{x}_1 ist strikt besser als \mathbf{x}_2 in mindestens einem Kriterium:

$$f_j(\mathbf{x}_1) < f_j(\mathbf{x}_2) \quad \text{für mindestens ein } j \in \{1, \dots, M\} \quad (2.4)$$

Wir nehmen ohne Verlust der Allgemeinheit an, dass es sich um ein Minimierungsproblem handelt. Wir bezeichnen \mathbf{x}_1 als nicht-dominiert von \mathbf{x}_2 und \mathbf{x}_2 als dominiert von \mathbf{x}_1 . Aus einer Menge von Lösungen P , bestimmen jene Lösungen die Untermenge P' , welche nicht-dominiert sind von allen anderen Lösungen aus P . Wenn die Menge P aus dem gesamten möglichen Lösungsraum besteht, wird P' als die *global Pareto optimale Menge* bezeichnet. Der Graph von $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ der Pareto optimalen Menge wird als *Pareto Front* bezeichnet.

Wie die Pareto optimale Menge im Bezug auf Lärmschutzwandoptimierung gefunden werden kann und die Parto Front dargestellt wird, zeigen wir in diesem Bericht.

2.2 L-BFGS-B Algorithmus

L-BFGS-B [8,9] steht für Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno Bound-constrained. Der L-BFGS-B Algorithmus ist eine Erweiterung von L-BFGS aus der Klasse der Quasi Newton Algorithmen. Er erlaubt die Modellierung von Randbedingungen der Form (2), exakt so wie für die Lärmschutzwandkonstruktion eine minimale (0m) und maximale Wandhöhe definiert ist.

Im Bericht des Vorläufer-Projekts [6] wurde gezeigt, dass sich der L-BFGS Algorithmus zur Optimierung von Wandgeometrien eignet. Mit der Einführung von Randbedingungen in L-BFGS-B kann auf unstetige Bestrafungsfunktionen [10] in der Kostenfunktion verzichtet werden, was eine deutliche Verbesserung ist. L-BFGS-B ist geeignet für große Probleme mit vielen Variablen, zeigt vergleichsweise rasche Konvergenzraten und ist zudem frei verfügbar. Mit dem kürzlichen Update zur in diesem Projekt verwendeten L-BFGS-B Version 3.0 [11], wurde die Leistung des Algorithmus erheblich verbessert.

L-BFGS-B garantiert nicht, dass die global optimale Lösung gefunden wird. Bei konvexen, nicht-linearen Kostenfunktionen kann der Algorithmus in lokale Optima “fallen”. Mit unseren Resultaten zeigen wir, dass der Startwert das Ergebnis deutlich beeinflusst und daher wohlüberlegt gewählt werden muss.

2.3 Simulated Annealing (SA) Algorithmus

SA ist ein heuristisches Verfahren und wird bei globalen Optimierungsproblemen angewendet.

“Das Verfahren ist an den Erstarrungsprozess von Schmelzen angelehnt und betrachtet die Güte unterschiedlicher Kristallisationszustände. Die Möglichkeit, gute Kristallisationszustände zu erzielen, steigt mit hoher Schmelztemperatur und mit geringer Abkühlrate. In dem Optimierungsalgorithmus wird eine Schmelztemperatur T_0 gewählt, die sich im Laufe des Prozesses reduziert.” [12]

SA besitzt die Fähigkeit schlechtere Lösungen zu verfolgen und so einen Ausweg aus lokalen Minima zu finden. Der langsame Abkühlungsprozess und die damit einhergehende hohe Wahrscheinlichkeit eine Lösung nahe am globalen Optimum zu finden, geht auf Kosten einer erhöhten Anzahl Iterationen und somit mehr Rechenzeit. SA ist ungeeignet um Pareto Fronten rasch zu finden, wir verwenden SA um zu bestätigen, dass der L-BFGS-B Algorithmus Lösungen findet, die mit genügender Genauigkeit in der Nähe des globalen Optimum liegen.

2.4 Kostenfunktion

Im Folgenden wird die aus der theoretischen Physik bekannte Einsteinsche Summenkonvention verwendet. Wir definieren die Kostenfunktion als

$$F(x_i) = \underbrace{c_i a_i x_i}_{\text{total barrier cost}} + P \underbrace{\Delta L(x_i)}_{\text{excess noise}} \quad (2.5)$$

unter den Randbedingungen

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (2.6)$$

mit

$$\Delta L(x_i) = \sum_j \max(L_j(x_i) - L_{limit}, 0) \quad (2.7)$$

i : barrier segment

j : receiver

x_i : height of barrier segment i

a_i : length of barrier segment i

c_i : cost per square meter of barrier segment i

P : noise penalty factor [$\frac{\text{€}}{\text{dB}}$]

ΔL_j : sound level exceeding noise immission limit at receiver j [dB]

L_i : sound level at receiver j [dB]

L_{limit} : noise immission limit [dB]

l_i : lower boundary condition of barrier segment i

u_i : upper boundary condition of barrier segment i

2.5 Gradient der Kostenfunktion

L-BFGS-B verlangt einen Benutzerdefinierten Gradienten der Objective Function als Input. Wir beginnen mit der Ableitung des Gradienten und schreiben:

$$\partial x_i F(x_i) = \partial x_i c_i a_i x_i + P \partial x_i \Delta L(x_i) \quad (2.8)$$

Der Schalldruckpegel ist definiert als

$$L_j(x_i) = 10 \log_{10}(I'_j(x_i)) \quad (2.9)$$

Die relative Schallintensität I' , so wie sie vom Schallausbreitungsprogramm übergeben wird, ergibt sich aus dem Effektivwert des Schalldrucks \tilde{p} relativ zum Bezugswert der menschlichen Hörschwelle p_0

$$I'_j(x_i) = \frac{\tilde{p}(x_i)^2}{p_0^2} \quad (2.10)$$

Es gilt

$$\partial x_i L_j(x_i) = \frac{10}{\ln(10) I'_j(x_i)} \partial x_i I'_j(x_i) \quad (2.11)$$

Aus (2.8) mit (2.7), (2.9) und (2.11) folgt somit

$$\partial x_i F(x_i) = c_i a_i + \sum_j \text{if}(L_j(x_i) > L_{limit}) \left\{ \frac{10P}{\ln(10) I'_j(x_i)} \partial x_i I'_j(x_i) \right\} \quad (2.12)$$

Der Gradient der relativen Schallintensität $\partial x_i I'_j(x_i)$ wird als Differenzenquotient numerisch approximiert:

$$\partial x_i I'_j(x_i) \approx \frac{I'_j(x_i + \delta) - I'_j(x_i)}{\delta} \quad (2.13)$$

2.6 Startwertberechnung x0init

Um einen guten Startwert zu finden, der in der Nähe des globalen Optimums liegt und damit generell zu besseren Optimierungsergebnissen führt, wurde die x0init-Funktion entworfen. Dies ist ein iterativer Prozess nach folgendem Muster:

- Schritt 1: Suche den Immissionspunkt mit der größten Grenzwertüberschreitung und finde den Wandabschnitt, aus dessen Richtung der größte Schallanteil kommt.
- Schritt 2: Erhöhe den Wandabschnitt aus Schritt 1 um einen Anteil der maximalen Wandhöhe, z.B. 2%.
- Schritt 3: Gehe zu Schritt 1 mit einem anderen Immissionspunkt. Wenn alle Immissionspunkte durchlaufen wurden, beginne wieder mit dem ersten.

Der Prozess stoppt, wenn alle Objekte geschützt sind oder benutzerdefinierte maximale Wandkosten erreicht sind. (x0 scaling factor)

3 SCHALLAUSBREITUNG UND SCHNITTSTELLE

3.1 Schallausbreitungsrechnung

Die Schallausbreitungsrechnung berechnet aufgrund der Emissions- und Transmissionsdaten den Immissionspegel in definierten Koordinatenpunkten. Theoretisch kann jede Form der Schallausbreitungsrechnung mit einem Optimierungsverfahren für Schallschutzmaßnahmen kombiniert werden. Allerdings sind aufgrund der derzeit zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten sowie allgemein verifizierten Methoden nur sogenannte Ingenieurmethoden von Relevanz. Dabei werden die Emissionsachsen (Fahrbahn, Gleis) in einzelne Abschnitte unterteilt. Diesem Abschnitt wird ein Schallleistungspegel oder Schalldruckpegel in definiertem Abstand zugewiesen. Die Emissionsdaten beruhen auf gemessenen Daten für einzelne Fahrzeugtypen, Geschwindigkeit und diversen Streckeneigenschaften. Zwischen den Emissionsabschnitten und dem Immissionspunkt werden Transmissionsparameter abhängig von Abstand, Bodendämpfung, Vegetation, atmosphärischer Absorption und Abschirmmaß berücksichtigt.

Für die in diesem Projekt berücksichtigen österreichischen Gegebenheiten sind zwei Regelwerke zur Schallausbreitungsrechnung von Bedeutung:

- RVS 04.02.11 Lärmschutz (Richtlinie der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr) für die Berechnung von Straßenverkehrslärm [13]
 - Schallausbreitung nach ÖAL Richtlinie Nr. 28 - Schallabstrahlung und Schallausbreitung
- ONR 305011 Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb für Schienenverkehrslärm [14]
 - Schallausbreitung nach ÖNORM ISO 9613-2 Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren [15]

Das Optimierungsverfahren benötigt den Immissionspegel an den einzelnen Immissionspunkten abhängig von der Wandform. Führt man für jede einzelne Iteration im Optimierungsverfahren eine vollständige Berechnung durch, ergeben sich Rechenzeiten, welche für die Handhabung des Verfahrens undurchführbar werden. Daher soll, wie später beschrieben, eine Vorausberechnung von Teilergebnissen durchgeführt werden, welche dann vom Optimierungsalgorithmus entsprechend kombiniert wird. Dazu sind drei Aspekte besonders zu berücksichtigen:

3.1.1 Von der Abschirmkante abhängige Parameter

Durch das Einfügen einer aktiven Schallschutzmaßnahme ergibt sich eine Abschirmkante. Diese beeinflusst nach ISO 9613-2 nur die Abschirmungsdämpfung D_z . Die Beeinflussung der Bodendämpfung ist darin bereits berücksichtigt. Nach ÖAL 28 ist nicht nur das Schirmmaß ΔL_s , sondern auch das Bodendämpfungsmaß ΔL_b von Veränderungen der Abschirmkante betroffen. Daher sind bei Berechnungen beide Parameter jeweils neu zu berechnen.

3.1.2 Schallausbreitungsweg

In der Regel verläuft der dominante Schallausbreitungsweg über die Lärmschutzwand. Nach ÖAL 28 können daher einzelne vertikale Profile zwischen Emissionspunkt und Immissionspunkt betrachtet werden. Für die Ausarbeitung der Optimierung für Straßenverkehrslärm nach RVS 04.02.11 sind daher keine zusätzlichen Bedingungen zu beachten.

Nach ISO 9613-2 sind zusätzliche, auch seitliche Ausbreitungswege, um die seitlichen Wandkanten, zu berücksichtigen. Wird zur Optimierung der Wand, diese in sehr kleine Abschnitte unterteilt, so ist keine unabhängige Berechnung für ein einzelnes Wandsegment möglich, da auch die links und rechts davon vorliegenden Wandhöhen in die Berechnung eingehen. Zur Vereinfachung kann aber die seitliche Beugung um Wandabschnitte durch Annahme einer durchgehend gleich hohen Wand für die Optimierung unberücksichtigt bleiben und erst bei der finalen Berechnung eingeführt werden. Bei sehr kleinen Wandabschnitten ist ebenfalls das Kriterium zur horizontalen Abmessung der Wand zu beachten: Ein Gegenstand wird nur dann als abschirmendes Hindernis betrachtet, wenn seine horizontale Abmessung normal zur Verbindungslinie

Quelle S – Empfänger R größer als die Wellenlänge ist. Für das 63 Hz Band sind daher Segmente > 5.5 m zu verwenden oder dieses Kriterium entsprechend auszuschalten.

3.1.3 Abschnittsweise Berechnung

Die Zerlegung der Emissionslinie in einzelne Abschnitte ist in den vorliegenden Regelwerken nicht vollständig geregelt. Daher verwenden die einzelnen Berechnungsprogramme verschiedene Verfahren. Dabei werden nicht nur konstante Abschnittslängen oder Abschnittswinkel (vom Immissionspunkt aus gesehen) verwendet, sondern auch Projektionsverfahren verwendet. Dabei werden Hindernisse ausgehend vom Immissionspunkt auf die Emissionslinie projiziert, um sicherzustellen, dass die Abschnittslängen hinreichend kurz sind, um diese Hindernisse auch ausreichend zu berücksichtigen. Dasselbe gilt auch umgekehrt, um Lücken in den Wänden durch Platzierung entsprechender Emissionspunkte auf der Emissionslinie zu integrieren. Durch die Zerlegung der Wand in einzelne Abschnitte wird eine Vielzahl von Projektionen durchgeführt. Zur praktikablen aber doch hinreichend genauen Berechnung muss der Bearbeiter eine entsprechende Wahl von Mindestlängen für die Abschnitte durchführen. Selbiges gilt für Parametereinstellungen für Reflexionen. Auch diese sind, bereits unabhängig, ob ein Optimierungsverfahren durchgeführt wird oder nicht, entsprechend anzupassen.

3.2 Vorausberechnung

Optimierungsläufe mit einem frühen Matlab Prototypen haben gezeigt, dass für die Berechnung einer Pareto Front, abhängig von der gewünschten Anzahl Pareto Optimaler Punkte, eine Anzahl Iterationen in der Größenordnung 10^3 - 10^4 notwendig ist. Bei jeder Iteration muss für eine bestimmte Wandgeometrie, der Wert der Kostenfunktion und ihr Gradient bestimmt werden. Entsprechend oft werden die Immissionspegel abgefragt und müssen durch das Schallausbreitungsberechnungsprogramm kalkuliert und über eine Schnittstelle an den Optimierungsalgorithmus weitergegeben werden.

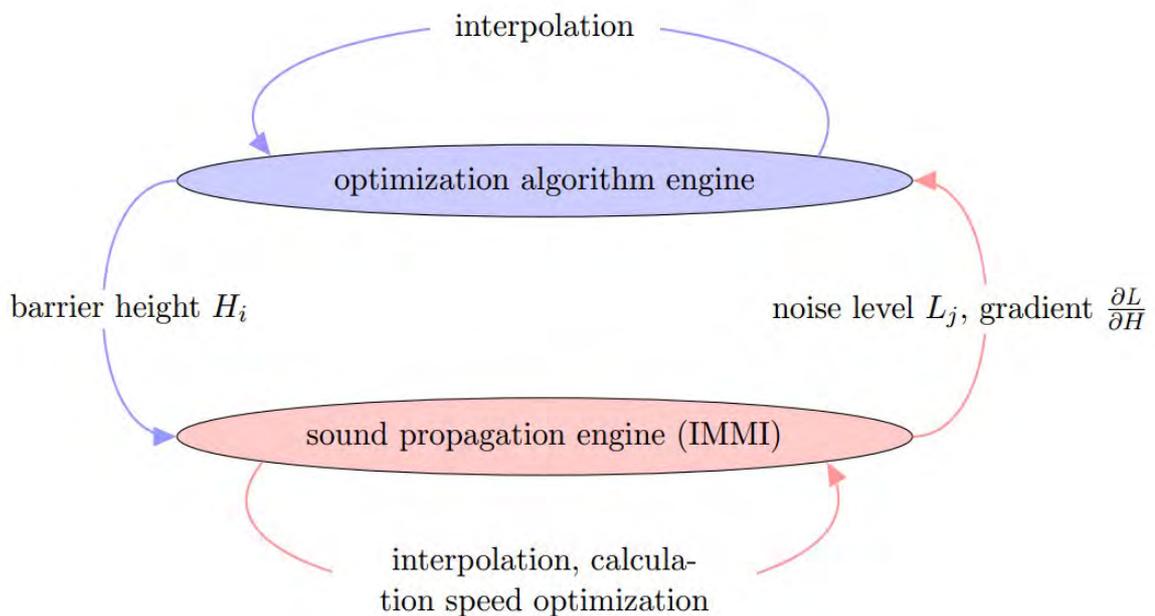


Abbildung 1: Schematisches Diagramm einer "iterativen" Schnittstelle zwischen Optimierungsalgorithmus und Schallausbreitungsberechnungsprogramm. Bei jeder Iteration des Optimierungsalgorithmus findet ein Datenaustausch statt.

Eine „iterative“ Schnittstelle (Abbildung 1) zwischen Optimierungsalgorithmus und Schallausbreitungsberechnungsprogramm erfordert ein hohes Maß an Optimierung der Rechengeschwindigkeit und eine effiziente Schnittstelle. Die Schnittstelle ist relativ komplex und der Gradient wird durch das Schallausbreitungsberechnungsprogramm ermittelt.

Der Benutzer des Optimierungsprogramms soll schnell und einfach detaillierte Pareto Fronten berechnen und verschiedene Optimierungsparameter ausprobieren können. Bei Bedarf sollen einzelne Abschnitte der Pareto Front genauer untersucht werden können und zusätzliche Pareto Optimale Punkte bestimmt werden. Die durch die „iterative“ Schnittstelle implizierten stundenlangen Rechenzeiten widersprechen diesen Anforderungen diametral.

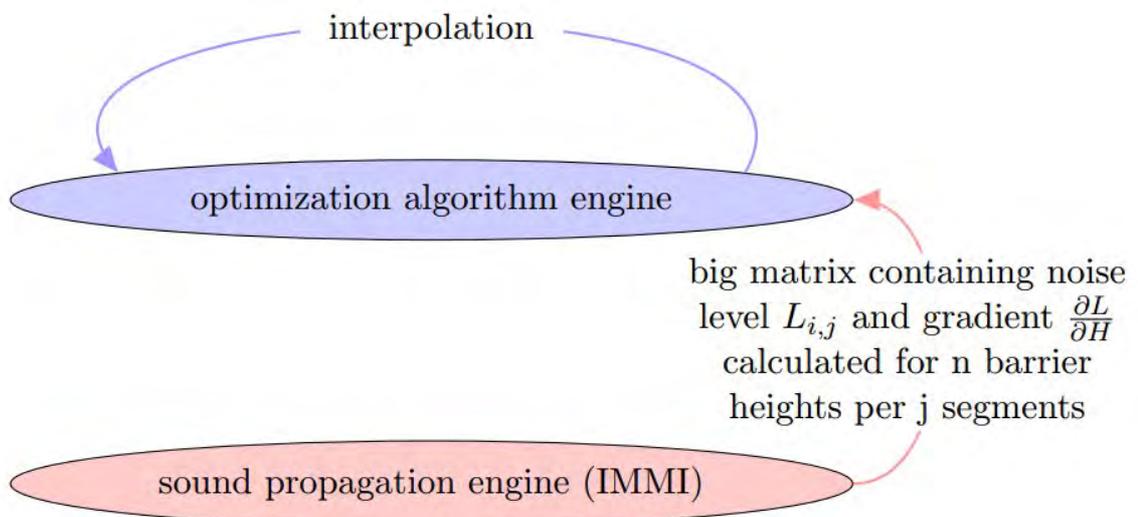


Abbildung 2: Schematisches Diagramm einer Schnittstelle mit Vorausberechnung der Schallimmissionspegel. Der Datenaustausch findet einmalig vor dem Optimierungsprozess statt.

Abbildung 2 zeigt eine auf der Vorausberechnungsmethode basierte Schnittstelle. Die rechenzeitintensive Schallausbreitungsrechnung findet einmalig vor dem Optimierungsprozess statt und wird in einer Binärdatei (.IOW) gespeichert. Die finale Implementierung weist Berechnungszeiten pro Pareto Front von wenigen Sekunden auf und schafft die Grundlage für die gewünschte User Experience.

In Kapitel 3.3 ist das Format der .IOW Datei genau beschrieben. Im Wesentlichen benötigt der Optimierungsalgorithmus zwei große Matrizen:

- Dreidimensionale Matrix mit dem Wert der relativen Schallintensität für jede Kombination aus Emissionspunkt, Immissionspunkt und für den Schallausbreitungsweg (definiert in Kapitel 3.1.2) relevante Wandabschnittshöhe. Die Vorausberechnung findet für eine durch den Benutzer bestimmte Anzahl diskreter Wandabschnittshöhen statt. Durch lineare Interpolation wird eine kontinuierliche Funktion für alle Wandabschnittshöhen berechnet.
- Zweidimensionale Matrix mit dem Schnittpunkt des Schallausbreitungsweges mit der Wand-Basislinie für alle Kombinationen aus Emissionspunkt und Immissionspunkt. Für die Definition des Schnittpunkts wird eine „S-Koordinate“ eingeführt, welche entlang der (gekrümmten) Wand-Basislinie läuft.

Aus diesen beiden Matrizen kann der Optimierungsalgorithmus für beliebige Wandgeometrien und Wandabschnittslängen (bis zu einem durch die Emissionspunktverteilung bestimmten Minimum) alle Schallimmissionspegel und damit die Kostenfunktion und ihren Gradienten berechnen.

3.2.1 Kontrolle

Bei der Schallimmissionsberechnung werden Linienschallquellen so unterteilt, dass die Teilstücke mit genügender Genauigkeit als Punktschallquellen berechnet werden können. Dabei spielt das Projektionsverfahren im allgemeinen eine wichtige Rolle. Wenn ein „Vorausberechnungsverfahren“ verwendet wird, ist zu diesem Zeitpunkt die genaue Unterteilung einer Lärmschutzwand in Abschnitte unterschiedlicher Höhe noch nicht bekannt. Die Projektion kann deshalb nur näherungsweise geschehen. Modellrechnungen haben gezeigt, dass diese Näherungen nur zu vernachlässigbaren Abweichungen führen. Dabei wurden verschiedene Wandgeometrien mittels OWR-Datei zurück nach IMMI importiert und eine Schallausbreitungsberechnung mit vollständiger Projektion durchgeführt.

	Mittlere Abweichung in dB
Beispiel B, P = 5721, Wandsegmentlänge 80m	0,45
Beispiel A, P = 9083, Wandsegmentlänge 50m	0,03
Beispiel B, manuelle Planung, l = 10m	0,04
Beispiel C, P = 306, Wandsegmentlänge 80m	0,45

Tabelle 1: Mittlere Abweichung zwischen Vorausberechnungsmethode und Berechnung mit vollständiger Projektion in IMMI, über alle Immissionspunkte.

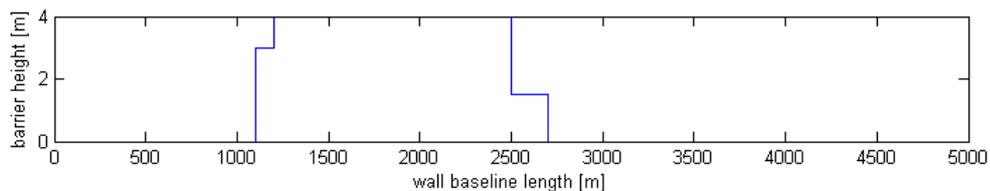


Abbildung 3: Beispiel B: Zur Kontrolle der Vorausberechnungsmethode verwendete optimierte Wandgeometrie, berechnet für Noise Penalty P = 5721.

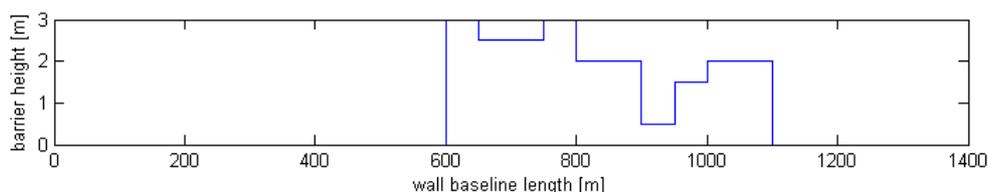


Abbildung 4: Beispiel A: Zur Kontrolle der Vorausberechnungsmethode verwendete optimierte Wandgeometrie, berechnet für Noise Penalty P = 9083.

3.3 .IOW

Der kommentierte Pseudocode zeigt, wie die Exportdatei von IMMI geschrieben wird.

```
function TOptWandHelper.StoreData( aFileName: string): boolean;

var
  S      : TFileStream;
  i      : integer;
  iIP, iQP : integer;
  iWH    : integer;
  szInt  : integer;
  szSng  : integer;
  ProgId : integer;
  Version : integer;

  UnusedInt : integer;
  UnusedSng : single;

begin
  S:= TFileStream.Create (aFileName, fmCreate);

  { --- Vorspann ----- }
  szInt:= SizeOf(integer); // 4 byte
  szSng:= SizeOf(single);  // 4 byte

  { 20 Integer-Werte mit 4 byte schreiben: }
  ProgId := 7777;
  Version := 1;
  UnusedInt:= 0;
  UnusedSng:= 0;
  S.Write(ProgId,      szInt); // Kennung für OPTWand-Vorbereitung
  S.Write(Version,    szInt); // Eine Versionsnummer
  S.Write(IPCount,    szInt); // Anzahl der Immissionspunkte
  S.Write(QPCountMax, szInt); // Max. Anzahl von Punktquellen
  S.Write(WHCount,    szInt); // Anzahl der Wandhöhen
  S.Write(Params.BurIndex0,      szInt); // Auswahl Beurteilungszeitraum
  // Start bei 0: Tag, Abend, Nacht, DEN
  S.Write(Params.OptBParamNummer, szInt); // Nr. in der Liste der Einstellungen
  // der Berechnungsparameter
  S.Write(Params.OptLFNummer,      szInt); // Nr. in der Liste der Varianten
  // (Lastfälle)
  S.Write(Params.IPInfoFlag,      szInt); // Regelt Zusatzausgabe
  // 0=nichts;
  // Für jeden IP:
  // 1= zRelativ;
  // 2= x,y,z,zRelativ
  // 3= x,y,z,zRelativ,
  //      Lr für min. Wandhöhe,
  //      Lr für max.Wandhöhe
  for i:= 1 to 11 do // Platz für spätere Erweiterungen
    S.Write(UnusedInt, szInt);

  { 10 Single-Werte mit 4 byte schreiben: }
  S.Write(Params.WHoeheMin, szSng); // Minimal Wandhöhe
  S.Write(Params.WHoeheMax, szSng); // Max. Wandhöhe
  S.Write(Params.WHoeheStep, szSng); // Konstante Schrittweite zur
  // Vergrößerung der Wandhöhe
  S.Write(Params.Grenzwert, szSng); // z.Zt. nicht ausgewertet
  S.Write(Params.Puffer,    szSng); // z.Zt. nicht ausgewertet
  for i:= 1 to 5 do // Für spätere Erweiterungen
    S.Write(UnusedSng, szSng);
```

```

{ --- WallMatSKoord ----- }
{ SP sei SP sei der Schnittpunkt eines Schallstrahls von QP zu IP auf der zu
  optimierenden Schallschutzwand. Dann ist sKoord die laufende Koordinate auf der
  SSW bis zu dem Schnittpunkt SP. Wenn s=-99, dann existiert kein Schnittpunkt
  auf
  der SSW. }
for iIP:= 0 to IPCount-1 do
begin
  for iQP:= 0 to QPCountMax-1 do
  begin
    S.Write(WallMatSKoord[iIP, iQP], szSng);
  end;
end;

{ --- WallMatElemId ----- }
{ Wenn mehr als 1 zu optimierende Schallschutzwand unterstützt wird, dann
  enthält dieses Feld die laufende Nummer des Wandelements, auf dem der
  Schnittpunkt liegt. }
for iIP:= 0 to IPCount-1 do
begin
  for iQP:= 0 to QPCountMax-1 do
  begin
    S.Write(WallMatElemId[iIP, iQP], szInt);
  end;
end;

{ --- LrMat ----- }
{ Beitrag zum Immissionspegel Lr am Punkt IP durch die Punktquelle QP bei einer
  Wandhöhe WH. Der Wert in der Matrix ist zwecks schnellerer Überlagerung
  bereits  $w = \exp(0.1 * Lr * \ln 10)$  !!! }

for iIP:= 0 to IPCount-1 do
begin
  for iQP:= 0 to QPCountMax-1 do
  begin
    for iWH:= 0 to WHCount-1 do
    begin
      S.Write(LrMat[iIP, iQP, iWH], szSng);
    end;
  end;
end;

{ --- Optional: ZaehlFeldQP----- }
{ Dieses Feld enthält für jeden Immissionspunkt die Zahl der Punktquellen.
  Kann also verwendet werden, um die Schleifen bei der Überlagerung der
  Einzelbeiträge zu verkürzen. }
for iIP:= 0 to IPCount-1 do
begin
  S.Write(ZaehlFeldQP[iIP], szInt);
end;

{ --- Optional: IPIdFeld ----- }
{ Dieses Feld enthält für jeden Immissionspunkt IP den Elementschlüssel, um IP in
  IMMI identifizieren zu können. Wird für das Optimierungsmodul nicht benötigt. }
for iIP:= 0 to IPCount-1 do
begin
  S.Write(IPIdFeld[iIP], szInt);
end;

{ --- Optional: Zusatzinformation zu den Immissionspunkten ----- }
{ Ausgabe hängt ab von IPInfoFlag. }

```

```

case Params.IPInfoFlag of
1: begin
  S.Write(zRel, szSng); // Relative Höhe von IP über OK. Gelände
end;
2: begin
  S.Write(xs, szSng); // x-Koordinate IP
  S.Write(ys, szSng); // y-Koordinate IP
  S.Write(zs, szSng); // absolute z-Koordinate IP
  S.Write(zRel, szSng); // relative z-Koordinate IP
end;
3: begin
  S.Write(xs, szSng); // s.o.
  S.Write(ys, szSng);
  S.Write(zs, szSng);
  S.Write(zRel, szSng);
  S.Write(w1, szSng); // Immissionspegel IP mit minimaler Wandhöhe
  S.Write(w2, szSng); // Immissionspegel IP mit maximaler Wandhöhe
end;
end;

result:= true;
end; { TOptWandHelper.StoreData }
{ ***** }

```

3.4 .OWR

Der kommentierte Pseudocode zeigt wie die Wandhöhenexportdatei durch die Optiwand Applikation geschrieben wird.

```

szSng : Single;
begin

  S:= TFileStream.Create (aFileName, fmCreate);
  S.Write(NoisePenalty, szSingle);
  S.Write(NumberOfRecords, szSingle);
  S.Write(BarrierSegmentLength, szSingle); //Wandlänge
  for iIP:= 0 to NumberOfRecords do
    begin
      S.Write(iIP, szSingle); //WallID
      S.Write(OptWallHeight, szSingle); //Optimized wall height of WallID
      S.Write(RoundedOptWallHeight, szSingle); //Rounded optimized wall height
    end;
  end;
end;

```


Variante für Optimierung

Hier wird – wie auch in anderen Berechnungsdialogen – die Variante für die Berechnung eingestellt.

Gruppe zu optimierender Wände

Wie bereits oben erwähnt, müssen die zu optimierenden Schallschutzwände einer speziellen Elementgruppe zugeordnet sein.

Wandhöhe: Minimale und maximale Höhe, Schrittweite

Diese Angaben legen fest, für welche Wandhöhen die Vorberechnung durchgeführt werden soll.

IP auswählen

Mit der Schaltfläche werden die Immissionspunkte ausgewählt, die für die Vorberechnung berücksichtigt werden.

Beurteilungszeitraum

Die Optimierung muss ggf. für verschiedene Zeiträume (Nacht oder DEN) getrennt durchgeführt werden. Der gewählte Zeitraum ist hier auszuwählen.

Dateien

Der Export der Vorausberechnung erfolgt über eine Binärdatei, die die Extension „.IOW“ (ImmiOptiWand) erhält. Der Dateiname ist in diesem Bereich einzugeben. Für die Eingabe gibt es drei Möglichkeiten, die in der Combobox ausgewählt werden:

- Dateinamen automatisch bilden:
Der Dateiname wird automatisch gebildet:
z.B. OptWandDemo2_E4V0Nacht
 - o Durch den Stamm der Projektdatei (OptwandDemo2)
 - o Durch Anhängen eines Kürzels für die Einstellung der Berechnungsparameter:
E4 = Berechnungseinstellung mit der Nummer 4 in der entsprechenden Immi-Liste
 - o Durch Anhängen eines Kürzels für die Variante:
V0 = Variante mit der Nummer 0 in der entsprechenden Immi-Liste
 - o Durch Anhängen des gewählten Beurteilungszeitraums.
Hier: „Nacht“. Diese Bezeichnung wird unter Umständen verkürzt, um ungültige Dateinamen zu vermeiden. So werden im Namen alle Zeichen nach dem Auftreten des ersten Sonderzeichens gelöscht.
So wird z.B. aus „Tag (6 - 22 Uhr)“ der Text: „Tag“.
- Dateinamen direkt eingeben
- **Optimierung starten**

Mit diesem Button wird die Optimierung gestartet.

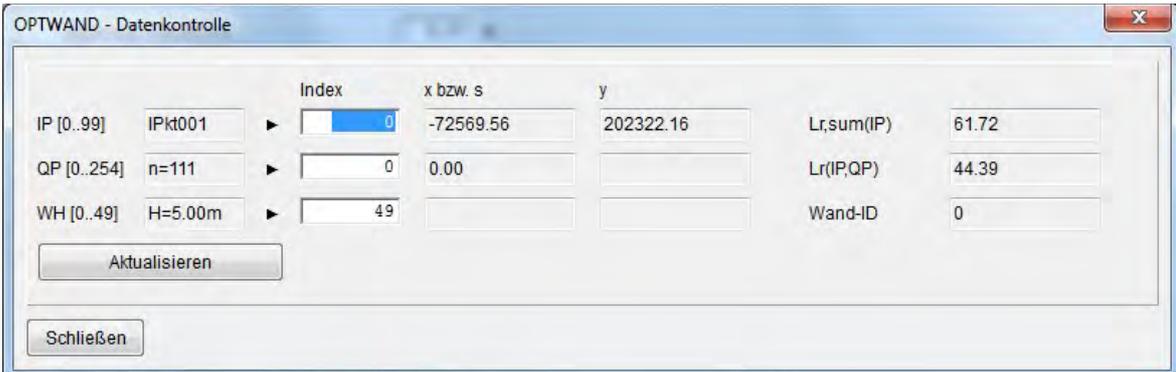
Dies bedeutet – etwas vereinfacht ausgedrückt - für die ausgewählten Immissionspunkte wird für alle vorgesehenen Wandhöhen eine Immissionsberechnung durchgeführt. Bei der Berechnung von Linienquellen wird die Quelle in Teilstücke zerlegt. Dabei hängt die Zerlegung von der Position des jeweiligen Immissionspunktes ab. Die Beiträge jeder Punktquelle werden für jeden Immissionspunkt und jede Wandhöhe in einer dreidimensionalen Matrix gespeichert (LrMatrix).

Aus dieser Matrix kann anschließend wieder das Gesamtergebnis durch energetische Addition der Einzelbeiträge zusammengesetzt werden. Am Ende der Berechnung werden LrMatrix und weitere notwendige Parameter in der Exportdatei gespeichert.

Datenkontrolle 1

Mit dieser Schaltfläche wird ein Dialog gestartet, der vor allem zu Testzwecken während der Programmentwicklung dient, aber auch geeignet ist, um die richtige Übernahme der Daten durch andere Programme als IMMI zu kontrollieren. Die Datenkontrolle ist erst nach einer Vorberechnung oder nach dem Laden einer Exportdatei möglich.

Das nächste Bild zeigt den Dialog zur Datenkontrolle.



		Index	x bzw. s	y		
IP [0..99]	IPkt001	0	-72569.56	202322.16	Lr,sum(IP)	61.72
QP [0..254]	n=111	0	0.00		Lr(IP,QP)	44.39
WH [0..49]	H=5.00m	49			Wand-ID	0

Aktualisieren

Schließen

Abbildung 6: Möglichkeit zur Datenkontrolle für einzelne Immissionspegel und den Anteilen einzelner Quellenabschnitte

Für ausgewählte Kombinationen von Immissionspunkt IP, Punktquelle QP und Wandhöhe WH werden verschiedenen Informationen angezeigt.

Die Indizes für die genannten Objekte werden entweder in der Spalte "Index" eingegeben oder mit den entsprechenden Pfeiltasten um 1 erhöht. Im ersten Fall erfolgt die Aktualisierung der angezeigten Werte beim Verlassen des Eingabefeldes oder durch Drücken der Schaltfläche „Aktualisieren“.

Erläuterung der einzelnen Felder:

In Spalte 1 sind die möglichen Wertebereiche für die Indizes zu IP, QP und WH angegeben. Startwert ist jeweils 0!

Der Wert n , der in der zweiten Spalte zu QP angegeben ist, ist die Anzahl der Punktschallquellen, die zum jeweiligen Immissionspunkt gehört. Wie bereits erläutert, variiert diese Zahl i.a. von IP zu IP.

Zu IP sind in der vierten und fünften Spalte die x- und y-Koordinaten in m angegeben. Zu QP ist in der vierten Spalte ein Wert angegeben, der wichtig ist für den Optimierungsalgorithmus:

SP ist der Schnittpunkt eines Schallstrahls von QP zu IP auf der zu optimierenden Schallschutzwand.

Dann ist s die laufende Koordinate auf der SSW bis zu dem Schnittpunkt SP. Wenn $s = -99$, dann existiert kein Schnittpunkt auf der SSW.

Zur Zeit ist nur die Optimierung einer einzigen SSW möglich. Diese Einschränkung kann vermutlich in Zukunft entfallen. Dann wird das Feld „Wand-ID“ in der letzten Spalte die laufende Nummer der SSW angeben, auf der der Schnittpunkt SP liegt.

Das Feld „Lr,sum(IP) gibt den Immissionspegel an, der durch Aufsummierung über die Anteile für den eingestellten Immissionspunkt und die gewählte Wandhöhe gebildet wird.

Dieser Vorgang der Aufsummierung gleicht dem entsprechenden Vorgang innerhalb des Optimierungsmoduls. Der Unterschied ist lediglich der, dass hier in IMMI mit der Auswahl der Wandhöhe eine Konfiguration untersucht wird, bei der alle Wandhöhen gleich sind, während im Optimierungsmodul die Wandhöhen abschnittsweise unterschiedlich sind.

Datenkontrolle 2

Mit diesem Button wird eine weitere Kontrolle gestartet: Für alle – konstanten – Wandhöhen werden alle Immissionspegel durch Rückrechnung aus den exportierten Vorberechnungsdaten gebildet und gelistet.

Protokoll

Hier wird ein Protokoll mit Informationen zur Vorberechnung angezeigt.

Vorberechnung laden

Eine bereits gespeicherte Vorberechnung wird geladen.
Anschließend kann – wie nach „Vorberechnung starten“ – die Datenkontrolle durchgeführt werden.

4.2 Matlab Prototyp

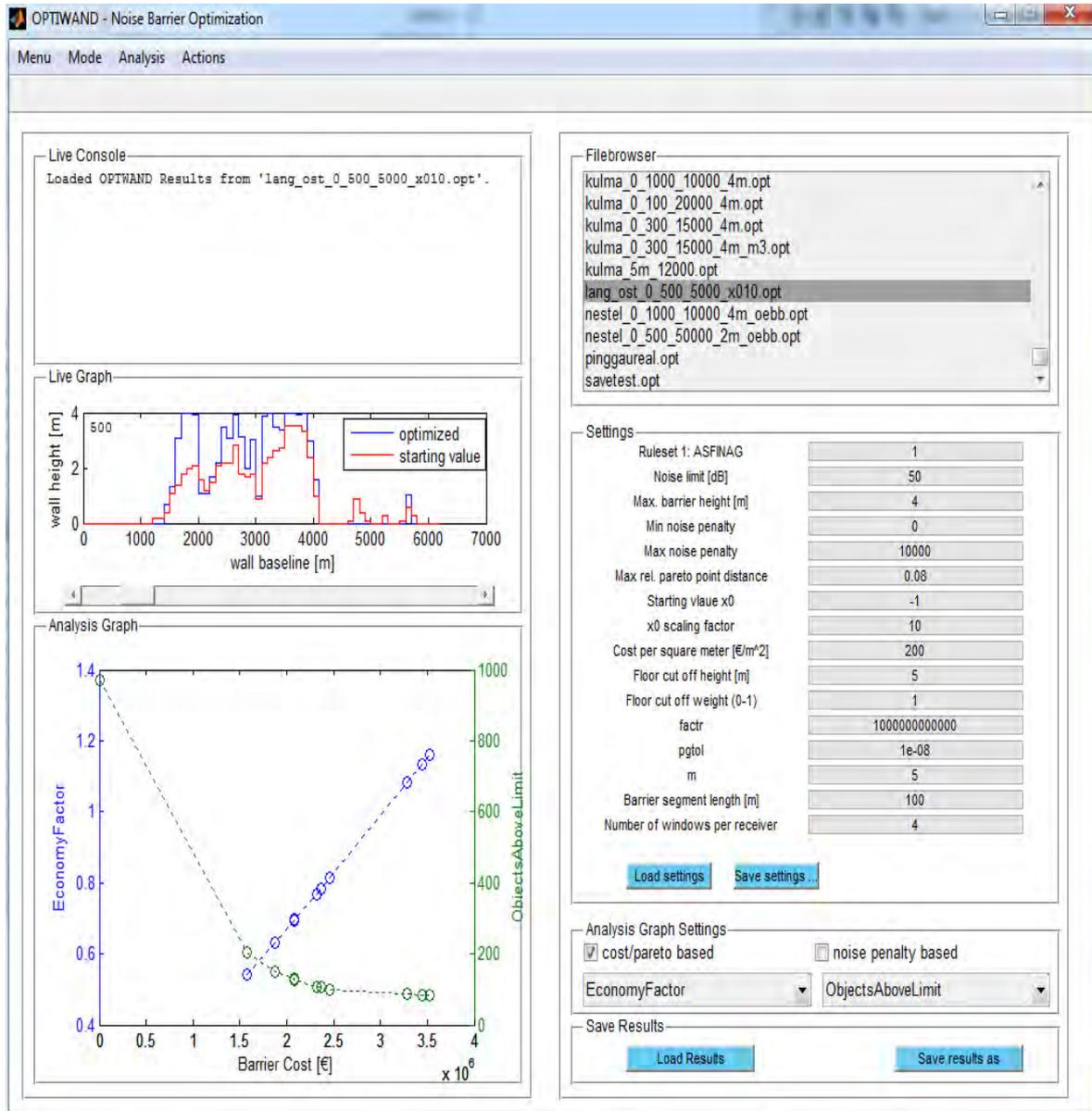


Abbildung 7: Die Benutzeroberfläche des Matlab Prototypen dient einerseits als Grundlage der Optiwand-App Entwicklung und erlaubt es, den Prototypen ohne Kenntnis des Codes und der Matlab Kommandozeile zu verwenden.

Der Matlab Prototyp wurde in der objektorientierten Form der Skriptsprache entwickelt. Die für den Test der Algorithmen und der Kostenfunktion relevanten Funktionen sind über die in Abbildung 7 gezeigte Benutzeroberfläche zugänglich.

Live Console

Es werden Informationen über die Aktivitäten des Prototypen wie z.B. Lesen und Schreiben einer Datei, Startwertberechnung oder Optimierung angezeigt.

Live Graph

Grafische Darstellung der Wandabschnittshöhen. Während der laufenden Optimierung mit dem L-BFGS-B Algorithmus werden in blau die Wandabschnittshöhen jeder einzelnen Iteration gezeigt. Zusätzlich wird der gewählte oder berechnete Startwert in rot eingeblendet. Optional werden in grün die auf 0,5 m Abschnitte gerundeten Wandabschnittshöhen dargestellt. Nach erfolgreicher Optimierung oder mit geladenen Resultaten dient der Rollbalken zur Auswahl der Noise Penalty P und der Darstellung der damit verbundenen optimierten Wandabschnittshöhen. Der gewählte Wert wird oben links in der Grafik angezeigt.

Analysis Graph

Nach erfolgreicher Optimierung oder mit geladenen Resultaten werden Pareto-Diagramme dargestellt.

Filebrowser

Mit Doppelklick wird die aus der Auswahlliste ausgewählte Datei, die jeweils passende Aktion, ausgeführt. IOW-Dateien werden geladen und für die eingestellte Wandsegmentlänge wird die dreidimensionale Schallintensitätsmatrix für den Optimierungsalgorithmus vorbereitet. Opt-Dateien sind zusammen mit den verwendeten Parametern gespeicherte Optimierungsergebnisse. Die gespeicherten Parameter werden beim Laden in ihre entsprechenden Felder übernommen und die Resultate werden im Live und Analysis Graph dargestellt. Es lassen sich bis zu zwei gespeicherte Resultate laden und gleichzeitig im Analysis Graph anzeigen und vergleichen.

Settings

Editierbare Felder mit den Optimierungsparametern, siehe Tabelle 2.

Settings, Optimierungsparameter	
Ruleset	ASFINAG/ÖBB, Auswahl der Richtlinien für Straße oder Schiene
Noise limit [dB]	Grenzwert
Max. barrier height [m]	Maximal erlaubte Wandhöhe
Starting value x0	Startwert: -1 für xinit Funktion, Werte von 0 bis maximaler Wandhöhe für eine gleichmäßig hohe Wand
x0 scaling factor	Skalierungsfaktor der xinit Funktion. Höherer Wert führt zu kleinerer Gesamtfläche der Startwertwand.
Cost per square meter [€/m ²]	Kosten pro Quadratmeter Wandfläche.
Barrier segment length	Wandabschnittslänge
Number of windows per receiver	Anzahl Fenster (bzw. Gebäudeöffnungen) pro Immissionspunkt.
Noise penalty start, step, end	Startwert, Schrittweite und Endwert der Noise Penalty P.
factr	L-BFGS-B Genauigkeitsabbruchbedingung: Dieser Faktor wird mit der Rechengenauigkeit multipliziert und bestimmt so auf wieviele Stellen genau die Kostenfunktion optimiert wird. Tieferer Wert für genauere Resultate. Da die Optiwand Applikation bereits ausreichend schnell rechnet, wird hier ein tiefer Wert von 10 ⁸ empfohlen.
pgtol	L-BFGS-B gradientenbasierte Abbruchbedingung: wird in den gerechneten Beispielen nur bei P = 0 aktiv, daher ist keine Änderung notwendig.
m	Zahl der metrischen Korrekturen bei der Approximation der limited-Memory Matrix des L-BFGS-B Algorithmus. Die Autoren des Algorithmus empfehlen Werte von 3 bis 20. Ein Einfluss auf die Optimierungsergebnisse wurde nicht beobachtet.
Max. number of Iteration	L-BFGS-B Abbruchbedingung. Bestimmt die maximale Anzahl der Iterationen. Die Kostenfunktionen der gerechneten Beispiele zeigen ein gutes Konvergenzverhalten und die Optiwand Applikation rechnet schnell genug. Eine Grenze von 1000 Iterationen genügt und diese Abbruchbedingung wird nie erreicht.

Tabelle 2: Beschreibung der Settings und Optimierungsparameter

Analysis Graph Settings

Darstellungsoptionen für den Analysis Graph. Es lassen sich alle Kombinationen aus kostenbasierten, Noise Penalty basierten und den in Tabelle gelisteten Kennzahlen darstellen.

Save Results

Schaltflächen, um Resultate zu speichern und laden.

Menüstruktur

- Menu
 - x0init: Berechnen des Startwerts nach Parameter „Starting Value x0“.
 - Read IOW: Einlesen der IOW-Datei.
 - Generate Pareto Front: Start des Optimierungsvorgangs.
- Mode
 - Adaptive NP: Ein adaptives Verfahren für die Wahl der Werteverteilung der Noise Penalty wird ausgewählt und die entsprechenden Parameterfelder unter „Settings“ angezeigt.
 - Fixed NP: Mit Start-, Endwert und Schrittweite definierte Werteverteilung der Noise Penalty wird ausgewählt und die entsprechenden Parameterfelder unter „Settings“ angezeigt.

- Analysis

verschiedene Darstellungsoptionen für den Analysis Graph

- show ground floor: zeige Pareto Diagramme für Immissionspunkte im Erdgeschoß.
- show upper floor: zeige Pareto Diagramme für Immissionspunkte in Obergeschoßen.
- show rounded: zeige Pareto Diagramme für auf 0,5m Elemente gerundete Wandgeometrien.

- show unrounded: zeige Pareto Diagramme für exakt optimierte, ungerundete Wandgeometrien.
- Actions
 - show noise immission values: Öffne separates Fenster mit einer Tabelle von allen Immissionspegeln für die im Live Graph dargestellte Wandgeometrie, vergleiche Abbildung 8.
 - show export analysis graph: Öffne separates Fenster mit dem aktuell dargestellten Analysis Graph.
 - export live graph: Öffne separates Fenster mit dem aktuell dargestellten Live Graph.
 - SA optimtool: Öffne Matlab Optimierungstoolbox mit Voreinstellungen für den Simulated Annealing Algorithmus, vergleiche Abbildung .

	L_opt	L_zero	Delta L_opt
1	50.9432	56.4713	5.5281
2	51.8414	57.6452	5.8038
3	51.4843	57.2738	5.7895
4	53.1907	60.1200	6.9293
5	53.5437	60.5355	6.9918
6	51.0097	57.2604	6.2507
7	48.2305	55.3481	7.1177
8	49.6012	56.9826	7.3815
9	53.1424	55.8325	2.6901
10	49.7817	53.3487	3.5670
11	47.7399	50.2284	2.4885
12	52.0519	54.6938	2.6419
13	48.8253	50.8232	1.9980
14	50.3490	54.3826	4.0335
15	48.1217	52.2266	4.1049
16	50.2016	54.2457	4.0441
17	50.0531	54.0492	3.9960
18	46.6557	50.2772	3.6216
19	49.8622	53.7253	3.8632
20	49.4648	53.3908	3.9261
21	47.5339	50.8464	3.3126
22	49.8201	53.6404	3.8203

Abbildung 8: Beispiel eines Matlab Pop-up Fensters mit Immissionspegeln aller Immissionspunkte. Für die gewählte optimale Wand in der ersten Spalte, ohne Wand in der zweiten Spalte und in der dritten Spalte, die Differenz zwischen erster und zweiter Spalte.

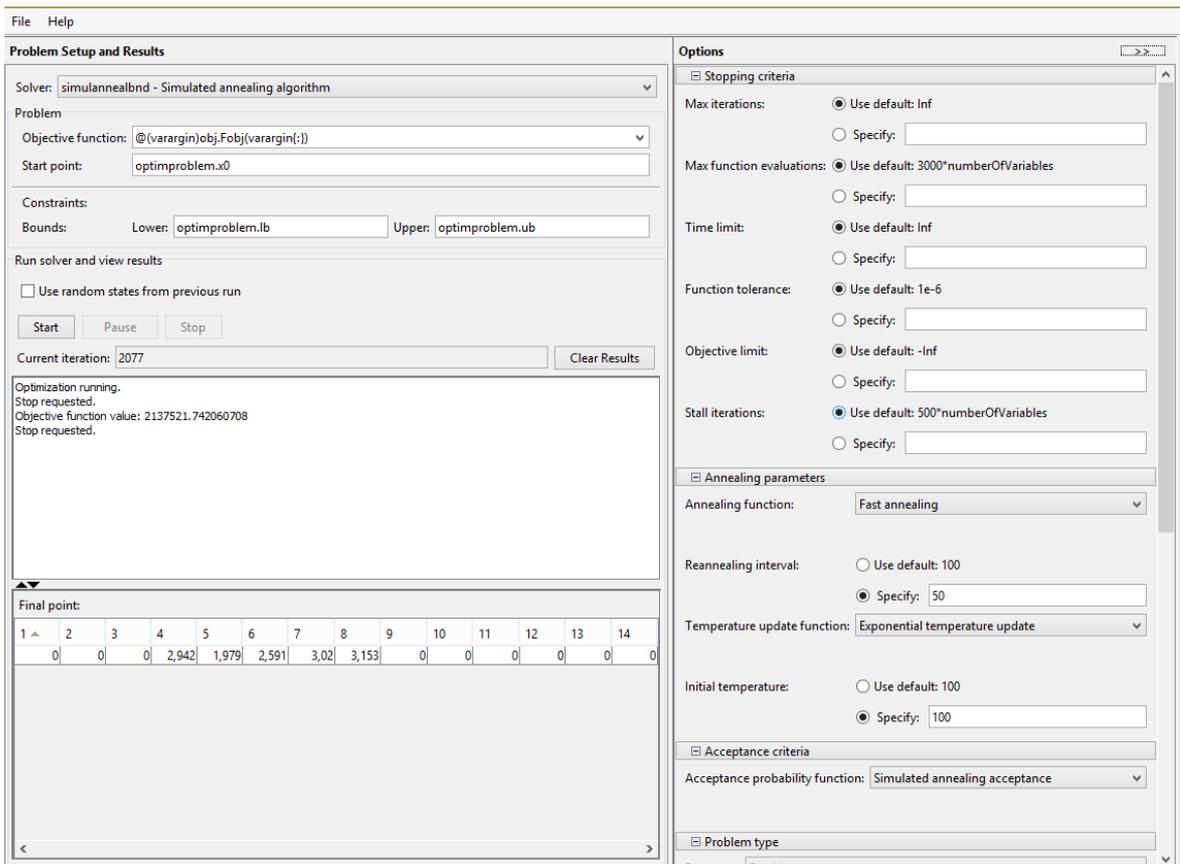


Abbildung 9: Die Benutzeroberfläche der Matlab Optimization Toolbox 6.2 wird direkt aus dem Matlab Prototypen aufgerufen und für eine Optimierung mit dem Simulated Annealing Algorithmus eingestellt. Es wird die im Live Graph eingestellte Noise Penalty P verwendet und die dabei mit dem L-BFGS-B Algorithmus gefundene optimale Lösung als Startwert eingetragen. Es stehen sämtliche Fähigkeiten der Matlab Optimization Toolbox zur Verfügung. Für nähere Information wird auf die online frei zugängliche Dokumentation von Matlab verwiesen.

4.3 OPTIWAND Applikation

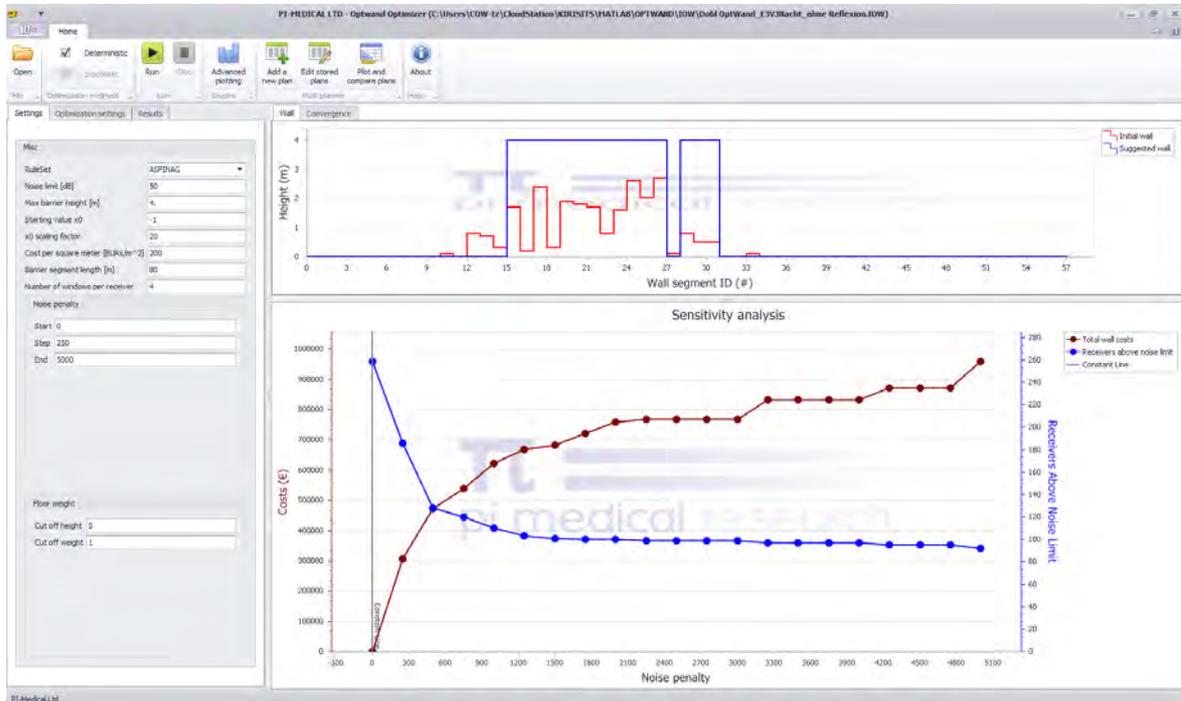


Abbildung 10: Benutzeroberfläche der Optiwand Applikation

Die OPTIWAND Applikation wurde für das Betriebssystem Windows (Microsoft Corporation, Redmont, USA) entwickelt. Da es im Gegensatz zu Matlab eine compilierte und auch auf Zeit optimierte Applikation ist, lassen sich damit Optimierungen für Pareto Diagramme wie in Abbildung 10 dargestellt, innerhalb weniger Sekunden berechnen. Die Funktionalität ist mit dem Matlab Prototypen weitgehend ident. Es können .IOW Dateien geladen, Optimierungsparameter nach Tabelle 2 eingestellt und die Ergebnisse, wie in Kapitel 5 illustriert, dargestellt werden. Neben der Darstellung der Parameter über dem Noise Penalty Wert erlauben erweiterte Grafikoptionen Diagramme nach Kosten und davon abhängig der verschiedenen Entscheidungsparameter. Diagramme für verschiedene Einstellungen (maximale Wandhöhen, Startwerte, Kostensätze etc..) können abgespeichert und in einem Untermenü grafisch miteinander verglichen werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine optimierte Wandgeometrie als .OWR Datei zu exportieren. Diese kann dann wiederum von IMMI eingelesen und ins 3D Geländemodell integriert werden. Damit ist dann eine weitere Detaillärmschutzplanung möglich.

5 RESULTATE

Die Beispiele A bis E beinhalten realistische und detaillierte Geländemodelle aus der Praxis. Zum Testen des Systems OPTIWAND wurden aber verschiedene, von der Realität abweichenden Emissionsdaten simuliert. Ebenfalls entsprechen die dargestellten Gebäude zwar realen Gegebenheiten, die Zuordnung als Wohngebäude mit Schutzwürdigkeit wurde für die dargestellten Vergleiche aber beliebig verändert. Aufgrund dieser Beispiele sind daher keinerlei Schlüsse auf die Situation in der Realität möglich. Eine namentliche Zuordnung zu einem in Wirklichkeit vorkommenden Untersuchungsgebiet wurde bewusst vermieden, um Missverständnisse auszuschließen.

5.1 Beispiel A



Abbildung 11: Lageplan zu Beispiel A mit blau gekennzeichneten schutzwürdigen Wohngebäuden und der rot gezeichneten Basislinie für die Lärmschutzwand parallel zum Straßenverlauf.

Abbildungen 11 und 12 zeigen den Lageplan und eine 3D-Darstellung der verwendeten IMMI-Projektdatei. Damit wurde bewusst ein sehr einfaches und vom Umfang kleines Lärmschutzprojekt gewählt, um die grundsätzliche Funktionsweise zu demonstrieren. In Beispiel A wird der Immissionsgrenzwert nur so weiter überschritten, dass alle Objekte ausreichend geschützt werden können, ohne die in der Dienstanweisung angegebene maximale Wandhöhe von 4m zu erreichen. Das Verhalten des Algorithmus im Grenzfall, dass der zweite Term der Kostenfunktion gegen Null geht, wird gezeigt.

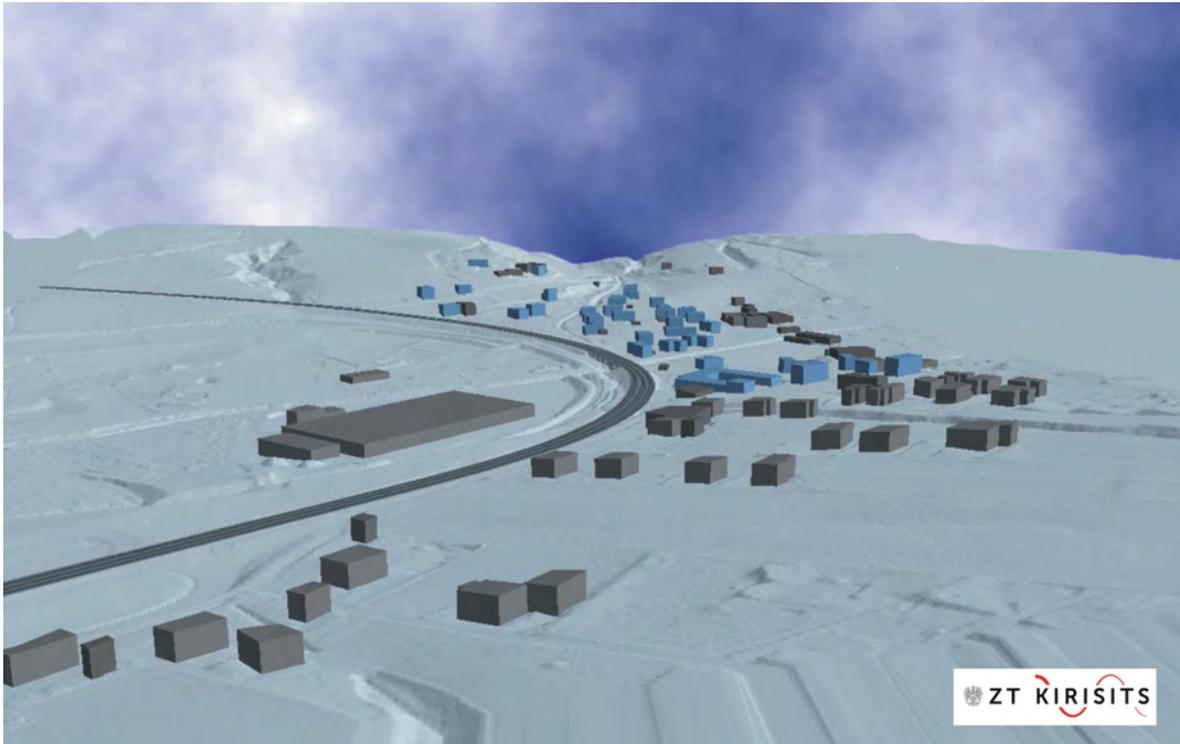


Abbildung 12: Beispiel A: 3D-Darstellung aus der Planungssoftware IMMI. Für den Schallschutz berücksichtigte Gebäude werden blau dargestellt.

Die verwendeten Optimierungsparameter sind Tabelle 3 zu entnehmen. Für Abbildung 15 wurde der x_0 init Skalierungsfaktor auf 20 gesetzt, um zu vermeiden, dass der Algorithmus im lokalen Minimum von x_0 init festsetzt. (Siehe Kapitel 5.1.1) Mit $P = 0$ wird die Grenzwertüberschreitung ohne Bedeutung bemessen und entsprechend keine Wand als optimale Lösung gefunden. Mit steigender P beobachten wir eine mit den Kosten annähernd linear sinkende Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte. Ab $P = 4000$ beginnt eine deutliche Sättigung einzutreten. Die optimale Wandgeometrie weist nun solche Immissionswerte auf, dass die Mehrheit der Objekte unter dem Grenzwert liegt und somit nicht zum zweiten Term der Kostenfunktion beitragen. Die wenigen verbleibenden Objekte liegen nur knapp über dem Grenzwert (vergleiche Tabelle) und die Lärmschutzwandeffizienz sinkt mit steigender Wandhöhe im Allgemeinen.

Szenario	ASFINAG
Grenzwert [dB]	50
Maximale Wandhöhe [m]	4
Noise Penalty P	0:500:8000
Startwert	xinit
x0init Skalierungsfaktor	4
Kosten pro m ² [€/m ²]	200
Wandsegmentlänge	50
Gebäudeöffnungen pro Immissionspunkt	2
factr	10 ¹⁰
pgtol	10 ⁻⁸
m	5

Tabelle 3: Beispiel A: Optimierungsparameter

Abbildungen 13 und 14 zeigen die Entscheidungsgrundlage bildenden Beziehungen zwischen Wandkosten, Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte (Fassadenpunkte) und Wirtschaftlichkeitsfaktor.

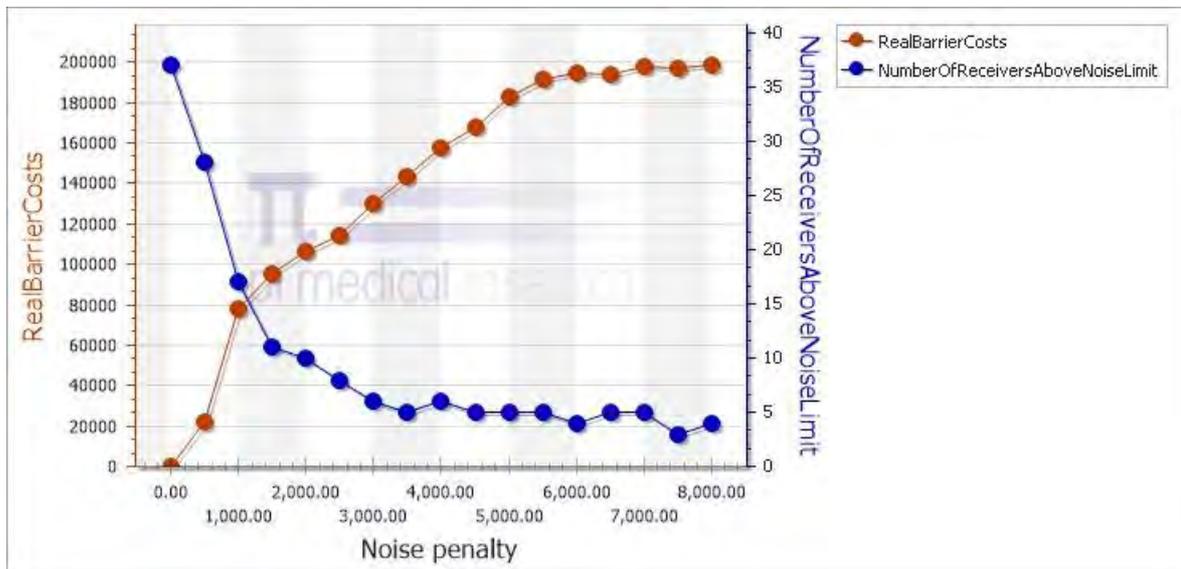


Abbildung 13: Beispiel A: Noise Penalty basierter Plot. Wandkosten verglichen mit der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

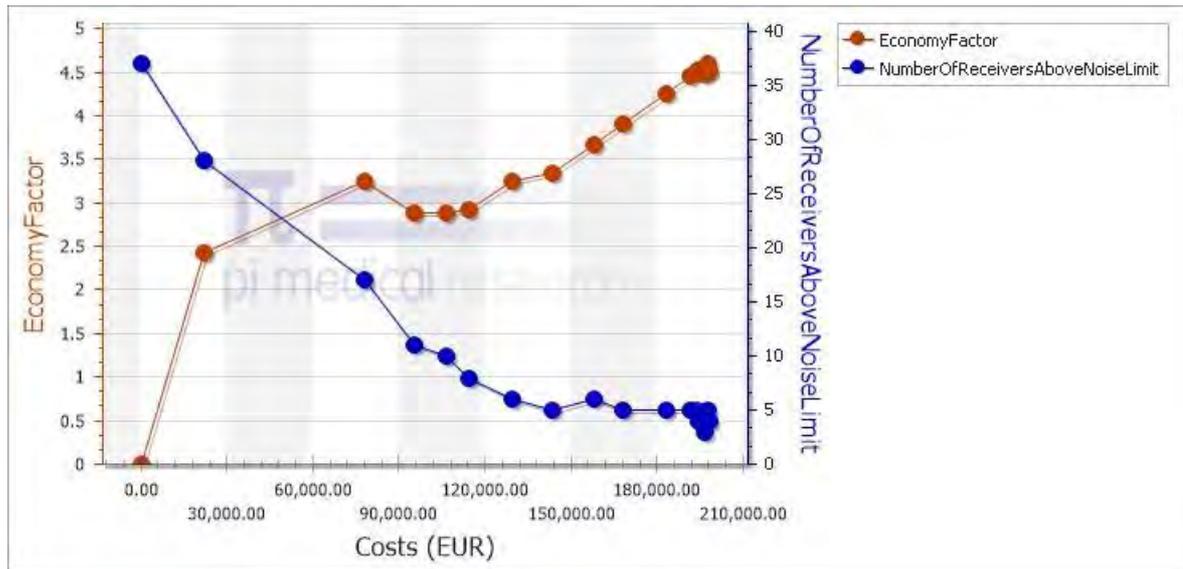


Abbildung 14: Beispiel A: Kostenbasierter Plot. Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und der Anzahl grenzwertüberschreitender Fassadenpunkte.

Der Wirtschaftlichkeitsfaktor weist bei Wandkosten von etwa 100.000 € ein Minimum auf, das zufällig knapp unter 3 liegt. Das für die Lärmschutzwandplanung ideale Kosten-Nutzen-Verhältnis muss aber nicht zwingend beim minimalen Wirtschaftlichkeitsfaktor liegen. Dem Entscheidungsträger stehen Diagramme mit zusätzlichen Kennzahlen zur Verfügung.

Die in der punktuell unstetigen Kostenfunktion begründeten Fluktuationen zeigen eine Schwäche des gradientenbasierten Algorithmus. Ein Objekt kann nur diskret über oder unter dem Grenzwert sein und mit größerer Noise Penalty wird diese Unstetigkeit stärker. Aus mathematischer exakter Sicht ist dieses Verhalten absolut unerwünscht und bleibt aus realistischer physikalischer Sicht jedoch vernachlässigbar. Die Rundungsabweichungen durch die Limitierung auf 0,5 m Wandelemente sind zumindest von gleicher Größenordnung (vergleiche Kapitel 5.7). Die für den Lärmschutzwandplaner entscheidende grobe Wandgeometrie bleibt trotz Fluktuationen erhalten.

Abbildung 15 zeigt wie P überproportional erhöht werden muss um weitere Wohngebäude bis unter den Grenzwert zu schützen.

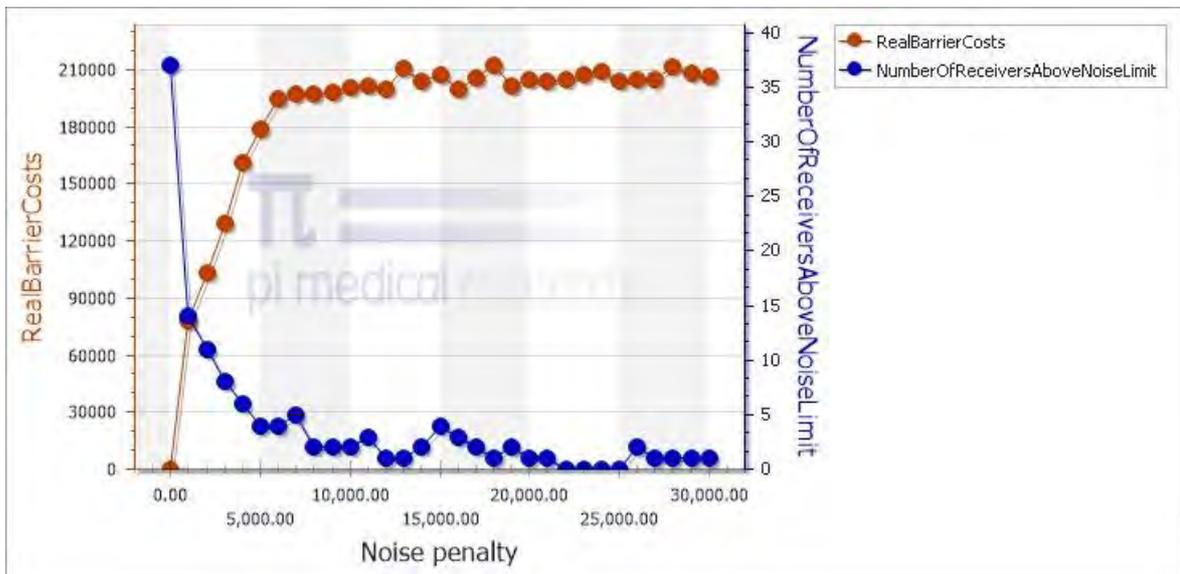


Abbildung 15: Beispiel A: Noise Penalty basierter Plot. Vergleich zwischen Wandkosten und der Anzahl grenzwertüberschreitender Fassadenpunkte. Die Sättigung und überproportional nötige Steigerung von P sind deutlich zu erkennen.

In Abbildung 16 lassen sich direkt die absoluten Kosten, welche den Wirtschaftlichkeitsfaktor von 3 überschreiten und laut Dienstanweisung durch eine dritte Partei getragen werden müssen, ablesen. Abbildung 17 zeigt die durchschnittliche Immissionspegeldämpfung über alle Immissionspunkte, wobei nur jene Anteile berücksichtigt sind, die den Grenzwert überschreiten. Der Lärmschutzwandplaner könnte so argumentieren, dass Kosten die 20 - 40% über jenen mit minimalem Wirtschaftlichkeitsfaktor liegen, gerechtfertigt sind. Aus den Diagrammen können wir schließen, dass bis zu Wandkosten von rund 140.000 € noch eine prozentuell deutliche Steigerung der Lärmschutzwirkung sowohl in der Anzahl der grenzwertüberschreitenden Fassadenpegel als auch der durchschnittlichen Immissionspegelreduktion eintritt. 16.000 € der Wandkosten müssten laut Dienstanweisung durch eine dritte Partei getragen werden.

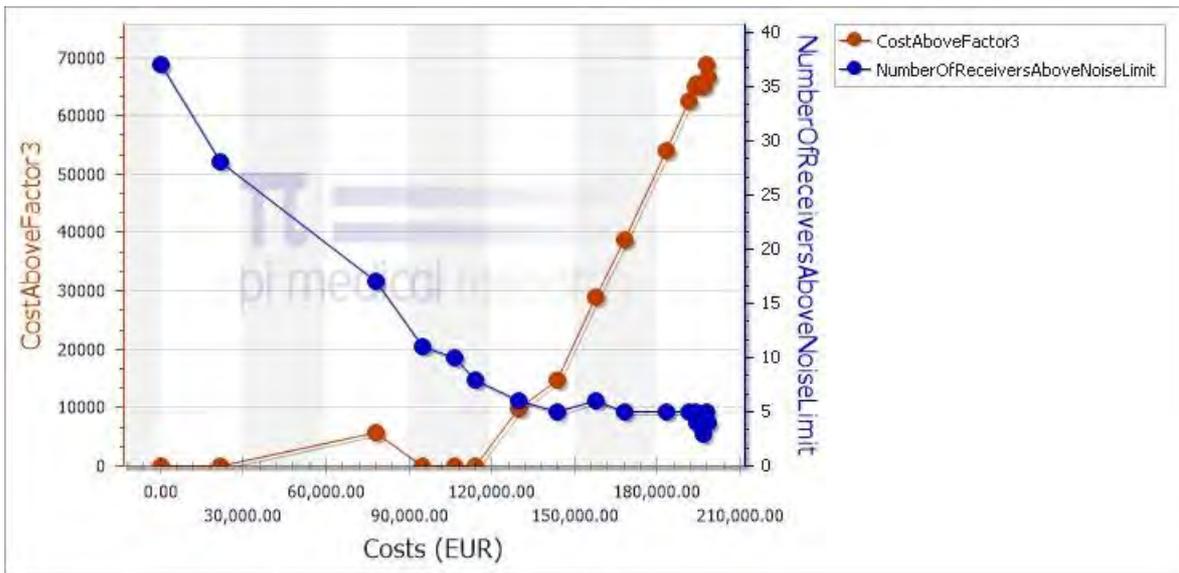


Abbildung 16: Beispiel A: Kostenbasierter Plot. Vergleich der absoluten Kosten, welche den Wirtschaftlichkeits Faktor von 3 überschreiten und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte. Der Entscheidungsträger kann direkt ablesen, wieviele Kosten, laut Dienstanweisung, durch eine dritte Partei zu tragen wären.

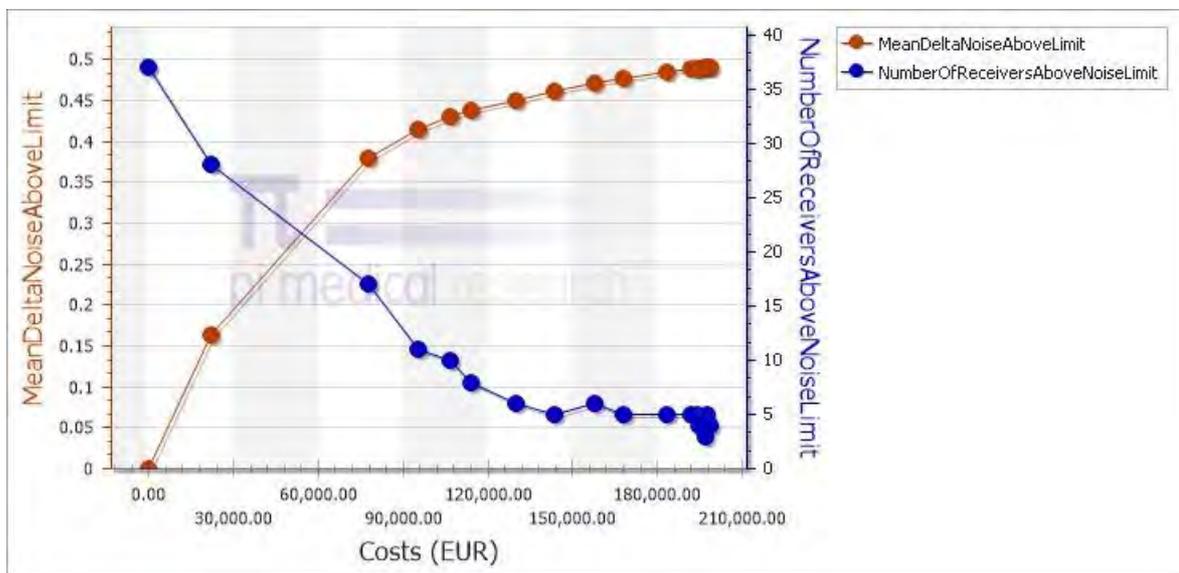


Abbildung 17: Beispiel A: Kostenbasierter Plot. Vergleich zwischen der durchschnittlichen Immissionspegelreduktion über alle Immissionspunkte (nur Anteile über dem Grenzwert) und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

5.1.1 Startwertvergleich und x0init

Die Wahl des Startwerts kann das Optimierungsergebnis deutlich beeinflussen. Abbildung 18 zeigt, dass von vornherein keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden kann, welcher x_0 Skalierungsfaktor zu besseren Ergebnissen führt.

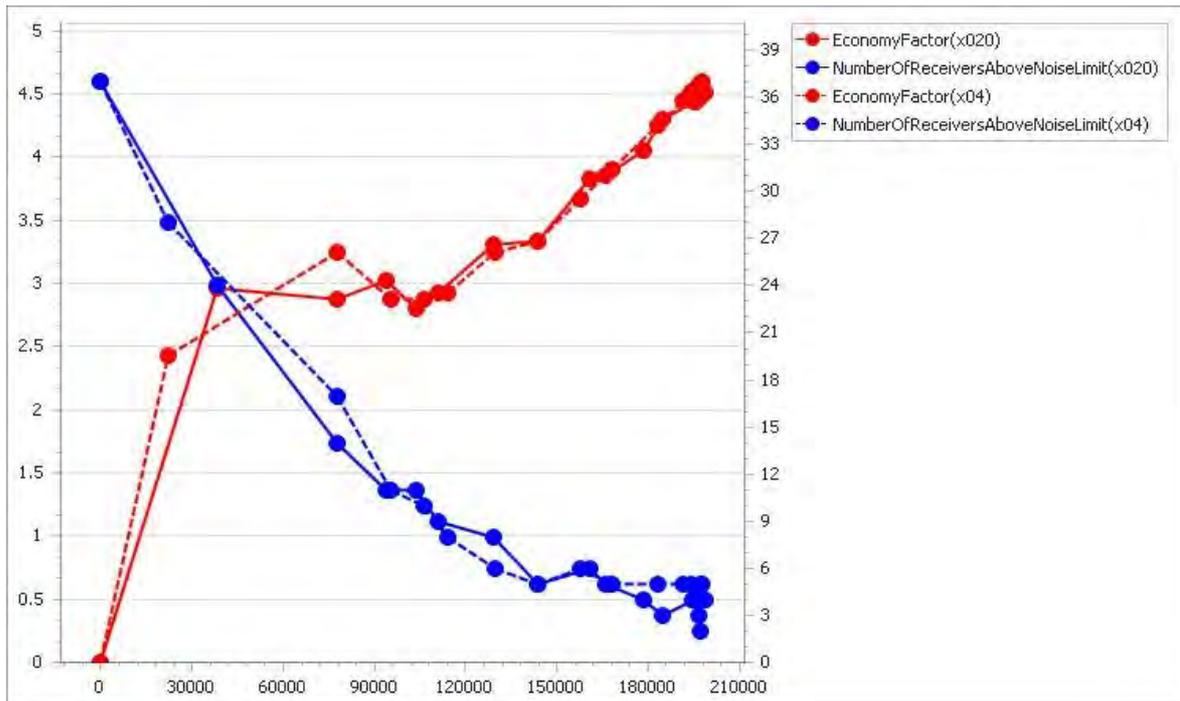


Abbildung 18: Beispiel A: Kostenbasierter Startwertvergleich zwischen x_0 Skalierungsfaktor 20 (durchgezogene Linie) und 4 (gestrichelte Linie). Wirtschaftlichkeitsfaktor auf der linken Achse in rot, Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte auf der rechten Achse in blau. P von 0 bis 30'000.

X0init Skalierungsfaktor	4	20
Absolutwert Kostenfunktion	231'300	204'340
Objekte über Grenzwert	2	0
Mittlere Pegelreduktion	0,49	0,49
Wandkosten	229'750	204'340
Wirtschaftlichkeitsfaktor	5,22	4,64

Tabelle 4: Beispiel A: Startwertvergleich zwischen x_0 Skalierungsfaktor 4 und 20 bei $P = 22'000$.

5.1.2 Vergleich mit manueller Planung

Abbildung 19 zeigt vier mit x eingezeichnete manuelle Planungsversuche. Der Planer kennt die Lage und Form der Pareto Front nicht und liefert Ergebnisse, die deutlich entfernt von Pareto Optimalen Punkten sind. Er ist sich dessen aber nicht bewusst, ohne auf die optimierten Ergebnisse Zugriff zu haben.

Das inverse Optimierungsverfahren liefert mit viel weniger Zeitaufwand besser optimierte und umfassendere Ergebnisse.

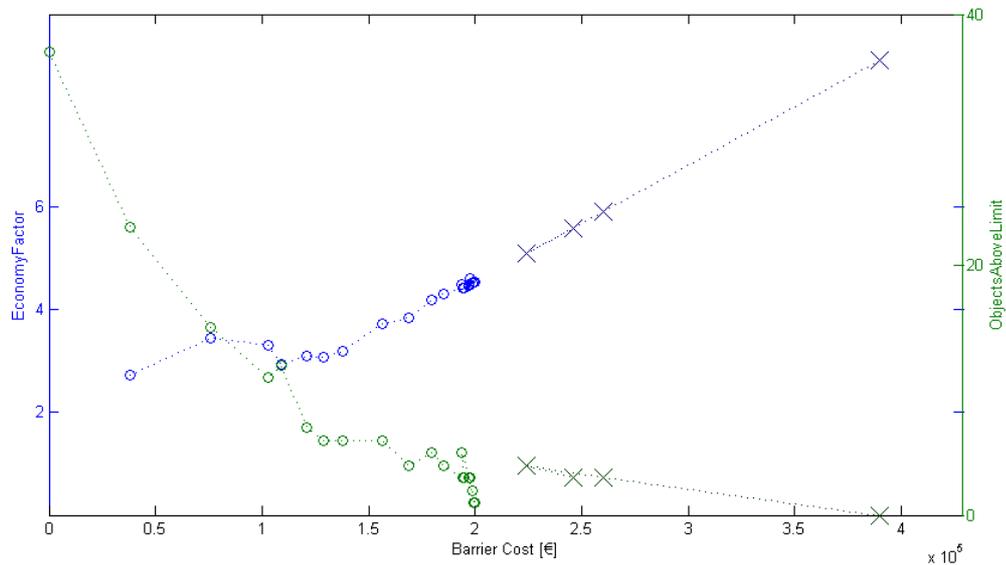


Abbildung 19: Beispiel A: Kostenbasierter Pareto Plot. Wirtschaftlichkeitsfaktor verglichen mit der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte. Mit x sind die Ergebnisse des manuellen Planungsprozesses eingezeichnet.

5.2 Beispiel B



Abbildung 20: Lageplan zu Beispiel B mit blau gekennzeichneten schutzwürdigen Wohngebäuden und der rot gezeichneten Basislinie für die Lärmschutzwand parallel zum Straßenverlauf.

Abbildungen 20 und 21 zeigen den Lageplan und die 3D-Darstellung der verwendeten IMMI-Projektdatei. Die auffallende geometrische Anordnung mit zwei Häusergruppen, die nahe an einem gekrümmten Autobahnabschnitt heranreichen, macht dieses Beispiel besonders interessant und erlaubt uns die Fähigkeiten der Optimierungsapplikation zu demonstrieren. Die Lärmemissionswerte sind so hoch und einige Objekte so nah an der Lärmquelle, dass selbst mit einer Lärmschutzwand von laut Dienstanweisung maximaler Höhe nie alle Fassadenpegel unterhalb des Grenzwerts reduziert werden können.



Abbildung 21: Beispiel B: 3D-Darstellung aus der Planungssoftware IMMI. Für den Schallschutz berücksichtigte Gebäude werden blau dargestellt.

Anhand der mit der OPTIWAND Applikation erstellten Pareto Plots werden die Resultate eines Optimierungslaufs ausführlich präsentiert und diskutiert. Die Optimierungsparameter sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Abbildung 22 zeigt die optimierten Wandgeometrien für $P = 750$, 2250 und 5000 zusammen mit dem durch die x0init Funktion kalkulierten Startwert und einer manuell durchgeführten Planung. Die Distanzzählung der Wand-Basislinie beginnt in oben links in Abbildung 21 und führt der Autobahn entlang nach unten rechts.

Wir können sofort feststellen, dass langsam ansteigende Wandhöhen mit der nach der Dienstanweisung erstellten Objective Function nicht optimal sind. Zugleich ist dies eine der Stärken des Algorithmus: optimaler Anfang und Ende der Lärmschutzwandkonstruktion werden rasch und zuverlässig gefunden.

Szenario	ASFINAG
Grenzwert [dB]	50
Maximale Wandhöhe [m]	4
Noise Penalty P	0:250:5000
Startwert	xinit
x0init Skalierungsfaktor	4
Kosten pro m ² [€/m ²]	200
Wandsegmentlänge	100
Gebäudeöffnungen pro Immissionspunkt	2,4
factr	10 ⁻¹⁰
pgtol	10 ⁻⁸
m	5

Tabelle 5: Beispiel B: Verwendete Parameter der OPTIWAND Applikation

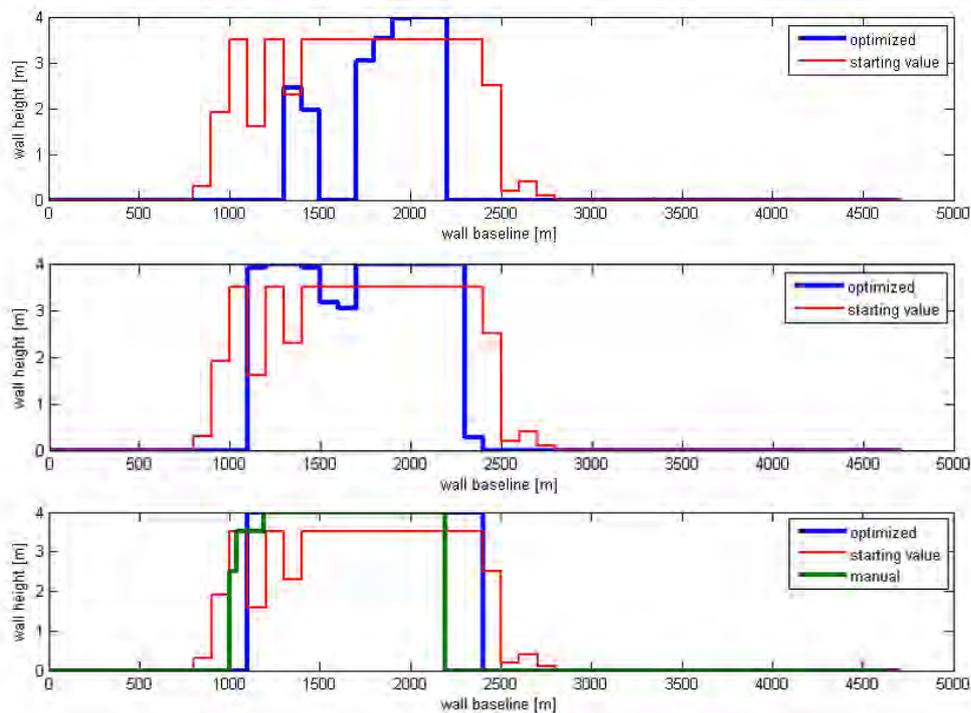


Abbildung 22: Beispiel B: Optimierte Wandgeometrien für verschiedene Noise Penalties P. Oben P = 750, mitte P = 2250, unten P = 5000. Eine durch manuelle Planung entworfene Wandgeometrie ist grün eingezeichnet.

Wir beobachten, wie für $P = 750$ zunächst zwei einzelne Wandabschnitte als optimale Lösung gefunden werden. Die etwas dichtere und näher an die Lärmquelle heranreichende Häusergruppe, in der Mitte der 3D-Darstellung, erhält den größeren Wandabschnitt, so wie wir dies erwarten würden. Dieser größere Wandabschnitt erreicht schnell die maximale erlaubte Wandhöhe von 4 m, womit bei $P = 2250$ nur vergrößern des kleineren Wandabschnitts und füllen der Lücke zwischen beiden Abschnitten übrig bleibt. $P = 5000$ zeigt deutlich wie eine Sättigung der optimalen Wand eintritt. Es ist ineffizient, eine längere Lärmschutzwand zu bauen und eine weitere Erhöhung ist aufgrund der Limitierung nicht erlaubt. Durch eine überproportionale Steigerung der Noise Penalty ist eine weitere Verlängerung zu erzielen, jedoch nur in engen Grenzen. Der Algorithmus zeigt hier eindeutig die Fähigkeit, den wirtschaftlichen Nutzen von weiteren Lärmschutzelementen zu erkennen und berechnet dementsprechend keine unnötigen Lärmschutzwandgrößen.

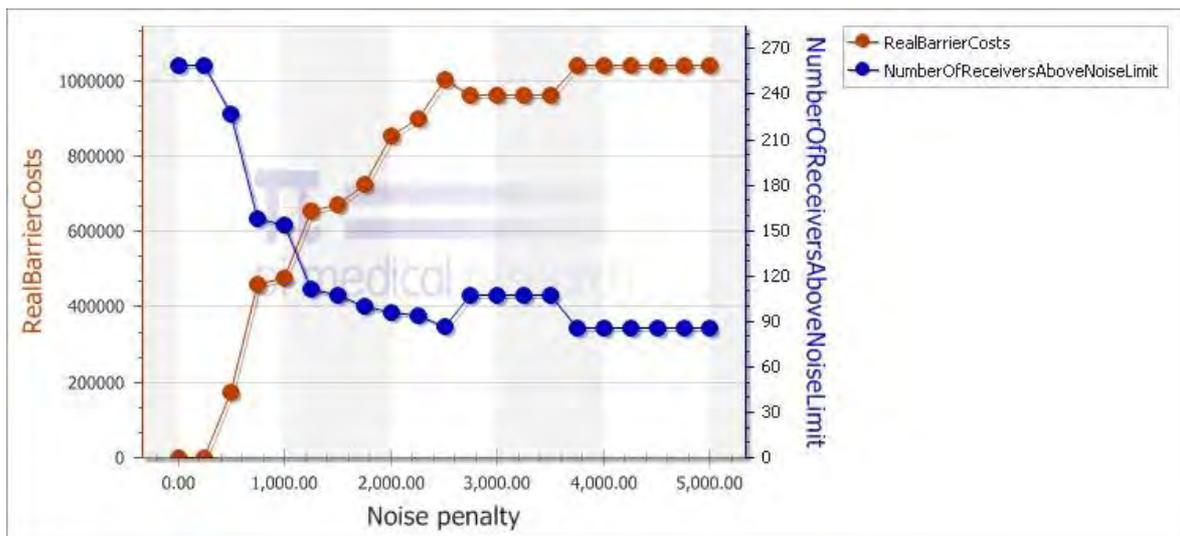


Abbildung 23: Beispiel B: Noise Penalty basierter Pareto Plot. Vergleich zwischen Wandkosten und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

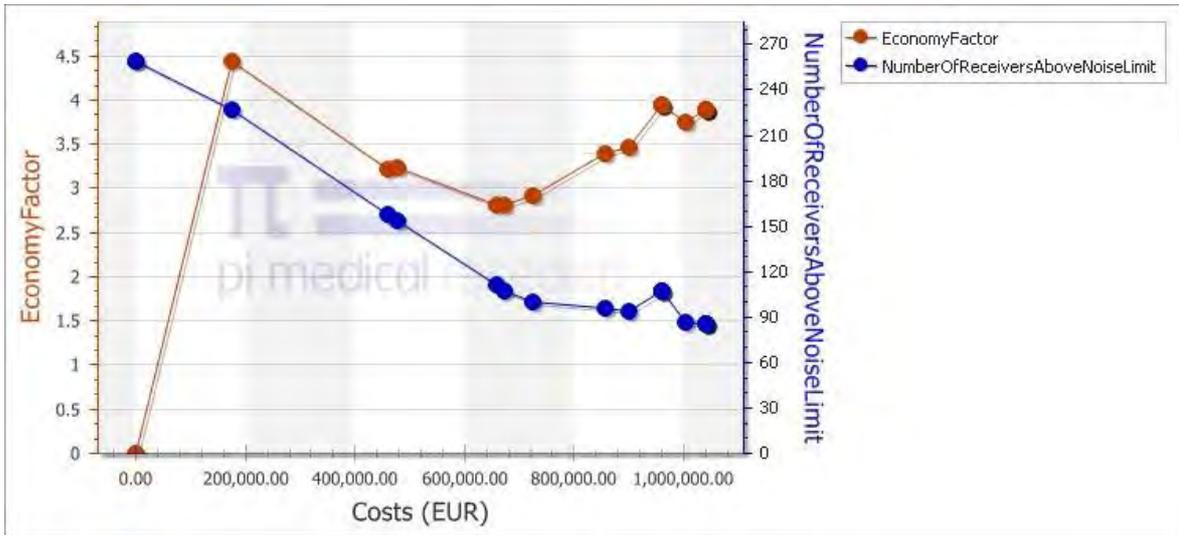


Abbildung 24: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

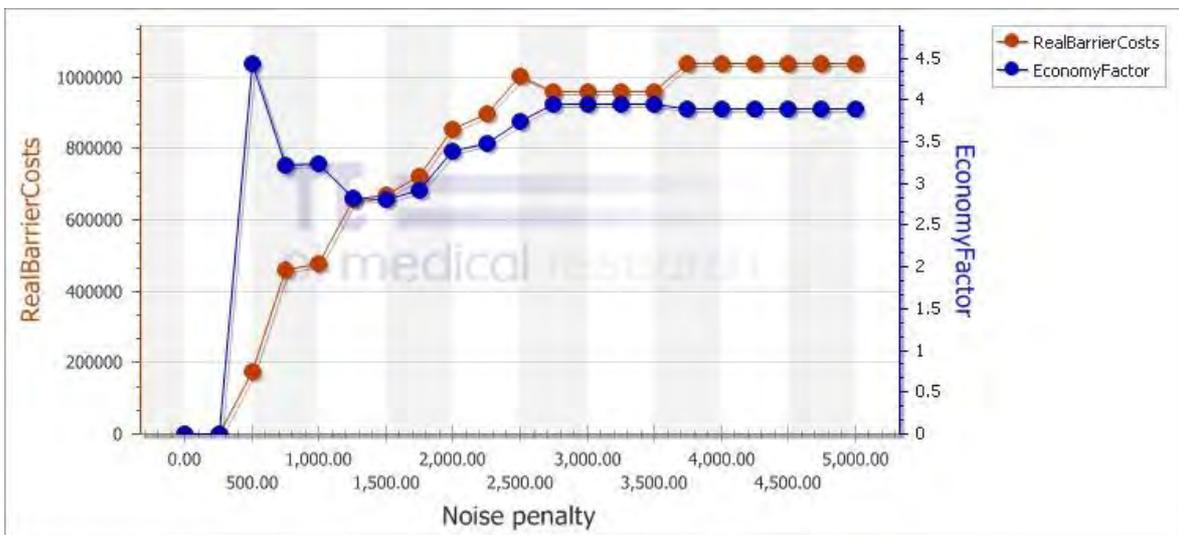


Abbildung 25: Beispiel B: Noise Penalty basierter Pareto Plot. Vergleich zwischen den absoluten Wandkosten und dem Wirtschaftlichkeitsfaktor.

Die Abbildungen 23, 24 und 25 zeigen die aussagekräftigsten Pareto Plots. Die Noise Penalty basierten Plots zeigen deutlich die Sättigung der Lärmschutzwandgröße, die Kurven verhalten sich asymptotisch. Wir stellen fest, dass für tiefe P keine Wand als optimale Lösung gefunden wird. Grenzwertüberschreitungen werden zu wenig gewichtet um den Bau einer Lärmschutzwand zu begründen. Mit steigender P wird zunächst eine kleine Wand optimiert, die eine entsprechend geringe Anzahl Immissionspunkte bis unter den Grenzwert schützt. Der Wirtschaftlichkeitsfaktor ist hoch, weil für viele Objekte passiver Lärmschutz effizienter wäre. Die Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte und der Wirtschaftlichkeitsfaktor sinken dann annähernd linear mit steigenden Kosten, bis die maximale Wandhöhe mehr und mehr erreicht wird und Sättigung eintritt. Es wird ein minimaler Wirtschaftsfaktor erreicht, der zufällig nahe unter dem in der Dienstanweisung definierten Limit von 3 liegt.

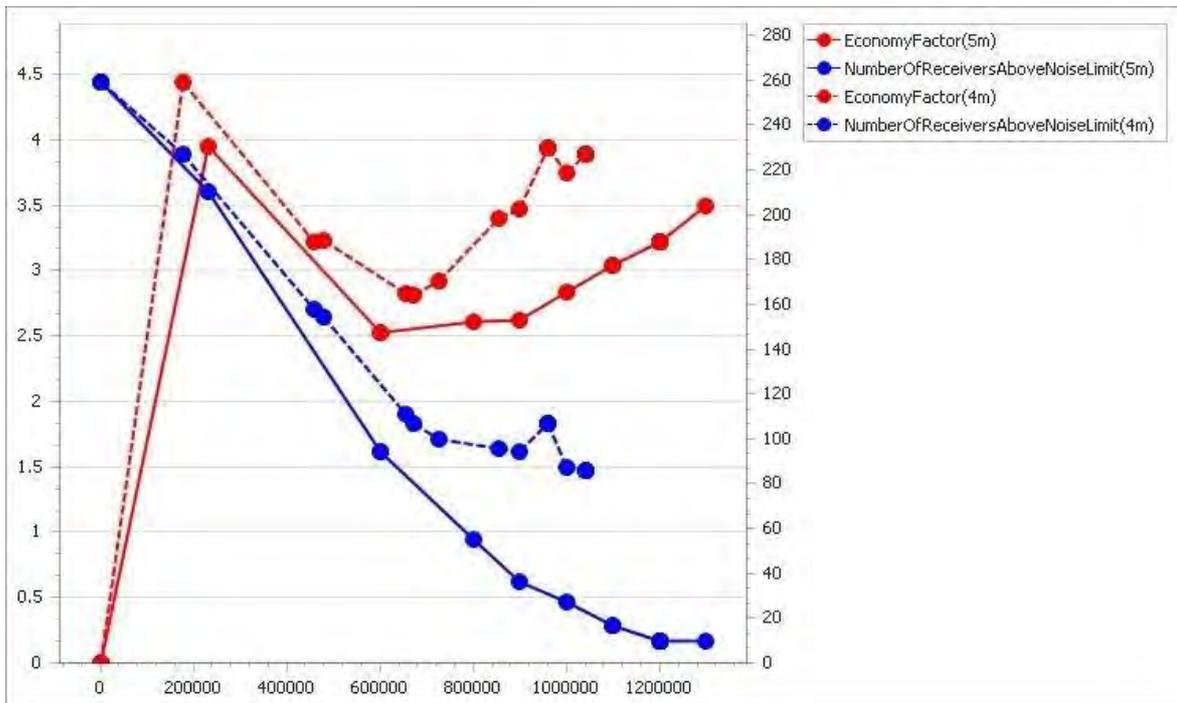


Abbildung 26: Beispiel B: Kostenbasierter Vergleich von maximaler Wandhöhe 4 m und 5 m. Wirtschaftlichkeitsfaktor auf der linken Achse in rot und Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte auf der rechten Achse in blau. Mit höheren Wänden lassen sich deutlich wirtschaftlichere Wandgeometrien konstruieren und erwartungsgemäß zusätzliche Objekte bis unter den Grenzwert schützen.

Die Applikation OPTIWAND erlaubt eine in Abbildung 26 illustrierte Gegenüberstellung von verschiedenen maximalen Wandhöhen als Ausgangsparameter. Sehr deutlich ergibt die Erweiterung von 4 m auf 5 m Maximalhöhe mehr Potential, Fassadenpunkte unter den Grenzwert zu schützen. Damit wird auch der Wirtschaftlichkeitsfaktor günstiger und erlaubt nach Dienstanweisung weit höhere investierte Wandkosten und damit höhere Schutzwirkung.

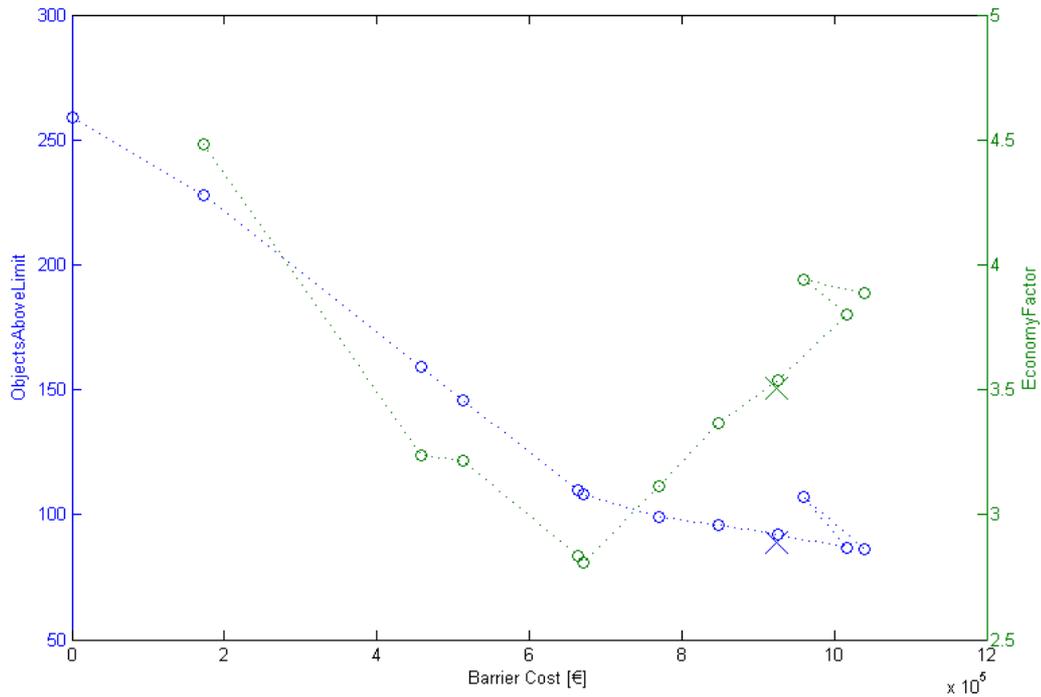


Abbildung 27: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Wirtschaftlichkeitsfaktor verglichen mit der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte. Mit x ist das Ergebnis der manuellen Planung eingezeichnet.

In Abbildung 27 ist mit x ein manueller Planungsversuch eingezeichnet, der sich an einer real konstruierten Lärmschutzwand orientiert. Wir sehen die Übereinstimmung zwischen manuellem Punkt und Pareto Front als Beweis für die Behauptung, mit dem L-BFGS-B Algorithmus Pareto optimalen Punkte zu finden. Die geringfügige Abweichung ist auf die fix definierten, relativ langen (100m) Wandabschnitte zurückzuführen. Gleichzeitig können wir ablesen, dass mit weniger Kosten eine beinahe gleichwertig effiziente und wirtschaftlichere Wandgeometrie realisiert werden kann.

Die folgenden Abbildungen illustrieren die vielfältigen Kombinationen zur grafischen Darstellung der Entscheidungsgrundlagen.

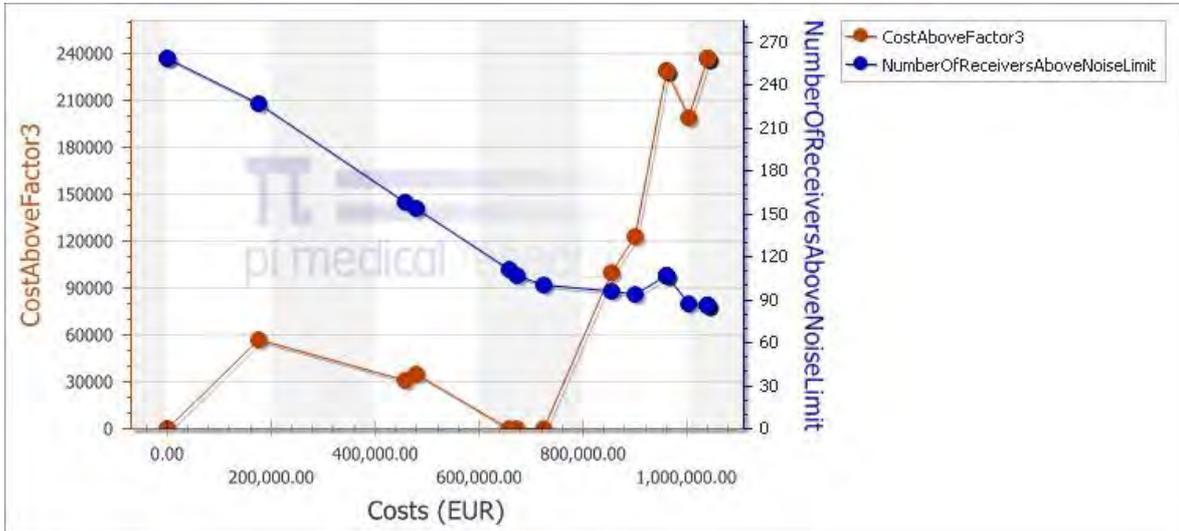


Abbildung 28: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Vergleich der absoluten Kostenüberschreitung des Wirtschaftlichkeitsfaktors 3 und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.



Abbildung 29: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und den absoluten kompensierten passiven Kosten.

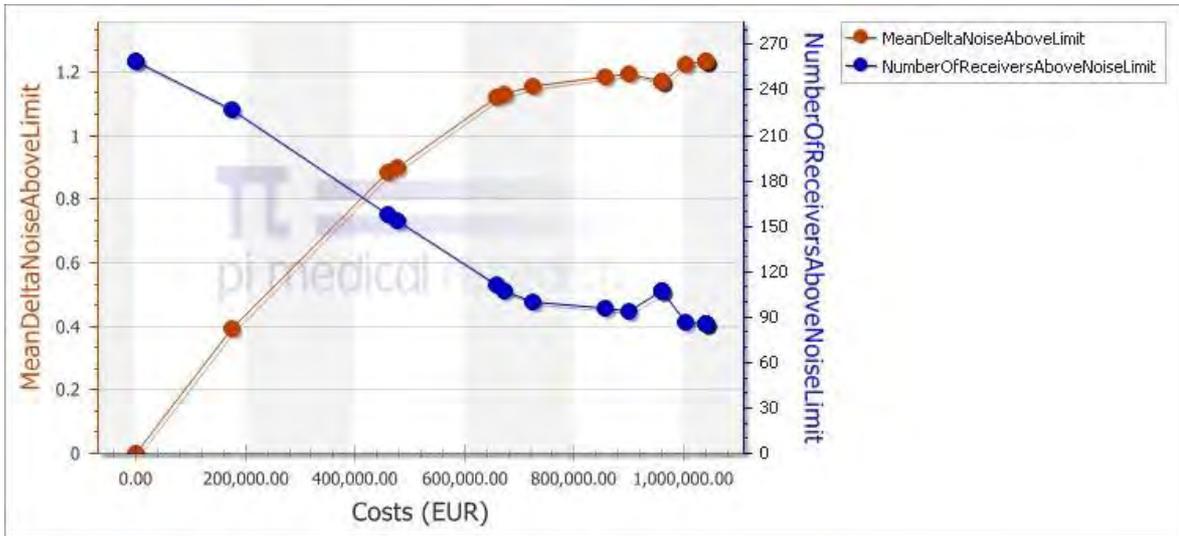


Abbildung 30: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Vergleich zwischen der über dem Grenzwert stattfindenden durchschnittlichen Lärmreduktion und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

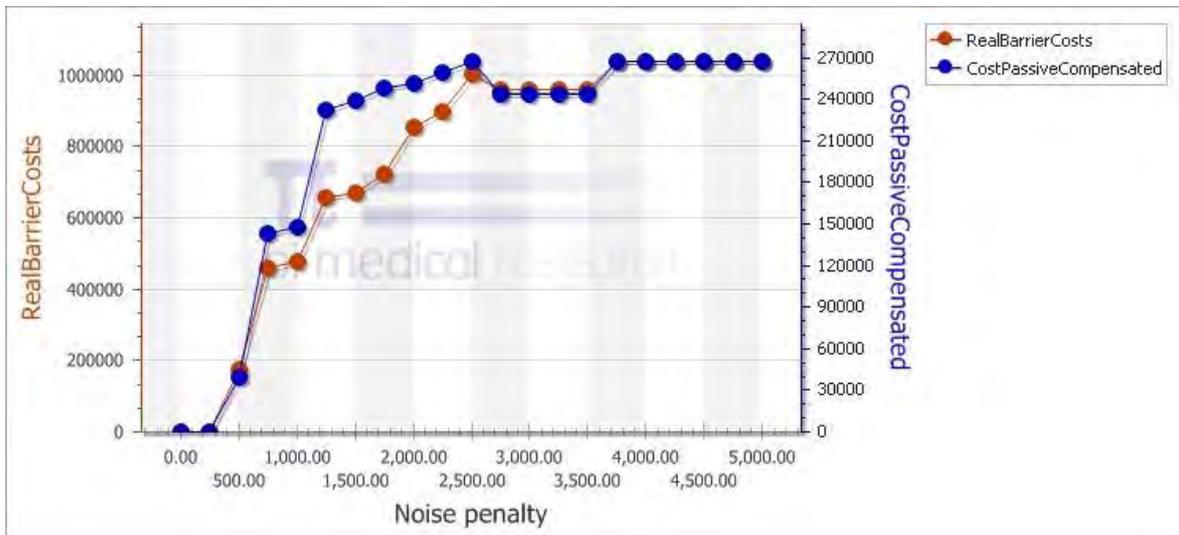


Abbildung 31: Beispiel B: Noise Penalty basierter Pareto Plot. Vergleich zwischen den absoluten Wandkosten und den absoluten kompensierten passiven Kosten.



Abbildung 32: Beispiel B: Kostenbasierter Pareto Plot. Vergleich zwischen dem Absolutwert der Objective Function und der Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

5.2.1 Startwertvergleich

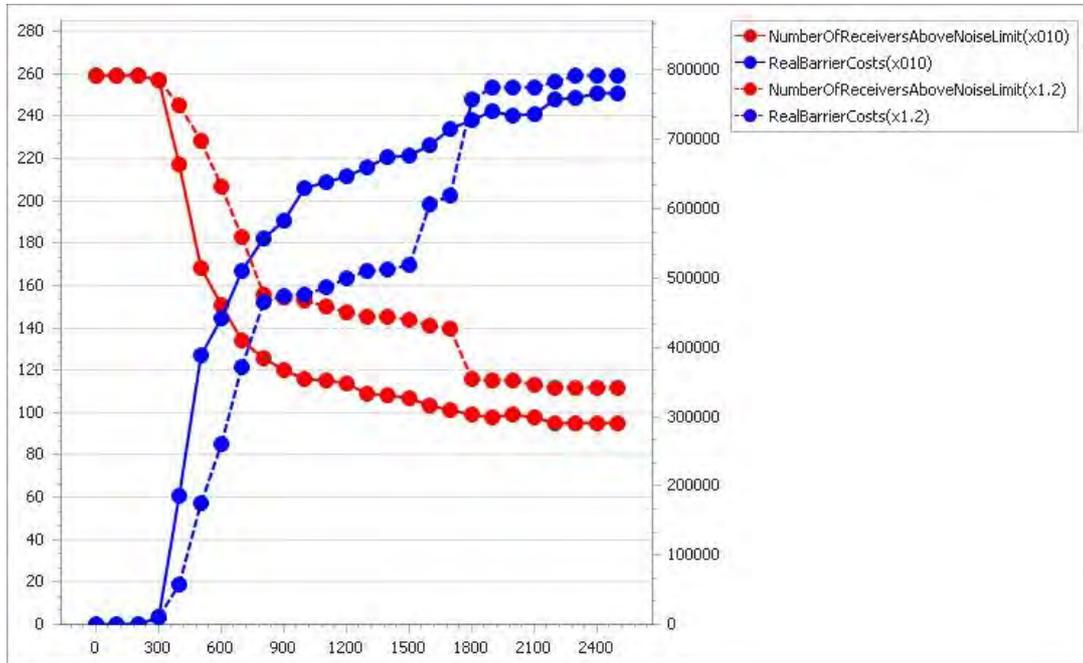


Abbildung 33: Beispiel B: Noise Penalty basierter Plot. Wandkosten (blau) und Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte (rot), dargestellt für zwei verschiedene mit $x0_{init}$ berechnete Startwerte. $X0$ Skalierungsfaktor 10 mit durchgezogener Linie und $x0$ Skalierungsfaktor 1,2 mit gestrichelter Linie. Siehe auch Abbildung 34.

Die Wahl des Startwerts kann das Optimierungsergebnis deutlich beeinflussen. Abbildungen 33 und 34 zeigen den Vergleich zwischen $x0$ Skalierungsfaktor 10 und 1,2. Skalierungsfaktor 10 entspricht einer Wandgeometrie mit kleinerer Gesamtfläche als Startwert. Der L-BFGS-B Algorithmus arbeitet sich also von „weiter unten“ an die optimale Wandgeometrie heran. Die Ergebnisse weichen zwar nicht radikal voneinander ab, Skalierungsfaktor 10 liefert dennoch eindeutig verbesserte Ergebnisse. In der präsentierten Form der Optiwand Applikation muss der Benutzer selbst den idealen Startwert finden und auswählen.

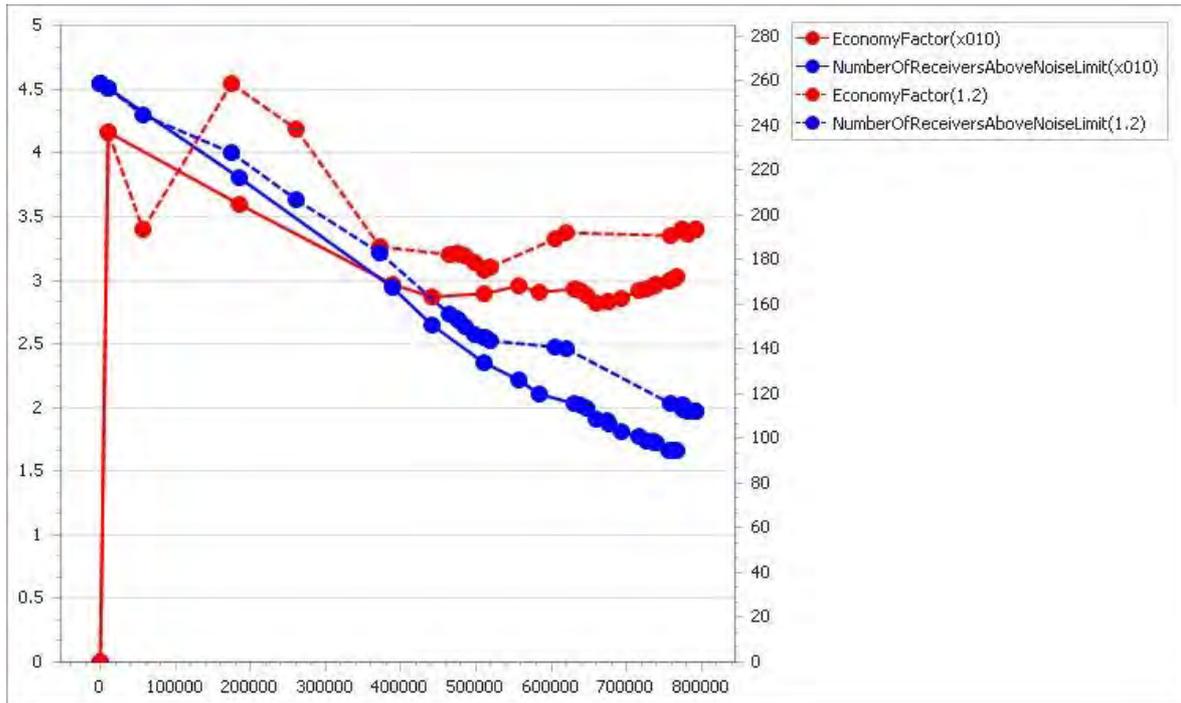


Abbildung 34: Beispiel B: Kostenbasierter Plot von Abbildung 33.

5.3 Beispiel C



Abbildung 35: Beispiel C: 3D-Darstellung aus der Planungssoftware IMMI. Für den Schallschutz berücksichtigte Gebäude werden blau dargestellt.



Abbildung 36: Lageplan zu Beispiel C mit blau gekennzeichneten schutzwürdigen Wohngebäuden und der rot gezeichneten Basislinie für die Lärmschutzwand parallel zum Straßenverlauf.

Beispiel C zeigt einen Schienenabschnitt mit schutzwürdigen Gebäuden südöstlich des Streckenverlaufs. (Abbildungen 38 und 36). Markant sind die große, langgezogene Häusergruppe im östlichen Teil und die geringe Anzahl, jedoch nahe an der Lärmquelle liegender Häuser im westlichen Teil. Es wird das Verhalten des Algorithmus bei unterbrochenen Lärmschutzwänden gezeigt. Es wurde mit vier Gebäudeöffnungen pro Immissionspunkt gerechnet, um das Verhalten des Wirtschaftlichkeitsfaktors bei dicht besiedelten Gebieten zu veranschaulichen.

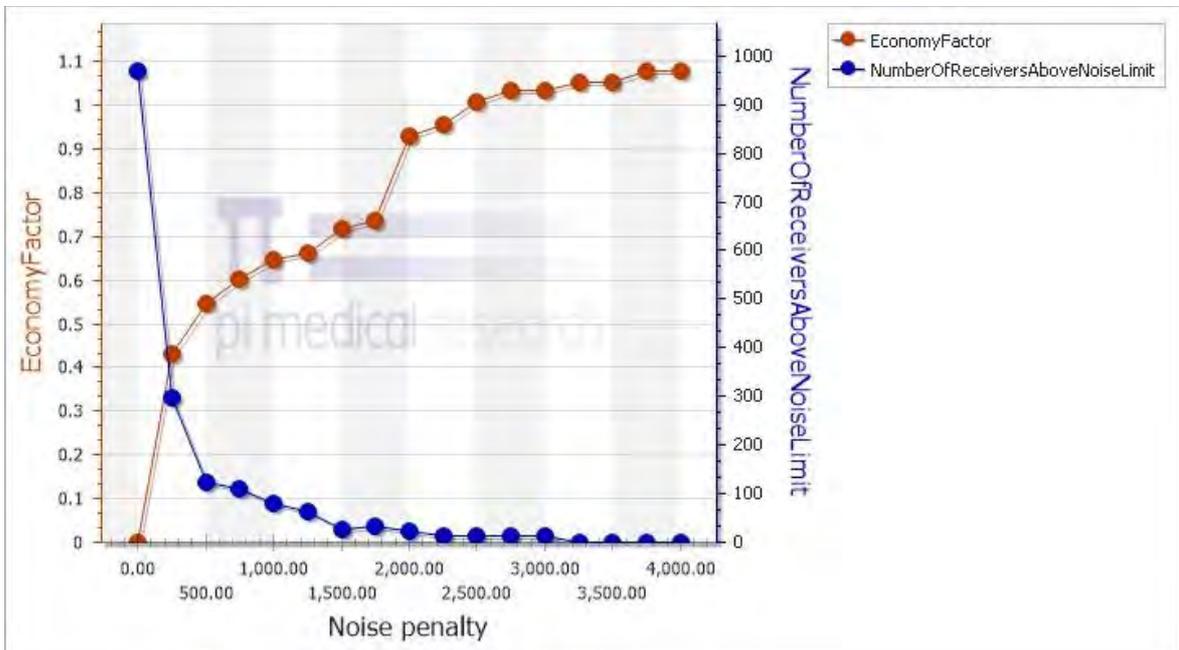


Abbildung 37: Beispiel C: Noise Penalty basierte Plot. Vergleich zwischen Wandkosten und Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte.

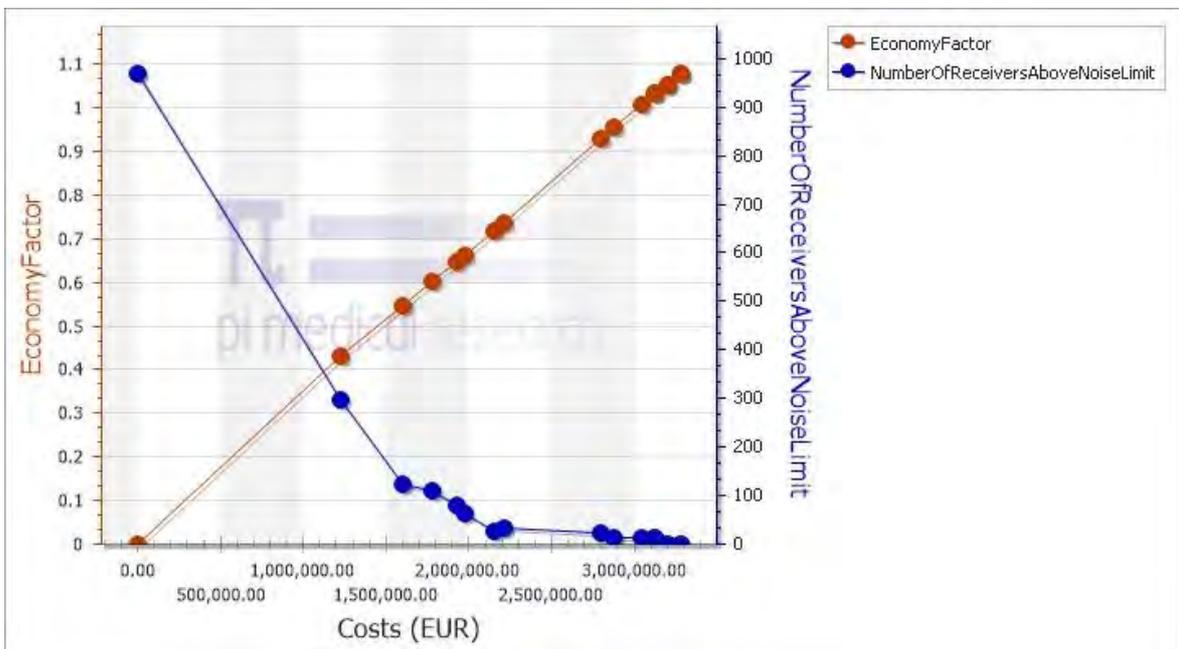


Abbildung 38: Beispiel C: Kostenbasierter Plot für P von 0 bis 4000. Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und Anzahl grenzwertüberschreitender Immissionspunkte.

Abbildungen 37 und 38 zeigen die Kosten-Nutzen-Diagramme mit dem Verhalten des Wirtschaftlichkeitsfaktors und der Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte. Abbildung 39 und zeigt in größerem Detail den Abschnitt mit Noise Penalty < 1000. Der Wirtschaftlichkeitsfaktor bleibt stets tief, weil die absolute Anzahl der geschützten Objekte sehr hoch ist. Laut Wirtschaftlichkeitskriterium ließe sich also so gut wie jede Wandgeometrie rechtfertigen. Wir können jedoch bereits bei relativ kostengünstigen Wandgeometrien ein Minimum des Wirtschaftlichkeitsfaktors beobachten, danach steigt der Wirtschaftlichkeitsfaktor linear mit den Wandkosten. Wir stellen fest, dass sich alle Objekte schützen lassen, allerdings nur mit einer Wand, die die maximale Wandhöhe erreicht. Bereits mit wesentlich kostengünstigeren Wänden lassen sich die überwiegende Mehrheit der Objekte bis unter den Grenzwert schützen.

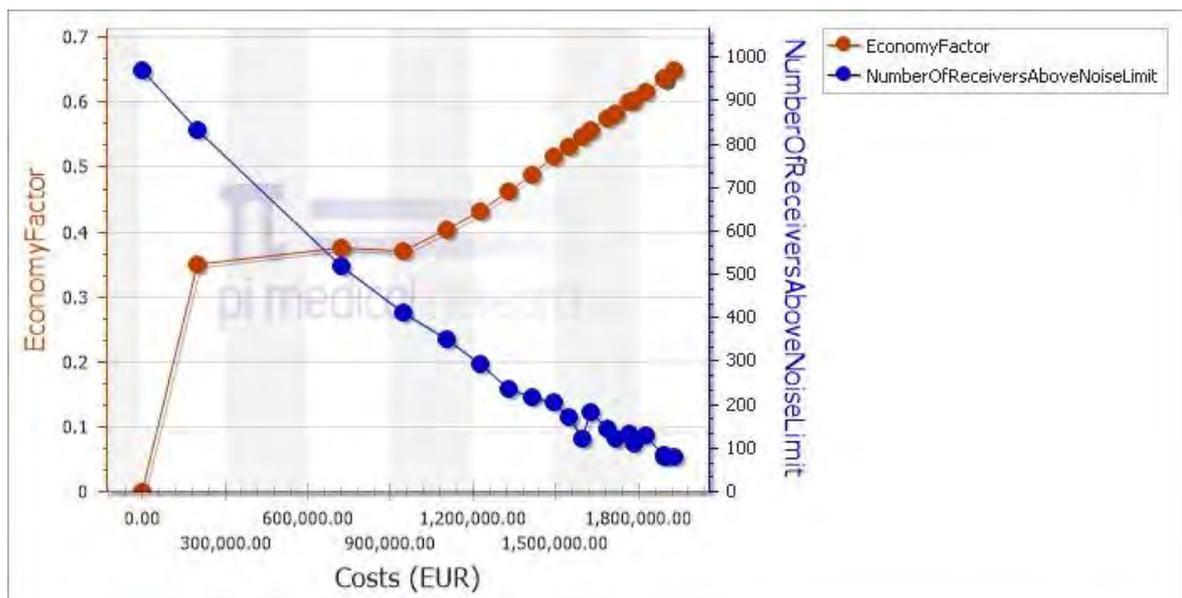


Abbildung 39: Beispiel C: Kostenbasierter Plot für P von 0 bis 1000. Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte.

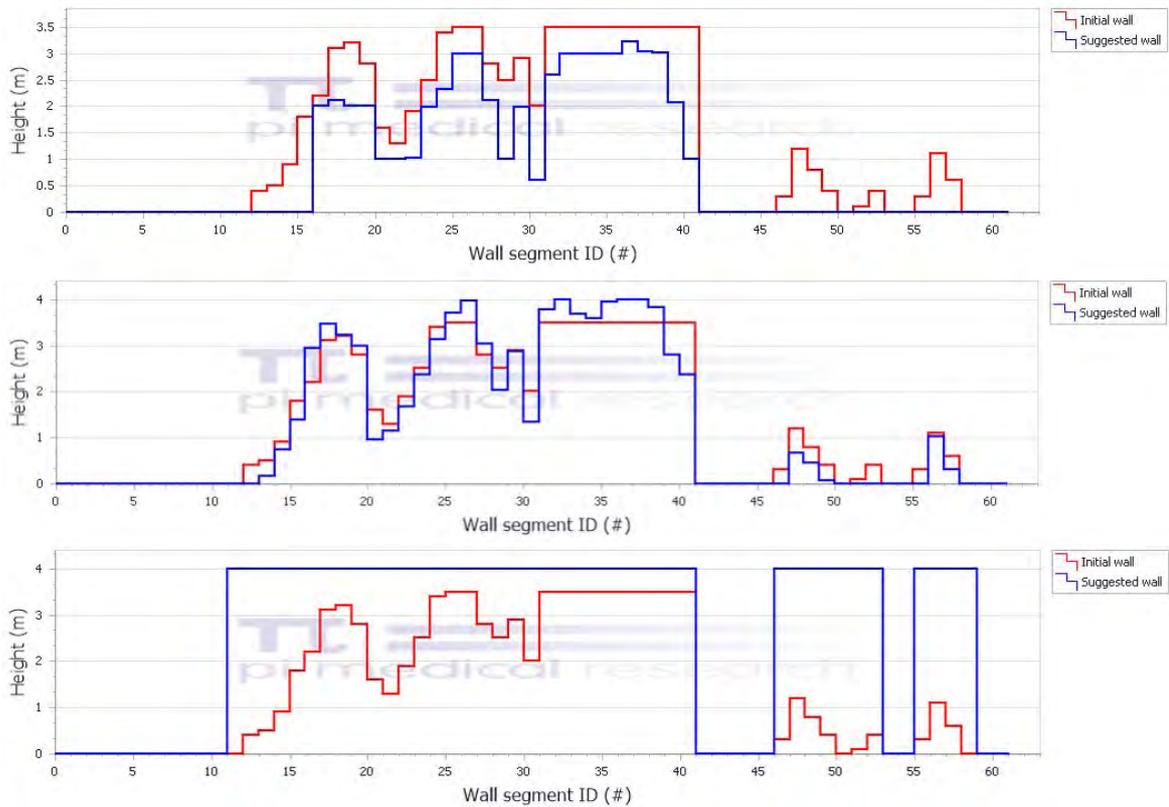


Abbildung 40: Beispiel C: Optimierte Wandgeometrien (blau) mit Startwert (rot). Oben: $P = 200$, Mitte: $P = 500$, Unten: $P = 4000$.

Abbildung 40 zeigt, wie der Algorithmus automatisch die verschiedenen Gebäudegruppen priorisiert. Mit steigender Noise Penalty erhalten die wenigen Gebäude im Westen zunächst keine Lärmschutzwand, dann eine wesentlich kleinere als die große Gebäudegruppe und mit stark erhöhter Noise Penalty, wenn keine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Schutzwirkung besteht, die maximale Wandhöhe.

5.3.1 Maximalhöhenvergleich

Wir vergleichen in der Abbildung 41 die oben präsentierten Resultate bei 4 m Maximalhöhe mit einer Variante bei 2 m Maximalhöhe (Abbildung 42). Auffallend ist das beinahe identische Verhalten des Wirtschaftlichkeitsfaktors. Wir simulieren wie oben beschrieben dicht besiedeltes Gebiet mit vielen schutzwürdigen Gebäudeöffnungen. Gelingt es uns noch einzelne zusätzliche Objekte zu schützen, so beeinflusst dies den Wirtschaftlichkeitsfaktor nur sehr geringfügig. Der Wirtschaftlichkeitsfaktor ist also ein nur bedingt geeignetes Entscheidungskriterium.

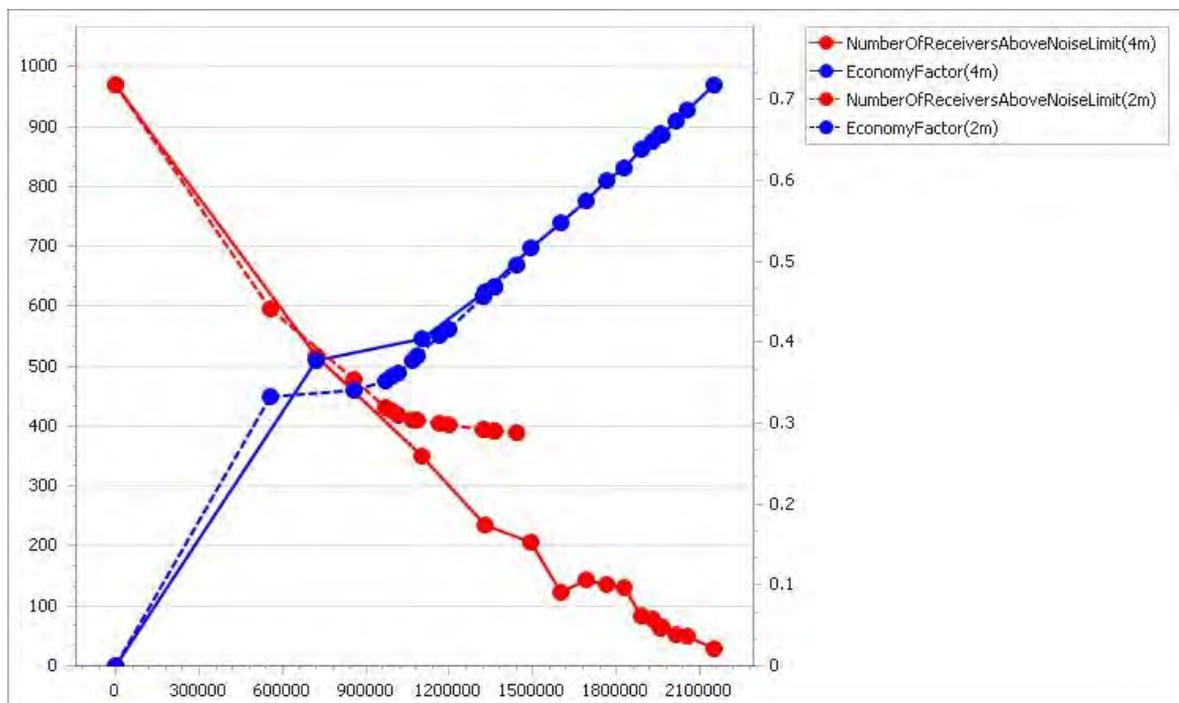


Abbildung 41: Beispiel C: Kostenbasierter Vergleich zwischen Maximalhöhe 4 m und 2 m. Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte auf der linken Achse und rot, Wirtschaftlichkeitsfaktor auf der rechten Achse und blau. Durchgezogene Linie für 4 m Maximalhöhe

Wir lesen aus Abbildung 41, dass mit 4m Wandhöhe einerseits teurere, aber auch wesentlich effizientere (bei gleichen Kosten) Wandgeometrien geplant werden können.

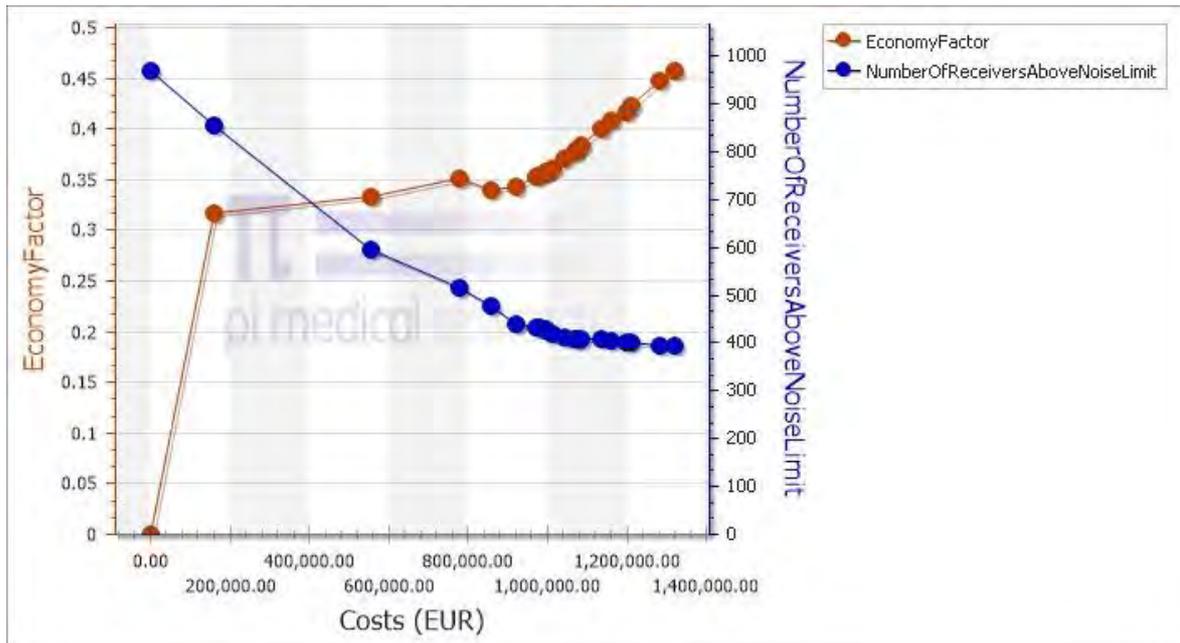


Abbildung 42: Beispiel C: Kostenbasierter Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsfaktor und der Anzahl grenzwertüberschreitender Objekte für P von 0 bis 1000 bei Maximalhöhe 2 m.

5.4 Beispiel D



Abbildung 43: Lageplan zu Beispiel D mit blau gekennzeichneten schutzwürdigen Wohngebäuden und der rot gezeichneten Basislinie für die Lärmschutzwand nördlich, parallel zur Schienenstrecke.

In diesem Beispiel (Lageplan und 3D Ansicht in Abbildungen 43 und 44) liegen nördlich einer Eisenbahnstrecke vereinzelt fünf Ansammlungen von schutzwürdigen Wohngebäuden. Die Wandhöhe wird auf maximal 2 m limitiert. Mit dieser Limitierung verbleiben etwa die Hälfte aller schutzwürdigen Fassaden (geschoßweise) weiterhin über dem Grenzwert. Die optimierte Wand ist jedoch nicht durchgehend auf 2 m gesetzt, sondern wird zwischen den isoliert liegenden Objektengruppen unterbrochen (Abbildung 45).

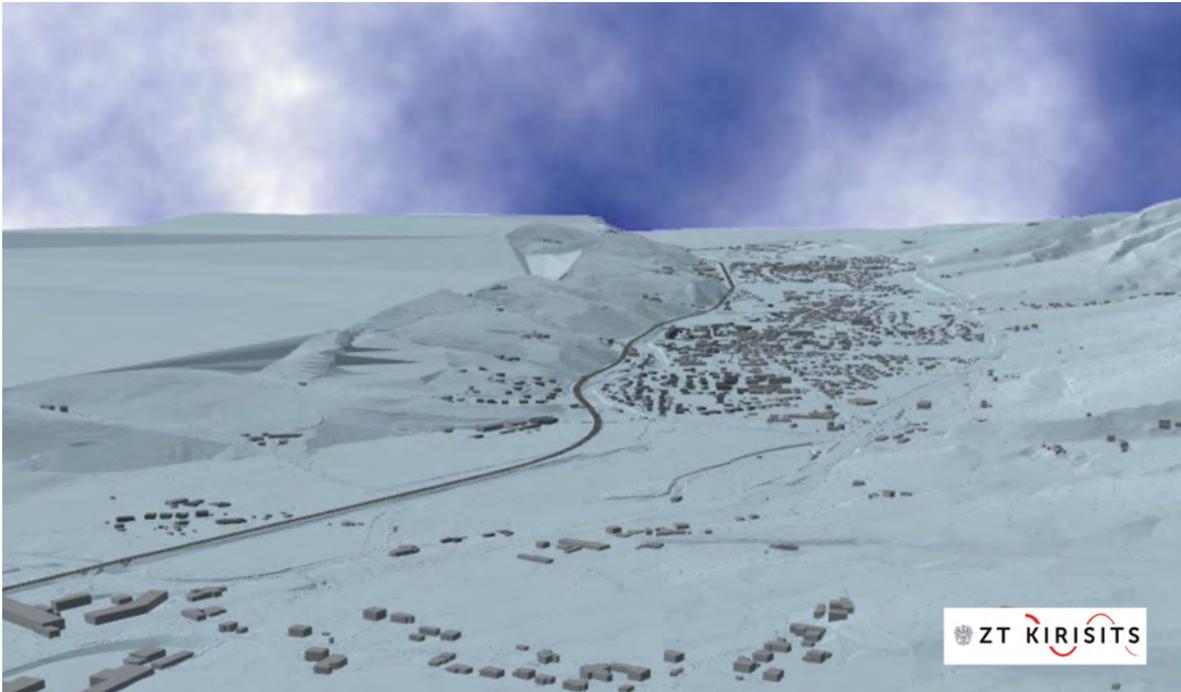


Abbildung 44: 3D Ansicht des Geländes zum Beispiel D

In Abbildung 45 erkennt man bereits, dass nach dem Erreichen des Grenzwertes für die meisten Immissionspunkte jede weitere Erhöhung der aktiven Maßnahmen nur geringe Effekt bewirkt.

Trägt man die Anzahl der betroffenen Punkte und den Wirtschaftlichkeitsfaktor direkt gegenüber den Kosten für die aktiven Maßnahmen auf (Abbildung 46), so zeigt sich ein Minimum des Wirtschaftlichkeitsfaktors bei etwa 450.000 €, eine Erhöhung der Kosten bis zum Wirtschaftlichkeitskriterium von 3 erhöht die Kosten um ~ 200.000 €, wobei aber nur mehr wenige zusätzliche Objekte geschützt werden. Die Wandkonstruktion bei 450.000 € liegt ebenfalls bei 2 m Wänden, allerdings in der Länge weiter eingeschränkt. Die Wand für den fünften Objektbereich entfällt zur Gänze (wird auf 0 m gesetzt).

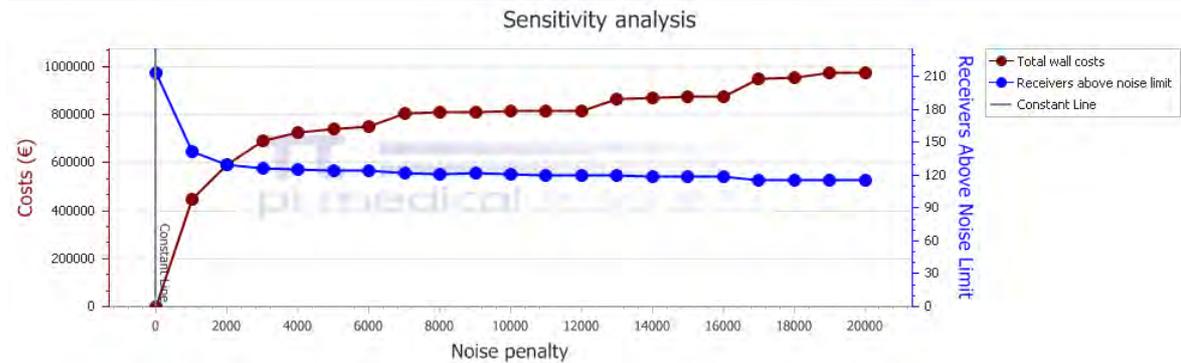
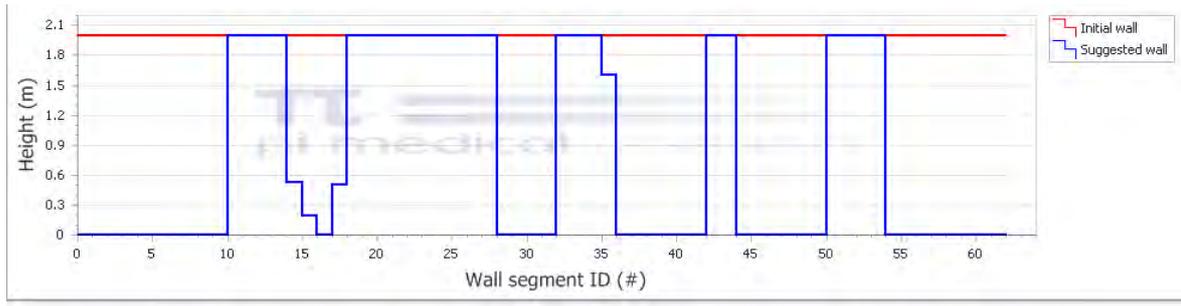


Abbildung 45: Mit einer Limitierung auf 2 m Höhe bleiben die Immissionen für den Großteil der schutzwürdigen Gebäude über dem Grenzwert. Jede weitere Erhöhung der Wichtungsfaktoren für Grenzwertüberschreitungen resultieren nur beschränkt in weiteren Wandbauten, da diese nicht in der Lage sind passive Kosten zu kompensieren.

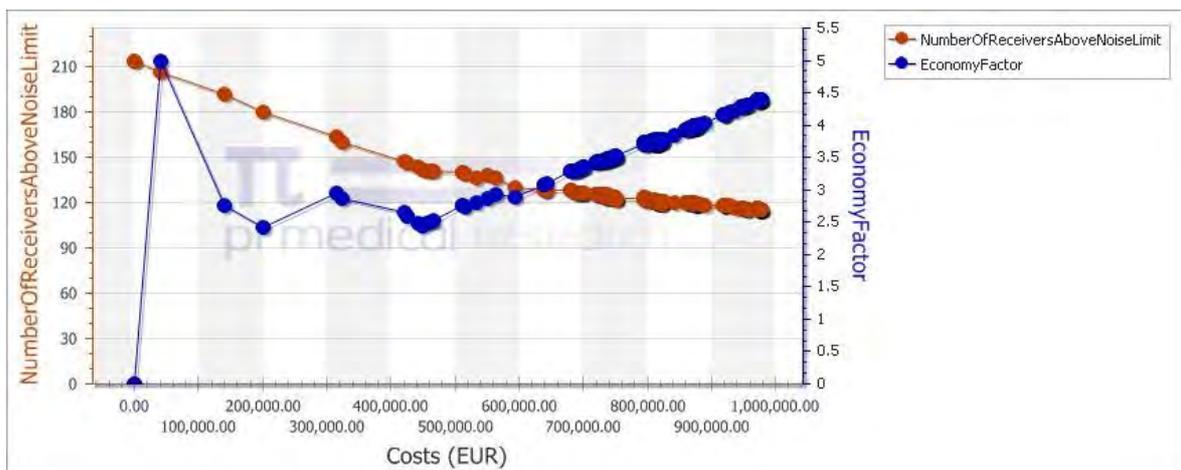


Abbildung 46: Der Wirtschaftlichkeitsfaktor erreicht ein Minimum, bevor vor allen Gebäudeansammlungen Wände errichtet werden.

Um mehr Objekte zu schützen ist in diesem speziellen Fall eine Wanderhöhung notwendig. Lässt man Wandhöhen von 4 m zu, so fällt die Anzahl der geschützten Punkte substantiell. Es gibt mehrere Betrachtungsweisen des direkten Vergleichs zwischen 2 m und 4 m Wandvarianten in Abbildung 47. Bis zu einem Betrag von etwa 400.000 € werden gleich viele Objekte unter den Grenzwert geschützt. Mit den 4 m Wänden werden aber mehr Gebäudeöffnungen kompensiert, da deren Immissionen auch trotz Grenzwertüberschreitung im Sinne der Verordnung deutlich reduziert werden. Ab etwa 400.000 € werden die Vorteile der 4 m Wand noch deutlicher. Es lassen sich um ein Vielfaches mehr an schutzwürdigen Objekten unter den Grenzwert schützen. Aufgrund der dadurch kompensierten passiven Kosten liegt das Wirtschaftlichkeitskriterium deutlich niedriger. Dies bedeutet aber auch, dass bei Beibehaltung des Faktors von 3 nun bedeutend mehr Kosten für aktive Maßnahmen gerechtfertigt werden. Die Limitierung auf eine Wandhöhe und das Wirtschaftlichkeitskriterium sind daher eng miteinander verknüpft.

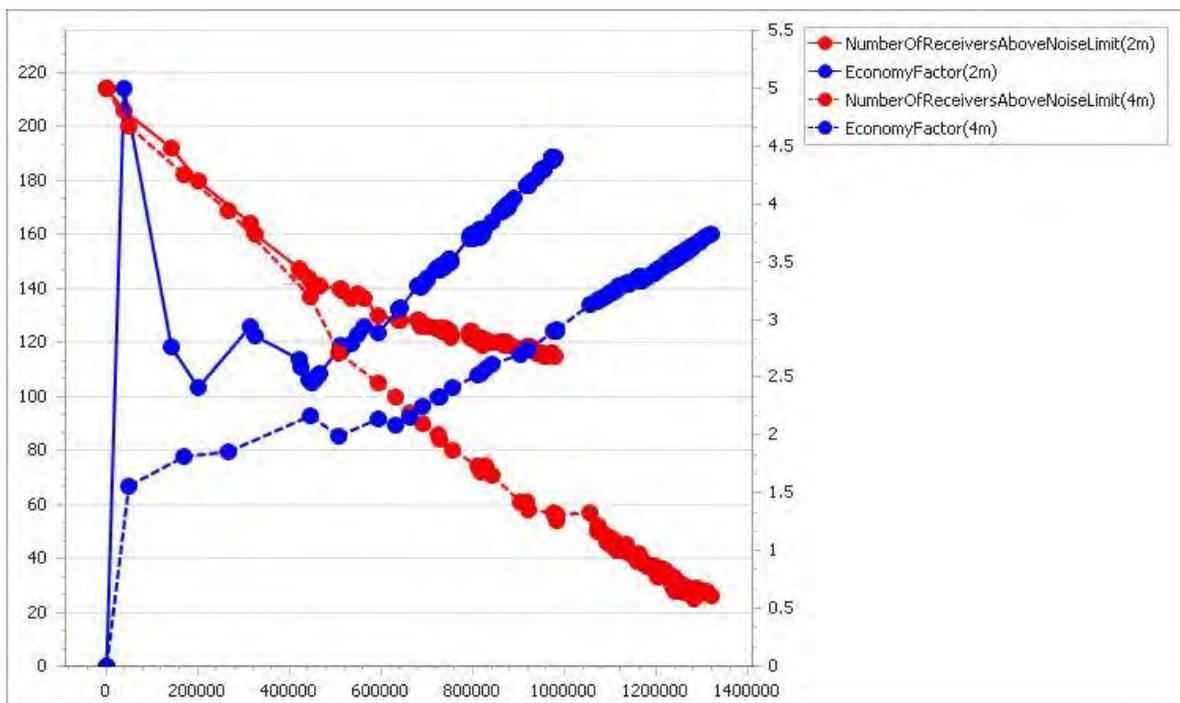


Abbildung 47: Beispiel D: Kostenbasierter Vergleich zwischen maximaler Wandhöhe 2m und 4m. Erlaubt man im Optimierungsprozess eine Wanderhöhung auf bis zu 4 m, so können mehr passive Kosten kompensiert werden und ein Wirtschaftlichkeitskriterium von 3 würde mehr aktive Maßnahmen erlauben als mit 2 m.

5.5 Beispiel E

In diesem Beispiel mit Lageplan und 3D Ansicht in Abbildungen 48 und 49 liegen die schutzwürdigen Objekte parallel zu einem relativ geraden Straßenabschnitt. Mit den gewählten Emissionsdaten wurde ein illustratives Beispiel generiert, dessen Optimierungsergebnisse in Abbildung 50 dargestellt sind. Eine Vielzahl von Fassadenpunkten ist betroffen. Erst die Möglichkeit einzelne Wandabschnitte bis 5 m Höhe zu erhöhen brächte die Rate an nicht geschützten Fassaden auf unter 10% der ursprünglich schutzwürdigen Fassaden. Allerdings ist für keine Situation das Wirtschaftlichkeitskriterium erfüllt. Dieses liegt relativ lange konstant auf 3,5, da zwar die Kosten der aktiven Maßnahme gesteigert werden, gleichzeitig die Anzahl der damit geschützten Punkte stetig streng monoton sinkt. In diesem Falle wäre eine Realisierung der aktiven Maßnahme ohnehin nur mit Drittmitteln durchführbar. Die Entscheidung für eine bestimmte Variante könnte vom absoluten Wert der Kosten und aber auch vom Verhalten der Kurven abhängen. Ab etwa 2.5 Millionen € wird die Schutzwirkung geringer, der Wirtschaftlichkeitsfaktor steigt von seinem Minimum wieder deutlich an.

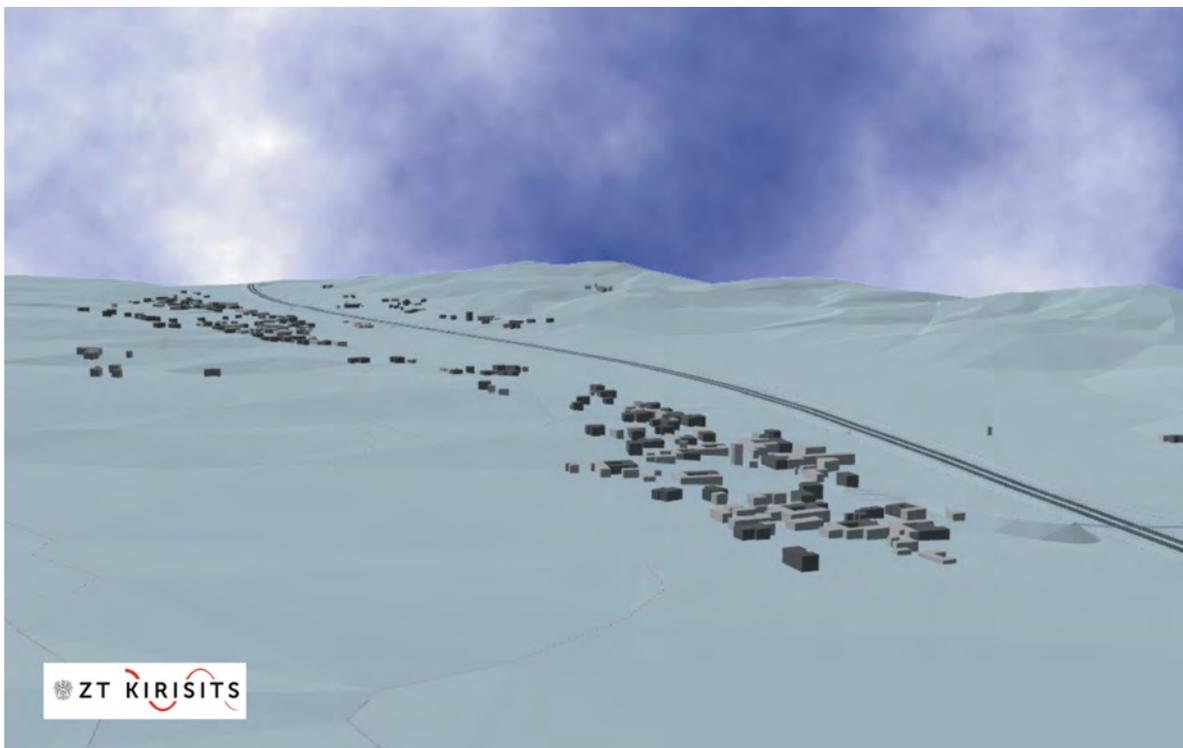


Abbildung 48: 3D Ansicht des Geländes zum Beispiel E



Abbildung 49: Lageplan zu Beispiel E mit blau gekennzeichneten schutzwürdigen Wohngebäuden und der rot gezeichneten Basislinie für die Lärmschutzwand parallel zum Straßenverlauf.

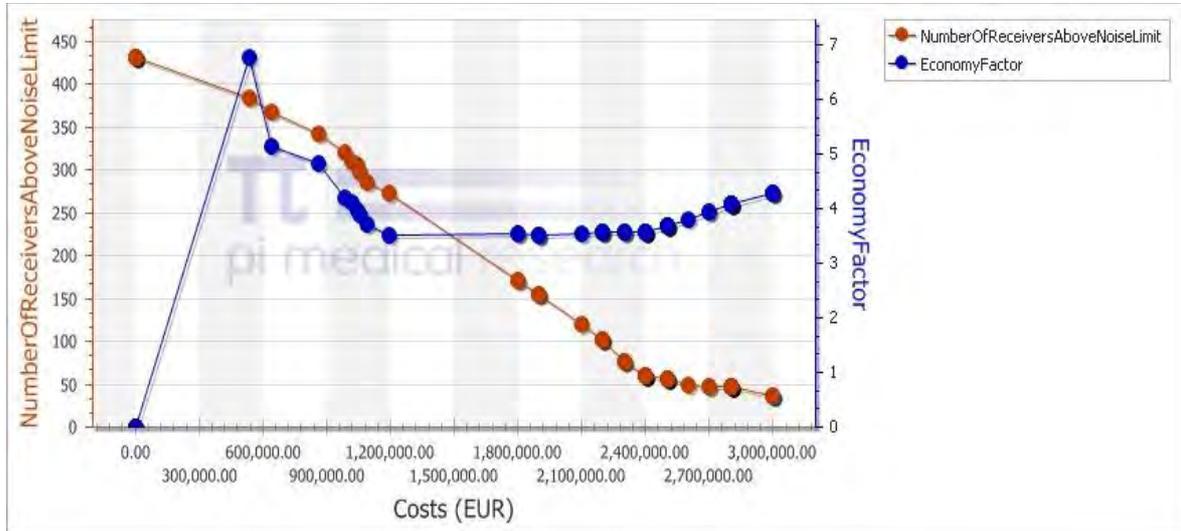


Abbildung 50: Beispiel E: Der Wirtschaftlichkeitsfaktor erreicht niemals Werte unter 3. Kostenbeteiligung Dritter ist erforderlich. Die Analyse könnte Investitionen bis zu ~ 2.5 Mill. € rechtfertigen, da erst ab dann der Wirtschaftlichkeitsfaktor wieder deutlich ansteigt.

5.6 Simulated Annealing

Abbildung 51 zeigt exemplarisch für eine zufällig ausgewählte Noise Penalty P in Beispiel C, die Resultate des in Matlab implementierten SA Algorithmus. Als Strategie um eine akzeptable Optimierungsgeschwindigkeit zu erreichen, wurde die Wandsegmentlänge mit 500 m (und eine somit geringere Anzahl Variablen) gewählt und als Startwert die mit L-BFGS-B optimierte Wandgeometrie, jedoch durchwegs um einen Meter erhöht, verwendet. (Abbildung 52)

Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass SA und L-BFGS-B sehr ähnliche Lösungen finden. L-BFGS-B findet einen um 0,62% optimaleren Wert der Kostenfunktion. Möglicherweise lässt sich die SA Lösung durch veränderte Optimierungsparameter (höhere Temperatur, langsames Abkühlen) und mehr Versuche noch geringfügig verbessern. SA folgt stochastischen Prinzipien und muss daher nie zweimal die identische Lösung finden.

Die gute Übereinstimmung der Lösungen der beiden Algorithmen ist ein starkes Indiz dafür, dass die Lösungen mit hinreichender Genauigkeit in der Nähe eines (der Definition in Kapitel 2.1.1 folgend) Pareto Optimalen Punktes liegt. Damit darf angenommen werden, mit dem L-BFGS-B Algorithmus globale Minima der Kostenfunktion zu finden und somit die Pareto Front des multikriteriellen Optimierungsproblems zu finden.

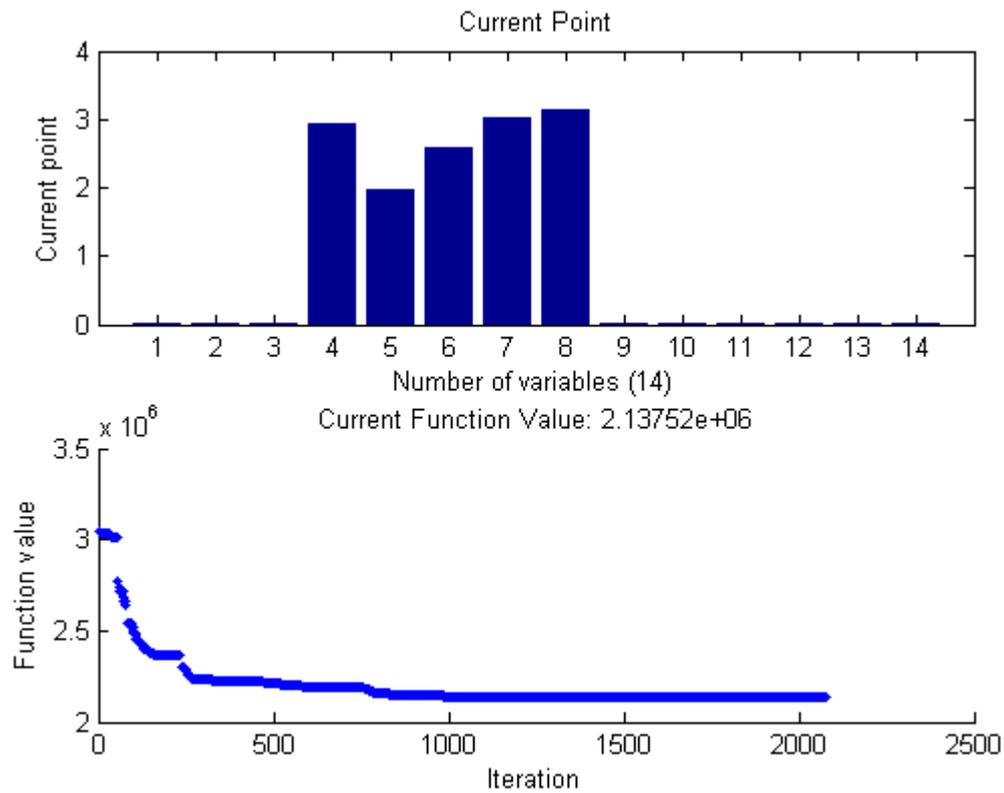


Abbildung 51: Beispiel C: Resultat einer Optimierung mit dem Simulated Annealing Algorithmus. Im oberen Graphen sind die optimierten Wandabschnittshöhen in Metern mit Wandabschnittslänge 500 m dargestellt. Der untere Graph zeigt den Verlauf des Absolutwerts der Kostenfunktion während der Optimierung mit 2077 Iterationen. Fast annealing function, reanneal interval 50, exponential temperature update, initial Temperature 100.

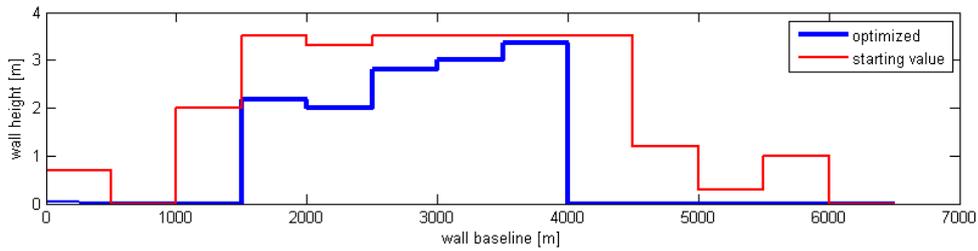


Abbildung 52: Beispiel C. Optimierungsergebnis mit dem L-BFGS-B Algorithmus mit Wandabschnittslänge 500 m. Die optimierte Wand wurde durchgehend um 1 m erhöht und als Startwert für die in Abbildung 51 gezeigte SA-Optimierung verwendet.

SA	L-BFGS-B	Differenz
Absolutwert Kostenfunktion		
2.137.522	2.124.186	0,62%
Wandabschnittshöhen [m]		
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
2,94	2,17	0,77
1,98	1,99	-0,01
2,59	2,81	-0,22
3,02	3,00	0,02
3,15	3,35	-0,20
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00

Tabelle 6: Beispiel C. Vergleich zwischen den Optimierungsergebnissen von SA und L-BFGS-B. Es werden die jeweiligen Wandabschnittshöhen und ihre Differenz gelistet.

5.7 Runden auf verfügbare Wandsegmenthöhen

Die Optimierung der Lärmschutzwandgeometrie erfolgt beliebig genau, in der Realität werden jedoch meist 50 cm hohe Lärmschutzwandpaneele eingesetzt. Dies führt zu Fehlern, welche wir in Tabelle 7 für eine Auswahl an Beispielen abschätzen. Bei den Beispielen B und C wird für viele Wandsegmente die maximale Wandhöhe erreicht, was zu einer deutlichen Reduktion der Rundungsfehler im Vergleich zu Beispiel A führt.

Rundungsfehleranalyse

	mittlere relative Abweichung der Kostenfunktion [%]	maximale relative Abweichung der Kostenfunktion [%]	mittlere Abweichung der Anzahl ungeschützter Objekte	mittlere Abweichung der Immissionspegel [dB]	maximale Abweichung der Immissionspegel [dB]
Beispiel A	1.32%	3.27%	1.60	0.13	1.56
Beispiel B	0.10%	3.27%	0.77	0.02	0.34
Beispiel C	0.24%	0.52%	2.35	0.04	0.33

Tabelle 7: Analyse der durch Runden auf 0,5 m Wandsegmentelemente entstandenen Fehler.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ziele der in der Ausschreibung formulierten Fragestellung wurden erreicht. Der vorliegende Bericht beinhaltet eine detaillierte Anleitung von Methoden und Algorithmen zur Erstellung eines EDV Programms zur Ermittlung der optimalen Abmessung einer Lärmschutzwand entlang von Straßen und Schienenstrecken. Vorgeschlagen wird die Vorausberechnung der für eine Optimierung notwendigen Parameter durch die Berechnungsprogramme für Schallausbreitung. Dazu müssen die gängigen Programme nicht substantiell verändert werden. Die Daten werden an der richtigen Stelle abgefragt und abgespeichert. Die dazu beachtenden Probleme bei der abschnittswisen Berechnung und die dazu notwendige Abschnittunterteilung werden beschrieben. Zur Verifikation dieses Ansatzes wurde in Zusammenarbeit mit dem Programmhersteller für das kommerziell erhältliche Programmpaket IMMI diese Form der Datenbereitstellung implementiert und in diesem Bericht präsentiert.

Die eigentliche multikriterielle Optimierung erfolgt mittels einer Kostenfunktion (objective function), welche passend für die österreichischen Richtlinien (im Speziellen für die ASFINAG geltenden Vorgaben durch die Dienstanweisung Lärmschutz des BMVIT) ausgearbeitet und detailliert dargestellt wird. Diese Kostenfunktion ist Basis der inversen Optimierung mit dem L-BFGS-B Algorithmus. Die Dokumentation dazu ist frei verfügbar. Als Alternative wird auch die Optimierung mit dem Simulated Annealing Verfahren getestet. Zur Demonstration der Funktionsweise wurde ein Programmprototyp entwickelt und damit eine Reihe von repräsentativen Beispielen analysiert. Nach der zeitintensiven Berechnung der Ausgangsdaten erfolgt die Optimierung im Rahmen von Berechnungen unter einer Minute.

In der Ausschreibung wird eine „Einsparung beim Bau von Lärmschutzmaßnahmen (Einhausungen, Wänden etc.) und eine Reduktion der Planungskosten“ erwartet. Die Einsparungsmöglichkeiten für aktive Lärmschutzmaßnahmen sind vielfältig:

Das Optimierungsverfahren errechnet für einen gegebenen Wert an Kosten für aktive Lärmschutzmaßnahmen (derzeit linear mit der Wandfläche verknüpft) eine Wandform (Höhen in frei definierbaren Segmentlängen entlang einer vorgegebenen Basislinie), bei der die Kosten der kompensierten passiven Lärmschutzmaßnahmen ein Maximum erreichen. Diese kompensierten Kosten korrelieren hauptsächlich mit der Anzahl an maßgeblichen Gebäudeöffnungen, deren zugehörige Immissionspegel ohne Wand über dem Grenzwert und mit der Wandkonstruktion unter diesem zu liegen kommen.

Der Prozess zur Optimierung verläuft aber nicht durch die Angabe einer Einzahlangabe für die Kosten der aktiven Maßnahmen oder einem definierten Wirtschaftlichkeitskriterium (Verhältnis der Kosten aktiver Maßnahmen zu den Kosten kompensierter passiver Maßnahmen). Denn die „optimale“ Lösung ist *a priori* nicht bekannt. Vielmehr bietet der Algorithmus die Darstellung der Pareto Front in einem Kosten-Nutzen-Diagramm. Dazu werden die zur Entscheidung hilfreichen Parameter, Kosten der aktiven Maßnahmen (Wandkosten), Anzahl der Immissionspunkte (bzw. schutzwürdigen Gebäude oder maßgeblichen Gebäudeöffnungen) über dem Grenzwert, die kompensierten Kosten passiver Maßnahmen, der Wirtschaftlichkeitsfaktor oder Mittelwerte von Pegelreduktionen gegenüber der Gewichtung der Kosten der passiven Maßnahmen, aufgetragen. Eine andere praktikable Darstellung ist das Auftragen der genannten Parameter direkt gegenüber den Kosten der aktiven Maßnahmen (Wandkosten). Damit erhält der Bearbeiter einen Überblick über mögliche Varianten. Eine optimale Lösung ist derzeit nicht definiert. Die BMVIT Dienstanweisung für Lärmschutz an bestehenden Bundesstraßen bzw. die Durchführungsbestimmungen zur SchIV erlauben den Bau aktiver Lärmschutzmaßnahmen, „*wenn dies im Verhältnis zum Erfolg mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erreicht werden kann.*“. Der dazu definierte Wirtschaftlichkeitsfaktor kann derzeit bis zum Wert von 3 ausgeschöpft werden. Dies ist aber nicht zwingend die optimale Lösung. So kann ein Kosten-Nutzen-Diagramm auch aufzeigen, dass mit bedeutend geringeren Mitteln die Mehrzahl an schutzwürdigen Gebäuden geschützt werden kann, der Mittelaufwand für dann noch verbleibende Grenzwertüberschreitung aber unverhältnismäßig hoch ansteigt. Andererseits können aber auch Fälle aufgezeigt werden, in denen verhältnismäßig geringe Zusatzaufwendungen, über den Wirtschaftlichkeitsfaktor von 3 hinausgehend, einen sehr hohen Nutzen durch zusätzlich kompensierte passive Kosten bewirken. Damit erhält man Argumentationshilfen für potentielle Kostenbeteiligung Dritter an aktiven Lärmschutzmaßnahmen. Weiters erlaubt das Verfahren den Vergleich verschiedener Varianten mit unterschiedlich hoher Begrenzung der Wandhöhe. Wandhöhen über 4 m können bei gleichem Wirtschaftlichkeitsfaktor in bestimmten Fällen eine weit höhere Anzahl an Gebäudeöffnungen schützen.

Die aufgezeigte Kombination des Verfahrens mit kommerziellen Schallausbreitungs-Berechnungsprogrammen ermöglicht die rasche Darstellung verschiedener Varianten. Derzeit wird in Österreich oft die Darstellung von zwei bis drei Varianten beauftragt und der dazu notwendige Planungsaufwand entsprechend abgerechnet. Mit Hilfe der

erarbeiteten Methode wäre es möglich, hundert Varianten gleichzeitig darzustellen. Jeder dieser Varianten liegt die optimale Wandform zu Grunde. Eine Entscheidung, welche Variante dann in einer Detaillärmschutzuntersuchung ausgearbeitet wird, kann vom Auftraggeber auf Grund der Übersicht mit dem Kosten-Nutzen-Diagramm erfolgen. Diese Diagramme erlauben den Entscheidungsprozess transparent zu dokumentieren.

Die vorgestellte Methode erlaubt die Darstellung von Entscheidungsgrundlagen für den Bau einer aktiven Lärmschutzmaßnahme. Die bestmögliche Nutzung der jeweils eingesetzten Wandfläche wird durch den Optimierungsalgorithmus gewährleistet. Die Definition der optimalen Lösung selbst ist durch die derzeitigen österreichischen Richtlinien nicht gedeckt. Die Nutzung der entwickelten Methode erlaubt jedoch einen transparenten und reproduzierbaren Entscheidungsprozess.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie. Dienstanweisung für Lärmschutz an bestehenden Bundesstraßen (Autobahnen und Schnellstraßen) Fassung Jänner 2011. 2011.
- [2] Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Lärmschutzmaßnahmen bei Haupt-, Neben- und Straßenbahnen (Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung - SchIV). BGBl. Nr. 415/1993; 1993.
- [3] Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie. Durchführungsbestimmungen zur Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung (DB-SchIV). 2006.
- [4] Trnková P, Pötter R, Baltas D, Karabis A, Fidarova E, Dimopoulos J, et al. New inverse planning technology for image-guided cervical cancer brachytherapy: description and evaluation within a clinical frame. *Radiotherapy & Oncology* 2009;93:331–40.
- [5] Mun S, Cho Y-H. Noise barrier optimization using a simulated annealing algorithm. *Applied Acoustics* 2009;70:1094–8.
- [6] Kirisits C, Kirisits H, Karabis A. Inverse planning of noise barrier - A feasibility study. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings 01/2011* 2011:2182–7.
- [7] Miettinen K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Volume 12. International Series in Operations Research & Management Science; 1998.
- [8] Byrd RH, Lu P, Nocedal J, Zhu C. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing* 1995;16:1190.
- [9] Zhu C, Byrd RH, Lu P, Nocedal J. Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization. *ACM Transactions on Mathematical Software* 1997;23:550–60.

- [10] Griva I, Stephen GN, Ariela S. Linear and nonlinear optimization. 2. ed. SIAM; 2009.
- [11] Morales J, Nocedal J. Remark on “Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization.” ACM Transactions on Mathematical Software (... 2011:1–4.
- [12] Schumacher A. Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktual. Springer Berlin Heidelberg; 2013.
- [13] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr. RVS 04.02.11 Umweltschutz, Lärm und Luftschadstoffe, Lärmschutz. 2006-03-01; 2006.
- [14] ONR 305011: Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr — Zugverkehr, Vershub- und Umschlagbetrieb. 2009-11-15; 2009.
- [15] ÖNORM. ISO 9613-2: Akustik — Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. 2008-07-01; 2008.