

Volker Bank & Anita Damm

**Mastery Learning im Klassenunterricht:
Problemformulierung für eine Untersuchung
mit Hilfe der Automatentheorie**

*Berichte aus der Berufs- und Wirtschaftspädagogik
Papers and Proceedings in Vocationomics
Nr. 5 – Oktober 2009*



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Professur für Berufs- und Wirtschaftspädagogik
Technische Universität Chemnitz
Chair of Vocationomics - Chaire de Vocationomie
University of Technology - Université de Technologie
D-09107 Chemnitz (Allemagne)

Mastery Learning im Klassenunterricht: Problemformulierung für eine Untersuchung mit Hilfe der Automatentheorie

Gliederung

(1)	Simulation und Didaktik	3
(2)	Grundgedanken des Mastery Learnings	4
(3)	Grundlagen der Automatentheorie	6
(4)	Zur Eignung der Automatentheorie als Simulationsverfahren	9
(5)	Darstellung des Simulationszusammenhanges anhand der Automatentheorie	11
(6)	Diskussion und Ausblick	16
	Literatur	19

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: von Neumann-Nachbarschaft.....	7
Abbildung 2a: Moore-Nachbarschaft.....	8
Abbildung 3: Werte des *Zeitaufwandes (ZA).....	12
Abbildung 4: Ausprägungen des *Instruktionsverständnisses (IV).....	12
Abbildung 5: Werte der benötigten *Lernzeit	13
Abbildung 6: Werte der *Ausdauer.....	13
Abbildung 7: Lernerfolgsgrad in UE ₁ (links) und in UE ₂ (rechts)	13
Abbildung 8: Lernerfolgsgrad in UE ₃ bei normaler (l) und bei geringer *Instruktionsqualität (r).....	14
Abbildung 9: Lernerfolgsgrad in UE ₂ bei normaler (l; s. Abb.8) und geringer *Instruktionsqualität (r).....	15
 Tabelle 1: Annahmen des Mastery Learnings und der Automatentheorie.....	 10
Tabelle 2: Übersicht über die spezifisch eingeführten Annahmen.....	12

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

'	Minuten	IV	Instruktionsverständnis
*	virtuelle Modellgröße (z.B. *Edukand: virt. Edukand)	T	Lehrkraft (teacher)
		L	Lernerfolgsgrad
		<i>min</i>	Minimum
aLZ	aufgewendete Lernzeit	r	Radius
A	Ausdauer	σ	Standardabweichung
bLZ	benötigte Lernzeit	UE	Unterrichtseinheit
μ	Erwartungswert	t	allgemein: Zeitpunkt (time)
f	funktionaler Zusammenhang	ZE	Zeiteinheiten
IQual	Instruktionsqualität	zLZ	zugestandene Lernzeit

Mastery Learning im Klassenunterricht: Problemformulierung für eine Untersuchung mit Hilfe der Automatentheorie

Die Konzeption des Mastery Learnings nimmt auf ein zentrales Problem des Klassenunterrichts bezug, nämlich in welcher Weise der Lernfortschritt der Schülerinnen und Schüler didaktisch zu bedenken ist. Während in aller Regel unterschiedliche Publikationen von *John B. Carroll* ohne inhaltliche Differenzierung zitiert werden (v.a. betrifft dieses *Carroll 1963, Carroll 1972*), behandelt *Carroll* in einem früheren Beitrag ein Modell des schulischen Lernens (präziser: des Lernens im Klassenverband). Dafür definiert er unterschiedliche Faktoren der Lernzeit und versucht, diese in eine in Ansätzen formale Darstellung zu überführen. Später wird das Konzept – teils auch durch andere – radikalisiert¹ zu dem, was wenigstens in der deutschen Didaktik mit dem Begriff des Mastery Learnings verbunden wird, nämlich daß tunlichst alle Schüler die Lernziele erreicht haben sollten, bevor eine Unterrichtseinheit mit neuen, weitergehenden Zielen begonnen wird (vgl. etwa *Eigler & Straka 1978, Kaiser 1991*).

Der Versuch einer Formalisierung didaktischer Zusammenhänge hat unserer Kenntnis nach wenig Folgen in der Theorie der Didaktik gezeitigt, was man wohl auch darauf zurückführen muß, daß nicht nur die Annahmen *Carrolls* recht restriktiv sind. Sicherlich aber ist die verkürzte Rezeption auch daher zu erklären, daß der Erkenntniswert des Modells sehr begrenzt ist, solange keine systematische Variation der Parameter und keine Dynamisierung der Zusammenhänge in zeitlicher Hinsicht möglich war. Mit der Weiterentwicklung der automatischen Rechentechnik auf den heutigen Stand ist dieser Aspekt zu einer Marginalie geworden, was es nahelegt, den seinerzeit offenbar abgebrochenen Diskurs wieder aufzunehmen. So soll in diesem Beitrag in einem ersten Schritt versucht werden, auf Grundlage der in anderen Disziplinen längst vorliegenden Erkenntnisse die Automatentheorie als Instrument zur Modellierung von kollektiven Lernprozessen fruchtbar zu machen. Es ist zu zeigen, daß eine simulative Darstellung unterrichtlicher Zusammenhänge in einer interpretierbaren Weise möglich ist und so der didaktischen Theoriebildung in neuartiger Form Raum für Erkenntnisgewinnung mittels Interpretation und weiterführender Betrachtungen der Simulationsläufe erreicht werden kann.

In Verfolgung dieser Absicht werden zunächst mögliche Bezüge zwischen Didaktik und Simulation skizziert (vgl. eingehender *Bank 2009a*). Ein zweiter Abschnitt widmet sich der Darlegung der Grundgedanken des Mastery Learnings, gefolgt von einem Einblick in die Grundlagen der Automatentheorie. In einem vierten Abschnitt wird die Automatentheorie auf ihre potentielle Eignung für das zu simulierende Problem hin untersucht. Dazu wird in einer noch sehr vorläufigen Form ein möglicher Implementationsansatz vorgestellt. Es schließt sich ein Entwurf für ein Modellierungsverfahren an, wonach gewonnene Einsichten, Erweiterungsmöglichkeiten und der damit verbundene Bedarf an weiterer Forschung diskutiert werden.

¹ *Bloom* griff das von *Carroll* initiierte Konzept auf und leitete daraus das Konzept des Mastery Learnings ab, welches als Grundlage für ein zielerreichendes Lernen eine Individualisierung des Unterrichts fordert. Vgl. hierzu bspw. *Bloom 1970; Bloom 1971*.

(1) Simulation und Didaktik

In der Didaktik – in diesem Falle verstanden als die Lehre vom gemeinsamen Unterricht² – hat man bislang im Grundsatz zwei Verfahren wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung gepflegt: Die im deutschen Idealismus vorangetriebenen Paradigmen von Analytik und Hermeneutik einerseits sowie andererseits die empirisch-synthetischen Verfahren, welche in aller Regel positivistisch, mitunter auch kritisch-rational angelegt sind und sich methodologisch des Instrumentariums der empirischen Sozialforschung bedienen. Letztere didaktische Forschungsrichtung setzt sich von der seit *Comenius* in ungebrochener Tradition betriebenen Didaktik zugleich in begrifflich akzentuierter Weise ab und benutzt die Bezeichnung ‚Lehr-Lernforschung‘.

Beide Paradigmen sind indes jeweils durch spezifische Mängel gekennzeichnet: Die empirische Sozialforschung ist zumeist auf stichpunktartige Messungen mit prinzipiell nicht kontrollierbaren Randbedingungen verwiesen. Die hier angesprochene Unkontrollierbarkeit der Randbedingungen resultiert aus der Singularität didaktischen Handelns sowohl über die Zeit als auch über die betrachteten Individuen. Infolgedessen ergeben sich Interpretationsschwierigkeiten hinsichtlich der zeitlichen Dynamik und damit zugleich abschnittsweise der Kausalitäten bei z.B. pfadanalytisch oder faktorenanalytisch ermittelten Zusammenhängen. Die analytischen Verfahren weisen eine insbesondere für unerfahrene Dritte gegebene Intransparenz hinsichtlich einer realweltlichen Relevanz des reflexiv Erkannten auf. In der Regel werfen sich die Vertreter der jeweiligen Paradigmen wechselseitig eben diese Schwächen vor.

Abgestützt auf die Erkenntnisse beider sich ausschließender Paradigmen ließe sich eine dritte Linie gründen: Die Simulation als Synthese beider Traditionen der Erkenntnisgewinnung, die dann ihrerseits in der Didaktik auch als Erkenntnisverfahren dienen kann. Diesem Ansatz gegenüber sind in der Didaktik Simulationsverfahren bislang ausschließlich als Unterrichtsmedien, nicht jedoch als Verfahren der Erkenntnisgewinnung eingesetzt worden. Die Parameter wären dann empirisch zu ermitteln, die ideale Analyse drückte sich in der Konstruktion des Simulationsmodelles und der Interpretation der errechneten Werte aus.

Durch Nutzung von Simulationsmodellen kann auch in unterrichtlichen Zusammenhängen die Komplexität eingeschränkt werden (*ceteris paribus*-Klausel). Zwar bedarf die Betrachtung von Lernprozessen in der Regel keiner hohen Anzahl von Datensätzen – schließlich ist Unterricht ein singulärer Prozeß, wie es schon von *Paul Heimann* deutlich gemacht worden ist³ – jedoch besteht bei einem experimentellen Vorgehen (d.h. mit kontrollierten und reproduzierbaren Randbedingungen) gerade deshalb die Schwierigkeit der Interpretation auf eine didaktische Praxis. Im Vergleich zu groß angelegten Feldstudien kann weiterhin der zeitliche Ablauf der Untersuchung erheblich verkürzt werden; auch die Kosten der Modellerstellung und Simulation sind verhältnismäßig gering. Gleichfalls können ethische Bedenken, die beispielsweise die Verantwortung der Auswahl bestimmter Edukanden betreffen, bei der Nutzung von Simulationen vermieden werden (vgl. hierzu im Einzelnen *Bank* 2009a, S. 11).

² Die Auffassung der Didaktik als Lehre vom gemeinsamen Unterricht ist methodologisch auf *Comenius* zurückzuführen, welcher 1657 in seiner „*Didactica Magna*“ den Didaktikbegriff zu grundlegend reformierte.

³ Vgl. *Heimann* 1962, S. 426: „Seine innere Wahrheit gewinnt ein ‚theoretisches Äquivalent‘ ... immer nur im Hinblick auf seine Übereinstimmung mit personalen, situativen und anderen objektiven Grundverhältnissen, denen entsprochen wird oder die verfehlt werden können.“

(2) Grundgedanken des Mastery Learnings

Die didaktische Reflexion von Klassenunterricht kann sich wahlweise sowohl auf die Beschreibung des Klassenunterrichts als Strukturmodell⁴ als auch auf prozessuale Aspekte des Klassenunterrichts konzentrieren. Ein Konzept, das sich mit der Gestaltung von Unterrichtsprozessen auseinandersetzt, ist das Mastery Learning bzw. das zielreichende Lernen, welches seinen Anstoß durch das 1963 von *Carroll* vorgestellte Model of School Learning erhielt.

Das Konzept des Mastery Learning gründet sich auf der Annahme, daß die Lerngeschwindigkeit der Edukanden näherungsweise normalverteilt ist. Da Unterrichtseinheiten zudem gewöhnlich zeitlich beschränkt sind, resultiert daraus eine (ebenfalls näherungsweise) Normalverteilung des Lernerfolges. Um den Lernerfolg zu erhöhen, muß demnach die zeitliche Beschränkung aufgehoben werden, was sich dann als rechtsgipfelige Kurve bei der Verteilung der Lernerfolge darstellte (vgl. *Carroll* 1972, S. 7 f.; *Ingenkamp* 1979, S. 14 sowie *Schwarzer* 1972, S. 17).⁵ Der Lerngeschwindigkeit als zeitlicher Größe kommt im Konzept des Mastery Learnings eine zentrale Bedeutung zu, sodaß versucht wird, so viele Einflußfaktoren des Lernerfolges wie möglich über Zeiteinheiten zu definieren (vgl. *Carroll* 1963, S. 724; *Ingenkamp* 1979, S. 16).

Bezüglich der die Unterrichtsprozesse kennzeichnenden Faktoren unterscheidet *Carroll* die Einflußfaktoren der benötigten Lernzeit von denen der aufgewendeten Lernzeit. Nach seinen Vorstellungen sollen dies für die *benötigte Lernzeit* Lerneignung, Instruktionsverständnis und die Qualität der Instruktion sein. Für die *aufgewendete Lernzeit* sind entsprechende Variablen Ausdauer und zugestandene Lernzeit. Diese Parameter sollen im Weiteren eingehender betrachtet werden.

Einen Einflußfaktor der benötigten Lernzeit stellt die **Lerneignung**⁶ dar, welche nach *Carroll* dem Zeitaufwand und somit der Menge an Zeit entspricht, die ein Edukand benötigt, um eine Problemstellung zu bewältigen. Da die Lerngeschwindigkeit als normalverteilt unterstellt wird, werden einige Schüler sehr wenig Zeitaufwand, andere dagegen einen unbestimmbar großen Zeitaufwand zur Bewältigung einer Aufgabe benötigen (vgl. *Carroll* 1963, S. 725; 1972, S. 8).

Als weiterer Faktor, der auf die benötigte Lernzeit einwirkt, wird das **Instruktionsverständnis** angeführt, welches *Carroll* als eine Kombination von allgemeiner Intelligenz und verbalen Fähigkeiten versteht. Ersteres zeigt sich in Situationen, in denen der Lernende eigenständig Begriffe und Beziehungen herleiten muss. Verbale Fähigkeiten sind gegeben, wenn die im Unterricht verwendete Sprache dem Lernenden zu Gebote steht (vgl. *Carroll* 1963, S. 726).⁷ *Carroll* schlußfolgert, daß Edukanden mit ausgeprägtem Instruktionsverständnis bei ungeeigneter Vermittlung einen Lehrstoff ohne zusätzlichen Zeitaufwand aufnehmen können; Edukanden mit einem geringen Instruktionsverständnis sind dagegen nicht in der Lage, den Lehrstoff ohne weiteren Bedarf an Zeiteinheiten zu bewältigen. Damit besteht eine unmittelbare Wechselwirkung zwischen dem Instruktionsverständnis

⁴ Vgl. zu einer schematischen, in methodischer Form rekonstruierten Darstellung des Unterrichts als Strukturmodell das Kölner Modell von *Jongbloed* und *Twardy* 1983.

⁵ Das Konzept des Mastery Learnings sieht neben einer Berücksichtigung des Zeitbedarfs u. a. auch die Individualisierung der Lernmaterialien und die Abkehr vom Lehrervortrag vor; vgl. bspw. *Carroll* 1972, S. 10; *Bloom* 1971, S. 21. Im Folgenden erfolgt jedoch eine Konzentration auf die Aufhebung der zeitlichen Beschränkung zur Erhöhung des Lernerfolges.

⁶ Der häufig vorzufindenden Übersetzung des Begriffes „aptitude“ (*Carroll* 1963, S. 725) mit dem Wort „Begabung“ (u. a. in *Carroll* 1973, *Ingenkamp* 1979, *Schwarzer* 1972) wird an dieser Stelle nicht gefolgt, da der Begabungsbegriff im Rahmen der Intelligenzdiagnostik fachsprachlich bereits in anderer Form festgelegt ist. Vgl. eingehender zur Bestimmung des Begabungsbegriffes *Rost* 2000, S. 15 ff. Nicht zuletzt würde für ‚Begabung‘ im Englischen auch eher die Bezeichnung ‚giftedness‘ verwendet werden.

⁷ Es ist zu überlegen, ob die Fähigkeit, dem Unterricht zu folgen, nicht dem herkömmlichen Begabungsbegriff entspricht; vgl. *Ingenkamp* 1979, S. 20.

nis und der Instruktionsqualität – dem dritten auf die benötigte Lernzeit Einfluß ausübenden Faktor (vgl. *Carroll* 1963, S. 727, 1972, S. 8).

Die **Qualität der Instruktion** wird nach dem Grad beurteilt, in dem die Präsentation, Erläuterung und Sequenzierung auf jeden Edukanden zugeschnitten ist. Treffen eine ‚schlechte‘ Instruktionsqualität und ein weniger ausgeprägtes Instruktionsverständnis aufeinander, wird der Zeitaufwand des Edukanden annahmegemäß zunehmen, wobei das Ausmaß der Zunahme durch das Instruktionsverständnis determiniert wird (vgl. *Carroll* 1963, S. 726 f., 1972, S. 8).

Unter Vernachlässigung einer Vielzahl möglicher weiterer Einflußgrößen kann die benötigte Lernzeit eines Edukanden als Funktion seines Zeitaufwandes aufgefaßt werden, welcher bei einer unzureichenden Instruktionsqualität wiederum eine Funktion des Instruktionsverständnisses darstellt:

Modellgleichung 1: Einflußfaktoren der benötigten Lernzeit

$$\text{bLZ [ZE]} = f(\text{ZA [ZE]}, \text{mit ZA} = f(\text{IV}), \text{falls IQual (klein)})$$

(+)(-)

mit:
bLZ: benötigte Lernzeit
ZE: Zeiteinheiten (z.B. Minuten)
IV: Instruktionsverständnis
IQual: Instruktionsqualität
ZA: Zeitaufwand

Die aufgewendete Zeit wird durch die **Ausdauer** des Lernenden und die zur Verfügung stehende Zeit beeinflusst. *Carroll* definiert Ausdauer als die Zeit, die der Lernende bereit ist aufzubringen, sich mit einer Lernaufgabe auseinanderzusetzen (vgl. 1963, S. 728 f.; 1972, S. 9). Als ausschlaggebend für die Ausdauer wird die Motivation angesehen, dabei ist es unerheblich, ob der Lernende intrinsisch oder extrinsisch motiviert ist. Die Folge einer geringen Ausdauer ist eine Reduzierung des Lernerfolges.

Die **zugestandene Lernzeit** entspricht der Zeit, die einem Lernenden zur Bewältigung einer Aufgabe gewährt wird. *Carroll* kritisiert, daß in den Schulen festgelegte Stundenpläne, welche jedem Schüler dasselbe Maß an Zeit zur Verfügung stellen, zur Anwendung kommen, woraus bei Vielen ein geringerer Lernerfolg resultiert (1963, S. 727 f.; 1972, S. 9).

Carroll nimmt an (1963, S. 730), daß die aufgewendete Lernzeit durch die kleinere der beiden Größen determiniert wird:

Modellgleichung 2: Einflußfaktoren der aufgewendeten Lernzeit

$$\text{aLZ} = \min(\text{A [ZE]}, \text{zLZ [ZE]})$$

(+)(+)

mit:
aLZ: aufgewendete Lernzeit
A: Ausdauer
zLZ: zugestandene Lernzeit

Das Verhältnis von aufgewendeter und benötigter Zeit bestimmt nun den Grad des Lernerfolges (*Carroll* 1963, S. 730):

**Modellgleichung 3a:
Bestimmung des Grades des Lernerfolges**

$$L = f \left(\frac{\text{aufgewendete Lernzeit}}{\text{benötigte Lernzeit}} \right)$$

Durch Einsetzen der jeweiligen Faktoren ergibt sich folgende Konkretisierung:

**Modellgleichung 3b:
präzisierte Bestimmung des Grades des Lernerfolges**

$$L = f \left(\frac{\min (A [ZE], zLZ [ZE])}{f (ZA [ZE], \text{mit } ZA = f (IV), \text{falls IQual (klein)})} \right)$$

Es ist Zielstellung des Mastery Learnings, möglichst alle Edukanden zu einem Grad des Lernerfolges von mindestens 1 zu führen,⁸ was zugleich bedeutet, daß den Edukanden die für die Bewältigung einer Aufgabe erforderliche Zeit auch gewährt werden muß (vgl. *Carroll* 1972, S. 9 f.; *Bloom* 1970, S. 21; *Ingenkamp* 1979, S. 22; *Schwarzer* 1972, S. 17).

Zentrales Anliegen einer simulativen Nachstellung des Konzepts ‚Mastery Learning‘ ist es an dieser Stelle, dem aufgezeigten Gedanken eines „Lernerfolges für alle“ (*Carroll* 1972, S. 7) als Makroeffekt einer Erhöhung der zugestandenen Lernzeit nachzugehen. Da einzelne Edukanden und sich eben solche u. U. ergebende Makroeffekte modelliert werden sollen, wird dieser Versuch mit Zellulären Automaten unternommen, welche in der Lage sind, aus einzelnen Elementen zustande kommende komplexe Strukturen wiederzugeben. Bevor die Anwendbarkeit Zellulärer Automaten für die simulative Nachstellung der Annahmen des Mastery Learnings untersucht wird, sollen zunächst die Grundlagen der Automatentheorie dargelegt werden.

(3) Grundlagen der Automatentheorie

Die Automatentheorie findet bisher vor allem in den Natur- und Ingenieurwissenschaften ihre Anwendung. Auch in den Sozialwissenschaften gibt es bereits eine Reihe von Ansätzen, dynamische Zusammenhänge anhand der Automatentheorie simulativ zu untersuchen. Zelluläre Automaten sind mathematische oder programmiersprachliche Gebilde, die sich aus einer großen Anzahl identischer und lokal interagierender Komponenten zusammensetzen. Sie dienen der Simulation von Interaktionen zwischen diesen Komponenten, die auf der Aggregatebene zur Herausbildung neuer Strukturen führen (vgl. *Gilbert & Troitzsch* 2005, S. 9; *Troitzsch* 2003, S. 358 f. sowie *Troitzsch* 2006, S. 524).

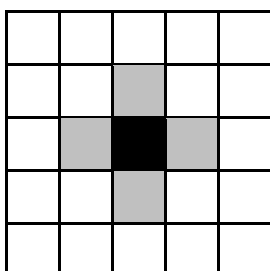
⁸ Nach *Carroll* (1963, S. 731) ist eine Leistung, die unter dem Verhältnis 1:1 steht, als „underachievement“ anzusehen, wobei „underachievement is now seen to be a state of affairs which results whenever perseverance is less than some ‘reasonable value’, whenever the quality of instruction is poor, whenever time allowed for learning has not been sufficient, or whenever a combination of these conditions has occurred.“
Leistungen, die über dem Verhältnis 1:1 stehen, bezeichnet *Carroll* als „overachievement“. „Overachievement“ kann eintreten (*Carroll* 1963, S. 731), „when there is an especially favorable combination of attendant events: high perseverance, high quality, or ample opportunity for learning.“

Zelluläre Automaten bestehen aus einem n-dimensionalen Gitter, welches sich aus Zellen zusammensetzt. Zu den weiteren grundlegenden Eigenschaften Zellulärer Automaten zählen (vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 210; 1996b, S. 176 f.):

- das Fortschreiten der Zeit in diskreten Zeitschritten,
- das Gegebensein einer endlichen Anzahl möglicher Zustände, von denen sich jede Gitterzelle genau in einem befinden kann,
- die Zustandsänderung der Zellen gemäß lokaler Regeln. Die Lokalität bezieht sich dabei auf Raum und Zeit, da der Zustand einer Zelle in $t+1$ nicht nur vom eigenen Zustand in t , sondern auch von den Zuständen der Nachbarzellen in t abhängt,
- die im Allgemeinen deterministische Festlegung von Übergangsregeln,
- das Anwenden derselben Anzahl möglicher Zustände und Übergangsregeln auf alle Zellen,
- die Anwendung der Übergangsregeln synchron auf alle Zellen oder anhand eines Zufallsmechanismus,
- die Reaktion der Gitterzellen auf simulierte Geschehnisse der Umwelt (vgl. *Troitzsch* 2003, S. 358; 2006, S. 518).

Welche Zellen als Nachbarzellen einer Zelle zu bestimmen sind, unterliegt der jeweils zugrundegelegten Nachbarschaftsdefinition. So kann in einem zweidimensionalen rechteckigen Gitter eine Zelle vier Nachbarn haben; benachbart sind dann Zellen, die durch eine gemeinsame Seite miteinander verbunden sind. Diese Nachbarschaftsform wird als von Neumann-Nachbarschaft bezeichnet (vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 210; 1996b, S. 177 sowie *Gilbert & Troitzsch* 2005; S. 134).

Abbildung 1:
von Neumann-Nachbarschaft



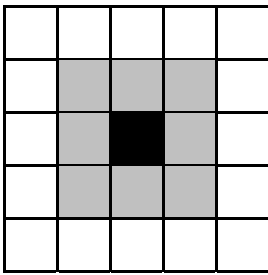
Quelle: *Hegselmann* 1996a, S. 211.

Die Moore-Nachbarschaft schließt indes auch Zellen ein, die sich nur an einer Ecke berühren, folglich besitzt jede Zelle 8 Nachbarn. Wird der Radius der Moore-Nachbarschaft erweitert, so erhält man die erweiterte Moore-Nachbarschaft, bei $r=2$ hat eine Zelle 24 Nachbarn (vgl. *Gerhardt & Schuster* 1995, S. 23).⁹

⁹ Werden die betrachteten Zellen als Teil ihrer Nachbarschaft mit einbezogen, so besteht die Nachbarschaft in der von Neumann-Nachbarschaft aus 5 Zellen, in der Moore-Nachbarschaft aus 9 Zellen und in der um zwei Ringe erweiterten Moore-Nachbarschaft aus 25 Zellen; vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 211; 1996b, S. 177.

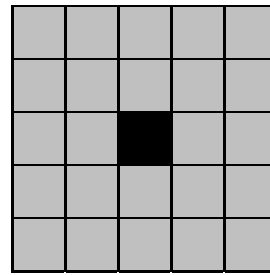
Die von Neumann- und die Moore-Nachbarschaft basieren auf der Grundlage rechteckiger Gitterstrukturen, lassen sich aber auch für andere zweidimensionale Strukturen definieren; vgl. *Hegselmann & Flache* 1998, S. 3. Für höhere Dimensionen sind ebenfalls Nachbarschaftskonzepte definierbar; vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 211; 1996b, S. 177.

**Abbildung 2a:
Moore-Nachbarschaft**



Quelle: *Hegselmann* 1996a, S. 211.

**Abbildung 2b:
Erweiterte Moore-Nachbarschaft**



Quelle: *Hegselmann* 1996a, S. 211

Die Ursprünge Zellulärer Automaten gehen auf *John von Neumann* und *Stanislaw Ulam* zurück, welche erstmals Ende der 40^{er} Jahre des 20. Jahrhunderts das Konzept Zellulärer Automaten entwickelten. Sie verfolgten das Ziel der Erarbeitung eines reduktionistischen Modells des Lebens und der Selbstproduktion. An Popularität gewannen Zelluläre Automaten, als *John Horton Conway* 1970 das ‚Game of Life‘ erfand, mit welchem er die Evolution simulierte (vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 211; 1996b, S. 175). Später wurden Zelluläre Automaten in zahlreichen naturwissenschaftlichen Gebieten angewendet (vgl. *Toffoli & Margolus* 1987). Sie dienten bspw. der Modellierung von Kristallwachstum, Diffusionsprozessen, Flüssigkeitsdynamiken und chemischen Reaktionen (vgl. *Hegselmann* 1996a, S. 211; 1996b, S. 175, *Gilbert & Troitzsch*, S. 8 f.). Zu den Klassikern sozialwissenschaftlicher Anwendungen zählen *Sadokas* ‚Checkerboard Model of Social Interaction‘ (1971) und *Schellings* ‚Segregationsmodell‘ (1971).

Es ist an dieser Stelle nicht möglich, alle Beiträge zur Modellierung sozialwissenschaftlicher Fragestellungen mit Hilfe der Automatentheorie entsprechend zu würdigen,¹⁰ sodaß im Folgenden eine Beschränkung auf eine exemplarische Kurzdarstellung der Modelle *Sadokas*, *Schellings* sowie eines Modells von *Hegselmann*, das die Entstehung von Solidarbeziehungen simuliert, erfolgt.

Sadoka untersucht in seiner Arbeit die Entstehung sozialer Segregation in Abhängigkeit der Einstellungen gegenüber den Mitgliedern der eigenen bzw. der anderen Gruppe. In diesem Modell leben die Angehörigen zweier Gruppen auf einem Schachbrett, das nicht vollständig besetzt ist. Die Akteure weisen positive, neutrale oder negative Valenzen (+1, 0, -1) gegenüber den Mitgliedern der eigenen bzw. der anderen Gruppe auf. Den Individuen wird eine Wanderungsoption innerhalb eines 3×3-Migrationsfensters zugestanden; sind dort keine leere Zellen vorhanden, kann innerhalb einer 5×5-Nachbarschaft gewandert werden. Die Wanderungschancen werden genutzt, um Standorte aufzusuchen, an denen die Summe der gewichteten Valenzen, aufsummiert über die ganze Welt, maximal ist. Das Gewicht der Valenzen nimmt mit der Entfernung ab. Die Akteure verfolgen das Ziel, sich möglichst nahe bei Agenten zu befinden, die sie positiv bewerten und Abstand zu solchen Agenten zu halten, die sie als negativ erachten. *Sadoka* nimmt in seiner Untersuchung einen Vergleich zweier unterschiedlicher Einstellungsmuster vor: *segregation* beschreibt ein Einstellungsmuster, bei welchem die Akteure eine positive Einstellung zur eigenen Gruppe und eine negative zur anderen Gruppe aufweisen; *suspicion* nennt *Sadoka* ein Einstellungsmuster, bei dem die Akteure Angehörigen der eigenen Gruppe neutral und Angehörigen der anderen Gruppe negativ gegenüberstehen. Kontraintuitiv zeigt sich bei *Sadoka* (S. 126 ff.), welcher die Simulation zweier Gruppen mit jeweils 6 Mitgliedern auf einem 8×8-Gitter durchführte, daß sich bei beiden Einstellungsmustern eine maximale Segregation als stabiler Endzustand einstellt: beide Gruppen versammelten sich je-

¹⁰ Weitere Beiträge finden sich bspw. in *Hegselmann* 1996a sowie verschiedentlich in dem im Internet erscheinenden Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>

weils in den gegenüberliegenden Ecken des Gitters. Eine Neuprogrammierung durch *Hegselmann & Flache* 1998 in einer 40×40-Welt mit 100 Agenten je Gruppe erbrachte noch überraschendere Ergebnisse (S. 9 f.): Neutralität gegenüber der eigenen Gruppe kann zu einer stärkeren Segregation als eine positive Einstellung zur eigenen Gruppe führen. Bei beiden Einstellungsmustern ‚fliehen‘ die Akteure vor den Angehörigen der anderen Gruppe. Allerdings gewinnt bei dem Einstellungsmuster *segregation* bei Aufeinandertreffen zweier Akteure der gleichen Gruppe ein Ort derart an Attraktivität, daß ggf. der Anreiz zur Flucht nicht mehr besteht. Dies trifft für das Einstellungsmuster *suspicion* nicht zu, ein jeder Akteur wird immer einen maximalen Abstand zu Angehörigen der anderen Gruppe halten, sodaß der Effekt der Clusterung, welcher erst bei einer deutlich größeren Weltgröße auftritt, stärker ist.

Auch *Schelling* widmet sich 1971 der Analyse menschlichen Migrationsverhaltens. Er nimmt an, daß zwei Bevölkerungsgruppen in einer zweidimensionalen Welt, die nicht vollständig besetzt ist, leben. Ein jeder Akteur ist von 8 Nachbarzellen umgeben (Moore-Nachbarschaft). Die Angehörigen einer Bevölkerungsgruppe weisen gegenüber den Angehörigen der anderen Bevölkerungsgruppe eine Toleranzschwelle auf, welche sie dazu veranlaßt, ihren Standort zu wechseln, wenn der Anteil an der anderen Bevölkerungsgruppe in der Nachbarschaft diese Toleranzschwelle überschreitet. Im Ergebnis zeigt sich, daß bereits niedrige Nachbarschaftspräferenzen für eine weitgehende Segregation ausreicht, wie auch eine Replikation *Hegselmanns & Flaches* bestätigt, welche feststellen, daß es erst ab einer Nachbarschaftspräferenz deutlich unter 30 % keine Ghettosierung mehr zu geben scheint (1998, S. 10 f.).

Ein Modell, das sich mit Kooperationsproblemen in dynamischen Netzwerken beschäftigt, ist die Modellierung der vorteilsorientierten Partnersuche von *Hegselmann*. Dabei steht bei *Hegselmann* die Fragestellung, ob in einer durch rationale Egoisten bevölkerten Welt Solidarnetzwerke entstehen können, im Vordergrund. Er modelliert die Partnersuche mit Hilfe einer aus 21×21 Zellen bestehenden Welt. Es wird die von Neumann-Nachbarschaft zugrundegelegt, sodaß ein Akteur nur mit seinen vier Nachbarn Kooperationsbeziehungen eingehen kann. Wiederholte Kooperationsbeziehungen werden eingegangen, wenn eine hinreichende Dauer der Beziehung zu erwarten ist und der Partner als hinreichend attraktiv befunden wird. Den Akteuren wird eine Wanderungsoption innerhalb eines festgelegten Mobilitätsradius zugestanden. Ein Individuum wird zu einem solchen Standort ‚umziehen‘, an dem die für ihn attraktivsten Partner gerade noch dazu bereit sind, mit ihm zu kooperieren. Die Experimente zeigen, daß sich geschlossene Netzwerke bilden, in denen vor allem Agenten gleicher Attraktivität miteinander kooperieren. Dabei formen die attraktivsten Individuen den Kern des Netzwerkes. Die am wenigsten attraktiven Akteure werden ausgesondert und sind häufig an den Rändern des Netzwerkes aufzufinden. Insgesamt wird deutlich, daß auch innerhalb einer egoistischen und ungleich bevölkerten Welt Solidarnetzwerke entstehen können, welche jedoch Züge einer Klassensegregation aufweisen (vgl. *Hegselmann* 1996b, S. 192 ff.).

(4) Zur Eignung der Automatentheorie als Simulationsverfahren

Wie bereits angedeutet, scheinen Zelluläre Automaten die Auswirkungen einer Erhöhung der zugestandenen Lernzeit darbieten zu können. Dieses Anliegen umfaßt jedoch weitere Vorstellungen – zugleich Anforderungen an ein geeignetes Simulationsinstrument – hinsichtlich einer simulativen Nachstellung der Annahmen des Mastery Learnings:

Es gilt zunächst einmal, eine endliche Anzahl an Edukanden als ungeteilte Einheiten zu repräsentieren. Zudem soll ein jeder *Edukand¹¹ durch den Zustand ‚Grad des Lernerfolges‘ gekennzeichnet

¹¹ Wenn von keiner realen sondern einer modellierten Variablen die Rede ist, ohne das dieses sprachlich unmittelbar deutlich wird („Modelledukand“), soll zur besseren Unterscheidung ein Asterisk vorangestellt werden (*Edukand).

werden. Eine Variation des Grades des Lernerfolges sei Folge einer Modifikation der zugestandenen Lernzeit oder der Instruktionsqualität. Weiterhin erfolgen die Zustandsänderungen zu diskreten Zeitpunkten. Es wird eine einheitliche Erhöhung der zugestandenen Lernzeit für sämtliche Edukanden gleichzeitig vorgenommen. Nicht zuletzt ist von einer sich im Klassenunterricht vollziehenden Wissensweitergabe von der Lehrkraft auf die Edukanden auszugehen.

Es zeigt sich, daß die bereits erläuterten Eigenschaften Zellulärer Automaten mit den gestellten Anforderungen korrespondieren, wie nachstehende Übersicht verdeutlicht.

Tabelle 1:
Annahmen des Mastery Learnings und der Automatentheorie

Mastery Learning	Zelluläre Automaten (vgl. <i>Hegselmann</i> 1996a, S. 210 f.)
diskrete Repräsentation einer endlichen Anzahl von Edukanden	n-dimensionales Gitter, welches sich aus diskreten Zellen zusammensetzt
Modellierung des Grades des Lernerfolges als Zustand eines jeden Edukanden	Existenz einer endlichen Anzahl von Zuständen, von denen sich jede Zelle genau in einem befinden kann
Zustandsänderungen der Edukanden infolge einer Modifikation der zugestandenen Lernzeit oder der Instruktionsqualität	Zustandsänderungen der Zellen in Abhängigkeit vom eigenen Zustand und/oder den Zuständen der Nachbarzellen und/oder den Geschehnissen in der simulierten Umwelt
Zustandsänderungen erfolgen zu diskreten Zeitpunkten	Fortschreiten der Zeit in diskreten Zeitschritten
einheitliche Erhöhung der zugestandenen Lernzeit für alle Edukanden	Homogenität im Sinne des Anwendens derselben Übergangsregeln auf alle Zellen
Zeiterhöhung betrifft alle Edukanden gleichzeitig	Anwendung der Übergangsregeln simultan auf alle Zellen möglich
Darstellung der sich im Klassenunterricht vollziehenden Wissensweitergabe	Moore-Nachbarschaften schließen diagonale Zellen ein

Während Makrosimulationsmodelle nur den Zustand eines Objektes darzustellen vermögen, können mit Mikrosimulationsmodellen eine endliche Anzahl von Edukanden sowie deren Zustände modelliert werden (vgl. *Troitzsch* 2006, S. 509 ff.). Damit erscheint eine angemessene Repräsentation des in der eingangs formulierten Problemstellung als wesentlich definierten Klassenzusammenhanges möglich. Allerdings erfolgen Zustandsänderungen bei Mikrosimulationsmodellen nur aufgrund der Eingriffe des Experimentators (vgl. *Troitzsch* 2006, S. 518), sodaß bei einer simulativen Nachstellung der Annahmen des Mastery Learnings die Wechselwirkung zwischen Instruktionsqualität und Instruktionsverständnis nicht berücksichtigt werden könnte. Zudem ist hier nicht das mit Mikrosimulationsmodellen bezweckte Anliegen, einen Gesamteffekt im Sinne einer Aggregation der einzelnen Lernerfolgsgrade zu untersuchen.

Insgesamt zeigt die Tabelle 1 aber sehr deutlich, daß aufgrund der Eigenschaften Zellulärer Automaten die eingangs gestellte Fragestellung mit den bei Modellen unvermeidlich zu machenden Einschränkungen untersucht werden kann; und so soll im Folgenden der Versuch unternommen werden, einen möglichen Weg zur Implementation eines Simulationsmodells zur Abbildung der Annahmen *Carrolls* vorzustellen.

(5) Darstellung des Simulationszusammenhanges anhand der Automatentheorie

Zunächst wird festgelegt, daß sich ein *Edukand, symbolisiert als Gitterzelle in genau einem von mehreren Zuständen befinden kann. Ein Zustand wird hier als ein Merkmalskomplex aufgefaßt, sodaß der *Zeitaufwand, die *Ausdauer und das *Instruktionsverständnis einen *Edukanden kennzeichnen.¹²

Um die sich im Klassenunterricht vollziehende Wissensweitergabe von der *Lehrkraft (T) auf die *Edukanden darzustellen, wird ein 5×5-Quadratgitter unter Anwendung der erweiterten Moore-Nachbarschaft zugrunde gelegt (vgl. noch einmal Abbildung 2b), wobei davon ausgegangen wird, daß die Zelle der Lehrkraft kein Teil ihrer Nachbarschaft ist. Die *Lehrkraft besitzt also 24 Nachbarn, respektive unterrichtet 24 *Edukanden.¹³

Gemäß den Annahmen des Mastery Learnings werden der Zeitaufwand und die Ausdauer in Zeiteinheiten (ZE) ausgedrückt, hier in *Minuten spezifiziert. Es wird angenommen, daß jeweils 1/3 der *Edukanden einen Zeitaufwand zwischen $0' < ZE \leq 30'$ sowie zwischen $90' < ZE \leq 120'$ aufweisen; die restlichen 18 *Edukanden benötigen zwischen $30' < ZE \leq 90'$, um eine *Problemstellung zu bewältigen.¹⁴

Eine entsprechende Vorgehensweise wird für die Festlegung der Ausdauer gewählt, wobei auch hier die Verteilung der Werte zufällig erfolgt, d. h. es wird nicht unmittelbar unterstellt, daß eine hohe *Lerneignung mit einer hohen *Ausdauer einhergeht.

Das *Instruktionsverständnis sei näherungsweise als normalverteilt unterstellt und kann bei den in dieser Klasse repräsentierten *Edukanden Ausprägungen zwischen $\mu - \sigma$ und $\mu + \sigma$ annehmen. Die *Instruktionsqualität wird vereinfachend nominal mit den Merkmalsausprägungen ‚gut‘ oder ‚schlecht‘ skaliert. Gemäß den Annahmen *Carrolls* erhöht sich der Zeitbedarf eines Edukanden bei minderwertiger Instruktionsqualität in Abhängigkeit vom vorhandenen Instruktionsverständnis.

Da es zu untersuchen gilt, ob ein Schüler alles lernen könne, wenn ihm nur ausreichend Zeit zur Verfügung gestellt wird, wird eine Simulation dreier *Unterrichtseinheiten vorgenommen, in welcher die anfänglich *zugestandene Lernzeit von 90' um jeweils 30' erhöht wird. Die Werte und Ausprägungen des *Zeitaufwandes, der *Ausdauer und des *Instruktionsverständnisses werden in allen drei *Unterrichtseinheiten konstant gehalten. Da der Implementationsansatz insgesamt wenig komplex ist, soll zusätzlich zur Variation der *zugestandenen Lernzeit zugleich die *Instruktionsqualität im Übergang von der ersten zur zweiten *Unterrichtseinheit verbessert werden. Eine Veränderung der benötigten *Lernzeit in der zweiten oder dritten *Unterrichtseinheit ist demnach nur Folge einer verbesserten *Instruktionsqualität, welche in der ersten *Unterrichtseinheit eine schlechte sei und in der zweiten und dritten *Unterrichtseinheit eine Verbesserung erfährt.

Nachfolgende Übersicht präzisiert die eingeführten Annahmen:

¹² Vgl. hierzu *Bank 2004*, S. 114 ff., welcher vor dem Hintergrund der Struktur der Organisationsentwicklung die Organisation als ein Merkmal oder Merkmalskomplex des Systems einordnet.

¹³ Natürlich kann die Nachbarschaft auch ausgeweitet werden. Die Repräsentation von 24 Edukanden soll an dieser Stelle allerdings genügen.

¹⁴ Die Zuweisung der Werte zu den Edukanden erfolgt nach dem Zufallsprinzip.

Tabelle 2:
Übersicht über die spezifisch eingeführten Annahmen

UE ₁	UE ₂	UE ₃
Zugestandene Lernzeit: 90'	• Zugestandene Lernzeit: 120'	• Zugestandene Lernzeit: 150'
Zeitaufwand: 3 Edukanden: $0' < ZE \leq 30'$ 18 Edukanden: $30' < ZE \leq 90'$ 3 Edukanden: $90' < ZE \leq 120'$	• Zeitaufwand: unverändert zu UE ₁	• Zeitaufwand: unverändert zu UE ₁ , UE ₂
Ausdauer: 3 Edukanden: $0' < ZE \leq 30'$ 18 Edukanden: $30' < ZE \leq 90'$ 3 Edukanden: $90' < ZE \leq 120'$	• Ausdauer: unverändert zu UE ₁	• Ausdauer: unverändert zu UE ₁ , UE ₂
Instruktionsverständnis: 4 Edukanden: $IV < \mu - \sigma$ 8 Edukanden: $\mu - \sigma \leq IV < \mu$ 8 Edukanden: $\mu \leq IV \leq \mu + \sigma$ 4 Edukanden: $IV > \mu + \sigma$	• Instruktionsverständnis: unverändert zu UE ₁	• Instruktionsverständnis: unverändert zu UE ₁ , UE ₂
Instruktionsqualität ▪ wenn $IV < \mu - \sigma$, dann ZA + 30' ▪ wenn $\mu - \sigma \leq IV < \mu$, dann ZA + 20' ▪ wenn $\mu \leq IV \leq \mu + \sigma$, dann ZA + 10'	• Instruktionsqualität ▪ wenn $IV < \mu - \sigma$, dann ZA - 30' ▪ wenn $\mu - \sigma \leq IV < \mu$, dann ZA - 20' ▪ wenn $\mu \leq IV \leq \mu + \sigma$, dann ZA - 10'	• Instruktionsqualität: unverändert zu UE ₂

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die für die *Edukanden aleatorisch ermittelten Ausgangswerte und Ausprägungen des *Zeitaufwandes und des *Instruktionsverständnisses auf:

Abbildung 3:
Werte des *Zeitaufwandes (ZA)

90	32,1	37,3	83,2	39
95	55	22	74,6	66
71	34	T	79	101
63,5	26	49	29	47
115	81,9	43	42	32

Abbildung 4: Ausprägungen des *Instruktionsverständnisses (IV)

					mit	#
					IV <	4
		T			$\mu - \sigma \leq IV < \mu$	8
					$\mu \leq IV \leq \mu + \sigma$	8
					IV > $\mu + \sigma$	4

Da in der ersten *Unterrichtseinheit die *Instruktionsqualität als ‚schlecht‘ unterstellt wird, erhöht sich der *Zeitaufwand entsprechend der getroffenen Annahmen, sodaß sich die benötigte *Lernzeit der *Edukanden in der ersten *Unterrichtseinheit aus dem *Zeitaufwand zuzüglich der *zusätzlich benötigten Zeit infolge der schlechten *Instruktionsqualität und eines nicht ausreichenden *Instruktionsverständnisses zusammensetzt (vgl. Abbildung 5).

Weiterhin sei angenommen, daß den Modelledukanden folgende aleatorisch ermittelte Werte der *Ausdauer zugeordnet werden:

Abbildung 5:
Werte der benötigten *Lernzeit

100	42,1	57,3	103,2	59
115	75	22	104,6	76
101	44	T	99	121
73,5	56	49	39	77
125	101,9	53	42	32

Abbildung 6:
Werte der *Ausdauer

52,7	36	50	70,7	63,5
48	57	1	95,7	62,7
69,5	82,3	T	45	44,1
21	80,4	86	11	81
64,1	39,5	100	73,4	113

Die *Lernerfolge der ersten *Unterrichtseinheit werden nun anhand der Modellgleichung 3 ermittelt. Unter Verwendung der Schreibweise (Zeile, Spalte) für die Gitterzellenposition ergibt sich bspw. für den *Edukanden (1,1), welcher einer *Lernzeit von 100 Minuten benötigt und über eine *Ausdauer von 52,7 Minuten verfügt,

$$(1) \quad L = \frac{\min(90', 52,7')}{100'} = \frac{52,7'}{100'} = 0,53.$$

Da die *Ausdauer mit 52,7' kleiner als die *zugestandene Lernzeit ist, beträgt der Grad des *Lernerfolges bei Angabe des jeweiligen *Lernerfolgsgrades mit einer Genauigkeit von auf zwei Nachkommastellen 0,53.

In entsprechender Weise kann der *Lernerfolgsgrad für alle *Edukanden ermittelt werden. Wird nun festgelegt, daß von einem angemessenen Lernerfolg gesprochen werden kann, wenn $L \geq 1$, ein mittlerer Lernerfolg eingetreten ist, wenn $0,5 \leq L < 1$ und ein Lernerfolg bei $L < 0,5$ versagt bleibt, so ergibt sich in der ersten *Unterrichtseinheit in Abbildung 7 tabellarisch visualisiertes Gesamtbild der Klasse nach der ersten und nach der zweiten *Unterrichtseinheit.

Abbildung 7:
Lernerfolgsgrad in UE₁ (links) und in UE₂ (rechts)

0,53	0,86	0,87	0,69	1,08	mit	#	0,59	1,12	1,34	0,85	1,63	#
0,42	0,76	0,05	0,86	0,83			0,51	1,04	0,05	1,28	0,95	
0,69	1,87	T	0,45	0,36	L < 0,5	7	0,98	2,42	T	0,57	0,44	5
0,29	1,44	1,76	0,28	1,05	$0,5 \leq L < 1$	9	0,33	3,09	1,76	0,38	1,72	7
0,51	0,39	1,70	1,75	2,81	$L \geq 1$	8	0,56	0,48	2,33	1,75	3,53	12

Da die *zugestandene Lernzeit erhöht wird, müßte der *Lernerfolg gemäß den Annahmen des Mastery Learnings in der zweiten *Unterrichtseinheit bei allen *Schülern steigen, wobei die hauptsäch-

liche Veränderung wohl in einer Erhöhung der Lernerfolge der lernschwächeren *Schüler zu sehen ist.

Weil nun gleichzeitig die *Instruktionsqualität verbessert wird, benötigen alle *Edukanden weniger Zeit, sodaß sich die Werte der *benötigten Lernzeit verringern (vgl. Tabelle 2). Die *Ausdauer sei konstant zu UE₁; gleiches wird für das *Instruktionsverständnis angenommen. Für den *Edukanden mit den Koordinaten (1,1) zum Beispiel werden für die Bestimmung von L eine benötigte *Lernzeit von 90 Minuten, eine *Ausdauer von 52,7 Minuten und eine *zugestandene Lernzeit von 120 Minuten zugrunde gelegt, sodaß

$$(2) \quad L = \frac{\min(120', 52,7')}{90'} = 0,59'.$$

Für die betrachtete *Klasse ergeben sich nun erkennbar verbesserte Werte für die *Lernerfolge (vgl. noch einmal Abb. 7, rechter Teil). Es zeigt sich bei allen *Edukanden ein höherer Grad des *Lernerfolges; insgesamt bleiben nur noch fünf anstatt sieben *Edukanden unter einem Grad des *Lernerfolges von weniger als 0,5 und damit im mangelhaften Bereich. Die Zahl der *Edukanden, welche einen mittleren Grad des *Lernerfolges erzielt haben, ist von neun auf sieben gesunken; einen hohen Grad beim *Lernerfolg ($L \geq 0,7$) weisen in UE₂ 12 *Schüler auf, was einem Anstieg um vier *Schüler entspricht.

Man wird nun erwarten, daß eine nochmalige *Zeiterhöhung zu einem weiteren Anstieg der *Lernerfolge führt, weshalb in der dritten *Unterrichtseinheit die *zugestandene Lernzeit auf 150 Minuten erhöht wird. Gleichzeitig bleiben die Werte und Ausprägungen der *Ausdauer und des *Instruktionsverständnisses unverändert. Da die *Instruktionsqualität analog zur zweiten *Unterrichtseinheit UE₂ als ‚gut‘ unterstellt sei, bleiben ebenso die *benötigten Lernzeiten der *Edukanden konstant zu UE₂. Somit gilt für den *Edukanden (1,1) in der folgenden Einheit UE₃:

$$(3) \quad L = \frac{\min(150', 52,7')}{90'} = 0,59'.$$

Abbildung 8 zeigt die *Lernerfolge aller *Schüler in UE₃ auf.

Abbildung 8:
Lernerfolgsgrad in UE₃ bei normaler (l) und bei geringer *Instruktionsqualität (r)

					mit	#						#	
0,59	1,12	1,34	0,85	1,63			0,53	0,86	0,87	0,69	1,08		
0,51	1,04	0,05	1,28	0,95			0,42	0,76	0,05	0,91	0,83		
0,98	2,42	T	0,57	0,44	L < 0,5	5	0,69	1,87	T	0,45	0,36	7	
0,33	3,09	1,76	0,38	1,72	0,5 ≤ L < 1	7	0,29	1,44	1,76	0,28	1,05	9	
0,56	0,48	2,33	1,75	3,53	L ≥ 1	12	0,51	0,39	1,89	1,75	3,53	8	

Trotz der Erhöhung der *zugestandenen Lernzeit in UE₃ bleiben die Werte der *Lernerfolge im Vergleich zu UE₂ unverändert. Daran wird bereits deutlich, daß der Grundgedanke des Mastery Learnings, nämlich daß *alle* *Klassenmitglieder das Lernziel vollständig erreichen, nicht ohne weiteres realisierbar ist. Es stellt sich die Frage, weshalb in der zweiten *Unterrichtseinheit eine Erhöhung des *Lernerfolgsgrades stattgefunden hat, während in der dritten *Unterrichtseinheit kein Anstieg eingetreten ist.

In UE₂ wurden die Werte der *benötigten Lernzeit aufgrund der Erhöhung der *Instruktionsqualität angepaßt, was sich durch einen geringeren *Zeitbedarf der *Edukanden ausdrückt. Die Erhöhung der *Lernerfolge resultiert folglich nicht aus einer *Zeitausweitung, sondern aus der Verbesserung der *Instruktionsqualität und der damit einhergehenden Verringerung der benötigten *Lernzeiten.

Wird in der zweiten *Unterrichtseinheit davon ausgegangen, daß die *Qualität der Instruktion eine geringe bleibt und daher keine Verringerung der *benötigten Zeiten erfolgt, würde sich der *Lernerfolgsgrad L bei dem *Edukanden (1,1) ergeben als

$$(4) \quad L = \frac{\min(120', 52,7')}{100'}$$

Der *Lernerfolgsgrad aller *Edukanden berechnet sich jeweils wie folgt:

Abbildung 9:

Lernerfolgsgrad in UE₂ bei normaler (l; s. Abb.8) und geringer *Instruktionsqualität (r)

0,59	1,12	1,34	0,85	1,63	mit	#	0,53	0,86	0,87	0,69	1,08	#
0,51	1,04	0,05	1,28	0,95			0,42	0,76	0,05	0,91	0,83	
0,98	2,42	T	0,57	0,44	L < 0,5	5	0,69	1,87	T	0,45	0,36	7
0,33	3,09	1,76	0,38	1,72	0,5 ≤ L < 1	7	0,29	1,44	1,76	0,28	1,05	9
0,56	0,48	2,33	1,75	3,53	L ≥ 1	12	0,51	0,39	1,89	1,75	3,53	8

Außer bei den *Edukanden (2,4), (5,3) und (5,5) bleiben die *Lernerfolge konstant zu denen in UE₁. Bei den bezeichneten *Edukanden ist die Zunahme der *Lernerfolge den hohen Werten der *Ausdauer geschuldet. Diese lagen in UE₁ über der *zugestandenen Lernzeit, in UE₂ stellen dagegen die Werte der *Ausdauer die geringeren Größen dar, wodurch angestiegene *Lernerfolge zu begründen sind. Bei nochmals unterstellter geringer *Qualität der Instruktion in UE₃ wäre als Illustration des *Lernerfolgsgrades auf die Abbildungen 8 (rechter Teil) und 9 zu verweisen. Auch eine abermalige Erhöhung der *zugestandenen Lernzeit kann dem Überschreiten dieser über die Werte der *Ausdauer keine Abhilfe verschaffen.

Eine einmalige Erhöhung der *Lernerfolge tritt somit nur bei *Edukanden ein, bei denen in der ersten *Unterrichtseinheit die Werte der *Ausdauer über der *zugestandenen Lernzeit liegen. Eine anhaltende Erhöhung des Grades des *Lernerfolges des *Edukanden (i,j) kann dagegen nur unter Einbeziehung weiterer Annahmen erreicht werden:

Überschreitet die *Ausdauer des *Edukanden (i,j) in der ersten *Unterrichtseinheit die *zugestandene Lernzeit, muß trotz Erhöhung der *zugestandenen Lernzeit die *Ausdauer in folgenden *Unterrichtseinheiten den größeren Wert darstellen. Stellt dagegen in der ersten *Unterrichtseinheit die *zugestandene Lernzeit den größeren Wert dar, muß mit der Erhöhung der *zugestandenen Lernzeit gleichfalls eine Erhöhung der *Ausdauer einhergehen. Auch hier soll die Bedingung gelten, daß diese in folgenden *Unterrichtseinheiten über der *zugestandenen Lernzeit liegt, damit die beabsichtigte Wirkung der didaktischen Entscheidung auch eintreten kann.

Formal können diese Bedingungen wie folgt ausgedrückt werden:

Gilt in UE_1 : $A(i,j) > zLZ$,

so muß für $UE_{t=2,3,\dots}$ gelten: $A(i,j)_{UE(t)} > zLZ_{UE(t-1)} + (zLZ_{UE(t)} - zLZ_{UE(t-1)})$.

Gilt in UE_1 : $A(i,j) < zLZ$,

so muß für $UE_{t=2,3,\dots}$ gelten: $A(i,j)_{UE(t-1)} + (A(i,j)_{UE(t)} - A(i,j)_{UE(t-1)}) > zLZ_{UE(t-1)} + (zLZ_{UE(t)} - zLZ_{UE(t-1)})$.

Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, beruht ein Anstieg der ^{*}Lernerfolge auf einer Erhöhung der Werte der ^{*}Ausdauer, anstatt Resultat einer Ausweitung der ^{*}zugestandenen Lernzeit zu sein.

Es ist auf der Grundlage der Modellergebnisse interpretativ festzuhalten, daß ein „Lernerfolg für alle“ (s.o.) nur eintreten kann, wenn vorausgesetzt wird, daß alle Edukanden länger dazu bereit sind, sich mit einem Inhalt zu beschäftigen, als eine Unterrichtseinheit es zunächst zuläßt. Gemäß *Carroll* müßte die Ausdauer durch einen „reasonable value“ gekennzeichnet sein (1963, S. 731). Die Frage nach einer Präzisierung und Operationalisierung dessen, was als vernünftig erscheint, bleibt auch dort allerdings unbeantwortet.

Wenn auch einfach gehalten, zeigt schon der hier vorgenommene Simulationsansatz somit die Grenzen der Annahmen *Carrolls* auf und dokumentiert bereits in diesem ersten Versuch, daß Zelluläre Automaten auch in didaktischen Zusammenhängen als Erkenntnisinstrument fungieren können.

(6) Diskussion und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Modell – oder besser: mit diesem Modellansatz, denn es wird eine weitere Ausdifferenzierung nötig sein, bevor der angestrebte epistemische Wert der Simulation seine volle Tragkraft entwickeln kann – erfolgt eine stufenweise dynamische Modellierung, deren Wertgrößen in deterministischer Form verändert werden. Diese Wertgrößen sind auf einer abschnittsweise linear transformierten rationalen Zahlengrundlage diskreten Gitterzellen zugewiesen (vgl. die Beschreibungskriterien von Modellen bei *Saam* 2005b, S. 196 f.).

Ohne jede Frage ist dieser Ansatz einer simulativen Darstellung des Lernerfolges im Klassenkontext noch nicht anders als rudimentär zu bezeichnen. Die ^{*}Klasse ist in ihrer Sozialstruktur starr und überaus eng definiert. Die Dynamik reicht in dieser Umsetzung des Modells gerade über drei Perioden. Für eine vollständige Simulation wäre eine Implementation des Ansatzes auf einem Computer nötig, sodaß durch Variation der aleatorisch ermittelten Anfangsparameter sichergestellt werden könnte, daß ein spezifisches Ergebnis nicht durch eine spezifische Anfangskonstellation zufällig erzielt wurde. Ferner müßte durch eine größere Anzahl von Simulationsläufen die Rolle der Relationen der Parameter untereinander durch isolierte Variation (d.h. in einem *ceteris-paribus*-Verfahren) ermittelt werden.

Letztlich handelt es sich bei der hier vorgelegten Fassung der Modellkonstruktion um kaum mehr als eine numerische Darstellung des Modells von *Carroll*. Grundsätzlich bleibt allerdings festzustellen, daß gleichwohl sehr deutlich wird, daß Zelluläre Automaten Ansatzpunkte hergeben, um mit der Dynamik didaktischer Fragestellungen unter der zentralen und zugleich sehr realistischen Annahme der Ganzzahligkeit der ^{*}lernenden Individuen umzugehen; immerhin drückt sich der Tatbestand der Unmöglichkeit einer zerstörungsfreien Teilbarkeit in der Bezeichnung ‚Individuum‘ aus. Die meisten konkurrierenden Kalküle hätten den entschiedenen Nachteil, daß Stetigkeit vorzusetzen wäre.

Überdies sind schon in dem Modell *Carrolls* deskriptive Annahmen über das Unterrichtsgeschehen eingebaut, die kaum Anspruch auf eine Entsprechung in der Realität haben, insofern wird die un-

vermeidliche Schwäche analytisch-idealistischer Epistemik in die Modellierung mit eingeschleppt. Bereits der Ausdruck der berücksichtigten Einflußfaktoren etwa des Lernerfolges allein in Form von Zeiteinheiten ist eine Vereinfachung, die an dieser Stelle nicht zufriedenstellen kann. Es zeigt sich nichtsdestoweniger sehr schnell, daß das erkenntnisleitende Interesse *Carrolls*, ein vollständiges Erreichen der Lernziele durch alle Edukanden einer Klasse anzustreben, eine reichlich unrealistische Annahme ist. Ein vollständiges Erreichen des Lernzieles der Unterrichtseinheit durch alle Edukanden läßt sich nicht erzielen, will man nicht den weiteren Durchlauf des Curriculums erheblich verlangsamen. Wenn die Idee des Mastery Learnings auch schwerlich umzusetzen ist, stellt jedoch die Frage nach der Dauerhaftigkeit der Stabilität einer Klasse als System einen Anknüpfungspunkt dar.

Wägt man die Möglichkeiten und Grenzen der Simulation der Annahmen des Mastery Learnings mit Zellulären Automaten ab, so zeigt sich das Verfahren in einigen Aspekten durchaus geeignet und unproblematisch. Insbesondere ist die diskrete Grundstruktur eine sehr hilfreiche und der Realität entsprechende Annahme. Die erweiterte Moore-Nachbarschaft bietet die Möglichkeit, das Einwirken der *Lehrkraft visuell nachvollziehbar darzustellen. Auch die Repräsentation von 24 *Edukanden kann derzeit Anspruch auf Realitätsnähe erheben; diese Größe entspricht in guter Annäherung den praktisch realisierten Klassenfrequenzen von 20-30 Schülern.¹⁵

Neben der eindimensionalen Abbildung verschiedenster Faktoren ist allerdings ferner noch als problematisch zu betrachten, daß die Instruktionsqualität als hochdimensionales Konstrukt auf eine nominal, allenfalls dichotom ordinal skalierte Größe reduziert wird. Soll der Anspruch erhoben werden, auf der Grundlage empirisch erhobener Größenparameter zu arbeiten, ist die dichotome Darstellung der Instruktionsqualität keineswegs zufriedenstellend.

Weiterhin werden in der durchgeführten Simulation nicht alle Zellen – wie in der Automatentheorie gefordert – als gleichartig definiert, die Zelle der *Lehrkraft unterliegt keinerlei äußerem Einfluß und ist in diesem Sinne eine exogene Größe. Hier wäre möglicherweise eine Redefinition des Modellansatzes als Zwei-Ebenen-Modell angebracht, das der besonderen Stellung der Lehrkraft Rechnung trüge. Zudem sind Zelluläre Automaten dem Grunde nach darauf ausgelegt, Interaktionen zwischen den Zellen zu simulieren und dadurch entstehende Strukturbildungen zu untersuchen. In diesem Sinne wird mit dem hier vorgestellten Kalkül allenfalls ein erster Schritt in Richtung einer automatentheoretischen Anwendung gegangen, denn es wurden keine wechselseitigen Beeinflussungen zwischen den Edukanden mit modelliert, sondern lediglich von einer Einwirkung seitens der Lehrkraft ausgegangen. In diesen Wechselwirkungen indes liegt gerade der didaktische Wert des Lernens im Klassenverband wie zugleich die spezifische Stärke der Automatentheorie.

Schließlich ist es, wie bereits angedeutet, eine in didaktischen Zusammenhängen entscheidende Frage, wieviele Edukanden in welchem Maße Lernziele erreichen müssen, damit der Unterricht fortschreiten kann – was bliebe sonst als Stagnation, wenn doch nicht alle Mitglieder einer Klasse hinsichtlich eines Lernziels reüssieren. Während inhaltlich unabhängige Lernziele keinerlei Voraussetzungen an die zuvor bereits erreichten Lernziele machten, impliziert der Gedanke des Mastery Learnings, daß die Lernziele curricular aufeinander aufbauen und damit nicht als voneinander unabhängig zu betrachten sind. In den verschiedenen *Unterrichtseinheiten wird demgegenüber nicht deutlich, inwieweit sie aufeinander aufbauen oder neue Lernziele verfolgt werden.

Insgesamt zeigen die aufgewiesenen Mängel in der Modellierung eine Reihe interessanter Forschungsdesiderata auf; zugleich scheinen die meisten der angesprochenen Probleme dabei lösbar.

¹⁵ Hier ist hinzuzufügen, daß die durchschnittliche Klassenfrequenz seit geraumer Zeit steigt, weil viele Kultusministerien sich aus haushaltstechnischen Gründen genötigt sehen, die Klassenteiler sowie die Mindestklassengrößen anzuheben.

Dabei ist allerdings – wie Nicole Saam mit Nachdruck deutlich macht (vgl. 2005a, S. 178) – von *ad hoc*-Änderungen der Modellannahmen abzusehen (was hier auch unterbleiben soll) und stattdessen jede Änderung der Modellkonzeption umfassend theoretisch abzusichern. Gleichwohl lassen sich in aller Kürze mögliche Lösungsansätze für einzelne Aspekte hier umreißen:

Die Kritik der mangelhaften *Interaktion ließe sich durch Einführung zusätzlicher Moore- oder von Neumann-Nachbarschaften entkräften.¹⁶ So ließen sich ergänzend *Interaktionen darstellen, die sich beispielsweise auf die *Lernausdauer auswirken könnten. Diese müßte dann als Variable endogenisiert werden. Es ist schließlich so, daß ein ideales soziales Anreizniveau immer dann vorliegt, wenn die Bezugspartner im Gruppenkontext ein knapp besseres Lernniveau aufweisen. Sind die Lernleistungen der Bezugspartner zu schwach, fehlt der Wettbewerbsdruck, sind sie zu gut, droht Frustration und Selbstaufgabe. Durch Einführung von Gruppierungsregeln (analog derer in dem oben vorgestellten Modell Heggelmanns) wären dann entstehende Gruppierungen samt deren Leistungseffekte zu explorieren.

Eine Ausweitung der Interaktionen zwischen den *Edukanden, die über den Gruppierungsansatz hinausgehen, wiese in Richtung einer umfassenderen Berücksichtigung der Sozialdynamik und damit auf eine Abstützung des Modellansatzes in der Netzwerktheorie. Demgegenüber könnte das Problem der Bestimmung einer Mindestquote erfolgreicher Edukanden als Vorbedingung eines erfolgreichen Voranschreitens im Lehrplan durch Einführung eines modellimmanenten Erfolgskriteriums gelöst werden. Ein solches bei der Automatentheorie fehlendes Erfolgskriterium könnte durch die Anwendung eines perkolationstheoretischen Modells dargestellt werden.¹⁷ Im Sinne der Perkolationstheorie stabilisiert sich ein System ‚Klasse‘ ab Erreichen eines Schwellenwertes, den es zu bestimmen und zu analysieren gilt. In der Nähe des Schwellenwertes verhält sich das System katastrophisch, oberhalb des Wertes konvergiert es auf einen Zustand der Durchlässigkeit, es ‚perkoliert‘. Ein solcher Zustand wäre etwa dahingehend zu interpretieren, daß ein curriculares Voranschreiten möglich ist, obwohl nicht alle Klassenmitglieder es bis zur vollständigen Beherrschung der davorliegenden Lernziele gebracht haben. Dieses würde die tatsächlich geübte Praxis besser als das Mastery Konzept abbilden.

Übertragen auf Lernprozesse im Klassenunterricht wäre es möglich, die den Schwellenwert eines erfolgreichen Voranschreitens beeinflussenden Parameter zu variieren und die Auswirkungen der Parametervariation, wie bspw. eine Verkürzung der Lernzeit, einen Wechsel der Lernmaterialien und dergleichen, zu untersuchen. Unter Anwendung eines den unterrichtlichen Zusammenhang adäquat modellierenden Simulationsinstrumentes ließen sich folglich sonst nur aus Erfahrung resultierende Erkenntnisse gewinnen, deren Bedeutung und praktischer Mehrwert insbesondere für Lehramtstudenten nicht zu übersehen ist.

In der Gesamtbetrachtung scheint es richtig und möglich, Fortschritte in dieser spezifischen Form der Erkenntnis didaktischer Zusammenhänge durch eine sukzessive Verbesserung der Modellannahmen sowie eine Anpassung der zugrundegelegten Modellstrukturen zu erzielen. Ein auf der Automatentheorie gegründetes Modell des Klassenunterrichtes dürfte in einer Ausbaustufe als Mehr-Perioden-Modell mit mehreren aufeinander aufbauenden Lernzielen geeignet sein, das Ziel didaktischer Erkenntnisgewinnung zu verfolgen. Insbesondere durch die Möglichkeit der Analyse von Entwicklungspfaden (im Rahmen von *What-if*-Analysen und Sensitivitätsanalysen, vgl. Saam

¹⁶ Ergänzend oder alternativ könnte von einem *Klassenverband als Torus ausgegangen werden, sodaß alle *Edukanden die gleiche Anzahl von Nachbarn aufweisen.

¹⁷ Die Perkolationstheorie beschäftigt sich mit der Bestimmung der Perkolationsschwelle, die zu einem das System durchdringenden Cluster führt; vgl. Stauffer & Aharony 1995, S. 2 ff. Mit der Perkolationstheorie werden bspw. physikalische und biologische Vorgänge beschrieben; vgl. hierzu bspw. Stauffer & Aharony 1995, Grimmet 1999, Sahimi 1994. Eine sozialwissenschaftliche Anwendung der Perkolationstheorie findet sich in Solomon et al. 2000, ein Versuch, Wege in der didaktischen Erkenntnisfindung anzubahnen, in Bank 2009b.

2005a, S. 180; 2005b, S. 198 f.) darf dieses auch auf der Grundlage des vergleichsweise einfach gehaltenen Unterrichtsmodells von *Carroll* – oder unter moderater, nach Möglichkeit empirisch fundierter Modifikation der dort getroffenen Annahmen (im Sinne der Forderung von *Saam* 2005a, S. 171, S. 178) erwartet werden.

Eine Analyse von Optima oder strategischen Gleichgewichten (v.a. unter Bezugnahme auf die Spieltheorie, vgl. *Saam* 2005b, 198 f.) erscheint dagegen weder möglich noch sinnvoll. Allerdings könnte man im Idealfall erwägen, allgemeiner zu prüfen, inwieweit simulierte Systeme Wege zu einem dynamischen Gleichgewicht aufzeigen könnten. Die letzte Herausforderung stellte sich in einer Überprüfung des Modells in einer Ex-post-Prognose des Unterrichtsverlaufs einer beobachteten Klasse (vgl. wiederum *Saam* 2005a, 178 f., bes. S. 179; vgl. aber auch die Bedenken in *Bank* 2009a, S. 18).

* * * * *

Literatur

- Bank, V.*: Von der Organisationsentwicklung zum »systemischen Change Management«. Der Umgang mit Innovationen als didaktisches Problem der Führung in sozialen Systemen. Kiel 2004.
- Bank, V.*: Dynamik und die Problematik der Führung. Präliminarien zur Konzeption dynamischer Modelle für didaktische und ökonomische Führungsprobleme (Berichte aus der Berufs- und Wirtschaftspädagogik. Papers and Proceedings in Vocationomics Nr. 3 – August 2009). Chemnitz 2009a [Internetz: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0160/data/Vocationomica003.pdf>].
- Bank, V.*: Innovation und Wandel in diskret strukturierten Systemen: Ein Sickermodell (Berichte aus der Berufs- und Wirtschaftspädagogik. Papers and Proceedings in Vocationomics Nr. 4 – September 2009). Chemnitz 2009b [Internetz: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0163/data/Vocationomica004.pdf>].
- Bloom, B. S.*: Alle Schüler schaffen es, in: betrifft: Erziehung 11 (1970), S. 15-21.
- Bloom, B. S.*: Mastery Learning, in: *Block, J.H. (Hg.): Mastery Learning – Theory and Practice*. New York 1971, S. 47-63.
- Carroll, J.B.*: A model of school learning, in: *Teachers College Record* 64 (1963), S. 723-733.
- Carroll, J.B.*: Lernerfolg für alle, in: *Westermanns Pädagogische Beiträge* 24 (1972), S. 7-12.
- Carroll, J.B.*: Ein Modell schulischen Lernens, in: *Edelstein; W. & Hopf, D. (Hg.): Bedingungen des Bildungsprozesses. Psychologische und pädagogische Forschungen zum Lehren und Lernen in der Schule*, Stuttgart 1973, S. 234-250.
- Comenius, J.A.*: Große Didaktik (org.: *Didactica Magna*, Amsterdam 1657). 7. Auflage, Stuttgart 1992.
- Eigler G. & Straka G.A.*: Mastery Learning. Lernerfolg für jeden? München u.a. 1978.
- Gerhardt, M. & Schuster, H.*: Das digitale Universum. Zelluläre Automaten als Modelle der Natur, Braunschweig u. Wiesbaden 1995.
- Gilbert, N. & Troitzsch, Klaus G.*: *Simulation for the Social Scientist*, 2. Auflage, Maidenhead u. a. 2005.
- Grimmet, G.*: *Percolation*. 2. Auflage, Berlin u. a. 1999.
- Hegselmann, R.*: Cellular Automata in the social sciences. Perspectives, Restrictions, and Artefacts, in: *Hegselmann, R. u. a. (Hg.): Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of view*, Dordrecht u. a. 1996a, S. 209-233.
- Hegselmann, R.*: Zelluläre Automaten. Ein neuer Ansatz für die Modellierung sozialer Dynamiken, in: *Preuss, V. (Hg.): Risikoanalysen. Über den Umgang mit Gesundheits- und Umweltgefahren (Band 1)*. Heidelberg: 1996b, S. 175-203.
- Hegselmann, R. & Flache, A.*: Understanding Complex Social Dynamics: A Plea For Cellular Automata Based Modeling, in: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1, no. 3 (1998). [Internetz: <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/3/1.html>]

- Heimann, P.: Didaktik als Theorie und Lehre, in: Die Deutsche Schule 54 (1962), S. 407-427.
- Ingenkamp, F.-D.: Zielerreichendes Lernen – Mastery Learning. Grundlagen – Forschungsbericht - Praxis. Ravensburg 1979.
- Jongbloed, H.-C. & Twardy, M.: Strukturmodell Fachdidaktik Wirtschaftswissenschaften (SMFW), in: Twardy, M. (Hg.): Kompendium Fachdidaktik Wirtschaftswissenschaften (Wirtschafts-, Berufs- und Sozialpädagogische Texte, Band 3; Teilband I-III). Düsseldorf 1983, S. 163-203.
- Kaiser, E.: Unterrichtsformen, Differenzierung und Individualisierung, in Roth L. (Hg.): Pädagogik. Handbuch für Studium und Praxis. München 1991.
- Rost, D.H.: Grundlagen, Fragestellungen, Methode, in: Rost, D.H. (Hg.): Hochbegabte und hochleistende Jugendliche. Neue Ergebnisse aus dem Marburger Hochbegabtenprojekt (Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie, Band 15). Münster u.a. 2000, S. 3-91.
- Sadoka, J. M.: The checkerboard model of social interaction, in: Journal of Mathematical sociology 1 (1971), S. 119-132.
- Saam, Nicole J.: Computersimulation, in: Kühl, St., Strodtz, P. & Taffertshofer, A. (Hg.): Quantitative Methoden der Organisationsforschung. Ein Handbuch. Wiesbaden 2005a, S. 167-189.
- Saam, Nicole J.: Modellbildung, in: Kühl, St., Strodtz, P. & Taffertshofer, A. (Hg.): Quantitative Methoden der Organisationsforschung. Ein Handbuch. Wiesbaden 2005b, S. 190-209.
- Sahimi, M.: Applications of Percolation Theorie. London 1994.
- Schelling, T.C.: Dynamic models of segregation, in: Journal of Mathematical sociology 1 (1971), S. 143-186.
- Schwarzer, R.: Mastery Learning durch programmierte Instruktion? Eine Untersuchung der Beziehungen zwischen Lernerfolg, Intelligenz und Arbeitszeit beim programmierten Unterricht. Kiel 1972.
- Solomon, S. et al.: Social percolation models, in: Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 277 (2000), S. 239-247.
- Stauffer, D. & Aharony, A.: Perkolations-theorie. Eine Einführung (org.: Introduction to percolation theory, London u. a. 1985). Weinheim u. a. 1995.
- Toffoli, T. & Margolus, N.: Cellular Automata Machines. A new environment for modeling, 4. Auflage, Cambridge u. a. 1989.
- Troitzsch, Klaus G.: Simulation in den Sozialwissenschaften, in: Orth, B.; Schwietring, T. & Weiß, J. (Hg.): Soziologische Forschung: Stand und Perspektiven. Ein Handbuch. Opladen 2003, S. 353-363.
- Troitzsch, Klaus G.: Modellbildung und Simulation. Dynamische Systemmodelle, in: Diekmann, A. (Hg.): Methoden der Sozialwissenschaften (Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 44/ 2004). Wiesbaden 2006, S. 505-535.

* * * * *

Autoren:

Prof. Dr. Volker Bank
 Professur für Berufs- und Wirtschaftspädagogik
 Technische Universität Chemnitz
 Reichenhainer Str. 41
 D-09 107 Chemnitz
volker.bank@phil.tu-chemnitz.de
 Download address: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0169>

Dipl.-Hdl. Anita Damm
 Adresse: wie links

anita.damm@phil.tu-chemnitz.de

Weitere in der Reihe
„Berichte aus der Berufs- und Wirtschaftspädagogik – Papers and Proceedings in Vocationomics“
publizierte Diskussionspapiere:

- [004] **Bank, V.:** Innovation und Wandel in diskret strukturierten Systemen: Ein Sickermodell (Nr. 4 – September 2009). Chemnitz 2009
[Download address: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0163/data/Vocationomica004.pdf>]
- [003] **Bank, V.:** Dynamik und die Problematik der Führung. Präliminarien zur Konzeption dynamischer Modelle für didaktische und ökonomische Führungsprobleme (Nr. 3 – August 2009). Chemnitz 2009
[Download address: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0160/data/Vocationomica003.pdf>]
- [002] **Bank, V. & Jongbloed, H.-C.:** Le ‘Système de Dualité’, expliqué aux enfants (Das Duale System, verständlich erklärt) (Nr. 2 – Dezember 2007). Chemnitz 2007
[Download address <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2007/0215/data/vocationomica002.pdf>]
- [001] **Bank, V.:** On Money, Selfishness, and their Contributions to Bildung (Nr. 1 – Oktober 2006). Chemnitz 2006
[Download address: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2007/0006/data/Vocationomica001.pdf>]