

Ein Simulationsframework zur Bewertung von großräumigen Habitatnetzen

Jens Finke¹

Zusammenfassung

Das weitverzweigte und engmaschige Straßenverkehrsnetz, wie es heutzutage in allen entwickelten Ländern vorzufinden ist, führt zu einer sichtbaren Zerschneidung und Fragmentierung der Landschaft. Für viele Wildtiere stellen Straßen bei ihren Bewegungen in der Landschaft ein erhebliches Hindernis und eine Gefahrenquelle dar. Insbesondere werden Verbindungen zwischen verschiedenen Habitaten einer Art signifikant gestört. Das in diesem Text vorgestellte individuen-orientierte Simulationsframework dient der Abschätzung von Einflüssen unterschiedlicher Störungen, wie z.B. Straßen, Kanäle, Windkraftanlagen oder anderen anthropogenen Eingriffen, auf die Konnektivität eines Habitatverbundes. Ziel ist es, die Konnektivität eines Habitatnetzes durch gezielte Gegenmaßnahmen zu verbessern. An welchen Stellen in diesem Verbundnetz eine Maßnahme am effektivsten ist, kann anhand verschiedener Szenarien mit Hilfe des vorgestellten Bewertungsansatzes evaluiert werden.

1 Einleitung

Viele Wildtiere sind auf die Möglichkeit von weitläufigen Migrationen angewiesen, sei es für die Suche nach Nahrung, die Besiedlung von neuen Habitaten oder das Finden von Paarungspartnern. Je nach Spezies kann dies einen Aktionsradius von einigen Kilometern bis zu mehreren hundert Kilometern bedeuten. In den meisten Industrienationen sind kaum noch Flächen verfügbar, die diese Wanderungen ungestört zulassen. Die sichtbarste Form der künstlichen Zerschneidung der Landschaft und damit Verkleinerung der ungestörten Flächen ist das dichte Straßennetz mit seinen vielfältigen Auswirkungen auf die Umwelt (Forman und Sperling 2002, Holzgang et. al. 2000). Aber auch andere künstliche Landschaftselemente, wie z.B. Siedlungen, Kanäle, Windkraftparks (Hötker et. al. 2004) o.ä., führen zu einer Fragmentie-

¹ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Uhlhornsweg 84, Umweltinformatik, D-26111 Oldenburg; Tel.: +49 441 798 2751, Fax.: +49 441 798 2756; E-Mail: jens.finke@informatik.uni-oldenburg.de

zung der Landschaft, die deren Durchlässigkeit für Wanderungen von Wildtieren beeinträchtigt. Das hier vorgestellte Simulationsframework SimapD (simulation of anthropogenic population disturbances) berechnet anhand eines abstrakten Landschaftsmodells einen Durchlässigkeitsindex für eine Region. Dieser Index kann als Vergleichskriterium für die Evaluation verschiedener Szenarien herangezogen werden, die jeweils unterschiedliche Maßnahmen repräsentieren. Ziel ist es, eine Entscheidungsunterstützung zu geben, an welchen Stellen die Maßnahmen am effektivsten in Bezug auf die Verbesserung der Durchlässigkeit der Landschaft sind. Problematisch bei der Modellierung ist, dass für viele Arten nur vage Informationen vorliegen, wie sie auf bestimmte Störungen reagieren bzw. wie sich ihre Bewegungsmuster ändern.

Der folgende Abschnitt 2 geht zunächst auf die Motivation für die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Landschaftsbewertung ein. Der eigentliche Lösungsansatz wird in Abschnitt 3 vorgestellt, bevor Abschnitt 4 detaillierter auf die Umsetzung und die Berechnung des eingeführten Bewertungsmaßes λ eingeht. Abschnitt 5 zeigt die Anwendung des hier vorgestellten Ansatzes. Abschließend wird in Abschnitt 6 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

2 Motivation

In der Literatur finden sich eine Vielzahl verschiedener Metriken zur Bewertung der Fragmentierung einer Region oder der Konnektivität einer Landschaft (einen Überblick geben Baier et. al. 2006, S. 359ff; Forman 2003, S. 282; Keitt et. al. 1997, S. 4). Die effektive Maschenweite (m_{eff}) gibt z.B. die mittlere Größe der unzerschnittenen Teilflächen in einer Region an (Jaeger, 2000). Vorher festzulegende Landschaftselemente (z.B. alle Land- und Bundesstraßen) grenzen die unzerschnittenen Flächen dabei voneinander ab. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Entwicklung der effektiven Maschenweite über die Zeit für Baden-Württemberg.

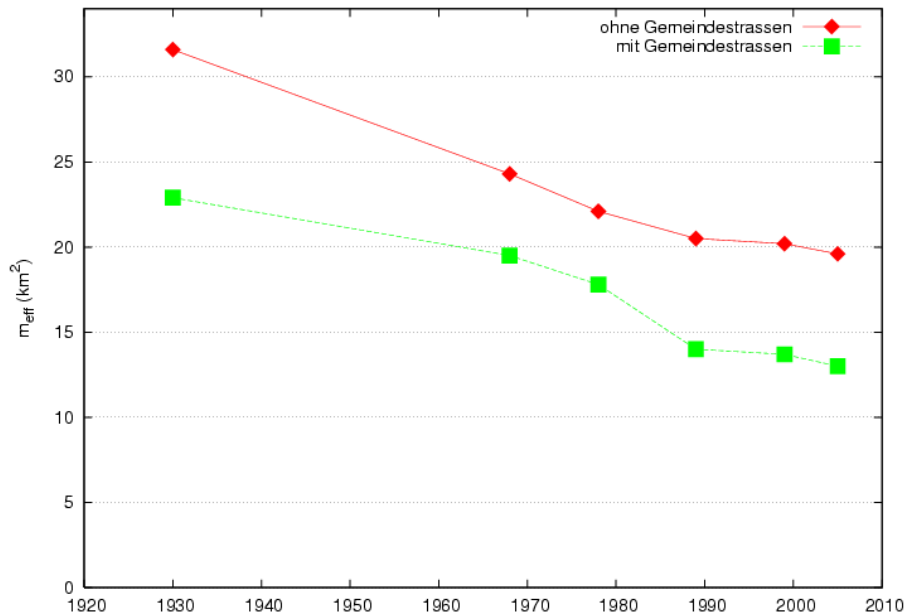


Abbildung 1: Entwicklung der Landschaftszerschneidung in Baden-Württemberg anhand der effektiven Maschenweite, nach Jaeger et. al. (2005)

Die meisten dieser Maße berücksichtigen lediglich die statische Struktur der Landschaft, d.h. ob eine Straße vorhanden ist oder nicht und von welcher Art diese ist. Welchen Einfluss eine Straße für die Migration von Wildtieren hat, hängt allerdings auch von ihrer Charakteristik ab. Insbesondere die Geschwindigkeit und die Intensität mit der die Straße befahren wird, spielen dabei eine Rolle und welche weiteren Umgebungsparameter vorherrschen (Randbewuchs, Schallschutzmaßnahmen, Topographie der umgebenden Landschaft etc.). Erst diese Informationen zusammen bestimmen, ob ein Straßenabschnitt ein Wildwechsel- und Wildunfallschwerpunkt ist oder nicht. Ziel des im Folgenden vorgestellten Ansatzes ist es, derartige Umgebungsparameter und die Verkehrsdynamik mit in die Landschaftsbewertung einzubeziehen. Auf diese Weise lässt sich die Effektivität von Gegenmaßnahmen zur Verbesserung der Durchlässigkeit der Landschaft besser bewerten. Da die statischen Metriken nur die Existenz oder Abwesenheit von Straßen berücksichtigen können und ein Rückbau von Straßen in der Regel keine realistische Option ist, ist die Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Durchlässigkeit mit diesen Metriken schwierig.

3 Modellierungsansatz

Das für die Bewertung mit SimapD verwendete abstrakte Landschaftsmodell basiert

auf einem ungerichteten Graphen. Dieser repräsentiert die möglichen Bewegungsmuster einer untersuchten Tierart innerhalb der Landschaft. Die Knoten des Graphen beschreiben mögliche Habitate oder Kreuzungspunkte verschiedener Wanderkorridore und werden als Patch bezeichnet. Dabei kann es sich durchaus um Trittsteine handeln, die nur für die Durchquerung der Landschaft benutzt werden, aber nicht dauerhaft besiedelt sind. Eine Kante zwischen zwei Knoten gibt an, dass die entsprechenden Patches durch einen Wanderkorridor miteinander verbunden sind. Die Information über ein derartiges Habitatnetz aus Korridoren und Patches lässt sich z.B. durch GIS-Analyse (Müller et. al. 2003), Telemetrieuntersuchungen oder detaillierte vor-Ort-Untersuchungen (Jacksteit 2005) gewinnen. Eine vergleichbare Notation wird auch in der Metapopulationstheorie (Hanski 1999) verwendet.

Dieses strukturelle Modell wird in einem zweiten Schritt um die Dynamik der Störungen erweitert. Jeder Korridor besitzt zwei Attribute, die während der Simulation ausgewertet werden: eine Widerstandsrate und eine Mortalitätsrate. Erstere gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Individuum von der Störung behindert wird den Korridor weiter zu durchqueren (Barriereeffekt). Die Mortalitätsrate gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Individuum beim Überwinden der Barriere getötet wird. Mit diesen beiden Werten lassen sich alle migrationsrelevanten Ereignisse von Wildtieren an Störungen beschreiben: erfolgreiche Überquerung, Umkehr an der Störung und Tötung durch die Störung. Die Ausprägung der Attribute ist abhängig von der konkreten Störung, die den Korridor zerschneidet und wird für eine viel befahrene Straße anders ausfallen als für einen Feldweg. So genannte Untermodelle sind dafür zuständig, die beiden Korridorattribute aus störungsspezifischen Parametern abzuleiten. Häufig liegen lediglich qualitative Informationen über den Einfluss der Wirkungsgrößen auf die Korridorparameter vor. Aus diesem Grund unterstützt das Framework SimapD neben der Auswertung von numerischen und konstanten Modellen auch Fuzzy-Modelle, die dieses vage Wissen bei der Simulation berücksichtigen können (Finke 2006). In Abschnitt 5 wird ein Fuzzy-Modell für die Straßenmortalität verwendet. Je nach Störung sind so verschiedene Untermodelle denkbar, die gemeinsam in einem Strukturmodell verwendet werden können.

4 Simulationsframework

Das in Java geschriebene Programmierframework SimapD führt auf dem im voran-

gegangenen Abschnitt beschriebenen Datenmodell eine zweistufige Simulation durch. Zunächst werden alle Untermodelle mit den störungsspezifischen Parametern ausgewertet und die resultierenden Mortalitäts- und Widerstandswerte für jeden Korridor in der Korridormatrix gespeichert. Diese Korridormatrix wird im zweiten Simulationsschritt benutzt, um das Habitatnetz mit Hilfe eines individuen-orientierten Ansatzes auf seine Durchlässigkeit zu prüfen. Ähnlich den Vorgängen in der Natur versucht dabei jedes Individuum den Graphen erfolgreich zu durchqueren.

4.1 Individuen-orientierte Simulation

Bei der individuen-orientierten Simulation wird in jedem Simulationslauf von allen Patches des Graphen aus jeweils ein Individuum auf einen zufälligen Weg durch das Korridornetz geschickt. An jedem Patch wird zunächst zufällig ein Korridor gewählt, auf dem das Individuum seinen Weg fortsetzt. Per Monte-Carlo-Simulation wird anschließend anhand der Widerstands- und Mortalitätsrate des Korridors entschieden, ob das Individuum bei der Durchquerung des Korridors erfolgreich ist oder behindert bzw. getötet wird. Je nachdem erreicht das Individuum entweder den entfernten Patch, bleibt im gleichen Patch oder beendet den Weg. Der Pfad endet ebenfalls, wenn eine maximale Pfadlänge m erreicht ist, die als Parameter bei der Simulation übergeben wird und standardmäßig auf den doppelten Durchmesser des Graphen gesetzt ist.

Während der Simulation werden detaillierte Informationen über die Pfade der einzelnen Individuen durch den Graphen protokolliert. Diese Informationen dienen nicht nur der Analyse, sondern bestimmen auch die Terminierung der Simulation. Diese endet, wenn die relative Besuchshäufigkeit der Patches über eine vorher definierte Anzahl an Simulationsläufen hinweg unverändert bleibt. Die Verteilung darf sich dabei zwischen zwei Läufen maximal um ein kleines ϵ unterscheiden. Da in jedem Simulationslauf immer von allen Patches genau ein Individuum losgeschickt wird, werden die Veränderungen über alle Patches gleichmäßig in diesen Vergleich einbezogen. Sowohl ϵ als auch die Anzahl der Läufe in denen die Besuchshäufigkeit unverändert bleiben muss, stellen Parameter der Simulation dar.

4.2 Bewertung von Habitatnetzen

Für den Vergleich verschiedener Szenarien ist es wichtig einen einzigen aussagekräftigen Index heranzuziehen. Die während der Simulation protokollierten Daten bieten bereits die Möglichkeit, einen Vergleich von verschiedenen Szenarien über die Besuchshäufigkeit der Patches oder die Mortalitäts- und Widerstandswerte an einzelnen Korridoren vorzunehmen. Allerdings ist es anhand dieser Informationen schwierig, ganze Szenarien zu vergleichen und zu bewerten. Aus diesem Grund berechnet SimapD den Index λ , der die Qualität eines Szenarios im Hinblick auf die Durchlässigkeit der Landschaft wiedergibt.

Der Index basiert auf der Güte aller Pfade, die während der Simulation von den Individuen unternommen wurden. Die Güte $\varphi(p)$ eines Pfades p berechnet sich aus der Länge des Pfades $s(p)$ und der Anzahl der unterschiedlichen besuchten Patches $v(p)$ mit $\varphi(p) = s(p) * v(p)$. Das Intervall der möglichen Werte von $\varphi(p)$ hängt dabei von der maximal zugelassenen Länge m der Pfade bei der Simulation ab, da dies offensichtlich die Pfadlänge und die mögliche Anzahl besuchter Patches limitiert. Es gilt $\varphi(p) \in [1, m*(m+1)]$. Zwischen der Widerstands- und Mortalitätswirkung des Modells und den beiden Faktoren der Pfadgüte $\varphi(p)$ besteht ein antiproportionaler Zusammenhang. Bei einer hohen Mortalitätsrate gibt es nur eine geringe Pfadlänge $s(p)$, da die Individuen häufig vorzeitig getötet werden. Ein hoher Widerstandswert führt dazu, dass die Individuen häufig im gleichen Patch verweilen, wodurch sich $v(p)$ reduziert. Auf Basis aller Pfade lässt sich eine relative Häufigkeitsverteilung erzeugen, die für jeden Gütewert den Anteil an Pfaden angibt, die diese Güte erreicht haben. In Abbildung 2 sind drei Häufigkeitsverteilungen aus verschiedenen Szenarien dargestellt, die die Unterschiede zwischen den Szenarien illustrieren. Ist eine Landschaft kaum durchlässig, ergibt sich eine linkslastige Verteilung. Je durchlässiger die Landschaft ist, desto weiter schiebt sich die Verteilung nach rechts. Im Idealfall (keine Mortalität und keine Widerstandswirkung) ergibt sich fast eine Normalverteilung.

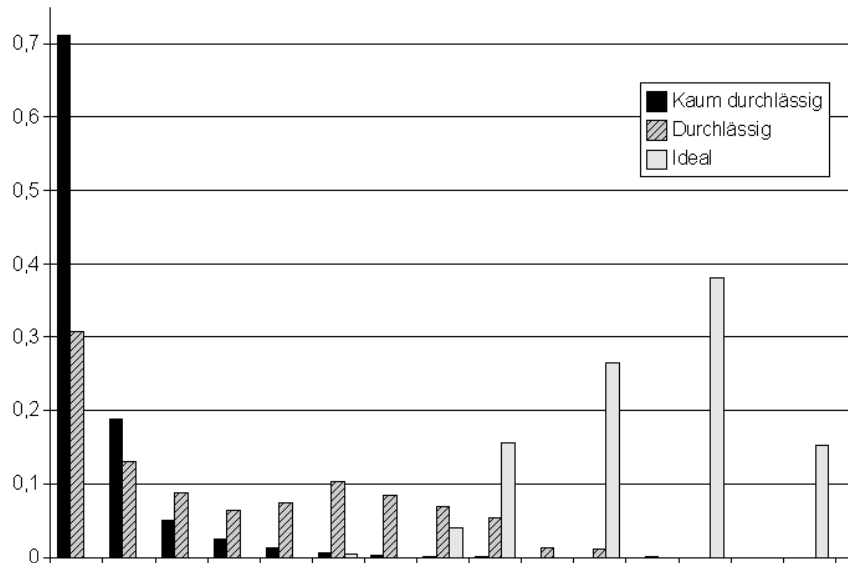


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung der Pfadqualitäten in drei verschiedenen Szenarien

Die relative Häufigkeitsverteilung stellt eine charakteristische Eigenschaft des Habitatnetzes dar. Der Erwartungswert dieser relativen Häufigkeitsverteilung wird als Durchlässigkeitsindex λ bezeichnet und dient als aggregiertes Maß für die Bewertung verschiedener Szenarien innerhalb von SimapD.

5 Anwendungsbeispiel

Der in den vorangegangenen Abschnitten erläuterte Modellierungs- und Simulationsansatz soll in diesem Abschnitt anhand eines kurzen fiktiven Anwendungsbeispiels illustriert werden. Als Störung sollen hierbei eine Hauptstraße und eine Nebenstraße dienen, die eine heterogene Landschaft mit Wald und Wiesenflächen zerschneidet (Abbildung 3). Als Untermodell zur Beschreibung der Mortalitätseigenschaften der Straßen wird ein Fuzzy-Modell verwendet, das in Zusammenarbeit mit Martin Strein von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) auf Grundlage von Wildunfalldaten aus Baden-Württemberg erstellt wurde (Finke et. al. 2006). Das Modell ist für Rotwild anwendbar und umfasst fünf Eingangsparameter: relative Rotwildichte, Verkehrsaufkommen in Fahrzeugen pro Tag, Länge des Unfallschwerpunktes in Metern, Straßentyp (Kreis-, Land- oder Bundesstraße) und Randbewuchs bzw. Nutzung. Daraus wird der Jahresdurchschnitt an Wildunfällen berechnet und für die Simulation so skaliert, dass die Werte im Intervall $[0.0, 0.5]$ liegen.

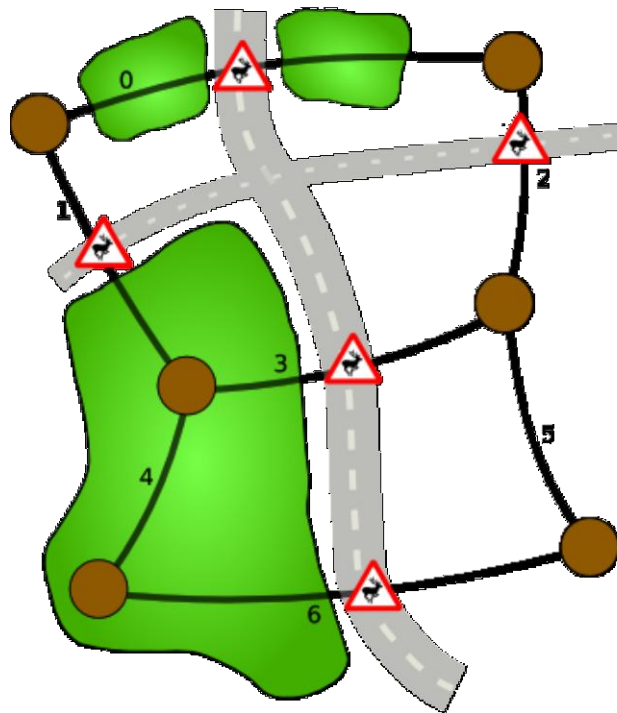


Abbildung 3: Beispielszenario einer Landschaft, die durch zwei Straßen zerschnitten wird

Nimmt man die in Tabelle 1 angegebenen Modellparameter an und führt die Simulation des Szenarios mit einer maximalen Pfadlänge $m = 6$, $\varepsilon = 0.0001$ und 80 stabilen Läufen durch, dann ergibt sich $\lambda = 10.88$. Ausgehend von diesem Szenario lassen sich weitere Entwicklungen simulieren. Wird davon ausgegangen, dass sich der Verkehr auf der Straße, die Korridor eins kreuzt, in der nächsten Zeit um ca. 1000 Fahrzeuge pro Tag erhöht, kann dies leicht durch eine entsprechende Erhöhung der Fahrzeuge pro Tag bei den Parametern für Korridor eins repräsentiert werden. Mit dieser einen Änderung an den Parametern verringert sich der Durchlässigkeitsindex erwartungsgemäß auf $\lambda = 10.53$.

Korridor	Dichte	Länge	Verkehr	Straßentyp	Umgebende Landschaft
Korridor 0	4.1	612	4358	Landstraße	Wald
Korridor 1	4.71	444	3826	Kreisstraße	Wald/Grünland
Korridor 2	4.1	807	2762	Kreisstraße	Feld
Korridor 3	4.71	500	4624	Landstraße	Wald/Feld
Korridor 6	4.1	249	4624	Landstraße	Wald/Grünland

Tabelle 1: Verwendete Parameter für die Simulation des initialen Szenarios

Eine Entscheidungshilfe kann SimapD bei der Planung von Maßnahmen zur Verbesserung der Konnektivität leisten, z.B. bei dem Bau einer Grünbrücke². Da solche Maßnahmen in der Regel aufwändig und teuer sind, muss die Platzierung gut gewählt sein, um den größtmöglichen Effekt zu erzielen. Für die Simulation sei angenommen, dass eine Grünbrücke die Mortalität um 80% reduziert. Die Simulation liefert die in Tabelle 2 angegebenen Ergebnisse. Dabei wurden insgesamt fünf Simulationen durchgeführt, wobei in jeder Simulation jeweils für den angegebenen Korridor eine Reduzierung der Mortalität um 80% im Vergleich zum Ausgangsszenario angenommen wurde. Tabelle 2 zeigt, dass eine solche Maßnahme am Besten für Korridor sechs implementiert werden sollte, da auf diese Weise mit $\lambda = 12.92$ die beste Durchlässigkeit erreicht wird. Eine Grünbrücke an Korridor drei ist die zweitbeste Wahl. Die Präferenz für Korridor sechs entsteht aus der Struktur des Graphen. In diesem Fall gilt für die beiden Patches, die Korridor sechs verbindet, dass ein Individuum fast eine Wahrscheinlichkeit von 1.0 hat, einen anderen Patch erfolgreich nicht nur nach Norden zu erreichen, sondern mit der Grünbrücke auch in West-Ost-Richtung. Im Falle der Installierung einer Grünbrücke an Korridor drei gilt das für die Patches, die dieser Korridor verbindet, nicht. Startet ein Individuum von einem dieser Patches, dann besteht nur eine 2/3 Wahrscheinlichkeit, dass keine Störung überquert werden muss. Richtung Norden muss immer noch eine Kreisstraße überwunden werden. D.h. im Korridor-drei-Szenario gibt es mehr Pfade, die nach nur einem Schritt beendet werden, weil das Individuum an der Straße getötet wird.

Korridor	Reduzierte Mortalitätsrate	Lambda
Korridor 0	0.073	12.43
Korridor 1	0.060	12.25
Korridor 2	0.071	12.45
Korridor 3	0.072	12.61
Korridor 6	0.068	12.92

Tabelle 2: Ergebnisse der Simulation mit je 80%iger Reduzierung der Mortalitätsrate

Der Index λ bewertet die große störungsarme Partition des Graphen, die durch die

² Eine brückenartige Konstruktion über eine Straße, die komplett begrünt ist und eine gefahrlose Überquerung einer Straße für Wildtiere ermöglicht.

Korridore vier, fünf und sechs aufgespannt wird, besonders positiv. Das entspricht der gewünschten Eigenschaft, da diese Partition ein zerschnittenes Gebiet darstellt, das mit einer Grünbrücke gefahrloser durchquert werden kann und längere Bewegungsmöglichkeiten zulässt.

6 Fazit und Ausblick

SimapD stellt ein flexibles Framework für die Simulation und Bewertung der Durchlässigkeit von Habitatnetzen dar. Durch das abstrakte Landschaftsmodell und die Verwendung unterschiedlicher Störungsmodelle kann das Framework auf eine Vielzahl von Problemstellungen in einem weiten Bereich von räumlichen Skalen angewendet werden. Je nach Kontext sind detaillierte Parameter in die Simulation integrierbar, die auf die vorhandenen Informationen und anthropogenen Störungen zugeschnitten sind. Das Anwendungsbeispiel zeigt, wie sich der von SimapD errechnete Durchlässigkeitsindex λ für den Vergleich verschiedener Entwicklungs- und Planungsszenarien verwenden lässt. Der Einsatz für größere Habitatnetze und konkrete Fragestellungen ist im Rahmen von zukünftigen Arbeiten vorgesehen. Hierbei ist die algorithmische Optimierung von Habitatnetzen eine interessante Perspektive. Um die Anwendung der Simulation zu vereinfachen, wird derzeit eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, mit der keine Programmierkenntnisse bei der Anwendung von SimapD zur Bewertung von Landschaftskonfigurationen erforderlich sind.

7 Literatur

- Baier, H.; Erdmann, F.; Holz, R.; Waterstraat, A. (Hrsg) (2006): Freiraum und Naturschutz – Die Wirkung von Störungen und Zerschneidungen in der Landschaft. Springer Verlag
- Finke, J (2006): Softcomputing zur Modellierung von anthropogenen Populationsstörungen. In: A. Gnauck (Hrsg): Modellierung und Simulation von Ökosystemen – Workshop Kölpinsee 2005, S. 183-195. Shaker Verlag
- Finke, J; Strein, M.; Sonnenschein, M (2006): A Simulation Framework for Modelling Anthropogenic Disturbances in Habitat Networks. Eingereicht für: Ecological Informatics, Special Issue 3: Bio-inspired Computation and Hybrid Modelling of Aquatic and Terrestrial Ecosystems.
- Forman, R.T.T (2003): Land Mosaics – The ecology of landscape and regions. Cambridge University Press

- Forman, R.T.T.; Sperling, D (2002): Road Ecology: Science and Solutions; Island Press.
- Hanski, I (1999): Metapopulation Ecology. Oxford University Press
- Holzgang, O.; Sieber, U.; Heynen, D.; von Lerber, F.; Keller, V.; Pfister, H.P. (2000): Wildtiere und Verkehr – eine kommentierte Bibliographie. Schweizerische Vogelwarte, Sempach, 72 S.
- Hötter, H.; Thomson, K.-M.; Köster, H. (2004): Auswirkung regenerativer Energiegewinnung auf die biologische Vielfalt am Beispiel der Vögel und Fledermäuse – Fakten, Wissenslücken, Anforderungen an die Forschung, ornithologische Kriterien zum Ausbau von regenerativen Energiegewinnungsformen. Endbericht, Michael-Otto-Institut im NABU.
- Jaeger, J (2000): Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15/2, 115-130
- Jaeger, J; Grau, S.; Haber, W. (2005): Einführung: Landschaftszerschneidung und die Folgen. *GAiA Themenschwerpunkt Landschaftszerschneidung*. 14/2, 98-100
- Jacksteit, J. (2005): Kleinräumige Untersuchung und Analyse von Wildtierkorridoren am Beispiel des Bereichs von B27 und B31 zwischen Donaueschingen und Blumberg. Diplomarbeit, Fachhochschule Rottenburg (FHR), Hochschule für Forstwirtschaft.
- Keitt, T. H.; Urban, D.; Milne, B. T. (1997): Detecting Critical Scales in Fragmented Landscapes. *Conservation Ecology*. <http://www.ecologyandsociety.org/vol1/iss1/art4/> (2007-01-17)
- Müller, U.; Strein, M.; Suchant, R (2003): Wildtierkorridore in Baden-Württemberg. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Arbeitsbereich Wildökologie, Abt. Landschaftspflege. http://www.fva-bw.de/publikationen/fff_bericht/FFF_H_48.pdf (2007-01-17)