

Modellierung feuererzeugter räumlicher Strukturen in borealen Wäldern

Armin Ratz

Synopsis

Fire is one of the most important factors structuring boreal forests. A spatial simulation-model based on a cellular automata approach was built to obtain insights into the spatial pattern of successional stages. Two scenarios (i) constant flammability and (ii) flammability increasing with the course of succession are compared. The formation of spatial structure depends strongly on the specific form of age dependent flammability. The fine-structure of single fires generated by the model is analysed by five different measures and is in agreement with empirical evidence.

Feuer, Räumliche Struktur, Borealer Wald, Simulationsmodell.

Fire, spatial structure, boreal forests, simulation model.

1. Einleitung

Feuer ist für viele Gebiete des borealen Waldes der Faktor, der das Ökosystem am stärksten prägt. Beeinflusst werden Artenzusammensetzung, Abundanzen, Altersstrukturen und räumliche Strukturen (BERGERON 1991, BERGERON & BRISSON 1990, TANDE 1979, ROMME 1982). Wie beeinflusst "das Feuer" diese Faktoren? Der Begriff Feuer wird einer quantitativen Beschreibung zugänglich, indem die Charakteristika von Feuern eines Gebietes, wie Frequenz der Feuer, Größe der Brände, Intensität und Vorhersagbarkeit beschrieben werden. Diese Charakteristika werden als Feuerregime bezeichnet (HEINSELMANN 1973).

Ein Verständnis, wie ein bestimmtes Feuerregime das Ökosystem beeinflusst, ist für das Feuermanagement in Naturparks von zentraler Bedeutung. Der Erhalt oder die Wiederherstellung eines früher bestandenen Feuerregimes ist eine wichtige Determinante des Erhalts des Ökosystems selbst. Die Herstellung oder Restaurierung eines Feuerregimes wirft Probleme auf: (a) Das Feuerregime darf nicht a priori als isoliert von der vorhandenen Vegetation gesehen werden, denn die Vegetation mit ihrer aktuellen Brennbarkeit (Alter, Bestandsdichte, Totholzakkumulation etc.) beeinflusst das Feuerregime ebenso wie dies klimatische Faktoren tun. D. h., das Feuer strukturiert die Vegetation und die Vegetation modifiziert die Feuercharakteristika - es liegt eine Wechselwirkung vor. (b) Häufig ist nicht bekannt, wie das Feuerregime früherer Zeiten aussah. (c) Die Zeitskala, auf der sich das System ändert, liegt im Bereich von Jahrzehnten bis Jahrhunderten.

Um ein erstes Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse zu erzielen, soll in dieser Arbeit mit Hilfe eines Modells die Wechselwirkung einer altersspezifischen Brennbarkeit von Standorten einerseits und dem Feuerprozeß andererseits untersucht werden. Das Zusammenwirken dieser beiden Komponenten prägt die räumliche Struktur des Systems.

Die Ausbreitung des Feuers wird in diesem Modell explizit modelliert. Die Feinstruktur der aus dem Algorithmus der Brandausbreitung entstehenden Feuer werden mit empirischen Ergebnissen (EBERHART & WOODARD 1987) verglichen.

2. Das Modell

2.1 Beschreibung

In der Folge eines bestandserneuernden Feuers läuft in vielen Wäldern eine sekundäre Sukzession ab (HEINSELMANN 1981b, ROMME 1982). Ein Waldgebiet wird in unserem Modell in quadratische Standorte (Zellen) eingeteilt. Simuliert wird ein Areal mit 200 x 200 Waldstandorten (siehe Abb. 1 und 2). In jedem der ca. 4 ha großen Standorte läuft eine Sukzession bis zum Erreichen eines Klimaxstadiums ab. Die Länge der Sukzession beträgt 500 Jahre und ist in 50 Phasen á 10 Jahre unterteilt. Eine Phase entspricht einem Modellzeitschritt. Tritt an einem Standort im Laufe der Sukzession ein Feuer auf, so wird dieser Standort an den Beginn der Sukzession (Phase 1) zurückversetzt. Im weiteren wird der Begriff "Alter der Vegetation" (an einem Standort) synonym zu dem Begriff "Stadium der Sukzession seit dem letzten Feuer" verwendet.

Die Entzündung von Feuern, z. B. durch Blitzschlag, wird durch die räumlich zufällige Entzündung einer bestimmten Zahl von Feuern pro Simulationszeitschritt realisiert. Diese Zahl der zu zündenden Feuer ist ein Parameter des Modells (Parametername: *flashes*). Die Entzündungen können sich im Modellareal nach dem fol-

genden Algorithmus zu einem Feuer ausbreiten: Ist ein Standort vom Zufallsgenerator als Entzündungsort ausgewählt worden, so wird anhand der altersspezifischen Brandwahrscheinlichkeit des Standortes entschieden, ob dieser Standort zum Brennen kommt oder nicht. Brennt der Standort, so kann er potentiell seine vier nächsten Nachbarn in Brand setzen. Ob diese entzündet werden, wird für jeden einzelnen Nachbarn erneut anhand seiner altersspezifischen Brandwahrscheinlichkeit entschieden. Jeder so entzündete Standort kann nun wiederum das Feuer weitertragen an seine nächsten Nachbarn. Dieser Algorithmus wird durchgeführt, bis kein Standort mehr brennt. Es entstehen sowohl kleine Brände als auch Brände, die das ganze System erfassen. Der einzelne Brand spielt sich dabei innerhalb eines Simulationszeitschrittes ab.

Die Auswertung des Modells erfolgte auf einem 150 x 150 Standorte umfassenden Teilareals des 200 x 200 Simulationsareals, um die durch die Begrenzung des Areals verursachten Randeffekte zu reduzieren. Das 150 x 150 Standorte große Auswertungsareal entspricht bei einer Standortgröße von 4 ha einem Gebiet von 90 km².

2.2 Modellannahmen

Untersucht werden soll die Wechselwirkung von altersspezifischer Brennbarkeit und Feuerprozeß im Hinblick auf die sich ausbildende räumliche Anordnung der verschiedenen Alters- oder Sukzessionsstufen. Von der Berücksichtigung weiterer Einflußfaktoren, wie z. B. Topographie, wechselndes Klima und Wind wurde, um den alleinigen Einfluß der altersspezifischen Brennbarkeit untersuchen zu können, abgesehen. Prinzipiell sind diese Faktoren jedoch integrierbar. An jedem Standort beginnt nach einem Feuer die Sukzession erneut, d. h. eine räumliche begrenzte Ausbreitung von Samen wird nicht berücksichtigt. Die Feuer sind immer bestandserneuernd, d. h. nicht lethale Feuertypen wie z. B. leichte Bodenfeuer werden nicht modelliert.

2.3 Durchführung der Simulationsläufe

Jede Simulation beginnt mit einer homogenen Fläche in der 1. Phase der Sukzession (Ruderalfläche). Pro Zeitschritt wird die vom Parameter *flashes* vorgegebene Anzahl von Feuern gezündet. Für die hier vorgestellten Simulationen ist *flashes* = 5 gewählt worden. Diese Wahl resultiert aus einem Abgleich mit empirischen Werten. *Flashes* = 5 auf einem 200 x 200 Gitter mit 4 ha großen Modellstandorten entspricht $3,2 \cdot 10^{-6}$ potentiellen Feuern pro Jahr x Hektar ($F/(a \cdot ha)$) (man beachte, daß *flashes* nicht die Zahl der wirklich gebrannten Feuer ist, denn eine Zündung kann auch fehlschlagen s.o.). Die Zahl der tatsächlich gebrannten Feuer liegt dann im Bereich von $1,5 \cdot 10^{-6} F/(a \cdot ha)$. Empirische Werte liegen z. B. bei ca. $1,7 \cdot 10^{-6} F/(a \cdot ha)$ (PAYETTE et al. 1989), $0,42 \cdot 10^{-6} F/(a \cdot ha)$ (BERGERON 1991).

Die Simulation wird durchgeführt, bis die im Laufe der Simulation berechneten Maße zur Charakterisierung der Struktur (s. u.) eine zeitliche Konstanz zeigen.

2.4 Maße zur Analyse

Um die entstehenden räumlichen Strukturen auch quantitativ erfassen zu können, werden folgende Größen bestimmt:

MPS: Mittlere Patchgröße (mean patch size); Einheit ha.
Als Patch wird ein Zusammenhangsgebiet gleicher Vegetation bezeichnet. Diese Zusammenhangsgebiete werden herauspräpariert, ihre Größe aufgenommen und der Mittelwert berechnet.

YOP: Jung-Alt-Grenzen (young old pattern); Einheit Jahre.
Ein Maß für die Ausprägung des Aneinandergrenzens von jungen und alten Standorten. Eine homogene gleichalte Fläche ist durch $YOP = 0$ Jahre charakterisiert. Für ein Schachbrettmuster mit dem maximalem Altersunterschied von 500 Jahren ergibt sich $YOP = 500$ Jahre. Es wird die Summe der Altersdifferenzen an allen Grenzen zwischen Standorten gebildet und diese durch die Zahl der Grenzen mit tatsächlich unterschiedlichem Alter dividiert. Das Alter am Standort i sei mit a_i bezeichnet.

$$YOP = \frac{\sum_{Alle} |a_x - a_y|}{\text{Zahl der Grenzen unterschiedlichen Alters}} \quad (1)$$

EVSS: Gleichverteilung der Altersstruktur (relative evenness); Angabe in %. Ein Maß für die Homogenität der Besetzung der Altersklassen. Die Größe wird in Prozent des Maximalwertes (alle Altersphasen gleich häufig besetzt) angegeben. Die *EVSS* kann also zwischen 0% (nur eine Altersklasse besetzt) und 100% variieren. Der Anteil in der Altersphase *i* betrage p_i .

$$EVSS = \frac{\ln\left(\sum_{i=1}^{50} p_i^2\right)}{\ln\left(\sum_{i=1}^{50} \left(\frac{1}{50}\right)^2\right)} \quad (2)$$

MFFI: Mittlere Rückkehrzeit des Feuers an einen Standort (mean fire-fire intervall); Einheit Jahre. Während der Simulation wird an ausgewählten Standorten die Zeit zwischen zwei Feuern registriert und eine Verteilung ermittelt (Feuer-Feuer-Intervall-Verteilung, JOHNSON & VAN WAGNER 1984). Der Mittelwert dieser Verteilung gibt das mittlere Intervall zwischen zwei Feuern an einem Standort an. Die *MFFI* kann Werte zwischen 10 Jahren (jeder Standort brennt in jedem Zeitschritt) und sehr großen Werten » 500 Jahre (Feuer sind klein und/oder sehr selten) annehmen.

MAGE: Mittleres Alter des gesamten Untersuchungsareals (mean age); Einheit Jahre. Das Alter aller Standorte des Untersuchungsareals wird gemittelt. Es ist $0 \leq MAGE \leq 500$ Jahre.

Diese Größen werden für jeden Zeitpunkt der Simulation berechnet, indem eine Mittelung der Größe über die letzten 100 Zeitschritte durchgeführt wurde. Stochastische Schwankungen können somit weitestgehend eliminiert werden. Die Simulation wird durchgeführt, bis die so ermittelte zeitgemittelte Größe in ein Gleichgewicht einläuft. Zusätzlich zu dieser Zeitmittelung wurde eine Mittelung über drei Simulationsläufe durchgeführt.

3. Alters- oder Sukzessionsstufenstruktur

Empirische Befunde zur Altersabhängigkeit der Brandwahrscheinlichkeit lassen sowohl eine konstante als auch eine mit dem Alter ansteigende Brandwahrscheinlichkeit möglich erscheinen (HEINSELMANN 1981a). Diese beiden Möglichkeiten werden in zwei Szenarien diskutiert: (a) eine konstante, altersunabhängige Brandwahrscheinlichkeit, (b) eine vom Alter abhängige Brandwahrscheinlichkeit mit quadratischem Verlauf (Abb. 1 und 2).

3.1 Konstante Brandwahrscheinlichkeit

Abbildung 1a - 1c zeigt das Szenario für eine konstante altersunabhängige Brandwahrscheinlichkeit (*fireprob* = const.). Eine altersunabhängige Brandwahrscheinlichkeit hat zur Folge, daß die räumliche Anordnung der Sukzessionsstadien keinen Einfluß auf die Ausbreitung des Feuers ausübt. Es sind die Ergebnisse für drei verschiedene Wahrscheinlichkeiten dargestellt. Die Vegetationsmuster sind jeweils nach 2000 Jahren aufgenommen worden.

Für den Wert *fireprob* = 0,5 (Abb. 1c) ergibt sich eine mittlere Rückkehrzeit des Feuers von 35 Jahren. D. h. für diesen Parameterwert brennt jeder Standort im Mittel alle 3,5 Simulationszeitschritte, womit in jedem Zeitschritt ungefähr ein Viertel des Areal abrennt. Nach einer Simulationszeit von 2000 Jahren ist die entstandene Vegetation durch ein niedriges mittleres Alter von 240 Jahren und eine ungleichmäßige Altersverteilung *EVSS* = 27% gekennzeichnet.

Der Wert *fireprob* = 0,46, dargestellt in Abb. 1a, ist für die Ausbreitung des Feuers ein niedriger Wert und führt zu einer Vegetationsstruktur, welche durch ein hohes mittleres Alter (*MAGE* = 350 Jahre) und eine große mittlere Feuerrückkehrzeit (*MFFI* = 519 Jahre) gekennzeichnet ist. Die Feuer erreichen hier keine Deckung des Areal mit einem "Patchteppich" unterschiedlicher Altersstufen. Ein Hintergrund aus Klimaxvegetation (schwarz gefärbt) bleibt ständig vorhanden.

Alein in einem schmalen Parameterbereich um *fireprob* = 0,48 (Abb. 1b) ergibt sich ein flächendeckender Patchteppich. Die relativ gleichmäßige Verteilung der Altersphasen (*EVSS* = 60%) zusammen mit dem mittleren Alter von 150 Jahren zeigt an, daß ein Großteil der jüngeren Altersphasen vertreten ist.

Die Werte *fireprob* = 0,46 bzw. 0,5 sind die Eckwerte unterhalb bzw. oberhalb derer sich keine komplexe Patchstruktur formiert. Der schmale Parameterbereich, indem sich eine komplexe Patchstruktur ausbildet, spricht gegen das Vorkommen einer konstanten Brandwahrscheinlichkeit in den Wäldern, in denen eine komplexere Patchstruktur beobachtet wird (ROMME 1982, TANDE 1979). Denn wäre eine solche Patchstruktur von einer konstanten Brandwahrscheinlichkeit verursacht, so müßte diese im ausgezeichneten Parameterbereich

$fireprob \approx 0,48$ liegen. Dies kann für verschiedene Wälder mit unterschiedlichen Brandwahrscheinlichkeiten aber nicht erwartet werden.

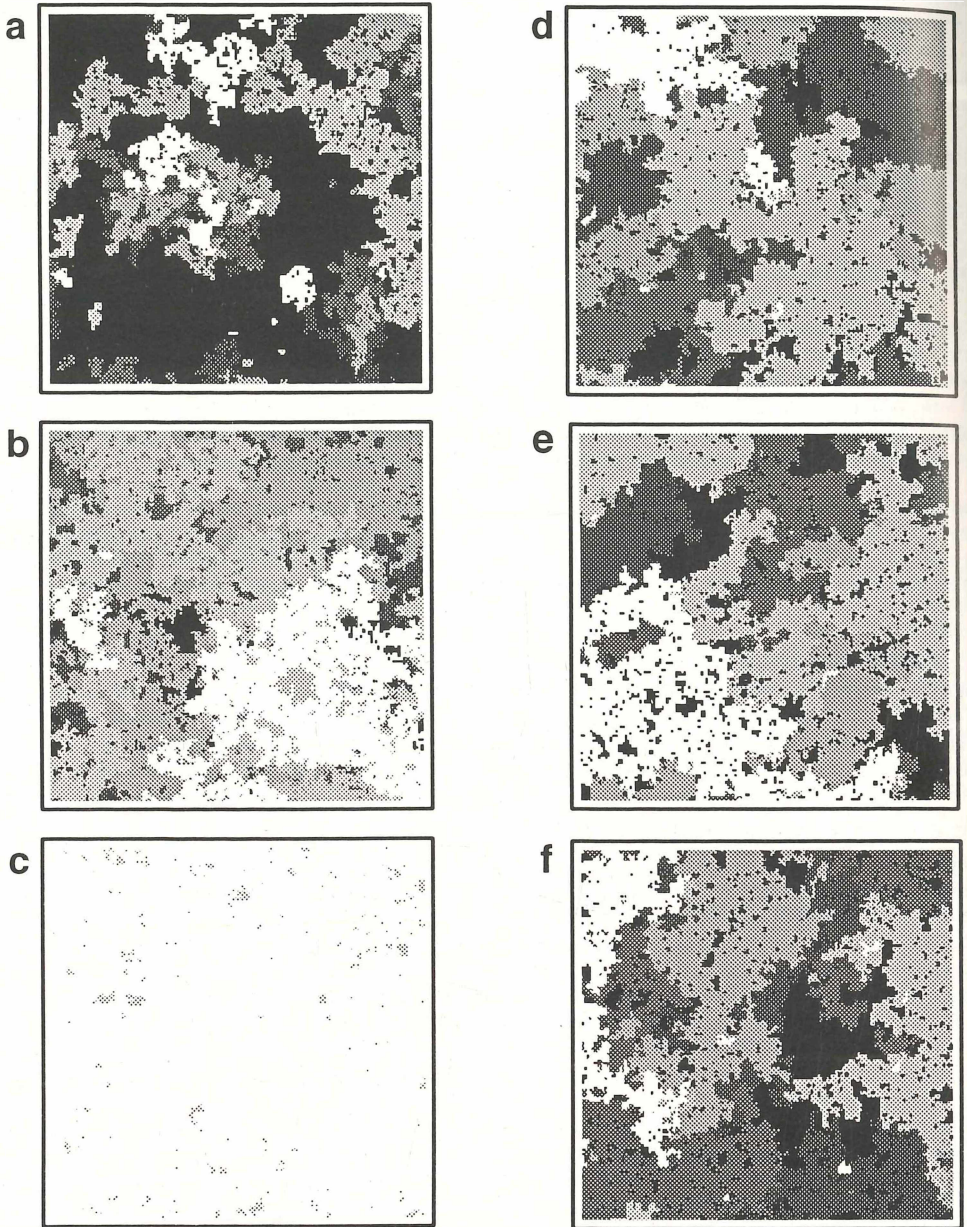


Abb. 1: **a-c:** Szenario mit konstanter Brandwahrscheinlichkeit. Vegetationsmuster dargestellt nach $t = 2000$ Jahren.
d-f: Szenario mit quadratischer Brandwahrscheinlichkeit $fireprob = i + c \cdot Alter^2$. Vegetationsmuster dargestellt nach 3000 (d), 4000 (e), 6000 Jahren (f).

Fig. 1: **a-c:** Scenario with constant flammability. The vegetation mosaic is shown at $t = 2000$ a.
d-f: Scenario with quadratic flammability $fireprob = i + c \cdot age^2$. The vegetation mosaic is shown at $t = 3000$ (d), 4000 (e), 6000a (f), respectively.

Zu Abbildung 1:

a:	$fireprob = 0,46,$	$flashes = 5,$	$MPS = 25,6 \text{ ha},$	$YOP = 230 \text{ a},$	$MFFI = 519 \text{ a},$	$MAGE = 350 \text{ a},$	$EVSS = 37\%$	
b:	$fireprob = 0,48,$	$flashes = 5,$	$MPS = 12,6 \text{ ha},$	$YOP = 144 \text{ a},$	$MFFI = 171 \text{ a},$	$MAGE = 150 \text{ a},$	$EVSS = 60\%$	
c:	$fireprob = 0,5,$	$flashes = 5,$	$MPS = 12,0 \text{ ha},$	$YOP = 30 \text{ a},$	$MFFI = 35 \text{ a},$	$MAGE = 24 \text{ a},$	$EVSS = 27\%$	
d:	$i = 0,025,$	$c = 0,00034,$	$flashes = 5,$	$MPS = 31,6 \text{ ha},$	$YOP = 239 \text{ a},$	$MFFI = 452 \text{ a},$	$MAGE = 233 \text{ a},$	$EVSS = 63\%$
e:	$i = 0,1,$	$c = 0,00028,$	$flashes = 5,$	$MPS = 26,5 \text{ ha},$	$YOP = 234 \text{ a},$	$MFFI = 445 \text{ a},$	$MAGE = 234 \text{ a},$	$EVSS = 54\%$
f:	$i = 0,3,$	$c = 0,00012,$	$flashes = 5,$	$MPS = 19,2 \text{ ha},$	$YOP = 235 \text{ a},$	$MFFI = 471 \text{ a},$	$MAGE = 252 \text{ a},$	$EVSS = 54\%$

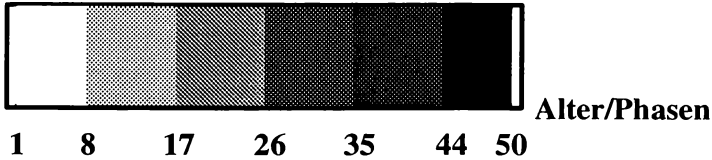


Abb. 2: Grauwertkodierung der Alters- oder Sukzessionsstufen.

Fig. 2: Values of the grayscale representing the different stages of age or succession, resp.

3.2 Quadratische Brandwahrscheinlichkeit

Als zweites Szenario wird eine mit dem Alter quadratisch ansteigende Brandwahrscheinlichkeit diskutiert (Abb. 1 d-f). Da dies nur eine Möglichkeit der Modellierung einer mit dem Alter ansteigenden Brennbarkeit ist, wurden zudem andere ansteigende Verläufe (z. B. linear) angesetzt. Der quadratische Ansatz zeigte die typischen Effekte besonders deutlich und wurde aus diesem Grunde hier dargestellt.

In Abb. 1d - 1f wird der Anstieg der quadratischen Abhängigkeit von f nach d steiler. Die entstehenden Strukturen werden mit diesem steilerem Anstieg sowohl großflächiger als auch kompakter (d. h. innerhalb von zusammenhängenden Gebieten befinden sich weniger Inseln). Quantitativ spiegelt sich dies im Anstieg der mittleren Patchgröße von 19,2 ha über 26,5 ha auf 31,6 ha wieder. Die Zeit, bis die beobachteten Größen in ein Gleichgewicht einlaufen, ist ebenfalls von diesem Anstieg abhängig. Steilerer Anstieg führt zu einer längeren Einschwingzeit ($t = 3000, 4000, 6000$ Jahre, siehe Abb. 1).

Die Maßzahl YOP für das Aneinandergrenzen von jungen und alten Standorten liefert für alle drei Verläufe hohe Werte im Bereich von 230-240 a. Dies bestätigt die theoretischen Überlegungen von Johnson und stimmt mit empirischen Befunden im kalifornischen Chaparral überein, welche ein ausgeprägteres Jung-Alt-Muster für eine im Alter ansteigende Brandwahrscheinlichkeit feststellen (JOHNSON 1992).

Vergleicht man diese YOP -Werte mit den Werten aus dem Szenario mit konstanter Brandwahrscheinlichkeit, so ergeben sich für $fireprob > 0,46$ deutlich kleinere Werte ($YOP = 30-150 \text{ a}$). Für $fireprob \leq 0,46$ erreicht YOP hingegen ähnlich hohe Werte ($YOP = 230 \text{ a}$) wie im quadratischen Fall. Unser Modell zeigt also auch für die Bereiche einer konstanten Brennbarkeit mit niedrigem Brandrisiko (Abb. 1a) einen hohen Wert für das Aneinandergrenzen von jungen und alten Standorten. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Modellüberlegungen von Johnson. Ein sicherlich aufschlußreicher Vergleich dieser Ergebnisse mit empirischen Arbeiten ist an dieser Stelle leider nicht möglich, da zur Zeit keine fundierten Arbeiten zur Ausprägung des Jung-Alt-Musters in borealen Wäldern zur Verfügung stehen. JOHNSON (1992) argumentiert, daß kein besonderes Jung-Alt Muster in den wenigen untersuchten Waldgebieten gefunden wurde, zitiert allerdings keine Arbeiten zu dieser Aussage.

Die Abbildung 1 belegt deutlich, in welchem Maße die räumliche Struktur von der altersabhängigen Brandwahrscheinlichkeit geprägt wird. Die räumlichen Strukturen, die sich aus der quadratischen Altersabhängigkeit ergaben, erweisen sich dabei als relativ unempfindlich gegenüber einer Veränderung des Verlaufs der quadratischen Abhängigkeit. Eine Vielzahl von quadratischen Verläufen liefert in dieser Situation plausible Strukturen. Die konstante Brandwahrscheinlichkeit formiert im Gegensatz dazu nur in einem kleinem Parameterbereich komplexere Patchstrukturen. Die Frage, welcher Mechanismus in der Natur die dominante Rolle spielt, kann anhand dieser Indizien noch nicht vollständig diskutiert werden. Die Auswertung von stand-origin-maps (Karten, in denen gleichaltrige Bestände mit dem Alter seit dem letztem Brand eingezeichnet sind) mit denselben Maßen, die zur Analyse der räumlichen Strukturen des Modells verwendet wurden, könnte an dieser Stelle Aufschluß geben.

4. Feuer-Feinstruktur

Eine empirische Arbeit von EBERHART & WOODARD (1987) analysiert Strukturmaße für Feuer verschiedener Größenklassen in Alberta/Kanada. Das Hauptaugenmerk richtete sich dabei auf die Inseln nicht verbrannter Vegetation innerhalb der Feuer. Analysiert wurden in 5 Größenklassen jeweils 5 Maße. Verwendet wurden die Größenklassen: C: 20-40 ha, D: 41-200 ha, E1: 201-400 ha, E2: 401-2000 ha, 2001-20000 ha. Die Analysemaße waren:

- (i) Fläche des gestörten Areal in %:
Tatsächlich gebrannte Fläche dividiert durch die Fläche, die durch den Außenumriß des Feuers definiert ist.
- (ii) Form Index
- (iii) Rand Index
- (iv) Median der Insel Größen in ha:
Aufnahme sämtlicher Inselgrößen und Berechnung des Medians dieser Größen.
- (v) Zahl der Inseln pro 100 ha der Brandfläche

Form- und Rand Index werden berechnet, indem der Umfang des Außenumrisses (Form) bzw. der gesamte Umfang (inclusive des Randes der im Inneren liegenden Inseln) (Rand) bestimmt wird. Diese Größen werden dann jeweils durch den Umfang eines Kreises, mit einer zur Brandfläche äquivalenten Fläche, dividiert.

Dieselben Maße wurden für Modellfeuer aufgenommen. Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen den empirischen Werten und den Modellwerten einer Simulation. Für die Maße (i) bis (ii) ergeben sich gute quantitative Übereinstimmungen, für den edge index (iii) liegen die Werte quantitativ etwas zu niedrig, spiegeln aber den qualitativen Verlauf sehr gut wieder. Das Maß (iv), der Median der Inselfläche, zeigt immer noch eine qualitative Übereinstimmung, wohingegen das Maximum der empirischen Werte für die Zahl der Inseln pro 100 ha (v) vom Modell nicht reproduziert werden konnte.

Insgesamt ergibt sich eine in Anbetracht des einfachen Modells überraschend gute Übereinstimmung von Modellwerten und empirischen Werten. Zudem sind die Ergebnisse robust gegenüber Veränderungen des Verlaufs der quadratischen Brandwahrscheinlichkeit und bleiben in den wesentlichen Zügen sogar für eine konstante Brandwahrscheinlichkeit (im Parameterbereich von *fireprob* = 0,48) erhalten.

Der im Modell angesetzte Brandalgorithmus wird durch diesen Vergleich validiert, denn dieser ist es, der die Feinstruktur der Feuer im wesentlichen bestimmt. Die unterschiedlichen altersabhängigen Brandwahrscheinlichkeiten modifizieren die Modellwerte nur in geringem Maße. Das bedeutet, daß mit Hilfe der Feuer-Feinstruktur keine weiteren Aussagen über Möglichkeiten und Wahrscheinlichkeiten der beiden zuvor diskutierten Szenarien gewonnen werden können.

4.1 Eichung der Größenskala

Die Festlegung der Größenskala für den einzelnen Standort im Modell bereitete zu Beginn der Arbeit Schwierigkeiten, welche aber mit Hilfe der Arbeit von EBERHART & WOODARD gelöst werden konnten. Die Autoren bemerkten, daß bis zu einer bestimmten Größe von Feuern keine Inseln auftreten. Für Feuer der Klasse C werden keine Inseln innerhalb des Feuers festgestellt, weiterhin treten bei 65% der Klasse D Feuer keine Inseln auf. Demzufolge kann eine Grenze im Bereich von 40-100 ha festgelegt werden, unterhalb derer Brände ohne Inseln auftreten. Auch im Modell kann eine Grenze bestimmt werden, unterhalb derer keine Inseln innerhalb des Brandes auftreten. Diese Grenze liegt bei ca. 15-20 Gitterstandorten (siehe Abb. 4). Daraus resultiert eine Größenskala im Bereich von 2-6 ha pro Gitterstandort (140-230 m Seitenlänge).

Die Eichung mithilfe dieses Verfahrens ist konsistent mit einer Abschätzung der Größenskala. Der Brandalgorithmus beruht auf der Annahme, daß das Feuer sich nur über eine Nächste-Nachbar-Wechselwirkung ausbreiten kann. Die Ausbreitungsdistanz des Feuers ist (unter anderem) an die Höhe der Vegetation gekoppelt. In borealen Wäldern ist eine Mindestgröße von 100 m für eine effektive Feuerbarriere angemessen. Die Größenskala wäre dieser Überlegung folgend also zumindest größer als 1 ha anzusetzen.

Empirische Werte

Modellwerte

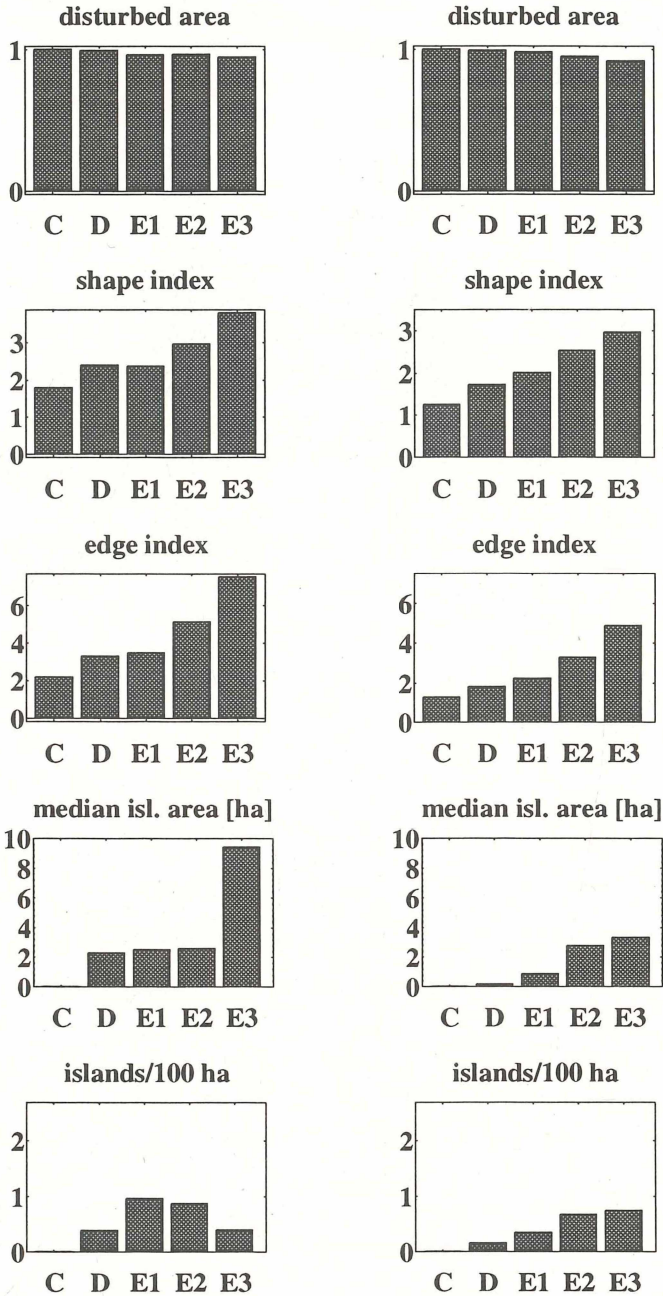


Abb. 3: Vergleich der Strukturmaße von realen Feuern und Modellfeuern. Die Ergebnisse des Modells wurden mit einer quadratischen Brandwahrscheinlichkeit berechnet (Parameterwerte wie Abb. 1d). Analysiert wurden in 3000 Zeitschritten ca. 1000 Feuer. Erläuterung der Größenklassen und Maße siehe Text.

Fig. 3: Comparison of the structural measures of real fires and model fires. Results of the model (righthandside) were obtained with a quadratic flammability (values of parameters are the same as in fig. 1d). 1000 fires occurring in a run with 3000 timesteps were analysed. See text for explanation of sizeclasses and measures.

W. mindestens eine Insel zu haben

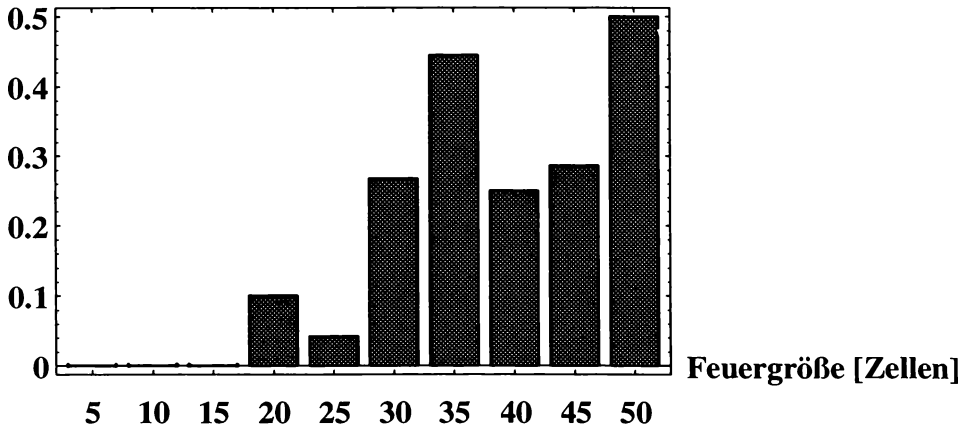


Abb. 4: Wahrscheinlichkeit, in einer Feuergrößenklasse mindestens eine Insel nichtverbrannter Vegetation anzutreffen. Bis zu einer Größe von 15-20 Zellen treten keine Feuer mit Inseln auf. Die Modellergebnisse wurden mit einer quadratischen Brandwahrscheinlichkeit berechnet (Parameterwerte wie Abb. 1d)

Fig. 4: Probability to obtain at least one island of unburnt vegetation within a fire. Up to a size of 15-20 cells there are no fires with islands. The results were obtained with a quadratic flammability (values of parameters are the same as in fig. 1d).

5. Zusammenfassung

Das vorgestellte einfache Modell auf der Basis eines zellulären Automaten verwendet wenige Annahmen, um die Ausbreitung von Feuern und ihre Auswirkung auf die räumliche Struktur von Sukzessions- oder Altersphasen zu simulieren. Mit der Verwendung einer altersabhängigen Brandwahrscheinlichkeit kann eine echte Wechselwirkung zwischen der räumlichen Struktur der Vegetation und dem Prozeß der Feuerausbreitung modelliert werden. Die Form der altersabhängigen Brandwahrscheinlichkeit erweist sich dabei als eine wesentliche Determinante der entstehenden räumlichen Strukturen.

Diskutiert wurden zwei unterschiedliche Szenarien: eine konstante Brandwahrscheinlichkeit und eine mit dem Alter quadratisch ansteigende Brandwahrscheinlichkeit. Letztere zeigt über einen weiten Parameterbereich komplexe Patchstrukturen und ein häufiges Aneinandergrenzen von jungen und alten Standorten. Das Szenario mit konstanter Brandwahrscheinlichkeit produziert komplexere Patchstrukturen allein für einen schmalen Parameterbereich. Das Auftreten einer konstanten Brandwahrscheinlichkeit in Wäldern mit komplexen Patchstrukturen erscheint aus diesem Grunde unwahrscheinlich.

Der verwendete Algorithmus der Feuerausbreitung bestimmt die Feinstruktur der Modellfeuer. Diese Feinstruktur konnte mit mehreren Maßen analysiert und mit empirischen Daten von realen Feuern verglichen werden. Der Vergleich zeigte gute quantitative und qualitative Übereinstimmungen zwischen den Modellwerten und den empirischen Daten.

Literatur

- BERGERON, Y., 1991: The influence of island and mainland lakeshore landscapes on boreal forest fire regimes. - Ecology 72 (6): 1980-1992.
- BERGERON, Y. & J. BRISSON, 1990: Fire regime in red pine stands at the northern limit of the species range. - Ecology 71 (4): 1352-1364.
- EBERHART, K. E. & P. M. WOODARD, 1987: Distribution of residual vegetation associated with large fires in Alberta. - Can. J. For. Res., Vol. 17: 1207-1212.

- JOHNSON, E. A., 1992: Fire and Vegetation dynamics - Studies from the North American boreal forest. - Cambridge University Press, Cambridge 1992: 129 S.
- JOHNSON, E. A. & C. E. VAN WAGNER, 1985: The theory and use of two fire history models. - Can J. For. Res. Vol. 15: 214-220.
- HEINSELMANN, M. L., 1973: Fire in the virgin forests of the Boundary Water Canoe Area, Minnesota. - Quaternary Res. 3: 329-382.
- HEINSELMANN, M. L., 1981a: Fire intensity and frequency as factors in the distribution and structure of northern ecosystems. - In: Proc. of the conf.: Fire regimes and ecosystem properties (held at 11.-15. Dez. 1978 Honolulu, Hawaii). - General technical report WO26 1981: 7-57.
- HEINSELMANN, M. L., 1981b: Fire and succession in the conifer forests of northern North America. - In: Forest succession - Concepts and applications. - Editoren: WEST, D. C., SHUGART, H. H. & D. B. BOTKIN - Springer Verlag, New York/Heidelberg/Berlin 1981: 374-405.
- PAYETTE, S., MORREAU, C., SIROIS, L. & M. DESPONTS, 1989: Recent fire history of the northern Quebec biomes. - Ecology 70 (3): 656-673.
- ROMME, W. H. 1982: Fire and landscape diversity in subalpine forests of Yellowstone National Park. - Ecological Monographs, Vol. 52/2: 199-221.
- TANDE, G. F., 1979: Fire history and vegetation pattern of coniferous forests in Jasper National Park, Alberta. - Can. J. Bot. 57: 1912-1931.

Adresse

Armin Ratz, Umweltforschungszentrum Leipzig/Halle, Sektion Ökosystemanalyse, Permoserstr. 15, D-04318 Leipzig.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1994

Band/Volume: [23_1994](#)

Autor(en)/Author(s): Ratz Armin

Artikel/Article: [Modellierung feuererzeugter räumlicher Strukturen in borealen Wäldern 373-381](#)