

1. Einführung

Seit Beginn der 70er Jahre hat sich die Feuerökologie (*fire ecology*) als neuer Schwerpunkt innerhalb der Ökologie herausgebildet, der sich mit der Funktion und den Auswirkungen des Feuers in der Umwelt befaßt. Die wesentlichen Gedankenanstöße hierzu kamen aus Nordamerika, wo der Einfluss natürlicher und anthropogener Feuer auf den Wald und die übrige Landschaft frühzeitig erkannt wurde und die feuerökologische Forschung auf den Weg brachte (Tall Timbers Fire Ecology Conferences 1962-76). Die Erkenntnisse aus der in Nordamerika und insbesondere dann auch in Australien und Südafrika betriebenen Forschung hat zu einer Neuorientierung des Naturschutzes, der Waldwirtschaft und der Bewirtschaftung und Behandlung der übrigen Landschaftsressourcen in diesen Ländern geführt.

Der Umfang der Kenntnis über die Rolle des Feuers aus evolutionärer (prähistorischer), historischer und moderner Perspektive ist ungleich verteilt. So ist der Stand des Wissens über die Rolle des Feuers in Ökosystemen der gemäßigten Zone hoch. Dies manifestiert sich beispielsweise in einer Reihe von Monographien und Zusammenfassungen über die Feuerökologie der gemäßigten Zone (Kozłowski und Ahlgren 1974; Wright und Bailey 1982; USDA Forest Service 1981), der besonderen Verhältnisse Australiens, des am stärksten von Feuer beeinflussten Kontinents (Gill *et al.* 1981). Die Rolle des Feuers in der borealen Zone Nordamerikas und Skandinaviens wurde von Wein und McLean (1983) zusammengefasst. Auch die Rolle des Feuers in den Verbreitungsgebieten mediterraner Vegetation des Mittelmeerraumes, Nordamerikas und des südlichen Afrikas ist umfassend beschrieben (u.a. USDA Forest Service 1977; Booyen und Tainton 1984; Goldammer und Jenkins 1990). Die anwendungsbezogenen Aspekte der Feuerforschung, die sich im Feuer-Management niederschlagen, stammen im Wesentlichen aus der gemäßigten Zone (zusammenfassend in Chandler *et al.* 1983; Pyne 1984), ebenso die kulturhistorische Aufarbeitung der Feuernutzung durch den Menschen (Pyne 1982, 1991).

Der Raum auf der Erde, in dem der Wald und die übrige Vegetation dem Feuer heute am stärksten ausgesetzt ist, liegt zwischen den Wendekreisen und den sich daran anschließenden Subtropen und den Regionen der gemäßigten und borealen Zone, die die gleichen sozio-kulturellen und sozioökonomischen Strukturen wie in den Tropen aufweisen. Über die Auswirkungen des Feuers auf die Vegetation der Tropen und Subtropen liegen eine große Zahl von Einzeluntersuchungen aus der Zeit zwischen dem Ende des letzten Jahrhunderts bis Heute vor. Sie bezeugen das Interesse an dem wohl wichtigsten natürlichen und zunehmend auch vom Menschen eingebrachten Störfaktor in dieser Vegetationszone der Erde, insbesondere in Zusammenhang mit der in den Tropen und Subtropen bis heute praktizierten Brandwirtschaft (vgl. Bartlett 1955, 1957, 1961).

Seit etwa Ende der 80er Jahre wird den Vegetationsbränden in den Tropen größere Aufmerksamkeit entgegengebracht. Eine erste systematische Beschreibung des komplexen Feuergeschehens in den Tropen und ihres ökologischen Impakts erfolgte in einem multidisziplinären Ansatz (Goldammer 1990b). Das steigende Interesse an einem besseren Verständnis der Rolle der Biomasseverbrennung auf biogeochemische und atmosphärenchemische Prozesse berücksichtigt besonders auch die Feuer im Tropenraum; eine große Reihe von Untersuchungen hierzu sind bei Levine (1991) erschienen und auch in einer ersten globalen Betrachtung der Rolle des Feuers in der Umwelt zusammengefasst (Crutzen und Goldammer 1992; s.a. Crutzen und Andreae 1990; Andreae und Goldammer 1992).

Die Bevölkerungszunahme und die damit verbundene Inanspruchnahme von Vegetationsressourcen in den Entwicklungsländern, die im Wesentlichen zwischen den Wendekreisen liegen, bringen derzeit eine Eskalation der Feueranwendung mit sich, die wohl auch in absehbarer Zukunft anhalten wird. Die Erlangung eines besseren Verständnisses des Ursachenkomplexes, der ökologischen Auswirkungen der Feueranwendung und der möglichen Maßnahmen der Stabilisierung bzw. Gegensteuerung waren Anlass zur Vorlage dieser Monographie. Sie stellt eine zusammenfassende Bearbeitung über das Feuer in den Ökosystemen der Tropen dar, die in erster Linie aus dem Blickwinkel der Forstwissenschaft erfolgt. Um die feuerinduzierten Prozesse in den Tropen und Subtropen verstehen zu können, ist es allerdings notwendig, einen großen zeitlichen und biogeographischen Bogen zu spannen. Nach einer Beschreibung

der bioklimatischen und anthropogenen Rahmenbedingungen des Feuergeschehens in den Tropen und Subtropen wird eine ökologische Systematik der Feuerregime aufgestellt. Nach dieser Systematik wird die Feuerökologie der wichtigsten tropischen Waldformationen und Savannen der immerfeuchten und wechselfeuchten Tropen beschrieben. Angeschlossen an diese Betrachtung wird ein Abschnitt über die Auswirkungen von Feuer in den subtropischen Plantagenwäldern (Exoten-Aufforstungen). Weiterhin folgen Exkurse in ausgesuchte Wald- und Graslandgesellschaften Asiens und des südlichen Südamerikas, die sich an den Gürtel der Subtropen anschließen, die Himalajas, die nördlichen Wälder Chinas und die andino-patagonischen Waldgesellschaften Südamerikas, die zwar nicht dem klimatischen, aber dem sozio-kulturellen Einfluß der Tropen unterliegen. Einer Retrospektive über die Entwicklung des Waldbrandschutzes in Feuerökosystemen folgen Vorstellungen zum Integrierten Feuer-Management in tropischen Waldformationen.

Die Beschreibung der über den Standort hinausgehenden Auswirkungen des Feuers zeigen, daß die Wald- und Savannenbrände in den Tropen und Subtropen erhebliche Auswirkungen auf Ökosystemprozesse regionalen und globalen Charakters haben.

Aufgrund des Umfanges der für diese Synopse verwendeten Untersuchungen und Informationen schien es sinnvoll, die wichtigsten Abschnitte jeweils zusammenzufassen.

2. Natürliche und anthropogene Rahmenbedingungen des Auftretens von Feuer

2.1 Bioklimatische Rahmenbedingungen

Die bioklimatischen und anthropogenen Rahmenbedingungen sind die entscheidenden Faktoren, die die Feuerökologie der Tropen bestimmen. Trotz der pan-tropischen Konzeption dieser Synopse bezieht sich einerseits der Großteil der Fallbeispiele aufgrund der eigenen Arbeiten auf das tropische Asien. Andererseits scheint es notwendig, die geographisch, phytogeographisch oder klimatisch definierten Grenzen der Tropen zu überschreiten. Eine Einengung auf die geographischen Grenzen der Tropen (Wendekreise), den Wärmefaktor (20°C-Jahresisotherme oder 18°C-Isotherme des kältesten Monats) oder die Klimaperiodizität (besonders die thermische Jahres- und Tagesperiodizität) (s.a. Lamprecht 1986; Köppen 1923; Troll 1961) ist nicht sinnvoll. So müssten dadurch beispielsweise innertropische Hochgebirgslagen ausgeklammert werden (Lamprecht 1986), ebenso benachbarte Regionen mit ähnlichen Vegetationsgesellschaften und Landnutzungsformen. Auf dem indischen Subkontinent wirken sich beispielsweise die jahreszeitliche Verschiebung der innertropischen Konvergenzzone und das Relief des Himalajas und des Tibet-Plateaus derart aus, dass der Einflussbereich des tropischen Klimas bis weit in außertropische Regionen/Länder spürbar ist (Pakistan, Nordindien, Nepal, Bhutan).

Hinzu kommt, dass die demographischen, sozio-ökonomischen und kulturellen Rahmenbedingungen in den unmittelbar an die Tropen angrenzenden Regionen einen ähnlichen Einfluss auf den Waldzustand bzw. die Waldentwicklung haben, wie dies innerhalb der Tropen der Fall ist. Damit sind die Verhältnisse derjenigen Regionen benachbarter Entwicklungs- und Schwellenländer angesprochen, deren Verständnis für die gesamte Thematik von Bedeutung ist.

2.1.1 Eigenschaften der zonalen Klimaräume

Die zonalen Klimaräume und die zugeordneten zonalen Vegetationstypen sind aufgrund der Verteilung und der Orographie der Landmassen unregelmäßig ausgeformt. Von den von Walter *et al.* (1975) und Walter (1977) definierten Klimazonen sind bei der vorliegenden Betrachtung vor allem das Zonobium I (Äquatoriales Zonobium mit Tageszeitenklima) und das Zonobium II (tropisches Zonobium mit Sommerregen) und ihre Übergangsformen (Zono-Ökotone) von Interesse (s.a. Walter und Breckle 1984). Die Klimazonen, mit deren Wald- und anderen Vegetationsformen sich die vorliegende Arbeit befaßt,

werden an dieser Stelle zusammenfassend charakterisiert.

Zonobiom I

Die Vegetation des perhumiden Zonobioms I (äquatoriales Tageszeitenklima) ist durch den immergrünen tropischen Regenwald gekennzeichnet. Das Auftreten von Vegetationsbränden oder die Bildung von Feuerökosystemen ist vom Auftreten periodischer oder anomaler Trockenzeiten abhängig. Folgende Überlegungen lassen eine Beziehung zwischen Feuer und den Vegetationsgesellschaften des äquatorialen Zonobioms herstellen:

- Die bisherigen Vorstellungen über die unveränderte Form des tropischen Regenwaldes seit dem Tertiär müssen revidiert werden. Nach dem bisherigen Kenntnisstand ist anzunehmen, dass in der Periode von 20.000 bis 10.000 Jahren vor Heute ausgeprägte Trockenzeiten das äquatoriale Klima zwischen 10°N und 10°S bestimmt haben. Erst zwischen 14.000 bis 1700 vor Heute glichen sich die Vegetationsverhältnisse in den Tropen den heutigen allmählich an. Wenn sich der tropische Regenwald in seiner heutigen Verbreitung erst in den letzten 10.000 bis 7000 Jahren ausgedehnt hat, dann ist anzunehmen, dass der potentielle Einfluss des Feuers unter den zuvor arideren Bedingungen einen Einfluss auf die Dynamik der Vegetationsentwicklung gehabt haben und eventuell auch nachvollziehbar sein muss.

- Periodische, großräumige Trocken-Ereignisse können in vegetationsgeschichtlichen Zeiträumen die Voraussetzungen für eine periodische Brennbarkeit der Vegetation geschaffen haben. Das zyklische Auftreten des pazifischen "El Niño" mit seinem Einfluß auf die Ausprägung und Dauer der Trockenzeiten im West-Pazifik und im insularen Südostasien (El Niño - Southern Oscillation) haben in jüngerer Zeit gezeigt, dass selbst tropische Sumpf- und Torfmoorwälder in einen Zustand der Brennbarkeit versetzt werden können.

- Auch innerhalb des perhumiden äquatorialen Zonobioms lassen sich "Subzonobiome" abgrenzen, die durch eine oder zwei kürzere Trockenzeiten charakterisiert sind (Whitmore 1975; Walter und Breckle 1984).

- Die Auswirkungen der Umwandlung des tropischen Regenwaldes in den letzten Jahrzehnten lassen bereits jetzt einen Rückkoppelungseffekt erwarten (Abschn. 5.3). Es ist mittlerweile bekannt, daß ein Großteil des Niederschlagsaufkommens über dem tropischen Regenwald *in situ* entsteht. So stammen nach den Untersuchungen von Salati *et al.* (1978) 48% der Niederschläge im Amazonasbecken zwischen Belém und Manaus aus der Evapotranspiration des dortigen Waldes. Schubart (1982) ermittelte sogar lokale Werte um 80%. Der Umfang und die Auswirkungen der Rodung und Waldverbrennung innerhalb der großen Regenwaldgebiete der Neotropis und der Paläotropis müssen daher auch einen Einfluss auf das lokale und regionale Niederschlagsregime haben und insgesamt zu trockeneren Verhältnissen führen (vgl. Salati 1987).

Zono-Ökoton I/II

Die Übergangszone zwischen dem äquatorialen Tageszeitenklima und dem humido-ariden tropischen Sommerregengebiet des Zonobioms II (nach der Walter'schen Nomenklatur als Zono-Ökoton I/II bezeichnet) weist in zunehmender Entfernung vom Äquator auch ausgeprägte Trockenzeiten auf. Die in Äquatornähe auftretende kleine Trockenzeit im Sommer verschwindet allmählich zwischen dem 10. und 15. nördlichen Breitengrad. Mit zunehmendem nördlichen Abstand vom Äquator tritt hingegen in den Wintermonaten eine ausgeprägte Trockenzeit auf. Südlich des Äquators findet sie während des "Nordsommers" statt.

Mit der zunehmenden längeren Trockenzeit ist ein Übergang vom immergrünen Feuchtwald in den regenrünen Feuchtwald zu beobachten, der in seinem Verbreitungsareal von etwa 250×10^6 ha eine

Fülle von verschiedenen Ausformungen erreicht, die sich sehr wesentlich nach der Dauer der Trockenzeit (2-5 Monate) richten. Nach Lamprecht (1986) sind dies geschlossene, hochstämmige Waldtypen, die während der Trockenzeit in der Oberschicht teilweise, gewöhnlich jedoch überwiegend bis vollständig laubabwerfend sind; in den unteren Schichten ist der Laubabwurf weniger ausgeprägt. Der Laubfall während der Trockenzeit führt zur Bildung einer leicht entzündlichen Bodenauflage mit trockenen Blättern, in der sich ein Bodenfeuer leicht aufbauen und ausbreiten kann.

Zonobiom II

Das tropische Sommerregengebiet des Zonobioms II ist durch ein humido-arides Klima jahreszeitlicher Periodizität mit einer ausgeprägten Regenzeit während der heißen Sommermonate und einer extremen Dürre im kühleren Winterhalbjahr gekennzeichnet. Gegliedert wird das Zonobiom in ein feuchteres und in ein trockeneres Subzonobiom. Dabei ist nicht nur die Länge der Regenzeit entscheidend, sondern auch die Höhe der Jahresniederschläge, da hohe Niederschläge auch eine kurze Trockenzeit kompensieren können. Im feuchteren (humiden) Subzonobiom ist die jährliche potentielle Evapotranspiration geringer als der Jahresniederschlag; im trockeneren Subzonobiom ist dies umgekehrt, so daß das Klima hier hydrologisch arid ist.

Die zonale Vegetation des Zonobioms II ist durch regengrüne Trockenwälder (laubabwerfende Baumarten) und verschiedene Ausformungen von Savannen charakterisiert. Eine große Reihe von Übergangsformen macht hierbei die Unterscheidung zwischen Wald und Nicht-Wald besonders schwierig (Hegner 1979). Der physiologisch bedingte Laubabwurf der Holzgewächse während der Trockenzeit bzw. das Dürwerden der Gras- und Krautschicht in den Savannen und Grasländern schafft die Voraussetzungen für das Auftreten und die Ausbreitung des Feuers. Auf der gesamten Fläche der tropischen Trockenwälder (etwa 500×10^6 ha) und der Savannen (etwa 2500×10^6 ha) spielt daher der Einfluss des Feuers in der Dynamik und Degradation der Vegetation eine zentrale Rolle; im Einzelnen wird darauf später eingegangen (Abschn. 3.2-3.4).

Zono-Ökoton II/III

Der Übergang vom humido-ariden zum ariden Klima geht einher mit der Verkürzung der Sommerregenzeit und der Abnahme des Jahresniederschlages bis auf etwa 200 bis 100 mm. Mit zunehmender Trocknis findet ein gradueller Übergang von geschlossenem oder offenem laubabwerfenden Wald in die Baumsavanne statt, im weiteren Verlauf in die Strauch- und Buschsavanne. Bei weiterer Abnahme der Niederschläge bildet sich Grasland.

Eine kontinuierliche und periodisch austrocknende Auflage brennbarer Bodenvegetation schafft in diesen offenen Waldformationen und Savannen besonders günstige Voraussetzungen für die großflächige Ausbreitung des Feuers. Erst bei weiter zunehmender Aridität und der Vereinzelnung der Vegetation, wie etwa weitständige Horstgräser, wird die Kontinuität der potentiell brennbaren Streuauflage unterbrochen; damit tritt dann auch die Bedeutung bzw. Häufigkeit des Feuers zurück.

Zonobiom III

Das aride Zonobiom der subtropischen Wüsten spielt hinsichtlich des Auftretens von Feuer eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der Abnahme des zur Verfügung stehenden Wassers steht die Vegetation, die die Dürrezeiten überdauert (Xerophyten, Sukkulente, Halophyten) im allgemeinen weitständig und läßt daher die Ausbreitung des Feuers nicht zu. Lediglich nach einem Niederschlagsereignis kann es zum Blühen von Ephemeren und Ephemeroïden (Geophyten) kommen, die ein Flächenfeuer zu tragen vermögen.

2.1.2 Natürliche Vegetationsbrände

Unter den natürlichen Ursachen für die Entstehung von Wald- und anderen Vegetationsbränden waren und sind die Blitzschlagfeuer von größter Bedeutung. Die übrigen natürlichen Feuerquellen seien daher nur am Rande erwähnt. Unter ihnen spielt heute gelegentlich der aktive Vulkanismus eine Rolle, der durch Eruption oder Lavaströme die Vegetation in Brand setzen kann. Aus der vulkanisch aktiven Region Indonesiens liegt hierzu ein Bericht von Swart (1939) vor; dort brannte zuletzt im Jahr 1991 in Sulawesi die Hälfte eines 8000 ha großen Nationalparks aufgrund vulkanischer Entzündung ab. Vogl (1969) berichtet über derartige, wenn auch seltene, Ereignisse auf Hawaii. In Japan entstanden 1991 eine Reihe von Waldbränden durch die Eruptionen des Vulkans Unzendake.¹ Indirekt können stärkere Vulkanausbrüche die Gewitterbildung und damit auch Blitzschlagfeuer induzieren. Die durch Vulkaneruptionen in höhere Luftschichten eingetragenen Staub- und Aschepartikel stellen Kondensationskerne dar, die zur Wolken- und Regenbildung führen, bei der auch Gewittertätigkeit beobachtet wurde.²

Eine Selbstentzündung (spontane Entzündung) von Vegetation kann in starken organischen Auflagen dann entstehen, wenn die durch Bakterienzersetzung entstandene Wärme nicht an die Umgebung abgegeben werden kann (Wärmestau). Komarek (1973) führt die Waldbrände in früheren erdgeschichtlichen Zeiten, wie bereits im Karbon, unter anderem auf Selbstentzündung zurück. Selbstentzündung wird auch heute noch von Braunkohlelagerstätten berichtet (Rempe und Rodewald 1985).

Eine weitere natürliche Feuerquelle ist die Funkenbildung bei Steinschlägen. Von derart entstandenen Bränden wurde dem Autor an verschiedenen Stellen im südlichen Afrika berichtet. Stein- und Felsschläge in Südafrika werden nach Beobachtungen von Edwards (1984) durch Hangrutschungen und leichte Erdstöße erzeugt, ebenso aber auch durch Tiere (u.a. Affen), die einen Felsschlag auslösen können. Immerhin entstanden etwa ein Viertel der Naturbrände in der Cedarberg-Region (Südafrika) zwischen 1958 und 1974 durch Steinschlag (Andrag 1977; in Edwards 1984). Ähnliche Berichte liegen aus den submontanen Kiefernwäldern des indischen Himalayas vor (Henniker-Gotley 1936).

Die Voraussetzungen für die Entstehung und Ausbreitung dieser Feuer ist das Vorhandensein besonders leicht entzündlicher Bodenvegetation (*flash fuels*), wie sie etwa in den Grasländern Afrikas anzutreffen sind.

Die von brennenden Kohleflözen ausgehenden Feuer im tropischen Regenwald, wie sie für Borneo beschrieben wurden (Goldammer und Seibert 1989), stellen eine wenig verbreitete Variante natürlicher Feuerquellen dar (Abschn. 3.1.1).

Der Blitzschlag ist heute unverändert die wichtigste natürliche Feuerquelle. Es ist davon auszugehen, daß Blitzschläge bereits in erdgeschichtlichen Zeiträumen verantwortlich für die Waldbrände waren, deren Spuren sich heute noch finden lassen. In nahezu allen Kohlelagerstätten aus der Zeit zwischen dem Paläozoikum und dem Tertiär läßt sich fossile Holzkohle (Fusinit, *fusain*) finden, die in den Flözen eingebettet ist (Mägdefrau 1953; Komarek 1973). Besonders während des Paläozoikums (Karbon) hinterließen die Waldbrände große Mengen an Holzkohle, die in den heutigen Steinkohleflözen als Einschlüsse, oder in Extremfällen sogar als nahezu reine Holzkohleschichten zu finden sind, wie etwa die über 5.000 km² großen Holzkohleflöze von Pittsburg (Francis 1961).³

¹ Über die Rolle des Vulkanismus bei Entstehung von Waldbränden in der Andenregion s. Abschnitt 3.6.3.

² In vielen älteren Beschreibungen und Gemälden von Vulkanausbrüchen sind Gewitter oder Blitzschläge um den Vulkan oder die Eruptionswolken herum dargestellt worden (s.a. Wilcoxson 1966).

³ Eine ausführliche Auseinandersetzung mit den prä-pleistozänen Feuern und der Paläoökologie des Feuers insgesamt wird auf die derzeit im Druck befindlichen Ausführungen von Clark und Robinson (1992) verwiesen. Darin wird auch die Bedeutung der prähistorischen Feuer in der Atmosphärenchemie diskutiert, insbesondere auch die

Die Bildung dieser Holzkohleeinschlüsse lässt sich unter den heutigen tropischen und subtropischen Vegetationsbedingungen durchaus nachvollziehen. Komarek (1973) berichtet von Bränden in den Zypressen-Sumpfwäldern (*Taxodium distichum*) und Marschen des subtropischen Südostens der USA. Derartige Sumpf- und Sumpfwaldbrände treten auch in den Feuchttropen auf (ausführlich in Abschn. 3.1). Unter natürlichen Bedingungen entstehen sie durch Blitzschlag dann, wenn nach längeren außergewöhnlichen Trockenperioden der Wasserstand eines Sumpfgebietes fällt und der obere Teil der organischen Auflage austrocknet und brennbar wird. Die in den organischen Auflagen brennenden Feuer bzw. Schwelbrände dringen in die ausgetrockneten organischen Auflagen ein und wirken sich besonders im Wurzelraum aus. Dadurch werden die Bäume des Sumpfwaldes zu Fall gebracht. Das stärkere Brennmaterial, insbesondere die Baumstämme, werden selten ganz vom Feuer verzehrt, sondern nur verkohlt. Beim erneuten Ansteigen des Wasserspiegels werden die Holzkohlereste in die organische Sumpfschicht eingebettet bzw. die Baumstämme versinken im Sumpf.

Die Hinweise auf natürliche Waldbrände und ihre fossile Dokumentation setzt sich im Mesozoikum fort, deren Nachweis von Harris (1958) ausführlich beschrieben ist. Die Waldbrandspuren des Tertiär lassen sich durch die Fusinit-Vorkommen heute weltweit in Braunkohlelagerstätten auffinden (Kemp 1981).

Spuren von Blitzschlag und Blitzschlagfeuern während des Tertiär und des Quartär sind durch Blitzschlagrinnen in fossilen Baumstämmen nachweisbar. Komarek (1972) berichtet von einer fossilen Zypresse (*Taxodium* spp.) aus dem Miozän, die eine typische Blitzschlagrinne aufwies. Der Nachweis von Waldbränden bzw. Feuerwunden kann auch an traumatischer Jahrringbildung fossilen Holzes erbracht werden. Für das nördliche Afrika (heutiges Äthiopien und Libyen) wurden mit dieser Methode Waldbrände für die Zeit von 0,1 bis 3,1 Millionen Jahren nachgewiesen (Dechamps 1984). Blitzeinschläge in den Boden lassen sich für jüngere geologische Zeiträume besonders gut in Sandböden rekonstruieren, in denen sich durch Verschmelzung und Erhärtung anorganischer Bestandteile Blitzröhren (Fulgurite) bilden. Für den Nachweis von Blitzeinschlägen in tropischen und subtropischen Savannen und Wüsten sind diese Blitzkanäle hilfreich (Glover 1975, 1978).

Die heutige globale Verteilung der Blitzschlagaktivitäten zeigt die größte Dichte in den Tropen. Neuere Untersuchungen der Blitzschlagaktivitäten durch satellitengestützte (optische) Erdbeobachtungssysteme (**Defense Meteorological Satellite Program, DMSP**) von Turman und Edgar (1982) und Orville und Henderson (1986) konkretisieren ältere Angaben der World Meteorological Organization (WMO 1956). Danach liegen die Schwerpunkte der Gewitterhäufigkeit in den Regenwald- und Trockenwaldgebieten und Savannen der Paläotropis und der Neotropis. Die Gewitterdichte in den Tropen unterliegt dabei zyklischen und jahreszeitlichen Schwankungen. So verlagern sich die Gewitteraktivitäten synchron mit den Nord-Süd-Bewegungen der Innertropischen Konvergenzzone (ITZ). Sie zeigen zu Jahresbeginn (Januar) den Schwerpunkt der Gewitteraktivitäten südlich des Äquators (bis zum Kap); zu dieser Zeit treten praktisch keinerlei Gewitter nördlich des Äquators auf. In der Jahresmitte (Juni) liegt der Schwerpunkt der Gewitteraktivitäten nördlich des Äquators, im April und Oktober in der Äquatorregion.

Mit zunehmendem Abstand vom Äquator verlängern sich die Trockenzeiten (s. Abschn. 2.1) und damit auch die Häufigkeit der Blitzschlagfeuer. Da am Ende der Trockenzeit häufig zunächst Trockengewitter auftreten, liegen zu diesem Zeitpunkt besonders günstige Bedingungen für Vegetationsbrände vor. In den Savannen und den laubabwerfenden Waldgesellschaften ist die Grasschicht (einjährige Gräser) ausgetrocknet und ebenso wie die Streuschicht (Blattstreu) im Zustand der höchsten Brennbarkeit. Bisweilen sind die ersten Begleitniederschläge auch nur vereinzelt und nicht sehr ergiebig, so dass vertikale Blitzentladungen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Feuer führen. Beschreibungen der natürlichen Savannenbrände liegen insbesondere bei Philipps (1930), Komarek (1972) und Edwards (1984) vor.

Mit zunehmender Äquatornähe (perhumides Tageszeitenklima des Zonobioms I) und insbesondere im

immergrünen Regenwald wird dem Blitzschlag in erster Linie eine Funktion in der Bestandesdynamik (Schaffung von Blitzschlaglöchern → **gap dynamics**) zugeschrieben (siehe vor allem Brünig 1964; Brünig und Huang 1989). Berichte von Blitzschlagfeuern, wie etwa von Anderson (1966) oder Weidelt und Banaag (1982), sind selten, so dass dem Blitzschlagfeuer insgesamt auch keinerlei Bedeutung zugemessen wird (Komarek 1968; Richards 1976; Whitmore 1985). Im wesentlichen wird dies auf die fehlenden organischen Bodenaufgaben bzw. fehlende Bodenvegetation zurückgeführt, die eine Entstehung und Ausbreitung eines Bodenfeuers nicht zulassen. Edaphische Varianten des tropischen Regenwaldes, wie etwa die Heidewälder (auf Podsol) oder Regenwaldgesellschaften auf Kalkböden ermöglichen die Bildung solcher organischen Auflagen und damit auch die Feuerausbreitung (s.a. Mueller-Dombois 1981).

2.2 Sozioökonomische und kulturelle Rahmenbedingungen der anthropogenen Vegetationsbänder

Die von Bartlett (1955, 1957, 1961) vorgelegte dreibändige Bibliographie "Fire in relation to primitive agriculture and grazing in the tropics" stellt erstmalig umfassendes Quellenmaterial über die Anwendung des Feuers in der Landnutzung der Tropen zusammen. Diese werden durch Untersuchungen über Afrika (Philipps 1965, 1968a, 1968b, 1974) und über die tropischen Tiefländer der Amerikas (Budowski 1966) ergänzt. Die räumlichen und saisonalen Aspekte der Feueranwendung in den Tropen sind von Batchelder (1967) kartographisch zusammengestellt. Im Nachfolgenden werden die kausalen Vernetzungen zwischen der Nutzung des Feuers im Agrarsektor und ihr Übergreifen auf die Waldvegetation in Anlehnung an Goldammer (1988b) zusammengefasst.

2.2.1 Wanderfeldbau (Shifting Agriculture)

Der Begriff **shifting agriculture** (SHAG) oder auch **shifting cultivation** steht für eine Reihe verschiedener Grundformen des Wanderfeldbaues. Nach der Definition der FAO (1982) sind dies landwirtschaftliche Systeme mit einer relativ kurzen Periode kontinuierlicher Kultivierung, gefolgt von einer relativ langen Periode der Brache (**fallow**). Hierunter fallen die Systeme, in denen die Periode der Brache mindestens doppelt so lang ist, wie die Periode der Nutzung. Landwirtschaftliche Systeme mit kürzerer Periode (semi-permanente oder stationäre Kulturen) sind hingegen unter dem Begriff der reinen landwirtschaftlichen Nutzung einzuordnen (FAO 1985; Lanly 1985).

Der Wanderfeldbau ist eine Form der Waldnutzung für den landwirtschaftlichen Zwischenbau, mit der das Verbrennen der Waldvegetation untrennbar verbunden ist. Neben den vielen lokalen Bezeichnungen für den Wanderfeldbau (z.B. **swidden cultivation, jhum, kaingin, chena, podu, milpa, roza y tumba, conuco**) wird der Begriff **slash-and-burn** synonym verwendet (s.a. Watters 1960, 1971; Spencer 1965; Ruthenberg 1980; FAO 1984a; Savage *et al.* 1982; Lamprecht 1986; Peters und Neuenschwander 1988). Dabei werden die Holzgewächse des Primär- und Sekundärwaldes meist zu Beginn der niederschlagsarmen oder Trockenzeit gefällt und am Ende der Trockenzeit flächenweise oder auch auf Haufen verbrannt.

Die Auswirkungen des frühen Brandfeldbaues in den Tropen wurden als punktförmig und daher unbedeutend gewertet (Lamprecht 1961; Jordan 1985); dies gilt auch heute noch für dünn besiedelte Regenwaldgebiete wie beispielsweise in Zaire (Myers 1980b).⁴

⁴ Die Wurzeln der Brandwirtschaft reichen nicht nur in den Tropen weit zurück, sondern wurden auch in vielen Ländern Europas angetroffen (Goldammer 1978). Die Vorbereitung des Waldbodens zur landwirtschaftlichen Nutzung (Brandwaldfeldbau, landwirtschaftlicher Zwischenbau) durch flächiges Verbrennen (im deutschen Kulturraum: Flammfeuer, Überlandbrennen, Sengen) oder haufenweises Anzünden mit anschließender Verteilung der Asche (Schmoren, Schmoden, Schmotfeuer) gab es nicht nur in der mitteleuropäischen Hackwaldwirtschaft, sondern wurde auch in Skandinavien und Rußland bis weit in dieses Jahrhundert hinein betrieben. Der Hintergrund der Brandwirtschaft ist und war auch stets die Verknappung von Lebensraum und Ernährungsgrundlage. In Mitteleuropa wurde der Brandwaldfeldbau sogar als "nachhaltige Quelle der Nahrung und des Erwerbs" bezeichnet

Insgesamt hat der Wanderfeldbau in den Tropen heute aber eine neue Größenordnung erreicht. Schätzungen der FAO gingen zu Anfang der 80er Jahre davon aus, daß etwa 500 Millionen Menschen in den Tropen Wander- bzw. Brandfeldbau betreiben; betroffen waren dabei insgesamt 240×10^6 ha geschlossener Wald (**closed forest**) und 170×10^6 offener Wald (**open forest**) (FAO/UNEP 1982; FAO 1985; Lanly 1985).

Dies entspricht 8,3% der Landmasse der Tropen, gleichzusetzen mit etwa 21% der bewaldeten Fläche. Die FAO ging zu diesem Zeitpunkt von einer jährlichen Erweiterung der SHAG-Flächen von 1,25% aus.

Crutzen (1979) und Seiler und Crutzen (1980) schätzten zur gleichen Zeit die Fläche der gerodeten und/oder abgebrannten Waldes durch den Wanderfeldbau bereits auf 41×10^6 ha pro Jahr. Die durch Brandrodung betroffenen Waldflächen haben aber im letzten Jahrzehnt eine zusätzliche dramatische Steigerung erfahren, die in ihrem Umfang und in ihren direkten Auswirkungen in Abschnitt 5 näher besprochen wird.

Die mit dem Wanderfeldbau verbundenen Störungsprozesse der Naturwaldstruktur, die sich daraus entwickelnde Sekundärvegetation und das "Zusammenwachsen" der Brandrodungsflächen (vgl. Loetsch 1958) haben zur Folge, daß über die eigentliche, jeweils vorgesehene, Brandrodungsfläche hinaus das Waldgefüge insgesamt feueranfälliger wird. Die Auswirkungen des Wanderfeldbaues auf die erhöhte Feueranfälligkeit des tropischen Regenwaldes sollen beispielhaft dargestellt werden:

Randeffekt und Auflichtung des Kronenraumes

Die Randstufenwirkung (**edge effect**) zwischen Brandrodungsparzellen und nicht berührtem Wald hat im wesentlichen mikroklimatische Auswirkungen. Erhöhte Sonneneinstrahlung und Luftbewegung im Randbereich führen zu stärkeren und rascheren Austrocknung des potentiell brennbaren Materials. Die Auflichtung der Kronen-Überschirmung durch selektive Holznutzung und -bringung, in deren Kielwasser sich der unkontrollierte Wanderfeldbau in bislang unerschlossenen Naturwaldflächen vollzieht, hat den gleichen Effekt. Im Einflussbereich der Randstufe entstehen aufgrund der geänderten Einstrahlungsverhältnisse die Voraussetzungen für die Etablierung einer Bodenvegetation. Auf der verlassenen Brandrodungsparzelle sind die ersten Jahre des Sukzessionsverlaufs ebenfalls durch die Gras-, Kraut- und Strauchschicht bzw. bodennahe Vegetation charakterisiert (Uhl und Jordan 1984). Damit sind im Gegensatz zum Primär-Regenwald, dem diese bodennahe Vegetation weitgehend fehlt, die Voraussetzungen zur Entstehung und zum Weitertragen eines Bodenfeuers gegeben.

Anderes Brennmaterial

Neben der in den Trockenperioden feueranfälligen bodennahen Vegetation stellt die Blattstreu der Primär- und Sekundärwaldpflanzen auch im tropischen Regenwald einen nicht zu unterschätzenden Faktor für die Erhöhung der Brennbarkeit des gestörten Waldgefüges dar. Während einerseits die Abbaurate organischer Substanz in den feuchten Tropen als am höchsten eingeschätzt wird (Olson 1963; Zinke *et al.* 1984), stellen sich andererseits Pionier- und Sukzessionspflanzen auf den aufgelassenen Rodungsparzellen bzw. deren Randbereich auf die verstärkt xerischen Standortbedingungen ein. Dabei wird die Bildung von sklerophyllischen Blättern typisch, die relativ hart sind und ein geringes Blattflächen-Gewichts-Verhältnis haben (Mooney *et al.* 1984). Besonders die Anfangsphase der Dekomposition dieser Hartlaubblätter ist dadurch stark verzögert. Diese Blattstreu steht daher als potentiell brennbares Material länger zur Verfügung.

Unter den großblättrigen Pionierarten mit ihrem extrem großen Blattflächen-Gewichts-Verhältnis bildet

(Wedekind 1847; s.a. Goldammer 1978; Montag 1990).

sich unter diesen Standortsbedingungen eine locker aufgeschüttete Blattstreu, die sich aufgrund der sperrigen Lagerung nicht so schnell zersetzt, besonders leicht austrocknet und damit die Bildung von Bodenfeuern ermöglicht (**flash fuels**). Eine Verstärkung des Feuerpotentials bildet auch der Schlagabraum, der bei der selektiven Holznutzung und der Anlage von Waldstraßen und Rückegassen anfällt und nicht verwertet wird.

Die Zunahme der beobachteten Waldbrände, die sich von den Brandrodungsparzellen ausgehend selbst in den Regenwaldgebieten der perhumiden Äquatorialzone unkontrolliert ausbreiten, läßt sich durch die beschriebenen Auswirkungen des Wanderfeldbaues erklären. Besonders stark sind die Brandrodungsfeuer derzeit im Amazonasbecken. Im Jahr 1985 wurden mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren alleine im südlichen Amazonasbecken (brasilianische Bundesstaaten bzw. Territorien Acre, Rondônia und Mato Grosso) starke Waldbeschädigungen durch Brandrodungsaktivitäten und Weidefeuer auf insgesamt $26,5 \times 10^6$ ha und eine völlige Waldumwandlung auf $8,9 \times 10^6$ ha festgestellt (Malingreau und Tucker 1988). Die Beobachtungen von 1987 zeigen allein in der Region "Amazônia Legal" eine Brandrodungsfläche von etwa 20×10^6 ha, davon 40% erstmalig gebrannter Primärwald und 60% Sekundärwaldflächen, die bereits schon einmal überbrannt worden waren (Setzer und Pereira 1991).

Diese außergewöhnliche Eskalation der Brandrodungsaktivitäten in Amazonien ist nicht nur auf die Walderschließung (Straßenbau, in Rondônia) zurückzuführen (Malingreau und Tucker 1988), sondern auch auf die sozio-ökonomische Landschaft Brasiliens, die durch Freisetzung von Arbeitskräften (Enteignung von Kleinbauern, hohe Mechanisierung der großflächigen und staatlich geförderten landwirtschaftlichen Programme) gekennzeichnet ist, die ihren Lebensunterhalt durch Rodung neuer Flächen suchen müssen (Fearnside 1986).

2.2.2 Weidewirtschaft

Die traditionelle Anwendung des Feuers in der Weidewirtschaft ist praktisch untrennbar verknüpft mit der Entstehung und Dynamik der offenen Waldgesellschaften (**open forests**), Savannen und Grasländern. Die tropischen Savannen und offenen Waldgesellschaften kommen auf insgesamt etwa $2300-2600 \times 10^6$ ha vor (Cole 1986; Weiss 1990) und stellen damit den überwiegenden Anteil der tropischen natürlichen und halbnatürlichen Vegetation. Die vorsätzliche Einbringung des Feuers wurde schon frühzeitig als ein wesentlicher Faktor der Erhaltung eines dynamischen Gleichgewichtszustandes im Verteilungsmuster von Bäumen, Büschen und Gras erkannt (siehe insbesondere Busse 1908; Phillips 1930; Skovlin 1972). Bei den meisten Naturvölkern fand das Feuer zunächst bei der Jagd auf Wildtiere Anwendung. Zum einen wurde das Feuer direkt als ein Mittel der Treibjagd verwendet (**fire hunting**), zum anderen auch zur Schaffung von Äsungsflächen, insbesondere auf dem Höhepunkt der Trockenzeiten, um dort gezielt das Wild zu erlegen (Conklin 1957; Seavoy 1975).

Die Stimulation des Wuchses frischer Triebe von Gras, Sträuchern und Bäumen ist auch heute die wesentliche Zielsetzung des Feuereinsatzes in der Weidewirtschaft. Auf dem Höhepunkt der Trockenzeit erfolgt sie damit zu einem Zeitpunkt der Vegetationsruhe und der Knappheit von Äsungsgrundlagen, die mit den durch das Feuer stimulierten Aufwuchs frischer Triebe, die zudem einen hohen Nährwert haben (Milligan und Sule 1982), überwunden wird. Gleichzeitig soll mit den Weidefeuern auch die Akkumulation abgestorbener und nicht mehr verwertbarer organischer Substanz bzw. die Überalterung der Vegetation verhindert werden. Die Kontrolle von tierischen Parasiten und Krankheitsüberträgern und das Zurückdrängen von Pflanzen, die zur Beweidung ungeeignet sind oder diese behindern, ist ebenfalls ein Teil der traditionellen Strategien des Feuereinsatzes (van Rensburg 1972).

Ebenso wie das Feuer wirkt sich der Einfluß der Herbivoren (sowohl über die Äsung von Gras als auch über den Verbiß von Holzgewächsen) in eine Richtung aus, die die Vegetation an der Weiterentwicklung in Richtung der potentiellen natürlichen Vegetation hindert (Erhaltung einer Subklimax-Gesellschaft). Dabei interagieren Feuer und Verbiss erheblich: Periodische Feuer halten die Holzgewächse in einer verbissgerechten Höhe, der Verbiss selbst wiederum reduziert den Höhenwuchs von Bäumen und Sträuchern, so dass diese im Einflussbereich des Feuers bleiben (Trollope 1974; Pellew 1983).

Die Savannen und Grasländer stellen den größten Teil des Weidelandes in den Tropen dar und tragen derzeit einen Umfang an Biomasse domestizierter Tiere, die der ursprünglichen, natürlichen tierischen Biomasse gleichkommt oder diese auch übertrifft (Cumming 1982; Mott *et al.* 1985). Dennoch ist die Tragfähigkeit der für die Weidewirtschaft nutzbaren Savannen begrenzt, so daß der zunehmende Beweidungs- und Feuerdruck zu einer zur Degradation der Vegetation (bis hin zur Desertifikation) führt, zum anderen sich die Weidewirtschaft zunehmend auf das Waldland ausweitet. Betroffen sind dabei insbesondere die weltweit auf über 550×10^6 ha vorkommenden laubabwerfenden Trockenwälder bzw. halbhimmergrünen Wälder und die Koniferenwälder (*Pinus* spp.) der submontanen und montanen Höhenlagen der Tropen.

In den Waldgebieten, in denen wegen hoher Bevölkerungsdichte nicht ausreichend Weideflächen und Futtermittel vorhanden sind, tritt das Schneiteln (**lopping**) zur Futtergewinnung hinzu. Das Abschneiden von grüner Blattmasse von stehenden Bäumen ist besonders dort gängig, wo Schutzwälder unter Einschlagsverbot und Forstaufsicht stehen. Der Eingriff in den Kronenraum derart genutzter Bestände bewirkt eine starke Öffnung ihres Innenraumes. Vermehrter Lichteinfall und stärkere Luftzirkulation ermöglichen auch hier die Bildung einer Gras- und Strauchschicht, die bei den ehemals geschlossenen Beständen nicht anzutreffen war, und die diese Wälder in einen Zustand erhöhter Brennbarkeit bringen. Im asiatischen Raum sind dies insbesondere die Schutzwälder der submontanen Laubwaldgesellschaften des Himalaja, wie etwa die von *Tormentalia tomentosa* dominierten Wälder Nepals (Goldammer 1986e) oder die Assoziationen von *Quercus* spp. in der submontanen Höhenstufe der Region von Uttar Pradesh (Indien).

Eine weitere Praxis des Durchbrennens der submontanen Kiefernwälder tritt hier hinzu. In den generell vorherrschenden Steilhanglagen des submontanen Himalaya bilden sich aufgrund des Einflusses von Feuer und Verbiss Reinbestände von *Pinus roxburghii*. Um die Beweidung dieser Hanglagen überhaupt erst zu ermöglichen, muss die Streuauflage der Bestände jährlich nach dem Höhepunkt der Nadelschütte abgebrannt werden, da die langen Kiefernadeln selbst in trockenem Zustand eine extrem glatte Bodenaufgabe bilden, auf denen das Vieh leicht ausrutscht und die Steilhänge herabstürzen kann (Goldammer 1988).

2.2.3 Andere forstliche Nebennutzungen

In den nicht immergrünen Waldgesellschaften, insbesondere in den regengrünen Trockenwäldern, werden die Waldbrände nicht nur durch die direkten und indirekten Auswirkungen der Brandrodung und der Waldweidefeuer verursacht. Eine Vielzahl von weiteren forstlichen Nebennutzungen sind ebenfalls mit der Anwendung von Feuer verbunden. Die forstlichen Nebennutzungen stellen vor dem Hintergrund der sozialen und demographischen Verhältnisse der ländlichen Bevölkerung in den Tropen einen zunehmend wichtigen und gleichzeitig auch kritischer werdenden Faktor für die Volkswirtschaften dar (s.a. Poulsen 1982). Die klassische angelsächsische Einteilung von **major forest products** (= Holzprodukte) und **minor forest products** (= Nicht-Holz-Produkte) vermittelt insofern ein ungenaues Bild, da in einigen Ländern die Bedeutung der forstlichen Nebennutzungen sowohl hinsichtlich der Subsistenzwirtschaft als auch des Exports die der eigentlichen Holznutzung übertreffen. So ist der Ertrag der **non-wood forest products** in Indien besonders in der zweiten Hälfte der 70er Jahre angestiegen. In der Dekade 1965-75 erbrachten die Nebennutzungen 63% der Exporterlöse aller forstlichen Produkte. Gleichzeitig belief sich in diesem Zeitraum der Anteil der durch forstliche Nebennutzungen Beschäftigten auf über 70% der insgesamt im Forstsektor arbeitenden Menschen (Gupta und Guleria 1982).

Gerade in den laubabwerfenden Trockenwäldern des indischen Subkontinents (**southern dry mixed deciduous forests**) gibt es eine große Bandbreite von Nebennutzungen, darunter medizinische Pflanzen, Früchte, Blätter, Honig, Harze etc. Die Anwendung des Feuers beim Honigsammeln (Ausräuchern) ist eine alte kulturelle Praxis, die dort wie auch in anderen Regionen der Tropen zu ausgedehnten Waldbränden führt (West 1972). Feuer wird ebenfalls beim Sammeln von Früchten und

Blüten angewendet. Da sowohl Blüten- und Fruchtreife als auch das Sammeln dieser Waldprodukte während der Trockenzeit erfolgt, in der das Laub der Blätter abgeworfen ist, ist diese bodenbedeckende, sperrige und trockene Laubschicht sehr hinderlich beim Sammeln. Und so werden die Sammelgebiete großflächig durchbrannt, und die frisch herabfallenden hellen Früchte/Blüten, in Indien vor allem die Mahua-Blüten (*Bassia latifolia*), können dann leichter auf dem geschwärzten und freigelegten Waldboden gefunden und eingesammelt werden (Gorrie 1926; Prasad 1957; MacLagan 1954). Die Freilegung der Vegetation durch Feuer erleichtert das Sammeln von Exsudaten verschiedener Dipterocarpaceen und das Auffinden essbarer Echsen und der Erdhöhlen essbarer Schildkröten, die durch die Vegetationsdichte sonst verborgen bleiben (Wharton 1966). Holzöl verschiedener *Dipterocarpus* spp. fand in Burma, vor allem während des II. Weltkrieges, Verwendung als Ersatz für knappes Kerosin. Der Ölertrag eines Baumes, der wie bei der konventionellen Harznutzung angerissen und zusätzlich am Stammfuß angebohrt wurde, wurde durch Anlegen von Feuer stimuliert und erhöht (Edwards 1947; Rodger 1943). Auch die Gewinnung von Asche zur Düngung von Reisfeldern ist Ursache von Waldbränden; ein Bericht von Anfang des Jahrhunderts aus Java und Madura bestätigt diese Praxis, die heute nicht mehr so weit verbreitet ist (Anonymus 1922).

Das Feuer wird auch direkt zur Wachstumsstimulierung und Verbesserung eines wirtschaftlich sehr bedeutenden Nebenproduktes, den Deckblättern für Zigaretten (**Bidi**) angewendet. Die dafür verwendeten Blätter stammen im wesentlichen von *Diospiros melanoxylon* (**Tendu**) und einer Reihe von anderen Baumarten (darunter *Butea monosperma*, *Shorea robusta* und *Castanopsis indica*). Die Tendu-Blätter sind besonders dann gut geeignet für die Zigarettenproduktion (weich), wenn sie von frischen Trieben oder Stockausschlägen gepflückt werden. Dazu wurden in der Vergangenheit die Stämme von *D.melanoxylon* mechanisch verletzt oder zurückgesetzt. Der gleiche Effekt kann allerdings auch durch das Zurückbrennen der jungen Bäume erreicht werden: es bilden sich Stockausschläge, die nicht nur die geeignete Blattqualität liefern, sondern zudem auch in einer bequemen Arbeitshöhe abgeerntet werden können. Diese im Vergleich zu den mechanischen Verfahren kostengünstige und einfache Praxis der Blatternte hat dazu geführt, daß die in den laubabwerfenden Trockenwäldern Indiens jährlich gelegten Feuer sich großflächig und unkontrolliert ausdehnen. Im indischen Bundesstaat Madras wurden zu Anfang des Jahrhunderts die Ursachen der jährlich auftretenden Feuer zu 60% in der Weidewirtschaft und zu 30% im Rahmen forstlicher Nebennutzungen gesucht (Anonymus 1905). Die Einschätzung von Srivastava (1985), dass heute jährlich etwa die Hälfte der indischen Wälder durchbrennen (*Shorea*- und *Pinus*-Wälder und andere Waldformationen), ist in den laubabwerfenden im Wesentlichen sicherlich auch auf diese Praktiken der Waldnutzung zurückzuführen.

2.2.4 Weitere Ursachen der Waldverbrennung

Neben den zunehmend spürbaren Auswirkungen der **slash-and-burn agriculture** bringen auch andere Formen der intensiveren Landnutzung eine Erhöhung des Feuerrisikos *per se* und eine verstärkte direkte Anwendung des Feuers mit sich. Die bei der selektiven Holznutzung (Extraktion und Bringung) angelegten Randstufen, die Auflichtung des Kronenraumes und der Schlagabraum führen zu einer erhöhten Disposition gegenüber Feuer. Die gleiche Wirkung des "Aufbrechens" der geschlossenen Primärwälder erzielen die Wege und Trassen, die für die Exploration anderer natürlicher Ressourcen (Mineralien, Kohle, Öl) angelegt werden. Durch dieses sich zunehmend verdichtende Erschließungsnetz wird der ungesteuerten (spontanen) Besiedelung der Zugang in bislang unbesiedelte Waldgebiete ermöglicht.

Neben der kleinbäuerlichen Brandrodung und den davon ausgehenden Waldbränden wird das Feuer in der Forstwirtschaft zu großflächiger Rodung von Naturwäldern eingesetzt. Waldbauliche Verfahren, wie sie für die Erhaltung oder Verbesserung der nachhaltigen Produktivität tropischer Wälder entwickelt wurden und bei denen auf großflächige Kahlschläge verzichtet werden kann (Lamprecht 1986; s.a. Weidelt und Banaag 1982), haben sich in der Praxis der Tropenwaldbewirtschaftung bislang nicht oder nur sehr fragmentarisch durchsetzen können. Unverändert vorherrschend ist die Umwandlung des Waldes und die Neuaufforstung mit gleichförmigen Beständen heimischer oder exotischer Arten, die auf

der Freifläche (ohne Überschildung) großgezogen werden können. Auch hier wird nach der Exploitation der vermarktungsfähigen Hölzer der Restwald kahlgeschlagen und die verbliebene Biomasse weitestgehend verbrannt.

Die systematische Waldrodung und die möglichst vollständige Verbrennung der pflanzlichen Biomasse ist ebenfalls das allgemein übliche Vorgehen bei der Vorbereitung großflächiger Nutzungsänderungen in den Gebieten des tropischen Regenwaldes. Die Gründe für die Waldrodungen sind zunächst häufig im Bereich der Landspekulation zu suchen, bei der die Aneignung von Rechtstiteln auf vermutetes oder zu erwartendes Vorhandensein von Bodenschätzen im Vordergrund steht. Nach der Verbrennung des exploitierten Waldes werden "Scheinaufforstungen" oder vorübergehende, da rechtlich notwendige, landwirtschaftliche Aktivitäten betrieben, bis die Exploration von Mineralien, Öl der Kohle den notwendigen Erfolg der Wertsteigerung des Landes gebracht hat.

Die Umwandlung von Waldflächen in agroindustrielle Rinderfarmen, für die häufig mehrere Brände in aufeinanderfolgenden Jahren notwendig sind, wird derzeit in großem Maßstab in der Amazonas-Region (Brasilien) und in Mittelamerika (Costa Rica) betrieben. In der Amazonas-Region beträgt dieser Anteil mehr als 50% der gesamten umgewandelten Fläche (Seiler und Crutzen 1980). Hinzu kommt die systematische Umwandlung des Waldes in Agrarflächen für die Durchführung von Umsiedlungsprogrammen (Migrationsprogramme). In der jüngeren Vergangenheit wurden insbesondere im Rahmen des indonesischen Transmigrationsprogrammes große Waldflächen auf Sumatra und Kalimantan (Borneo) verbrannt.

2.2.5 "Wildland/Residential Interface"

In der Berührungs- und Überlappungszone zwischen natürlicher/naturnaher Vegetation und den Siedlungen (**wildland/residential interface**) entsteht besonders dann eine wechselseitige Gefährdung des Übergreifens von Feuern, wenn das in den beiden Systemen vorhandene potentielle Brennmaterial ähnliche Eigenschaften aufweist. In den Trockenwaldregionen der Tropen liegen diese Bedingungen weitgehend vor, da für den Bau der in die Waldlandschaft eingestreuten Siedlungen und Einzelhäuser natürlichen Materialien verwendet werden (Holz, Bambus, Gras, Ried). Der Feuchtigkeitsgehalt und die Entzündlichkeit dieser zellulosehaltigen Baumaterialien reagiert genauso auf Veränderungen der Witterungsbedingungen (Wind, Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur), wie das Brennmaterial der sie umgebenden Vegetation.

Da über die Feuer in Siedlungen eher berichtet wird, als dies bei den häufigen und nicht als außergewöhnlich betrachteten Waldbränden der Fall ist, spiegeln die zur Verfügung stehenden Statistiken oder Pressemeldungen die Saisonalität und den Umfang dieses Gefährdungspotentials wieder. So waren in Burma im Jahr 1985 während der Trockenzeit (Januar bis Mai) 5% aller Haus- und Siedlungsbrände durch übergreifende Waldbrände verursacht, in der regenreichen Periode (Juni bis Dezember) hingegen nur 1% (Goldammer 1988). Die Dimension dieser Brände, die in den dicht bebauten Dörfern und Vorstädten schwer zu bekämpfen sind, mögen einige Beispiele aus Burma (Myanmar) zeigen: Bei vier Bränden in den Städten bzw. Stadtteilen Kamayut Township, Lashio, Mergui und Mandalay (zwischen 1986 und 1989) verbrannten 8.150 Häuser, wobei mehr als 63.000 Obdachlose zu verzeichnen waren. Die von den Siedlungen in den Wald übergreifenden Brände werden in den Statistiken in der Regel nicht erfaßt. Sie sind im allgemeinen auf den nachlässigen Umgang mit Feuer zurückzuführen.

Ein Bericht der Forstverwaltung von Côte d'Ivoire über die Feuer der Trockenzeit 1982-83 veranschaulicht die Schäden, die ein Übergreifen der Savannen- und Waldbrände auf Dörfer und Landwirtschaftsflächen haben kann (Anonymus 1984): Eingebettet in die vom Feuer überbrannten Savannenfläche von insgesamt 12×10^6 ha und einer von Feuer zerstörten Waldfläche von ca. 60.000 ha verbrannten

- 39.618 ha Kaffeeplantagen
- 60.264 ha Kakaoplantagen
- 3.797 ha andere Plantagen

- 6.169 ha andere Kulturen
- 271 Stück Vieh.

Der Verlust an Menschenleben ist bei diesen in die Siedlungen übergreifenden Wildfeuern erheblich. Bei den oben genannten Bränden in Burma waren mehr als 100 Tote zu beklagen, bei den Savannenfeuern in Côte d'Ivoire kamen 24 Menschen ums Leben.

2.2.6 Andere kulturelle und psychosoziale Aspekte

Die Anwendung des Feuers in der Landschaft beschränkt sich nicht ausschließlich auf die Urbarmachung und Bewirtschaftung des Landes. In einigen Kulturkreisen und Religionen hat das Feuer auch heute noch eine stark symbolische Bedeutung und ist gleichermaßen Kult- und Glaubenshandlung in Verschmelzung mit pragmatischen Überlegungen. Von den bei Goldammer (1978, 1991) angestellten kulturhistorischen Betrachtungen der Feueranwendung sei ein Beispiel aus Mittelamerika angeführt. Im Brauchtum der Maya spielen Feuer und Rauch noch heute eine besondere Rolle in den "Äquinoktial-Riten". Die Entzündung des "Neuen Feuers" am Ostersonntag, das den Indios zur Entzündung ihres Herdfeuers weitergegeben wird, gibt gleichzeitig das Signal zum Abbrennen der Felder. Neben dem pragmatischen Nutzen des Säubers der Felder durch Aschedüngung ist das Aufsteigen von Rauch von Bedeutung (Bachelard, in Goldammer 1978). Denn wie der Priester dicke Rauchwolken mit dem Rauchgefäß produziert, um durch diese imitative Magie die Wolkenbildung und damit den Regen herbeizurufen, so erzeugen auch die Bauern große Rauchwolken beim Abbrennen ihrer abgeernteten Felder, um in Wiederholung des priesterlichen Beispiels etwas für die Entstehung von Regen zu tun.

Während einerseits das Feuer in den altindischen und altiranischen Kulturen und in der indoeuropäischen Religion eine zentrale Rolle spielte (Sonnenfeuer, dämonenvertreibendes Element, Stammes- und Volksfeuer; vgl. Frazer [1922]; Freudenthal [1931]), wurden die Bäume des Waldes als Sitz heiliger Lebenskräfte oder, wie in der vedischen Religion, der weiblichen Baumgeister verehrt und respektiert (Heiler 1980). Im Hinduismus werden der **Banyan**-Baum (*Ficus benghalensis*) und der **Betel**-Baum (*Areca catechu*) als heilig angesehen. Die Bevölkerungsexplosion und der Landhunger auf dem indischen Subkontinent, die zu einer Zurückdrängung der Waldflächen in Indien auf derzeit etwa 14% geführt haben (Koshoo 1986), führen offensichtlich trotz des Primates der Religion in Politik und Alltag zu einem Abrücken von diesem tradierten Respekt. Nur vereinzelt kann in den Brandrodungsflächen die Belassung von Einzelbäumen beobachtet werden, die ihren Ursprung in der Religiosität hat.

Sehr stark gegenwartsbezogen ist die wirtschaftlich und politisch motivierte Brandstiftung. Sie richtet sich in erster Linie gegen Aufforstungen und andere Wälder, denen ein wirtschaftlicher und kultureller Wert beigemessen wird. Die Ursache liegt hier in der Regel in der Landenteignung von indigenen Naturvölkern. Durch die Übertragung des Landeigentums auf den Staat oder der Nutzungsrechte auf industrielle Konzessionen ändert sich zwangsläufig die Einstellung der betroffenen Bevölkerung zu dem Land, auf dem sie lediglich noch wohnen oder beschäftigt werden. Die Sorge um eine nachhaltige Pflege des Waldes im Sinne eines Generationenvertrages schlägt häufig um in den verzweifelten Akt der Brandstiftung, mit der den Repressionen des anonymen Staates oder der als Ausbeuter angesehenen Konzession entgegengetreten wird. Diese Art der politisch motivierten Waldverbrennung hat beispielsweise auf den Philippinen (Luzón) bis in die Mitte der 80er Jahre angedauert und dort trotz aller Aufforstungsbestrebungen nicht nur die Fragwürdigkeit der industriellen Waldnutzung aufgezeigt, sondern auch die Verwundbarkeit eines politischen Systems. Die Ausmaße politisch motivierter Brandlegung zeigten sich bei den verbreiteten Unruhen in Indien im Jahr 1921-22, bei denen eine Welle von Brandstiftungen mehrere Zehntausend Hektar Bergwald zwischen Punjab und Uttar Pradesh in Asche versinken ließen (Pring und Bakhsh 1940).

Die Entfremdung der ländlichen Bevölkerung von den Belangen des Waldschutzes hat ihre Wurzeln allerdings auch in der unmittelbaren wirtschaftlichen Betroffenheit. Entlassene Forstbedienstete oder nicht ausgezahlte Waldarbeiter haben auf den Philippinen in den letzten Jahren wiederholt die Neuaufforstungen und Schutzwälder im zentralen Bergland von Luzon in Brand gesteckt. Die durch die

vorsätzlich gelegten Feuer degradierenden Waldflächen übertreffen derzeit immer noch die Fläche der gesicherten Aufforstungen (Goldammer 1985a).

Ein erheblicher Anteil der Wildfeuer lässt sich allerdings nicht aus der Landnutzung und den vorgenannten Gründen erklären. Ohne dass hier auf gesicherte Daten zurückgegriffen werden kann, zeigt die Erfahrung, dass der Umfang der Vegetationsfeuer, die ohne gezielte und nutzungsbezogene Anwendung gelegt werden, gleichzusetzen ist mit den in der Land- und Forstwirtschaft entstehenden kontrollierten und unkontrollierten Bränden. Bei näherer Untersuchung des offensichtlich ziellosen Feuerlegens in den offenen Wald- und Savannenlandschaften und Grasländern, entlang von Straßen, Wegen und landwirtschaftlichen Flächen, lassen sich zwei wesentliche Motivationen erkennen, die in der Psyche des im ländlichen Raum der Tropen lebenden Menschen verborgen sind: Angst und Spieltrieb. Die Furcht vor der dichten und undurchdringlichen Vegetation, die die Wirtschaftsfelder, Wohnsiedlungen und Verkehrsverbindungen zu überwuchern drohen, und die Angst vor darin verborgenen Wildtieren, Parasiten und Krankheitsüberträgern sind ausreichend, um mit Hilfe des Feuers den Wald und das Buschland einsehbarer und offener zu machen. Der ständige Kampf gegen die vordringende Vegetation erklärt sich aus den Ansprüchen des Menschen an seinen Lebensraum.

Das in allen Regionen der Tropen beobachtete Phänomen, dass der spielerische Umgang mit dem Feuer jenseits des Kindesalters nicht aufhört, ist allerdings eher der Ausdruck eines neuen, zeitgemäßen Naturverständnisses. Wenn für die durch spielende Kinder gelegten Feuer eine Erklärung in der heute leichten Zugänglichkeit zu Feuerzeug und Streichhölzern liegt, spielt bei den Erwachsenen die zunehmende starke Entfremdung von einem ursprünglich engeren Verhältnis zur Natur und Umwelt eine Rolle. Diese Entfremdung ist gleichzusetzen mit nicht mehr vorhandener Verantwortung für eine im eigenen Interesse liegende nachhaltige und pflegliche Land- und Waldbewirtschaftung. Die Loslösung von dieser Verantwortung liegt ebenso in den Auswirkungen der modernen Staatsbürokratien begründet, wie auch in den geänderten Landrechtsverhältnissen, dem Anwachsen der ländlichen Bevölkerung und der Auflösung tradiert familiärer und kommunaler Lebensgemeinschaften. Die Gewichtung der einzelnen sozialen, ökonomischen und kulturellen Faktoren innerhalb des Ursachenkomplexes der unkontrollierten tropischen Vegetationsbrände ist schwierig. Ihr jeweiliger Anteil an Anzahl und Ausmaß der Vegetationsbrände wird bislang nur ausschnittsweise erfasst (Abschn.5). Feuer- oder Waldbrandstatistiken gibt es nur in wenigen Ländern. Sie konzentrieren sich meistens auf Wirtschaftswälder und Plantagen, so dass die Dunkelziffer insgesamt sehr hoch ist. Auch in den wenigen Ländern, die über eine straff organisierte Forstaufsicht verfügen, wie etwa in den ehemaligen britischen Kolonien Indien und Burma, wird der Großteil der Waldbrände offiziell nicht registriert. Da beispielsweise in Indien die zuständigen Forstschutzbeamten zur Verantwortung gezogen werden, wenn sie den Verursacher eines Waldbrandes nicht feststellen können, werden die Waldbrandmeldungen unterdrückt, so dass sich der überwiegende Teil des Waldbrandgeschehens nicht rekonstruieren lässt (Goldammer 1986d).

Eine entscheidende Voraussetzung, ob Waldbrände und andere Wildfeuer überhaupt wahrgenommen werden, liegt im Stand des Bewusstseins der Forstverwaltungen bzw. der für den Naturschutz zuständigen Stellen über den ökologischen Impact dieser Brände. Sofern kein unmittelbarer und kurzfristig erkennbarer Schaden vorliegt, wie beispielsweise im Fall der periodischen Feuer in den trockenen laubabwerfenden Wäldern und Kiefernwäldern, werden die Brände nicht zur Kenntnis genommen. Die möglichen langfristigen Prozesse der Destabilisierung und Degradierung müssen aber ebenso in die Planung von Waldschutz und Feuer-Management einbezogen werden, wie der anthropogene Ursachenkomplex. Die Grundlage dafür stellt die Einführung eines entsprechenden Systems der Erfassung dar, das neben den üblichen statistischen Daten auch den langfristig wirkenden ökologischen Impact der Feuer erfasst (Goldammer 1986d).

2.2.7 Anfänge der Feuernutzung: Eine prähistorische Perspektive

Die Führung des Nachweises über den Beginn der systematischen Nutzung des Feuers durch den Menschen bzw. durch Hominide ist bis heute ein besonderes Anliegen der Paläoanthropologie. Bis in die

70er Jahre ergaben die Rückdatierungen von Feuerspuren in früheren menschlichen Siedlungen im heutigen China, Ungarn und Südfrankreich Größenordnungen von bis zu 0,5 Mio. Jahren (Gowlett *et al.* 1981). In den Tropen wird der Nachweis von anthropogenen Feuerspuren aus dem frühen Pleistozän als besonders schwierig angesehen, da die für die ^{14}C -Analyse geeignete Holzkohle unter den geomorphologischen Bedingungen der Tropen, insbesondere durch Wind- und Wasserabtrag, leicht verloren geht. Für den Bereich des südlichen Afrika ging man bis vor kurzem ebenfalls von gesicherten Nachweisen über die Feueranwendung im Siedlungsbereich seit etwa einer halben Million Jahren und in der Landschaft seit etwa 0,15 bis 0,18 Mio. Jahren aus (Maggs 1977; Hall 1984).

Der erste indirekte Hinweis auf eine Feuerdatierung, die bis in das frühe Pleistozän hineinreicht, gelang Gowlett *et al.* (1981) in Kenia. Dort wurde neben den Überresten von Hominiden (*Australopithecus robustus*) verbackener Lehm gefunden, der auf die Existenz einer alten Feuerstelle hinweist; diese prähistorische Feuerstelle war in einer stratigraphischen Schicht eingelagert, deren Alter auf etwa 1,4 Mio. Jahre bestimmt wurde.

Der derzeit sicherste direkte Nachweis über anthropogene Feuer im Pleistozän wurde erst kürzlich erbracht, als in einer 1,5 Mio. Jahre alten Sedimentschicht in einer südafrikanischen Höhle (Swartrkans Cave) eine Feuerstelle mit angekohlten Antilopenknochen gefunden wurde (Brain und Sillen 1988).

Das Herausragen des Feuers von der Feuerstelle in die Waldlandschaft und der Beginn des Einflusses von "intensiven" anthropogenen Feuer-Regimen auf die Vegetationsentwicklung ist wenig genau rückdatierbar, da sich die Spuren bzw. die Auswirkungen des Feuers nicht klar von natürlich entstandenen Vegetationsbränden trennen lassen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die anthropogene Feuer gegen Ende des Pleistozän an Bedeutung gewonnen haben und im Verlaufe der steinzeitlichen Besiedlung des heutigen Raumes der Tropen das zentrale Werkzeug der Jäger- und Sammlergesellschaften und der frühen Viehzucht und des Wanderfeldbaues waren (Maggs 1980; Hall 1984).

Die Rückdatierung des Feuers in ariden Savannen der heutigen Rajastan (Indien) auf über 10.000 Jahre ist nach Jacobson (1979) auf die mesolithische Weidewirtschaft zurückzuführen. Das Vegetationsmosaik und die Bildung der Grasländer des Nyika-Plateaus von Malawi (südliches Afrika) sind vermutlich seit über 12.000 Jahren durch den Eintrag anthropogener Feuer und durch wiederkehrende Blitzschlagfeuer entstanden (Meadows 1984). Batchelder und Hirt (1966) gehen ebenfalls von einer anthropogenen Feuerbeeinflussung tropischer Vegetation seit über 12.000 Jahren aus. Maloney (1985) vermutet in den etwa 18.000 Jahre alten Feuer-Einflüssen auf die Vegetation Sumatras eine Erweiterung der offenen Landschaft zum Zweck der Jagdnutzung. Etwas älter sind die radiometrisch vermessenen Holzkohlehorizonte in Irian Jaya (Neu-Guinea), die auf Rodungsaktivitäten vor 25.530 ± 620 bis 28.240 ± 3660 Jahren vor Heute hinweisen (Haberle *et al.* 1991). Die Entstehung der Savannen in Nord-Kampuchea wird nach Wharton (1966) durch die über 2000-jährige Anwendung von Weidefeuern erklärt, die den dortigen laubabwerfenden Dipterocarpaceenwald verdrängt hat.

Diese Beispiele stehen stellvertretend für die Entstehung intensiver anthropogener Feuer-Regime in den Tropen, die sich in der Anwendung des Feuers in der heutigen Landnutzung fortsetzen und die die Dynamik und Zusammensetzung der derzeitigen Wald- und anderer Vegetationsgesellschaften der Tropen weitgehend bestimmen.

2.2.8 Zusammenfassung

Waldbrandspuren lassen sich weltweit zurück bis in die Zeit zwischen dem Paläozoikum und dem Tertiär nachweisen. Neben Vulkanismus spielte in erdgeschichtlichen Zeiträumen dabei das Blitzschlagfeuer eine zentrale Rolle. Die bioklimatischen Rahmenbedingungen in den Tropen ermöglichen das Auftreten von natürlichen Feuern in der Wald- und Savannenvegetation nicht nur in den wechselfeuchten Tropen, sondern aufgrund klimatischer Anomalien (langfristige Klimaschwankungen und kürzere

Klimaoszillationen) auch im perhumiden Zonobiom des äquatorialen Tageszeitenklimas; hierauf wird näher in Abschnitt 3.1 eingegangen.

Die Anwendung von Feuer durch Hominide ist seit 1,5 Millionen Jahren nachgewiesen. Der anthropogene Feuereinfluss in den tropischen Wäldern Asiens und Afrikas ist seit fast 30.000 Jahren nachweisbar und führt seit dem Übergang vom Pleistozän ins Holozän zur Savannisierung in den wechselfeuchten Tropen. Mit zunehmender Bevölkerungsdichte in der "Dritten Welt" eskaliert der Landnutzungsdruck und damit auch die Anwendung des Feuers.

Tradierte Brennmethoden finden ihre Anwendung in einer großen Zahl von Formen der Landnutzung (Wanderfeldbau, Jagd- und Weidewirtschaft, Bewirtschaftung von Nicht-Holzprodukten) und fußen dabei auch auf mythisch-religiösen Bräuchen. Diese tradierten Kulturformen der Naturvölker unterliegen heute aber einem starken Entfremdungsprozess, dessen Ursachen nicht nur demographisch bedingt sind (gestiegener Raum- und Ernährungsbedarf der Menschen), sondern auch in der Frage des Landeigentums und damit in der Verantwortung für eine nachhaltige Sicherung der natürlichen Ressourcen liegen.