


# Hochspannungsleitungen planen und deren Akzeptanz erhöhen – mit dem 3D Decision Support System der ETH Zürich

**Conference Paper****Author(s):**

Schito, Joram 

**Publication date:**

2018-09

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000377753>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

# Hochspannungsleitungen planen und deren Akzeptanz erhöhen – mit dem 3D Decision Support System der ETH Zürich

Joram Schito

Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zurich  
Stefano-Franscini-Platz 5, CH-8093 Zurich  
Switzerland  
[jschito@ethz.ch](mailto:jschito@ethz.ch)

## Abstract

Die Planung von Hochspannungsleitungen ist ein heikles Thema, da deren Resultate nachhaltige Auswirkungen auf die Landschaftsästhetik und auf die Wahrnehmung des Lebensraums haben. Aus diesem Grund hat sich der politische Diskurs über Erdkabelleitungen in den letzten Jahren deutlich erhöht. Allerdings ist die Planung von Erdkabelleitungen komplex und bedarf eines computergestützten Ansatzes, um ideale Erdkabelkorridore zu bestimmen.

Das Forschungsprojekt «3D DSS – Erdkabel» der ETH Zürich baut auf dem vorangehenden Forschungsprojekt «3D GIS zur Planung von elektrischen Versorgungsnetzen» auf, das Algorithmen zur Identifizierung von Freileitungskorridoren erforscht hat und erweitert es, indem erforscht wird, wie Erdkabelkorridore modelliert werden können. Aus diesem Forschungsprojekt entstand das 3D DSS (3D Decision Support System) – ein Programm, das Planern und Entscheidungsträgern bei der Findung geeigneter Freileitungs- und Erdkabelkorridore dienen soll, indem diese berechnet und in 3D visualisiert werden. Die mit dem 3D DSS durchgeführten Fallstudien in der Schweiz und in Österreich zeigen ein positives Bild: Planungsexperten hegen hohe Erwartungen an die Zuverlässigkeit der Modellierung, die gemäss der neusten Studie in einem hohen Masse erfüllt wird.

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über das Konzept, wie mit Multikriterieller Entscheidungsanalyse und Geografischen Informationssystemen (GIS) basierend auf gesetzlichen Vorgaben ein optimaler Leitungskorridor berechnet werden kann. Zudem präsentieren wir bisherige Erkenntnisse und zeigen auf, an welchen Fragestellungen wir aktuell forschen. Das Ziel des Projekts ist es, Ansätze zur Modellierung von Erdkabeln (u.a. in Kombination mit Freileitungen) zu entwickeln und hinsichtlich einer realistischen Planung gegeneinander abzuwägen, sodass Planer und Entscheidungsträger bei ihrer täglichen Arbeit darauf zurückgreifen können.

**Keywords:** Geographic Information Science, Multi-Criteria Decision Analysis, Visual Analytics, Power Transmission Line Planning.

## 1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende ist es nötig, das bestehende Stromnetz in ganz Europa auszubauen, da erwartungsgemäss mehr Strom durch das Netz fließen wird und die Stromspitzen unvorhersehbarer über den Tag und das Jahr verteilt sein werden. Erfreulicherweise ist das Bewusstsein gegenüber einem nachhaltigen Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen gestiegen, was zu einer steigenden Nachfrage nach sauberem Strom geführt hat.

Trotz all diesen positiven Entwicklungen werden Hochspannungsleitungen und insbesondere Freileitungen von weiten Teilen der Bevölkerung häufig negativ wahrgenommen. Einige Gründe dafür liegen darin, dass die Masten von Freileitungen

für viele Einwohner das Landschaftsbild stören, sich negativ auf die Wahrnehmung des Lebensraums auswirken oder gar den Wert einer Liegenschaft mindern können. Dazu kommt, dass Elektrizität zwar als unverzichtbares Konsumgut angesehen, aber als gefährlich, unheimlich und gesundheitsschädigend wahrgenommen wird. Erstens beruht die gefährliche Komponente darauf, weil ein Stromschlag Schmerzen oder Verbrennungen verursacht oder im Extremfall Menschen tötet. Zweitens beruht die unheimliche Komponente darauf, weil Elektrizität zwar unsichtbar, aber bei Regen dennoch als Knistern hörbar ist. Drittens beruht die gesundheitsschädigende Komponente darauf, weil über die Auswirkung der durch Leitungen (und Antennen) emittierte nichtionisierende Strahlung auf die Gesundheit Uneinigkeit herrscht. Fasst man diese drei

**Preprint version. This is the author's version of the work. Please do not redistribute.  
Please cite as: Joram Schito (2019): Hochspannungsleitungen planen und deren Akzeptanz erhöhen – mit dem 3D Decision Support System der ETH Zürich. Wissenschaftsdialog 2018 der Bundesnetzagentur, Bonn, Germany, September 9, 2018. DOI: 10.3929/ethz-b-000377753**

Komponenten zusammen, ist gemäss der Auffassung einiger Personen eine potentielle Gefahr für die eigene Gesundheit zwar präsent, aber nicht direkt erkennbar. Aus diesem Grund kann dieser Sachverhalt bei den betroffenen Personen Unbehagen und diffuse Ängste auslösen.

Ungeachtet allfälliger Ängste ist der Wille, auf Strom zu verzichten und Einbussen bezüglich der Ausübung des eigenen Lebensstils in Kauf zu nehmen, vergleichsweise gering, auch nicht zuletzt, da Elektrizität wesentlich zur Volkswirtschaft und zum gesellschaftlichen Wohlstand beiträgt. Aus diesem Grund wird Elektrizität – und damit verbunden, die sichtbaren Freileitungen – oft als notwendiges Übel angesehen. Jeder braucht Strom, aber niemand will ihn sehen – dazu gelten zwei Prinzipien: «aus den Augen, aus dem Sinn» und «NIMBY» (not in my backyard). Entweder möchte man die Leitungen überhaupt nicht oder wenn, dann nicht in der unmittelbaren Lebensumgebung sehen. Gerade in Demokratien und in aufstrebenden Wohlstandsgesellschaften regt sich daher ein merklicher Widerstand gegen Freileitungen und allgemein gegen neue Hochspannungsprojekte.

Aus diesem Grund hat sich das Institut für Kartografie und Geoinformation der ETH Zürich dieses Themas angenommen und erforscht Ansätze, wie die negativen Auswirkungen neuer Hochspannungsleitungen minimiert werden können. Dabei werden Algorithmen entwickelt, die innerhalb eines Untersuchungsgebiets den optimalen Verlauf von Freileitungen und Erdkabeln berechnen. Da die Meinung, was als optimal gilt, zwischen unterschiedlichen Interessensvertretern ungleich aufgefasst wird, versucht das Forschungsteam, aus allen Meinungen eine Alternative zu finden, die für alle Beteiligten stimmt. Das Forschungsprojekt widmete sich 2014–2017 der Bestimmung optimaler Freileitungspfade, während seit 2018 an der Bestimmung optimaler Pfade für Erdkabel geforscht wird. Als Ziel sollen dabei beide Ansätze vereint werden, sodass für beide Leitungstypen optimale Teilverläufe berechnet werden, um schliesslich geeignete Strecken für Teilverkabelungen zu ermitteln. Das dabei entwickelte System – das 3D DSS – soll dabei drei Funktionen erfüllen: Erstens soll die **Planungsfunktion** Planer bei der Findung optimaler Alternativen für Korridore und Trassen auf einer mathematisch-objektiven Entscheidungsgrundlage unterstützen, indem es diese schnell, einfach und zuverlässig berechnet. Zweitens soll die **Analysefunktion** Entscheidungsträger beim Vergleich unterschiedlicher Alternativen zur Findung einer besten Alternative unterstützen. Drittens soll die **Kommunikationsfunktion** die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Interessensvertretern unterstützen und den Planungsprozess transparent gestalten, was zu mehr Akzeptanz bei der betroffenen Bevölkerung führen soll. Insgesamt erhofft sich das Forschungsteam, mit dem 3D DSS den Planungsprozess zu vereinfachen und zu beschleunigen, was insgesamt die Kosten senkt und zur schnelleren Umsetzung der Energiewende führt.

## 2 Funktionsweise des 3D DSS

Setzen sich Planer zum Ziel, auf eine möglichst objektive Weise geeignete Flächen für den Bau einer Hochspannungsleitung mithilfe eines Geografischen Informationssystems zu identifizieren, wird weltweit grundsätzlich das Verfahren angewandt, das von Houston und Johnson [1] und von Bevanger u.a. [2] in zwei gross angelegten Studien eingesetzt wurde. Dabei

werden die Funktionsprinzipien von Geografischen Informationssystemen (GIS; Geographic Information Systems) und Multikriterieller Entscheidungsanalyse (MCDA; Multi-Criteria Decision Analysis) miteinander kombiniert. GIS übernehmen die räumlichen Fragestellungen, da sich durch sie räumlich referenzierte Daten modellieren, erfassen, verarbeiten, analysieren und darstellen lassen. MCDA hingegen stellt Werkzeuge zur Entscheidungsfindung zur Verfügung, sodass mehrere Faktoren in ein Modell einfließen können, aus denen durch die Anwendung mathematischer Regelwerke sich schliesslich eine finale Alternative berechnen lässt.

Das im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelte System verbindet beide Komponenten und trägt die Bezeichnung 3D DSS – 3D Decision Support System. Es besteht grundsätzlich aus drei Komponenten: den Daten, den Algorithmen, welche den optimalen Korridor- und Trassenverlauf anhand des Entscheidungsmodells modellieren und der grafischen Benutzeroberfläche mit den wichtigen Stueurelementen. Folgend werden der Aufbau und die Funktionsweise dieser Komponenten näher beschrieben.

### 2.1 Ermittlung des optimalen Korridors

Eine Hauptschwierigkeit liegt darin, das Entscheidungsmodell so realitätsnah wie möglich zu gestalten. Die im Entscheidungsmodell enthaltenen Faktoren müssen einerseits auf einer gesetzlichen Grundlage basieren, die der Normenhierarchie des jeweiligen Landes oder Bundeslandes entspricht, aber auch vergangene Rechtsprechungen berücksichtigt. Andererseits müssen die Faktoren räumlich verortet werden können und sollten im Idealfall feste Grenzen aufweisen. In unserem Forschungsprojekt wurden basierend auf gesetzlichen Vorgaben [3] und in Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern 34 Faktoren in drei Kategorien festgelegt (siehe Tabelle 1). Jeder Faktor ist räumlich als Fläche definiert, sodass z.B. der Faktor «Wald» alle Waldflächen repräsentiert. Das Entscheidungsmodell ist so aufgebaut, dass die Interessensvertreter definieren müssen, **inwieweit welcher Faktor wie stark vor dem Bau einer Hochspannungsleitung geschützt werden soll**. Durch die Vermeidung der entsprechenden Flächen wird ausserdem ein Hauptziel verfolgt (siehe Tabelle 1), d.h., dass die Erreichung von Hauptzielen dadurch definiert ist, inwieweit die entsprechenden Gebiete durchquert werden.

Folglich verursacht die Durchquerung jedes Gebiets eine bestimmte Menge an **Raumkosten**. Diese Raumkosten werden von den Interessensvertretern für jeden Faktor einzeln definiert, indem bestimmt wird, wie gross der **Raumwiderstand** des jeweiligen Faktors gegen den Bau einer Hochspannungsleitung ist. Dafür wird eine lineare, fünfstufige Skala verwendet, bei der die Interessensvertreter die Faktoren für den Bau einer Hochspannungsleitung von «geeignet» über «neutral» bis «ungeeignet» einstufen müssen. Faktoren, die aus gesetzlichen Gründen nicht bebaut werden dürfen, können zudem für die Durchquerung als verboten markiert werden. Bei Faktoren, die aus gesetzlichen Gründen einer hohen Schutzwürdigkeit unterstehen, kann die fünfstufige Skala so eingeschränkt werden, dass eine Eignung für den Bau nicht gewählt werden kann. Diese Raumwiderstandswerte werden anschliessend mit einer **Gewichtung** multipliziert. Diese Gewichtung widerspiegelt die subjektive Präferenz hinsichtlich der Schutzwürdigkeit zwischen «neutral» über «wichtig» bis «sehr wichtig». Den Interessensvertretern wird durch dieses System eine Möglichkeit

gegeben, die einzelnen Faktoren untereinander zu vergleichen und sowohl objektiv als auch subjektiv zu bewerten.

Nachdem allen Faktoren  $i$  ein Raumwiderstand  $w$  und eine Gewichtung  $g$  zugeteilt wurde, werden – da sich Schutzgebiete überlappen können – für jede Stelle  $x$  der Widerstand und die Gewichtung eines Faktors miteinander multipliziert und über alle Faktoren aufaddiert. Dies ergibt den totalen Widerstand  $t$  an der Stelle  $x$  (siehe Formel 1). Berechnet man für jede Stelle  $x$  in einem Untersuchungsgebiet den **totalen Raumwiderstand**  $t_x$ , lässt sich daraus eine Raumwiderstandskarte erstellen (siehe Abbildung 1 links). Anschließend wird aus der totalen Kostenoberfläche die **globale Kostenoberfläche** abgeleitet, indem vom Start zum Ziel und zurück der Dijkstra-Algorithmus (löst das Problem der kürzesten Pfade von einem Startpunkt aus) pro Feld die geringsten Kosten berechnet, die aufgewendet werden müssen, um das entsprechende Feld auf irgendeinem Weg zu erreichen. Diese globale Kostenoberfläche (siehe Abbildung 1 rechts) zeigt, wie hoch die aufsummierten Kosten sind, die aufgewendet werden müssen, um vom Start zum Ziel zu gelangen. Entsprechend repräsentiert die globale Kostenoberfläche, inwieweit sich welche Gebiete für den Bau einer Hochspannungsleitung eignen. Der Pfad der geringsten Kosten (in der Abbildung 1 rechts gelb dargestellt) entspricht dabei dem sogenannten Least Cost Path und stellt somit das Optimum der entsprechenden Alternative dar. Der Korridor wird so festgelegt, dass ausgehend vom Minimalwert der globalen Kostenoberfläche ein bestimmter Maximalwert festgelegt wird, bis zu welchem alle in Frage kommenden Punkte dargestellt werden.

$$t_x = \sum_{i=1}^n w_{i,x} \cdot g_i$$

Formel 1: Berechnung des totalen Widerstands an der Stelle  $x$  (vereinfacht)

Die Formel 1 stellt lediglich eine generalisierte Form dar, wie die totale Kostenoberfläche berechnet wird. Die ausführliche Funktionsweise, die das ganze Spektrum von «ungeeignet» bis «geeignet» berücksichtigt, wird in Raubal u.a. [4] beschrieben. Des Weiteren wurden unterschiedliche Mechanismen getestet,

inwiefern sich die Wertefunktionen und das Zusammenspiel zwischen Widerstand und Gewichtung auf die resultierende Kostenoberfläche auswirkt. Diese Resultate werden in Schito u.a. [5] genauer beschrieben. Folgend werden diejenigen Modelle präsentiert, die sich in unserer bisherigen Forschung als optimal erwiesen haben.

## 2.2 3D DSS-Schnittstelle

Unser Forschungsteam hat eine webbasierte Schnittstelle entwickelt, die es Nutzern ermöglicht, die Faktoren eines Entscheidungsmodells nach dem oben beschriebenen Prinzip hinsichtlich Widerstand und Gewichtung zu bewerten. Die Kostenoberflächen, Korridore und Trassen werden innert weniger Sekunden berechnet und in 3D dargestellt. Zudem kann die Ausdehnung der raumwirksamen Faktoren ein- und ausgeblendet werden, was die Planung zusätzlich unterstützt. Als virtueller Globus wurde «CESIUM» gewählt, da das Paket open-source ist und da sich zusätzliche Daten wie z.B. LiDAR Laser-Scanning-Daten (siehe Abbildung 2 dunkelgrüne Flächen im Hintergrund) oder 3D-Gebäudemodelle integrieren lassen. Planer schätzen dabei die Möglichkeit, innerhalb des Studiengiebts interaktiv zu navigieren und um einen Eindruck zu gewinnen, wo eine zukünftige Leitung geplant werden könnte.

Das 3D DSS erlaubt zudem, die Magnetfelder der jeweiligen Leitung in Abhängigkeit der Spannung und der Verbauung (Freileitung oder Erdkabel) darzustellen. Ausserdem kann bei jedem Faktor eine zusätzliche Distanz definiert werden, die es ermöglicht, die entsprechenden Flächen um den jeweiligen Betrag über ihre Grenzen hinaus zu schützen. Auf diese Weise erhalten schützenswerte Gebiete wie z.B. Naturschutzgebiete durch die Eingabe von 100 Metern einen zusätzlichen Puffer, über welchen diese vor dem Bau einer Hochspannungsleitung «geschützt» bzw. «verschont» werden können. Dieses Prinzip wurde erstmals in Schito [6] beschrieben und wurde in Schito u.a. [5] als voraussagekräftigstes Modell identifiziert. Nicht zuletzt schätzen unsere Projektpartner die Option für eine zusätzliche Pufferdistanz sehr, da dies realen Planungsbedingungen am nächsten kommt.

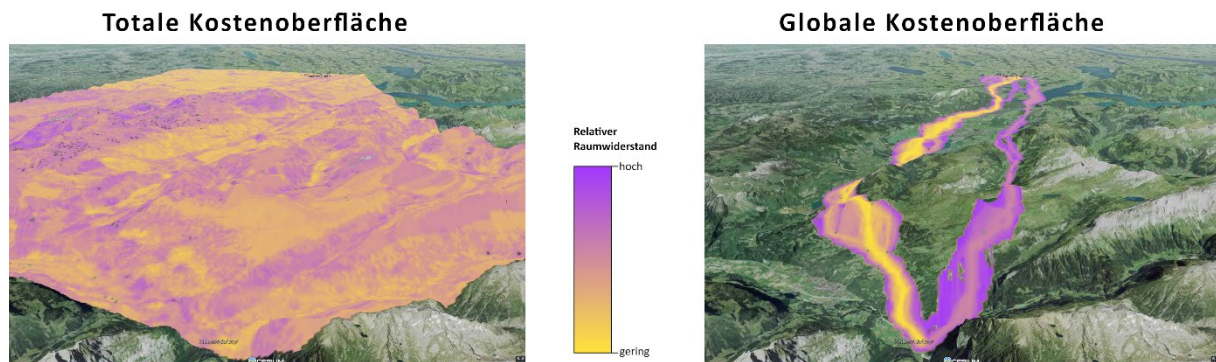


Abbildung 1: Totale Kostenoberfläche (links) und die entsprechende globale Kostenoberfläche (rechts) einer fiktiven Konfiguration im Untersuchungsgebiet Innertkirchen-Mettlen. Die globale Kostenoberfläche (rechts) zeigt die Raumwiderstandswerte vom Minimum bis 0.1 Standardabweichungen der gesamten Verteilung. Die Farbskalen sind dabei relativ zum jeweiligen Minimal- und Maximalwert normalisiert (d.h., dass die Farben der beiden Abbildungen nicht dieselben Werte repräsentieren). Dargestellt mit dem 3D DSS der ETH Zürich unter Verwendung von CESIUM.

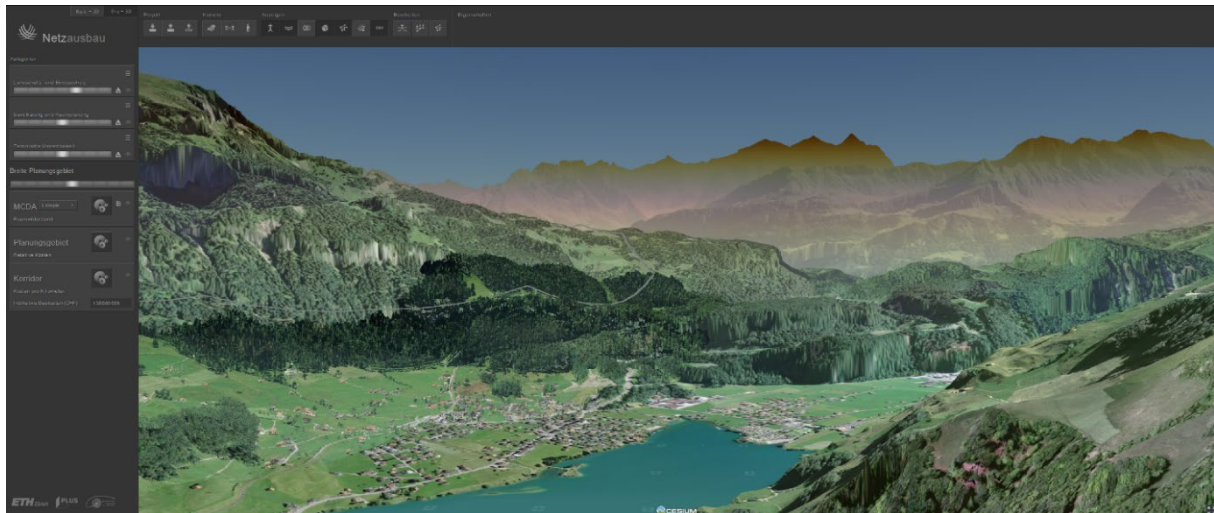


Abbildung 2: Die 3D DSS-Schnittstelle mit der Visualisierung eines Teils des Studiengebiets in der Zentralschweiz. Die visualisierte Freileitung im Hintergrund wurde mit zufälligen Werten generiert und bildet daher ein fiktives Szenario ab.

### 3 Aktuelle Arbeiten: Planung von Erdkabelkorridoren mit dem 3D DSS

Eine der häufigsten Fragen, denen wir immer wieder begegnen, wenn wir über unser Forschungsprojekt reden, ist, ob zukünftig alle Hochspannungsleitungen in den Boden kommen. Diese Wunschvorstellung ist in der Bevölkerung spürbar präsent, zumal sich die diffusen Ängste reduzieren, wenn die Leitung nicht sichtbar ist. Aufgrund eines Gerichtsentscheids der höchsten juristischen Instanz in der Schweiz wurde entschieden, dass bei zukünftigen Hochspannungsprojekten immer auch ein Erdkabelkorridor oder zumindest ein Abschnitt als Erdkabel vorgeschlagen werden muss. Im aktuellen Projekt befassen wir uns daher mit der Modellierung von Erdkabelkorridoren und mit der Frage, wie man Erdkabelabschnitte am besten mit Freileitungsabschnitten verbindet.

#### 3.1 Erdkabel modellieren

Im Gegensatz zu Freileitungen werden bei Erdkabeln der Untergrund und das Bauinfrastrukturmanagement stärker in Betracht gezogen. Konkret soll bereits bei der Modellierung des Korridors die Bebaubarkeit des Untergrunds und die Zugänglichkeit für schwere LKWs und Maschinen geprüft werden. Des Weiteren muss die Modellierung gewährleisten, dass die Muffenschächte in regelmässigen Abständen angeordnet und für eine jährliche Routineüberprüfung zugänglich sind. In unserem Modell prüfen wir daher, ob im Untergrund nebst den bestehenden Leitungen noch ausreichend Platz vorhanden ist, um neue Rohrblöcke für die Installation von Erdkabeln verlegen zu können. Dies ist komplex, da bestehende Rohrblöcke nebst den Lagekomponenten  $x$  und  $y$  noch eine Tiefenkomponente  $z$  aufweisen. Die Bebaubarkeit muss demnach in die Tiefe modelliert werden können.

Unser Ansatz schliesst zuerst alle Gebiete aus, die aus gesetzlichen oder bautechnischen Gründen für die Verlegung von Rohrblöcken oder für eine Spülbohrung ohnehin nicht in Frage kommen. Die restlichen Gebiete werden anschliessend je nach Bedarf in einer Auflösung von 1–5 m gekachelt. Um herauszufinden, ob im Untergrund in einer bestimmten Tiefe noch Platz vorhanden ist, wird der Untergrund in ca. 4–5 Kategorien eingeteilt (z.B. 0.7–1.4 m, 1.5–2.4 m, 2.5–4.9 m und 5.0–8.0 m). Für jede Zelle wird für jede Tiefenkatgorie eruiert, ob die entsprechende Zelle bereits verbaut oder noch frei ist. Ähnlich dem Ansatz von Rheinert [7] oder Piveteau [8] wird anschliessend ein Algorithmus angewandt, der alle benachbarten freien Zellen miteinander verbindet und die Kosten so festlegt, dass die Fortsetzung in der gleichen Richtung in der gleichen Tiefenkatgorie günstiger ausfällt als eine Richtungs- oder Tiefenänderung. Aufgrund dieses Netzwerkgraphen kann anschliessend mit dem Dijkstra-Algorithmus der optimale Korridor- oder Trassenverlauf modelliert werden.

#### 3.2 Erdkabel mit Freileitungen verbinden

Unter der realen Annahme, dass Erdkabel in Verbindung mit Freileitungen modelliert werden sollen, ergibt sich die Frage, wie sich dieses Problem konzeptionell, aber auch technisch lösen lässt. Da die Voraussetzungen für die Modellierung von Freileitungen und für Erdkabel unterschiedlich sind, kann auch nicht dasselbe Entscheidungsmodell angewandt werden. In der klassischen Betrachtung der räumlichen MCDA [9] löst man dieses Problem, indem zuerst die Kostenoberflächen beider Leitungstypen mit separaten Entscheidungsmodellen modelliert werden. Anschliessend setzt man für beide Fälle eine Wahrscheinlichkeit oder eine Gewichtung mit der Summe gleich 1 fest, mit der die Kostenoberflächen multipliziert werden. Die daraus resultierende Kostenoberfläche sollte dabei die kombinierte Ideallösung beider Leitungstypen repräsentieren.



Das Problem hierbei ist, dass die Fragestellung eigentlich ein Entweder-oder-Problem darstellt, wobei die Entscheidungsträger für das Untersuchungsgebiet insgesamt einen idealen Korridor und darin für jeden Streckenabschnitt den idealen Bautyp ermitteln müssen. Unser Ansatz versucht, dieses Problem pragmatisch zu lösen, indem gemäss schweizerischer Gesetzgebung [10], [11] davon ausgegangen wird, dass zwar der Anteil an Freileitungen gegenüber Erdkabeln überwiegen, aber an Stellen erhöhten Konfliktpotenzials das Verlegen eines Erdkabels in Betracht gezogen werden soll. Daher entwickeln wir aktuell einen Ansatz, der für jeden Ort zuerst das Konfliktpotential ermittelt, das sich durch den Bau einer Freileitung ergeben würde. An Stellen mit erhöhtem Konfliktpotenzial wird dann automatisiert nach geeigneten Standorten für zwei Übergangsbauwerke gesucht. Zwischen diesen Stellen wird dann geprüft, ob sich der Bau des Erdkabels verwirklichen lässt und die Instandhaltung gewährleistet werden kann [12].

Unsere Forschungstätigkeit konzentriert sich in nächster Zeit darauf, den klassischen mit dem neuen Ansatz bezüglich Praxistauglichkeit und der Qualität der prognostizierten Linienführungen zu vergleichen. Für die Modellierung einer kombinierten 380 kV-Leitung untersuchen wir eine voralpine Region in der Zentralschweiz, für eine 150 kV-Erdkabelleitung ein Quartier in Zürich und für eine 70 kV-Erdkabelleitung ein suburbanes Gebiet im Norden Belgiens. Die urbanen bzw. suburbanen Gebiete bedingen vor allem, dass eine geeignete Lösung auf engem Raum gefunden wird, was erfordert, dass der Detailgrad zu Lasten der Verarbeitungsrate erhöht werden muss.

### 3.3 Alternativen vergleichen und analysieren

Hinsichtlich der Erweiterung auf die Modellierung von Erdkabeln wird die Schnittstelle des 3D DSS aktuell so angepasst, dass entweder Freileitungen oder Erdkabel oder kombinierte Leitungen modelliert werden können. Zudem entwickeln wir stets neue Möglichkeiten, wie sich unterschiedliche Alternativen analysieren und vergleichen lassen. Aktuell arbeiten wir an einer Option, die es erlaubt, mögliche Trassenführungen interaktiv zu zeichnen und anschliessend nach definierten Zielen auszuwerten. Konkret kann dadurch untersucht werden, welche Faktoren (siehe Tabelle 1) die definierten Ziele über welche Distanz oder Fläche verletzen. Diese Metrik erlaubt es einerseits, unterschiedliche Alternativen gegeneinander abzuwägen, aber andererseits, auch pareto-optimale Lösungen zu finden. Somit können bei Verhandlungen über Korridor- und Trassenführungen Alternativen beigezogen werden, die stets pareto-optimal sind. Erste Umfragen in Zusammenarbeit mit Leitungsplanern haben gezeigt, dass eine solche Funktion zu einem hohem Grad erwünscht ist und das Potenzial in sich birgt, die Meinung der Leitungsplaner zugunsten einer optimaleren Lösung zu revidieren.

## 4 Diskussion

Einer der grössten Diskussionspunkte betrifft die generelle Herangehensweise des multikriteriellen Konzepts, um geeignete Räume für eine Hochspannungsleitung zu finden. Dabei eröffnen sich mehrere Fragen: Ist es juristisch legitim, Gebiete anhand ihrer Schutzwürdigkeit zu operationalisieren? Können unterschiedliche Widerstandswerte aufgrund unterschiedlicher Schutzverordnungen zu einer Summe aufsummiert werden o-

der muss jedes Gebiet einzeln auf unterschiedliche Schutzverordnungen geprüft werden? Wie sollen gesetzlich vorgegebene Faktoren berücksichtigt werden, die nicht räumlich-explicit sind und daher nicht ins räumliche Entscheidungsmodell aufgenommen werden?

Die aufgeführten Fragen stellen juristische Streitpunkte dar, für die es keine einfache Antwort gibt. Einerseits verfolgt das 3D DSS-Projekt das Ziel, Ansätze zu ergründen, die geeignete Planungsgebiete und Leitungskorridore modellieren, wohingegen juristische Verfahren häufig dann eingeleitet werden, wenn es um die Fachplanung geht, bei der parzellenscharf abgewogen wird, ob eine projektierte Trassenführung die gesetzlich vorgegebenen Richtwerte einhält und die Schutzgebiete meidet. Obwohl solche Analysefunktionen implementiert sind, soll das 3D DSS primär Experten als Planungshilfe und zur Entscheidungsunterstützung dienen, um damit in einem frühen Planungsstadium geeignete Korridorvarianten zu berechnen, die anschliessend verglichen und diskutiert werden können. Der dabei angewandte multikriterielle Ansatz mag aufgrund der mathematischen Operationalisierung juristisch nicht legitim sein, da solche Entscheide von Fall zu Fall abgewogen werden müssen. Dennoch eröffnen sich den Entscheidungsträgern durch die Betrachtung sich überlagernder Schutzgebiete Informationen darüber, welche Gebiete von besonderer Bedeutung sind und daher gemieden werden sollten.

Handumkehrt stellt sich die Frage, ob und inwieweit ein solcher Mechanismus, der die Schutzwürdigkeit von sich überlagernden Schutzgebieten aufaddiert, so manipuliert werden kann, dass bestimmte Gebiete für einen Korridor gar nie in Betracht gezogen werden. Angenommen, dass bestimmte Teile eines Gebiets in mehreren Schutzinventaren aufgelistet werden, soll dann das ganze Gebiet per se von der Planung ausgeschlossen werden, da der Raumwiderstand für einen geeigneten Korridor scheinbar unüberwindbar hoch ist? In aktuellen Diskussionen in Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern wurde vermehrt der Wunsch geäussert, dass grundsätzlich keine Gebiete infolge zu hoher Raumwiderstände ausgeschlossen werden dürfen, zumal zur Berechnung des Raumwiderstands nicht immer alle Faktoren von gleich hoher Bedeutung sind. In eine ähnliche Richtung geht die Frage, ob kleinräumige Schutzgebiete, die mit einer Freileitung gesetzlich und technisch problemlos überspannt werden können (z.B. Moorbiotope oder Fassungsbereiche von Grundwasserschutzzonen), überhaupt in die Findung eines Korridors einbezogen werden sollen. Aus diesem Grund zwingt der multikriterielle Ansatz die involvierten Experten gewissermassen dazu, sich vertieft mit der Festlegung der Einflussfaktoren des Entscheidungsmodells auseinanderzusetzen.

Weitere Vorteile des multikriteriellen Ansatzes sind zudem seine Transparenz, seine Praxisnähe und seine mathematische Objektivität, sodass unterschiedliche Meinungen beigezogen werden können, um damit eine beste Lösung für alle Interessensvertreter zu eruiieren. Unsere Aussagen werden ausserdem dadurch bestärkt, dass eine aktuelle Studie, die mit fünf Leitungsplanern und fünf Behördenvertretern in den Bereichen Genehmigungsverfahren, Raumplanung und Umweltschutz durchgeführt wurde, dem 3D DSS eine hohe Genauigkeit attestiert, tatsächlich geeignete Räume und Korridorvarianten zu finden.

Ein weiterer strittiger Punkt ist, ob und in welchem Rahmen ein solches entscheidungsunterstützendes System zur Information der Bevölkerung über geplante Hochspannungsprojekte verwendet werden soll. Die Meinungen zu diesem Punkt gehen weit auseinander: Einerseits sind viele Planer der Auffassung, dass ein solches System der Bevölkerung aufzeigen könnte, wie komplex, aber transparent die Planung von Hochspannungsleitungen ist. Diese Planer erhoffen sich, dass die Auseinandersetzung mit der Schutzwürdigkeit des Lebensraums zu mehr Akzeptanz führt. Hingegen sind andere Planer der Meinung, dass ein solches System Experten vorbehalten werden sollte, damit die Planung von Hochspannungsleitungen nicht zu einem Spiel verkommt, indem durch Gamification versucht wird, bessere Resultate zu erzielen. Tatsächlich würde sich in so einem Fall die Frage stellen, für wen eine berechnete Route überhaupt optimal ist, zumal die Meinungen über die Schutzwürdigkeit unterschiedlicher Objekte subjektiver Natur sind. In dieser Hinsicht können wir kein abschliessendes Bild darüber geben, inwieweit sich die Akzeptanz von Hochspannungsleitungen erhöhen lassen würde, da diese davon abhängt, ob das verwendete Planungsinstrument in der Bevölkerung als neutral, objektiv und zuverlässig wahrgenommen wird.

## 5 Herausforderungen und Ausblick

Die bautechnische Betrachtung des Untergrunds stellt insofern eine facettenreiche Herausforderung dar, als dass das bisherige Entscheidungsmodell für Freileitungen um einige Komponenten ergänzt werden muss, die für die Modellierung von Erdkabeln wichtig sind. Als Beispiele seien an dieser Stelle die Vermeidung von Querungen von Wasserleitungen, aber auch die nicht an allen Orten bekannte geologische Eignung des Untergrunds zu nennen. Des Weiteren stellen unterschiedliche Bauarten wie beispielsweise die Verlegung von Rohrböcken im offenen Grabenverfahren oder die Verlegung von Leitungsrohren durch Spülbohrung ebenso unterschiedliche Anforderungen an den Algorithmus, der die Eignung zum Bau berechnet und die Kosten schätzt.

Wie oben erwähnt, wird dem Vergleich zwischen unterschiedlichen Alternativen auch seitens unserer Projektpartner eine hohe Beachtung geschenkt. Aus diesem Grund werden wir in den kommenden Monaten daran forschen, welche Analysetools am zuverlässigsten zwischen unterschiedlichen Varianten unterscheiden und pareto-optimale Lösungen bestimmen. Die Resultate über eine laufende Studie sollten voraussichtlich in diesem Jahr veröffentlicht werden. Zu guter Letzt werden wir in nächster Zeit nach Lösungen suchen, wie die Visualisierung von kombinierten Leitungen verbessert werden kann und die Erscheinung des 3D-Modells realistischer aussehen lässt.

## 6 Danksagung

Das 3D DSS-Projekt wird vom Schweizerischen Bundesamt für Energie gefördert und von den Stromnetzbetreibern Swissgrid, ewz und Elia finanziell unterstützt (2014–2017 ebenso von APG und BKW). Die Forschungsarbeiten sind Teil der Tätigkeiten des Swiss Competence Center for Energy Research on the Future Swiss Electrical Infrastructure (SCCER–FURIES), welches von Innosuisse – der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung finanziell unterstützt wird.

## 7 Referenzen

- [1] G. Houston und C. Johnson, «EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology», Electric Power Research Institute and Georgia Transmission Corporation, Palo Alto, CA and Tucker, GA (USA), Technical Report 1013080, 2006.
- [2] K. Bevanger *u. a.*, «Optimal design and routing of power lines; ecological, technical and economic perspectives (OPTIPOL)», Norwegian Institute for Nature Research, Trondheim (Norway), Final Report 1012, 2014.
- [3] UVEK, «Bewertungsschema für Übertragungsleitungen». Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, Schweiz, 28-Feb-2013.
- [4] M. Raubal, J. Schito, A. Grêt-Regamey, und U. Wissen Hayek, «Einsatz von 3D GIS zur transparenten und nachhaltigen Planung von elektrischen Versorgungsnetzen», Bundesamt für Energie BFE, Ittigen (Switzerland), Schlussbericht SI/507073-01, 2017.
- [5] J. Schito, U. Wissen Hayek, und M. Raubal, «Enhanced multi criteria decision analysis for planning power transmission lines», in *Proceedings 10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018)*, Melbourne (Australia), 2018, Bd. 114.
- [6] J. Schito, «Modeling and optimizing transmission lines with GIS and Multi-Criteria Decision Analysis», *Information Technology*, Bd. 59, Nr. 1, S. 1–9, Jan. 2017.
- [7] P. Rheinert, «Freileitungen minimaler Sichtbarkeit und deren gleichzeitige Optimierung nach mehreren Kriterien», Dissertation, Universität Saarbrücken, Saarbrücken (Germany), 1999.
- [8] N. Piveteau, «A Novel Approach to the Routing Problem of Overhead Transmission Lines», Master Thesis, Universität Zürich UZH, Zurich (Switzerland), 2017.
- [9] J. Malczewski, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York, NY (USA): John Wiley & Sons, 1999.
- [10] UVEK, «Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL)». Bundesamt für Energie (BAFU) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) im Auftrag des Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 12-Apr-2001.
- [11] Schweizerisches Bundesgericht, *Urteil 1C\_398/2010 vom 5. April 2011*. 2011.
- [12] J. Schito und M. Raubal, «Planning transmission lines upside down: How earth cables are combined with overhead lines», gehalten auf der SCCER FURIES – 5th Annual Conference, Lausanne (Switzerland), 2018.