



Ein Zelluläres Automatenmodell zur Simulation urbaner Landnutzungsänderungen

*Diplomarbeit von
Dirk Rommeney*

*vorgelegt beim Institut für Geoökologie
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
an der Universität Potsdam
am
23.06.2006*

*Gutachter: Dr. Matthias Lüdeke
Prof. Dr. Wolfgang Cramer
Potsdam Institut für Klimafolgenforschung*

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel sind angegeben. Die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Potsdam, den 23.06.2006

(Dirk Rommeney)

Danksagung

Mein Dank gilt Dr. Gerhard Petschel-Held († 09.09.2005), Dr. Matthias Lüdeke, Diana Meyer-Veden, Dr. Dagmar Haase (UFZ Leipzig), Maria Boschütz, Prof. Wolfgang Cramer und den Menschen der Integrierten Systemanalyse am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung für die Unterstützung, die Lehre, den Fokus, wie auch die angenehme und sehr bereichernde Zeit.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
2. Zelluläre Automaten	3
2.1 Elemente eines zellulären Automaten.....	5
2.1.1 Zellraum.....	5
2.1.2 Randbedingungen.....	6
2.1.3 Nachbarschaft.....	7
2.1.4 Zustandsmenge der Zellen.....	8
2.1.5 Übergangsregeln.....	8
2.1.6 Ausgangskonfiguration.....	10
2.2 Das "Game of Life".....	11
3. Urbane Landnutzungsmodellierung.....	13
3.1 Anwendung des zellulären Automaten-Ansatzes in der Modellierung urbaner Landnutzungsdynamiken.....	14
4. Der Potentialansatz in urbanen zellulären Automaten-Modellen....	20
4.1 Der Potentialansatz nach White und Engelen.....	20
4.1.1 Struktur.....	20
4.1.2 Analyse der Regelsätze.....	24
4.1.3 Fazit aus den Monte-Carlo-Simulationen.....	28
4.2 Der Potentialansatz für zwei Nutzungsklassen.....	29
4.3 Der Potentialansatz für drei Nutzungsklassen.....	32
5. Das Fallbeispiel Leipzig.....	38
5.1 Datengrundlage.....	38
5.2 Identifikation der relevanten Prozesse der Landnutzungsänderungen.....	41
5.3 Anwendung des Potentialansatzes auf den Fall Leipzig.....	42
5.4 Anwendung eines frei definierten Regelsatzes.....	48
5.4.1 Exploration der Regelsätze.....	49
5.4.2 Qualitative Validierung der Simulationsergebnisse.....	55
5.4.3 Quantitative Validierung der Simulationsergebnisse.....	57
6. Diskussion und Ausblick.....	58
7. Literatur.....	63
8. Appendix.....	69

Abbildungsverzeichnis

2.1	Dimensionen eines Zellraumes: a) eindimensional, b) zweidimensional, c) dreidimensional	5
2.2	Zweidimensionale Zellräume mit unterschiedlicher Gittergeometrie: a) rechteckiges, b) hexagonales und c) dreieckiges Gitter	5
2.3	Verschiedene Strategien, Randbedingungen zu definieren, hier dargestellt für einen eindimensionalen Zellraum	6
2.4	Zweidimensionaler Zellulärer Automat mit periodischer Randbedingung	6
2.5	Verschiedene Nachbarschaften für ein zweidimensionales Rechtecksgitter: a) Neumann-Nachbarschaft ($r=1$), b) Neumann-Nachbarschaft ($r=2$), c) einfache Moore-Nachbarschaft ($r=1$), d) erweiterte Moore-Nachbarschaft ($r=2$), e) Doughnut-Nachbarschaft, f) willkürliche Nachbarschaft	7
2.6	Die ersten Iterationen eines „Game of Life“	12
4.1	Erweiterte Nachbarschaft von insgesamt 113 Zellen, unterteilt in 18 euklidische Distanzzonen (nach White & Engelen, 1993)	21
4.2	Die ersten fünf Iterationen verschiedener Ausgangssituationen, berechnet nach den Potentialparametern aus dem Parametersatz (Gl. 4.6)	31
4.3	Kritische Moore-Nachbarschaftskonstellationen mit N1 urbanen Nachbarzellen	32
4.4	Potentialfunktionen (nach Gleichung 4.12) in einer einfachen Moore-Nachbarschaft	34
4.5	Die ersten Iterationen verschiedener Ausgangssituationen mit drei Nutzungsklassen, berechnet nach den Parametersätzen aus (4.11)	34
4.6	Beispiel (1) einer Transformationsdynamik des Potentialansatzes bei drei Nutzungsklassen	36
4.7	Beispiel (2) einer Transformationsdynamik des Potentialansatzes bei drei Nutzungsklassen	36
4.8	Unterteilung der Nachbarschaftskonstellationen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Transformationsdynamik am Beispiel der Nutzung ‚Wohnen‘.	37
5.1	Flächennutzungsentwicklung in Leipzig 1870-2003 (Quelle: Haase & Magnucki, 2004)	40

5.2	Entwicklung der Flächennutzungen in Leipzig zwischen 1870 und 2003	41
5.3	Drei-dimensionale Darstellung der Potentialmatrizen der Nutzungsklassen zum Zeitpunkt $t=5$; Ausgangssituation Leipzig 1940; Potentialparameter nach Gl. 5.2	43
5.4	Simulationen der urbanen Landnutzungsentwicklung Leipzigs nach dem Potentialsatz (siehe Graphen); Ausgangssituation: Leipzig 1940; a) 6 Iterationen, Zeitschnitt 10 Jahre b) 10 Iterationen	46
5.5	Simulation nach deterministischen Transformationsregeln, Ausgangssituation Leipzig 1870; differenzierte industrielle Entwicklung im inner- & randstädtischen Bereich, Regelsatz siehe Graphen.	50
5.6	Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; disperse Siedlungsentwicklung am Stadtrand und im Umland, Regelsatz siehe Graphen.	51
5.7	Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; starke Siedlungsentwicklung im Umland, Regelsatz siehe Graphen.	51
5.8	Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; starke disperse Siedlungsentwicklung im Umland, Regelsatz siehe Graphen.	52
5.9	Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; starke disperse Siedlungsentwicklung im Umland, Regelsatz siehe Graphen.	53
5.10	Simulation der Landnutzung 2003 nach deterministischen Transformationsregeln, Ausgangssituation Leipzig 1940, Regelsatz siehe Graphen.	54
5.11	Darstellung Modellergebnisse auf Grundlagen der Stadtbezirksgrenzen	55
5.12	Qualitative Validierung der LUT-Simulation reduziert auf zwei Nutzungen (Urban / Nonurban)	57
5.13	Quantitative Analyse LUT-Simulation; Gesamtanzahl der simulierten Zellen einer Nutzung im Vergleich zur den Realdaten.	58

Tabellenverzeichnis

3.1	Regelsysteme ausgewählter urbaner CA-Modelle	19
4.1	Gewichtungparameter m_{kd} einer fiktiven Stadtsimulation (White & Engelen, 1993)	22
4.2	Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Simulation der Transformationspotentiale nach White und Engelen 1993	25
4.3	Gewichtungparameter m_{kd} der Cincinnati-Simulation (White & Engelen, 1997)	27
4.4	Monte-Carlo-Simulation zur Simulation der Transformationspotentiale für das Cincinnati-Modell von White & Engelen 1997	27
5.1	Thematische Aggregation der Landnutzungstypen Stadt Leipzig;	39
5.2	Quantifizierung der Simulationsergebnisse aus den Simulationen I & II: Gesamtanzahl der generierten Nutzungszellen der Modellläufe	45
5.3	Relative Anteile p_{ij} der Übereinstimmung von Nutzung i und j zwischen Simulation und Nutzungskartierung im Jahr 2003 für den Potential-Regelsatz der Simulation IIb.	48
5.4	Quantitative Analyse LUT-Simulation: Differenzierte Darstellung der simulierten Zellen einer Nutzung im Vergleich zur den Realdaten.	58
5.5	Relative Anteile p_{ij} der Übereinstimmung von Nutzung i und j zwischen Simulation und Nutzungskartierung im Jahr 2003 für den besten frei definierten Regelsatz	59

We cannot really predict, but we can explore possible futures, and can help to imagine some of the properties of these.
(Allen, 1997).

1. Einführung

Die Geschwindigkeit, das Ausmaß und die räumliche Reichweite menschlicher Veränderungen der Erdoberfläche sind beispiellos (Turner et al., 1990). Veränderungen der Landbedeckung und Landnutzung beeinflussen signifikant die Schlüsselfunktionen des Erdsystems (Lambin et al., 2001).

Urbanisierung, als physikalische Transformation von Landschaften, ist eine der mächtigsten, sichtbarsten und irreversiblen Belastungen der Erde (IHDP, 2005). Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung, ungefähr 3,3 Milliarden Menschen leben nach heutigen Schätzungen in Städten (UN, 2004). Gemäß Prognosen wird diese Zahl im Jahre 2030 auf 60% steigen (IHDP, 2005).

In entwickelten Staaten führt die Fragmentierung der Landschaft durch die großräumigen urbanen Agglomerationen und ausgedehnten suburbanen Siedlungen zu einer Gefährdung verschiedenartiger Ökosystemprozesse (Lambin et al., 2001). Die Überbauung und Versiegelung von Boden bedeutet die radikalste ökologische Schädigung anthropogen induzierter Bodenveränderungen (SRU 2000), durch die irreversible Verluste des natürlichen Funktionspotentials des Bodens (Puffer- und Filterkapazität der Böden, zunehmende Deposition und Akkumulation von Abfällen) hervorgerufen werden. Auf versiegelten Flächen fließt Wasser bevorzugt oberflächlich ab, so dass der Grundwasserspiegel absinkt und die Funktion der Flutkontrolle verringert wird. Zunehmende Luftverschmutzung und die Verringerung der Kalt- und Frischluftzufuhr mindern die Klimafunktion in urbanen Räumen (Johnson, 2001). Der Prozess der Ökosystem-Fragmentierung führt zur Reduzierung der Habitatgüte und Verlusten an Biodiversität.

Die Erstellung von Szenarien ist ein häufig praktizierter Ansatz, die Folgen denkbarer Entwicklungen abzuschätzen und unerwünschte Entwicklungstendenzen durch korrigierendes Eingreifen zu unterbinden (Benenson & Torrens, 2002). Lambin et al., führen folgende Fragestellungen als Hauptaufgaben in der Erstellung von Landnutzungsszenarien an:

- Welche Umwelt- und sozioökonomischen Variablen sind für den Landnutzungswandel verantwortlich?
- An welchen Orten findet die Änderung der Landnutzung statt?
- In welchem Umfang findet eine Änderung der Landnutzung statt?

Zelluläre Automaten vermögen durch ihre räumliche Struktur die Fragen nach dem Ort und der Quantität von Veränderungen zu beantworten (Batty, 1997; Wu, 1998). Die Regeln des Zellulären Automaten implementieren die relevanten Prozesse des Landnutzungswandels und ermöglichen damit Szenarien zu entwickeln, mögliche alternative Strategien zu definieren und zur Entscheidungsunterstützung beizutragen (Allen, 1997)

Das Regelsystem eines Zellulären Automaten ist ein zentraler Punkt für das Verständnis des Modellverhaltens und vice versa für die Identifizierung der relevanten Prozesse in der urbanen Landnutzungsdynamik. Daraus resultiert die Motivation für diese Arbeit, das Modell auf die wesentlichen Komponenten zu reduzieren und die Möglichkeiten einer endogenen Regelformulierung zu untersuchen.

Dafür sollen bestehende Regelsysteme analysiert und die daraus folgenden Transformationsdynamiken untersucht werden. Die Implementierung erfolgt am Beispiel der Landnutzungsentwicklung von Leipzig.

Allen sieht in dem Untersuchungsprozess und der Validierung der Modellierung eine wertvolle Phase, die dazu verhilft, das Modell zu verbessern und das Verständnis des realen Systems zu vertiefen. „Diese Lernphase ist möglicherweise der wertvollste Teil der gesamten Modellierung (Allen, 1997)“.

In der folgenden Arbeit wird es also nicht darum gehen, aus den bestehenden zellulären Automatenmodellen eines auszuwählen, das die beobachtete Landnutzungsentwicklung am besten wiedergibt, sondern genau zu untersuchen, in wieweit einfache, endogene Regelsysteme der komplexen Stadtentwicklung gerecht werden können. Damit soll ein Beitrag zur sowohl für die Stadtentwicklung als auch für die Nutzungsplanung entscheidende Frage geleistet werden, wie sich das Verhältnis von exogenen Bestimmungsfaktoren und endogenen, aus der dynamischen Wechselwirkung der Nutzungen hervorgehenden Faktoren darstellt.

”Das Ganze ist mehr als
die Summe seiner Teile “
(Aristoteles)

2. Zelluläre Automaten

Städte sind, wie die meisten geographischen Phänomene, komplexe Objekte (Barredo et al., 2003; White & Engelen, 1993). Sie verbinden physikalische, ökologische und menschliche Systeme und weisen mit ihrem komplizierten Gemenge an Aktivitäten und Wechselwirkungen einige für komplexe Systeme charakteristische Eigenschaften wie Selbstorganisation und Emergenz auf (Schweitzer, 1998; Batty & Longley, 1994; Allen, 1997; Portugali, 2000). Arbeiten zu der Theorie dynamischer und evolutionärer Systeme stützen die Annahme, dass Komplexität als inhärentes, notwendiges Charakteristikum von Städten aufgefasst werden kann (Allen, 1997). Diese Annahme impliziert einen Modellansatz, der die selbstorganisatorischen Eigenschaften emergenter Systeme abzubilden vermag (Barredo, 2003).

Zelluläre Automaten gehören zu einer Familie diskreter Modelle, die angewandt werden, um die fundamentalen Gesetzmäßigkeiten von Entwicklungen und Selbstorganisation zu erforschen. Der Zellularansatz ermöglicht ein hohes Maß an räumlicher Auflösung und Realismus, sowie eine direkte Verbindung der Ergebnisse zu den generellen Theorien der Strukturentwicklung. Die Arbeiten von Wolfram zeigen die Fähigkeit eines Zellulären Automaten, definiert als ein räumlich und zeitlich diskretes dynamisches System, eine komplexe Dynamik zu generieren, die allein durch die Interaktionen der Zellen mit vorgegebenen lokalen Regeln hervorgebracht wird (Wolfram, 1984). Der zelluläre Automat gehört zu der Klasse der sich selbst organisierenden Systeme und kann als „bottom-up“ Ansatz aufgefasst werden (Li & Yeh 2000).

Es finden sich Zelluläre Automaten in vielen Bereichen der räumlichen Modellierung. De Kok entwickelte ein Entscheidungsunterstützungssystem („decision-support system“) für das Küstenzonenmanagement in Indonesien (De Kok et al., 2001), Hea wandte ein zelluläres Automatenmodell zur Ausweisung von Schutzzonen für Grassteppen in der Inneren Mongolei an (Hea et al., 2004). Oxley et al. implementieren Bewässerungs- und Vegetationsmodelle in einem räumlichen Modell zur Abschätzung planungs- und politikrelevanter Einflüsse auf Degradation und Desertifikation (Oxley et al., 2004). Rubiano (2000) stellte ein Modell zur Untersuchung der Änderung der Landbedeckung in einer tropischen Andenregion durch zunehmende landwirtschaftliche Nutzung vor, Fritsch entwickelte das rasterbasierte, deterministische Allokationsmodell LUCK zur Verortung von Landnutzungsänderungen (Fritsch, 2002).

Einen Anwendungsschwerpunkt von Zellulären Automaten in der Landnutzungsmodellierung bildet die Modellierung der räumlichen Entwicklung von urbanen Räumen (Batty, 1991; Barredo, 2003; White & Engelen, 1993, 1997; Couclelis, 1997; Clarke, 1996; Li & Yeh, 2000).

In anderen Disziplinen finden sich Zelluläre Automaten beispielsweise in der Modellierung von Populationsdynamiken diverser Pflanzenarten (Balzter et al., 1998), Reaktions-Diffusions-Systemen (Greenberg et al., 1978), Waldbränden (Goncalves & Diogo 1994) und Lavaströmen (Barca, Crisci et al., 1994).

Die komplexe Dynamik eines zellulären Automatenmodells inspirierte nicht zuletzt Musiker und Freunde elektronischer Klänge, ein zelluläres Automatenmodell akustisch umzusetzen und mit dieser neuen Form der Komposition zu experimentieren (Wolfram, 1988; Automaton-Monk, 2004; WolframTunes, 2005).

Ein Zellulärer Automat (im Folgenden mit der gängigen Bezeichnung „CA“ abgekürzt, nach „cellular automaton“) ist definiert als ein räumlich und zeitlich diskretes dynamisches System, bestehend aus einem regulären Raster von gleichförmigen identischen Zellen (Wolfram, 1984). Zu Beginn einer Simulation wird der Anfangszustand des Systems vorgegeben, was im Fall einer Landnutzungsmodellierung durch die geographischen Landnutzungsdaten erfolgt. Eine Änderung des Systemzustands erfolgt in diskreten Zeitschritten. Jede Zelle befindet sich in einem definierten Zustand. Die Änderung des Zustands einer Zelle in einem Zeitschritt erfolgt entsprechend eines lokalen Regelsystems und ist abhängig von ihrem eigenen Zustand, sowie den Zuständen ihrer Nachbarzellen zum Zeitpunkt t . Das Regelsystem wird auf alle Zellen lokal und simultan zum Zeitpunkt t angewendet und generiert dann die neuen Zustände der Zellen zum Zeitpunkt $t+1$.

Das globale Systemverhalten wird demnach nicht über ein Gleichungssystem umfassend beschrieben, sondern resultiert allein aus Interaktionen der Zellen anhand der vorgegebenen lokalen Regeln und dem Anfangszustand des Automaten (Weimar, 1997).

Die Terminologie Zellulärer Automat bezieht sich damit auf das wesentliche Attribut dieses Automaten: alle Zellen sind im Grunde einzelne Automaten, die nach exakt den gleichen Regeln funktionieren. Die besondere Eigenschaft eines solchen „Teilautomaten“ ist, dass in seine Zustandsentwicklung nicht nur sein eigener Zustand, sondern auch der benachbarter Teilautomaten eingeht (Weimar, 1997).

Zelluläre Automaten wurden ursprünglich von dem Physiker Ulam in den 1940er Jahren entwickelt und bald darauf von Neumann zur Untersuchung der logischen Natur selbstreproduzierender Systeme weiterentwickelt (vgl. Benenson und Torrens, 2004; (White & Engelen, 1993)). 1970 stellte der Mathematiker Conway das populäre Spiel „Game of Life“ vor, ein Klassiker unter den Zellulären Automaten. Eine Renaissance in den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen erfuhr das Konzept der CA durch die Arbeit von Wolfram (1984), der das Vermögen der CA, sehr komplexe Strukturen aus einem einfachen Regelsystem zu generieren, systematisierte.

2.1 Elemente eines Zellulären Automaten

Ein klassischer Zellulärer Automat besteht aus Elementen, die alle durch exakte mathematische Definitionen beschrieben werden können. Nur wenn alle Bausteine eindeutig (ob mathematisch oder nicht) festgelegt bzw. dargestellt sind, ist auch der Zelluläre Automat eindeutig definiert und beschrieben (Freiwald & Weimar, 2001; Weimar, 1997; Torrens, 2000). Angelehnt an Weimar (1997) werden die verschiedenen Elemente im Folgenden erläutert.

2.1.1 Zellraum

Als Zellraum wird der Raum bezeichnet, in dem die Entwicklung stattfindet und der durch Rasterzellen mit diskreter Struktur repräsentiert wird. Unterschiede treten in der Dimension (ein-, zwei-, oder dreidimensional, siehe Abbildung 2.1), der Geometrie der Zellen (z.B. rechteckig, hexagonal, dreieckig, siehe Abbildung 2.2) und in der Größe (z.B. der gesamten Gittermatrix im zweidimensionalen Fall) auf.

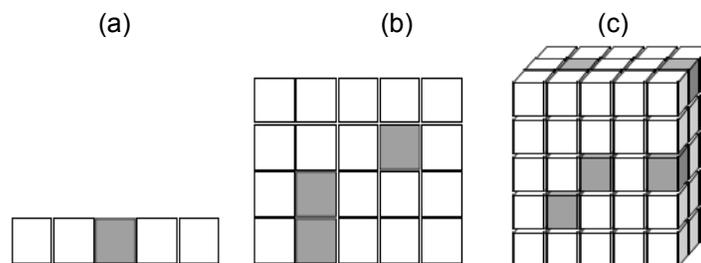


Abbildung 2.1: Dimensionen eines Zellraumes: a) eindimensional, b) zweidimensional, c) dreidimensional (nach Weimar, 1997)

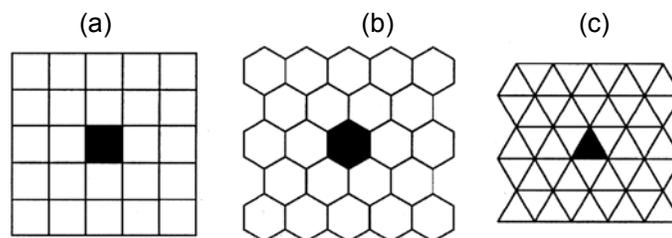


Abbildung 2.2: Zweidimensionale Zellräume mit unterschiedlicher Gittergeometrie: a) rechteckiges, b) hexagonales und c) dreieckiges Gitter. (Quelle: Gerhardt & Schuster, 1995)

Die Geometrie des Zellraumes kann je nach Anwendungsbereich frei gewählt werden. Die Dreiecksform einer Zelle hat den Vorteil, dass diese nur sehr wenige Nachbarn besitzt. Die hexagonale Zellenstruktur besitzt hingegen die geringste Abhängigkeit in Bezug auf die Richtung, die rechteckige Zelle die größte Anzahl an Nachbarn. In der Modellierung werden wegen der leichten Abbildbarkeit auf zweidimensionale Matrizen in der Regel rechteckige Zellen verwendet.

Die Wahl der Dimension ist von der Fragestellung abhängig. Eine Visualisierung der dreidimensionalen Automaten ist vor allem in der zeitlichen Entwicklung problematisch. Eine

Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten ist prinzipiell nur für eindimensionale Automaten möglich, da hier die Zahl möglicher Ergebnisse noch übersichtlich bleibt.

Die Größe des Zellraumes kann theoretisch unendlich sein, richtet sich jedoch in der praktischen räumlichen Modellierung nach dem Untersuchungsraum. Als Limitierung ist in diesem Fall die Rechenkapazität einzukalkulieren. Formalisiert lässt sich ein zweidimensionaler Zellraum L als Menge der Koordinatenpaare der einzelnen Zellen, wie folgt darstellen (Gleichung (2.1), vgl. Gerhard und Schuster, 1995):

$$L = \{(i, j) \mid i, j \in N, 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\} \quad (2.1)$$

2.1.2 Randbedingungen

In einer praktischen Anwendung muss der Zellraum im CA diskret sein. Dies hat im simulierten Prozess die Folge, dass eine Zeitentwicklung irgendwann auf eine Randbegrenzung mit einer veränderten Anzahl an Nachbarzellen treffen kann. Die Regeldefinition für die veränderten Randbedingungen können in offene, periodische oder symmetrische Randbedingungen unterschieden werden (siehe Abbildung 2.3).

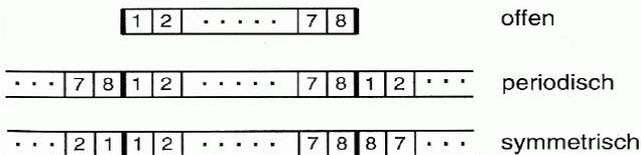


Abbildung 2.3: Verschiedene Strategien, Randbedingungen zu definieren, hier dargestellt für einen eindimensionalen Zellraum (Quelle: Gerhard und Schuster, 1995).

Als offenen Rand bezeichnet man die Situation, in der die veränderte Nachbarschaft an den Randzellen und damit auch ungewollte Effekte hingenommen werden.

Um die ungewünschten Randeffekte zu vermeiden, lassen sich periodische Randbedingungen definieren. Aus einem eindimensionalen Zellulären Automaten (d. h. einem Vektor an Zellen) wird so ein Ring, in dem die linke Zelle des ursprünglichen Streifens mit der rechten benachbart ist. Aus einem zweidimensionalen zellulären Automaten wird auf diese Weise ein Torus, ein „Schlauchreifen“ (siehe Abbildung 2.4)

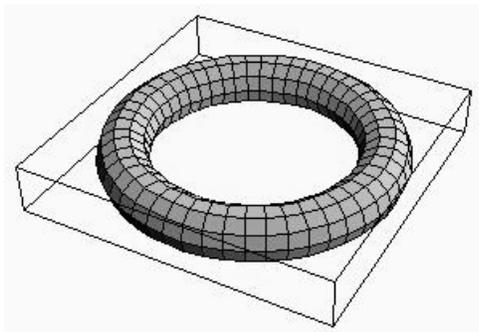


Abbildung 2.4: Zweidimensionaler Zellulärer Automat mit periodischer Randbedingung (Quelle: <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/3/1.html> – Zugriff: 15.05.2006)

Bei einer symmetrischen Randbedingung wird der Zellraum des Zellulären Automaten durch Spiegelung der Zellen künstlich über den Rand hinaus vergrößert. Der Rand wird dafür selbst als Spiegelachse genutzt.

Die Bedeutung, die die Wahl der Randbedingung für den Ablauf der Simulation innerhalb eines Zellulären Automaten hat, wird um so größer, je kleiner der Zellraum ist, da bei einem kleinen Zellraum der Anteil der Randzellen an der Menge aller Zellen des Zellulären Automaten wesentlich größer ist. Bei sehr großen Zellulären Automaten können die Ränder u. U. eine verschwindend geringe Rolle spielen.

2.1.3 Nachbarschaft

Die Nachbarschaft ist der Interaktionsradius einer Zelle. Alle Zellnachbarn in dieser definierten Umgebung stehen in Wechselwirkung mit der Referenzzelle. Die Nachbarschaft, die für jede einzelne Zelle definiert wird, hängt in erster Linie von der Dimension und Geometrie des Zellulären Automaten ab. Ein weiterer entscheidender Faktor ist der Radius. In der ursprünglichen Definition einer Nachbarschaft ist der Radius $r = 1$. Die Neumann- und die Moore-Nachbarschaft sind die zwei am häufigsten verwendeten Nachbarschaftstypen in zweidimensionalen, rechteckigen Zellulären Automaten (siehe Abbildung 2.5).

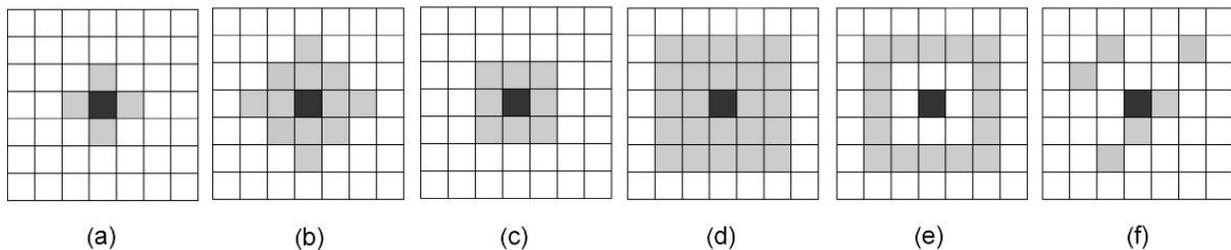


Abbildung 2.5: Verschiedene Nachbarschaften für ein zweidimensionales Rechtecksgitter: a) Neumann-Nachbarschaft ($r=1$), b) Neumann-Nachbarschaft ($r=2$), c) einfache Moore-Nachbarschaft ($r=1$), d) erweiterte Moore-Nachbarschaft ($r=2$), e) Doughnut-Nachbarschaft, f) willkürliche Nachbarschaft (vgl. Weimar, 1997)

Die von Neumann angewandte, gleichnamige Nachbarschaftsbeziehung berücksichtigt lediglich die vier direkt an den Zellkanten angrenzenden Nachbarzellen. Die Moore-Nachbarschaft hingegen zieht auch die vier Eckzellen hinzu, so dass eine Zelle insgesamt acht Nachbarzellen besitzt. Formalisiert werden diese beiden Nachbarschaftsbeziehungen folgendermaßen ausgedrückt (Gerhard und Schuster, 1995):

$$\text{Neumann-Nachbarschaft: } N_{ij} = \{(k, l) \in L \mid |k - i| + |l - j| \leq r\} \quad (2.2)$$

$$\text{Moore-Nachbarschaft: } N_{ij} = \{(k, l) \in L \mid |k - i| + |l - j| \leq r \cup |l - j| \leq r\} \quad (2.3)$$

Für die räumliche Modellierung kann diese Definition jedoch auf einen beliebigen Radius ausgedehnt werden, um den Einfluss weiter entfernter Attribute abbilden zu können (Couclelis, 1985, 1997; Barredo, 2003; Torrens, 2000). Es sind grundsätzlich auch andere Nachbarschaftsräume möglich, wie die Doughnut-Nachbarschaft (Abbildung 2.5 e)), die nur Zellen in einer definierten Distanz betrachtet, oder auch nicht geometrische, willkürlich verstreute Nachbarschaften, die lediglich für alle Zellen des Zellraumes gültig sein müssen (Weimar 1997).

2.1.4 Zustandsmenge der Zellen

Jede Zelle hat eine endliche, diskrete Zahl von Zuständen. In der klassischen Definition des Zellularen Automaten darf jede Zelle zu jedem Zeitpunkt stets nur einen Zustand annehmen. Eine erstaunliche Komplexität tritt bereits bei einem binären Zellulären Automaten mit nur zwei Zuständen, 0 und 1, auf.

Die Anzahl möglicher Zustände in einem CA hat einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtmenge aller möglichen Transformationen bzw. der möglichen Zellzustände in einem Zellraum. Die Anzahl möglicher Transformationen beträgt bei einem binären CA mit einer Moore-Nachbarschaft von 8 Zellen $2^{(2^8)} \approx 10^{77}$. (Zum Vergleich: Man schätzt, dass die Anzahl der Atome im Universum etwa 10^{80} beträgt). Generell formuliert, ist die Summe S aller möglichen Transformationen über die Anzahl der Zellzustände k und die Anzahl der Zellen im Nachbarschaftsraum N definiert: $S = k^{(k^N)}$ (Wolfram, 1983). Die Anzahl der Transformationsvarianten steigt demnach beträchtlich mit jedem zusätzlich möglichen Zellzustand und jeder weiteren Nachbarschaftszelle. Für die häufig verwendete Konstellation einer 3x3 Moore-Nachbarschaft mit acht Zellen und drei Landnutzungsklassen ergibt sich somit eine maximal mögliche Anzahl von $S = 3^{(3^8)} \approx 10^{3124}$ Transformationen. Prinzipiell kann die Menge der möglichen Zustände einer Zelle im Raum frei gewählt werden, eine systematische Analyse jedoch wird bei einer größeren Anzahl nicht praktikabel sein (vgl. Weimar 1997). Dies führt in der räumlichen Modellierung dazu, dass in der Regel nur sehr wenige Zellzustände verwendet werden (Couclelis, 1985, 1997; Barredo, 2003; Torrens, 2000).

2.1.5 Übergangsregeln

Die Übergangsregel ist das wesentliche Kernelement eines CA (White & Engelen, 1993; Benenson & Torrens 2004; Weimar 1997). Sie definiert die Zustandsentwicklung der Zellen in Abhängigkeit der Zustände der Zellen in der festgelegten Nachbarschaft und des Zustands der Zelle selbst. Die Zustände der Zellen, die außerhalb dieser lokalen Umgebung liegen, spielen bei der Entwicklung einer Zelle keine Rolle. Die Regeldefinition bestimmt das zu simulierende Systemverhalten und muss daher, so exakt wie möglich, die untersuchte Realität abbilden.

Basierend auf den definierten Regeln erfolgt die Veränderung aller Zellen in diskreten Zeitschritten, wobei die Zellaktualisierung synchron abläuft.

Das Spektrum der möglichen Regeln ist abhängig von der Zahl der möglichen Transformationen und beträgt daher wie unter dem Punkt 2.1.4 schon erläutert wurde, $S = k^{k^N}$ (Wolfram, 1983).

Es werden grundsätzlich zwei Arten von Regeln unterschieden (Wolfram, 1984; Weimar, 1997):

- Deterministische Regeln legen die Entwicklung eines Automaten für jeden Anfangszustand eindeutig fest. Eine Wiederholung der Entwicklung des Automaten mit dem gleichen Anfangszustand generiert somit stets dasselbe Ergebnis.
- Stochastische Regeln sind in Form von Wahrscheinlichkeitsaussagen formuliert. Sie definieren somit nicht ein eindeutiges Ergebnis für jede Konfiguration, sondern geben Wahrscheinlichkeiten für eine Zustandsänderung der betrachteten Zelle unter den jeweiligen Gegebenheiten an. Die Summe der Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen aller definierten Zustände muss für jede mögliche Konfigurationen von Nachbarzellen „1“ ergeben.

Die deterministischen Regeln können weiterhin noch in totalistische und erweiterte totalistische Regelwerke unterschieden werden. Wird bei der Regel nur die Anzahl der verschiedenen Zustände in der Nachbarschaft einbezogen, nicht jedoch die räumliche Anordnung, spricht man von totalistischen Regeln. Erweiterte totalistische Regeln berücksichtigen zusätzlich den Wert der Referenzzelle (vgl. Wolfram, 1984). Ein Beispiel für ein solches Regelsystem in der Landnutzungsmodellierung findet sich z.B. in de Kok et al. (2001) und White & Engelen (1993).

Übergangsregeln ersetzen die traditionellen mathematischen Funktionen in üblichen Modellen. Dieser methodische Ansatz birgt nach Ansicht von Batty wesentliche Vorteile in sich: Die Regeln ermöglichen, komplizierte Zusammenhänge auf einfache, wesentliche Komponenten zu reduzieren, die ihre Dynamik steuern (Batty, 1997).

Wolfram suchte für simple eindimensionale CAs nach möglichen Grenzmustern. In den konventionellen eindimensionalen CAs besteht der Zellraum aus einem linearen Array an Zellen, in dem jede Zelle zwei Nachbarn hat. Jede Zelle wird jedoch selbst in den Nachbarschaftsraum mit einbezogen, wodurch der einfache eindimensionale CA mit zwei Zellzuständen und einer Nachbarschaft von drei Zellen $2^{(2^3)} = 256$ Übergangsregeln hervorbringt. Ausgehend von dieser Anordnung schlug Wolfram eine empirische Klassifizierung der Regeln vor, die diese nach den Grenzmustern einteilen. Er identifizierte vier Klassen, die mit qualitativ unterschiedlichen Arten von Systemdynamiken korrespondieren (Wolfram, 1984):

- Klasse 1: Räumlich stabile Muster – jede Zelle erreicht einen stabilen Wert von 0 oder 1. Die Automaten erreichen schon nach wenigen Schritten, unabhängig vom Anfangszustand, einen Gleichgewichtszustand, von dem ab alle Zellen in Zukunft in einem Zustand bleiben. Es handelt sich um einen Fixpunktattraktor.

- Klasse 2: Reihen von stabilen oder periodischen Strukturen – jede Zelle verändert ihren Zustand nach einer feststehenden finiten Reihe. Die Automaten der 2. Klasse erzeugen längere periodisch-konstante Muster.
- Klasse 3: Chaotisches, aperiodisches Verhalten – die Reihe der Zellzustände ist nicht periodisch, das räumliche Muster wiederholt sich jedoch nach einiger Zeit. Es bilden sich sehr lange komplexe Muster mit lokalen Strukturen.
- Klasse 4: Komplizierte ortsgebundene Strukturen, die langlebiger und komplexer sind als die der Klasse 3. Kürzere Muster, die in chaotisch-irreguläre ('fraktale') Verteilung der Zellzustände übergehen.

Die Klassifizierung der Regeln nach Wolfram kann nicht direkt über den Regelsatz bestimmt werden, sondern ist nur über eine intensive Untersuchung der Dynamiken möglich. Weitere Klassifizierungsmethoden von CAs wurden entsprechend ihren Zellzuständen und Regelsätzen aufgestellt, jedoch gilt die Einteilung von Wolfram noch immer als die gängigste. Studien von zwei- und höher dimensionalen CAs zeigen, dass die Klassifizierung nach Wolfram auch auf zweidimensionale CA übertragbar ist (Benenson & Torrens, 2004).

Der Erkenntnisgewinn durch eine Klassenzuordnung nach Wolfram liegt in der generellen Abschätzung der Art der möglichen Phänomene. Wünsche (Wünsche, 1998) zeigte, dass diese Klasseneinteilung auch für CAs mit zwei Klassen und einer Nachbarschaft $N > 3$ relevant ist, schlug jedoch eine Zusammenfassung der ersten und zweiten Klasse vor, da viele Regeln bei einer Nachbarschaftsgröße $N > 3$ Grenzmuster verursachen, die sowohl der Klasse 1 wie auch der Klasse 2 zugehörig sind, obzwar die eine oder andere dominieren kann.

Weitere Zellzustände k und eine größere Nachbarschaft N verursachen, wahrscheinlich durch den höheren Anteil an Regelmöglichkeiten, chaotische oder komplexe dynamische Systemdynamiken (Wolfram, 2002).

2.1.6 Ausgangskonfiguration

Das Initialstadium eines Zellularen Automaten ist wesentlich für dessen weitere Entwicklung verantwortlich. Es kann künstlich konstruiert, dem Zufall überlassen werden oder, wie im Fall eines Landnutzungsmodell, durch die gegebenen geographische Daten vorgegeben sein. (vgl. Weimar, 1997). Basierend auf numerischen Experimenten konnte Wolfram jedoch nachweisen, dass die Grenzmuster der Zellulären Automaten nicht von den Anfangszuständen abhängen, sondern durch die Übergangsregeln definiert werden (Wolfram, 1984). Die Bedeutung der Ausgangskonfiguration wird in der Anwendung des „Game of Life“ (siehe Abbildung 2.6) im folgenden Abschnitt veranschaulicht.

2.2 Das „Game of Life“

Conway schuf mit dem 1970 entwickelten „Game of Life“ ein viel beachtetes Beispiel für einen zweidimensionalen binären CA - eine Analogie zur Geburt und dem Tod lebender Organismen. Es ist eine einfache Umsetzung der Automaten-Theorie von Stanisław Ulam (Batty & Xie, 1994) und dient im Folgenden als Beispiel für die Funktionsweise eines simplen CA. Es gibt im „Game of Life“ zwei Zustände der Zellen, d.h. sie „leben“ oder sie sind „tot“. Die Entwicklung einer Zelle - die Geburt, das Überleben und der Tod - wird von definierten Regeln determiniert. Die von Conway aufgestellten genetischen Regeln lauten (Riedl, 1999):

- Eine Zelle wird neu geboren, wenn in ihrer acht Zellen umfassenden Nachbarschaft (Moore-Nachbarschaft) genau drei lebende Zellen existieren.
- Überleben wird eine Zelle nur, wenn in ihrer Nachbarschaft zwei oder drei lebende Nachbarn zu finden sind.
- Existieren zu viele Nachbarn, stirbt die Zelle, da der Überlebensraum knapp wird. Gibt es zu wenige Nachbarn, stirbt die Zelle an Einsamkeit.

Der Algorithmus der Übergangsregeln (hier in der Notation der verwendeten Programmiersprache PV-Wave) lautet demnach:

```
if (f1(i,j) eq 0) and (N eq 3) then f2(i,j)=1
if (f1(i,j) eq 1) and (N lt 2) or (N gt 3) then f2(i,j)=0
if (f1(i,j) eq 1) and (N ge 2) and (N le 3) then f2(i,j)=1
```

wobei f den zweidimensionalen Zellraum und N die Anzahl der belebten Moore-Nachbarschaft beschreibt. Im Sinne der Kategorisierung des vorherigen Abschnitts, handelt es sich also um einen deterministischen, erweitert totalistischen Regelsatz.

Die genetischen Gesetze wurden von Conway so gewählt, dass sie folgende Bedingungen erfüllen:

- Es sollte nach Möglichkeit keine Ausgangspopulation geben, die im Laufe ihrer Entwicklung zu einer unendlichen Anzahl von Individuen führt.
- Es gibt Ausgangspopulationen, die sich, über viele Generationen hinweg, zu komplexen Strukturen mit sehr vielen Einzelindividuen entwickeln.
- Die zu Beginn des Spiels gewählten Ausgangspopulationen sollten im Laufe ihrer Entwicklung eines der folgenden Schicksale erleiden: Sie sterben aus; sie gehen in eine stabile, sich nicht mehr verändernde Population über; sie gehen in einen oszillierenden Zustand über, bei dem sich bestimmte Muster zyklisch endlos wiederholen.

Conway vermutete zunächst, dass mit diesen Spielregeln ein unendliches Wachstum von Populationen unmöglich sei. Eine Forschergruppe am Massachusetts Institute of Technology

(MIT) entdeckte schon 1970 eine als Gleiterkanone bezeichnete oszillierende Struktur, die nach jeweils 30 Generationen einen aus fünf Zellen bestehenden Gleiter ausstößt, der sich dann weiter fortbewegt. Neben den stabilen und zyklischen Populationen gibt es also tatsächlich, entgegen Conways ursprünglicher Ansicht, Populationen, die unbegrenzt wachsen können.

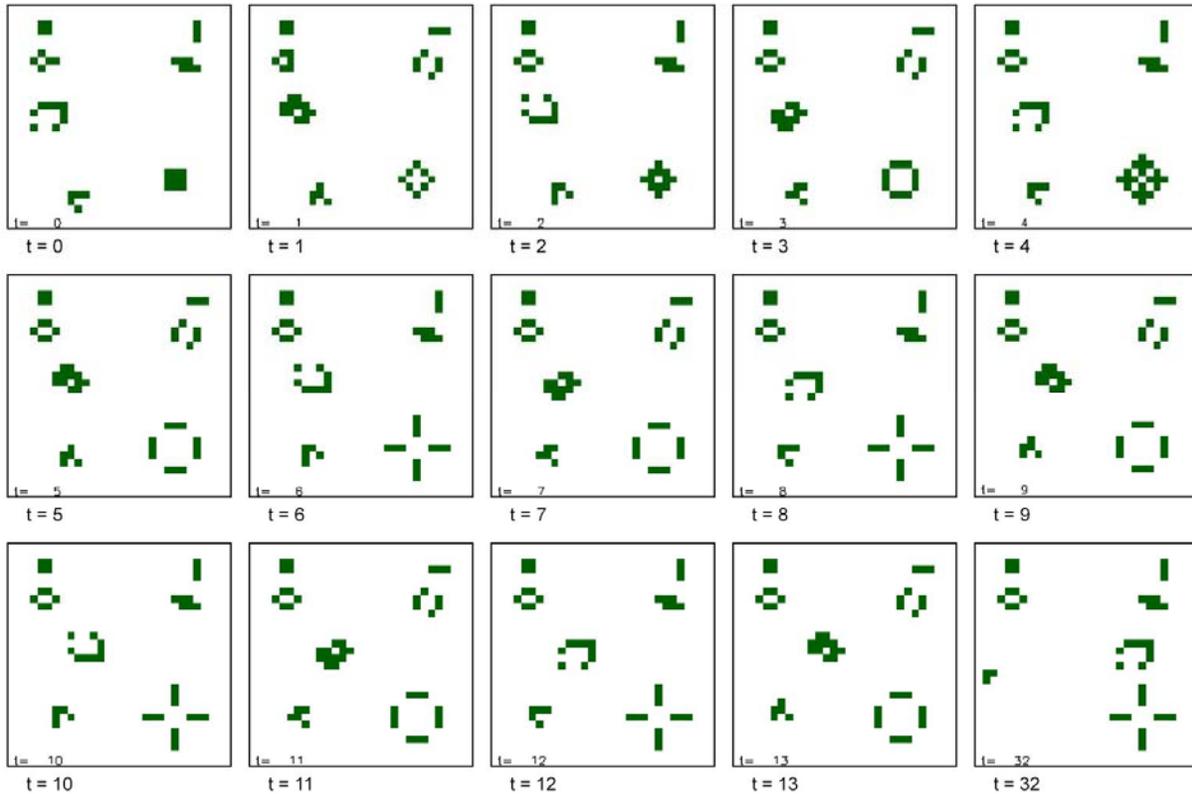


Abbildung 2.6: Die ersten Iterationen eines „Game of Life“

Das „Game of Life“ demonstriert anschaulich die sehr komplexen globalen Dynamiken eines zweidimensionalen CA, die bei einem sehr simpel gehaltenen Regelsatz entstehen können. Die Strukturen der Anfangssituation können schrumpfen, wachsen, oszillieren, stagnieren oder auch in besonderen Fällen gleiten. In Abbildung 2.6 sind in der Ausgangssituation (t=0) verschiedene Objekte dargestellt, die in den Folgegenerationen entsprechend des Regelsatzes verschiedene Muster bilden. In der oberen linken Ecke des Ausgangsgitters befinden sich zwei Objekte, die sich nach zwei Iterationen über den gesamten Lauf stationär verhalten, in der rechten oberen Ecke sind so genannte „Blinker“ abgebildet, die zwischen zwei Konstellationen oszillieren. Auf der linken Seite des Ausgangsgitters sind in der unteren Hälfte zwei gleitende Zellagglomerate abgebildet, die während des Oszillierens eine feste Strecke zurücklegen, ohne die wiederkehrenden Gestaltformen zu verändern. Am unteren rechten Rand befindet sich ein Zellenmuster, das erst auf eine kritische Größe anwächst und von da an oszilliert.

Das kurze PV-WAVE Programm, das für diese Simulation entwickelt wurde, ist in App. 1 zu finden.

“The chess-board is the world;
the pieces are the phenomena
of the universe; the rules of the
game are what we call the
laws of Nature.”
(T. H. Huxley)

3. Urbane Landnutzungsmodellierung

Die Entwicklung der Modellierung urbaner Räume begann in den 1960er Jahren in den USA mit der Einführung von ‚Large-scale Urban Models‘, die ausgehend von Submodellen den Hauptfokus auf die räumliche Verteilung und Interaktionen von Aktivitätsmustern wie der Bevölkerung und Beschäftigung legten (Batty, 1997). Die Integration der einzelnen Teilmodelle nach dem ‚top-down‘-Ansatz führte zu statischen Modellen, die als unnötig kompliziert und schwerfällig betrachtet wurden (Benenson & Torrens, 2000).

Die einflussreichste Kritik gegenüber den statischen großskaligen Modellen – die ‚seven sins‘ - wurde 1973 in „Requiem for Large-Scale Models“ von Douglas B. Lee geäußert (Lee, 1973). Die Kernpunkte seiner Kritik sind in einigen Punkten noch heute aktuell. Hyperausführlichkeit („*Hypercomprehensiveness*“) und das komplizierte Modelldesign („*complicatedness*“) führen zur Intransparenz und entgegen der Absicht zu einer Ungenauigkeit des Modells. Die Grobheit („*Grossness*“) trifft entgegen der Komplexität des Modells nur allgemeine Aussagen auf globaler Ebene und nicht auf lokaler, wo sie für Planungsentscheidungen notwendig wären (Lee, 1994).

Die Modelle waren als „Black-Box“ zu betrachten – Daten wurden eingegeben und Ergebnisse generiert, die Abläufe im Modell selbst blieben dem Anwender jedoch meist verschlossen. Ist das Ziel der Modellierung ein System zu verstehen und nicht nur abzubilden, so ist dies ein ernstzunehmender Schwachpunkt. Neben der Transparenz ist bei der Modellkonzeption eine Balance zwischen Theorie, Objektivität und Intuition anzustreben. Diese Forderung entspricht der Reduktion auf die wesentlichen Systemparameter und deren Relationen. Das Vorgehen sollte sich an der Problemstellung orientieren und dementsprechende Methoden auswählen, nicht umgekehrt (Lee, 1994).

Die Kritik an der urbanen Landnutzungsmodellierung ist begleitet von der erkenntnistheoretischen Auffassung, dass der Prozess des Modelltunings grundsätzlich die Objektivität der Modellkonstruktion unterminiert - eine tautologische Schleife der Feinkalibrierung, bis das Modellergebnis mit den realistischen Erwartungen konform liegt (Lee, 1973 ; Benenson und Torrens, 2000). Eine zentrale Aussage in dieser Diskussion stammt von Allen (1997), der einen wesentlichen und kritischen Unterschied darin sieht, ob ein System die

Regeln der Physik befolgt, oder ob sein Verhalten durch die Kenntnis dieser Regeln vorhergesagt werden kann. Dies spricht den viel diskutierten Unterschied zwischen „verstehen“ und „beschreiben“ an.

Die Eigenschaft des Zellulären Automaten, aus einfachen Regeln und wenigen, jedoch wohl definierten Elementen komplexe und realistische Muster und Prozesse zu generieren, bietet einige wichtige Vorteile für die Modellierung urbaner Strukturen. Die intuitive Simplizität des CA bezüglich der Übergangsregeln stellt einen wichtigen Vorteil dieser Methode dar - die „Black-Box“ wird transparent gestaltet (Torrens, 2000). Die Komplexität fließt nicht in das Modelldesign per se ein, sie entsteht aus dem Modell selbst heraus.

3.1 Anwendungen des zellulären Automaten-Ansatzes in der Modellierung urbaner Landnutzungsdynamiken

Der klassische CA kann als „bottom-up“-Ansatz aufgefasst werden. Lokale Regeln kreieren nach mehreren Iterationen komplexe Muster. Dies ist ein zentraler Punkt, sofern die Auffassung gilt, dass sich die Dynamik der Städte über die Aktivitäten der einzelnen Elemente und Individuen herausbildet. Das Verständnis des urbanen Systems kann aus diesem Grund nur über die Untersuchung der Mikroskala, nicht über die Makroskala gewonnen werden (Batty and Xie 1994). Genau dies ist das Vermögen und der grundlegende Vorteil eines CA.

Seit den vorbereitenden Arbeiten von Tobler (1979) wurden einige Modifizierungen von klassischen Zellulären Automaten für urbane Simulationen vorgeschlagen. Die Anwendungen erweitern den Ansatz in aller Regel dahin gehend, dass eine Einschränkung der Systemdynamiken des Automaten stattfindet (Batty, 1997; White & Engelen, 1993, 2000; White et al., 1997, 1999; Barredo et al., 2003; Clarke, 1996; Sui & Zeng, 2001). In der Literatur werden ähnliche Konzepte unter dem Begriff „Constrained Cellular Automata“ geführt (White und Engelen, 1997).

Die Modifikationen des klassischen CA im urbanen Kontext variieren in Abhängigkeit von der Fragestellung und Zielsetzung des Modells. Sie setzen in der Regel an folgenden Punkten an:

- Die Zelnachbarschaften müssen nicht zwangsläufig identisch sein, sondern können in Form und Größe variieren.
- Faktoren, die über den lokalen Nachbarschaftsraum hinausgehen (exogene Wachstumsraten, urbane Netzwerke) werden in das Modell implementiert.
- Neben den deterministischen und stochastischen Transformationsregeln werden weitere Regelsysteme eingeführt.

Batty unterscheidet grundsätzlich drei Kategorien von Modellen in der urbanen Landnutzungsmodellierung, die noch heute gültig sind (Batty, 1971):

- Modelle zur Untersuchung räumlicher Komplexität und urbaner Strukturen. Sie tragen wesentlich zur Theoriebildung bei.
- Modelle zur Theorievermittlung. Sie richten sich primär an Akteure in der Planung.
- Modelle als planungsunterstützende Systeme mit der Zielsetzung, mögliche zukünftige Konsequenzen von Planung (sowie planloser Entwicklung) abzuschätzen.

Die Modelle der drei Kategorien weichen in dieser Reihenfolge zunehmend stark vom klassischen CA-Ansatz ab. Urbane Modelle als planungsunterstützendes Instrument werden am stärksten modifiziert, um eine möglichst detailgetreue Simulation zu generieren (Benenson & Torrens, 2004).

Nachstehend werden einige Anwendungen von CA in der urbanen Modellierung vorgestellt.

SLEUTH ist ein Modell zur Simulation von urbanem Wachstum mit dem Ziel, bestmögliche Voraussagen über urbanes Wachstum auf regionaler, kontinentaler oder globaler Skala treffen zu können. Das Modell wurde von Keith C. Clarke an der University of California in Santa Barbara entwickelt und ist bisher in San Francisco, Chicago, und in einigen europäischen Städten implementiert worden (Clarke et al., 1997).

SLEUTH basiert auf den Faktoren Infrastruktur (Straßennetz), Hangneigung, Flächeninformation über nicht besiedelbare Gebiete (Wasserflächen, Nationalparks, etc.) und der urbanen Landnutzung. Die urbanen Landnutzungsänderungen werden von einem Set an Wachstumsregeln definiert. Eine Iteration wird in dem Modell durch einen Wachstumszyklus beschrieben, der aus vier Phasen besteht. Parameter (die Wachstumskoeffizienten) bestimmen die Wachstumsraten:

- Spontanes Wachstum: Der Dispersionskoeffizient definiert die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zufälliger Urbanisierung. Jede nicht urbanisierte Zelle $U(i,j,t)$ besitzt somit eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, zu einem beliebigen Zeitpunkt $(t+1)$ urbanisiert zu werden.
- Wachstum von Subzentren: Der ‚Breed‘-Koeffizient definiert die Wahrscheinlichkeit, ob die im vorangegangenen Schritt spontan entstandenen urbanen Zellen $U(i,j,t+1)$ ein neues urbanes Ausbreitungszentrum $U'(i,j,t+1)$ werden. Ist dies der Fall, werden zwei zufällig ausgewählte Zellen in der Nachbarschaft dieser Zelle urbanisiert.
- Randwachstum: Der ‚Spread‘-Koeffizient definiert die Wahrscheinlichkeit, dass diese Zentren weiter wachsen. Somit besteht für jede nichturbane Zelle mit drei urbanen Nachbarn die Wahrscheinlichkeit, bestimmt durch den ‚Spread‘-Koeffizient und den ‚Slope‘-Koeffizient, urbanisiert zu werden.
- Straßenbeeinflusstes Wachstum: Die existierende Infrastruktur, die Urbanisationen aus den vergangenen Wachstumsschritten und der Einsatz einiger Koeffizienten bestimmen diese Form von Wachstum. Eine der neu urbanisierten Zellen wird über den ‚Breed‘-

Koeffizient bestimmt. Ein ‚Road-gravity‘-Koeffizient definiert den Einflussradius von Straßen und platziert innerhalb dieser Zone eine neue urbane temporäre Zelle mit minimalem Abstand zur ausgewählten Ausgangszelle an der Straße (sofern eine existiert). Diese temporäre Zelle vollzieht nun einen zufälligen Gang entlang der Straße oder abzweigenden Straßen, bis sie an ihrem Endpunkt als ein neuer urbaner Wachstumskern fungiert. Die Anzahl der Schritte, die bis zum Endpunkt zurückgelegt werden, bestimmt der Dispersionskoeffizient.

Die urbane Fläche im Startjahr ist der Ausgangspunkt für die automatisierte Kalibrierung der Wachstumsparameter. Es werden vier weitere Zeitschnitte benötigt, um die statistische Kalibrierung durchzuführen. Die Wachstumskoeffizienten müssen während der Simulation nicht notwendigerweise statisch bleiben. Bei Über- oder Unterschreitung eines kritischen Maximum oder Minimums wird eine automatische Selbstmodifikation der Koeffizienten eingeleitet, um die beschleunigten oder verminderten Wachstumstrends zu simulieren.

Die Transformationen werden im SLEUTH-Modell, neben den Ausschlussfaktoren und den statischen, exogenen Einflüssen, wie Neigung und Infrastruktur, im Wesentlichen stochastisch bestimmt. Die kalibrierten Parameter legen den Ort und die Anzahl der zu transformierten Zellen stochastisch fest. Der endogene Regelanteil ist auf die Entstehung von Randwachstum beschränkt. Nur in dieser Wachstumsphase ist die Transformation einer Zelle (neben dem zusätzlichen stochastischen Einfluss) über die Interaktion mit der lokalen Umgebung bestimmt. Die Grundcharakteristika eines CA ist grundlegend abgewandelt worden.

Barredo et al. entwickelten im Rahmen des EU-Forschungsprojektes **MOLAND** (Monitoring Land Cover/Use Dynamics) ein CA-Modell, um detaillierte Aussagen über urbane Landnutzungsveränderungen auf regionaler und lokaler Ebene treffen zu können (Barredo et al., 2003). Das Modell arbeitet rasterbasiert unter Verwendung von 22 Landnutzungsklassen. Die Transformationen werden über einen Vektor an Übergangspotentialen bestimmt, der sich aus folgenden Faktoren zusammensetzt:

- Die Eignung ($S \in \{0,1\}$) beschreibt die inhärente Eignung einer Zelle, in eine Nutzung k überzugehen. Dieser Faktor schließt fixe, nicht im dynamischen Transformationsprozess mitwirkende Klassen (z.B. Wasserflächen, Straßen/Schienernetz, Flughafen, Deponien, künstliche nicht agrarbewirtschaftete bewachsene Flächen) aus.
- Die Erreichbarkeit (A) gibt die Infrastrukturanbindung einer Zelle wieder. Es werden die unterschiedlichen Interessen der Nutzungstypen berücksichtigt.
- Der Faktor Stadt- und Regionalplanung (Z) gibt die planerische Flächen- und Nutzungsregulationen des Untersuchungsgebietes wieder.
- Ein stochastischer Faktor (v) repräsentiert die unbekanntenen Faktoren in der Allokationsentscheidung.

- Der Nachbarschaftseinfluss (N) definiert über Gewichtungparameter die Attraktivität und Abstoßung der verschiedenen Nutzungen innerhalb der Nachbarschaft auf die betrachtete Referenzzelle.

Der Nachbarschaftsraum ist in 30 Distanzzonen mit insgesamt 172 Zellen differenziert. Die Landnutzungsklassen sind unterteilt in fixe, passive und aktive Klassen. Fixe Klassen fließen über Gewichtungparameter in die Transformationsregel ein, verändern jedoch nicht ihren Zustand. Passive Klassen (Fruchtbares Land, Wald, Feuchtgebiete, Weideland, Busch) sind dynamisch, d.h. sie können ihren Zustand während der Simulation verändern, werden aber nicht von einer exogenen Wachstumsrate (Nachfrage) gesteuert. Sie verändern sich in Abhängigkeit der Flächen, die von den aktiven Klassen eingenommen oder aufgegeben werden. Aktive Klassen (Industrie, Gewerbe, Dienstleistungen, Brachflächen, Wohnen) werden von einer nutzungsspezifischen Wachstumsrate gesteuert, die in Abhängigkeit des Wachstums der urbanen Region (Makroebene) in das Modell integriert wird. Die berechneten Übergangspotentiale einer Zelle werden der Größe nach geordnet und die Nutzung mit dem höchsten Potential für die Transformation bestimmt. Alle Zellen, die für eine Transformation in eine aktive Nutzung bestimmt sind, werden erneut der Größe nach geordnet und die Anzahl an Zellen mit den höchsten Potentialen transformiert, wie es die spezifische exogene Rate vorsieht. Das Übergangspotential $P_{k,i,j}$ errechnet sich wie folgt:

$$P_{k,i,j} = (1 + A_{r,k,i,j}) \cdot (1 + S_{k,i,j}) \cdot (1 + Z_{k,i,j}) \cdot (N_{k,i,j}) \cdot v \quad (3.1)$$

- $P_{k,i,j}$ Übergangspotential der Zelle (i,j) mit der Nutzung k
 $A_{k,r,i,j}$ Anbindung der Zelle (i,j) mit der Nutzung k zur Infrastruktur r
 $S_{k,i,j}$ Eignung S der Zelle (i,j) für die Landnutzung k
 $Z_{k,i,j}$ Planungsstatus für Zelle (i,j) mit der Nutzung k
 v Stochastischer Faktor $v = 1 + [-\ln(\text{rand})]^\alpha$; ($0 < \text{rand} < 1$)
 $N_{k,i,j}$ Nachbarschaftseffekt auf Zelle (i,j) mit der Nutzung k :

$$N_{k,i,j} = \sum_d \sum_l \omega_{k,l,d} \cdot T_l \quad (3.2)$$

- $\omega_{k,i}$ Gewichtungparameter, beschreibt den Nachbarschaftseffekt der Nutzung k gegenüber einer Nutzung l in der Distanzzone d
 T_l Trägheitseffekt: $T_l \in \{0,1\}$ beschreibt die Neigung, lange an einem Standort zu verweilen (Grund: hohe Kosten durch Ortswechsel)

Das Modell wurde zur Simulation der Landnutzungsentwicklung in Dublin (1968-1998) eingesetzt, wobei hier die Stadt- und Regionalplanungsdaten nicht in das Modell implementiert werden konnten. Die Ergebnisse des Modells zeigten gute Übereinstimmungen mit den

historischen Nutzungsdaten. Barredo et al. sehen in dem offenen Modelldesign eine gute Möglichkeit, verschiedene ‚if...then‘ –Szenarien durchzuführen.

White & Engelen entwickelten 1993 ein modifiziertes CA-Modell, dessen Ansatz sich in vielen folgenden Studien der urbanen Landnutzungsmodellierung wiederfindet (vgl. Riedl, 1999; De Kok et al., 2001; Oxley et al., 2004). Sie führten den Potentialansatz ein, der die Möglichkeit bot, Trends über eine exogene Größe vorzugeben. Auch das hier beschriebene Modell von Barredo et al. ist eine Weiterentwicklung der Methode von White & Engelen. Es handelt sich hierbei um stochastische, erweitert totalistische CAs. Der detaillierte Regelsatz aus White & Engelen (1993) wird im Kapitel 4.1 ausführlicher diskutiert.

Das CA-Modell von **Li & Yeh** verfolgt die Zielsetzung, urbane Landnutzungsstrukturen unter dem Gesichtspunkt der nachhaltigen Entwicklung zu analysieren und mögliche nachhaltige Landnutzungsmuster zu identifizieren (Li & Yeh, 2000; Yeh & Li, 2001). Die exogene Transformationsbeschränkung „Eignung“ (‚suitability‘) (vgl. Barredo; White et al., 1997), die in vielen Modellen mit Faktoren wie Entfernungskosten, Infrastruktur und Hangneigung in Beziehung gesetzt wird, um die bevorzugten Orte einer urbanen Entwicklung zu beschreiben, wird hierfür von Li & Yeh mit umweltschutzrelevanten Attributen besetzt. Zukünftige Landnutzungsszenarien können dadurch nach ökologischen Kriterien entwickelt werden. Die Übergangswahrscheinlichkeit einer Zelle berechnet sich in dem Modell aus dem Produkt der nachbarschaftssensitiven Wahrscheinlichkeitsfunktion multipliziert mit der Summe der exogenen (lokalen, regionalen und globalen) Einschränkungen. Die Multikriterienevaluation (vgl. auch Wu, 1998) wird zur Entscheidungsfindung bei konträr wirkenden Eignungen herangezogen.

Als weitere Formen der Regelformulierung gelten Fuzzy-Regelsysteme (Wu, 1998), Neuronale Netzwerke (Li, 2002), Zeitreihenanalysen, die Übergangswahrscheinlichkeiten aus Fernerkundungsdaten ableiten (Rubiano, 2000) oder Markovketten zur Beschreibung der Übergänge zwischen den möglichen Zuständen (Jenerette & Wu, 2001). Die Parametrisierung der Markovketten geschieht ebenfalls über Zeitreihenanalysen.

In Tabelle 3.1 ist ein zusammenfassender Überblick über die Regelsysteme der hier erläuterten Modelle gegeben.

Tabelle 3.1: Regelsysteme ausgewählter urbaner CA-Modelle

CA-Modell	Transformationsregeln	
	Endogener Anteil	Exogener Anteil
SLEUTH (Clarke et al. , 1997)	<ul style="list-style-type: none"> • Randwachstum ist nur dort möglich wo sich drei weitere urbane Zellen befinden 	<ul style="list-style-type: none"> • Spontanes Wachstum: Neue Siedlungszellen werden zufällig im Raum verteilt (Dispersionskoeffizient) • Wachstum von Subzentren: stochastischer Faktor ('Breedkoeffizient') bestimmt die Wahrscheinlichkeit, dass kleine Agglomerate wachsen • Randwachstum: stochastischer Faktor (,Spread'-Koeffizient) bestimmt die Wahrscheinlichkeit das neu entstandene Subzentren wachsen • Straßenbeeinflusstes Wachstum: von den Subzentren geht ein neues Wachstum entlang bestehender Transportwege aus. Ort und Anzahl wird über diverse Wachstumskoeffizienten bestimmt
MOLAND (Barredo et al. , 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Nachbarschaftseinfluss N beschreibt das Transformationspotential einer Zelle in Abhängigkeit der Nachbarschaftseffekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Eignung: statische Landnutzungen werden von dem Transformationsprozess ausgeschlossen • Die Erreichbarkeit gibt die Infrastrukturanbindung der Referenzzelle wieder • Stadt- und Regionalplanung • Nutzungsspezifische Wachstumsraten • stochastischer Faktor (v) implementiert unbekannte Einflüsse
White & Engelen (1993)	<ul style="list-style-type: none"> • Nachbarschaftseinfluss N beschreibt das Transformationspotential einer Zelle in Abhängigkeit der Nachbarschaftseffekte 	<ul style="list-style-type: none"> • stochastischer Faktor (v) implementiert unbekannte Einflüsse • Wachstumsrate
Sustainable urban forms (Li & Yeh, 2000)	<ul style="list-style-type: none"> • Nachbarschaftseinfluss N beschreibt das Transformationspotential einer Zelle in Abhängigkeit der Nachbarschaftseffekte 	<ul style="list-style-type: none"> • 'Constraints' beschreiben Aspekte nachhaltiger Entwicklung. Bewertung erfolgt über MCA. • urbane Form: Distanz zu Zentren ermittelt die Form (dezentral vs.kompakt) • Eignung für Agrarwirtschaft und die Nähe zu Naturschutzgebieten und ökol. wertvollen Flächen mindert Urbanisierungspotential • Flächenverbrauch wird über Dichtefaktor kontrolliert

4. Der Potentialansatz in urbanen Zellulären Automaten

In diesem Abschnitt soll eine häufig verwendete Form der Regeldefinition genauer betrachtet werden: die Verwendung von nachbarschaftsabhängigen, linearen Nutzungspotentialen. Zunächst wird der Ansatz von White und Engelen beschrieben und analysiert, um dann systematisch die Möglichkeiten auszuloten, die der lineare Potentialansatz für CAs mit zwei und drei Nutzungstypen bietet.

4.1 Der Potentialansatz nach White & Engelen

Das Modell von White und Engelen (White und Engelen, 1993) entwickelte sich in den 1990er Jahren unter den Anwendungen der zellulären Automatenmodelle zum Mainstream in der Geographie (Benenson und Torrens, 2004). Der Ansatz von White und Engelen führte das zelluläre Automatenmodell mit dem geographischen Modell Toblers (Tobler, 1979) zusammen und implementierte die Annahme, dass ein Potential einer Landnutzungszelle eine bestimmte Landnutzungstransformationen zu vollziehen, von den aktuellen Nutzungen in der Nachbarschaft der Referenzzelle abhängt.

4.1.1 Struktur

Der geographische Raum in dem die Potentiale von den umliegenden Zellen beeinflusst werden, wurde von der klassischen 3x3 Moore-Nachbarschaft auf einen Zellraum von insgesamt 113 Zellen mit einer maximalen Distanz von sechs Zellen zur Referenzzelle ausgeweitet.

Die Intention der Modellentwickler, grundlegende Fragen zur urbanen Dynamik zu untersuchen und weniger realistische Simulationen bestimmter Städte zu generieren, implizierte eine möglichst übersichtliche Modellgestaltung (White und Engelen, 1993):

- Das Modell ist auf einem 50x50 Zellgitter für vier Nutzungsklassen entwickelt.
- Jede Zelle besitzt eine der folgenden Nutzungen: *“Brache“*, *“Wohnsiedlung“*, *“Industrie“* oder *“Handel und Gewerbe“*.
- Die Gesamtmenge der Zellen, die während einer Iteration von dem Zustand Brache in eine andere, *“aktive“* Nutzung (*“Wohnsiedlung“*, *“Industrie“* oder *“Handel und Gewerbe“*) übergehen können, ist limitiert und wird exogen über eine Wachstumsrate definiert.
- Der Nachbarschaftsraum ist in 18 Distanzzonen unterteilt, um den Einfluss der Nutzungen in Abhängigkeit der Entfernung zur Referenzzelle zu differenzieren (Abbildung 4.1).
- Mit dem Ziel, den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden die die Nutzungsklassen, mit der Bedingung nur in eine höhere Nutzungskategorie zu transformieren, hierarchisiert. *“Handel und Gewerbe“* hat die höchste Wertung, es folgen *“Industrie“*, *“Wohnsiedlung“* und *“Brache“*. Keine Zelle kann erneut den Zustand *“Brache“* annehmen oder in diesem verweilen. Die Stadt kann nur wachsen.

- In jeder Iteration werden für alle möglichen Transformationen Übergangspotentiale berechnet.
- Die Übergangspotentiale werden nach ihrer Größe geordnet und dann insgesamt so viele Zellen umgewandelt, wie es die exogene, für jede Nutzungsklasse gesonderte Wachstumsrate vorschreibt. Die Auswahl erfolgt nach der Hierarchie der Landnutzungsklassen. "Handel und Gewerbe" - als höchste Klasse - wird zuerst betrachtet. Die Zellen mit dem höchsten Potential für "Handel und Gewerbe" werden identifiziert und entsprechend umgewandelt. Falls gleich hohe Übergangspotentiale für unterschiedliche Nutzungen auftreten, wird die zukünftige Nutzungsklasse stochastisch bestimmt. Sollte diese Zelle daraufhin nicht zu "Handel und Gewerbe" umgewandelt werden, rücken Zellen mit einem niedrigeren Potential nach, bis die exogene Wachstumsrate für "Handel und Gewerbe" erreicht ist. Dieses Verfahren wird für alle Klassen durchgeführt.

Das Transformationspotential P_{ij} beschreibt die Eignung einer Zelle mit der Nutzung i in die Nutzung j überzugehen (Gleichung 4.1) Jedes deterministische Übergangspotential repräsentiert den Einfluss der Nachbarzellen, modifiziert durch einen stochastischen Einfluss. Dieser Faktor hat den Sinn, die individuelle Präferenzen und unbekannte Faktoren in die Allokationsentscheidung zu integrieren.

$$P_{ij} = \left(1 + \sum_{h,k,d} m_{kd} \cdot I_{hd}^k \right) \cdot \left[1 + (-\ln(rand))^\alpha \right] \quad (4.1)$$

- m_{kd} Gewichtungparameter für Nachbarschaftszellen mit dem Zustand k in der Distanzzone d
 h Index für Zellen innerhalb einer Distanzzone,
 $I_{hd}^k \in \{0,1\}$ Faktor zur Selektion der relevanten Gewichtungen m_{kd} für die Zelle h
 $rand$ Zufallsfaktor: $0 < rand < 1$,
 α Parameter zur Justierung des stochastischen Faktors

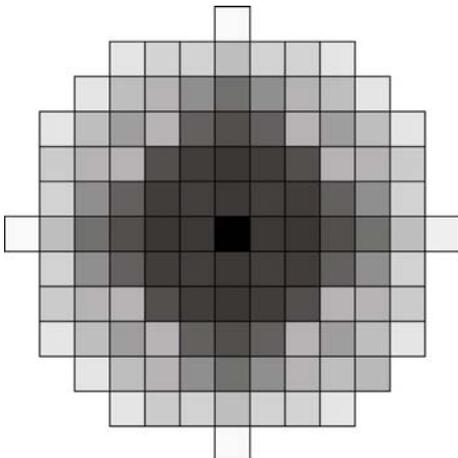


Abbildung 4.1: Erweiterte Nachbarschaft von insgesamt 113 Zellen, unterteilt in 18 euklidische Distanzonen (nach White & Engelen, 1993)

Die endogene Dynamik ist durch die die Wahl der Gewichtungparameter m_{kd} determiniert. Im Sinne der Klassifizierung von Übergangsregeln aus Abschnitt 2.1.5 handelt es sich um einen stochastischen, erweitert totalistischen CA.

White und Engelen stellen in ihrer ersten Arbeit eine Version dieses Regelsystems vor, das nicht an einer bestimmten Stadt kalibriert wurde, da das zelluläre Automatenmodell der Untersuchung grundlegender Fragen in der Modellierung der räumlichen Struktur urbaner Landnutzungen dienen sollte (White & Engelen, 1993). Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass intuitive, plausible Regeln realistische urbane Strukturen generieren konnten, unangemessene Regeln vermochten dies hingegen nicht. Die Wahl der Gewichtungparameter m_{kd} erfolgte gemäß einer Einschätzung der Nachbarschaftseffekte der Nutzungen in Abhängigkeit ihrer Entfernung zur Referenzzelle. In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Parameter (White & Engelen, 1993) dargestellt.

Tabelle 4.1: Gewichtungparameter m_{kd} einer fiktiven Stadtsimulation (White & Engelen, 1993)

Landnutzung, k	Distanzzone, d																	
Zustand $i \rightarrow j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Brache → Handel																		
Handel	25	25	25	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	4	3,5	3	2,5	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1
Brache → Industrie																		
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	3	3	2	1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wohnen	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brache → Wohnen																		
Handel	-2	-1	2	1	1	1	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
Industrie	-10	-10	-5	-3	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	2	2	1,5	1,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Industrie → Handel																		
Handel	25	25	25	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
Industrie	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	4	3,5	3	2,5	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1
Industrie → Industrie																		
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie → Wohnen																		
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen → Handel																		
Handel	25	25	25	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
Industrie	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	4	3,5	3	2,5	2	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1
Wohnen → Industrie																		
Handel	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen → Wohnen																		
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Das Modell aus dem Jahre 1993 differenziert die Gewichtung nach der aktuellen Nutzung i einer Zelle und berechnet für jede mögliche Transformation in einen Zustand j getrennte Potentiale. In Tabelle 4.1 sind daher drei Blöcke zu unterscheiden. „*Brache*“, „*Wohnen*“ und „*Industrie*“. Für jede Transformation ($i \rightarrow j$) sind unterschiedliche Gewichtungparameter m_{kd} in Abhängigkeit der Nutzung k in der Distanzzone d formuliert.

Für die vierte Nutzung („*Handel und Gewerbe*“) werden keine Potentiale berechnet, da in dieser Modellversion nur Transformation in eine höhere Stufe der Nutzungshierarchie möglich ist. Schon entwickelte Handels- und Gewerbezellen verändern ihre Nutzung nicht mehr.

Betrachtet man das Potential einer brachliegenden Zelle, in der nächsten Iteration eine Transformation zur Nutzung „*Handel und Gewerbe*“ zu vollziehen (erste Zeile in der Tabelle 4.1), so geht von einer direkt angrenzenden Handels- und Gewerbezelle ein sehr positiver Effekt aus ($m_{kd}=25$), der nach der euklidischen Distanz von $\sqrt{5}$ (in der 4. Zone, siehe Gleichung 4.2) kippt und durch weitere Handelszellen im weiteren Umkreis leicht negativ ($m_{kd}= -1$) beeinflusst wird.

$$d(i, j) = \sqrt{(i_x - j_x)^2 + (i_y - j_y)^2} \quad (4.2)$$

Angrenzende Wohnzellen üben eine geringere Attraktivität ($m_{kb}=4$) auf die Entstehung von „*Handel und Gewerbe*“ aus. Ihr positiver Einfluss nimmt mit zunehmender Distanz ab.

Parameterwerte, die einen Wert von Null besitzen, charakterisieren ein neutrales Verhalten. Zellen dieser Nutzung fließen nicht in die Potentialberechnung mit ein. Transformationen, die aufgrund der Nutzungshierarchie nicht zugelassen werden („*Industrie*“ \rightarrow „*Wohnen*“), erhalten Parameterwerte von Null.

Zusammenfassend lassen sich die Grundzüge der Parameterwahl aus Tabelle 4.1 folgendermaßen interpretieren:

- a) Die Entstehung von „*Handel und Gewerbe*“ wird stark begünstigt, wenn sich bereits angrenzende Handels- und Gewerbezellen in der Nachbarschaft befinden. In etwas weiterer Entfernung konkurriert „*Handel und Gewerbe*“ miteinander und wirkt sich negativ auf die Attraktivität aus. Angrenzende Wohnsiedlungen - die potentiellen Kunden - begünstigen die Entstehung von Gewerbe und Handel, ihr positiver Einfluss nimmt stetig mit zunehmender Distanz ab. Bestehende Industriegebiete sind keine bevorzugten Standorte für die Niederlassung von „*Handel und Gewerbe*“.
- b) Die günstigsten Industriestandorte befinden sich in der Nähe anderer Industriezellen. Direkt angrenzende Wohnsiedlungen wirken sich leicht negativ auf die Attraktivität eines Industriestandortes aus. Ihr Einfluss neutralisiert sich jedoch bereits in der 3. Distanzzone.
- c) Wohnzellen siedeln sich bevorzugt in einer etablierten, reinen Wohnumgebung an. Handels- und Gewerbezellen in der direkten Nachbarschaft wirken sich leicht negativ

aus, in weiterer Entfernung gewinnen sie jedoch an Attraktivität. Angrenzende Industrie mindert die Eignung für eine Wohnzelle im starken Maße. Der negative Einfluss sinkt mit zunehmender Distanz und neutralisiert sich in weiterer Entfernung.

Die Interpretation der Parameter scheint eine durchaus plausible Wechselwirkung von Attraktivitäten und Abstoßungen zwischen den verschiedenen urbanen Nutzungen und Funktionen in einem städtisch überprägten Raum wiederzugeben. Die Höhe einzelner Potentialwerte lässt jedoch eine starke Begünstigung von Handels- und Gewerbezellen vermuten. Um die tatsächlichen, durch die Potentialparameter vorgeschriebenen Transformationen zu ermitteln, kann der direkte Zusammenhang zwischen Nachbarschaftskonstellation und Potential Aufschluss geben (vgl. Kap. 4.2).

4.1.2 Analyse des Regelsatzes

Der soweit erläuterte potentialbasierte Regelansatz lässt damit keine direkte Schlussfolgerung darüber zu, wie wahrscheinlich es ist, dass unter allen denkbaren Nachbarschaftskonstellationen ein bestimmtes Potential dominiert. Im Extremfall könnten die Parameter m_{kd} so gewählt sein, dass sich eine bestimmte Nutzung unter keinen Umständen durchsetzt. Um dies zu überprüfen, könnte man alle denkbaren (totalistischen) Nachbarschaftskonstellationen durchgehen, jeweils das größte Potential bestimmen und dann auszählen, wie häufig die jeweiligen Nutzungen dominieren. Es ist offensichtlich, dass dies selbst im vorliegenden totalistischen Fall (der zu einer geringeren Anzahl von Konstellationen führt als in 2.1.4 abgeschätzt) alle denkbaren Rechenkapazitäten überschreitet.

Die Analyse der Parameterwahl von White und Engelen muss aus diesem Grund über eine Monte-Carlo-Simulation erfolgen. Ein stochastischer Simulationsalgorithmus bestimmt für jede der 18 Distanzzonen eine zufällig generierte totalistische Nachbarschaftskonstellation aus vier Nutzungen.

Ausgangspunkt des Algorithmus ist der Standard-Zufallszahlen-Generator in der Programmumgebung von PV-WAVE, der gleichverteilte Pseudo-Zufallszahlen zwischen 0 und 1 generiert. Für jeden der 18 Nachbarschaftsräume wird zuerst stochastisch eine Landnutzungskategorie zwischen 1 und 4 bestimmt und daraufhin eine zufällige Anzahl an Zellen für diese Nutzung im Nachbarschaftsraum generiert. Die maximale Anzahl der möglichen Zellen ist durch die Größe des Nachbarschaftsraumes bedingt. Die weitere Reihenfolge, nach der die Nutzungsanzahlen der Klassen bestimmt werden, erfolgt ebenso zufällig wie die Anzahl selbst. Die Menge der Zellen der letzten Nutzungsklasse ist durch die vorherigen Ergebnisse und die definierte maximale Zellanzahl in der Zone natürlich bestimmt.

Das Zwischenergebnis des Algorithmus ist demnach eine zufällig generierte mögliche Nachbarschaftskonstellation einer Zelle in dem Modell von White und Engelen. Die Potentialparameter werden nun herangezogen, um das höchste Potential der Zelle zu

berechnen. Nun werden weitere zufällig bestimmte Nachbarschaftskonstellationen ausgewertet, bis die relative Häufigkeit der Dominanz der unterschiedlichen Nutzungen konvergiert (siehe PV-WAVE Quellcode in App.2).

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Simulation der Transformationspotentiale nach White und Engelen 1993

Zustand der Referenzzelle	Prozentualer Anteil der höchsten Potentiale für:		
	<i>Handel und Gewerbe</i>	<i>Industrie</i>	<i>Wohnen</i>
a) 200 M-C-Simulationen			
<i>Brache</i>	97,0149	2,9851	0,0000
<i>Industrie</i>	94,5274	5,4726	0,0000
<i>Wohnen</i>	95,5224	4,4776	0,0000
b) 2000 M-C-Simulationen			
<i>Brache</i>	96,9016	2,7986	0,2999
<i>Industrie</i>	90,3548	9,6451	0,0000
<i>Wohnen</i>	92,5038	7,1464	0,3498
c) 20 000 M-C-Simulationen			
<i>Brache</i>	96,8002	2,8748	0,3249
<i>Industrie</i>	90,7355	9,2645	0,0000
<i>Wohnen</i>	92,9154	6,5846	0,4999

Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation (Tabelle 4.2) zeigt die prozentualen Anteile der Transformationen in eine Nutzung *k* nach den vorgeschriebenen endogenen Regeln des Modells von White und Engelen aus dem Jahre 1993. Die Werte stabilisieren sich nach 20 000 Simulationen und können als repräsentativ für die Transformationsdynamik im Modell betrachtet werden.

Wie die gewählten Werte der Parameter vermuten ließen, liegen klare Affinitäten für eine Handels- und Gewerbetransformation vor. Die Wahrscheinlichkeit einer Transformation zur Nutzung "*Handel und Gewerbe*" liegt nach 20 000 Monte-Carlo-Simulationen in Abhängigkeit der Referenzzelle bei 91-97% und dominiert damit die Entwicklung. Das Potential für eine industrielle Nutzung überwiegt in nur 2,9-9,3% aller möglichen Simulationen. Die Nutzung "*Wohnen*" besitzt nach diesem Regelsatz mit 0-0,5% einen sehr geringen Anteil an der Transformationsdynamik.

Die Transformationen, die durch die Potentialwerte generiert werden, können damit nicht die intuitiv gesetzten Regeln der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen urbanen Nutzungen wiedergeben. Die Simulationsergebnisse, die eine realistisch anmutende urbane Struktur darstellen, sind nur durch weitere Faktoren zu generieren.

Die exogene Randbedingung des Modells sieht eine globale Wachstumsrate von insgesamt 5% pro Zeitschritt vor, die im Verhältnis von 1:4:7 auf die Nutzungen Handel, Industrie und Wohnen übertragen wird. Demnach kann nur durch diese exogene Vorgabe eine realistische Simulation der einzelnen Nutzungsklassen erreicht werden. Ohne die exogene Bedingung würde die fiktive Stadt nach wenigen Iterationen völlig von Gewerbe und Handel dominiert sein. Kaum eine Wohn- und Industrieagglomeration würde sich etablieren können.

Der Einfluss des stochastischen Faktors in der Potentialbestimmung kann in dieser Betrachtung vernachlässigt werden. Er hat eine sehr schiefe Verteilung, so dass die meisten Werte nahe Eins liegen und höhere Werte nur sehr selten auftreten. Daher werden die Übergangspotentiale im Wesentlichen über die deterministischen Gewichtungparameter dominiert. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Wertedifferenzen der unterschiedlichen Potentiale sehr groß sind. Eine große Wertedifferenz bei der Parameterwahl mindert daher den stochastischen Einfluss im Falle des betrachteten Modells. Eine höhere Anzahl an Nachbarschaftszellen einer ‚aktiven‘ Nutzung im Nachbarschaftsraum führt in fortgeschritteneren Iterationen dieses Modells ebenso zu einer höheren Wertedifferenz und reduziert den stochastischen Einfluss zusätzlich in späteren Phasen des Modellverlaufes.

Ein erweitertes zelluläres Automatenmodell zur Simulation einer realen Stadtentwicklung wurde von White und Engelen vier Jahre später veröffentlicht (White und Engelen, 1997). Am Beispiel von Cincinnati wurde ein weitgehend ähnliches Modell zur Simulation urbaner Landnutzungsänderungen entwickelt. Um die Parametrisierung einer realen Stadtsimulation nachzuvollziehen, soll auch an diesem Regelsystem eine Analyse der Transformationspotentiale erfolgen.

Die Grundstruktur des Modells ähnelt dem bereits beschrieben. Die Landnutzklassen sind auf insgesamt sieben erweitert worden, wobei davon nur drei Klassen (*„Wohnen“*, *„Industrie“* und *„Handel und Gewerbe“*) aktiv an den Transformationsprozessen teilnehmen. Infrastruktur und Flüsse sind räumlich fixierte Nutzungen, die in die Potentialberechnungen eingehen, jedoch nicht selbst transformiert werden. Da auch in diesem Modell nur Wachstum möglich ist, wird für Brachen kein Potential berechnet. Das Transformationspotential berechnet sich nach Gleichung 4.1. In dieser Modellvariante wird allerdings nicht nach dem Zustand der Referenzzelle differenziert. Die Gewichtungparameter sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Eine Monte-Carlo-Simulation (siehe Quellcode in App. 3) zufällig generierter Nachbarschaftskonstellationen zeigte auch in dem Parametersatz der Cincinnati-Simulation eine klare Affinität der Potentiale zugunsten einer Nutzungsklasse. Die Ergebnisse in Tabelle 4.4 weisen für die industrielle Nutzung einer Zelle in 81% der simulierten Nachbarschaftskonstellationen den höchsten Potentialwert aus. Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung einer Wohneinheit liegt mit ungefähr 11% über den Werten des Parametersatzes aus dem Modell von 1993. Handel und Gewerbe besitzt zugunsten der hohen Industrieaffinität in nur ungefähr 7,4 % der Nachbarschaftskonstellationen das höchste Potential.

Tabelle 4.3: Gewichtungparameter m_{kd} der Cincinnati-Simulation (White & Engelen, 1997)

Landnutzung	Distanzzone , d																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Handel																		
Brache	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	98	98	98	98	38	19	-20	-21	-21	-20	-20	-21	-21	-21	-21	-20	-20	-20
Industrie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen	12	8	7	5	5	4	4	3	2	3	2	2	3	2	3	2	3	2
Fließgewässer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schiennetz	-19	-19	-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strassennetz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie																		
Brache	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	98	97	98	41	15	5	6	5	5	6	7	3	4	0	0	0	0	0
Wohnen	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	6	6	5
Fließgewässer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schiennetz	60	60	56	49	40	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strassennetz	56	50	43	35	24	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wohnen																		
Brache	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Handel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrie	98	97	98	41	15	5	6	5	5	6	7	3	4	0	0	0	0	0
Wohnen	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6	7	7	7	7	7	6	6	5
Fließgewässer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schiennetz	60	60	56	49	40	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strassennetz	56	50	43	35	24	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Die Annahme, dass die Nachfrage nach Land für verschiedene Aktivitäten essentiell von der ökonomischen Situation abhängig ist, führt auch in diesem Modell zu der Limitierung der Transformationen durch eine exogene Wachstumsrate. Zellen mit dem höchsten Potential für eine Nutzung werden nur in der Anzahl transformiert, wie es die Wachstumsrate vorschreibt.

Tabelle 4.4: Monte-Carlo-Simulation zur Simulation der Transformationspotentiale für das Cincinnati-Modell von White & Engelen 1997

	Prozentualer Anteil der höchsten Potentiale für:		
	<i>Handel und Gewerbe</i>	<i>Industrie</i>	<i>Wohnen</i>
a) 200 M-C-Simulationen	7,9702	79,592	12,4378
b) 2000 M-C-Simulationen	7,7461	80,8096	11,4443
c) 20 000 M-C-Simulationen	7,4296	81,3259	11,2444

4.1.3 Fazit aus den Monte-Carlo-Simulationen

Die Analyse der Parameterwerte zeigt eine klare Diskrepanz zwischen den endogenen und den exogenen Regeln in beiden Modellen. Das Kernelement des Modells, die Potentiale, generieren eine räumlich-zeitliche Dynamik an Transformationen, die in beiden Modellen von einer nachträglichen Bedingung wesentlich verändert wird. Der ZA generiert Industriezellen, die durch die „Schraube“ ‚globale Wachstumsrate‘ fast vollständig unterdrückt werden, um das vorgegebene Wachstumsverhältnis der aktive Nutzungsklassen zu produzieren.

Die Grundcharakteristika eines Zellulären Automaten, die Entwicklung einer Zelle nur von den Zuständen der Nachbarschaftszellen abhängig zu machen, wird durch die hier verwendete Randbedingung grundsätzlich verändert.

Die Kalibrierung der Parameterwerte des Cincinnati-Modells erfolgte mit der „trial and error“-Methode, ausgehend von den Parameterwerten der Vorgänger-Modells (White und Engelen, 1997). White und Engelen begründen dies mit der relativ realistischen urbanen Struktur, die das Modell generierte. Als Indikator wurde hierfür die fraktale Dimension herangezogen, die einen Vergleich eines sehr spezifischen Strukturcharakteristikums (in etwa: der „Ausgefranztheit“ der Nutzungsflächen) zwischen realen amerikanischen Städten und den Simulationsergebnissen ermöglicht (Batty, 1991; Frankhauser, P. Sadler, R., 1991; White und Engelen, 1993).

White und Engelen äußern in ihrer Arbeit die Annahme, dass sich die Parameterwerte m_{kd} der beiden Modelle relativ zueinander stark ähneln und damit eine ähnliche Gewichtung der einzelnen Nutzungen erfolge. Die erzielten Simulationen bestätigen nach White und Engelen die Güte der Parametersätze (White und Engelen, 1997).

Die durchgeführte Monte-Carlo-Analyse zeigt jedoch, dass dieser Aussage widersprochen werden kann, da sich der prozentuale Anteil an den Transformationen zwischen beiden Regelsätzen erheblich unterscheidet. Im Falle der Nutzung „Industrie“ variieren die Transformationen um ca. 70%, bei „Handel und Gewerbe“ um ca. 84%. Die Dynamik des Modells aus dem Jahre 1993 wird von „Handel und Gewerbe“ dominiert, im Nachfolgemodell aus dem Jahre 1997 hingegen von einer industriellen Nutzung.

Die zusätzlichen Randbedingungen in den Modellen von White und Engelen lassen sich im Kontext dieser Analyse durchaus kritisch hinterfragen. Die Erkenntnisse aus der Parameteruntersuchung eröffnen die Diskussion über grundsätzliche modellkonzeptionelle Fragen zu den ‚constraints‘ im urbanen CA, den exogenen Bedingungen, die einem klassischen CA ermöglichen, die komplexen realen Landnutzungsdynamiken abzubilden.

Couclelis vertritt die Auffassung, dass „ein Modell, das auf Spiel-Werten und den Annahmen der Homogenität, Uniformität und der Allgemeingültigkeit klassischer Zellulärer Automaten basiert, keinen Anspruch auf den Status selbsterklärender Werkzeuge für ‚real-world‘ Anwendungen besitzt“ (Couclelis, 1997). Torrens äußert sich diesbezüglich relativierend. Durch zusätzliche Randbedingungen können urbane CA ihre vorteilhaften Eigenschaften verlieren (Torrens, 2000).

Lee's Kritik aus den 70er Jahren ist in den Augen von Benenson & Torrens noch immer gültig: „Die Komplexität wird aus dem Modell selbst erzeugt. Sie könnte schnell ein unüberwindbares Hindernis werden. Der Formalismus muss daher so simpel wie möglich gehalten werden“ (Benenson und Torrens, 2000).

4.2. Potentialansatz für zwei Nutzungsklassen

Es sollen in diesem Abschnitt die grundlegenden Eigenschaften des Potentialansatzes erforscht werden. Hierzu wird der Ansatz zunächst auf zwei Nutzungsklassen angewendet.

In einem einfachen zellulären Automatenmodell mit zwei Landnutzungsklassen (urban und nonurban), wird der zukünftige Zustand einer Zelle über die Differenz des Potentials pot_1 (urban) und pot_2 (nonurban) bestimmt.

Das Potential pot_1 beschreibt die nachbarschaftsbedingte Eignung der betrachteten Zelle (ix, iy) zu urbanisieren oder auch in einem urbanen Zustand zu verweilen. pot_2 drückt das Potential für den nonurbanen Zustand aus, d.h. noch nicht versiegelte Fläche (Acker, Wald, Grünfläche) bleibt erhalten, oder die schon urbanisierte Fläche fällt brach bzw. wird deurbanisiert (rückgebaut).

Der hier verwendete Potentialansatz entspricht einer deterministisch totalistischen Regel (vgl. Kap. 1.2.5.). Die Zustandsänderungen einer Zelle sind eindeutig determiniert und berücksichtigen nur die Anzahl der verschiedenen Nutzungen in einer Moore-Nachbarschaft.

$$pot_1(ix, iy) = \alpha \cdot N_1 + \beta \cdot N_2 \quad (4.3)$$

$$pot_2(ix, iy) = \gamma \cdot N_1 + \delta \cdot N_2$$

Die Parameter in Gleichung (4.3), α , β , γ , δ gewichten den Einfluss einer Nutzungsklasse im Nachbarschaftsraum der betrachteten Zelle auf den zukünftigen Zustand dieser Zelle. Die Nachbarschaftskonstellation wird über die Anzahl urbaner N_1 und nonurbanen Nachbarzellen N_2 definiert.

Der Potentialansatz ermöglicht auf diese Weise, den Einfluss der Umgebung einer Zelle numerisch auszuwerfen und erfüllt damit zwei Funktionen:

- Der Vergleich mit den Potentialwerten anderer Nutzungen am selben Ort, erlaubt eine (die günstigste) Nutzungsänderung dieses Ortes zu beschreiben.
- Der Vergleich mit Potentialwerten anderer Zellen, erlaubt den (günstigsten) Ort einer Nutzungsänderung zu beschreiben.

Die Gleichung (4.5) verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den gewählten Potentialparametern und der Nachbarschaftskonstellation. In einer einfachen Moore-Nachbarschaft mit insgesamt acht Zellen ist die Anzahl der Nachbarn N_1 bei zwei Klassen stets

durch die Subtraktion der Nachbarzellen N_2 von der Summe aller Nachbarzellen bestimmt (Gleichung 4.4)

$$N_1 = 8 - N_2 \quad (4.4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (4.4) in die Potentialdefinitionen (4.3) erhalten wir bei Gleichsetzung der Potentiale $pot_1 = pot_2$ folgende Gleichung:

$$N_1^{krit} = \frac{8(\delta - \beta)}{(\alpha - \beta - \gamma + \delta)} \quad (4.5)$$

Der Wert N_1^{krit} bestimmt abhängig von den Parameterwerten ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$) die kritische Anzahl urbaner N_1 bzw. nichturbaner Zellen N_2 im berücksichtigten Einflussbereich, die für eine bestimmte Transformation der Zelle nötig sind.

Es sollen an einem einfachen Beispiel die Eigenschaften und Wirkungen der Potentialparameter beschrieben werden. Mit einer Parameterdefinition von:

$$\begin{aligned} pot_1(ix, iy) &= 4.3 \cdot N_1 + 2.5 \cdot N_2 \\ pot_2(ix, iy) &= -1.55 \cdot N_1 + 4.9 \cdot N_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

wird für das Potential einer urbanen Nutzung, den urbanen Zellen ($\alpha=4.3$) in der direkten Umgebung der Referenzzelle ein relativ hohes positives Gewicht beigemessen. Eine Zelle neigt wesentlich stärker zur Urbanisierung, wenn sich in Ihrer direkten Umgebung schon eine urbane Struktur etabliert hat. Der Parameter $\beta = 2.5$ bewirkt einen positiven Einfluss von freier, nichturbaner Fläche. Urbanisierte Zellen wirken sich negativ auf das Potential für nonurbane Nutzung aus ($\gamma = -1.55$), freie Fläche hat mit $\delta=4.9$ hingegen eine sehr gute Gewichtung – die Neigung zu urbanisieren ist bei fehlender urbaner Struktur als geringer eingestuft.

Der kritische Wert der Nachbarschaftskonstellation beträgt nach Gleichung (4.5) $N_1=2.32$. Dies bedeutet, dass eine Zelle mindestens drei urbane Nachbarzellen benötigt, um urbanisiert zu werden oder in der städtischen Struktur weiterhin bestehen zu können. Läge der Wert bei $N_1=1,9$ würden beispielsweise nur zwei urbane Nachbarn ausreichen.

Die Abbildung 4.2 a) stellt die ersten fünf Iterationen aus diesem Beispiel auf einer kleinen Testmatrix dar. Der verwendete Programmcode ist in App. 4 dokumentiert. Unter der Annahme, dass die dunkelgrauen Zellen städtische Nutzungen darstellen und die hellgrauen Zellen für nonurbane, freie Flächen stehen, sollen hier typische Transformationsprozesse dargestellt werden, die aus obigem einfachen Potentialansatz resultieren. Es zeigt sich, dass sich die Ausgangsagglomeration von drei urbanen Zellen nicht etablieren kann. Ein urbanes Agglomerat von insgesamt vier Zellen (Abbildung 4.2 b) kann sich hingegen halten, jedoch aufgrund zu geringer Größe nicht weiter anwachsen, sondern bleibt beständig auf dieser kritischen Größe.

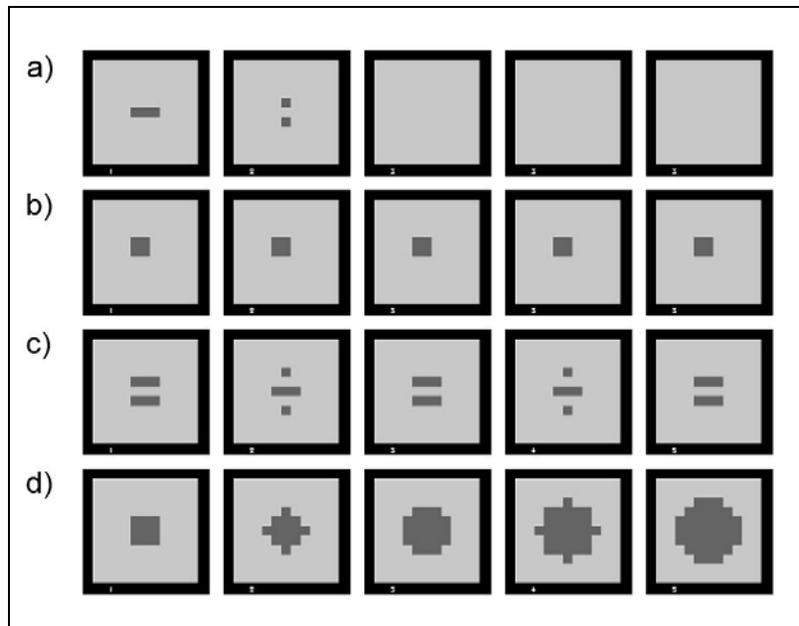


Abbildung 4.2: Die ersten fünf Iterationen verschiedener Ausgangssituationen, berechnet nach den Potentialparametern aus dem Parametersatz (Gl. 4.6)

Zwei benachbarte urbane Agglomerate, die nicht die kritische notwendige Größe besitzen, um sich einzeln zu etablieren oder zu wachsen, oszillieren endlos zwischen zwei Zuständen (Abbildung 4.2c). Im realen Kontext könnte diese Dynamik aus der Spekulation über eine vorteilhaftere, aufstrebende Lokalität heraus interpretiert werden. Der Wunsch nach einer größeren urbanen Agglomeration veranlasst die Akteure in der nächsten Iteration, in das Spekulationsgebiet zu ziehen. Die gleiche Motivation treibt die Bewohner des anderen Raumes dazu, sich eine neue Lokalität zu suchen, doch fallen ihre Spekulationen über den vorteilhafteren Standort nachbarschaftsbedingt anders aus. Treten keine weiteren Akteure hinzu, wird die kritische Agglomeratsgröße nicht erreicht und führt zu der ständigen Suche nach der „zukunftsweisenden“ Region.

In Abbildung 4.2 d ist eine klassische Wachstumssituation aus einem 3x3 Agglomerat heraus zu sehen. Da drei urbane Nachbarn ausreichen, wächst jede Stadtrandfläche mit drei Zellen weiter in die freie Fläche.

Es gilt zu beachten, dass die Wahl der Parameterwerte nach der beschriebenen argumentativen Gewichtung nicht immer den vermeintlich erwünschten Effekt der Nachbarschaftseinflüsse in der Dynamik der Transformationen wiedergibt.

Wie Gleichung (4.5) zeigt, kann ein Wert N_1 durch verschiedene Kombinationen von Parametern erfüllt werden. Da die Zellkonstellationen stets ganzzahlige Werte besitzen, reagiert die Transformationsdynamik ebenso nicht auf Veränderung des N_1 -Wertes im Dezimalbereich, sondern verhält sich bei diesen Abweichungen exakt ähnlich.

Eine Veränderung eines spezifischen Parameterwertes, beispielsweise mit der Intention, die Gewichtung der urbanen Zellen in der Nachbarschaft zu erhöhen, muss sich daher nicht

zwangsläufig direkt auf die Transformationen auswirken. Hingegen kann eine minimale Abweichung eines anderen Parameterwertes die Dynamik vollständig verändern.

Die Anwendung einer Vielzahl unterschiedlicher Parametersets bei einer einfachen Moore-Nachbarschaft mit acht Zellen ließ eine grundlegende Einteilung in drei Klassen von Dynamiken zu (Abbildung 4.3).

- $0 > N_1 < 2$: Sofern mehr als eine urbane Zelle vorhanden ist, findet ein stetiges Wachstum der urbanen Zellen statt. Keine Oszillation und kein stationäres Verhalten.
- $2 > N_1 < 4$: Es findet sowohl Schrumpfung wie auch Wachstum statt. Bei $N_1 > 3$ kann sich ein Agglomerat nur nach innen ausbreiten, es findet keine Expansion in die Fläche statt. Die Dynamik ist abhängig von der Größe des Ausgangsagglomerats. Oszillation und stationäres Verhalten treten auf.
- $4 > N_1 < 8$: Es findet kein Wachstum statt, nur Schrumpfung der urbanen Agglomeration. Keine Oszillation oder stationäres Verhalten.

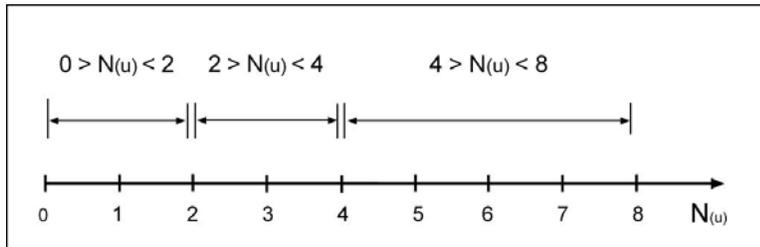


Abbildung 4.3: Kritische Moore-Nachbarschaftskonstellationen mit N_1 urbanen Nachbarzellen

Ergibt sich durch die Potentialparameter ein ganzzahliger Wert für N_1 , sind die Potentiale für beide Nutzungen in der Konstellation N_1 exakt gleich. Es entscheidet in diesem Fall der weitere Algorithmus über die Wahl der Nutzung. Aus diesem Grund sind diese Fälle von der Kategorisierung in ausgenommen.

4.3 Potentialansatz für drei Nutzungsklassen

Die Anwendung des Potentialansatzes auf drei Nutzungstypen kann einer Abbildung des realen städtischen Raumes etwas gerechter werden.

Wir erhalten in diesem Fall analog zur Definition des Potentialansatzes (Gl. 4.1), für jede Nutzungsklasse i ein Potential pot_i , dass sich über die gewichteten Einflüsse der umgebenden Nachbarzellen definiert:

$$pot_i = \alpha_i \cdot N_1 + \beta_i \cdot N_2 + \gamma_i \cdot N_3 \quad i = 1,2,3 \quad (4.7)$$

Es soll auch hier der Zusammenhang zwischen den Potentialparametern und den Nachbarschaftskonstellation betrachtet werden, die zu den Transformationen einer Zelle führen.

Auch bei drei Nutzungen lassen sich die kritischen Nachbarschaftskonstellationen für ein Set an Potentialparametern ermitteln. Unter der Annahme das (vgl. Gleichung 4.4),

$$N_3 = 8 - N_1 - N_2 \quad (4.8)$$

erhalten wir nach Einsetzen von Gleichung (4.8) in Gleichung (4.7) das Potential pot_i :

$$pot_i = (\alpha_i - \gamma_i)N_1 + (\beta_i - \gamma_i)N_2 + 8\gamma_i \quad (4.9)$$

Das Gleichsetzen der Potentiale pot_i und pot_j ergibt eine lineare Funktion (Gleichung 4.10), die den Verlauf der kritischen Anzahl an Nachbarschaften im betrachteten Moore-Raum darstellt.

$$N_2 = \frac{\Delta\alpha - \Delta\gamma}{\Delta\gamma - \Delta\beta} N_1 + \frac{8(\Delta\gamma)}{\Delta\gamma - \Delta\beta} \quad (4.10)$$

Es lässt sich so ein Aussage darüber treffen, unter welchen Nachbarschaftskonstellationen das Potential pot_i den höheren Wert annimmt, bzw. – übertragen auf die Nutzungen – welche Anzahl an Zellen einer Nutzung in der Umgebung mindestens existieren müssen, damit sich Nutzung i etablieren kann.

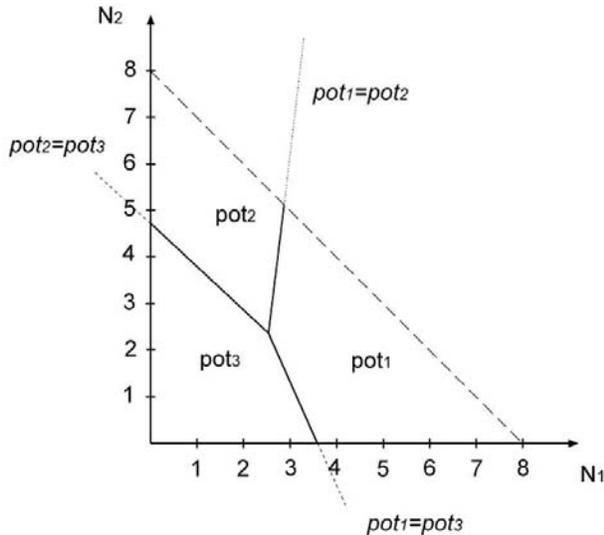
Nachfolgend soll der Potentialansatz für drei Nutzungsklassen an einem Beispiel genauer erläutert werden. Ausgehend von den Nutzungen Wohnen, Agrar- und Freifläche sowie Gewerbe und Industrie wird ein Parameterset festgelegt:

$$\begin{aligned} \text{Siedlungsfläche:} & \quad pot_1 = 4 \cdot N_1 + 1 \cdot N_2 - 3 \cdot N_3 \\ \text{Agrar- \& Freifläche:} & \quad pot_2 = -1 \cdot N_1 + 4 \cdot N_2 - 1 \cdot N_3 \\ \text{Gewerbe \& Industrie:} & \quad pot_3 = -3 \cdot N_1 + 1 \cdot N_2 + 3 \cdot N_3 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Das Potential für Wohn- und Siedlungsfläche steigt demnach, wenn sich in der direkten Umgebung weitere Siedlungsflächen befinden. Gewerbe und Industrie hingegen mindern die Eignung für Wohnen um den Faktor „3“, Acker und Freifläche wird ein geringer positiver Wert beigemessen. Die Güte für Agrar- und Freifläche mindert sich gleichermaßen durch Wohn- und Gewerbefläche in der Umgebung. Gewerbe und Industrie lässt sich vornehmlich dort nieder, wo schon andere Unternehmen angesiedelt sind und keine Wohngebiete angrenzen. Wie die Parameterwerte vermuten lassen, ist das Verhältnis für alle Nutzungen relativ ausgewogen. Eine Berechnung der kritischen Nachbarschaftskonstellationen nach Gleichung (4.10) gibt nun Aufschluss darüber, unter welchen Konstellationen die einzelnen Potentiale den höchsten Wert annehmen und somit die zukünftige Nutzung bestimmen.

Das paarweise Gleichsetzen aller Potentiale nach Gleichung (4.10) ergibt folgende drei lineare Funktionen (4.12).

(4.12)



$$pot_1 = pot_2 \Rightarrow N_2 = 7 \cdot N_1 - 16$$

$$pot_2 = pot_3 \Rightarrow N_2 = -\frac{6}{7} \cdot N_1 + \frac{32}{7}$$

$$pot_1 = pot_3 \Rightarrow N_2 = -\frac{13}{6} \cdot N_1 + 8$$

Abbildung 4.4: Potentialfunktionen (nach Gleichung 4.12) in einer einfachen Moore-Nachbarschaft

Die Bereiche pot_1 , pot_2 und pot_3 in der Grafik in Abbildung 4.4 sind die Nachbarschaftskonstellationen, in denen das jeweilige Potential den höchsten Wert einnimmt. Die Achse N_1 steht für die Anzahl an Zellen der Nutzung Wohnen, N_2 für die Anzahl der Zellen an Agrar- und Freiflächen. Die Anzahl der Zellen für Industrie und Gewerbe errechnet sich aus der Differenz nach Gleichung (4.8). Es lassen sich somit, wie auch schon bei zwei Nutzungen gezeigt wurde, die Potentialparameter in direkte Korrelation mit den Nachbarschaftskonstellationen setzen.

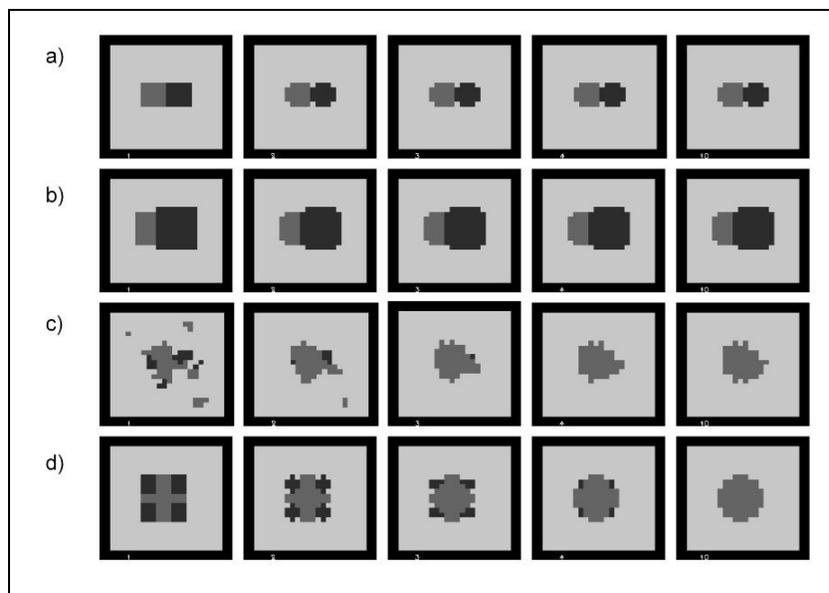


Abbildung 4.5: Die ersten Iterationen verschiedener Ausgangssituationen mit drei Nutzungsklassen, berechnet nach den Parametersätzen aus (4.11) PV-WAVE-Programmcode ist im App. 5 dokumentiert.

In Abbildung 4.5 sind die ersten Iterationen (1, 2, 3, 4 und 10) nach dem Parametersatz (siehe Gleichung (4.11)) aus dem Beispiel berechnet. Die hellgrauen Zellen entsprechen der Nutzung „Agrar- & Freifläche“, dunkelgraue Zellen stellen die Nutzung „Wohnen“ dar, „Industrie und Gewerbe“ ist schwarz dargestellt. Die Entwicklung der Zellen zeigt eine Dynamik zwischen einem stationären Verhalten und einer Schrumpfung auf eine kritische Agglomeratsgröße, bzw. einem Aussterben, wenn die kritische Größe nicht erreicht ist. Das ausgewogene Verhältnis der Parameterwerte zeigt sich in der Dynamik der Transformationen – keine der drei Nutzungen kann die Entwicklung dominieren.

Weiterführende Untersuchungen über die Dynamiken des einfachen Potentialansatzes zeigten, dass auch bei drei Nutzungsklassen dieselben Arten von Dynamiken auftreten können, wie sie im vorigen Kapitel bei zwei Nutzungen differenziert wurden (vgl. Abbildung 4.3): Stetiges Wachstum, Oszillationen, stationäres Verhalten und Schrumpfung. Auch hier spielen die kritischen Nachbarschaftskonstellationen eine wesentliche Rolle für die Transformationsdynamiken. Wird einer Nutzung in einer Moore-Nachbarschaft mit acht Zellen schon bei zwei angrenzenden Zellen gleichen Typs eine Transformation zugesprochen, so findet, ausgehend von einem Entwicklungskern, ein stetiges Wachstum dieser Nutzung statt. Beträgt der kritische Wert drei Zellen, tritt ein stetiges, jedoch gemäßigeres Wachstum auf. Benötigt eine Zelle vier Nachbarn, so schrumpft die Nutzung auf eine kritische Agglomeratsgröße ohne der Möglichkeit nach außen zu wachsen. Diese grundlegend möglichen Entwicklungen einer Grenzfläche unter einem kritischen Nachbarschaftswert sind für die Dynamik bedeutend und bei der Wahl der Parameter zu berücksichtigen.

Die drei linearen Funktionen, die durch das paarweise Gleichsetzen aller Potentiale berechnet werden (vgl. Gleichung 4.7) stellen den Verlauf der kritischen Anzahl an Nachbarschaften im betrachteten Moore-Raum für die jeweiligen Nutzungen dar. In den Abbildungen 4.6 und 4.7 sind Beispiele aufgeführt, die den Einfluss dieser kritischen Anzahl verdeutlichen. In Beispiel 1 (Abbildung 4.6) schneidet die lineare Funktion aus

$$pot_1 = pot_3 \Rightarrow N_2 = -5 \cdot N_1 + 16$$

bei einem Wert von $N_1 = 3,2$ die N_1 -Achse. Dies bedeutet, dass die Nutzung „Wohnen“ gegenüber dem Gewerbe nur bei einer Anzahl von vier weiteren Zellen wachsen kann. Gegenüber der Agrarnutzung gilt für das Potential pot_1 :

$$pot_1 = pot_2 \Rightarrow N_2 = 6 \cdot N_1 - 16$$

Auch hier liegen die Werte für $N_1 < 4$ nicht im Bereich von pot_1 . Eine Expansion von Wohnzellen ist damit nicht möglich. In den ersten Iterationen (1,2,4,...,10) ist in Abbildung 4.6 eine Schrumpfung der Wohnagglomerationen (dunkelgrau) auf eine kritische Größe zu sehen, die sich daraufhin stationär verhalten. Der industriellen und gewerblichen Nutzung (schwarz) wird gegenüber der Agrarnutzung eine Expansion ermöglicht. Die kritische Nachbarschaftskonstellation beträgt drei. Daher ist nur ein verhaltenes Wachstum möglich.

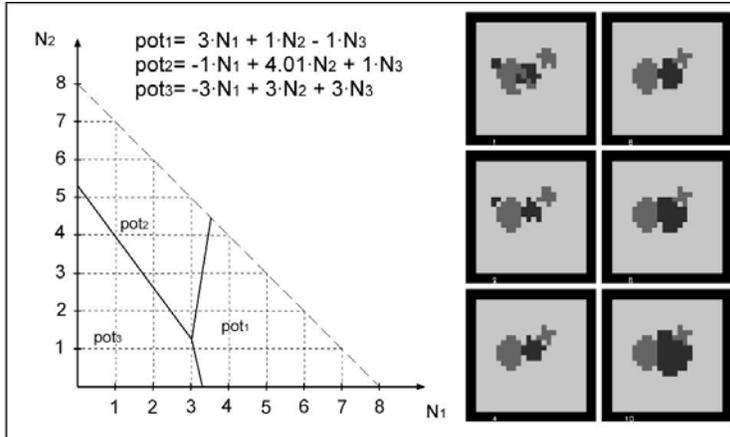


Abbildung 4.6: Beispiel (1) einer Transformationsdynamik des Potentialansatzes bei drei Nutzungsklassen (Agrarfl.= hellgrau, Wohnen= dunkelgrau, Industrie- und Gewerbe= schwarz)

Im Beispiel 2 (Abbildung 4.7) ist ein Parametersatz dargestellt, der durch die folgenden linearen Funktionen beschrieben werden kann:

$$\begin{aligned}
 pot_1 = pot_2 &\Rightarrow N_2 = 60 \cdot N_1 - 160 \\
 pot_2 = pot_3 &\Rightarrow N_2 = -1,428 \cdot N_1 + 3,809 \\
 pot_1 = pot_3 &\Rightarrow N_2 = -4,5 \cdot N_1 + 12
 \end{aligned}$$

In diesem Beispiel liegen alle Werte für $N_1=3$ im Bereich des höchsten Potentials für die Nutzung Wohnen, was sich in einer starken räumlichen Ausbreitung äußert. Die Industrie- und Gewerbeagglomerate sind zu klein um gegenüber der Agrarnutzung und der Wohnexpansion bei einer kritischen Größe von fünf Nachbarn längere Zeit zu bestehen.

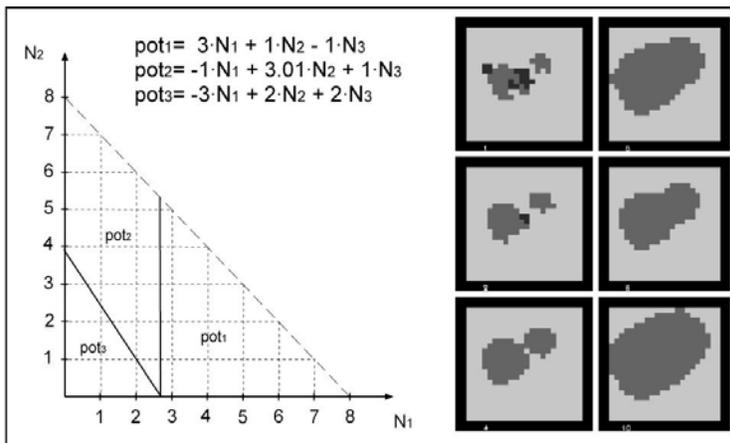


Abbildung 4.7: Beispiel (2) einer Transformationsdynamik des Potentialansatzes bei drei Nutzungsklassen (Agrarfl.= hellgrau, Wohnen= dunkelgrau, Industrie- und Gewerbe= schwarz)

Die folgende Unterteilung (Abbildung 4.8) liefert eine qualitative Abschätzung, wie sich die Wahl der Potentialfunktionen auf der Basis der resultierenden Nachbarschaftskonstellationen interpretieren lässt. Am Beispiel der Nutzung ‚Wohnen‘, wurden verschiedene Bereiche von dominierenden Nachbarschaftskonstellationen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Transformationsdynamik des Siedlungsbereiches ausgewiesen. Liegen die höchsten Potentiale für Wohnen in den Bereichen (Z_1, Z_2, \dots, Z_6), setzen sich in der Modelldynamik die beschriebenen räumlichen Strukturformen der Wohnsiedlung durch.

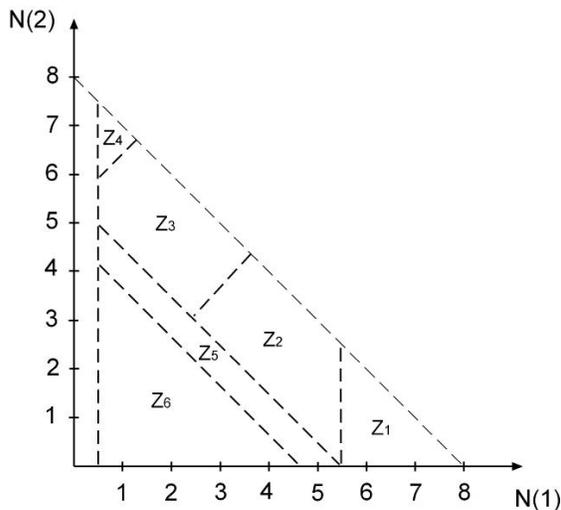


Abbildung 4.8: Unterteilung der Nachbarschaftskonstellationen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Transformationsdynamik am Beispiel der Nutzung ‚Wohnen‘.

$Z_1 \rightarrow (6 \geq N_1 \leq 8; 0 \geq N_2 \leq 2; 0 \geq N_3 \leq 2)$; sehr dichtes kompaktes Wohnen, wenig Agrar- und Freiflächen in der Umgebung, geringe Anzahl an Gewerbe und Industrie.

$Z_2 \rightarrow (3 \geq N_1 \leq 5; 1 \geq N_2 \leq 4; 0 \geq N_3 \leq 2)$; relativ dichtes randnahes Wohnen, etwas mehr Feiflächen geringe Anzahl an Gewerbe & Industrieflächen.

$Z_3 \rightarrow (1 \geq N_1 \leq 3; 4 \geq N_2 \leq 6; 0 \geq N_3 \leq 2)$ entspricht eher dem suburbanen Wohnstil, viel Agrar- und Feiflächen, wenig Gewerbe & Industrieflächen.

$Z_4 \rightarrow (N_1=1; N_2=7; N_3=0)$; allein stehende Siedlungszellen, sehr viel Agrar- und Feiflächen in der Umgebung, keine Gewerbe & Industrieflächen.

$Z_5 \rightarrow (1 \geq N_1 \leq 5; 1 \geq N_2 \leq 4; 0 \geq N_3 \leq 2)$; Übergangsbereich zwischen den prägnanten Siedlungsformen

$Z_6 \rightarrow (1 \geq N_1 \leq 4; 0 \geq N_2 \leq 3; 4 \geq N_3 \leq 7)$; relativ dichtes Industrienahes Wohnen, wenig Agrar- und Feiflächen, relativ hohe Anzahl an Gewerbe & Industrieflächen

5. Das Fallbeispiel Leipzig

Die Anwendung des Zellulären Automatenmodells erfolgt in der vorliegenden Arbeit am Beispiel der urbanen Landnutzungsentwicklung der Stadtregion Leipzig.

5.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage bildet eine digitale Flächennutzungskartierung der Stadtregion Leipzig, die fünf Zeitschnitte aus den Jahren 1870 bis 2003 im Maßstab von 1:25 000 abbildet (Abbildung 5.1). Basierend auf Äquidistantenkarten, Messtischblättern, Topographischen Karten, Color-Infrarot-Luftbildern und Flächennutzungsplänen, wurden von Haase & Magnucki (2004) die Nutzungskartierungen der Jahre 1870, 1940, 1985, 1997 und 2003 digitalisiert. Die Zeitschnitte umfassen aufgrund der unregelmäßigen Karteneditionen ungleich lange Zeiträume. Insgesamt wurden 30 Flächennutzungs- bzw. Bebauungstypen entsprechend der Stadtstrukturtypengliederung unterschieden. Die Flächennutzungsdaten von Leipzig wurden freundlicherweise von Frau Dr. D. Haase (UFZ Leipzig) in digitaler Form für diese Arbeit zu Verfügung gestellt.

Für eine räumliche Modellierung ist eine Abstraktion der realen Flächennutzungsdaten auf eine der Fragestellung entsprechenden Aggregation erforderlich. Die Datenaufbereitung für das CA-Modell wird nachstehend erläutert.

Räumliche Aggregation

Ein erster Bearbeitungsschritt stellte die Transformation der Vektordaten in hoch aufgelöste Rasterdaten (ASCII-Format) mittels der GIS-Software *ArcView* dar. Für die weiteren Aggregationen wurde ein Programmcode entwickelt, um eine exakte Kontrolle über die Methode zu gewährleisten und individuelle Anforderungen an die Bearbeitung zu ermöglichen (siehe App. 6). Die räumliche Aggregation eines Datensatzes mit diversen Attributen beinhaltet zwangsläufig auch eine Aggregation auf inhaltlicher Ebene. Der hier verwendete Algorithmus wählt für die zu aggregierende Submatrix das Attribut aus, welches in diesen Zellen am häufigsten vorkommt. In gängigen GIS-Applikationen werden hingegen die Attribute in der Mitte der Submatrix gewählt, unabhängig davon, ob sie den betrachteten Raum dominieren. Die hier gewählte Auswahl des Attributes gewährleistet die Informationsübernahme des flächenmäßig überwiegenden Attributes, was bei einer räumlichen Nutzungsbetrachtung zu einer sinnvollen Aggregation führt. Die räumliche Auflösung der Daten in dieser Arbeit beträgt 213x229 Zellen mit einer Rasterzellengröße von 100m². Dies ermöglicht eine angemessene Wiedergabe der relevanten räumlichen Strukturen und entspricht den gängigen Auflösungen in den Modellen ähnlicher Studien (White et al., 2000; Barredo, 2003)

Thematische Aggregation

Die Flächennutzungskartierung von Haase et al. differenziert je nach Zeitschnitt max. 30 unterschiedliche Nutzungen. Für die hier durchgeführte Modellierung werden die Nutzungen in drei Klassen zusammengefasst: *“Agrar- und Freifläche“*, *“Wohnen“* sowie *“Industrie und Handel“* (siehe Tabelle 5.1). Die Generalisierung der Landnutzungsklassen in drei Kategorien bedingt eine starke Vernachlässigung spezifischer Eigenschaften.

Gewässer, wie auch Forst, wurden der Kategorie *“Agrar- und Freifläche“* zugeteilt, da unter dieser Klasse Nutzungen mit überwiegend naturnahen Charakteristika zusammengefasst werden sollten. Urbane Freiflächen, Garten, Park- und Grünanlagen wurden in dieser Generalisierung unter der Kategorie *“Wohnen“* zusammengefasst, da sie einen stärker anthropogenen Charakter besitzen. Der Klasse *“Industrie und Handel“* sind aufgrund der Zweiteilung urbaner Nutzungen auch die Dienstleistungsklassen und Verwaltungseinrichtungen zugeordnet. Die linienartige Infrastruktur (Straßen und Bahnlinien) wird bei einer räumlichen Auflösung von 100m² Rastern nicht wiedergeben und wurde bewusst aus der Klassifizierung herausgenommen.

Der Algorithmus zur Typenaggregation ist in App. 7 dokumentiert.

Tabelle 5.1: Thematische Aggregation der Landnutzungstypen Stadt Leipzig; 1=“Wohnen“, 2=“Agrar- und Freifläche“, 3=“Industrie und Handel“

Nutzungstypen Orginalkartierung (nach Haase et al. 2004)	Aggregierte Nutzungstypen
Alter Siedlungskern	"Wohnen"
Zeilenbebauung	
Großwohnsiedlung	
Wohnpark	
Einzel- und Doppelhausbebauung	
Block(rand)bebauung	
Villen	
Zentrum	
Sport- und Freizeitfläche	
Park- und Grünanlage	
Gartenanlage	
Friedhof	
Acker- und Freifläche	"Agrar- und Freifläche"
Grünland	
Wald, Forst	
Brachfläche	
Fließgewässer	
Stillegewässer	
Industrie, Gewerbe	"Industrie und Handel"
Gewerbebrache	
Messegelände	
Verwaltung, Dienstleistung	
Gesundheit, Soziales	
Bildung, Forschung	
Militär	
Technische Ver- und Entsorgung	
Bahnanlage	
Abgrabung	
Aufschüttung	

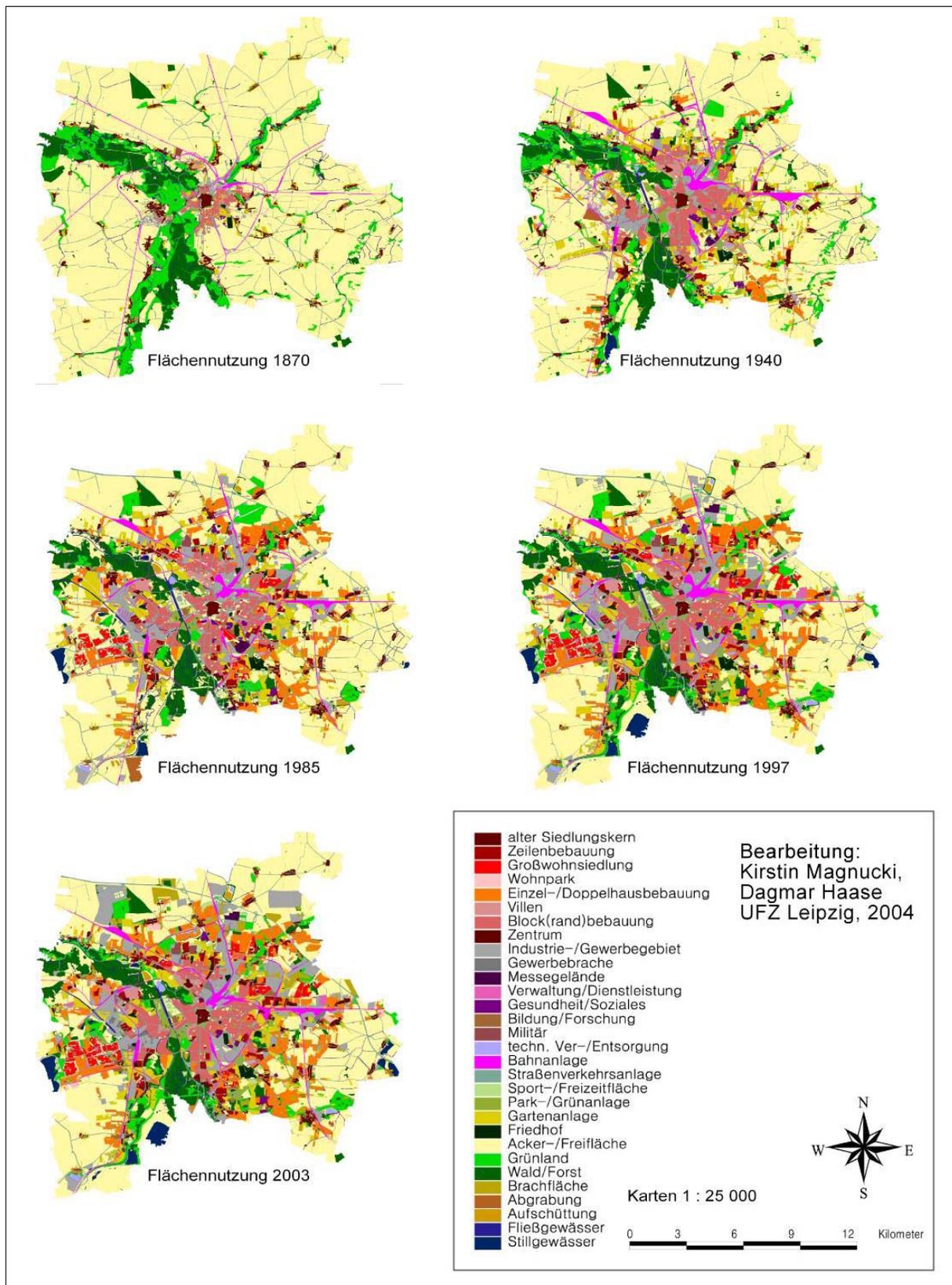


Abbildung 5.1: Flächennutzungsentwicklung in Leipzig 1870-2003 (Quelle: Haase & Magnucki, 2004)

5.2 Identifikation der relevanten Prozesse der Landnutzungsänderung in der Entwicklung von Leipzig

In Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit liegt der Fokus der Regeldefinition auf der Dynamik der Nutzungsklassen, ihren lokalen Präferenzen und nachbarschaftsräumlichen Affinitäten. Es wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die Prozesse der Nutzungsänderungen gegeben, die für die Regelsetzung im Modell berücksichtigt wurden.

Prägend für die Entwicklung der Stadtregion Leipzig ist das beträchtliche Flächenwachstum, das sich wesentlich in der Transformation von Agrarfläche zu urbanen Nutzungen äußerte. Auf der im Modell verwendeten sektoralen Aggregationsstufe ist ein Rückgang an Agrar- und Freifläche von ca. 61km² in den Jahren 1940 bis 2003 zu verzeichnen. 35km² dieser Fläche ist in Nutzungen der Kategorie „Wohnen“ und ca. 26km² in Nutzungen der Klasse „Industrie und Handel“ übergegangen. In Abbildung 5.2 ist ein Überblick über die Entwicklung der Flächennutzung basierend auf den digitalen Nutzungsdaten dargestellt.

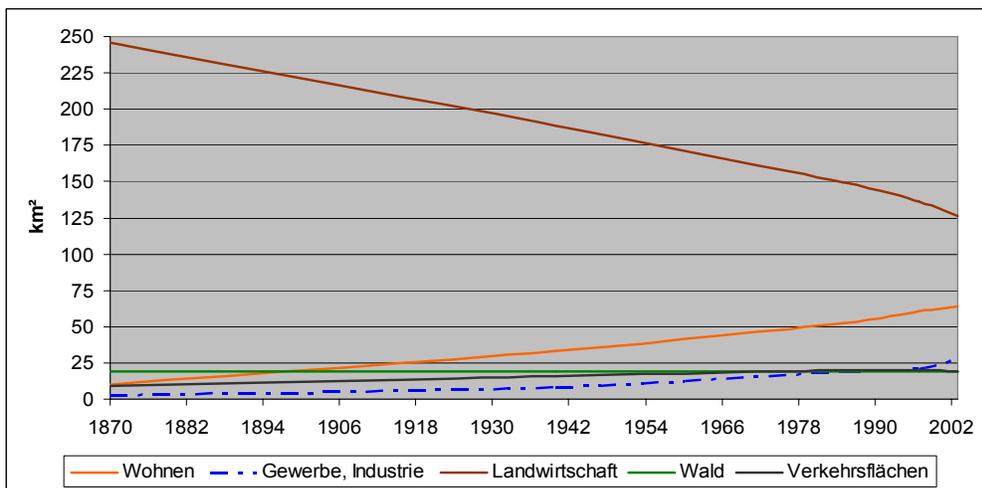


Abbildung 5.2: Entwicklung der Flächennutzungen in Leipzig zwischen 1870 und 2003 (Quelle: Magnucki, K. et Haase, D. [2004], aus Boschütz, 2006)

Die Strukturentwicklungen im Wohn- und Siedlungsbereich sind in dem betrachteten Zeitraum von 1940-2003, wesentlich in der Peripherie der Stadt zu finden. Die Entstehung von Wohnraum am Stadtrand begann bereits 1940 mit kleineren Einzelhaussiedlungen (Knauthain und Hartmannsdorf) und setzte sich in den 1970-80er Jahren mit dem Bau von Einzel- und Dopplerhäusern in der Peripherie fort. In dieser Zeitphase (1976-1988) entstanden zusätzliche Großwohnsiedlungen am Rand der Stadt (Grünau) sowie kleinere Siedlungen in industrieller Bauweise (1970er Jahre) im Norden des Stadtgebietes. Anfang der 1990er Jahre setzt ein starker Suburbanisierungstrend ein – es entstanden in erster Linie weitere Einfamilien- und Reihenhäuser, sowie Wohnparks in der Peripherie Leipzigs (Haase et al., 2004). Der Ausbau von Siedlungen am Stadtrand erreichte 1996 seinen Höhepunkt. Ihm folgte eine Stagnation hinsichtlich der Suburbanisierung. Gründe hierfür liegen in dem großen Angebot an preiswerten,

sanierten Altbauwohnungen in der Innenstadt, sowie der Abschaffung staatlicher Subventionen für neue Bauvorhaben.

Während der Industrialisierung wurde Leipzig zu einem bedeutendem Handels- und Industriestandort in Deutschland. Die Vorstädte waren durch Gewerbe und Handwerk geprägt, die enge Verknüpfung von Wohnbereich und Gewerbe zeigte sich vornehmlich in den südlichen Teilen der Stadt (Neustädter Markt und Südvorstadt).

Der Handels- und Industriestandort Leipzig, der durch die Leipziger Messe und den Braunkohleabbau einen wichtigen wirtschaftlichen Standort bis zur Wiedervereinigung darstellte, brach Anfang der 1990er Jahre zusammen. 80% der industriellen Arbeitsplätze wurden abgebaut und im Zuge der wirtschaftlichen Umstrukturierung von dem tertiären Sektor abgelöst. Der politischen und wirtschaftlichen Transformation folgten Investitionen in Gewerbekomplexe und große Einkaufszentren „auf der grünen Wiese“, die sich Anfang der 90er Jahre durch sehr günstige Bodenpreise und staatliche Vergünstigungen in den Außenbezirken ansiedelten. Einige Gewerbeflächen in der Innenstadt fielen brach und preiswertere Grundstücke am Stadtrand wurden vorgezogen (Brake, 2001). Im Norden Leipzigs wurden Anfang 2000 neue Gewerbe- und Industriestandorte (Sachsenpark, Leipzig-Nordost) errichtet, die mit der Ansiedlung großer Autofabriken und Logistikfirmen den neuen Strukturwandel markieren.

5.3 Anwendung des Potentialansatzes auf den Fall Leipzig

Im folgenden soll nun untersucht werden, inwieweit es gelingt, die Stadtentwicklung von Leipzig in Zeitraum von 1940-2003, mit einem Regelsatz, der auf der Basis von linearen Potentialen definiert ist, zu reproduzieren.

Analog zur Definition von White und Engelen, beschreibt das Transformationspotential pot_{ij} die Eignung einer Zelle mit der Nutzung i in die Nutzung j überzugehen (Gleichung 5.1).

$$pot_{ij} = \left(\sum_{h,k,d} m_{kd} \cdot I_{hd}^k \right) \quad (5.1)$$

m_{kd} Gewichtungparameter für Nachbarschaftszellen mit dem Zustand k in der Distanzzone d

h Index für Zellen innerhalb einer Distanzzone,

I_{hd}^k Faktor zur Selektion der relevanten Gewichtungen m_{kd} für die Zelle h

Die Nachbarschaft ist wie in den vorangegangenen Beispielen (Kap. 4.2 & 4.3) eine Moore-Nachbarschaft mit einem Zellraum von insgesamt acht Zellen und nur einer Distanzzone ($d=1$). Die Zellen innerhalb einer Nachbarschaftszone werden damit nur in Abhängigkeit der Anzahl ihrer Nutzung unterschiedlich gewichtet: Dies entspricht einem totalistischen Regelsatz. Der Wirkungsraum der Nutzungseinflüsse in der Nachbarschaft der Referenzzelle entspricht bei der hier verwendeten Auflösung von 213x229 Rasterzellen einer Fläche von 300m². Die

Transformationsregeln greifen zeitsynchron, d.h. es werden für alle Zellen drei Nutzungspotentiale zum Zeitpunkt t auf der Basis der aktuellen Nutzungskonstellation berechnet (vgl. Abbildung 5.3). Daraufhin wird das jeweils höchste Potential für jede Zelle bestimmt. Zum Zeitpunkt $t=t+1$ werden die Nutzungen gemäß dieses Resultates transformiert. Diese neue Nutzungsmatrix bildet die Datengrundlage für die weiteren Modelliterationen.

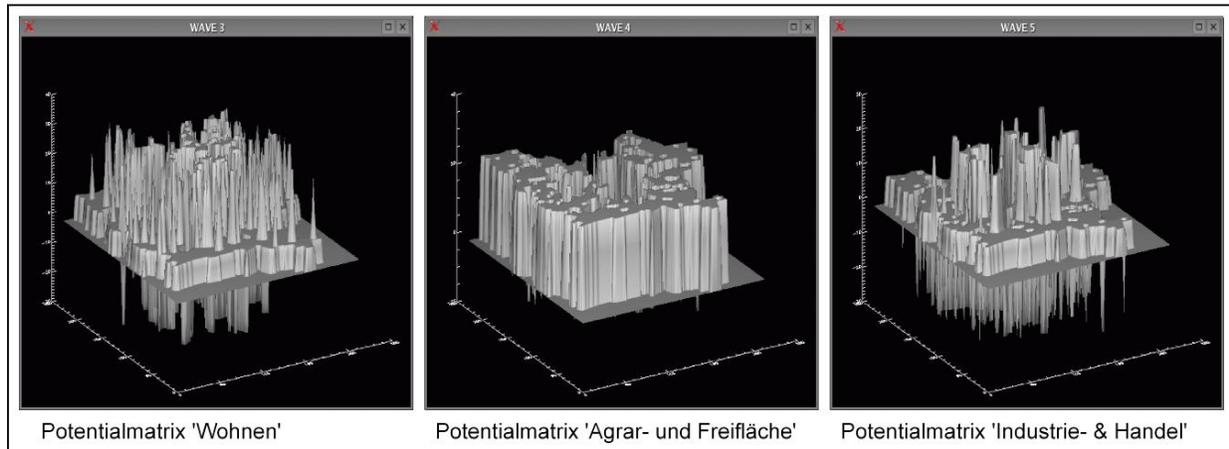


Abbildung 5.3: Dreidimensionale Darstellung der Potentialmatrizen der Nutzungsklassen zum Zeitpunkt $t=5$; Ausgangssituation Leipzig 1940; Potentialparameter nach Gl. (5.2)

Die Kalibrierung der Parameterwerte in urbanen Zellulären Automatenmodellen erfolgt in den häufigsten Studien unter Verwendung einer „trial and error“-Methode (White & Engelen, 1997; Barredo, 2003; Wu, 2002). Für automatisierte Kalibrierungsverfahren resultiert aus der Vielzahl an möglichen Nachbarschaftskonstellationen (in diesem Fall 3^{3^8} , vgl. Kap. 2.1.4) ein enormer Rechenaufwand. Eine zusätzliche Problematik ist das bis dahin noch unzureichende Verständnis über die Entwicklungsprozesse und Parametereinflüsse der CAs (Wu, 2002).

In dieser Arbeit ist die heuristische Form der Kalibrierung als ein bewusst gewählter Teil der Aufgabenstellung zu betrachten. Die Fragestellung nach den endogenen Mechanismen in dem Potentialansatz erfordert eine iterative Annäherung an die Wechselwirkungen der einzelnen Parameter und ihrer Transformationsdynamik. Scheinbar plausible Ergebnisse müssen nicht unbedingt einen kausalen Zusammenhang der Einflussparameter wiedergeben und umgekehrt generieren plausible Parameter nicht zwangsläufig realistische Ergebnisse. Die heuristische Methode zielt hier auf das Erfassen von Relationen, Verhältnissen, Beziehungen und Strukturen.

Ausgehend von den Erkenntnissen über die Wechselwirkungen der einzelnen Nutzungsklassen aus den vorangegangenen Simulationen (Kap. 4.2 & 4.3) werden die Parameterwerte auf die Landnutzungsdaten von Leipzig übertragen. Die bereits erfolgte, grobe Abgrenzung der Parametereinstellung bildet die Basis für die Feinabstimmung der Parameterwerte.

In der Regelformulierung wurde versucht, die historische Dynamik der Stadtentwicklung auf die Entwicklung der drei Nutzungsklassen zu aggregieren und mit Hilfe der Erkenntnisse über die

kritischen Nachbarschaftskonstellationen in das Modell zu implementieren. Basierend auf der Identifikation der relevanten Prozesse und der in Kap. 5.2 erfolgten Differenzierung in spezifische Nachbarschaftskonstellationen (Abb.: 4.9), sind für die Simulation (I) folgende Parameterwerte gewählt worden (vgl. Abbildung 5.4):

$$\begin{array}{ll}
 \text{Wohn- und Siedlungsfläche:} & pot_1 = 4 \cdot N_1 + 1 \cdot N_2 - 3 \cdot N_3 \\
 \text{Agrar- \& Freifläche:} & pot_2 = -1 \cdot N_1 + 3 \cdot N_2 - 1 \cdot N_3 \\
 \text{Industrie \& Handel:} & pot_3 = -3 \cdot N_1 + 1 \cdot N_2 + 3 \cdot N_3
 \end{array} \tag{5.2}$$

Die Regeldefinition lässt sich wie aufgeführt interpretieren:

- Die Kernstadt - eine dichte, urbane Wohnstruktur mit einer geringen Anzahl an Industrie- und Gewerbezellen in der Umgebung – bleibt als Zentrum bestehen.
- Es existieren industriell geprägte Wohnviertel im innerstädtischen Bereich.
- Eine relativ dichte, stadtrandnahe Wohnform, mit etwas mehr Freifläche und einer geringen Anzahl an Industrie- und Handelszellen wird als eine bevorzugte Wohnlage angesehen.
- Agrar- und Freiflächen in der Peripherie der Stadt sind nicht resistent gegenüber der Wohnsuburbanisierung. Sie widerstehen nur sehr schlecht einem räumlichen Druck der durch starke Flächennachfrage hervorgerufen wird.
- Industrie- und Handelszellen im städtischen Bereich sind beständig.
- Eine Neuansiedlung von Industrie- und Handel vollzieht sich bevorzugt an den Stadträndern mit mehrheitlich Agrar- und Freifläche in der Umgebung.
- Agrar- und Freifläche ist nicht resistent gegenüber Wohnen sowie Industrie- & Handel.

Als Ausgangssituation für die Modellläufe wurde der Datensatz von 1940 verwendet. Das zelluläre Automatenmodell simuliert die 63-jährige Stadtentwicklung bis zum Jahre 2003. In Abbildung 5.4 sind die Modellsimulationen mit zwei unterschiedlichen Zeitschritten abgebildet. In der Modellvariante a) wurden sechs Iterationen durchgeführt, die einen Zeitschnitt von je zehn Jahren darstellen, die Variante b) läuft zehn Iterationen je ca. sechs Jahre. Ein weiterer Simulationslauf (II) mit einer geringen Modifikation der Potentialparameter ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

In folgender Tabelle (Tabelle 5.2) ist die Gesamtanzahl an Zellen der jeweiligen Nutzungen aus den verschiedenen Modellergebnissen für das Jahr erfasst und den Daten aus der Landnutzung 2003 gegenübergestellt.

**Tabelle 5.2: Quantifizierung der Simulationsergebnisse aus den Simulationen I & II:
Gesamtanzahl der generierten Nutzungszellen der Modellläufe**

	Wohnen	Agrar- & Freifläche	Industrie & Handel
Simulation			
Ia	14251	13392	2150
Ib	18330	9392	2071
IIa	12919	13377	3497
IIb	15939	9368	4486
Landnutzung 2003	9700	15655	4436

Der quantitative Vergleich der Ergebnisse zeigt eine deutliche Überschätzung des Siedlungs- und Industriewachstums in allen Simulationen. Der Regelsatz wurde in Lauf II zugunsten der zu geringen Industrieentwicklung angepasst. Es gelang dabei eine relativ gute Annäherung an die Gesamtanzahl der Industrie- und Handelszellen in Lauf II b). Hierbei wurde jedoch das Siedlungswachstum stark überschätzt. Weitere Simulationen, mit einer reduzierten Gewichtung auf Siedlungswachstum, vermochten keine bessere Annäherung an das reale Landnutzungsverhältnis zu generieren.

Eine Feinkalibrierung der Potentialparameter über die linearen Funktionen der kritischen Nachbarschaftskonstellationen ist nur eingeschränkt möglich und konnte die Wachstumsrelationen der Nutzungen "Wohnen" und "Industrie- & Handel" nicht übereinstimmend wiedergeben.

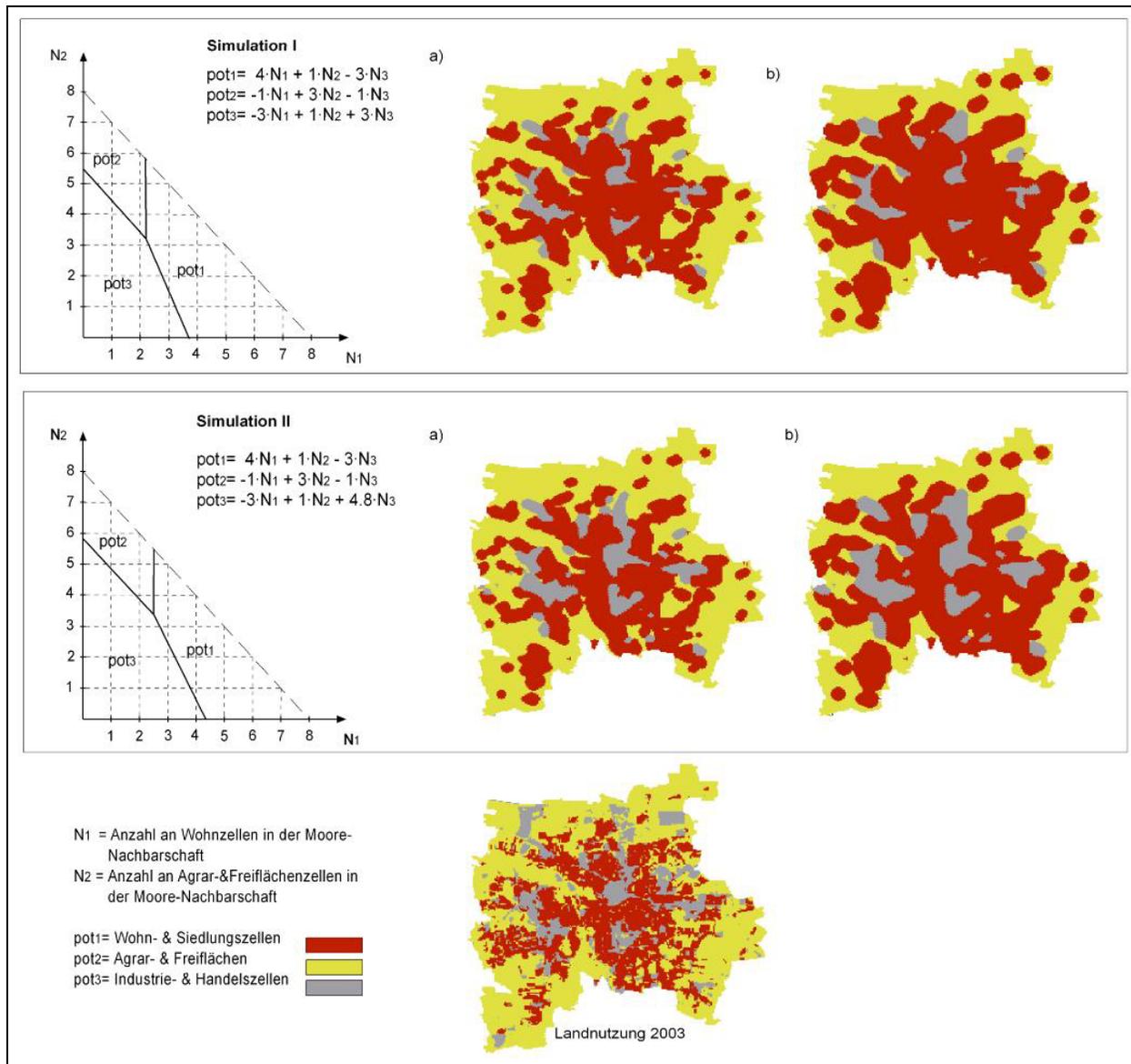


Abbildung 5.4: Simulationen der urbanen Landnutzungsentwicklung Leipzigs nach dem Potentialsatz (siehe Graphen); Ausgangssituation: Leipzig 1940; a) 6 Iterationen, Zeitschnitt 10 Jahre b) 10 Iterationen, Zeitschnitt 6 Jahre

Die hier erfolgte quantitative Analyse der Ergebnisse liefert keine Aussage über die Qualität der räumlichen Annäherung (vgl. Wu 2002). Für die Beurteilung der räumlichen und strukturellen Übereinstimmung finden sich in der Literatur verschiedene Methoden. In den Studien von White und Engelen (1993, 1997) wird die fraktale Dimension zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen, wobei hier nur ein sehr abstraktes Maß der Übereinstimmung gemessen wird. Als weitere Beispiele können Fuzzy Ansätze (Hagen, 2002) sowie das modifizierte ROC Verfahren (Receiver Operating Curve, Pontius & Schneider, 2001), angeführt werden. Auf den höheren Aggregationsebenen nutzen Kock et al. (2001) Verfahren der statistischen Regressionsanalyse, indem sie simulierte Werte für eine Region mit den jeweiligen Messdaten korrelieren.

Unter den pixelweisen Vergleichsalgorithmen zweier Karten mit diskreten Klassifizierungen ist die sogenannte Kappa-Statistik die arrivierteste Methode (Monserud und Leemans, 1992).

Wir betrachten zwei Karten mit jeweils M Pixeln, die die räumliche Verteilung von c unterschiedlichen Kategorien (z.B. Landnutzungen) darstellen. P_{ij} sei die Anzahl der Pixel, die in der einen Karte mit der Kategorie i und in der anderen mit der Kategorie j belegt sind. p_{ij} soll diese Anzahl als relative Größe, bezogen auf die Gesamtzahl M der Pixel der Karte, ausdrücken. Dann kann man zunächst den "Gesamtanteil der beobachteten Übereinstimmung", P_0 , berechnen:

$$P_0 = \sum_{i=1}^c P_{ii}$$

Nun könnte allerdings ein Teil dieser Übereinstimmung zufällig sein. Dies kann mit folgendem Ausdruck zum "Gesamtanteil der zufallsbedingten Übereinstimmung", p_e , abgeschätzt werden:

$$p_e = \sum_{i=1}^c \left(\sum_{j=1}^c P_{ij} \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^c P_{ji} \right)$$

Der normierte und um p_e bereinigte p_0 -Wert ergibt schließlich den Übereinstimmungsgrad zwischen 0 (keine Übereinstimmung) und 1 (vollständige Übereinstimmung) nach der Kappa-Statistik:

$$\kappa = \frac{P_0 - p_e}{1 - p_e}$$

Monserud und Leemans (1992) teilen die Skala der κ -Werte von 0 - 1 in folgende Bereiche der Übereinstimmung ein:

no	0.00-0.05
very poor	0.05-0.20
poor	0.20-0.40
fair	0.40-0.55
good	0.55-0.70
very good	0.70-0.85
excellent	0.85-0.99
perfect	0.99-1.00

In Appendix 10 ist das kurze PV-Wave Programm dokumentiert, mit dem die Auswertungen durchgeführt wurden.

Der aus Tabelle 5.3 resultierende κ -Wert für die Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Nutzungskartierung im Jahr 2003 liegt bei 0.39, was nach der Einteilung von Monserud und

Leemans (1992) dem Übereinstimmungsgrad "poor" (in etwa: "dürftig") entspricht. Diese Bewertung entspricht dem visuellen Eindruck, den man beim Vergleich der Karten gewinnt.

Tabelle 5.3: Relative Anteile p_{ij} der Übereinstimmung von Nutzung i und j zwischen Simulation und Nutzungskartierung im Jahr 2003 für den Potential-Regelsatz der Simulation IIb.

p_{ij}	Nutzungskartierung:		
	Wohnen	Agrar- & Freifläche	Industrie & Handel
Simulation: Wohnen	0.27	0.22	0.04
Agrar- & Freifläche	0.01	0.27	0.03
Industrie & Handel	0.04	0.04	0.07

Man stellt jedoch fest, dass die Reproduktion der groben räumlichen Verteilung der Nutzungen in etwa reproduziert werden kann, ohne dass die üblicherweise verwendeten exogenen Bedingungen hinzugezogen werden müssen. Hier wurden also erstmals die Grenzen und Möglichkeiten einer rein endogenen Modellierung auf der Basis des Potentialansatzes systematisch untersucht. Eine genaue qualitative Analyse wird für die Simulation des nächsten Kapitels durchgeführt. Hier soll nur beispielhaft erwähnt werden, dass (besonders in den "a"-Simulationen) der Auen- und Forstbereich im Nord-Westen des Stadtzentrums auch ohne externes Besiedlungsverbot erhalten bleibt.

Die relativen Erfolge endogener Modellierung motivieren den im nächsten Abschnitt durchgeführten Schritt, die Einschränkungen durch den linearen Potentialansatz fallen zu lassen und die Möglichkeiten, die in einem frei definierten Regelsatz stecken, auszuloten.

5.4 Anwendung eines frei definierten Regelsatzes

In den folgenden Modellsimulationen werden die Transformationsregeln nicht über Potentiale bestimmt, sondern über ein so genannten 'Look up-table' (LUT) definiert (vgl. Gerhardt und Schuster, 1995). Für jede mögliche Nachbarschaftskonstellation ist genau eine Nutzung definiert, die während einer Iteration synchron für alle Zellen der Landnutzungsmatrix abgefragt wird. Dies entspricht im Ansatz dem klassischen, totalistischen Regelsystem eines CA, in dem der zukünftige Zustand einer Zelle nur von der Anzahl der Zellzustände in ihrer Nachbarschaft abhängig ist, nicht von derer Lokalität innerhalb des Nachbarschaftsraums. Diese Form der Regeldefinition ist nur bei einer begrenzten Anzahl von möglichen Nachbarschaftskonstellationen praktikabel, da die Übersichtlichkeit und Kalibrierung bei größeren Nachbarschaftsräumen und mehreren Nutzungsklassen sehr stark vermindert wird. In der hier verwendeten einfachen Moore-Nachbarschaft mit drei Nutzungsklassen werden für die 45 mögliche Nachbarschaftskonstellationen spezifische Übergangsregeln definiert.

Die freie Wahl der Regelsetzung ermöglicht gegenüber dem Potentialansatz, explizit sinnvolle Intervalle von Nachbarschaftsanzahlen für die Nutzungen zu setzen, um gezielte Präferenzen einer Nutzung abzubilden (vgl. Kapitel 4.3). Die Regelzuweisungen, basierend auf den Nachbarschaftskonstellationen, können dadurch weitaus differenzierter implementiert werden. Grundsätzlich nachteilig ist, dass kein Ranking und somit auch keine sinnvolle Limitierung der Transformationen bestimmter Nutzungen während einer Iteration möglich ist. Dies ist jedoch angesichts der Zielsetzung dieser Arbeit, die Möglichkeiten endogener Regelsätze zu untersuchen, nicht als Nachteil zu bewerten, zumal sich die Möglichkeit der Limitierung durch die Approximation des frei definierten Regelsatzes durch nicht-linearer Potentialansätze wieder einführen ließe.

5.4.1 Exploration der Regelsätze

In Abbildung 5.5 sind die definierten Regeln in ähnlicher Form wie bei dem Potentialansatz in einem Koordinatensystem in Abhängigkeit der Nachbaranzahl der Nutzung ‚Wohnen‘ (N_1) und Agrar- und Freifläche (N_2) aufgetragen. Für alle möglichen totalistischen Konstellationen in der Nachbarschaft sind zukünftige Nutzungen (K_1, K_2, K_3) definiert. Die Regelzuweisungen basieren auf den hypothetisierten Nachbarschaftseffekten der Nutzungen, wobei die Abgrenzung bzw. Differenzierung innerhalb des Nachbarschaftsraumes in diesem Fall nicht über eine mathematische Funktion - wie im Fall des Potentialansatzes - berechnet, sondern Punkt für Punkt definiert wird.

Das Simulationsergebnis in Abbildung 5.5 zeigt schon bei einer geringen Abweichung vom linearen Verlauf der kritischen Konstellationen eine differenziertere Entwicklung der industriellen Nutzung. In diesem Beispiel wurde die Etablierung einer industriellen und gewerblichen Nutzung in einer städtischen Wohnumgebung ($N_1=5$), mit bereits bestehenden Gewerbe/Industrieansiedelungen ($N_3=3$) ohne Agrar- und Freiflächen ($N_2=0$) vorgesehen. Das Simulationsergebnis zeigt eine Zunahme der Gewerbefläche im innerstädtischen Bereich. Kleine, schon bestehende Gewerbekerne ($N_3=2$) im Stadtrandgebiet ($2 \geq N_1 \leq 5; 1 \geq N_2 \leq 4$) werden ebenso entwickelt. Die Konsequenz dieser Regel zeigt sich in der Simulation in der Ausbreitungen der Gewebefläche im süd- und nordöstlichen Teil Leipzigs. Die Randstrukturen der Gewerbe- und Industrieflächen sind sichtlich differenzierter im städtischen Bereich als es die Simulationen des Potentialansatzes ermöglichte.

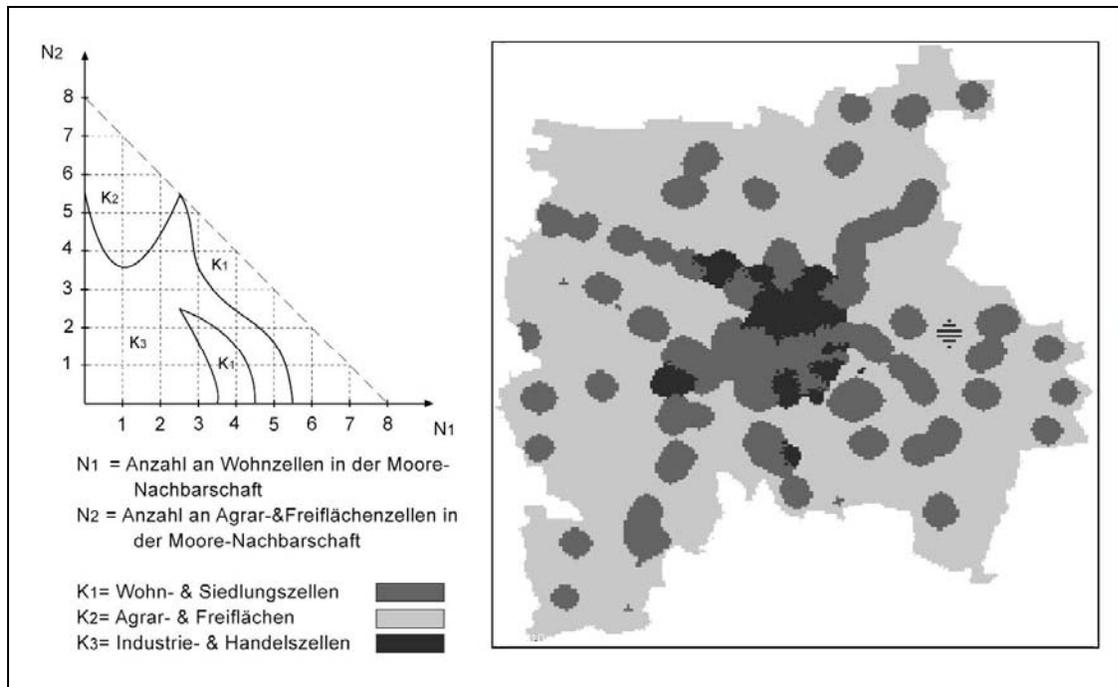


Abbildung 5.5: Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; differenzierte industrielle Entwicklung im inner- & randstädtischen Bereich, Regelsatz siehe Graphen.

Die leicht disperse Charakteristik der realen Siedlungsstruktur ist in den Simulationsergebnissen des Potentialansatzes am schlechtesten in den Umlandgemeinden abgebildet.

Eine Veränderung der Regel im Siedlungsbereich ($N_1=5$; $N_2=3$) ohne Gewerbeagglomerationen, setzt direkt bei den Umlandgemeinden an (Abbildung 5.6). Zellen mit diesen Nachbarschaftskonstellationen wurde der Übergang in eine Agrarnutzung zugewiesen. Wie das Simulationsergebnis zeigt, sind die relativ homogenen „Siedlungsschläuche“ aus den Simulationen des Potentialansatzes deutlich von Agrar- und Freiflächen zerteilt. Eine kleine Regeländerung an einer sichtbar wirkungsvollen Stelle.

Die Simulation aus Abbildung 5.6 generiert jedoch ein zu geringes Siedlungswachstum im Umland. Eine Ausdehnung der Siedlungsfläche im suburbanen Raum ist besonders dann begünstigt, wenn Nachbarschaftskonstellationen definiert werden, die einem Wohnstandort mit viel umliegender Agrar- und Freifläche ($N_2=6$) und nur wenigen benachbarten Wohneinheiten ($N_1=2$) eine hohe Attraktivität beimessen. Die Simulation zeigt unter dieser Transformationsregel eine deutlich veränderte Dynamik im Umland (Abbildung 5.6). Wie im Falle von zwei Nutzungsklassen schon dargestellt wurde, ist das Wachstum und die räumliche Ausdehnung einer Nutzung in einer einfachen Moore-Nachbarschaft mit acht Zellen besonders intensiv, wenn es von nur zwei oder weniger Nachbarn der eigenen Klasse abhängig ist. In dieser Regeldefinition wird neben der Nutzungsklasse Wohnen auch der Industrie und dem Gewerbe eine Etablierung bei nur zwei weiteren Gewerbe- und Industriezellen zugesprochen, jedoch unter der Bedingung weiterer angrenzender Siedlungszellen. Dies führt dazu, dass die Ausbreitung der Industrie im urbanen und randstädtischen Bereich stattfindet, die jedoch von

der rapiden Siedlungsentwicklung schnell eingedämmt wird. Auffällig ist auch in diesem Regelsatz die rautenartige Form der Siedlungsagglomerate, die in manchen Fällen klare geometrische Muster generieren.

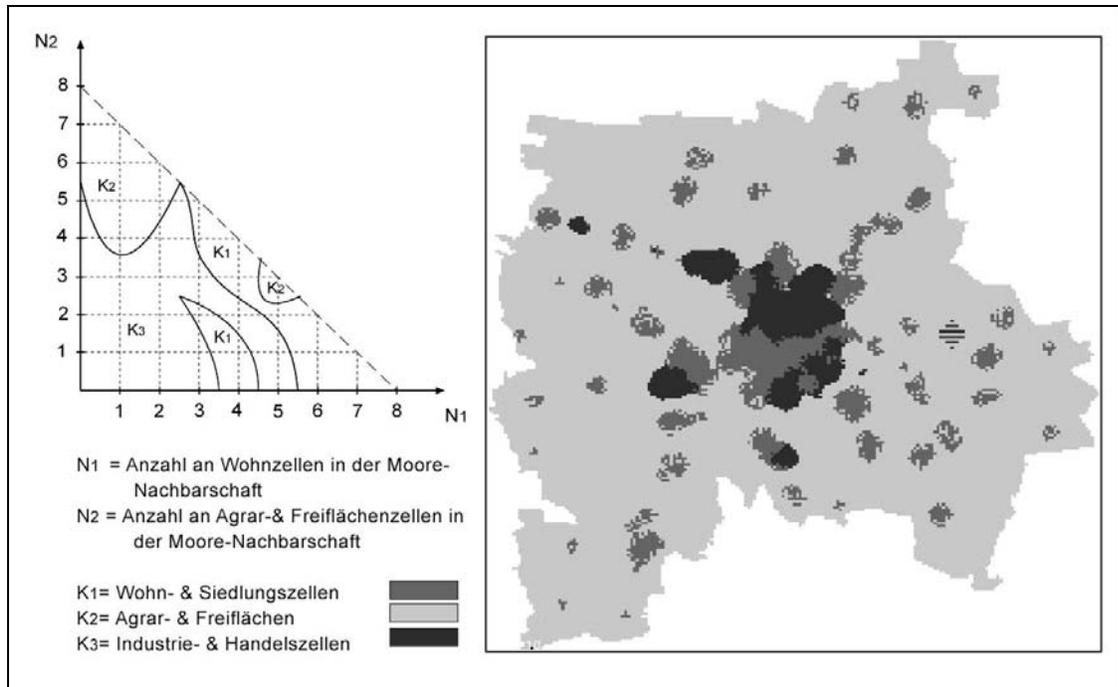


Abbildung 5.6: Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT) , Ausgangssituation Leipzig 1870; disperse Siedlungsentwicklung am Stadtrand und im Umland, Regelsatz siehe Graphen.

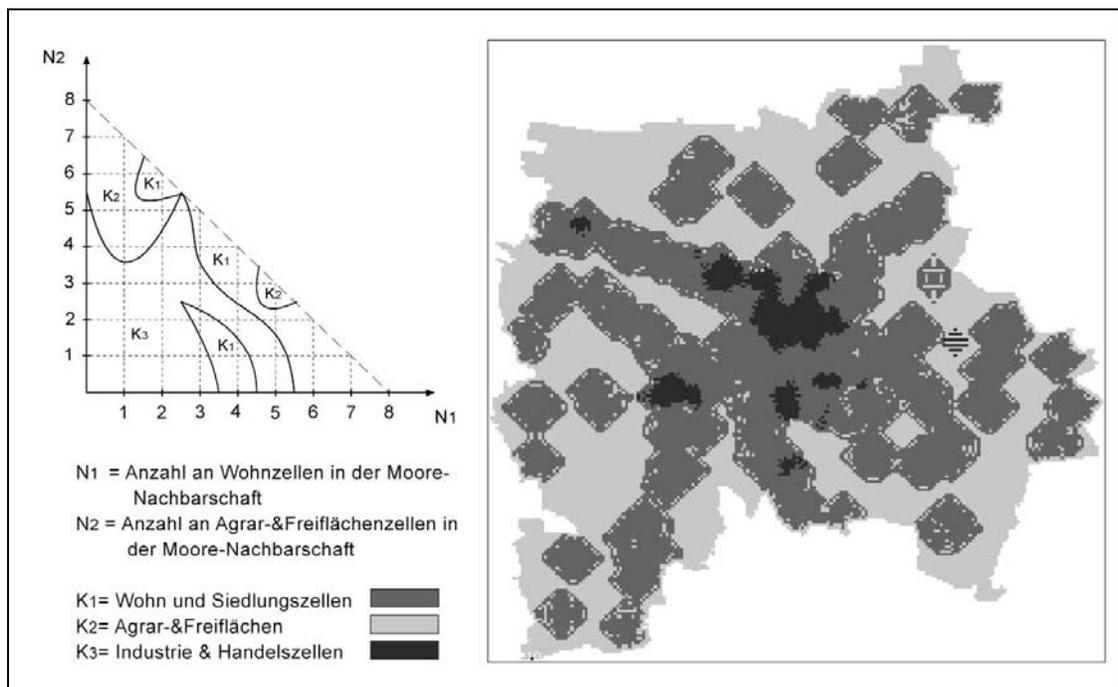


Abbildung 5.7: Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT) , Ausgangssituation Leipzig 1870; starke Siedlungsentwicklung im Umland, Regelsatz siehe Graphen.

Diese Simulationen repräsentieren nicht die reale Form der Siedlungen im Umland, so ist etwa der Grad an Dispersität nicht der erwünschte. Folgende Regel führt den Ansatz aus Abbildung 5.7 fort und definiert eine Nachbarschaftskonstellation, die eine Attraktivität für Wohnen bei nur einer weiteren Wohneinheit und sieben Agrar- und Freiflächenzellen (in der vorherigen Simulation waren dies sechs Agrarzellen) in der Umgebung formuliert. Das Simulationsergebnis zeigt eine noch stärkere und dispersere Siedlungsausbreitung im Umland mit relativ kompakten Kernen und leichten Siedlungslücken im Randbereich (Abbildung 5.8).

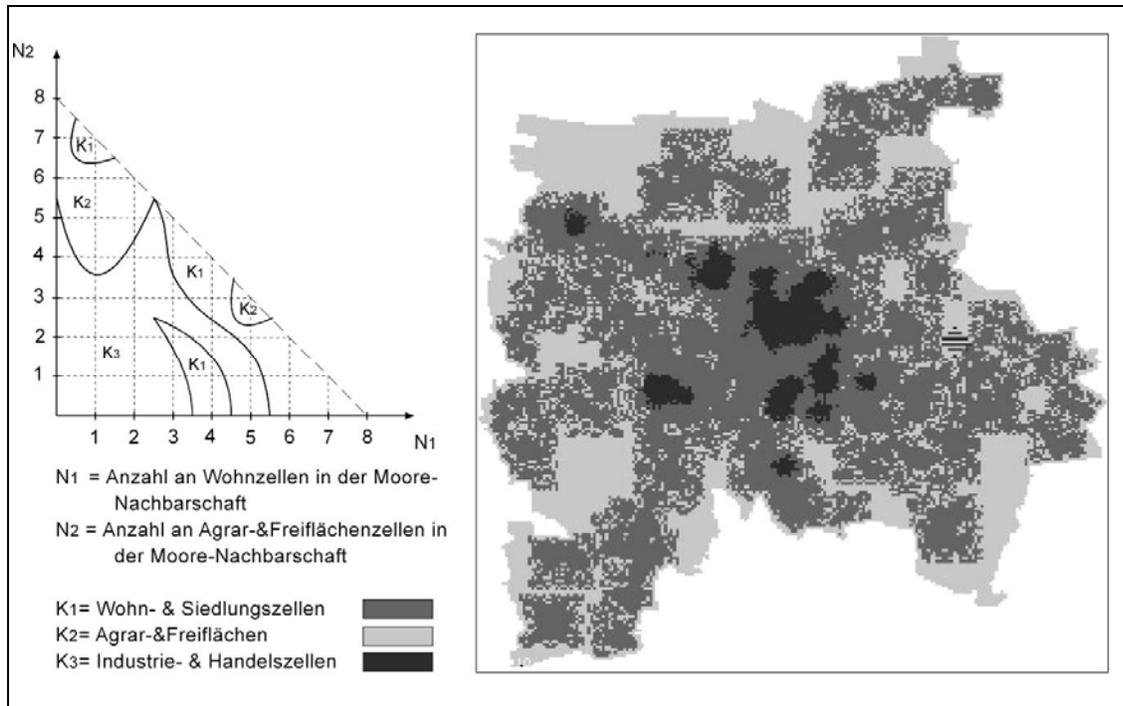


Abbildung 5.8: Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT), Ausgangssituation Leipzig 1870; starke disperse Siedlungsentwicklung im Umland, Regelsatz siehe Graphen.

Um die Möglichkeiten einer gezielten Regelsetzung weiter zu veranschaulichen, ist in Abbildung 5.9 eine Forcierung der Gewerbe- und Industrieansiedlung am Siedlungsrand dargestellt. In einer Nachbarschaftskonstellation von $N_1=3$ und $N_2=5$, einer Umgebung in der sich sonst keine weiteren Gewerbe- & Industriezellen befinden, wird eine solche vorgeschrieben. Die Simulation zeigt die Entstehung ringartiger Gewerbe- und Industrieansiedlungen an nahezu allen Siedlungsändern.

Für die Modellsimulationen ließ sich ausgehend von 1870 kein Regelsatz finden, der die historische Entwicklung bis zum nächsten vorliegenden Zeitschnitt aus dem Jahre 1940 adäquat simulieren konnte. Als Validierungskriterium diente der visuelle Abgleich der Ergebniskarte mit der Nutzungskartierung von 1940. Die Phase von 1870-1940 ist durch maßgebliche Veränderungen in der strukturellen und wirtschaftlichen Entwicklung Leipzigs geprägt. Nach einer intensiven Phase der Industrialisierung und hohem Bevölkerungszuwachs, bildete sich eine kompakte Stadtstruktur, die bereits einige Siedlungs- und Industriegebiete in der Peripherie

aufweist. Es entstanden isolierte Strukturen, die sich nicht über Nachbarschaftsbeziehungen simulieren lassen. Da für die Zeitspanne von 70 Jahren keine weiteren Zeitschnitte vorliegen, wurde der Datensatz von 1940 als Ausgangssituation festgelegt.

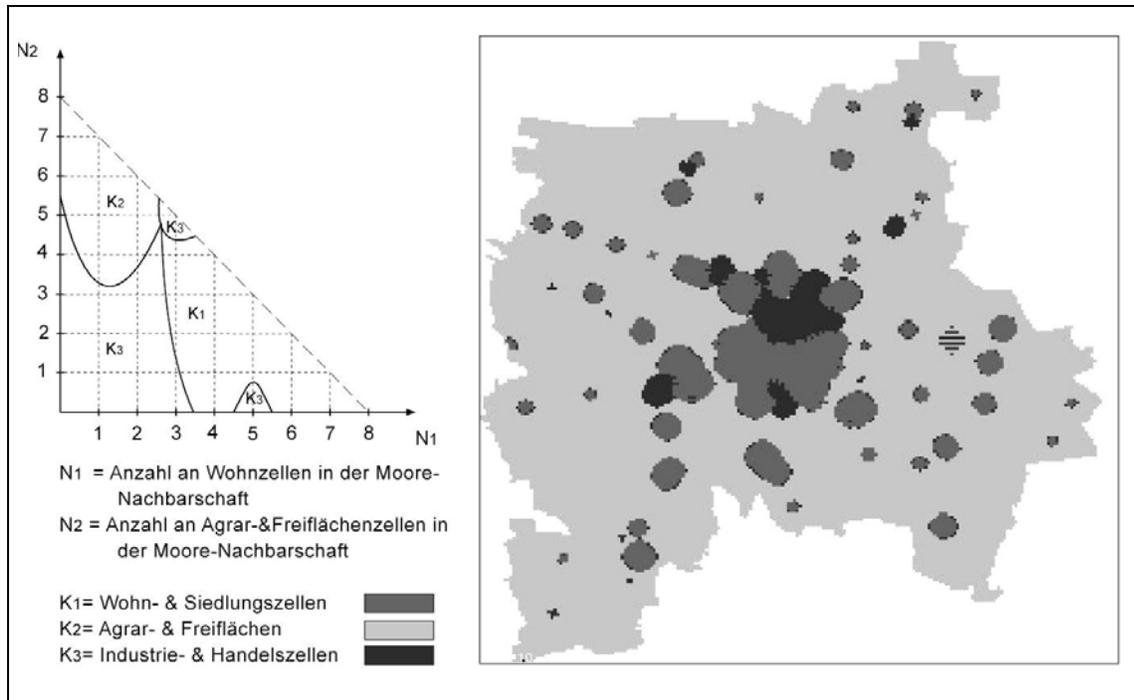


Abbildung 5.9: Simulation nach deterministischen Transformationsregeln (LUT) , Ausgangssituation Leipzig, 1870; Gewerbe- und Handelsansiedlung an Siedlungsrändern Regelsatz siehe Graphen.

Die Modellsimulationen ausgehend von den Landnutzungsdaten aus dem Jahre 1940 lieferten Ergebnisse mit einer höheren Übereinstimmung. In Abbildung 5.10 ist die simulierte Entwicklung dem realen Datensatz gegenübergestellt. Die Regel lässt sich wie folgt interpretieren:

- Eine dichte, urbane Wohnstruktur mit einer geringen Anzahl an Industrie- und Gewerbezellen in der Umgebung, behält als städtische Wohnform ihre Attraktivität.
- Eine relativ dichte, stadtrandnahe Wohnumgebung, mit etwas mehr Freifläche und einer geringen Anzahl an Industrie- und Handelszellen wird als eine bevorzugte Wohnlage angesehen.
- Angrenzende Industrie in der Umgebung von Wohnzellen ist nur in einem urbanen, innerstädtischen Kontext attraktiv.
- Die Neigung in einer Umgebung mit viel Agrar- und Freifläche zu wohnen (suburbaner Kontext), ist differenzierter abgebildet. Der Suburbanisierungsprozess dominiert im Stadtumland. Die Übergangsbereiche werden nicht forciert.
- In den Randbereichen und Umlandgemeinden der Stadt findet eine offenere Bebauung statt.
- Industrie- & Handel kann sich im innerstädtischen Bereich ($N_1 = 5$) etablieren.

- Eine Neuansiedlung von Industrie- und Handel vollzieht sich bevorzugt an den Stadträndern. Die Einschränkung in diesem Regelsatz sieht als Bedingung weitere Industrie- und Handelsnutzungen ($N_3 \geq 4$) an diesem Ort vor.
- Agrar- und Freiflächen in der Peripherie der Stadt sind nicht resistent gegenüber der Wohnsuburbanisierung und der Ausbreitung von Industrie & Handel.

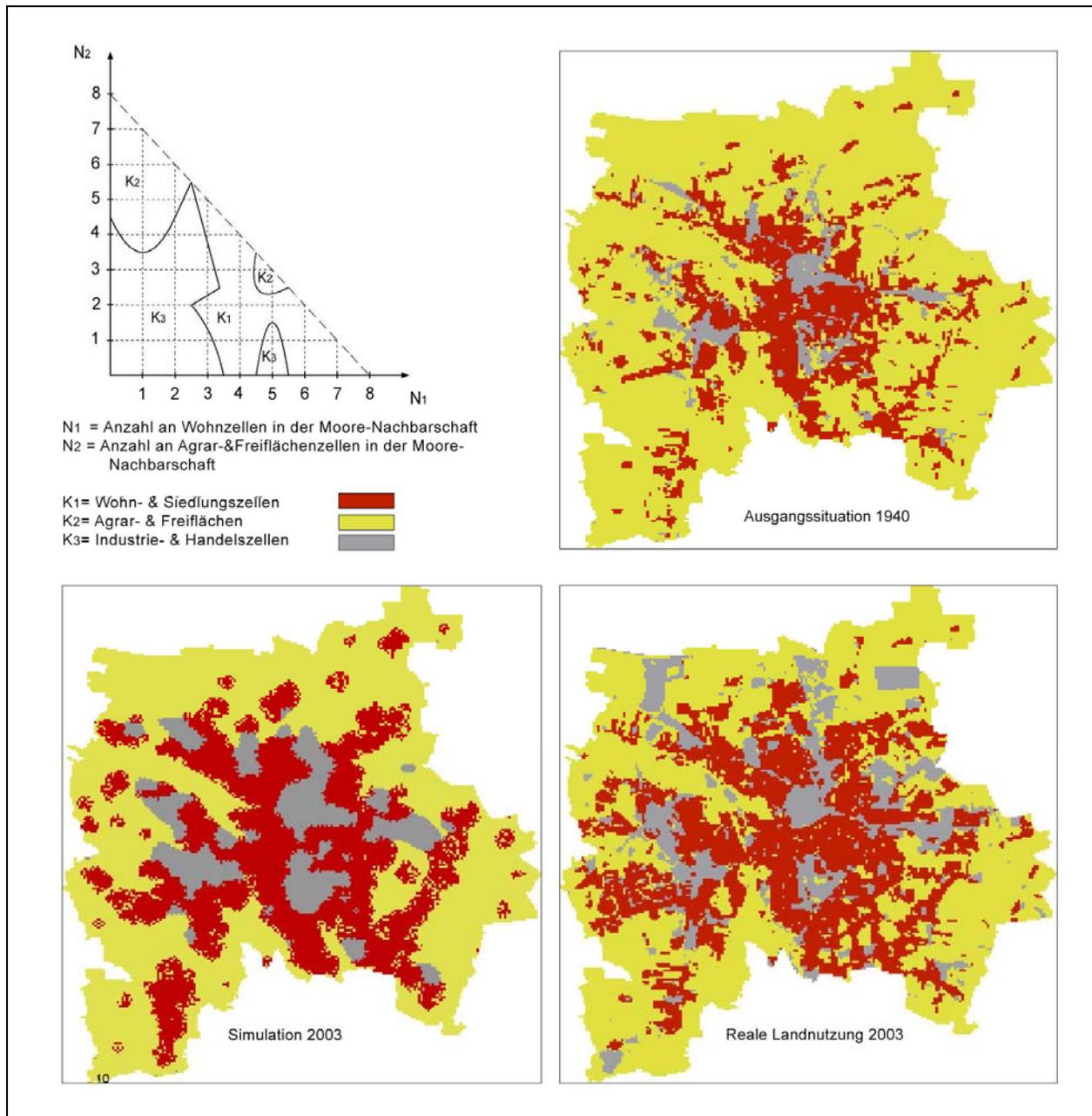


Abbildung 5.10: Simulation der Landnutzung 2003 nach deterministischen Transformationsregeln, Ausgangssituation Leipzig 1940, Regelsatz siehe Graphen.

Die Ergebnisse weisen beim visuellen Abgleich der Daten in den räumlichen Ausmaßen und der Lage deutliche Ähnlichkeiten auf. Die differenzierte Regeldefinition gegenüber dem Potentialansatz ließ eine erkennbare bessere Feinabstimmung in der Regelsetzung zu.

5.4.2 Qualitative Validierung der Simulationsergebnisse

Zur Beurteilung der Güte einer Simulation wird eine Validierung des Modellergebnisses durchgeführt. Hierfür werden von White et al. (1997) drei prinzipielle Möglichkeiten aufgeführt. Der visuelle Vergleich der Simulationsergebnisse mit den vorhandenen realen Landnutzungsdaten stellt eine grundlegende und zugleich die wichtigste Prüfung dar. Es wird der räumliche Eindruck der Simulationsergebnisse mit den vorliegenden realen Landnutzungsdaten abgeglichen und der Grad an Übereinstimmung bestimmt.

Die Gegenüberstellung historischer und simulierter Landnutzungskarten ist ein erstes und wichtiges Maß der Validierung. In Abbildung 5.11 ist die Simulation mit den aktuellen Stadtgebietsgrenzen zur räumlichen Beurteilung der Ergebnisse dargestellt. In manchen Fällen wurden die Bezirke der Übersicht wegen zusammengefasst.

Ein auffälliges Defizit der Simulation ist in der Wiedergabe der Industrie- und Handelsflächen im Umland Leipzigs zu erkennen. Die großen Industriegebiete ‚Leipzig Nord-Ost‘ in Plaußig-Portitz (49), der Gewerbepark in Lützschena-Stahmeln (53) und das Gebiet im Süden, Hartmannsdorf-Knautnaundorf (28) sind von dem Modell nicht generiert worden. Ein Defizit, das in der Natur des CA liegt. Das Regelsystem eines klassischen CA agiert auf lokaler, nachbarschaftsräumlicher Ebene und vermag daher, ohne eine exogene Vorgabe, keine Zellen ohne Nachbarschaftsbezug zu generieren.

Die kleinen Umlandgemeinden in Seehausen im Norden (50) und in Wiederitzsch (51) sind etwas überschätzt worden. Die nordwestliche Ausbreitung der Stadt im Bereich von Möckern (43), Lindenthal (44) und Gohlis (45) konnte im Modell relativ adäquat wiedergegeben werden. Eine gute Übereinstimmung ist in der Wiedergabe der Auen- und Forstbereiche im Nordwesten der Stadt zu finden, deren äußeren Grenzen die Struktur annähernd getreu abbilden. In Leutzsch (41), Möckern (43) und dem Zentrum-Nordwest (3) ist die Form der Auen und Forstflächen ebenfalls recht gut wiedergegeben. Die Siedlungsausbreitung vollzog sich ohne exogener Vorgabe nicht in die Freifläche hin. Die dort angesiedelten Industrie- und Handelszellen konnten sich nicht etablieren und gingen während den Modelliterationen in Agrar- und Freifläche über. Wenngleich ein ungewöhnlicher Transformationsprozess, schreibt die Regeldefinition für ein Wachstum auf der freien Fläche einen größeren Verbund an Zellen derselben Nutzung vor.

Unterschätzt wurde die Siedlungsausbreitung im Westen der Stadt, in Burghausen (40) und den Stadtgebieten Grünau (31,32). Grünau zählte zur zweitgrößten Wohnsiedlung der DDR, die

1975/76 im Rahmen des Generalbebauungsplanes errichtet wurde. Das Ziel war die Errichtung einer funktionalen Ost-West-Achse, die eine Stadt-Umland-Beziehung zwischen den Wohn- und Arbeitsbereichen und den Erholungsgebieten herstellen sollte (Schmidt et al., 2005). Es entstanden dort, gezielt in der Peripherie Leipzigs, Fertigwohnbauten für 100. 000 Bewohner. Ein Planwerk, das sich, wie im Falle der Industrie- und Gewerbegebiete, nicht über eine Nachbarschaftsbeziehung generieren lässt.

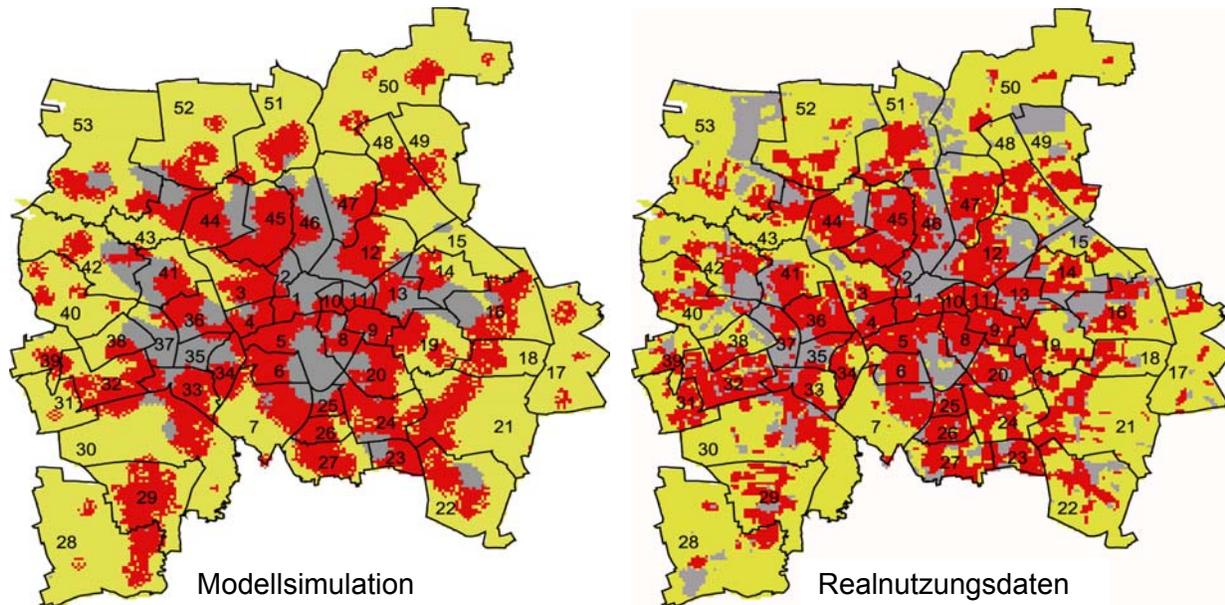


Abbildung 5.11: Darstellung Modellergebnisse auf Grundlagen der Stadtbezirksgrenzen

Mockau (47) und Schnönefeld (12), am nordöstlichen Stadtrand, sind zwei weitere Großwohnsiedlungen, die in dieser Phase errichtet wurden. Es entstanden dort fünf- bzw. elfgeschossige Bauten, die mehrere tausend Wohneinheiten umfassten und mit Kindergärten, Schulen, Kaufhallen und Dienstleistungszentren kleine eigenständige Subzentren bildeten (Boschütz, 2006). Auch diese Flächen wurden in der Simulation unterschätzt.

Eine qualitativ gute Wiedergabe fand im Bereich von Großzschocher (30) statt. Erwähnenswert ist weiterhin die Simulation des äußeren Siedlungsgürtels im östlichen Bereich der Peripherie in (18) Baalsdorf und Holzhausen (21).

Kleinzellige Siedlungs- und Industriezellen im Umland Leipzigs lagen unter der kritischen Agglomerationsgröße und schrumpften aus diesem Grund während den Modelliterationen zusammen.

Die Industrie- und Handelsgebiete im Zentrum der Stadt (1,2) und im Bezirk Eutritzsch (48) entwickelten sich in recht ähnlicher Struktur entlang der alten Industriestandorte in nördlicher Richtung. Die Industrie im südöstlichen Zentrum (5) ist etwas überschätzt worden.

In Abbildung 5.12 sind die Simulationsergebnisse auf zwei Klassen, urban und non-urban, aggregiert. Die rechte Karte stellt die räumlichen Übereinstimmungen der aggregierten

Nutzungen dar. Unterschätzte urbane Entwicklungen sind in grau abgebildet, die gelben Flächen verdeutlichen die Überschätzungen des Modells. Diese Darstellung zeigt deutlicher, dass ein großer Teil der unterschätzten Flächen Industrie-, Gewerbegebiete und Großwohnsiedlungen sind, die auf einen sehr starken bis absoluten Planungseinfluss zurückzuführen sind.

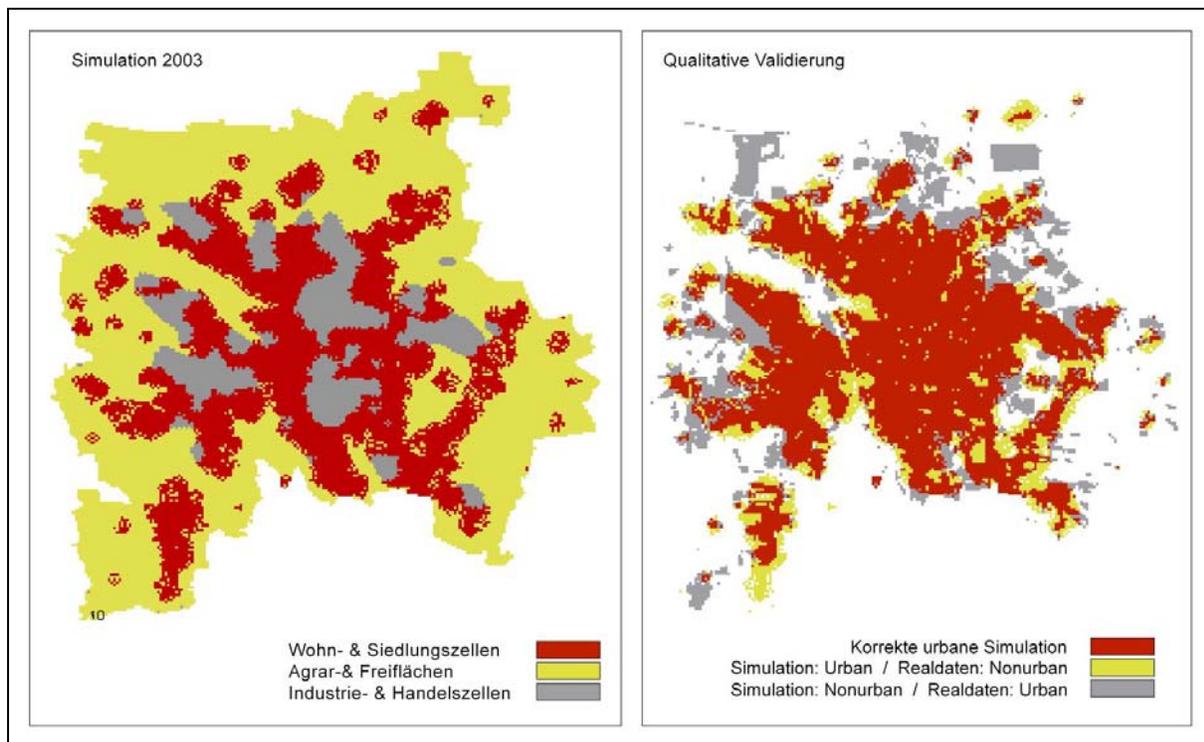


Abbildung 5.12: Qualitative Validierung der LUT-Simulation reduziert auf 2 Nutzungen (Urban / non-urban)

5.4.3 Quantitative Validierung der Simulationsergebnisse

Als weitere Validierungsmethode ist eine quantitative Analyse möglich, die über einen direkten Zellenvergleich die Anzahl der korrekt simulierten Daten überprüft. Dieser rein statistische Vergleich ist jedoch kritisch zu betrachten, da er keine Aussage über die Verteilung der Zellen im Raum und ihrer Formkomplexität liefert (vgl. Wu 2002).

In den Diagrammen aus Abbildung 5.13 ist die Gesamtanzahl aller Zellen der verschiedenen Nutzungen aus der Simulation den tatsächlichen Werten gegenübergestellt. Die absoluten Werte sind im Vergleich zu den Werten des Potentialansatzes (vgl. Tabelle 5.2) deutlich besser wiedergegeben. In der Simulation zeigen die Werte entgegen den realen Entwicklungen allerdings einen gleichmäßigeren Verlauf. Dies ist möglicherweise ein Hinweis auf exogene Einflußgrößen.

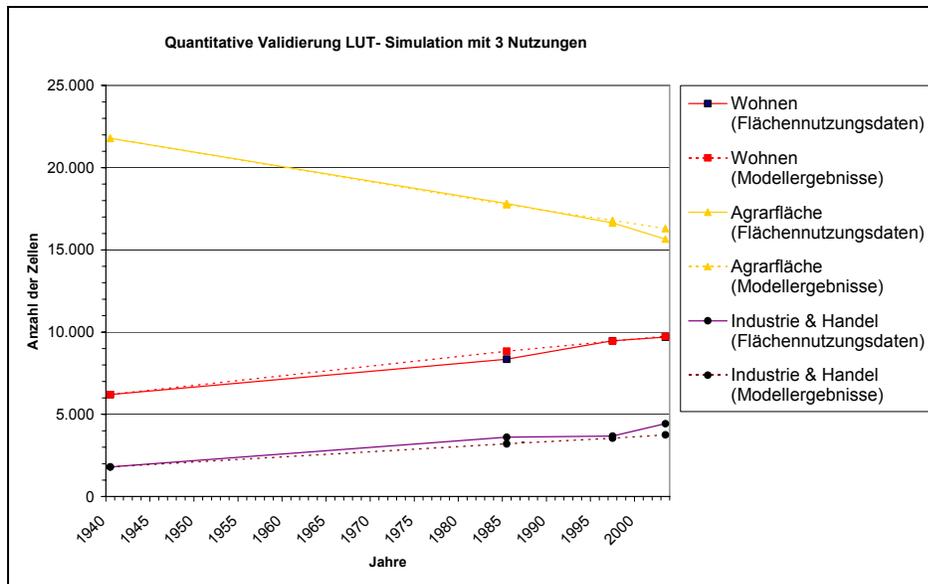


Abbildung 5.13: Quantitative Analyse LUT-Simulation; Gesamtanzahl der simulierten Zellen einer Nutzung im Vergleich zur den Realdaten.

In Tabelle 5.4 sind die Simulationsergebnisse weiter aufgeschlüsselt. Die räumliche Übereinstimmung der simulierten Nutzungszellen ist im Fall der Nutzung „Wohnen“ am höchsten mit ca. 65%. Die geringe Übereinstimmung der Industrie- und Handelszellen (42%) kann durch die erfolgte visuelle Validierung etwas relativiert werden. Eine quantitative Analyse des Flächenausmaßes der Industrieparks und Großwohnbauten könnte genaueren Aufschluss über die Simulationsergebnisse der Nutzung „Industrie- & Handel“ geben.

Tabelle 5.4: Quantitative Analyse LUT-Simulation: Differenzierte Darstellung der simulierten Zellen einer Nutzung im Vergleich zur den Realdaten.

	Simulationsergebnis	Realdaten 2003	Übereinstimmung
Simulation → Realdaten			
Wohnen → Wohnen	6 316		65,11%
Wohnen → Agrarfl.	2 740		
Wohnen → Industrie&Handel	691		
Summe Wohnen	9 744	9 700	
Agrarfl. → Wohnen	1 919		79,83%
Agrarfl. → Agrarfl.	12 497		
Agrarfl. → Industrie&Handel	1 866		
Summe Agrarfl.	16 282	15 655	
Industrie → Wohnen	1 467		42,33%
Industrie → Agrarfl.	407		
Industrie → Industrie&Handel	1 878		
Summe Industrie&Handel	3 752	4 436	
Urbane Zellen	13 496	14 136	57,96%
nonurbane Zellen	16 282	15 655	79,83%

Werden die Nutzungen Wohnen und Industrie- und Handel aggregiert, so liegt der Anteil der korrekt simulierten urbanen Zellen bei ca. 58%.

Tabelle 5.5: Relative Anteile p_{ij} der Übereinstimmung von Nutzung i und j zwischen Simulation und Nutzungskartierung im Jahr 2003 für den besten frei definierten Regelsatz

p_{ij}	Nutzungskartierung:		
	Wohnen	Agrar- & Freifläche	Industrie & Handel
Simulation: Wohnen	0.21	0.09	0.02
Agrar- & Freifläche	0.06	0.42	0.06
Industrie & Handel	0.05	0.01	0.06

Der resultierende κ -Wert (Tab. 5.5) für die Übereinstimmung zwischen Simulation und der Nutzungskartierung im Jahr 2003 liegt bei 0.48, was nach der Einteilung von Monserud und Leemans (1992) dem Übereinstimmungsgrad "fair" (in etwa: "angemessen") entspricht. Aggregiert man die Nutzungen auf die zwei Nutzungstypen "urban" und "non-urban", was der Auflösung von z.B. SLEUTH entspricht, erhöht sich der κ -Wert auf 0.53, verfehlt also nur knapp die Kategorie "Gut". Die Differenzierung zwischen den Nutzungen "Industrie & Handel" und "Wohnen" ist also etwas schlechter als die anderen Differenzierungen.

“Everything happens in our world resembles a vast game in which nothing is determined in advance but the rules, and only the rules are open to objective understanding.”

(Eigen & Winkler, 1981)

6. Diskussion und Ausblick

Aus modellkonzeptioneller Sicht ist es eine wichtige Aufgabe, die Wirkung der eingesetzten Variablen und Parameter genau zu verstehen, um die Aussagefähigkeit und Richtigkeit der Resultate verifizieren zu können. Nur das Verständnis der Eingangsvariablen und Regeln erlaubt dem Benutzer eine realistische Justierung der Werte. Dies ist ein wesentlicher Schritt um die Modellprozesse zu erfassen und der Kritik gegenüber einer Modellbenutzung im Sinne einer intransparenten ‚Black-Box‘ entgegenzuwirken.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Analyse des Potentialansatzes als einer Form des Regelsystems im zellulären Automaten, verfolgte diese Fragestellung. Am Beispiel von drei Nutzungsklassen, konnte die Wirkung der Parametersetzung und der daraus folgenden Transformationsdynamik der Nutzungsklassen vollständig untersucht werden. Die systematische Betrachtung der Modelldynamiken konnte die Möglichkeiten und Grenzen dieses Ansatzes aufzeigen.

Die Anwendung des linearen Potentialansatz am Beispiel der Stadtregion Leipzig ermöglichte nur eine eingeschränkte Reproduktion der realen Landnutzungsentwicklung und führte zu der Notwendigkeit, eine differenziertere Regelformulierung in der Modellierung urbaner Systeme zu erarbeiten. Das daraus resultierende frei formulierte Regelsystem lässt eine genauere Definitionen der Nachbarschaftsbeziehungen zu und zeigte in der Validierung der Simulation in qualitativer Hinsicht und nach der Methode der Kappa-Statistik eine bessere Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Realnutzungsdaten auf. Diese Form des frei formulierten Regelsatzes wäre auch über einen nichtlinearen Potentialansatz ausdrückbar.

Das hier verwendete Modellkonzept eines frei formulierten Regelsystems entspricht einer sehr direkten Umsetzung des klassischen CA. Das Modell – man könnte es in Anlehnung an Conway ‚*GAME OF Llpzig*‘ nennen – ist auf endogene Regeln reduziert. Aggregierte Verhaltensmuster in der Nutzungsdynamik wurden über Nachbarschaftsbeziehungen in das Regelsystem

implementiert und vermochten die urbanen Nutzungsänderungen adäquat simulieren. Dies ist ein erstaunliches Resultat, da - analog zu der Charakteristik eines CA - keine weiträumigen Wechselwirkungen und exogenen Vorgaben in das Modell integriert wurden, sondern nur die lokale Interaktionen - die Nachbarschaftsbeziehungen - die Entwicklungsdynamik Leipzigs generierten.

Dies spricht für die Methode des CA in der urbanen Modellierung und zeigt auf, dass über eine rein endogene Regelformulierung ein relativ großes Maß an realen Prozessen abgebildet werden kann. Das wiederum trägt zur Identifizierung der relevanten Systemkomponenten bei und erhöht die Aussagekraft möglicher zukünftiger Zustände, den Landnutzungsszenarien.

Der frei formulierte Regelsatz lässt keine exogene Regulierung der Wachstumsrate zu und kann damit den möglicherweise relevanten Wandel exogener Randbedingungen nicht repräsentieren. Die Regelsetzung kann jedoch in einen nicht-linearen Potentialansatz transformiert werden, wenn das Modell mit Wachstumsvorgaben gekoppelt werden soll. Während der Erstellung dieser Arbeit erfolgten einige Simulationen mit dem Potentialansatz, die eine exogene Nutzungsklassenbezogene Wachstumsrate vorsahen und diskutabile Ergebnisse lieferten, jedoch noch nicht abschließend untersucht und dokumentiert wurden. Es zeigte sich, dass dieser Parameter durchaus stark in die Dynamik eingreifen kann.

Die Simulationen der Potential- wie auch des frei formulierten Regelsatzes vermochten nicht, die Industrie- und Gewerbegebiete, sowie Siedlungsflächen zu generieren, die aus sehr stark exogenen Einflüssen hervorgingen. Auch hier gilt es weitere Möglichkeiten der Beschreibung dieser Prozesse zu untersuchen: Top-down-Kriterien sind gleichwohl ernst zu nehmen. Regierungen und Planungsinstanzen können ebenso wie die endogenen Regeln einen wichtigen Einfluss auf Landschaftsentwicklungen und Flächenverbrauch ausüben.

Die Analyse der Nachbarschaftsbeziehung wurde in dieser Arbeit nur für eine einfache Nachbarschaft durchgeführt. Grundsätzlich lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Nachbarschaftsgrößen und Nachbarschaftsräume mit mehreren Distanzzonen übertragen. Dadurch würden die Regeln weniger lokal agieren und könnten Aussagen zulassen, wo neue Siedlungs- oder Industriekeime entstehen.

Raumfragen sind zugleich auch Planungsfragen. Raum- und Nutzungsansprüche unterschiedlichster Akteure konkurrieren miteinander. Eine nachhaltige Planung hat die Aufgabe, Landnutzungsentwicklungen unter Berücksichtigung der ökologischen und naturräumlichen Funktionen der Landschaft zu steuern. In diesem Prozess ist es wichtig, die Einflussfaktoren der Entwicklung zu kennen und mögliche zukünftige Prozesse und Situationen abzuschätzen. Hinsichtlich dieser Planungsaufgabe kann die Entwicklung urbaner Landnutzungsszenarien zur Minimierung von Ungewissheiten bei Planungsentscheidungen beitragen. Um regulierend und planerisch einwirken zu können, ist es eine wichtige Voraussetzung zu wissen, wo dies geschehen muss und an wen die Maßnahmen adressiert sind.

Das Modell erlaubt hierfür eine sehr direkte Interaktivität. ‚What..if- Szenarien lassen sich einfach in das Regelsystem implementieren und über die visualisierte Simulation beurteilen. Fragen nach dem Ort der Veränderung bei variierenden Nutzungsinteressen können somit leicht durchgespielt werden: welche Agrarfläche wird versiegelt und welcher Auenstandort wird gefährdet, wenn das Interesse nach Einfamilienhäusern steigt?

Eine Situation, von Brisanz in dem Fallbeispiel Leipzig in den letzten Jahren abgenommen hat, die Folgen der Flächenversiegelung jedoch immer noch aktuell sind.

Die Entwicklung von Landnutzungsszenarien ist neben der Raumplanung auch für die Abschätzung und Bewertung der möglichen Folgen relevant. Hochwassergefährdung, verminderte Habitatqualität, Degradierung der Landschaft durch Übernutzung sind Beispiele einer Verminderung des Leistungsvermögens des Naturhaushaltes, die auf eine menschliche Inanspruchnahme und nutzungsbedingte Veränderung der Landschaft zurückgehen und in manchen Fällen zu deren völligen Zerstörung führen können.

Die Quantifizierung und Lokalisierung der Inanspruchnahme und resultierende Veränderungen des Naturhaushaltes sind hierbei eine wichtige Aufgabe der Analyse, die zu Aufklärung und Bewusstseinsbildung beitragen kann.

Literaturverzeichnis

~isle_ex~ (1988). "80x48". <http://jmge.net/parity.htm>

Allen, P. M. (1997). *Cities and Regions as Self-Organizing Systems - Models of Complexity*, Gordon & Breach.

Antrop, M. (2004). "Landscape change and the urbanization process in Europe." *Landscape and Urban Planning* 67: 9–26.

Automatous-Monk. (2004). "Switched-On Monk, Rule110-Metropolis." from <http://www.automatous-monk.com>.

Automatous-Monk. (2004). "The Well-Tempered Cellular Automaton, B minor (Rule 206)."

Balzter, H., Braun, P., Köhler, W. (1998). "Cellular automata models for vegetation dynamics." *Ecological Modelling* 107: 113–125.

Bandini, S. M., G., Serra, R. (2001). "Cellular automata: From a theoretical parallel computational model to its application to complex systems." *Parallel Computing* 27(5): 539-553.

Barca, D., Crisci, G.M., di Gregorio, S. und Nicoletta, F.P. (1994). "Cellular automata for simulating lava flows: A method and examples of Etnean eruptions." *Transport Theory and Statistical Physics* 23(1-3): 195-232.

Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N., and Lavalle, C. (2003). "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata." *Landscape and Urban Planning* 64: 145-160.

Batty, M. (1971). "Modelling Cities as Dynamik Systems." *Nature* 231.

Batty, M. (1991). *Cities as fractals: simulation of growth and form*. Fractals and Chaos. A. J. Crilly, Earnshaw, H.J. Berlin, Springer: 43-69.

Batty, M., Xie, Y. (1994). "From cells to cities." *Environment and Planning B: Planning and Design* 21: 31-48.

Batty, M. (1995). "New ways of looking at cities." *Nature* 377: 574.

Batty, M., Cole, S. (1997). "Time and Space." *Futures* 29: 217-289.

Batty, M., Torrens, P. (2005). "Modelling and prediction in a complex world." *Futures* 37: 745-766.

Belde, M. (1997). "Zellulärer Automat zur Simulation der Sukzession auf Niedermoorstandorten bei unterschiedlichen Managementmaßnahmen." *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 27: 189-198.

- Benenson, I., Torrens, P.M. (2004). Geosimulation. Automata-based Modeling of Urban Phenomena. London, John Wiley & Sons.
- Boschütz, M. (2006). Die Stadtentwicklung Leipzig zwischen 1870 und 2003, Studienprojekt, Universität Potsdam.
- Brake, K., Ed. (2001). Suburbanisierung in Deutschland - Aktuelle Tendenzen. Opladen, Leske+Budrich.
- Cecchini, A., Rizzi, P. (2001). "Is urban gaming simulation useful?" *Simulation & Gaming* 32(4): 507-521.
- Clarke, K. C., Gaydos, L. und Hoppen, S., (1997). "A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area." *Environment and Planning B* 24: 247 - 261.
- Couclelis, H. (1985). "Cellular Worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics." *Environment and Planning A* 17: 585-596.
- Couclelis, H. (1997). "From cellular automata to urban models: New principles for model development and implementation." *Environment and Planning B* 24: 165-174.
- De Kok, J.-L., Engelen, G., White, R., Wind, H. G. (2001). "Modeling land-use change in a decision-support system for coastal-zone management." *Environmental Modeling and Assessment* 6: 123–132.
- Ebeling, W., Freund, J., Schweitzer, F. (2001). Anwendungsmöglichkeiten der Selbstorganisation. *Natuerliche Konstruktionen in Raum und Zeit*. H.-W. Reinhardt, Reiner, R. Stuttgart, IWB Stuttgart: 445-451.
- Eigen, M., Winkler, R. (1981). *Laws of the Game*. New York, Knopf.
- Eng, C. T., Paw, J.N., Guarin, F.Y. (1989). "The environmental impact of aquaculture and the effects of pollution on coastal aquaculture development in southeast Asia." *Marine Pollution Bulletin* 20: 335-343.
- Frankhauser, P., Sadler, R. (1991). Fractal Anaylses of agglomerations. *Proceedings of the Second International Colloquium of the Sonderforschungsbereich 230: Natürliche Konstruktionen*. Stuttgart, University of Stuttgart.
- Freiwald, U., Weimar, J. (2001). *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata (ACRI 2000)*. S. Bandini, Worsch, T. London, Springer Verlag: 47-54.
- Fritsch, U. (2002). *Entwicklung von Landnutzungsszenarien für landschaftsökologische Fragestellungen*, Dissertation. Potsdam, Universität Potsdam.
- Gardner, M. (1970). "The fantastic combinations of John Conway's new solitary game of 'Life'." *Scientific American* 223: 120-123.
- Gerhardt, M., Schuster, H. (1995). *Das digitale Universum. Zelluläre Automaten als Modelle der Natur*. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg.

Goncalves, P. u. D., P.M. (1994). Geographic information systems and cellular automata: A new approach to forest fire simulation. The European Conference in Geographical Information Systems (EGIS 94), Paris.

Greenberg, J. M., Hassard, B. D., Hastings, S. P. (1978). "Pattern formation and periodic structures in systems modeled by reaction-diffusion equations." Bull. Am. Math. Soc. 84: 1296-1327.

Gruebler, A. (1994). Technology. Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. W. B. Meyer, Turner, B.L. II. Cambridge, Univ. of Cambridge Press: 287–328.

Haase, D., Magnucki, K. (2004). "Die Flächennutzungs- und Stadtentwicklung Leipzigs 1870-2003." Statistischer Quartalsbericht, Stadt Leipzig 1/2004.

Haase, D. (2005). Modelling urban growth using the SLEUTH approach (Poster presentation). ERSA 2005.

Hagen, A. (2002). Multi-method assessment of map similarity. 5th AGILE conference on geographic information science, Palma, Spain.

Hea, C., Zhang, Q., Lia, Y., Lia, X., Shia, P. (2005). "Zoning grassland protection area using remote sensing and cellular automata modeling -A case study in Xilingol steppe grassland in northern China." Journal of Arid Environments 63: 814–826.

Hesse, M. (2001). Mobilität und Verkehr im suburbanen Kontext. Suburbanisierung in Deutschland. K. Brake, Dangschat, J.S., Herfert, G. Opladen, Leske&Budrich.

IHDP (2005). Science Plan - Urbanization and Global Environmental Change, Report No. 15, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change.

Jenerette, G. D., Wu, J., (2001). "Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona - Phoenix region, USA." Landscape Ecology 16: 611 - 626.

Johnson, M. P. (2001). "Environmental impacts of urban sprawl: a survey of the literature and proposed research agenda." Environment and Planning A 33: 717-735.

Klostermann, R. E. (1999). "The what if? Collaborative planning support system." Environment and Planning. B, Planning and Design 26: 393– 408.

Lambin, E. F. e. a. (2001). "The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths." Global Environmental Change 11: 261-269.

Lee, D. B. (1973). "Requiem for large-scale models." Journal of the American Planning Association 60(1): 163-178.

Lee, D. B. (1994). "Retrospective on large-scale urban models." Journal of the American Planning Association 60(1): 35-40.

Li, X., Yeh, A. (2000). "Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS." Int. J. Geographical Information Science 14(2): 131-152.

- Li, X., Yeh, A. G. O. (2002). "Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS." *Int. J. Geographical Information Science* 16(4): 323-343.
- Manson, S. M. (2001). "Simplifying complexity. A review of complexity theory." *Geoforum* 32(3): 405–414.
- Monserud, R. A., Leemans, R., (1992). "Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic." *Ecological Modelling* 62: 275-293.
- O'Sullivan, D., Torrens, P (2001). *Cellular Models of Urban Systems. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2000)*. S. Bandini, Worsch, T. London, Springer-Verlag: 108–116.
- Oxley, T., McIntosh, B.S., Winder, N., Mulligan, M., Engelen, G. (2004). "Integrated modelling and decision-support tools: a Mediterranean example." *Environmental Modelling & Software* 19 (2004) 999–1010 19: 999–1010.
- Pontius Jr., R. G. u. S., L.C. (2001). "Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85: 239 - 248.
- Portugali, J. (2000). *Self-Organization and the City*. Berlin, Springer Verlag.
- Rees, W. E. (1997). "Urban ecosystems: the human dimension." *Urban Ecosystems*: 72.
- Riedl, L. (1999). *Possible Cities. Beiträge zum Symposium CORP'99*. M. Schenk. Wien: 1–8.
- Rubiano, J. (2000). "Land use change in tropical hillsides: the influence of pattern on process." *Advances in Environmental Monitoring and Modelling* 1(1): 61 - 79.
- Savill, N., Hogeweg, P. (1997). "Modelling Morphogenesis: From Single Cells to Crawling Slugs." *Journal of theoretical Biology* 184: 229-235.
- Schaldach, R. (2004). *Dissertation: Räumliche Modellierung der Dynamik von Landnutzung in Hessen und ihrer Wirkung auf die biologische Kohlenstoffspeicherung. Entwicklung eines GIS-basierten Modellsystems*. Kassel, Universität Kassel.
- Schmidt, H., Mayer, G., Wiktorin, D., Ed. (2005). *Der Leipzig-Atlas*. Köln, Emons Verlag.
- Schweitzer, F. (1998). *Ökonomische Geographie: Räumliche Selbstorganisation in der Standortverteilung. Evolution und Selbstorganisation in der Ökonomie*. F. Schweitzer, Silverberg, G. Berlin, Duncker & Humblot: 97-125.
- SRU (2000). *Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend*. Bonn, Deutscher Bundestag.
- Ströbl, B. W., V. ; Pfützner, B. (2003). *Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf den Wasserhaushalt im Großraum Berlin*. Potsdam, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

Sui, D. Z., Zeng, H. (2001). "Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen." *Landscape and Urban Planning* 53: 37–52.

Tobler, W. (1979). *Cellular Geography. Philosophy in Geography.* s. a. O. Gale, G. Dordrecht, Kluwer: 379-386.

Torrens, P. M. (2000). "How cellular models of urban systems work." *CASA Working Paper Series* 28.

Turner, B. L., Clark, W. C., Kates, R.W. Richards, J.F., Mathews, J.T., Meyer, W.B. (Eds.) (1990). *The Earth as Transformed by Human Action: Global and Regional Changes in the Biosphere Over the Past 300 Years.* Cambridge, Cambridge University Press.

United Nations (2004). *State of the World's Cities 2004/2005 - Globalisation and Urban Culture.* New York, United Nations Publications.

Verburg, P. H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., and Mastura, S.S.A. (2002). "Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S Model." *Environmental Management* 30: 391-405.

Vitousek, P. M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M. (1997). "Human domination of earth's ecosystems." *Science* 277: 494-499.

Wegener, M. (1994). "Operational Urban Models – State of the Art." *American Planning Association Journal* 60(1).

Weimar, J. R. (1997). *Simulation with Cellular Automata.* Berlin, Logos Verlag.

White, R., Engelen, G. (1993). "Cellular Automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns." *Environment and Planning A* 25: 1175-1199.

White, R., Engelen, G. (1994). "Urban Systems Dynamics and Cellular Automata: Fractal Structures between Order and Chaos." *Chaos, Solutions & Fractals* 4: 563-583.

White, R. (1997). "Cities and Cellular Automata." *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2: 111-125.

White, R., Engelen, G., Uljee, I. (1997). "The use of a constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use systemy " *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(3): 323-343.

White, R., Engelen, G. and Uljee, I. (2000). *Modelling Land Use Change with Linked Cellular Automata and Socio-Economic Models: A Tool for Exploring the Impact of Climate Change on the Island of St. Lucia.* *Spatial Information for Land Use Management.* M. Hill, Aspinall, R., Gordon and Breach: 189-204.

Wolfram, S. (2006). "How WolframTones Works." <http://tones.wolfram.com>

- Wolfram, S. (1983). "Statistical mechanics of cellular automata." *Review of Modern Physics* 55: 601-644.
- Wolfram, S. (1984). "Cellular automata as models for complexity." *Nature* 311: 419-424.
- Wolfram, S. (1984). "Universality and complexity in Cellular Automata." *Physica D* 10: 1-35.
- Wolfram, S. (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore, World Scientific.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*, Wolfram Media.
- Wu, F. (1998). "SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules." *Int. J. Geographical Information Science* 12(1): 63-82.
- Wu, F. (1998). "Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic controlled cellular automata in a geographical information system." *Journal of Environment Management* 53: 293 - 308.
- Wu, F. (2002). "Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions." *Int. J. Geographical Information Science* 16(8): 795–818.
- Wuensche, A. (1998). "Classifying Cellular Automata automatically." *Santa Fe Working Paper* 98-02-018.
- Yeh, A.G.O., Li, X. (2001). "A constrained model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS." *Environment and Planning B: Planning and Design* 28: 733-753.

Appendix 1

```
;simpler CA a la game of life
;(1:besetzt, 0:frei)
.....
n=30
f1=bytarr(30,30)
f2=bytarr(30,30)

;Anfangskonfiguration einlesen
openr,1,'30x30_2.asc'
readf,1,f1
close,1

;Farbtabelle definieren
rr=bytarr(256)
gg=bytarr(256)
bb=bytarr(256)
rr(0:1)=[255,0]
gg(0:1)=[255,90]
bb(0:1)=[255,0]
tvlct,rr,gg,bb

Window,1,xsize=400,ysize=400

;Zeitschleife
for k=0,32 do begin
;augenblickliche Iteration auf dem Display darstellen
b=congrid(f1,400,400)
tv,rotate(reverse(b),90)
xyouts,0.1,0.1,'t=';
xyouts,0.1,0.2,string(k)
wait,1
;folgenden Zustand bestimmen
for i=1,n-2 do begin
for j=1,n-2 do begin
an=total(f1(i-1:i+1,j-1:j+1))-f1(i,j)
if (f1(i,j) eq 0) and (an eq 3) then f2(i,j)=1
if (f1(i,j) eq 1) and (an lt 2) or (an gt 3) then f2(i,j)=0
if (f1(i,j) eq 1) and (an ge 2) and (an le 3) then f2(i,j)=1
endfor
endfor
;umspeichern
f1=f2
endfor
end
```

Appendix 2

```
::::Monte-Carlo-Analyse des Potentialansatzes
; von W&E, 1993
.....
nit=20000
;c(1)= Anzahl vacant
;c(2)= Anzahl housing
;c(3)= Anzahl industry
;c(4)= Anzahl commerce

;Grossen der Nachbarschaftsringe
nach=intarr(18)
nach(0:2)=4
nach(3)=8
nach(4:5)=4
nach(6:7)=8
```

```
nach(8)=4
nach(9)=8
nach(10)=4
nach(11)=8
nach(12)=12
nach(13:14)=8
nach(15)=4
nach(16)=8
nach(17)=4
;totalistische Beschreibung jedes Nachbarschaftsrings
c=intarr(4,18)
```

```
gewinnv=intarr(3)
gewinni=intarr(3)
gewinnh=intarr(3)
```

```
;auswurfeln gueltiger Nachbarschaftskonstellationen
for it=0,nit do begin
for j=0,17 do begin
for i=0,3 do begin
repeat2: c(*,j)=fix(randomu(seed,4)*(nach(j)+0.9999))
if total(c(*,j)) ne nach(j) then GOTO, repeat2
endfor
;print,c(*,j)
endfor
```

```
c1=c(3,0) & c2=c(3,1) & c3=c(3,2) & c4=c(3,3)
c5=c(3,4) & c6=c(3,5) & c7=c(3,6) & c8=c(3,7)
c9=c(3,8) & c10=c(3,9) & c11=c(3,10) & c12=c(3,11)
c13=c(3,12) & c14=c(3,13) & c15=c(3,14) & c16=c(3,15)
c17=c(3,16) & c18=c(3,17)
```

```
i1=c(2,0) & i2=c(2,1) & i3=c(2,2) & i4=c(2,3) & i5=c(2,4)
i6=c(2,5) & i7=c(2,6) & i8=c(2,7) & i9=c(2,8) & i10=c(2,9)
i11=c(2,10) & i12=c(2,11) & i13=c(2,12) & i14=c(2,13)
i15=c(2,14) & i16=c(2,15) & i17=c(2,16) & i18=c(2,17)
```

```
h1=c(1,0) & h2=c(1,1) & h3=c(1,2) & h4=c(1,3) & h5=c(1,4)
h6=c(1,5) & h7=c(1,6) & h8=c(1,7) & h9=c(1,8) & h10=c(1,9)
h11=c(1,10) & h12=c(1,11) & h13=c(1,12) & h14=c(1,13)
h15=c(1,14) & h16=c(1,15) & h17=c(1,16) & h18=c(1,17)
```

```
;Berechnung der entsprechenden Potentiale
p_vc=(25*c1+0*i1+4*h1)+(25*c2+0*i2+3.5*h2)+
(25*c3+0*i3+3*h3)+(-1*c4+0*i4+2.5*h4)+
(-1*c5+0*i5+2*h5)+
(-1*c6+0*i6+2*h6)+(-1*c7+0*i7+2*h7)+(-1*c8+0*i8+1.5*h8)+
(-1*c9+0*i9+1.5*h9)+(-1*c10+0*i10+1.5*h10)+
(-1*c11+0*i11+1.5*h11)+(1*c12+0*i12+1*h12)+
(-1*c13+0*i13+1*h13)+(-1*c14+0*i14+1*h14)+
(-1*c15+0*i15+1*h15)+(-1*c16+0*i16+1*h16)+
(-1*c17+0*i17+1*h17)+(-1*c18+0*i18+1*h18)
p_vi=(0*c1+3*i1-1*h1)+(0*c2+3*i2-1*h2)
+(0*c3+2*i3+0*h3)+(0*c4+1*i4+0*h4)+(0*c5+0*i5+0*h5)+
(0*c6+0.2*i6+0*h6)+(0*c7+0.2*i7+0*h7)+
(0*c8+0.2*i8+0*h8)+(0*c9+0.2*i9+0*h9)+
(0*c10+0.2*i10+0*h10)+(0*c11+0.2*i11+0*h11)+
(0*c12+0.2*i12+0*h12)+(0*c13+0.2*i13+0*h13)+
(0*c14+0.2*i14+0*h14)+(0*c15+0.2*i15+0*h15)+
(0*c16+0.2*i16+0*h16)+(0*c17+0.2*i17+0*h17)+
(0*c18+0.2*i18+0*h18)
p_vh=(-2*c1-10*i1+2*h1)+(-1*c2-10*i2+2*h2)+(2*c3-
5*i3+1.5*h3)+(1*c4-3*i4+1.5*h4)+(1*c5-1*i5+1*h5)+
(1*c6+0*i6+1*h6)+(0.5*c7+0*i7+1*h7)+(0.5*c8+0*i8+1*h8)+(0.
4*c9+0*i9+0.5*h9)+(0.3*c10+0*i10+0.5*h10)+(0.2*c11+0*i11+
0.5*h11)+(0.1*c12+0*i12+0.5*h12)+(0.1*c13+0*i13+0.5*h13)
+(0.1*c14+0*i14+0.1*h14)+(0*c15+0*i15+0.1*h15)+(0*c16+0
*i16+0.1*h16)+(0*c17+0*i17+0.1*h17)+
(0*c18+0*i18+0.1*h18)
```

```
.....
p_ic=(25*c1-2*i+4*h1)+(25*c2-2*i2+3.5*h2)+(25*c3-
2*i3+3*h3)+
```

```

(-2*c4+0*i4+ 2.5*h4)+(-2*c5+0*i5+2*h5)+(-2*c6+0*i6 +2*h6)
+
(-2*c7+0*i7+2*h7)+(-2*c8 + 0*i8+ 1.5*h8)+(-2*c9+ 0*i9+
1.5*h9)+
(-2*c10 +0*i10 +1.5*h10)+ (-2*c11+0*i11 +1.5*h11)+
(-2*c12 +0*i12 +1*h12)+(-2*c13 +0*i13 +1*h13)+
(-2*c14 +0*i14 +1*h14)+(-2*c15 + 0*i15 +1*h15)+
(-2*c16 +0*i16 +1*h16)+ (-2*c17 +0*i17+1*h17)+
(-2*c18 +0*i18 +1*h18)
p_ii = 0
p_ih = 0
:-----
p_hc =(25*c1+1*i1+4*h1)+(25*c2+1*i2+3.5*h2)+(25*c3+1*i3+
3*h3)+(-2*c4+0*i4+2.5*h4)+(-2*c5+0*i5+2*h5)+
(-2*c6+0*i6+2*h6)+(-2*c7+ 0*i7+ 2*h7)+
(-2*c8 + 0*i8+1.5*h8)+(-2*c9+ 0*i9 +1.5*h9)+
(-2*c10 +0*i10+1.5*h10)+ (-2*c11+0*i11+1.5*h11)+
(-2*c12 +0*i12+1*h12)+ (-2*c13+0*i13+1*h13)+
(-2*c14 +0*i14+1*h14)+(-2*c15 + 0*i15+1*h15)+
(-2*c16 +0*i16 +1*h16)+(-2*c17+0*i17+1*h17)+
(-2*c18 +0*i18 +1*h18)
P_hi =(1*c1+2*i1-1*h1)+ (1*c2+2*i2-1*h2)+(0*c3+2*i3+0*h3)
p_hh = 0

;Bestimmung der Nutzung mit dem hoechsten Potential
;und aufaddieren des Vorkommens
a=max([p_vc,p_vi,p_vh],pos)
gewinnv(pos)=gewinnv(pos)+1

a=max([p_ic,p_ii,p_ih],pos)
gewinni(pos)=gewinni(pos)+1

a=max([p_hc,p_hi,p_hh],pos)
gewinnh(pos)=gewinnh(pos)+1
endifor

;Ausgabe
openw,1,'WuE_93_erg.asc'
printf,1,'WuE_Potentialtest7: Prozentualer Anteil an
Max.Potentialen von Handel, Industrie und Wohnen bei',nit,'
Iterationen'
printf,1,' Pot_C Pot_I Pot_H '
printf,1,(float(gewinnv)/(nit+1)*100),(float(gewinni)/(nit+1)*100
),(float(gewinnh)/(nit+1)*100)
close,1

end

```

Appendix 3

```

;Monte-Carlo-Analyse des Potentialansatzes von W&E,
1997- das Cincinnati-Modell
:-----
;c(0)= Anzahl vacant
;c(1)= Anzahl commerce
;c(2)= Anzahl industry
;c(3)= Anzahl housing
;c(4)= Anzahl river
;c(5)= Anzahl railway
;c(6)= Anzahl road

nit=20000
c=intarr(7,18)
gewinn=intarr(3)
nach=intarr(18)

nach(0:2)=4
nach(3)=8

```

```

nach(4:5)=4
nach(6:7)=8
nach(8)=4
nach(9)=8
nach(10)=4
nach(11)=8
nach(12)=12
nach(13:14)=8
nach(15)=4
nach(16)=8
nach(17)=4

for it=0,nit do begin
for j=0,17 do begin
for i=0,6 do begin
repeat2: c(*,j)=fix(randomu(seed,7)*(nach(j)+0.9999))
if total(c(*,j)) ne nach(j) then GOTO, repeat2
endifor
;print,c(*,j)
endifor

v1=c(1,0) & v2=c(1,1) & v3=c(1,2) & v4=c(1,3) & v5=c(1,4)
v6=c(1,5) & v7=c(1,6) & v8=c(1,7) & v9=c(1,8) & v10=c(1,9)
v11=c(1,10) & v12=c(1,11) & v13=c(1,12) & v14=c(1,13)
v15=c(1,14) & v16=c(1,15) & v17=c(1,16) & v18=c(1,17)

c1=c(2,0) & c2=c(2,1) & c3=c(2,2) & c4=c(2,3) & c5=c(2,4)
c6=c(2,5) & c7=c(2,6) & c8=c(2,7) & c9=c(2,8)
c10=c(2,9) & c11=c(2,10) & c12=c(2,11) & c13=c(2,12)
c14=c(2,13) & c15=c(2,14) & c16=c(2,15)
c17=c(2,16) & c18=c(2,17)

i1=c(3,0) & i2=c(3,1) & i3=c(3,2) & i4=c(3,3)
i5=c(3,4) & i6=c(3,5) & i7=c(3,6) & i8=c(3,7)
i9=c(3,8) & i10=c(3,9) & i11=c(3,10)
i12=c(3,11) & i13=c(3,12) & i14=c(3,13)
i15=c(3,14) & i16=c(3,15) & i17=c(3,16)
i18=c(3,17)

h1=c(4,0) & h2=c(4,1) & h3=c(4,2) & h4=c(4,3)
h5=c(4,4) & h6=c(4,5)
h7=c(4,6) & h8=c(4,7)
h9=c(4,8) & h10=c(4,9)
h11=c(4,10) & h12=c(4,11)
h13=c(4,12) & h14=c(4,13)
h15=c(4,14) & h16=c(4,15) & h17=c(4,16)
h18=c(4,17)

river1=c(5,0) & river2=c(5,1) & river3=c(5,2)
river4=c(5,3) & river5=c(5,4) & river6=c(5,5)
river7=c(5,6)
river8=c(5,7) & river9=c(5,8) & river10=c(5,9)
river11=c(5,10) & river12=c(5,11) & river13=c(5,12)
river14=c(5,13) & river15=c(5,14)
river16=c(5,15) & river17=c(5,16)
river18=c(5,17)

rail1=c(6,0) & rail2=c(6,1) & rail3=c(6,2)
rail4=c(6,3) & rail5=c(6,4) & rail6=c(6,5)
rail7=c(6,6) & rail8=c(6,7) & rail9=c(6,8)
rail10=c(6,9) & rail11=c(6,10) & rail12=c(6,11)
rail13=c(6,12) & rail14=c(6,13) & rail15=c(6,14)
rail16=c(6,15) & rail17=c(6,16) & rail18=c(6,17)

road1=c(0,0) & road2=c(0,1) & road3=c(0,2)
road4=c(0,3) & road5=c(0,4) & road6=c(0,5)
road7=c(0,6) & road8=c(0,7) & road9=c(0,8)
road10=c(0,9) & road11=c(0,10) & road12=c(0,11)
road13=c(0,12) & road14=c(0,13) & road15=c(0,14)
road16=c(0,15) & road17=c(0,16) & road18=c(0,17)

p_c = (98*c1 + 0*i1 +12*h1 - 19*rail1 + 98*road1)+

```

```
(98*c2 + 0*i2 + 8*h2 - 19*rail2 + 97*road1)+
(98*c3 + 0*i3 + 7*h3 - 9*rail3)+(98*c4 + 0*i4 + 5*h4)+
(38*c5 + 0*i5 + 5*h5)+(19*c6 + 0*i6 + 4*h6)+
(-20*c7 + 0*i7 + 4*h7)+(-21*c8 + 0*i8 + 3*h8)+
(-21*c9 + 0*i9 + 2*h9)+(-20*c10+0*i10+ 3*h10)+
(-20*c11+0*i11+ 2*h11)+(-21*c12+0*i12+ 2*h12)+
(-21*c13+0*i13+ 3*h13)+(-21*c14+0*i14+ 2*h14)+
(-21*c15+0*i15+ 3*h15)+(-20*c16+0*i16+ 2*h16)+
(-20*c17+0*i17+ 3*h17)+(-20*c18+0*i18+ 2*h18)
```

```
p_i = (98*i1 + 0*h1 + 60*rail1 + 56*road1)+(97*i2 + 0*h2 +
60*rail2 + 50*road2)+(98*i3 + 1*h3 + 56*rail3 + 43*road3)+
(41*i4 + 1*h4+ 49*rail4 + 35*road4)+
(15*i5 + 2*h5+ 40*rail5 + 24*road5)+
(5*i6 + 2*h6+ 22*rail6 + 15*road6)+
(6*i7 + 3*h7 + 6*road7)+(5*i8 + 4*h8)+(5*i9 + 5*h9)+
(6*i10+ 6*h10)+(7*i11+ 7*h11)+(3*i12+ 7*h12)+
(4*i13+ 7*h13)+(0*i14+ 7*h14)+(0*i15+ 7*h15)+(0*i16+
6*h16)+
(0*i17+ 6*h17)+(0*i18+ 5*h18)
```

```
p_h =(0*v1 -20*c1 -31*i1 +34*h1 +43*river1 -21*rail1 -
5*road1)+
(0*v2 + 0*c2 -27*i2 +27*h2 +23*river2 -21*rail2 -1*road2)+
(0*v3 +22*c3 -21*i3 +23*h3 + 8*river3 -12*rail3 +3*road3)+
(0*v4 +21*c4 -8*i4 +21*h4 -7*rail4 +3*road4)+
(0*v5 +18*c5 -1*i5 +15*h5 -2*rail5 +4*road5)+
(0*v6+18*c6+3*i6+14*h6+4*road6)+
(0*v7+16*c7+4*i7+11*h7+4*road7)+
(0*v8 +15*c8 +6*i8 + 10*h8+4*road8)+(0*v9 +14*c9 +6*i9 +
9*h9+4*road9)+(1*v10 +13*c10+6*i10+ 7*h10+3*road10)+$
(1*v11 +11*c11+5*i11+ 7*h11+4*road11)+(1*v12
+10*c12+6*i12+ 6*h12+3*road12)+(1*v13 +8*c13 +6*i13+
4*h13+3*road13)+$
(1*v14 +7*c14 +6*i14+ 3*h14+3*road14)+(2*v15 +7*c15
+6*i15+ 4*h15+3*road15)+(2*v16 +5*c16 +6*i16+
3*h16+3*road16)+$
(2*v17 +5*c17 +6*i17+ 4*h17+3*road17)+(2*v18 +5*c18
+6*i18+ 3*h18+4*road18)
```

```
a=max([p_c,p_i,p_h],pos)
gewinn(pos)=gewinn(pos)+1
```

```
endifor
print,'WuE_Pottest_real: Prozentualer Anteil an
Max.Potentialen von Handel, Industrie und Wohnen bei',nit,'
Iterationen'
print,' _____ '
print,' Pot_C Pot_I Pot_H '
print, (float(gewinn)/(nit+1)*100)
```

```
openw,1,'WuE_97real_erg.asc'
printf,1,'WuE_Pottest_real: Prozentualer Anteil an
Max.Potentialen von Handel, Industrie und Wohnen bei',nit,'
Iterationen'
printf,1,' Pot_C Pot_I Pot_H '
printf,1,' _____ '
printf,1,(float(gewinn)/(nit+1)*100);gewinn
close,1
```

```
end
```

Appendix 4

```
; 0= nodata 1=urban 2=nicht urban
; 3x3 Moore-Nachbarschaft
;
;exogene Wachstumsrate kann vorgegeben werden,
;wurde in den Simulationen aber abgeschaltet
;(durch Vorgabe extrem grosser Limitierungen)
```

```
a=intarr(26,26)
openr,1,'26x26.asc'
readf,1,a
close,1

nx=26
ny=26
lim_u=800 ;wachstumslimiter urban
lim_nu=800 ;wachstumslimiter non_urban
```

```
sub3=intarr(3,3)
pot1=intarr(26,26) ;potential fuer urban
pot2=intarr(26,26) ;potential fuer nonurban
it1=intarr(26,26) ;neue zeitscheibe
```

```
it1=a
zi1=histogram(a,min=1,max=2)
```

```
window,0,xsize=200,ysize=200
b=congrid(a,200,200)*100
tv,rotate(reverse(b),90)
```

```
;Zeitschleife
for k=1,10 do begin
```

```
    window,k,xsize=200,ysize=200
    b=congrid(a,200,200)*100
    tv,rotate(reverse(b),90)
    xyouts,0,1,0.2,string(k) ;zaehler im fenster
    wait,2
```

```
    for ix=1,nx-2 do begin
        for iy=1,ny-2 do begin
```

```
            if a(ix,iy) ne 0 then begin
                sub3=a(ix-1:ix+1,iy-1:iy+1)
                sub3(1,1)=0 ;setzt matrixmitte auf 0
                z=histogram(sub3,min=1,max=2)
                pot1(ix,iy)= 4.3*z(0)+ 2.5*z(1)
                pot2(ix,iy)= -1.55*z(0)+ 4.9*z(1)
            endif
```

```
        endifor
    endifor
```

```
    index1=sort(pot1) ;sortiert matrix a nach max-
    werten(vektorformat),inhalt: indizes
    index2=sort(pot2)
```

```
    s=1
    for l=1,(nx*ny) do begin
        pin1=index1((nx*ny)-l)
        if s gt lim_u then GOTO, hopp
        if ((pot1(pin1) ge pot2(pin1)) and a(pin1) eq 2) then begin
            it1(pin1)=1
            s=s+1
        endif
    endifor
    hopp: print,' hopp! s1 :', s
```

```
    s=1
```

```

for l=1,(nx*ny) do begin
  pin2=index2((nx*ny)-l)
  if s ge lim_nu then GOTO, hopp2
  if ((pot2(pin2) ge pot1(pin2)) and a(pin2) eq 1) then begin
    it1(pin2)=2
    s=s+1
  endif
endif
endfor
hopp2: print,' hopp2! s2:', s

zi1=histogram(a,min=1,max=2)
a=it1
zi2=histogram(it1,min=1,max=2)
u1= zi2(0) - zi1(0)
print,' Anzahl urbanisierter Zellen:' ,u1

endfor

openw,3,'it1.asc'
printf,3,it1
close,3

end

```

Appendix 5

```

; Potentialansatz_3Klassen
; 0= nodata 1=wohnen 2=acker 3=gewerbe
; 3x3 nachbarschaft
; exogene Wachstumsrate kann beruecksichtigt werden
;.....
a=intarr(26,26)
openr,1,'26x26i3.asc'
readf,1,a
close,1

nx=26
ny=26
lim_1=900 ;wachstumslimiter wohnen
lim_2=900 ;wachstumslimiter acker
lim_3=900 ;wachstumslimiter gewerbe
sub3=intarr(3,3)
pot1=fltarr(26,26) ;potential fuer wohnen
pot2=fltarr(26,26) ;potential fuer agrar
pot3=fltarr(26,26) ;potential fuer gewerbe
it1=intarr(26,26)

it1=a
zi1=histogram(a,min=1,max=3)

for k=1,10 do begin
  window,k,xsize=200,ysize=200
  b=congrid(a,200,200)*100
  tv,rotate(reverse(b),90)
  xyouts, 0.1, 0.55, string(k) ;zaehler im fenster
  wait,2
  print, ''
  print, ' Iteration: ',k

  for ix=1,nx-2 do begin
    for iy=1,ny-2 do begin

      if a(ix,iy) ne 0 then begin
        sub3=a(ix-1:ix+1,iy-1:iy+1)
        sub3(1,1)=0 ;setzt matrixmitte auf 0
        z=histogram(sub3,min=1,max=3)
        pot1(ix,iy)= (4)*z(0)+(1)*z(1) +(-3)*z(2)
        pot2(ix,iy)= (-1)*z(0)+(4)*z(1)+(-1)*z(2)
        pot3(ix,iy)= (-3)*z(0)+(1)*z(1)+(3)*z(2)

```

```

      endif
    endfor
  endfor

  index1=sort(pot1) ;sortiert matrix a nach max-
  werten(vektorformat),inhalt: indizes
  index2=sort(pot2)
  index3=sort(pot3)

s1=1
for l=1,(nx*ny) do begin
  ;print, ' l:', l
  pin1=index1((nx*ny)-l)
  if s1 gt lim_1 then GOTO, hopp1
  if ((pot1(pin1) ge pot2(pin1)) and (pot1(pin1) ge
  pot3(pin1)) and a(pin1) ne 0) then begin
    it1(pin1)=1
    if a(pin1) ne 1 then s1=s1+1
  ;print, pin1
  endif
endif
endfor
hopp1:
s1=s1-1
print,' Transformierte Zellen Wohnen: ', s1

s2=1
for l=1,(nx*ny) do begin
  ;print, ' l:', l
  pin2=index2((nx*ny)-l)
  if s2 ge lim_2 then GOTO, hopp2
  if ((pot2(pin2) ge pot1(pin2)) and (pot2(pin2) ge
  pot3(pin2)) and a(pin2) ne 0 ) then begin
    it1(pin2)=2
    if a(pin2) ne 2 then s2=s2+1
  ;print, pin2
  endif
endif
endfor
hopp2:
s2=s2-1
print,' Transformierte Zellen acker :', s2

s3=1
for l=1,(nx*ny) do begin
  ;print, ' l:', l
  pin3=index3((nx*ny)-l)
  if s3 ge lim_3 then GOTO, hopp3
  if ((pot3(pin3) ge pot1(pin3)) and (pot3(pin3) ge
  pot2(pin3)) and a(pin3) ne 0) then begin
    it1(pin3)=3
    if a(pin3) ne 3 then s3=s3+1
  ;print, pin3
  endif
endif
endfor
hopp3:
s3=s3-1
print,' Transformierte Zellen gewerbe :', s3

zi1=histogram(a,min=1,max=3)
a=it1

zi2=histogram(it1,min=1,max=3)
u1= zi2(0)-zi1(0)
print,' Differenz "Wohnen": ',u1
u2= zi2(1)-zi1(1)
print,' Differenz "Ackerflaeche":',u2
u3= zi2(2)-zi1(2)
print,' Differenz "Gewerbe": ',u3
endfor
end

```

Appendix 6

```
;raumaggregation

a=intarr(2134,2294)

openr,1,'1870_3.asc'
readf,1,a
close,1

;i=where(a eq -5)
;a(i)=0

luma=10
uma=intarr(luma,luma) ; definiert die Untermatrix
nx=2134/luma ;definiert die Koordinatenindizes der
Untermatrix(grobmatrix)
ny=2294/luma
print,nx,ny
agg=intarr(nx,ny)

for ix=0,nx-1 do begin
  for iy=0,ny-1 do begin
    uma=a(ix*luma:ix*luma+luma-1,iy*luma:iy*luma+luma-1)
    z=histogram(uma,min=0,max=3)
    g=max(z,num)
    ;print,g,num+1
    agg(ix,iy)=num ;+1
  endfor
endfor

rr=bytarr(256)
gg=bytarr(256)
bb=bytarr(256)
rr(0:7)=[ 255,255,100, 0,255, 0,255,255]
gg(0:7)=[ 255,255,255, 0,255,255, 0,255]
bb(0:7)=[ 255,255, 0,255, 0,255,255,255]
tvlct,rr,gg,bb

b=congrid(agg,500,500)
window,2,xsize=500,ysize=500
tvsl,rotate(reverse(b),90)

b=congrid(a,500,500)
window,1,xsize=500,ysize=500
tvsl,rotate(reverse(b),90)

openw,1,'1870_3_213.asc'
printf,1,agg
close,1

end
```

Appendix 7

```
;typaggregation:
a=intarr(2134,2294)

openr,1,'1870_10.asc'
readf,1,a
close,1
agg=intarr(2134,2294)

i=where( ((a le 18) and (a ge 11)) or ((a le 64) and (a ge
61)),num)
if num gt 0 then agg(i)=1
i=where(a eq 74 or a eq 73 or a eq 72 or a eq 71 or a eq 102
or a eq 101,num)
```

```
if num gt 0 then agg(i)=2
i=where( ((a le 53) and (a ge 20)) or ((a le 82) and (a ge 81))
,num)
if num gt 0 then agg(i)=3

b=congrid(agg,500,600)
window,1,xsize=500,ysize=600
rotate(reverse(b),90)
tvsl,rotate(reverse(b),90)

b=congrid(a,500,600)
window,2,xsize=500,ysize=600
rotate(reverse(b),90)
tvsl,rotate(reverse(b),90)

openw,1,'1870_3.asc'
printf,1,agg
close,1
```

Appendix 8

```
; caleip_213_3_POT
;0=nodata 1=wohnen 2=freiflaeche(acker/gruenland)
3=gewerbe/industrie/dienstleistung
; 3x3 nachbarschaft
; exogene Wachstumsrate
; kann beruecksichtigt werden

a=intarr(213,229)
openr,1,'1940_3_213.asc'
readf,1,a
close,1

nx=long(213)
ny=long(229)

lim_1=long(nx*ny) ;wachstumslimiter wohnen
lim_2=long(nx*ny) ;wachstumslimiter freiflaeche
lim_3=long(nx*ny) ;wachstumslimiter gewerbe/industrie

sub3=intarr(3,3)
pot1=fltarr(213,229) ;potential fuer wohnen
pot2=fltarr(213,229) ;potential fuer freiflaeche
pot3=fltarr(213,229) ;potential fuer gewerbe/industrie
it1=intarr(213,229) ;neue zeitscheibe

it1=a ;gleichsetzung (fuer limiter)
zi1=histogram(a,min=1,max=3)

rr=bytarr(256)
gg=bytarr(256)
bb=bytarr(256)
rr(0:6)=[255, 190, 225, 150, 255, 225, 225]
gg(0:6)=[255, 0, 225, 150, 255, 225, 200]
bb(0:6)=[255, 0, 80, 150, 255, 0, 225]
tvlct,rr,gg,bb

window,1,xsize=500,ysize=500
b=congrid(a,500,500)
tv,rotate(reverse(b),90)
window,3,xsize=500,ysize=500

for k=1,10 do begin

  if k le 70 then lim_1=long(nx*ny)
  if k le 70 then lim_3=long(nx*ny)
  b=congrid(a,500,500)
  tv,rotate(reverse(b),90)
```

```

xyouts,0.01,0.02,string(k) ;zaehler im fenster
wait,3

for ix=1,nx-2 do begin
for iy=1,ny-2 do begin

if a(ix,iy) ne 0 then begin
sub3=a(ix-1:ix+1,iy-1:iy+1)
sub3(1,1)=0 ;setzt matrixmitte auf 0
z=histogram(sub3,min=1,max=3)
pot1(ix,iy)= 4*z(0) + 1*z(1) +(-3)*z(2)
pot2(ix,iy)= (-1)*z(0)+ 3*z(1) +(-1)*z(2)
pot3(ix,iy)= (-3)*z(0)+ 1*z(1) + 3*z(2)
endif

endfor
endfor

index1=sort(pot1)
index2=sort(pot2)
index3=sort(pot3)

s1=long(1)
for l=long(1),long(nx*ny) do begin
;print, 'l:', l
pin1=index1((nx*ny)-l)
if s1 gt lim_1 then GOTO, hopp1
if ((pot1(pin1) ge pot2(pin1)) and (pot1(pin1) ge
pot3(pin1)) and a(pin1) ne 0) then begin
it1(pin1)=1
if a(pin1) ne 1 then s1=s1+1
;print, pin1
endif
endfor
hopp1:
s1=s1-1
print, ' Transformierte Zellen Wohnen: ', s1

s2=long(1)
for l=long(1),long(nx*ny) do begin
;print, 'l:', l
pin2=index2((nx*ny)-l)
if s2 ge lim_2 then GOTO, hopp2
if ((pot2(pin2) ge pot1(pin2)) and (pot2(pin2) ge
pot3(pin2)) and a(pin2) ne 0 ) then begin
it1(pin2)=2
if a(pin2) ne 2 then s2=s2+1
;print, pin2
endif
endfor
hopp2:
s2=s2-1
print, ' Transformierte Zellen Acker : ', s2

s3=long(1)
for l=long(1),long(nx*ny) do begin
;print, 'l:', l
pin3=index3((nx*ny)-l)
if s3 ge lim_3 then GOTO, hopp3
if ((pot3(pin3) ge pot1(pin3)) and (pot3(pin3) ge
pot2(pin3)) and a(pin3) ne 0) then begin
it1(pin3)=3
if a(pin3) ne 3 then s3=s3+1
;print, pin3
endif
endfor
hopp3:
s3=s3-1
print, ' Transformierte Zellen Gewerbe : ', s3
print, "

zi1=histogram(it1,min=1,max=3)

```

```

print,'histo:it1:', zi1
print,"
a=it1
endfor
if k eq 10 then begin

eva1=intarr(213,229)
eva2=intarr(213,229)
org=intarr(213,229)
openr,2,'2003_3_213.asc'
readf,2,org
close,2

for ix=0,nx-1 do begin
for iy=0,ny-1 do begin
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=1
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=2
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=3
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=4
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=5
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=6
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=7
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=8
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=9
endif
endif

z3=histogram(eva1,min=0,max=9)

for ix=0,nx-1 do begin
for iy=0,ny-1 do begin
if eva1(ix,iy) eq 1 or eva1(ix,iy) eq 3 or eva1(ix,iy) eq 7 or
eva1(ix,iy) eq 8 or eva1(ix,iy) eq 9 then
eva2(ix,iy)=1 ;korrekte urbane Zellen
if eva1(ix,iy) eq 2 or eva1(ix,iy) eq 8 then eva2(ix,iy)=2
if eva1(ix,iy) eq 4 or eva1(ix,iy) eq 6 then eva2(ix,iy)=3

endif
endif

openw,2,'eva1.asc'
printf,2,eva1
close,2
openw,2,'eva2.asc'
printf,2,eva2
close,2

endif

openw,3,'pot1.asc'
printf,3,pot1
window,3, xsize=500,ysize=500
shade_surf, pot1
close,3
openw,3,'pot2.asc'
printf,3,pot2
window,4, xsize=500,ysize=500
shade_surf, pot2
close,3
openw,3,'pot3.asc'
printf,3,pot3
window,5, xsize=500,ysize=500
shade_surf, pot3
close,3

a=intarr(213,229)
openr,1,'2003_3_213.asc'
readf,1,a
close,1
zi3=histogram(a,min=1,max=3)
print,'histo:2003:', zi3
print,"

```

```

window,6,xsize=500,ysize=500
b=congrid(a,500,500)
tv,rotate(reverse(b),90)
openw,3,'it1.asc'
printf,3,it1
close,3

end

```

Appendix 9

```

; caleip_213_LUT
; 0= nodata 1=wohnen 2=freiflaeche(acker/gruenland)
; 3=gewerbe/industrie/dienstleistung
.....

a=intarr(213,229)
openr,1,'1985_3_213.asc'
readf,1,a
close,1

lut=intarr(9,9)
openr,1,'lut1.asc'
readf,1,lut
close,1

nx=213
ny=229

sub3=intarr(3,3)
it1=intarr(213,229)

it1=a
zi1=histogram(a,min=1,max=3)

window,1,xsize=500,ysize=500
b=congrid(a,500,500)*100
tv,rotate(reverse(b),90)

window,2,xsize=500,ysize=500

for k=1,10 do begin

b=congrid(a,500,500)*100
tv,rotate(reverse(b),90)
xyouts,0.1,0.2,string(k) ;zaehler im fenster
wait,3

for ix=1,nx-2 do begin
for iy=1,ny-2 do begin

if a(ix,iy) ne 0 then begin

sub3=a(ix-1:ix+1,iy-1:iy+1)
sub3(1,1)=0 ;setzt matrixmitte auf 0
z=histogram(sub3,min=1,max=3)

if total(z) eq 8 then begin
n1=z(0); ix=wohnen
n2=z(1); iy=acker
p=lut(n1,n2)
it1(ix,iy)=lut(n1,n2)
endif

endif

endifor
endifor

a=it1

```

```

if k eq 7 then begin

e1=histogram(it1, min=0, max=3)
print,'histo1985:',e1

eva1=intarr(213,229)

org=intarr(213,229)
openr,2,'1985_3_213.asc'
readf,2,org
close,2

for ix=0,nx-1 do begin
for iy=0,ny-1 do begin
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=1
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=2
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=3
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=4
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=5
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=6
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 1 then eva1(ix,iy)=7
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 2 then eva1(ix,iy)=8
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 3 then eva1(ix,iy)=9

endifor
endifor

z1=histogram(eva1,min=0,max=9)
print,'histo_eva1985:', z1
print,"
u=z1(1)+z1(3)+z1(7)+z1(9)
print,'korrekt urban85:',u
u1=long(z1(1))
print,'korrekt wohnen85:',u1
u2=long(z1(2))
print,'korrekt agrar85:',u2
u3=long(z1(9))
print,'korrekt industrie85:',u3
u1=z1(2)+z1(8)
print,'zuviel urban85:',u1
u2=z1(4)+z1(6)
print,'zuwenig urban85:',u2
print,"

openw,2,'eva1985.asc'
printf,2,eva1
close,2
endif

if k eq 9 then begin

e2=histogram(it1, min=0, max=3)
print,'histo1997:',e2

eva2=intarr(213,229)

org=intarr(213,229)
openr,2,'1997_3_213.asc'
readf,2,org
close,2

for ix=0,nx-1 do begin
for iy=0,ny-1 do begin
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 1 then eva2(ix,iy)=1
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 2 then eva2(ix,iy)=2
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 3 then eva2(ix,iy)=3
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 1 then eva2(ix,iy)=4
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 2 then eva2(ix,iy)=5
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 3 then eva2(ix,iy)=6
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 1 then eva2(ix,iy)=7
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 2 then eva2(ix,iy)=8

```

```

        if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 3 then eva2(ix,iy)=9

    endfor
endfor

z1=histogram(eva2,min=0,max=9)
print,'histo_eva1997:', z1

u=z1(1)+z1(3)+z1(7)+z1(9)
print,'korrekt urban97:',u
u1=long(z1(1))
print,'korrekt wohnen97:',u1
u2=long(z1(2))
print,'korrekt agrar97:',u2
u3=long(z1(9))
print,'korrekt industrie97:',u3
u1=z1(2)+z1(8)
print,'zuviel urban97:',u1
u2=z1(4)+z1(6)
print,'zuwenig urban97:',u2
print,"
openw,2,'eva1997.asc'
printf,2,eva2
close,2
endif
;
if k eq 10 then begin

e3=histogram(it1, min=0, max=3)
print,'histo2003:',e3

eva3=intarr(213,229)

org=intarr(213,229)
openr,2,'2003_3_213.asc'
readf,2,org
close,2

for ix=0,nx-1 do begin
for iy=0,ny-1 do begin
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 1 then eva3(ix,iy)=1
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 2 then eva3(ix,iy)=2
if it1(ix,iy) eq 1 and org(ix,iy) eq 3 then eva3(ix,iy)=3
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 1 then eva3(ix,iy)=4
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 2 then eva3(ix,iy)=5
if it1(ix,iy) eq 2 and org(ix,iy) eq 3 then eva3(ix,iy)=6
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 1 then eva3(ix,iy)=7
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 2 then eva3(ix,iy)=8
if it1(ix,iy) eq 3 and org(ix,iy) eq 3 then eva3(ix,iy)=9

endfor
endfor

z1=histogram(eva3,min=0,max=9)
print,'histo_eva2003:', z1

u=z1(1)+z1(3)+z1(7)+z1(9)
print,'korrekt urban03:',u
u1=long(z1(1))
print,'korrekt wohnen03:',u1
u2=long(z1(2))
print,'korrekt agrar03:',u2
u3=long(z1(9))
print,'korrekt industrie03:',u3
u1=z1(2)+z1(8)
print,'zuviel urban03:',u1
u2=z1(4)+z1(6)
print,'zuwenig urban03:',u2
print,"
openw,2,'eva2003.asc'
printf,2,eva3
close,2

```

```

endif
endfor

window,3,xsize=500,ysize=500
b=congrid(eva1,500,500)*100
tv,rotate(reverse(b),90)

window,4,xsize=500,ysize=500
b=congrid(org,500,500)*100
tv,rotate(reverse(b),90)

end

```

Appendix 10

```

;Bestimmung der pixelweisen Uebereinstimmung zweier
;Karten unter
;Berücksichtigung möglicher zufaelliger Uebereinstimmungen
;(nach Monserud und Leemans, 1992)
;Anzahl der Nutzungsklassen
d=3

; p(i,j): Anteil an den Gesamtpixeln, in denen Karte1 Nutzung
;i und Karte2 Nutzung j zeigt.
p=fitarr(d,d)
p(*,0)=[0.27,0.22,0.04]
p(*,1)=[0.01,0.27,0.03]
p(*,2)=[0.04,0.04,0.07]
print,"p:"
print,p

;"intraclass correlation coefficient"
p0=0.
;"overall proportion of chance-expected agreement"
pe=0

for i=0,d-1 do begin
p0=p0+ p(i,i)
pe=pe+ total(p(i,*))*total(p(*,i))
endfor

;normalisierter Ausdruck fuer p0-pe, "Kappa"
print,'Kappa:'
print,(p0-pe)/(1.-pe)

end

```