

1 Einleitung

»Holz ist ein einsilbiges Wort,
aber dahinter verbirgt sich eine Welt der Märchen und Wunder.«

Theodor Heuss

Die Bedeutung von Wäldern und Vegetationsgebieten für den »Lebensraum Deutschland« wird seitens der Bevölkerung, der Politik, aber auch von Dienststellen zur Gefahrenabwehr zum Teil stark unterschätzt. Selbst Eigentümer oder Pächter von Waldgebieten erkennen häufig die ökologische Bedeutung des Waldes bzw. orientieren sich bei der Wertschätzung ihres Waldes vielfach nur an Rohholzpreisen, den Pachteinnahmen für die Jagd oder den finanziell gering bewerteten Waldgrund. Führt man sich aber vor Augen, dass insbesondere Wälder für das Umweltsystem wichtige und multifunktionale Aufgaben erfüllen, ändert sich diese am kurzfristigen Profit orientierte Einschätzung schnell.

Wälder sind nicht nur ein wertvoller Lebensraum für Fauna und Flora, sondern auch Lieferanten für den wichtigen und nachwachsenden Rohstoff Holz. Holz ist wiederum unverzichtbarer Werkstoff u. a. für die Bauwirtschaft, für die Möbel- oder Verpackungsindustrie und nicht zuletzt für die Printmedien.

Für den Menschen stellt der Wald einen wertvollen Erholungsraum dar, sei es um sich in den Wäldern zu erfrischen oder schlicht den Anblick zu genießen. Nicht ohne Grund werden Freizeit-, Kur-, Hotel- und Sportanlagen bevorzugt in der Nähe des Waldes oder sogar innerhalb von Waldgebieten angesiedelt.

Wälder sind darüber hinaus für unser Klima wertvolle »Verbraucher« von Kohlendioxid und absorbieren weitere, die lebensnotwendige Atemluft belastende Schadstoffe. Zudem binden Wald- und Vegetationsgebiete große Mengen an Umweltstäuben und fungieren als natürliche Reduktionsquelle für Lärm. Ferner tragen Wälder dazu bei, extreme Witterungen zu vermeiden. So werden Erosion, Hitze, Frost und die Auswirkungen von Starkregenfällen und Stürmen deutlich reduziert. Auch sind die Wälder der Lebensraum vieler Tier- und Pflanzenarten. Nicht zuletzt dienen Wälder als gewaltige Trinkwasserspeicher und Sauerstofflieferanten (König, 2007).

Somit ist ersichtlich, dass dem Schutz unserer Wälder eine weitaus größere Bedeutung beigemessen werden muss, als dies in weiten Teilen der Bevölkerung und verantwortlichen Stellen tatsächlich der Fall ist.

Betrachtet man nun den forstwissenschaftlich erbrachten Nachweis, dass ein Waldgebiet, welches durch einen Vollbrand vernichtet wurde, ca. 60 bis 70 Jahre Zeit

benötigt (König, 2007) (etwa die Dauer eines durchschnittlichen Menschenlebens oder die Dauer zweier Generationen!), um sich wieder zu regenerieren oder sich zumindest in Teilen zu erholen, muss klar sein, dass die Wälder vor Brandeinwirkung und anderen Schadenseinflüssen zu schützen sind. Diese Aussage muss aber insofern eingeschränkt werden, da einige Ökosysteme durch Einwirkung von Feuer auch Nutzen ziehen oder für die weitere Entwicklung sogar darauf angewiesen sind. Der WWF Deutschland schätzt, dass ca. 46 % der weltweiten Ökoregionen von Feuer abhängig sind oder dadurch positiv beeinflusst werden. Innerhalb dieser Regionen sind Feuer ähnlich wichtig wie z.B. Regen oder Sonneneinwirkung (Hirschberger, 2012). Dieser Schätzung folgend verbleiben 54 % an weltweiten Ökosystemen, in denen ein Feuer keinen natürlichen Nutzeffekt aufweist und somit in vielerlei Hinsicht nur eine in unterschiedlichen Ausprägungen schädigende Wirkung eintritt.

Betrachtet man nun noch die Erfahrungswerte von Feuerwehren und Forstdienststellen, die belegen, dass die Brandbekämpfung in Waldgebieten nicht nur körperliche Schwerstarbeit ist, sondern die Gefahrenabwehr auch vor groÙe strategische und logistische Probleme stellt, liegt nahe, dass ein Brand in einem feuerunabhängigen Ökosystem schon so früh wie möglich entdeckt, zuverlässig eingeschätzt, gemeldet und mit Einsatzkräften beschickt werden muss.

Waldbrände stellen eine konstante Gefahr für feuerunabhängige ökologische Systeme, Infrastruktur und alle Lebensformen dar. Betrachtet man die Prognosen für die zukünftigen Waldbestände, ist festzustellen, dass Waldbrände und die Rodung des Regenwaldes die Hauptursachen dafür sind, dass sich die Waldbestände mit Stand des Jahres 2000 bis zum Jahr 2030 weltweit halbiert haben werden (Stipanićev et al., o. A. und Kührt et al., 2000).



Bild 1: *Momentaufnahme der Entstehung des Waldbrandes am Thumsee, Stadt Bad Reichenhall, Landkreis Berchtesgadener Land, am 13.04.2007. Dieser Entstehungsbrand entwickelte sich über einen Zeitraum von drei Tagen zu einer der größten Waldbrandkatastrophen im Freistaat Bayern (Quelle: Florian Weiß).*

Jedes Jahr zerstören Brände mehrere Millionen km² Pflanzenbewuchs in der Savanne und – zusätzlich zu dessen Rodung – ca. 100.000 km² tropischen Regenwald (Kührt, o. A.). In Europa werden jedes Jahr ca. 10.000 km² Wald durch Brände vernichtet (Bild 1). In den Regionen Nord Amerikas und Russland fallen jedes Jahr ca. 100.000 km² Wald, den meist von Menschen verursachten Bränden, zum Opfer. Rund 20 % der das Weltklima beeinflussenden CO₂-Emmissionen werden durch Waldbrände verursacht (Stipaničev et al., o. A.).

Im Jahr 2009 fanden sich Spezialisten verschiedener Dienststellen der Vereinigten Staaten von Amerika zusammen, um u. a. die von Bränden in der Vegetation ausgehenden Risiken und Gefahren zu bewerten, aber auch die Wirksamkeit der Strategien von Brandschutzprogrammen der Vergangenheit und Gegenwart zu untersuchen und daraus eine Prognose für künftige Anforderungen an das »Fire Management« zu erstellen (National Association Of State Foresters, 2009). Beteiligte Dienststellen waren u. a. das

- U.S. Department of the Interior, Bureau Of Indian Affairs,
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management,
- U.S. Department of the Interior, U.S. Fish & Wildlife Service und
- U.S. Department of Agriculture, Forest Service

sowie der National Park Service, die National Association of State Foresters und Dienststellen einzelner Bundesstaaten der USA, darunter Feuerwehren, Universitäten und Spezialisten von Nicht-Regierungsorganisationen (National Association Of State Foresters, 2009).

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im »Quadrennial Fire Review 2009« zusammengefasst, der für die kommenden vier Jahre – daher der Name des Berichtes – und darüber hinaus die Rahmenbedingungen aller Maßnahmen zur Gefahrenabwehr in Wald- und Vegetationsgebieten prognostiziert. Ergebnisse dieser Untersuchungen waren unter anderem (MV Group Ltd., 2009 und National Association Of State Foresters, 2009):

Die Auswirkungen des Klimawandels führen aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer Verlängerung der Waldbrandsaison mit größeren und intensiveren Brandverläufen. Ferner werden Brände in mehreren Gebieten (der USA) ausbrechen, als dies früher üblich war.

(...)

Zunehmende Dürreperioden führen zu einer vermehrten Anhäufung von Brennstoffen, einer schnelleren Austrocknung der Vegetation und einer leichteren Entzündbarkeit der Brennstoffe.

(...)

Trotz eines größeren Bewusstseins der Öffentlichkeit besteht ein kontinuierliches Risiko für die Entstehung von Bränden in Wäldern und Vegetationsgebieten.

(...)

Der Finanzmittelhaushalt von Gefahrenabwehrdienststellen wird durch steigende Anforderungen und Kosten in der Zeit, in der eine Regierung nur geringe Einnahmen verzeichnet, überlastet.

(...)

Neue Denkansätze und Modelle, die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und neu entstehendes Wissen über Zuverlässigkeit, Sicherheit und Risikomanagement müssen gefördert werden und in allen Ebenen des »Fire Managements« integriert werden.

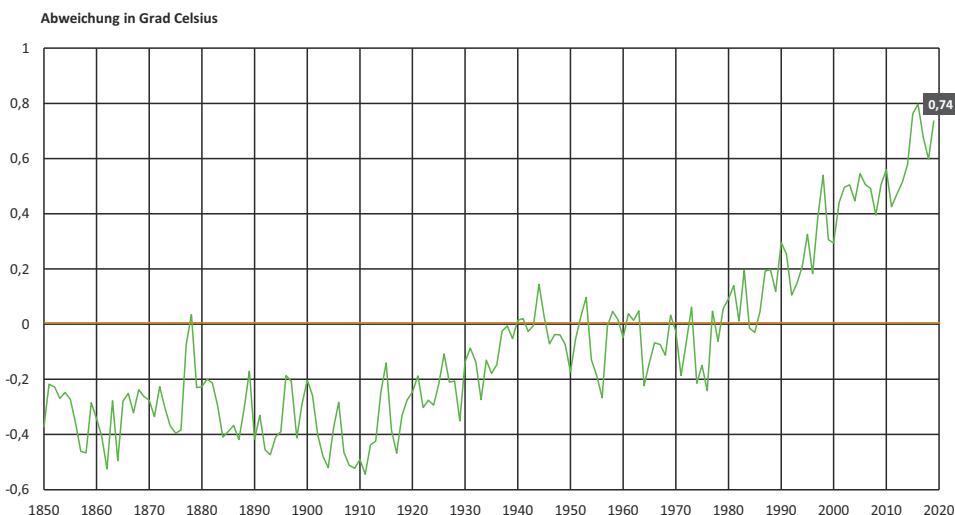


Bild 2: Erderwärmung seit dem Jahre 1850. Deutlich erkennbar ist der Anstieg der Temperatur oberhalb des globalen Temperaturdurchschnitts (Nulllinie) (Quelle: Umweltbundesamt).

Die Ergebnisse dieses Berichtes, aber auch die vielfältigen Schäden betrachtend, die jährlich durch Brände in Wald- und anderen Vegetationsgebieten entstehen, lassen daher nur eine logische Schlussfolgerung zu: Wald- und Vegetationsgebiete müssen einer steten Überwachung zugeführt werden, um die sich durch Brände ergebenden negativen Folgen für das Ökosystem im Allgemeinen und den Menschen im Besonderen deutlich zu reduzieren.

Alle Methoden der Waldbrandfrüherkennung haben dabei gemeinsam, dass diese die Anzahl der Waldbrände nicht reduzieren können, wohl aber deren Auswirkungen. Je früher und sicherer das Brandereignis dabei detektiert und gemeldet werden kann, desto

- mehr Waldflächen können geschützt werden,
- mehr Finanzmittel können eingespart werden,
- früher und effizienter kann die Brandbekämpfung aufgenommen werden,
- weniger Löschmittel und kostenintensive Löschmittelzusätze müssen eingesetzt werden,
- mehr Lebensformen von Fauna und Flora können geschützt werden und
- größer sind die globalen Erfolge des Umweltschutzes.

All dies sind Gründe, der Waldbrandfrüherkennung in vorliegendem Buch besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Ziel des Buches ist der Erhalt einer Übersicht über systemtechnisch völlig unterschiedlich wirkende herkömmliche und moderne Methoden der Waldbrandfrüherkennung. Auf Basis dieser Übersicht sind die unterschiedlichen Systeme und Methoden einem vorwiegend technischen und in begrenztem Umfang einem wirtschaftlichen Leistungsvergleich zu unterziehen, der sich sowohl an spezifischen technischen Funktionsmerkmalen als auch am Wirkbetrieb für einen frei gewählten Schutzbereich und folgend an einem realen Schadensfall, der Waldbrandkatastrophe in der Lüneburger Heide im Jahre 1975, orientiert.

Wesentliches Ziel ist auch die Entwicklung definierter Anforderungskriterien an Systeme zur Früherkennung von Wald- und Vegetationsbränden, die in einem Leistungspositions katalog zu bündeln sind. Die zu definierenden Anforderungskriterien sollen die praktischen Erfordernisse des Einsatzdienstes der Feuerwehr sowie Belange der Sicherheitstechnik, der freien Wirtschaft und des öffentlichen Dienstes berücksichtigen. Dabei ist davon auszugehen, dass dieser so entwickelte und nachfolgend dargestellte Leistungspositions katalog Neuigkeitscharakter aufweist. Im Weiteren sind auch die Einflussfaktoren zu ermitteln, die sich auf die Beschaffung bzw. den Einsatz eines Früherkennungssystems auswirken. Für ein weitergehendes Verständnis wird neben der Darstellung unterschiedlicher Methoden der Früherkennung von Wald- und Vegetationsbränden auch auf die Waldbrandsituation speziell in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Ursachen eingegangen.

2

Die Waldbrandsituation in Deutschland

Der Begriff der »Waldbrandgefahrenklassen« wurde schon vor dem zweiten Weltkrieg erdacht. Hierzu wurde durch Professor Weck eine Statistik der preußischen Staatsforsten ausgewertet, welche sich inhaltlich über einen Zeitraum von 60 Jahren erstreckte. Die Ergebnisse dieser Statistik kamen jedoch erst nach dem zweiten Weltkrieg – zunächst in den Ländern der Sowjetischen Besatzungszone, dann im Hoheitsgebiet der entstehenden DDR – zum Tragen (Sobczyk, 2014). So wurden die Waldbrandgefahrenklassen nach langen aber praxisnahen Diskussionsprozessen, beginnend ab dem Jahre 1950 (König, 2007), in der DDR eingeführt. Hierzu wurden alle Oberförstereien zunächst in drei, später, durch Einwirkung der »Arbeitsgemeinschaft Waldbrandschutz« (Sobczyk, 2014), in vier Waldbrandgefahrenklassen eingestuft:

- A Gebiete mit über 50 ha Vollbrandfläche pro 100.000 ha Wald und Jahr
- B Gebiete mit über 5 - 50 ha Vollbrandfläche pro 100.000 ha Wald und Jahr
- C Gebiete mit weniger als 5 ha Vollbrandfläche pro 100.000 ha Wald und Jahr

Hinzu kam zu einem späteren Zeitpunkt die zusätzliche Waldbrandgefahrenklasse A1, welche besonders gefährdete Gebiete noch einmal besonders hervorhob:

- A1 Gebiete, die im Zeitraum von 1925 bis 1964 mehr als drei Brände über 100 ha Größe und über 50 ha Vollbrandfläche pro 100.000 ha Wald aufwiesen.

Ähnliche, aber nicht direkt vergleichbare Einstufungen in Gefährdungsbereiche lagen im Hoheitsgebiet der damals noch jungen Bundesrepublik Deutschland nur in Bayern, Niedersachsen und Hessen vor (König, 2007).

Im Jahr 1992 schloss sich die mittlerweile wieder vereinigte Bundesrepublik Deutschland dann den Vorstellungen der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft, dem Vorläufer der heutigen Europäischen Union an, das Staatsgebiet auf Ebene der Landkreise in Waldbrandrisikogebiete zu unterteilen. Infolge dieser europaweit einheitlichen Einordnung auf rechtlicher Grundlage der EWG-VO Nr. 2158/92 ff werden die Waldbrandrisikogebiete wie folgt eingeteilt (König, 2007):

- Landkreise mit hohem Waldbrandrisiko,
- Landkreise mit mittlerem Waldbrandrisiko und
- Landkreise mit geringem Waldbrandrisiko.

Auf Basis dieser Einteilung ergab sich für das Hoheitsgebiet der Bundesrepublik Deutschland die durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und

Forsten im Jahre 1995 erstellte Karte für Waldbrandrisiken (Engel, 2014). Der Karte ist zu entnehmen, dass der Nordosten Deutschlands das Gebiet mit dem höchsten Risiko für einen Waldbrand ist. Das Agrarministerium des Landes Brandenburg mit Sitz in Potsdam begründet diese hohe Waldbrandgefahr mit einem hohen Anteil an Kiefernwäldern, leichten Sandböden und geringen Niederschlagsmengen (König, 2007). Daher ist es nicht verwunderlich, wenn im Land Brandenburg bzw. im Nord-Osten der Republik vergleichsweise hohe Anstrengungen für den Schutz des Waldes vor Bränden unternommen werden. Bis zum Jahre 2013 wurde die Waldbrandgefahr in den einzelnen Bundesländern auf Basis inhaltlich nicht einheitlicher Parameter ermittelt und mittels unterschiedlicher Begrifflichkeiten zum Ausdruck gebracht. Hierdurch kam es insbesondere in den Grenzbereichen der Länder immer wieder zu Irritationen.

Seit 2014 (SMUL, 2014) verwenden alle Länder der Bundesrepublik Deutschland das gleiche fünfstufige Modell, über welches die Waldbrandgefährdung einheitlich definiert wird. Dieses als Waldbrandgefahrenindex (WBI) bezeichnete Prognosemodell basiert auf der von George M. Byram entwickelten Feuerintensitätsgleichung, in welcher die Laufgeschwindigkeit eines Brandes in Abhängigkeit der Waldstruktur (z. B. Bodenbeschaffenheit, Streuauflagen, Ausbildung der Kronen) und die gegebenen bzw. prognostizierten Wetterdaten (z. B. Luftfeuchte, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmenge, Schneehöhe, Strahlung innerhalb der Atmosphäre) berücksichtigt werden.

Die Formel der Brandintensität nach George M. Byram lautet (Johnston et al., 2017):

$$\text{FI} = \text{HwR}$$

$\text{FI} =$	Fire Intensity	$= \text{Brandintensität (kW m}^{-1}\text{)}$
$\text{H} =$	$\text{Low heat of Combustion}$	$= \text{Verbrennungswärme (kJ kg}^{-1}\text{)}$
$\text{w} =$	Fuel consumed	$= \text{Gewicht brennbarer Stoffe (kg m}^{-2}\text{)}$
$\text{R} =$	Rate of Spreading	$= \text{Laufgeschwindigkeit des Bodenfeuers (m s}^{-1}\text{)}$

Der WBI entspricht dem internationalen Standard und gibt den Stand der Waldbrandforschung wieder. Das Prognosemodell des täglich aktualisierten WBI wird seitens der Länder dazu benutzt, die Waldbrandgefahr einzuschätzen und auf Basis dieser Erkenntnisse Waldbrandwarnungen bzw. Handlungsempfehlungen auszusprechen, die weitreichend bis hin zur Erteilung des Verbotes zum Betreten der Wälder reichen können (Bild 3).

Die Ausgabe des Waldbrandgefahrenindex erfolgt in fünf Stufen (DWD, 2018): Auch weltweit lassen sich Aussagen zu Häufigkeiten und Risikogebieten treffen. Werden so z. B. die Häufigkeit von Waldbränden, deren Verlaufsformen und Hauptursachen zusammengefasst, entsteht die Weltkarte der Feuerregime (Lavorel et al., 2007). Bei der eingebrachten Häufigkeit (»freq« = frequency) wird zwischen

STUFE	GEFÄHRDUNGSPOTENTIAL
1	SEHR GERINGE GEFAHR
2	GERINGE GEFAHR
3	MITTLERE GEFAHR
4	HOHE GEFAHR
5	SEHR HOHE GEFAHR

Bild 3: Gefahrenstufen nach Waldbrandgefahrenindex

geringer (»low«), mittlerer (»medium«) und hoher (»high«) Häufigkeit unterschieden. Die Häufigkeit gibt dabei ein periodisch wiederkehrendes, gleichartiges Brandereignis an, welches bei geringer Häufigkeit bis zu seiner Wiederholung über 200 Jahre dauert, bei mittlerer Häufigkeit zwischen 20 und 200 Jahren und sich bei hoher Häufigkeit innerhalb von 20 Jahren wiederholt (Hirschberger, 2012). Bei den Verlaufsformen des Brandes wird zwischen Boden- (»Surface«) und Kronenfeuern (»Crown«) unterschieden. Die Brandursachen (vgl. Kapitel 3) werden gemäß ihren Hauptursachen in natürliche (»N« = natural) und anthropogenen (»H« = human) bedingte Schadensergebnisse eingeteilt (Lavorel et al., 2007).

Die Verwendung des Begriffes »Kronenfeuer« (auch als »Wipfelfeuer« bezeichnet) entspricht dem herkömmlichen Sprachgebrauch, stellt jedoch keine eigenständige Waldbrand- oder Verlaufsform dar, da ein »Kronenfeuer« ausschließlich mit einem Vollbrand (auch als »Totalfeuer« bezeichnet) einhergeht (König, 2007). Wald- und Vegetationsbrände lassen sich somit in

- Moor- bzw. Erdbrände (Abbrand unterirdischer organischer Schichten),
- Bodenbrände (Abbrand des brennbaren Bodenbelages und -bewuchses),
- Stammbrände (Abbrand eines einzelnen Baumstamms) und
- Vollbrände (Totalfeuer)

unterscheiden (König, 2007 und Schott/Ritter, 2013).

Eine Besonderheit bei den Erdbränden ist der Abbrand unterirdischer Kohleschichten, der sehr zur globalen Luftverschmutzung und Treibhausemissionen beiträgt. Infolge dieser weltweit bestehenden Problematik des ungewollten Abbrandes von Kohlevorkommen beschäftigt sich das interdisziplinäre geowissenschaftliche Verbundprojekt »The Sino-German Coal Fire Research Initiative« mit

den Möglichkeiten der Erkundung, Bekämpfung und Überwachung von unterirdischen Kohlebränden.

Die Einteilung bzw. Unterscheidung von unterschiedlichen Verlaufsformen der Brände in Wald- und Vegetationsgebieten ist für die Auswahl und Anwendung geeigneter und nachhaltig wirkender Maßnahmen zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr von Bedeutung (Cimolino, 2014 und Cimolino et al., 2015). Die Beschreibung taktischer und strategischer Einsatzmaßnahmen sowie der hierfür benötigten Ausrüstung der Feuerwehr ist jedoch nicht Gegenstand des Buches. Vielmehr stellt dieser Themenkomplex ein eigenes Tätigkeitsfeld dar, welches sich nach präventiv wirkenden Maßnahmen des Waldbrandschutzes (Waldbrandprävention) nahtlos an die Früherkennung von Wald- und Vegetationsbränden anschließt.

Die Gesamtheit der durch Schadenfeuer verbrannten Waldfläche in der Bundesrepublik Deutschland weist derzeit, betrachtet ab dem Jahr 2002 (Bild 4), eine zunehmende Tendenz auf (Quelle: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2020). Im Einsatzjahr 2018 kam es dabei nicht nur zu den meisten Waldbränden seit 15 Jahren, sondern auch zur in Deutschland größten vernichteten Waldbrandfläche seit 26 Jahren. Die vernichtete Fläche von 2348,81 Hektar entspricht dabei ungefähr einer Fläche von 3290 Fußballfeldern (Quelle: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, 2020)

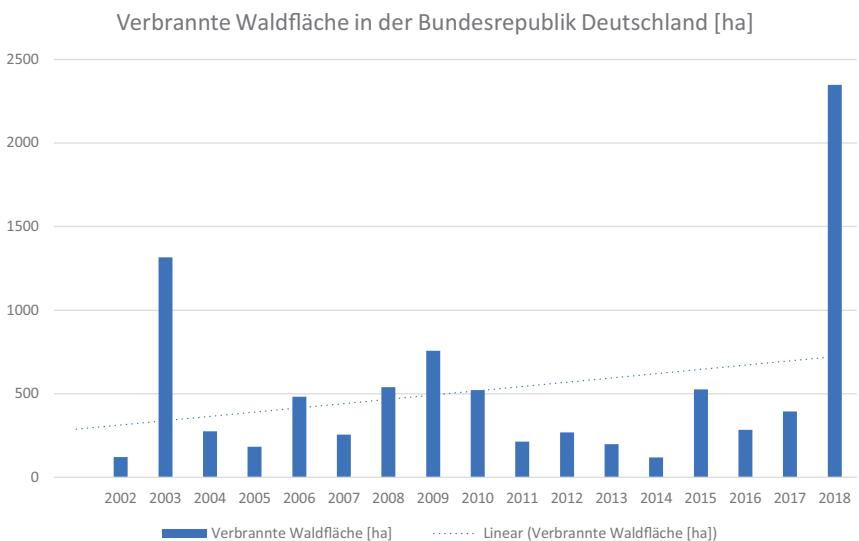


Bild 4: Verbrannte Waldfläche in der Bundesrepublik Deutschland seit dem Jahre 2002
(Quelle: Forstpraxis.de)

3 Brandursachen in Wäldern und Vegetationsgebieten

»Das Talent der Menschen, sich einen Lebensraum zu schaffen, wird nur durch ihr Talent übertröffen, ihn zu zerstören.«

Georg Christoph Lichtenberg

Brandursachen in Wäldern und Vegetationsgebieten lassen sich anhand des Zündquellenkataloges der Explosionsschutzrichtlinie, der Einteilung von Brandursachen aufgrund von Erfahrungswerten nach Schneider (1997) oder auch der Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland, geführt durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Tabelle 1 und 2), auf zwei Hauptursachen reduzieren: natürliche und anthropogen bedingte Brandursachen.

Natürliche Brandursachen sind der Blitz einschlag sowie Vulkanausbrüche. Zudem können unterirdische Kohleschichten durch exotherm verlaufende Selbstentzündungsprozesse in Brand gesetzt werden (Drebenstedt et al., 2010), in deren Folge auch Brände an der Oberfläche möglich sind. Während die Selbstentzündung von Kohle der Reaktion mit der Umgebungsluft oder Luftein schlüssen in der Kohle selbst geschuldet ist, lässt sich die relativ seltene (König, 2007) Selbstentzündung von Torf auf das Vorhandensein thermophiler, vorwiegend aerober Mikroorganismen zurückführen (Schwarz, 1964, Schneider, 2003 bis 2009). Bedingung hierfür ist jedoch eine einhergehende Dürre (König, 2007).

Die Blitz einschläge, die zu einer Zündung von natürlichen Brennstoffen in der Vegetation führen, unterliegen, betrachtet man die Region im Bereich des Landkreises Bautzen, einer Zunahme (Sobczyk, 2019). Dies kann einerseits an einer bereits einsetzenden Klimaänderung liegen, in deren Folge durch vermehrten Wassereintrag in die Atmosphäre und stärkere Winde zunehmend elektrische Ladungen und Spannungsfelder entstehen, die sich mittels Blitz(einschlag) entladen. Andererseits ist es den hochmodernen meteorologischen Erkennungssystemen (vgl. Kapitel 4.2.1.10) geschuldet, welche Blitz einschläge im Vergleich zu früheren Zeiten heute präzise erkennen, analysieren und aufzeichnen.

Aussagen, die Meteoriten als Brandursache bei baulichen Anlagen oder in Vegetationsgebieten nennen, können nicht bestätigt werden. Meteoriten verbleiben infolge der hohen Fluggeschwindigkeit nur kurzzeitig in der Atmosphäre und verlieren während des Fluges deren geschmolzene Oberfläche (Ablation), wodurch ein vollständiges