

Zwischenbericht Forschungsvorhaben A2, Arbeitspaket A Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK)

Autorengruppe DFNK-Cluster Waldbrand*

1. Einleitung

Das Forschungsvorhaben A2 "Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr" im Deutschen Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK) (Merz und Friedrich DFNK 2000; <http://www.dfnk.de>) beinhaltet eine experimentelle Komponente, in der Erkenntnisse über Grundlagen der Waldbrandcharakteristik unter mitteleuropäischen Verhältnissen gewonnen werden sollen. Ausgereifte Modelle für das Verhalten von Waldbränden in Abhängigkeit von Vegetationstyp, Menge und Anordnung des zur Verfügung stehenden Brennmaterials, Topographie und der meteorologischen Rahmenbedingungen liegen für eine Reihe von außereuropäischen Vegetationstypen vor, insbesondere in Nordamerika (z.B. Forestry Canada Fire Danger Group 1992, Rothermel 1972). Diese sind aber nicht direkt auf die Verhältnisse Mitteleuropas übertragbar.

Die Zielsetzung bisheriger Waldbrandversuche in Deutschland beinhalteten Untersuchungen zur Anwendbarkeit des kontrollierten Brennens in jungen Kiefernbeständen (Goldammer 1979), den Test neuer Löschmittel oder -taktiken (Goldammer 1982) oder den Test von Sensoren für die Detektion von Waldbränden aus dem Weltraum (Goldammer 1995). Dabei wurden der Untersuchung der von Parametern wie der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feuers, Feuerintensität, Flammenlänge und Brennmaterial nicht die Aufmerksamkeit gewidmet, die für eine Modellierung von Waldbränden erforderlich ist.

Ein neuer Forschungsansatz war daher notwendig. Ein experimenteller Waldbrand wurde in den für Brandenburg typischen Kiefernwäldern (*Pinus sylvestris* L.) in der Lausitz durchgeführt, einer der am stärksten von Waldbränden gefährdeten Regionen Deutschlands. Durch die Zusammenarbeit mit weiteren Forschungsinstitutionen konnte ein interdisziplinäres Experiment durchgeführt werden.

2. Teilnehmende Institutionen und Zielsetzungen der Untersuchungen

Arbeitsgruppe Feuerökologie, Max-Planck-Institut für Chemie

(J.G. Goldammer, Marco Hille und Alexander Held)

Die Arbeitsgruppe Feuerökologie des Max-Planck-Instituts für Chemie trat als Koordinator des Vorhabens auf. Zusammen mit dem Eigentümer der Versuchsflächen, der Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG) (s.u.), und der Landesforstverwaltung, Amt für Forstwirtschaft Peitz, war die Arbeitsgruppe Feuerökologie verantwortlich für die gesamte Planung und Durchführung des Vorhabens. Für die Erstellung eines Waldbrandmodells wurden vor dem

* Die Redaktion des Zwischenberichtes erfolgte durch Johann G. Goldammer und Marco Hille, Arbeitsgruppe Feuerökologie des Max-Planck-Instituts für Chemie. Die einzelnen Beiträge wurden von folgenden Teilnehmern am Experiment verfasst: Karl-Heinz Apel, Johann G. Goldammer, Marco Hille, Alexander Held, Günter Naumann, Dieter Oertel, Karl Preußner, Winfried Riek, Helmut Schmitz, Stefan Schütz, Bernhard Weißbecker, Klaus-Peter Wittich.

Versuch die Brennmaterialeuflagen gemessen (Juli 2001). Während des Versuches wurden Daten über die Flammenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Temperaturen in Bodennähe aufgenommen. Zudem wurde Rauchgase direkt über den Flammen aufgefangen, um ausgewählte Emissionscharakteristika zu bestimmen.

Zielsetzung der Untersuchungen: (1) Modellbildung bzw. Validierung von Feuerausbreitungsmodellen; (2) Bestimmung der Anteile der Spurengase Methylbromid und Methylchlorid, die zum stratosphärischen Ozonabbau beitragen (Manö und Andrae 1994, Andrae et al. 1995).

Deutscher Wetterdienst (DWD)

(Klaus-Peter Wittich)

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) ist seit Jahrzehnten im Bereich der Waldbrandvorsorge tätig, indem er während der Feuersaison sowohl die aktuell vorherrschende als auch die prognostizierte Wettersituation operationell nach waldbrandfördernden Signalen detektiert. Die Ergebnisse in Form lagebeurteilender Waldbrandindizes werden an die Forst- und Innenministerien der Länder weitergeleitet und zum Teil im Internet veröffentlicht (Wittich und Janssen 2001; <http://www.dwd.de/forecasts/lw/waldbrand/index.html>).

Elektronisch erfasst wurden zum einen die üblichen Standardparameter Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie die Globalstrahlung. Zum anderen wurde mittels eines kapazitiven Benetzungssensors speziell die Taubenetzungsdauer in der Vornacht des Experiments (22./23.8.) gemessen. Zusätzlich wurde die durch Feuchtigkeitsaufnahme bzw. -abgabe hervorgerufene Gewichtsänderung einer Streuprobe mithilfe einer elektronischen Wägevorrichtung ermittelt.

Ferner erfolgten in Plot IV Temperaturmessungen im mineralischen Boden in 2, 5, 10 und 20 cm Tiefe unter der Streuauflage. Zudem wurde die Oberflächentemperatur der nordöstlichen Bestandsseite von Plot IV mit einem Strahlungspyrometer (Spektralbereich 8–14 µm) erfasst, welches in einer Horizontalentfernung von ca. 30 m und einer Höhe von 2 m über einer freien Grasfläche positioniert war.

Zielsetzung der Untersuchungen: Bereitstellung von Eingangsgrößen für verschiedene von der Arbeitsgruppe Feuerökologie GFMC und vom DWD eingesetzte Modelle (BEHAVE-Modell zur Modellierung des Feuerverhaltens, Streufeuchtemodell).

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR)

(Dieter Oertel)

Advanced BIRD Airborne Simulator (ABAS)

Im Berliner Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR-IWP) wurde ein neues abbildendes Infrarot-Sensorsystem zur Erfassung von Hochtemperatur-Ereignissen (*High Temperature Events* - HTE) entwickelt, beispielsweise der weltraumgestützten Detektion und Beschreibung von Waldbränden oder Vulkanausbrüchen. Als *Bi-Spectral Infrared Detection* (BIRD) wird dieses System Mitte Oktober 2001 mit einer indischen Rakete in den Orbit gebracht werden (Oertel et al. 2000). Eine Version der BIRD Sensoren wurde in diesem Experiment zur mehrkanaligen thermalen

Aufnahme der Brände eingesetzt. Dabei handelt es sich um den *Advanced BIRD Airborne Simulator* (ABAS).

Zielsetzung der Untersuchungen: Durch den Überflug und die Erfassung der Brandflächen mit der neuartigen Kamera soll getestet werden, ob dieses System in der Lage ist, die hohe energetische Dynamik der Brandflächen quantitativ zu erfassen.

Das Automatisierte Waldbrand-Früherkennungssystem (AWFS)

Bestandteil des Waldbrandinformationssystems Brandenburg wird das Automatisierte Waldbrand-Früherkennungssystem (AWFS). Die Kameras des AWFS liefern digitale Bilder der Umgebung von Feuerwachtürmen, auf denen sie installiert sind (360°). Die Informationen werden durch einen Computer zentral auf Rauchemissionen analysiert (Hartung und Gruner 2000, Kührt et al. 2000).

Zielsetzung der Untersuchungen: Die seit 1999 in der Nähe der Probeflächen auf Feuerwachtürmen installierten AWFS-Kameras sollten in Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit bei der Erkennung von Waldbränden getestet werden.

Landesforstanstalt Eberswalde, Dezernat Bodenkunde / Waldernährung

(Winfried Riek)

Es soll die Wirkung des Feuers auf chemische und physikalische Eigenschaften des Mineralbodens und der Humusaufgabe untersucht und die Ergebnisse in das gesamte Spektrum der bislang vorliegenden Bodendaten Brandenburger Brandflächen eingeordnet werden. Dabei interessieren vor allem Fragen des Nährstoff- und Wasserhaushaltes von Brandflächen, der Veränderung von Humusqualität und -vorräten sowie der biologischen Aktivität. Die dazu vorgenommenen Analysen auf den Probeflächen vor und nach dem Brand umfassen Kationenaustauschkapazität, pH-Wert, C/N-Verhältnisse, Elementgesamtgehalte, Elementvorräte, Lagerungsdichte, pF- und ku-Charakteristik. Außerdem werden thermogravimetrische Analysen der organischen Bodensubstanz und Untersuchungen zur Bodenatmung in Kooperation mit dem Fachgebiet Bodenkunde der TU Berlin durchgeführt.

Zielsetzung der Untersuchungen: Langfristig können die interdisziplinären Untersuchungen dazu dienen, ein flächenbezogenes Modell zur räumlichen Darstellung von Bodenveränderungen in Abhängigkeit vom Feuerverhalten auf Bestandesebene abzuleiten. Die Ergebnisse sollen unter forstpraktischen Gesichtspunkten Hinweise zum Umgang mit Waldbrandflächen liefern (Aufforstungsverfahren, Bodenmelioration, Möglichkeiten und Grenzen natürlicher Sukzession, u.a.).

Landesforstanstalt Eberswalde, Abteilung Waldschutz

(K.-H. Apel, S. Schütz, H. Schmitz und B. Weißbecker)

Der heimische Schwarze Kiefernprachtkäfer (*Melanophila acuminata* L.) benötigt als Nahrungsquelle für seine Larven den Bast und das Holz frisch verbrannter Bäume. Die Larven können sich nur in Brandholz entwickeln. Aus diesem Grund fliegen die Käfer Waldbrände auch aus großen Entfernungen an. Das Auffinden von Waldbränden erfolgt mittels ihres Geruchssinns für brandspezifische Duftstoffe in den Antennen in Kombination mit Infrarot-Grubenorganen am Thorax.

Durch die Sammlung flüchtiger Bestandteile des Brandgases von Kiefernholz auf Aktivkohle in diesem Brandversuch ermöglichte die Untersuchung, welche Bestandteile für den Käfer den spezifischen „Brandgeruch“ ausmachen. Die Duftproben wurden gaschromatographisch analysiert und die elektrophysiologische Antwort einer isolierten Antenne von *M. acuminata* untersucht.

Zielsetzung der Untersuchungen: Bestimmung der Bestandteile im Rauchgas, auf die der Käfer reagiert.



Abb.1. Schwarzer Kiefernprachtkäfer (*Melanophila acuminata* L.)

3. Die Versuchsbestände

(Karl Preußner)

Die von der Lausitzer Braunkohle AG (LAUBAG) zur Verfügung gestellten vier Waldparzellen liegen in der Nähe von Cottbus (51°47'03" N, 14°24'20" E) hatten einen Umfang von ca. 0,3 bis 1 ha (insgesamt 2 ha) und stellten in Hinblick auf ihre Lage und Abgrenzung gute Voraussetzungen für die sichere Durchführung der Versuchsbrände. Diese ausgewählten Waldflächen liegen in der Abbauscheibe des nächsten Jahres und werden planmäßig im Herbst/Winter 2001/2002 beräumt.

Drei der Parzellen waren bis zu 100-jährige Baumhölzer (*Pinus sylvestris* L.) geringer Dimension, wie sie typisch für die Region sind. Die vierte war eine Kieferndickung (15-jährig), die mit teils dicht gedrängt stehenden Bäumen, teils mit breitkronigen Solitärkiefern bestockt war.

Das natürliche Waldbild wäre von Kiefern - bzw. Birken - Stieleichenwäldern mit Kiefer geprägt. Die Forstwirtschaft hat Kiefernreinbestände mit geringen Laubholzanteilen, vor allem Stieleiche (*Quercus robur* L.) und Birke (*Betula pendula* ROTH) geschaffen. In der Bodenvegetation finden wir neben Heidekraut (*Calluna vulgaris* L.), Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* L.) und Preiselbeere (*Vaccinium vitis-idaea* L.), auch Silbergras (*Corynephorus canescens* L.), Sandstrohblume (*Helichrysum arenarium* L.) und Sandgrasnelke (*Armeria*

maritima Mill.). In den letzten Jahren hat sich großflächig Landreitgras (*Calamagrostis epigeios* L.) ausgebreitet.

Alle vier Parzellen hatten eine inhomogene Brennmaterialauflage. Eine Grasschicht, dominiert von *Calamagrostis* spp. bzw. *Deschampsia* spp., war örtlich dicht ausgeprägt, an anderen Stellen nicht zu vorzufinden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die für die Feuerentwicklung wichtigen Auflagemassen an Brennmaterial für die vier Parzellen. Diese Werte wurden mit der Transect-Methode nach Brown (1974) berechnet. Neben der Gesamtmasse ist der Anteil von feinem und stärkeren Brennmaterial entscheidend für das Verhalten und die Intensität eines Feuers. Die Einteilung des Brennmaterials nach seiner Eigenschaft, den Feuchtegehalt an verändernde Umweltbedingungen anzupassen, wurde nach dem Verfahren des *National Fire Danger Rating System* (USA) durchgeführt. Dieses sieht eine Einteilung des Brennmaterials in Zeitverzugsklassen (1, 10, 100 oder 1000 Stunden) vor (Fosberg 1970, Deeming et al. 1972, 1977). Der Zeitverzug ist als dasjenige Zeitintervall zu verstehen, das notwendig ist, um 2/3 der Differenz zwischen einem einheitlichen Ausgangs-Gleichgewichtszustandes der Feuchte von Brennmaterials und Umgebungsluft und einem neuen Gleichgewichtszustand auszugleichen (Byram 1963).

Die Auflagehumusschicht war auf den armen Standorten mit 2-4 cm Stärke eher gering, zum Teil führten aber verfilzte Grasauflagen zu dickeren Schichten.

Tab.1. Übersicht der Versuchsflächen I bis IV. Die Brennmaterialauflagen unter dem Kiefernbaumbestand sind klassifiziert nach Art und Größe (Zeitverzugsklassen; siehe Text). Die Zeitverzugsklasse 1000 Stunden wird noch nach „morsch“ oder „fest“ unterteilt.

Plot	Humus cm	Brennmaterial in t/ha (Gras und holziges Brennmaterial nach Zeitverzugsklassen)						
		Gras	1	10	100	1000f	1000m	Total
1	1,8	0,06	0,69	2,35	1,23	0,00	2,15	6,41
2	1,6	0,09	1,10	1,50	6,13	1,74	0,65	11,12
3	1,9	1,8	0,40	2,11	16,08	6,16	3,56	13,31
4	1,3	0,05	0,36	1,50	2,69	0,00	1,68	6,23

4. Wetterdaten vor und während des Feuerexperiments

Alle für die Brandentwicklung wichtigen Wetterparameter wurden von einer meteorologischen Messstation auf einer grasbestandenen Freifläche nordöstlich von Plot IV in einer Entfernung von ca. 30 m zum Bestandesrand erfasst. Die Messungen von Temperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit erfolgten in 35 cm und 2m Höhe im 15-Sekundenintervall. Zudem wurde die Sonneneinstrahlung und die Windrichtung gemessen. Am Versuchstag war die Waldbrandwarnstufe II ermittelt worden, somit bestand keine extreme Waldbrandgefahr in der Region. Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Parameter am Nachmittag des Brandtages.

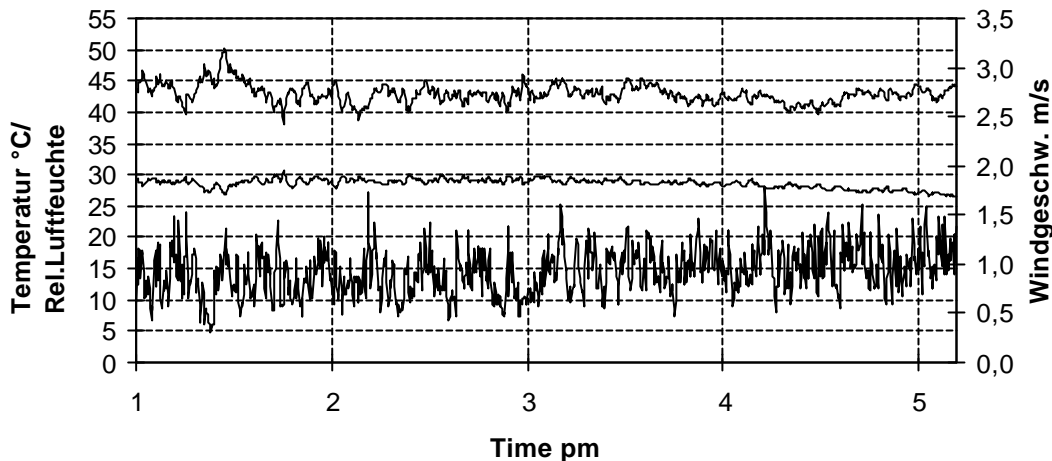


Abb.2. Die wichtigsten Wetterparameter während der Versuchsbrände, gemessen im Freiland in 35 cm Höhe (Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit). Während die Temperatur (mittlere Linie) und die relative Luftfeuchte (obere Linie) den ganzen Nachmittag über relativ konstant waren (mit einem leichten Temperaturrückgang am späten Nachmittag bei 30...26°C bzw. 40...45%), gab es z.T. erhebliche Schwankungen in der Windgeschwindigkeit (0,5...1,7 m/s). Diese plötzlichen Böen beeinflussten natürlich das Verhalten des Feuers.

5. Erste Ergebnisse

Alle vier Plots sollten am Dienstag, den 21.8 gezündet und von der ABAS-Kamera befliegen werden. Niederschläge am Vormittag des 21.8. und geringe Temperaturen während des gesamten Tages waren dann aber Anlass für eine Verschiebung des Experiments um zwei Tage. In dieser Zeit trockneten die Brennmaterialien unter Sonneneinstrahlung und eines kräftigen Windes zügig ab. Zwar war das Brennmaterial nicht extrem trocken, und auch die Waldbrandwarnstufe "2" am 23.8. war eher im normalen Bereich. Dennoch war diese Situation nach Auskunft der Forstbeamten vor Ort die Ausgangslage für die meisten Waldbrände in der Lausitz

5.1 Streufeuchtemessung und -modellierung (DWD)

Der Probebehälter der Waage wurde am 20.8.2001 bis zu seiner Höhe von 4 cm mit relativ trockenem Streumaterial gefüllt, welches kurz zuvor dem Plot 4 bis in eine Tiefe von 1–2 cm entnommen worden ist (das Auflagegewicht im Probenbehälter betrug $2,1 \text{ kg/m}^2$ nach Ofentrocknung). Am Folgetag nahm es während der fallenden Niederschläge Wasser auf. Am 22.8. war das Material aufgrund der intensiven Sonneneinstrahlung in Abtrocknung begriffen, so dass gegen 12.00 MEZ der Feuchtegehalt bei 54 % lag. Im Laufe des Nachmittags erfolgte eine weitere Feuchteabnahme auf 24,5 %. Über Nacht nahm die Streufeuchte aufgrund von Taubildung (0,16 mm) auf 32,1 % zu. Am Morgen des 23.8. verdunstete zunächst das auf der Streuoberfläche interzipierte Wasser, anschließend folgte die Desorption des in den Streuelementen gebundenen Wassers, so dass die Streufeuchte am Nachmittag einen Wert von 9 % erreichte. Dieser Wert entspricht der Gefahrenstufe 4 für Bodenfeuer.

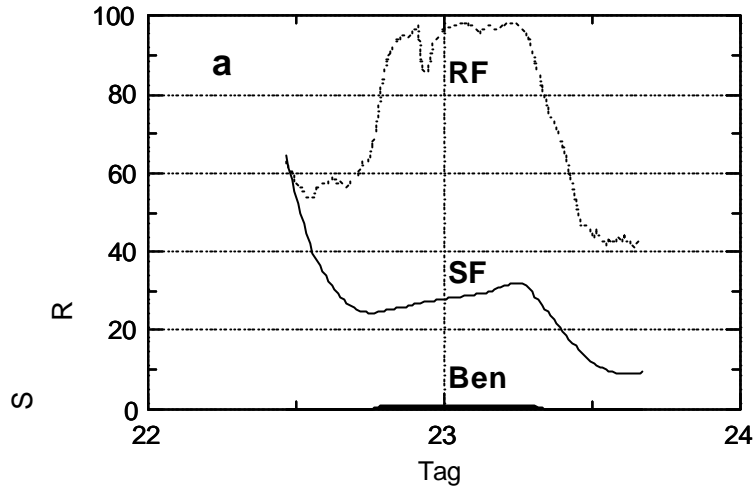


Abb.3. Messung der Streufeuchte (SF) und relativen Luftfeuchte in 35 cm Höhe (RF). Zusätzlich ist die durch einen kapazitiven Benetzungssensor (Ben) festgestellte Taubenetzungsdauer auf der Abszisse dargestellt.

Die Streufeuchtemessungen konnten zur Validierung des im DWD entwickelten Streufeuchtemodells (Wittich 1998) herangezogen werden. Dieses Modell beschreibt die Streufeuchte als Funktion des Wasser- und Energiehaushalts und simuliert sowohl die Wasserabsorption als auch die Ad- und Desorptionsprozesse. Als Eingangsdaten dienen die üblichen Standardparameter Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und thermische Strahlung der Atmosphäre. Das Modell gibt die gemessenen Abtrocknungsphasen und den zwischenzeitlichen, nächtlichen Feuchteanstieg mit ausreichender Genauigkeit wieder (Abb.4).

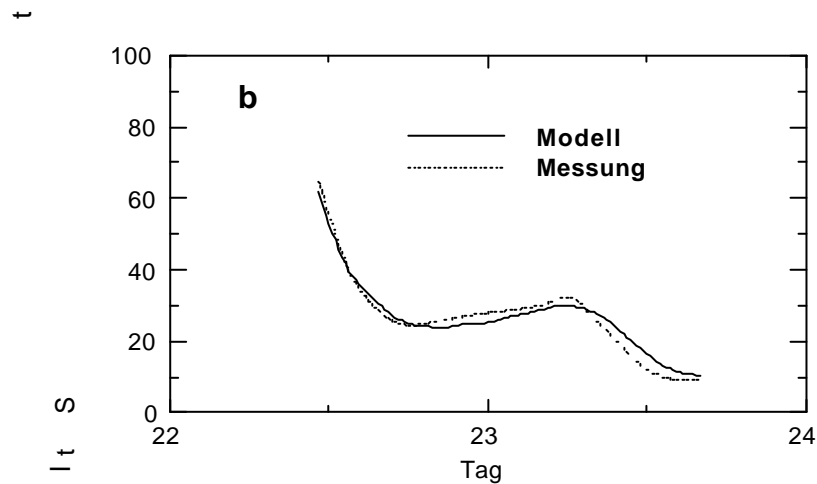


Abb.4. Vergleich der gemessenen und der modellierten Streufeuchte.

5.2 Brennmaterialzustand (GFMC)

Neben der Feuchte der Gesamtstreu wurden Feuchtegehalte für die unterschiedlichen Brennmaterialien am Boden gemessen. Tabelle 2 gibt einen Überblick der direkt vor dem Brand gemessenen Feuchtegehalte und der Wetterparameter während des Brandes.

Tab.2. Wichtige Parameter für die Versuchsbrände sind Feuchtigkeitsgehalt des Brennmaterials und die aktuellen Wetterdaten (Lufttemperatur und -feuchte in Bodennähe, Windstärke (Min, Mittel, Max) in 35 cm Höhe).

Plot	Uhrzeit der Zündung	Feuchtgehalt (%)					Lufttemperatur °C	Relative Luftfeuchte %	Windstärke m/s
		Gras (tot)	Gras (grün)	1	10	100			
I	13:45	28	100	9,7	12,8	13,0	28	44	0,5..0,8..1,3
II	14:43						29	42	0,7..1,0..1,4
III	17:54						25	47	0,6..1,0..1,3
IV	15:58						29	44	0,5..0,9..1,3

5.3 Feuerverhalten

Um 13:45 Uhr wurde die erste Fläche unter böigem und wechselhaften Wind an der Ost-Seite gezündet. Dabei garantierte eine Feuerlinie, die entlang des Bestandesrandes gelegt wurde, ein gleichmäßiges Durchlaufen der Feuerfront durch die Probefläche. Ein breiter Grasgürtel an den stark besonnten Seiten wirkte entzündungsfördernd und verbrannte unter Flammenbildung bis zu 1,4 m Länge.

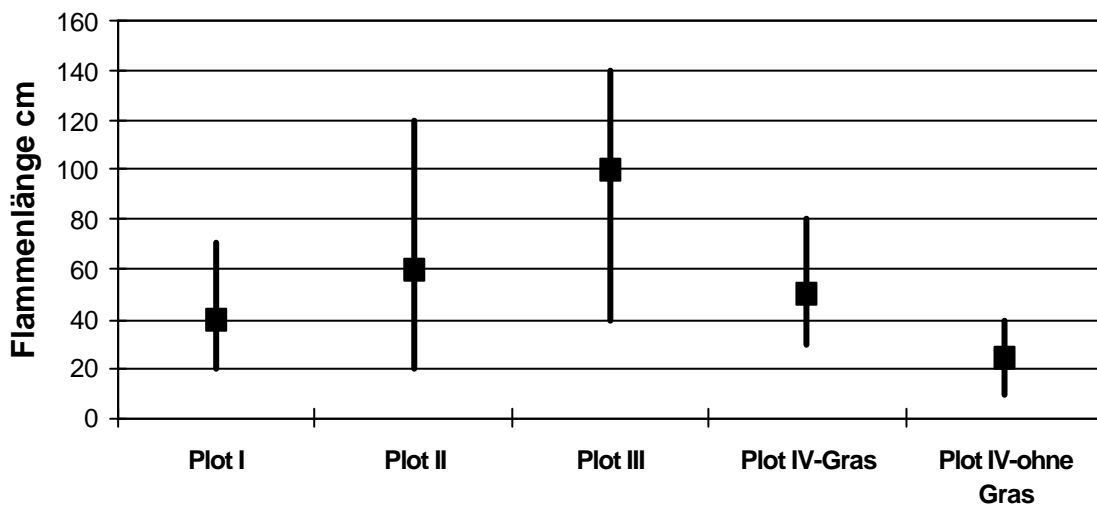


Abb.5. Flammenlänge (Min-Mittel-Max) der Feuerfront in den ProbepLOTS. Deutlich werden sowohl die hohe Varianz innerhalb eines Plots als auch die Unterschiedlichkeit zwischen den Versuchspartzen.

Wie auch später bei den anderen Probeflächen zeigten sich sehr bald die Auswirkungen des inhomogen verteilten Brennmaterials auf der Fläche. Zwar schritt die Feuerfront insgesamt zügig durch die Versuchsfläche, treibender Faktor war der Wind; doch die Ausprägung des Feuers war doch sehr unterschiedlich. Stellenweise, wo z.B. gehäuft Gras vorkam (Drahtschmiele und Reitgras im Bestand) oder trockene und noch benadelte Äste am Boden lagen, kam es zu einer erheblichen Flammenlänge von bis zu 70 cm, an anderen Stellen, die nur eine geringe Auflage hatten, kam das Feuer zu stehen und erlosch sogar von selbst. Hinter der Feuerfront war der Boden mit einer feinen, gräulichen Ascheschicht bedeckt, lokal kam es zu einem Nachbrennen von stärkeren Ästen oder alten Stöcken. Das Feuer konsumierte

sämtliche feinen Brennmaterialien, Gräser und die oberste Streuschicht und teilweise die stärkeren Äste.

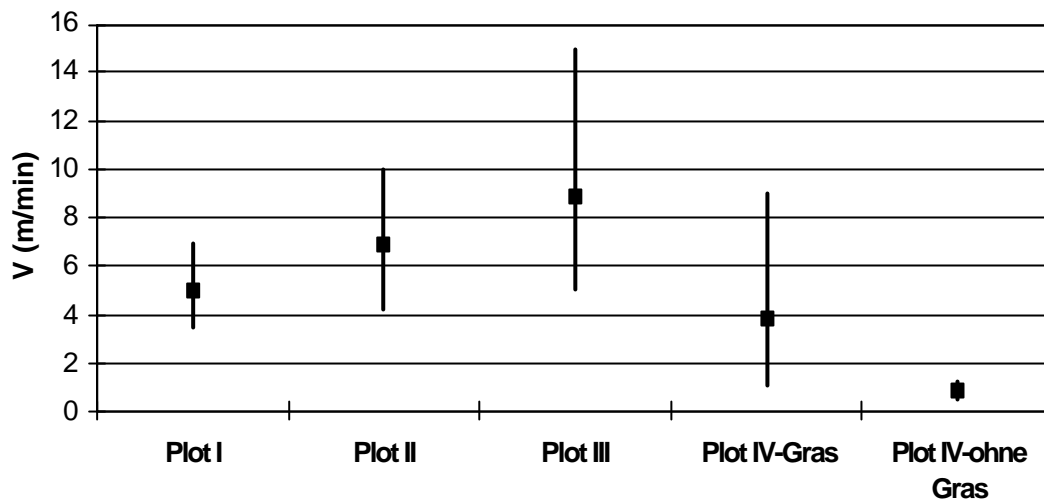


Abb.6. Ausbreitungsgeschwindigkeit (V) der Feuerfront in den vier Probeflächen. Die Aufnahmen in Plot IV konnten in Gras/ohne Gras unterteilt werden, begraste Teile wurden wesentlich schneller vom Feuer durchlaufen.

Ein ähnliches Bild bot sich in Plot II, das anschließend gezündet wurde und eine vergleichbare Brennmaterialauflage hatte. Plot III hingegen unterschied sich erheblich von den anderen beiden, vorher gebrannten Flächen. Zwar stockte ein sehr ähnliches Stangenholz auf allen dreien, doch war der Unterwuchs von Plot III durch dichtes *Calamagrostis*-Gras dominiert. Hinzu kamen erhebliche Reste eines Durchforstungseingriffes, der ca. 5 Jahre vorher stattgefunden hatte. Diese Reste waren u.a. verantwortlich für den hohen Anteil an Brennmaterial der Zeitverzugsklassen 100 und 1000 Stunden (Tab.1). Sofort nach dem Entzünden entwickelte sich eine sehr intensive, sich schnell fortbewegende Feuerfront, die hauptsächlich durch die trockene Grasschicht getragen wurde. Die im Vergleich zu den ersten beiden Flächen wesentlich größere Energiefreigabe war deutlich spürbar und spiegelt sich z. B. in den Temperaturkurven wieder (Abb.7). Die entzündeten Durchforstungsreste brannten lang anhaltend nach.

In Plot IV war die Baumschicht unterschiedlich strukturiert. In der Dichtung mit Baumhöhen bis zu 8 m und teilweise vorhandenen Kronenansätzen direkt am Boden lagen Voraussetzungen für die Entwicklung eines Vollfeuers vor. Auch in diesem Bestand war das Brennmaterial ungleichmäßig verteilt, insbesondere die Bedeckung bzw. Mächtigkeit der Grasschicht. Die Geschwindigkeit der Ausbreitung des Feuers war dementsprechend unterschiedlich. Am dicht begrastem Bestandesrand breitete sich das Feuer zügig und mit Flammenlängen um 60 cm aus, im Bestandesinneren kam es jedoch ohne deckende Grasschicht und nur geringe Brennmaterialauflagen manchmal zum Erlöschen der Flammen. An Stellen mit höheren Auflagen von Reisig war die Verweilzeit des Feuers länger, und es konnten sich Vollfeuer entwickeln, insbesondere in tief beasteten Baumgruppen. In solchen Fällen waren Flammen bis in 10 m Höhe zu beobachten, doch brannten an einer Stellen maximal zehn Bäume. Ein aktives oder unabhängiges Kronenfeuer entstand nicht.

Aufgrund der Inhomogenität des Bestandes war es nötig, mehrere Feuerlinien zu legen, so dass die unterschiedlichen Stadien des Bodenfeuers gleichzeitig auf der Probefläche beobachtet werden konnten.

5.4 Temperaturentwicklung

Messungen oberhalb des Mineralbodens

Die in Abbildung 7 wiedergegebenen Temperaturkurven, die von der Arbeitsgruppe Feuerökologie gemessen wurden, stellen den Temperaturverlauf der Feuerfront in den unterschiedlichen Höhen über dem Mineralboden dar. Die höchsten Temperaturen treten in Bodennähe auf, dort wirkt die Hitze der restlichen Glut und Asche länger nach. Die Annäherung der Feuerfront an die Messstellen ist jedoch in 30 oder 50 cm Höhe früher abzulesen. Bedingt durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit der Feuerfront und die mäßige Brennmaterialauflage kommt es aber nur kurzzeitig zu hohen Temperaturen. In Plot I und II war nach weniger als drei Minuten die Temperatur wieder unter 80°C abgesunken, im Plot III dauerte dies wesentlich länger. Die Verweildauer des Feuers und die in dieser Zeit freigewordene Energie bestimmen wesentlich die Mortalität des Baumbestandes.

Bemerkenswert sind die unterschiedlichen Maximaltemperaturen. Während in Plot I lediglich knapp 420°C erreicht werden, kommt es in Plot III zu Temperaturen über 700°C, allein bedingt durch die dichte Grasschicht und die Durchforstungsreste am Boden.

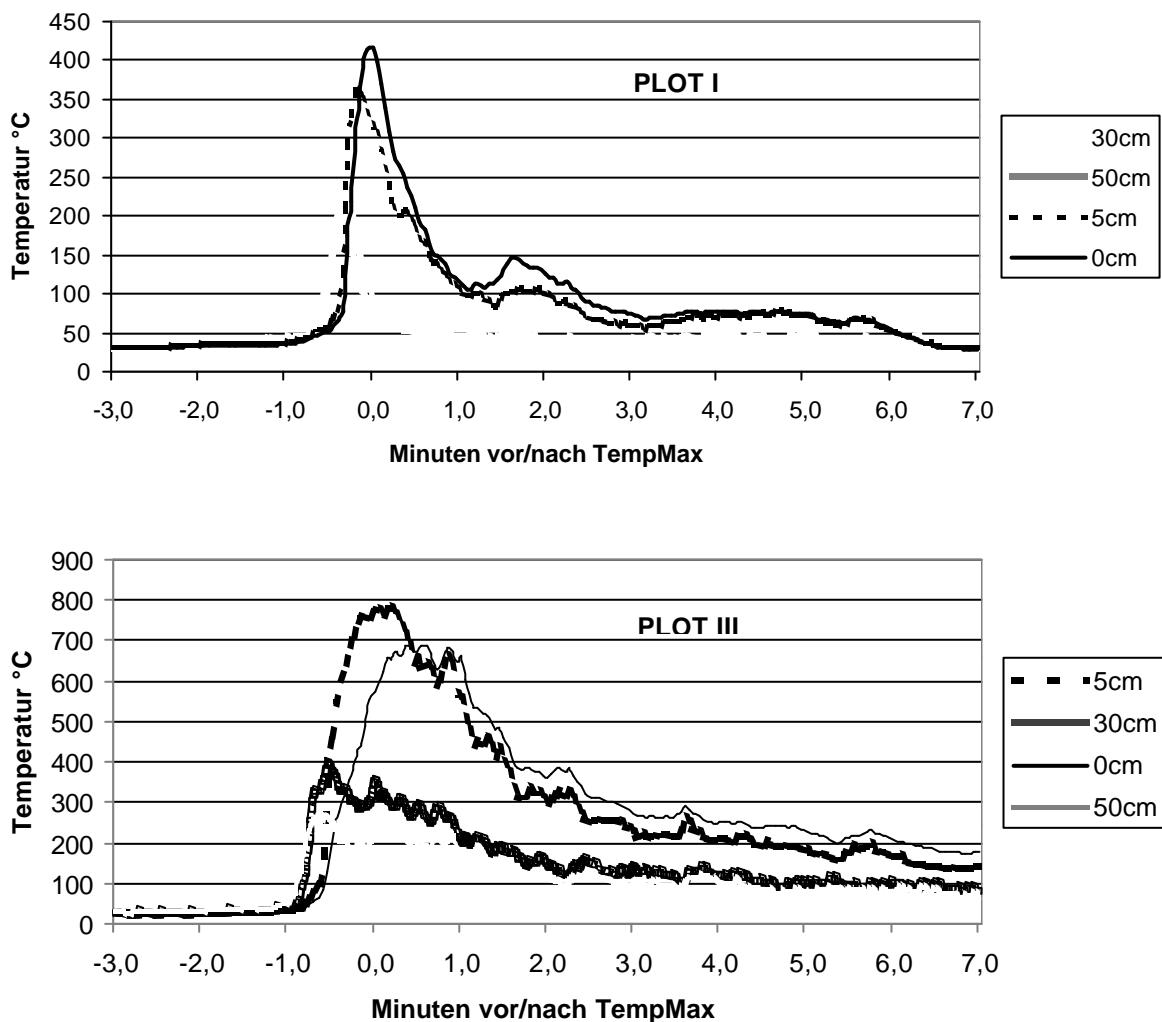


Abb.7 a,b. Temperaturverlauf drei Minuten vor bis sieben Minuten nach Erreichen der Maximaltemperatur in Plot I und III. Man beachtet die fast doppelt so hohe Maximaltemperatur in Plot III und das lange Nachbrennen der Durchforstungsreste am Boden.

Abbildung 8 zeigt die vom DWD im Zentrum von Plot IV erfassten Bodentemperaturen und die Oberflächentemperatur der nordöstlichen Seitenfläche des Bestandes. Während dieses Messzeitraumes lag die Lufttemperatur in 2 m Höhe über der angrenzenden, von der Brandentwicklung unbeeinflussten Freifläche bei 27°C.

Kurz nach der Zündung des am Nordostrand des Plot IV gelegten Bodenfeuers wurde das Signal des auf der Freifläche positionierten Strahlungspyrometers durch Rauchentwicklung beeinflusst. Die Flammen selbst machten nur einen geringen Anteil innerhalb des Pyrometer-Sichtfeldes aus und wirkten später hauptsächlich als Hintergrundstrahler hinter den vom Bodenfeuer unterlaufenen Bäumen des Vordergrundes.

Das vom Boden in die Wipfel kletternde Feuer entwickelte sich erst im Zentrum von Plot IV, und zwar dort, wo die Bodentemperatursensoren installiert waren. Hier lagen einzelne stärkere Totholzstücke am Boden, die auch nach Durchgang der Feuerfront sehr lange und intensiv brannten. Während des Vollfeuers stieg die Bodentemperatur in 2 cm Tiefe auf 166°C, während der vom Strahlungspyrometer erfasste Messfeldausschnitt des nordöstlichen Bestandsrandes eine Maximumtemperatur von 97°C aufwies. Die Temperatursensoren in 10 und 20 cm Tiefe blieben bis ca. 15.30 MEZ unbeeinflusst von der Feuerfront. Danach brach der Datentransfer ab, da die im Boden verlegten Messkabel durch Feuereinwirkung zerstört wurden.

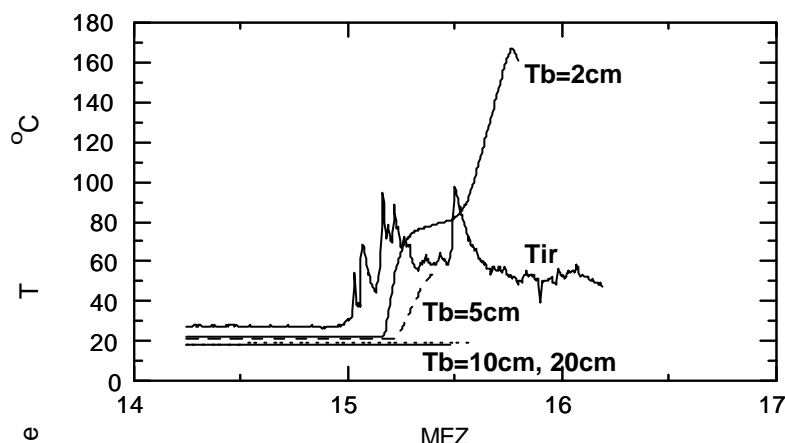


Abb. 8. Zeitreihen der im infraroten Spektralbereich erfassten Oberflächentemperatur (Tir) des nordöstlichen Bestandsrandes und Zeitreihen der im Zentrum von Plot IV (Bereich des Vollfeuers) gemessenen Bodentemperaturen (Tb) in 2, 5, 10 und 20 cm Tiefe.

5.5 Befliegung mit der BIRD-Kamera

Bei der vorläufigen Auswertung verschiedener Luftbildaufnahmen des ABAS-Systems stellte sich heraus, dass dieses System in der Lage ist, die hohe energetische Dynamik der Brandflächen quantitativ zu erfassen.

Abbildung 9 zeigt Ausschnitte eines Aufnahmestreifens, der mit ABAS aufgenommen wurde, und in denen die brennenden Plots I, II und IV in den Bildfragmenten B bis D farblich erkennen sind. Eine Farbkodierung der Feuerdarstellungen wurde vorgenommen, um die Temperaturskalen der Feuer optisch von den Grautönen der normal temperierten Umgebung abzuheben.

Dabei entsprechen die Farben:

Blau: ~ 50 – 130 °C
 Grün: ~ 130 – 230 °C
 Gelb: ~ 230 – 330 °C
 Rot: > 330 °C

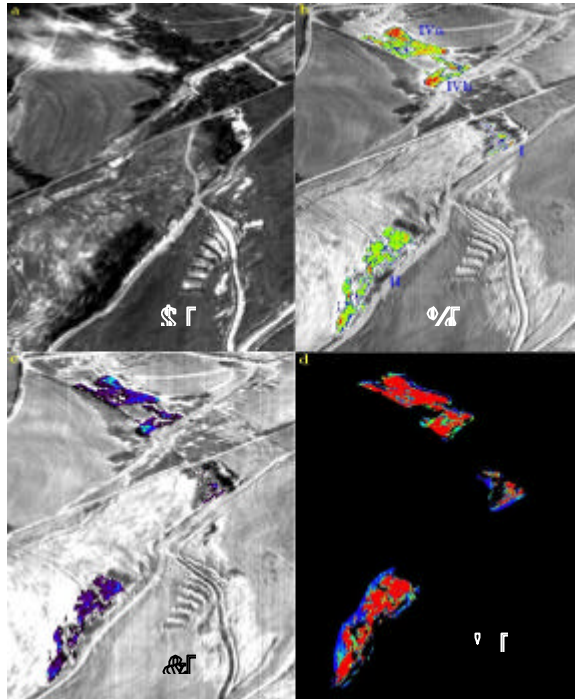


Abb.9. Ausschnitte eines mit ABAS aufgenommenen Streifens, in dem die brennenden Plots I, II und IV in den Bildfragmenten B bis D farbige zu erkennen sind (s. Text)

Bildfragment A ist im sichtbaren Bereich bei 0,5 µm Wellenlänge registriert und zeigt die starke Raumentwicklung bei Plot IV. Bildfragment B ist im mittleren Infrarot (IR) Bereich bei 3,7 µm Wellenlänge registriert, der für die Erkennung von Feuern am geeignetsten ist. Bild C ist im thermalen IR Bereich bei 8,8 µm Wellenlänge aufgezeichnet, welcher weniger sensitive für heiße Ziele ist, und damit auch niedrigere scheinbare Temperaturen signalisiert.

Bildfragment D ist eine vorläufige Darstellung der sogenannten effektiven Feuertemperatur in jedem Pixel.

Tab.3. Effektive Temperaturen und Flächen der Feuer in den Plots I, II, und IV

ABAS Überflug	Plot I	Plot II	Plot IV
Überflug 5 (16:34 h):			
Temperatur, °C	516	536	566
Fläche, m ²	13	53	79
Überflug 6 (16:43 h):			
Temperatur, °C	521	556	616
Fläche, m ²	10	94	65

Die Bildfragmente B bis D und Tabelle 3 zeigen sehr eindrucksvoll die jeweilige Entwicklung der Brände:

Plot I: Kleine Rest-Schwelfeuer (dieses Plot wurde 13:45 gezündet, und 14:30 h teilweise gelöscht)

Plot II: Umfangreiche Schwelfeuer, auch noch wenig Flammen (dieses Plot wurde 14:45 h gezündet, dann sich selbst überlassen und nicht gelöscht),

Plot IV: Mehrere frisch gezündete flammende Feuerstellen, wobei Plot IV während des Überfluges 6 besonders heiße Feuerstellen aufweist.

5.6 Automatische Branddetektion

(Günter Naumann)

Die eingesetzten Kameras des *Automatisierten Waldbrand-Früherkennungssystems* (AWFS) sind in unterschiedlicher Entfernung von den Brandflächen positioniert. Die Entfernungen der AWFS-Detektorstandorte zum Versuchsgebiet sind:

- Kathlow: 8 km
- Reuthen: 23 km
- Jerischke: 30 km

Wie zu erwarten, meldeten die nächstgelegenen Wachtürme die Brände am schnellsten. Erstaunlich ist aber, dass schon eine Minute nach dem Zünden der Fläche die erste Meldung kam. Die verdeutlicht die Effektivität und Funktionalität der eingesetzten Technik. Die weiter entfernten Türme meldeten die Rauchfahne später, beeindruckend ist hier aber die große Distanz, über die die Kameras wirksam tätig sind (Tab.4).

Tab.4. Protokoll der AWFS-Kameras während der Testfeuer

Plot	Zeit		Meldung FWT / AWFS
I	13.45	Zündung	
	13.46		Kathlow
	13.59		Reuthen
II	14.43	Zündung	
	14.44		Kathlow
	14.47		Reuthen
	14.48		Jerischke
IV	15.58	Zündung	
	16.01		Kathlow
	16.07		Reuthen
III	17.54	Zündung	durch Rauchentwicklung vorhergehender Brände keine Differenzierung zwischen Versuch 3 und 4 möglich

Die von den Kameras auf den Feuerwachtürmen aufgezeichneten Bilder zeigen deutlich die langgestreckte Rauchwolke. Exemplarisch ist eine Aufnahme vom Feuerwachturm Kathlow (Abb.10).



Abb10. Digitale Aufnahme vom Feuerwachturm Kathlow, mit detektiertem Feuer im kleinen Rahmen (Uhrzeit 16:52, Feuer in Plot IV, nachlassende Rauchbildung in I und II).

5.7 Verhalten der Brandkäfer

Die von der Aktivkohle eluierten Duftproben wurden gaschromatographisch (GC) getrennt und parallel durch einen universellen Flammenionisationsdetektor (FID) und einen elektroantennographischen Detektor (EAD) nachgewiesen. Der EAD misst die elektrophysiologische Antwort einer isolierten Antenne von *M. acuminata* auf die Komponenten der Duftstoffmischung. Die parallele Detektion durch FID und EAD ermöglicht einerseits eine quantitative Erfassung sämtlicher im Rauchgas vorhandener organischer Verbindungen durch den FID, andererseits die Zuordnung der Antennenreaktion zu bestimmten Substanzen im EAD. Eine Identifizierung der Duftstoffe erfolgt durch Gaschromatographie-Massenspektrometrie.

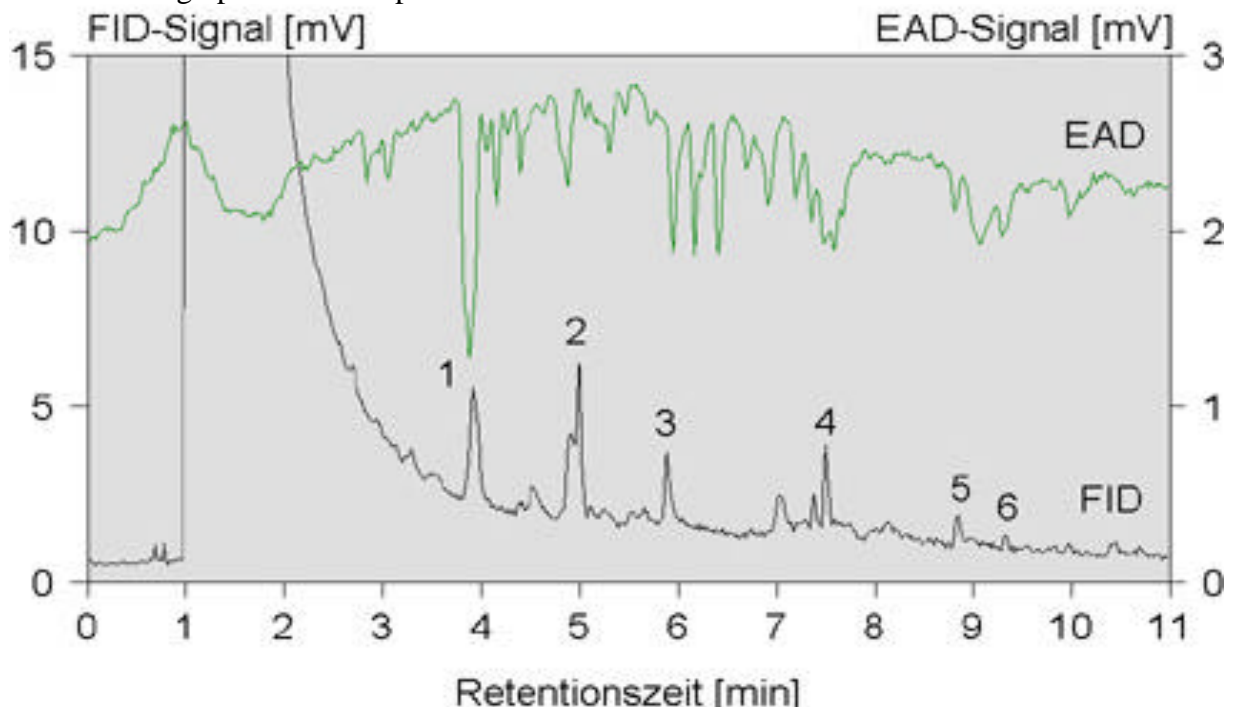


Abb.11 Reaktion des FID (Flammenionisationsdetektor) und des EAD (Elektroantennographischer Detektor mit Antenne von *Melanophila acuminata*) auf unterschiedliche Substanzen in den Rauchgasen.

Mit diesen Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Antennen von *M. acuminata* Guajakol-Verbindungen im Rauchgas besonders empfindlich nachweisen können (bis 1pg/ml). Unter Berücksichtigung der aus schwelendem Kiefernholz in Laborversuchen freigesetzten Menge Guajakol konnte abgeschätzt werden, dass ein einziger, auf 2 m Höhe angekohelter Kiefernstamm bei schwachem Wind noch in über 1 km Entfernung von den Käfern zu wahrzunehmen ist.

6. Vorläufige Zusammenfassung und Ausblick

Die am 23. August 2001 nordöstlich von Cottbus kontrolliert gelegten Waldbrände sind in den Kontext jener Beobachtungen von Waldbränden einzuordnen, die Missbach (1970, 1973) in der ehemaligen DDR zum Zweck des Studiums des Feuerverhaltens auswertete. Diese Beobachtungen brachten erste, für eine spätere Feuermodellierung wichtige Erkenntnisse. Weitere Waldbrandversuche, die in der Einführung erwähnt sind, hatten jeweils nur Teilaspekte des Ablaufes eines Waldbrandes als Gegenstand ihrer Untersuchungen.

Das Interesse an einem Waldbrandexperiment, in dem gemeinsame und umfassende Untersuchungen durchgeführt werden, war daher sehr groß. Die Beteiligung mehrerer Forschungseinrichtungen und -disziplinen am ersten Waldbrandexperiment des DFNK unterstreichen dessen Bedeutung und den Forschungsbedarf.

Die Rahmenbedingungen dieses ersten großen Waldbrandexperimentes erlaubten einen Anfang. Die vier von der LAUBAG zur Verfügung gestellten Waldparzellen waren sehr kleinräumig und unterschiedlich strukturiert. Entsprechend unterschiedlich war das Feuerverhalten auf den jeweiligen „Kleinstandorten“.

Um die aus diesen ersten Versuchen gewonnenen Erkenntnisse aller beteiligten Untersuchungsansätze auszuwerten und eine Strategie für eine weitere Versuchsserie zu entwickeln, bedarf es noch einiger Zeit. Sicher ist aber, dass aus Sicht der Erarbeitung eines Waldbrandmodells für Brandenburg weitere Versuche notwendig sind, um derzeit bestehenden Feuermodelle besser an die Brandenburger Verhältnisse anzupassen. Weitere, nach Vegetationstypen und Bestandesformen stratifizierte Versuche sind notwendig. Wünschenswert sind vor allem Versuche in größeren Waldbeständen, die es erlauben, die großflächige Entwicklung eines Waldbrandes zu vermessen.

Danksagung

An dieser Stelle sei allen Beteiligten Stellen, die diese Versuche unterstützt haben, Dank ausgesprochen. Dies gilt vor allem für die Geschäftsleitung und Mitarbeiter der LAUBAG und der Forstverwaltung Brandenburg.

Literatur

Andreae, M. O., J. G. Goldammer, and G. Schebeske. 1996. Methyl chloride and methyl bromide emission from vegetation fires. EGS XXI General Assembly, The Hague, The Netherlands, 6-10 May 1996. *Annales Geophysicae* 14, Supp. II, C 595.

Brown, J. K. 1974. Handbook for Inventorying Downed Woody Material. USDA Forest Service General Technical Report INT-16

Byram, G. M. 1963. Combustion of forest fuels. In: Forest fire. Control and use (K.P. Davis, ed.), 61-89. McGraw Hill, New York.

Deeming, J. E., J. W. Lancaster, M. A. Fosberg,, R.W. Furman, and M. J. Schroeder. 1972. National fire-danger rating system. USDA For. Serv. Res. Pap. RM-84, 165p.

Deeming, J. E., R. E. Burgan, and J. D. Cohen. 1977. The National fire-danger rating system - 1978. USDA For. Gen. Tech. Rep. INT-39, 63 p.

Forestry Canada Fire Danger Group. 1992. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3, Published by Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate, Ottawa.

Fosberg, M. A. 1970. Drying rates of heartwood below fiber saturation. *For. Sci.* 16, 57-63.

Goldammer, J. G. 1979. Der Einsatz von kontrolliertem Feuer im Forstschutz. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 150, 41-44.

Goldammer, J. G. 1982. Die Anwendung von Schaumlöschmitteln in der Waldbrandbekämpfung und die Versuchsergebnisse mit EXPYROL W 1. *Allg. Forst. Z.* 37, 1094-1097.

Goldammer, J. G. 1995. Entwicklung eines Sensors zur Entdeckung und Überwachung von Waldbränden. FIRES - Ein Kooperationsprojekt zwischen der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Max-Planck-Institut für Chemie. Vorversuch in Freiburg/Breisach, 10. Juli 1995. Unveröffentlichtes Protokoll.

Hartung, W., und R. Gruner. 2000. Weltraumtechnologie für die Waldbrandfrüherkennung. *Allg. Forst. Z.* 55, 388-390.

Kührt, E., T. Behnke, H. Jahn, H. Hetzheim, J. Knollenberg, V. Mertens, G. Schlotzhauer, and B. Götz. 2000. Autonomous early warning system for forest fires tested in Brandenburg (Germany). *International Forest Fire News* No. 22, 84-90.

Manö, S., and M. O. Andreae. 1994. Emission of methyl bromide from biomass burning. *Science* 263, 1255-1257.

Merz, B., und J. Friedrich (Hrsg.). 2001. Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK). Konzeption und Stand der Arbeiten, Dezember 2000. GeoForschungszentrum Potsdam, 103 S.

Missbach, K., 1970. Der Ablauf von Waldbränden. *Sozialistische Forstwirtschaft*. Beilage zu Heft 12, 9-11 VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 384 S.

Missbach, K., 1973. Waldbrand- Verhütung und Bekämpfung. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 126 S.

Oertel, D., P. Haschberger, V. Tank, F. Schreier, B. Schimpf, B. Zhukov, K. Briess, H.-P. Röser, E. Lorenz, W. Skrbek, J. G. Goldammer, C. Tobehn, A. Ginati, and U. Christmann. 2000. Two dedicated spaceborne fire missions. In: Proc. Joint Fire Science Conference and Workshop, Boise, Idaho, USA, 15-17 June 1999, Vol. I, 254-261. Published by the University of Idaho and the International Association of Wildland Fire.

Rothermel, R. C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Pap. INT-115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40p.

Wittich, K.-P., 1998. Waldbrandgefahrenvorhersage – Teil 1: Streufeuchtemodell. Beiträge zur Agrarmeteorologie, 2/98, DWD-intern, 70, 20 Seiten. Deutscher Wetterdienst, Braunschweig.

Wittich, K.-P., und W. Janssen, 2001. Waldbrandgefahrenvorhersage für Deutschland im Internet. Allg. Forst. Z. 56, 794-795.