



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Langzeitanalyse des Einflusses von Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf blitzbedingte Brände im Kernland der USA“

verfasst von

Jürgen Homm, B.Sc.

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (M.Sc.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Geographie

Betreuerin: Ao. Univ.-Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Embleton-Hamann für ihre sehr freundliche und fachlich kompetente Unterstützung als Betreuerin vorliegender Arbeit bedanken.

Ebenfalls bedanke ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden, durch die das Studium an der Universität und die Zeit in Wien stets eine große Freude war.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich bei meinem Studium immer unterstützt hat.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass die ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, 29. November 2013

Inhalt

1.	Einleitung	7
2.	Klimawandel – aktueller Stand der Wissenschaft	9
2.1	Begriffsbestimmung	9
2.1.1	Klima	9
2.1.2	Klimawandel	10
2.2	Klimasystem und Klimafaktoren.....	10
2.3	Natürliche Klimavariabilität vs. anthropogener Einfluss.....	13
2.3.1	Globale Klimaänderungen in der Erdgeschichte.....	14
2.3.2	Einfluss menschlicher Aktivitäten auf den Klimawandel	16
2.4	Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Zeitverlauf.....	16
2.4.1	Globale Änderungen seit der Aufzeichnung der Erdoberflächentemperatur ...	16
2.4.2	Klimaänderungen im 21. Jahrhundert.....	19
2.5	Treibhauseffekt.....	23
2.5.1	Treibhausgase.....	24
2.5.2	Treibhausgase und Klimaänderung.....	26
3.	Feuer	29
3.1	Gebrauch von Feuer	29
3.2	Brandverhalten und Temperaturen von Feuer	31
3.3	Typen von Bränden.....	33
3.4	Ursachen von Bränden	34
3.4.1	Natürliche Auslöser und deren Häufigkeiten.....	34
3.4.2	Anthropogene Einflüsse	37
3.5	Feuer im Ökosystem	39
3.5.1	Auswirkung auf Landschaft und Vegetation	39
3.5.2	Effekte auf Böden.....	40
3.5.3	Feuer und Tiere	41
3.6	Brandbekämpfung und der Gebrauch von „wildland fire“ in den USA.....	42
3.6.1	Allgemeines	42
3.6.2	Geschichte und Evolution des “wildland fire use“ in den USA	43
3.7	Feuerregime.....	53
3.7.1	Allgemeine Konzepte von Feuerregimen.....	53

3.7.2	Komponenten von Feuerregimen	54
3.7.3	Klassifizierung von Feuerregimen in den USA.....	55
3.7.4	Regionale Muster von Feuerregimen in den USA.....	57
3.7.5	Anthropogenbedingte Änderung von Feuerregimen	59
4.	Einfluss des Klimas auf Brandereignisse im Allgemeinen.....	62
4.1	Temperatur.....	62
4.2	Niederschlag und relative Feuchte.....	63
4.3	Wind.....	65
5.	Klimawandel und Brände in den USA	66
5.1	Untersuchungsgebiet.....	66
5.2	Aktueller Stand der Wissenschaft	68
5.2.1	Temperatur und Niederschlag	68
5.2.2	Brände	71
5.2.3	Blitze	73
5.3	Brandereignisse in den USA im Zeitraum 1980 - 2012.....	81
5.3.1	Datengrundlage.....	81
5.3.2	Methodik	82
5.3.3	Ergebnisse	84
5.4	Klimawandel in den USA.....	94
5.4.1	Datengrundlage.....	94
5.4.2	Methodik	95
5.4.3	Ergebnisse	97
5.5	Regionale Einflüsse des Klimas auf Brände in den USA.....	107
5.5.1	Kalifornien	108
5.5.2	Arizona.....	119
5.5.3	Idaho.....	130
5.6	Statistische Analyse	140
5.7	Diskussion	141
5.8	Klimawandel im 21. Jahrhundert und dessen Einfluss auf Brandaktivität	148
6.	Einfluss von Bränden auf das Klima	151
7.	Fazit	154
8.	Quellenverzeichnis.....	156

8.1	Literatur	156
8.2	Onlinequellen	159
8.3	Datenquellen	161
8.4	Abbildungsverzeichnis	161
8.5	Tabellenverzeichnis	171
Anhang.....		175

1. Einleitung

Feuer ist ein weltweites Phänomen, das in geologischen Aufzeichnungen, kurz nach dem Aufkommen terrestrischer Pflanzen, erscheint. Es beeinflusst globale Ökosystemmuster und -prozesse, darunter Vegetationszusammensetzung und -verteilung, den Kohlenstoffkreislauf und das Klima (vgl. Bowman et al., 2009: 481). Andersrum verändert der Klimawandel die geographische Verteilung von Bränden und die Brandaktivität (vgl. Krawchuk et al., 2009: 1).

Feuer stellen in den Wäldern der USA einen der größten Störfaktoren dar. Die Struktur und Zusammensetzung von Wäldern werden durch sogenannte Feuerregime beeinflusst. Diese bestehen wiederum aus verschiedenen Komponenten, die durch Mensch und Umweltveränderungen beeinflusst werden (vgl. Flannigan et al., 2000: 221).

Brände werden größtenteils von Menschen, sowohl absichtlich als auch unabsichtlich, verursacht. Erst 2013 gab es ein Feuer in den USA, welches mediale Beachtung bekam. Das sogenannte „Rim Fire“ wurde illegal durch einen Jäger ausgelöst und war das drittgrößte Feuer in der jüngsten US-Amerikanischen Geschichte (vgl. Cone, 2013 und Cal Fire, 2013). Zu den häufigsten natürlichen Brandursachen zählen Blitze. Die dadurch ausgelösten Brände stellen zudem die größte Gefahr für den Menschen dar, da sie plötzlich und in entfernt gelegenen Gegenden auftreten können (vgl. Flannigan et al., 2000: 222 f.). Im August 2012 trat beispielsweise das zweitgrößte Feuer in der jüngsten Geschichte der USA in Kalifornien auf. Dieses Feuer wurde durch einen Blitz ausgelöst (vgl. Cal Fire, 2013). Dies sind nur zwei Beispiele von einer Vielzahl an Bränden, die jährlich in den USA ausgelöst werden und nicht selten eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich deswegen der Analyse des Klimawandels in den USA, im Zeitraum 1980 bis 2012 und dessen Einfluss auf Brandereignisse. Zu Beginn der Arbeit werden die grundlegenden Klima- und Klimawandelprozesse auf der Erde besprochen. Des Weiteren wird ein allgemeiner Überblick über Feuer im historischen Kontext geliefert, sowie eine Darlegung der Eigenschaften von Bränden geboten. Dadurch soll dem Leser zunächst einen Überblick über die Thematik geboten werden und ihn mit dem nötigen Hintergrundwissen vertraut machen.

Anschließend wird der Einfluss des Klimas und des Klimawandels im Allgemeinen auf Brände untersucht. Darauf folgend wird untersucht, ob in den USA ein Einfluss des Klimawandels auf Brände im Zeitraum 1980 bis 2012 beobachtet werden konnte. Anhand ausgewählter Fallstudien werden zudem mögliche zukünftige Klimaänderungen und dessen Einflüsse auf Brandaktivität in den USA vorgestellt.

Zuletzt werden die Einflüsse von Bränden auf das Klima dargestellt und die draus entstehenden Folgen diskutiert.

Die forschungsleitenden Fragen vorliegender Arbeit lauten demnach:

- Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf Brände im Allgemeinen?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Temperaturänderungen und Bränden in den USA im Zeitraum 1980-2012?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen, aufgrund des Klimawandels veränderten, Niederschlagswerten und Bränden in den USA im Zeitraum 1980-2012?
- Inwiefern steigt oder sinkt die Brandgefahr in den USA im 21. Jahrhundert?
- Welche Auswirkungen haben Brände wiederum auf das Klima?

Aus diesen Fragen ergeben sich folgende Arbeitshypothesen:

- Es gibt einen Zusammenhang zwischen steigenden Temperaturen im Zuge des Klimawandels und einer erhöhten Anzahl an Bränden in den USA zwischen 1980 und 2012.
- Es gibt einen Zusammenhang zwischen verringerten Niederschlägen im Zuge des Klimawandels und einer erhöhten Anzahl an Bränden in den USA zwischen 1980 und 2012.
- Im Laufe des 21. Jahrhunderts werden die Brände in den USA weiter ansteigen.
- Brandemissionen verstärken den Klimawandel.

Im Zuge dieser Arbeit sollen obenstehende Fragen beantwortet und die Hypothesen bestätigt oder widerlegt werden.

2. Klimawandel – aktueller Stand der Wissenschaft

Die Grundlagen der aktuellen Klimawandelforschung werden im Wesentlichen durch drei Bereiche dargestellt. Der erste Bereich umfasst die instrumentellen Aufzeichnungen meteorologischer Bedingungen an der Erdoberfläche. Diese Aufzeichnungen stehen für die letzten 140 Jahre zur Verfügung. Des Weiteren gibt es für den Zeitraum der letzten 50 Jahre Aufzeichnungen atmosphärischer Kohlenstoffdioxidkonzentrationen. Die Aufzeichnungen bieten klar ersichtliche Beweise des Treibhauseffekts, des Anstiegs von Oberflächentemperaturen und weiterer Trends. Die räumliche und zeitliche Abdeckung instrumenteller Beobachtungen ist seit Mitte der 1950er Jahre erheblich erhöht worden, insbesondere seit dem Beginn von satellitengestützten Beobachtungsverfahren. Der zweite Forschungsbereich besteht aus paläoklimatischen Aufzeichnungen aus der Beobachtung von Baumringen, Eisbohrkernen und verschiedener anderer Techniken. Beobachtete Treibhausgaskonzentrationen und Temperaturwerte können in Kombination mit diesen Aufzeichnungen weit in die Vergangenheit rekonstruiert werden. Dadurch können z.B. Entwicklungen von Ökosystemen nachvollzogen werden. Kohlenstoffdioxid- und Methankonzentrationen sind in den letzten Jahrtausenden des Holozäns (vor etwa 10000 Jahre bis heute) angestiegen. In den vergangenen 420 Millionen Jahren gab es auf der Erde erhebliche Unterschiede der Treibhausgaskonzentrationen, des Klimas und der Feuerregime (siehe Kapitel 3.7). Der dritte Bereich ergibt sich aus der Interpretation komplexer Zusammenhänge. So ist es möglich, die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren, z.B. der Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, auf die gekoppelte Zirkulation und auf Energieflüsse der Erdatmosphäre und der Ozeane (auch allgemeine Zirkulation genannt) und wie diese wiederum Wetter und Klima beeinflussen, zu erklären. Somit können instrumentelle und paläoklimatische Beobachtungen mit anderen Informationsquellen kombiniert werden. Dadurch ergibt sich ein ganzheitliches Verständnis von vergangenem und gegenwärtigem Klima, momentanem Klimawandel und Projektionen möglicher weiterer Änderungen des Klimas im 21. Jahrhundert und darüber hinaus (vgl. Sommers et al., 2011: 6).

2.1 Begriffsbestimmung

2.1.1 Klima

Im engeren Sinne wird Klima im Allgemeinen als das durchschnittliche Wetter definiert. Genauer ausgedrückt wird darunter die statistische Beschreibung durchschnittlicher und variabler relevanter Quantitäten über einen bestimmten Zeitraum verstanden. Dieser Zeitraum kann sich zwischen Monaten und Millionen von Jahren bewegen. Als klassischen Zeitraum, um ein Klima zu definieren, wird ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren gewählt. Dieser wurde so von der „World Meteorological Organization“ festgelegt. Zu den relevanten Quan-

titäten gehören meistens Oberflächenvariablen wie Temperatur, Niederschlag und Wind. Im weiteren Sinne versteht man unter Klima den Status des Klimasystems, inklusive statistischer Beschreibungen (vgl. IPCC, 2007^a: 942).

Bei der Betrachtung des Klimas auf nationaler Ebene ist es wichtig zu verstehen, dass dieses auf lokale, regionale und globale Faktoren reagiert. Demnach variiert das Klima auf nationaler Ebene mehr als das durchschnittliche Klima auf globaler Ebene. In manchen Teilen der Erde gab es im erdgeschichtlichen Verlauf besonders heiße oder kalte Perioden, die jedoch nicht überall auf der Erde präsent waren. Die Erwärmung die in vergangenen Jahrzehnten stattfand kann aber auf globaler Maßstabsebene verfolgt werden – demnach auch der Begriff „globale Erwärmung“. Des Weiteren sollte festgehalten werden, dass es bezüglich des Wetters und Klimamustern sowohl auf nationaler als auch globaler Ebene jährliche Unterschiede geben kann, welche nicht dem Langzeittrend entsprechen. Nicht jedes Jahr ist also wärmer als das vorangegangene, obwohl sich der Trend der Erwärmung fortsetzt (vgl. Karl et al., 2009: 27).

2.1.2 Klimawandel

„Climate change refers to a change in the state of the climate that can be identified (e.g., by using statistical tests) by changes in the mean and/or the variability of its properties, and that persists for an extended period, typically decades or longer. Climate change may be due to natural internal processes or external forcings, or to persistent anthropogenic changes in the composition of the atmosphere or in land use“ (IPCC, 2007: 943). Die „United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)“ (1992: 3) geht einen Schritt weiter und bezeichnet als Klimawandel den Wandel des Klimas, der direkt oder indirekt auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist, die die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern. Die UNFCCC unterscheidet also zwischen Klimawandel der auf menschliche Einwirkungen zurückzuführen ist und zwischen Klimavariabilität, die natürlichen Ursachen zu Grunde liegt (vgl. IPCC 2007^a: 943).

2.2 Klimasystem und Klimafaktoren

Das Klimasystem ist ein komplexes, interaktives System, welches sich aus der Atmosphäre, der Landoberfläche, Schnee und Eis, den Ozeanen und anderen Gewässern, sowie Lebewesen zusammensetzt. Die Atmosphäre ist dabei der wichtigste Bestandteil, der das Klima charakterisiert. Das Klimasystem entwickelt sich mit der Zeit aus seinen eigenen internen Dynamiken und aus externen Einflussfaktoren. Zu diesen Einflussfaktoren gehören sowohl natürliche Phänomene, wie z.B. vulkanische Eruptionen, als auch anthropogen bedingte Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung. Die Solarstrahlung versorgt das Klimasystem mit Energie. Die Strahlungsbilanz der Erde kann im Wesentlichen auf drei Arten beein-

flusst werden: Durch Änderungen der eingehenden Solarstrahlung (z.B. durch Veränderungen des Erdbits oder der Sonne selbst), durch Änderungen des Anteils der reflektierten Solarstrahlung (=Albedo; z.B. durch Änderungen der Wolkenbedeckung oder der Vegetation) oder durch Änderungen der reflektierten langwelligen Strahlung von der Erde ins Weltall (z.B. durch Änderungen der Treibhausgaskonzentrationen). Das Klima reagiert auf solche Änderungen direkt oder indirekt durch eine Reihe von Rückkoppelungsmechanismen (vgl. IPCC, 2007^a: 96).

Eine, der Sonne zugewandte Fläche der oberen Erdatmosphäre von einem Quadratmeter empfängt tagsüber pro Sekunde etwa 1370 W Energie. Über den ganzen Planeten gemittelt, beträgt diese Energiemenge pro Quadratmeter und Sekunde etwa ein Viertel davon. Etwa 30 % des Sonnenlichtes, das die obere Atmosphäre erreicht, wird zurück ins Weltall reflektiert. Rund zwei Drittel dieser Reflektion ist auf Wolken und kleine Teilchen in der Atmosphäre (=Aerosole) zurückzuführen. Das letzte Drittel des Sonnenlichts wird von hellen Bereichen der Erde (hauptsächlich Schnee, Eis und Wüste) reflektiert. Aerosol bedingte Reflektion ist besonders hoch, wenn vulkanische Eruptionen Material hoch in die Atmosphäre ausstoßen. Regen wäscht normalerweise Aerosole in ein bis zwei Wochen aus der Atmosphäre aus. Werden jedoch Partikel einer vulkanischen Eruption weit über die höchste Wolke ausgestoßen, können diese Aerosole das Klima ein bis zwei Jahre lang beeinflussen, bevor sie wieder in die Troposphäre zurückgelangen und über Niederschlag wieder auf die Erdoberfläche geraten. Demnach können große Vulkanausbrüche zu einem Absenken der globalen Oberflächentemperatur um etwa 0,5 °C führen, was einige Monate bis sogar Jahre anhalten kann (vgl. IPCC, 2007^a: 96 f.).

Energie die nicht ins Weltall reflektiert wird, wird von der Erdoberfläche und der Atmosphäre absorbiert (etwa 240 W/m²). Um die eingehende Energie auszugleichen, muss die Erde etwa die gleiche Menge an Energie wieder abgeben. Dies geschieht durch die Emission von langwelliger Strahlung. Jedes Objekt auf der Erde emittiert kontinuierlich langwellige Strahlung. Je wärmer ein Objekt, desto mehr Wärmeenergie gibt es ab. Um eine Menge von 240 W/m² abzugeben, müsste die Oberfläche des Objekts etwa -19 °C haben. Die eigentliche Erdoberflächentemperatur ist jedoch um einiges wärmer (im globalen Mittel: ca. 14 °C). Die nötigen -19 °C befinden sich in einer Höhe von fünf Kilometern oberhalb der Erdoberfläche (vgl. IPCC, 2007^a: 97).

Die Erdoberfläche ist aufgrund von Treibhausgasen so warm. Diese wirken wie eine Art Decke für die emittierende langwellige Strahlung. Dies wird auch als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet. Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid. Die Hauptbestandteile der Atmosphäre (Stickstoff und Sauerstoff) haben einen solchen Effekt nicht. Wolken hingegen haben einen solch ähnlichen Effekt. Dieser wird jedoch durch ihre Reflektivität ausgeglichen, sodass Wolken im Schnitt eher einen kühlenden Effekt auf

das Klima haben. Der Treibhauseffekt wird durch menschliche Aktivitäten intensiviert, da diese Treibhausgase freigegeben. Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre hat beispielsweise seit der Industrialisierung um etwa 35 % zugenommen. Dieser Anstieg ist auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen (v.a. durch Gebrauch fossiler Brennstoffe und Abholzung von Wäldern). Die Menschheit hat also die chemische Zusammensetzung der Erdatmosphäre mit einer nachhaltigen Einwirkung auf das Klima drastisch verändert (vgl. IPCC, 2007^a: 97).

In den Tropen kommt mehr Solarenergie an, als in höheren Breitengraden, da hier die Sonnenstrahlen in einem geringeren Winkel einfallen. Von äquatorialen Bereichen wird Energie über atmosphärische und ozeanische Zirkulationen in höhere Breitengrade transportiert. Um Wasser von der Meeres- oder Landoberfläche zu verdunsten wird ebenfalls Energie benötigt. Diese Energie wird latente Wärme genannt und wird freigesetzt wenn Wasserdampf in Wolken kondensiert (siehe Abbildung 1). Die atmosphärische Zirkulation wird primär durch die Freisetzung latenter Wärme angetrieben. Durch die Aktivität von Winden an der Meeresoberfläche treibt die atmosphärische Zirkulation wiederum die ozeanische Zirkulation an. Desweiteren wird die ozeanische Zirkulation durch Änderungen der Meeresoberflächentemperatur und des Salzgehalts aufgrund von Niederschlag und Verdunstung angetrieben (vgl. IPCC, 2007^a: 97).

Bedingt durch die Rotation der Erde folgen die atmosphärischen Zirkulationsmuster eher einer Ost-West- als einer Nord-Süd-Ausrichtung. Die Westwindzonen der mittleren Breiten weisen ausgedehnte Wettersysteme auf, die Wärme zu den Polen hin transportieren. Diese Wettersysteme sind die wandernden Tief- und Hochdrucksysteme, mit denen die Kalt- und Warmfronten verbunden sind. Aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Land und Ozean und natürlicher Barrieren, wie Gebirgszügen und Eisschilden, sind die planetaren atmosphärischen Wellen des Zirkulationssystems tendenziell an Kontinenten und Gebirgszügen verankert. Wegen dieser Wellenmuster kann es z.B. zu einem besonders kalten Winter in Nordamerika kommen, während es in anderen Teilen der Hemisphäre hingegen zu einem besonders warmen Winter kommen kann. Änderungen verschiedener Aspekte des Klimasystems, wie die Größe der Eiskappen, Vegetationstyp und -verteilung oder die Temperatur der Atmosphäre oder Ozeane beeinflussen die Eigenschaften der großräumigen Zirkulationsmuster der Atmosphäre und der Ozeane (vgl. IPCC, 2007^a: 97).

Eine Reihe von Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem können eine Änderung im Antrieb des Klimas entweder verstärken (positive Rückkopplung) oder abschwächen (negative Rückkopplung). Ein Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen führt beispielsweise zu einer Erwärmung des Klimas, woraufhin Schnee und Eis schmelzen. Dadurch kommen dunklere Oberflächen und Wasseroberflächen mit einer geringeren Albedo zum Vorschein, die die Sonnenwärme absorbieren. Das bedingt eine weitere Erwärmung welche wiederum zu weiterem Abschmelzen von Schnee und Eis führt. Diese Rückkopplungsschleife ist als „Eis-

Albedo-Rückkopplung“ bekannt. Sie verstärkt die ursprüngliche Erwärmung, die durch steigende Treibhausgaskonzentrationen verursacht wurde. Demnach ist es besonders wichtig, solche Klimarückkopplungen zu erkennen, zu verstehen und genau zu quantifizieren, um die Komplexität des Erdklimasystems zu verstehen (vgl. IPCC, 2007^a: 97).

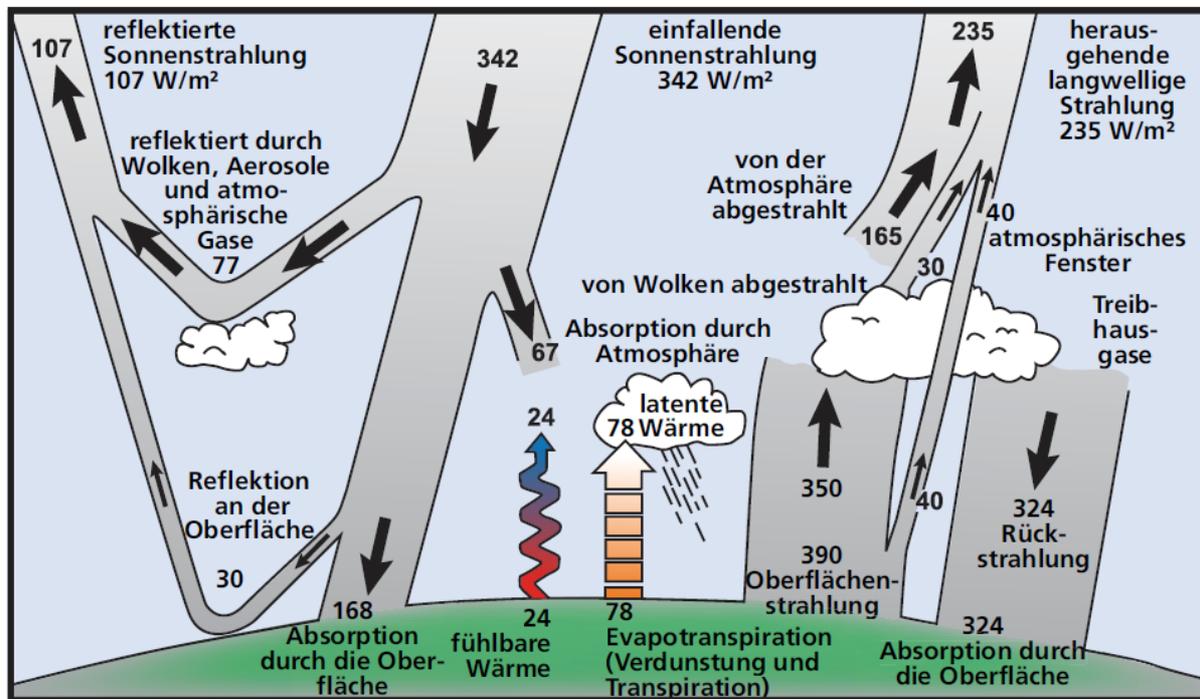


Abbildung 1: Abschätzung der jährlich und global gemittelten Energiebilanz der Erde (Quelle: IPCC, 2007^f: 4)

2.3 Natürliche Klimavariabilität vs. anthropogener Einfluss

Bei der Betrachtung des Klimawandels stellt sich immer die Frage, ob dieser auf menschliche Einflüsse zurückzuführen ist oder doch nur einer natürlichen Klimavariabilität unterliegt. Diese Frage wird im folgenden Kapitel behandelt.

Die Erde existiert seit etwa 4,6 Milliarden Jahren und verändert sich seitdem ständig. Dabei ändert sich auch das Klima in unterschiedlicher Art und aus unterschiedlichen Gründen. Die gesamte Menschheit, sowie die Biosphäre sind von günstigen Klimabedingungen abhängig. Somit haben Klimaänderungen ökologische, soziologische wie auch ökonomische Folgen, die sehr tiefgreifend sein können. Seit der neolithischen Revolution, besonders aber seit dem Beginn des Industriezeitalters, greifen Menschen in das Klima ein und sind somit zu einem weiteren Klimafaktor geworden. Das Klima und seine Veränderungen in der Vergangenheit lassen sich anhand verschiedener Informationsquellen untersuchen: direkt gewonnene Messdaten (instrumentelle Periode), Informationen aus historischen Quellen, die direkte und indirekte Rückschlüsse auf das Klima erlauben (historische Periode) und indirekte Rekonstruktionen anhand paläoklimatischer Methoden (paläoklimatologische Periode). Direkte Messdaten gibt es regional seit etwa 350 Jahren (Temperaturmessungen in England seit ca.

1659), global aber erst seit ca. 1850/60. Historische Daten reichen etwa 5000 Jahre zurück (Höhlenmalereien in Nordafrika). Paläoklimatologische Daten können hingegen aus den ältesten Sedimenten abgeleitet werden (ca. 3,8 Milliarden Jahre) (vgl. Schönwiese, 2007: 246 f.).

2.3.1 Globale Klimaänderungen in der Erdgeschichte

Im Folgenden wird kurz dargestellt, wie sich das Klima der Erde im Zeitverlauf verändert hat, ehe es im Industriezeitalter verstärkt zu anthropogenen Einflüssen kam. „Ausgehend von der Frühzeit der Erde hat zunächst eine markante Abkühlung stattgefunden, bis vor zirka 1 bis 2 Milliarden Jahren in etwa das heutige Temperaturniveau erreicht war, das derzeit mit einer global gemittelten bodennahen Lufttemperatur von zirka 15°C angegeben wird“ (Schönwiese, 2007: 247). Abbildung 2 zeigt einen Überblick der mittleren Variationen der bodennahen Lufttemperatur der Nordhemisphäre für verschiedene Zeitabschnitte. Man erkennt einen Wechsel von relativ kalten Epochen der Eiszeitalter von einigen Millionen Jahren und längeren, deutlich wärmeren Epochen (vgl. Schönwiese, 2007: 247 f.).

Innerhalb der Eiszeitalter gibt es ebenfalls einen Wechsel zwischen Kaltzeiten bzw. Eiszeiten (Glazialen) und Warmzeiten (Interglazialen). Diese unterscheiden sich am auffälligsten durch die variierende Eisbedeckung der Erdoberfläche. „Während frühere Epochen, zuletzt die Würm-Kaltzeit bzw. –Eiszeit, die bis ungefähr 11 000 Jahre vor heute andauert hat, sehr wahrscheinlich durch eine ausgeprägte Klimavariabilität gekennzeichnet waren, ist die nachfolgende Warmzeit – genannt Neo-Warmzeit, Postglazial oder Holozän -, in der wir leben, bisher relativ stabil gewesen, was die kulturelle Entwicklung der Menschheit sicherlich begünstigt hat“ (vgl. Schönwiese, 2007: 249).

In den vergangenen ein bis zwei Jahrtausenden ist ein Abkühlungstrend zu erkennen. Dieser wird nach diversen Klimamodellierungen in die nächste Kaltzeit (Eiszeit der Zukunft, Prägla-zial) führen, mit einem Tiefpunkt in etwa 60 000 Jahren. Eiszeitähnliche Bedingungen sind jedoch schon in einigen Jahrtausenden zu erwarten. Obwohl die bodennahe Lufttemperatur der letzten Jahrtausende aus paläoklimatologischer Sicht eines der am verlässlichsten rekonstruierbaren Klimaelemente ist, bestehen dennoch quantitative Unsicherheiten, woraus sich für das letzte Jahrtausend mehrere Alternativen ergeben. Das sogenannte Mittelalterliche Klimaoptimum, dessen Höhepunkte vermutlich 900, 1000, 1100 und 1400 n.Chr. waren, war zumindest regional ähnlich warm oder wärmer als das heutige Klima (vgl. Schönwiese, 2007: 249).

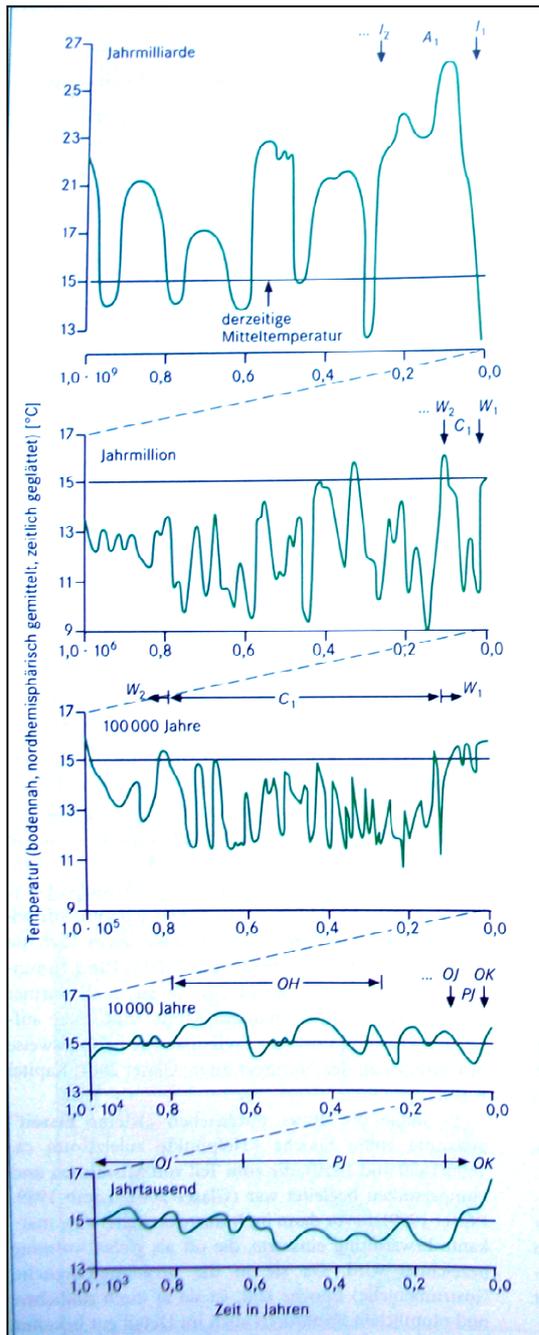


Abbildung 2: Änderung der gemittelten bodennahen Lufttemperatur der Nordhemisphäre in der letzten Jahrmilliarde, der letzten Jahrmillion, der letzten 100 000 Jahre, der letzten 10 000 Jahre und des letzten Jahrtausends; Abkürzungen: I_1 = Quartäres Eiszeitalter; A_1 = akryogenes Warmklima; W_1 = Neo-Warmzeit (Holozän, „postglazial“); C_1 = Würm-Kaltzeit; W_2 = Eem-Warmzeit (interglazial); OK = modernes „Optimum“; PJ = Kleine „Eiszeit“; OJ = Mittelalterliches „Optimum“; OH = Holozänes „Optimum“ (Quelle: Schönwiese, 2007: 247)

Auf dieses Zeitalter folgte die „Kleine Eiszeit“ (Tiefpunkte etwa 1600/1650 und 1850). In dieser Zeit gab es teilweise Missernten und Hungersnöte. Im Industriezeitalter kam es zu einer markanten Erwärmung („global warming“). Diese Epoche wurde sowohl zeitlich als auch räumlich gut aufgezeichnet und besitzt somit ein geringeres Unsicherheitsmaß als die indirekten Rekonstruktionen. In dieser Epoche sind zudem Daten über weitere Klimaelemente (z.B. Niederschlag) verfügbar. Die globale Lufttemperatur hat seit 1850 um etwa $0,6^\circ\text{C}$ zugenommen. „Dieser Trend ist, wie bei jeder klimatologischen Zeitreihe, jedoch von Fluktuationen und Anomalien überlagert, sodass die wesentliche Erwärmung in die Zeit 1907 bis 1944 und seit 1976 fällt“ (Schönwiese, 2007: 251). Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass sich räumliche Klimaänderungsstrukturen von Zeitintervall zu Zeitintervall und Jahreszeit zu Jahreszeit ändern und sich somit ein insgesamt recht komplexes Bild ergibt (vgl. Schönwiese, 2007: 249 ff.).

2.3.2 Einfluss menschlicher Aktivitäten auf den Klimawandel

Menschliche Aktivitäten beeinflussen Treibhausgaskonzentrationen, die Menge an Aerosolen und die Bewölkung der Erdatmosphäre und tragen auf diese Weise zum Klimawandel bei. Der größte bekannte Beitrag stammt vom Verbrennen fossiler Brennstoffe, wodurch Kohlenstoffdioxidgase in die Atmosphäre freigesetzt werden. Treibhausgase und Aerosole verändern die einfallende Solarstrahlung und die abgestrahlte Infrarotstrahlung, die Teile der Energiebilanz der Erde sind. Durch Änderungen der Menge oder Eigenschaften dieser Gase und Partikel kann es zu einer Erwärmung oder Abkühlung des Klimasystems kommen. Seit dem Beginn des Industriezeitalters (etwa im Jahre 1850), haben alle menschlichen Handlungen im Allgemeinen zu einer Erwärmung des Klimas geführt. Zudem überschreitet der menschliche Einfluss bei weitem den, der natürlichen Prozesse (z.B. vulkanische Eruptionen) (vgl. IPCC, 2007^a: 2 ff.).

2.4 Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Zeitverlauf

2.4.1 Globale Änderungen seit der Aufzeichnung der Erdoberflächentemperatur

Elf der zwölf wärmsten Jahre seit dem Beginn der Aufzeichnungen der Erdoberflächentemperatur (1850) lagen im Zeitraum zwischen 1995 und 2006. Der hundertjährige lineare Trend (1906 bis 2005) liegt bei +0,74 °C. Der lineare Erwärmungstrend der letzten 50 Jahre liegt bei 0,13 °C pro Dekade. Der gesamte Temperaturanstieg von 1850 - 1899 bis 2001 - 2005 liegt bei 0,76 °C (Abbildung 3 bis Abbildung 5) (vgl. IPCC^a, 2007: 5).

Des Weiteren nahm der durchschnittliche atmosphärische Wasserdampfgehalt seit etwa den 1980ern über Land, Ozeanen und der oberen Troposphäre zu (vgl. IPCC^a, 2007: 5).

Zwischen 1900 und 2005 wurde ein Anstieg des Niederschlags in östlichen Teilen Nord- und Südamerikas, Nordeuropas sowie Nord- und Zentralasiens festgestellt. Ein Rückgang des Niederschlags wurden im Sahel, im Mittelmeerraum, Südafrika und Teilen Südasiens beobachtet. Niederschlag ist jedoch räumlich und zeitlich sehr variabel (Abbildung 6) (vgl. IPCC^a, 2007: 7).

Seit den 1970er Jahren konnten vor allem in größeren Gebieten der Tropen und Subtropen intensivere und länger anhaltende Dürren festgestellt werden. Eine zunehmende Austrocknung zusammen mit einem verringerten Niederschlag hat zu diesen Veränderungen der Dürren beigetragen (vgl. IPCC^a, 2007: 8).

Über den meisten Landflächen hat zudem die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen zugenommen, welche wiederum in Verbindung mit der Erwärmung und der Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs stehen.

In den letzten 50 Jahren kam es zudem zu Änderungen von Temperaturextremen. Demnach nahm die Anzahl an kalten Tagen, kalten Nächten und Frosttagen ab, die Anzahl heißer Tage, heißer Nächte und Hitzewellen nahm zu (vgl. IPCC^a, 2007: 8).

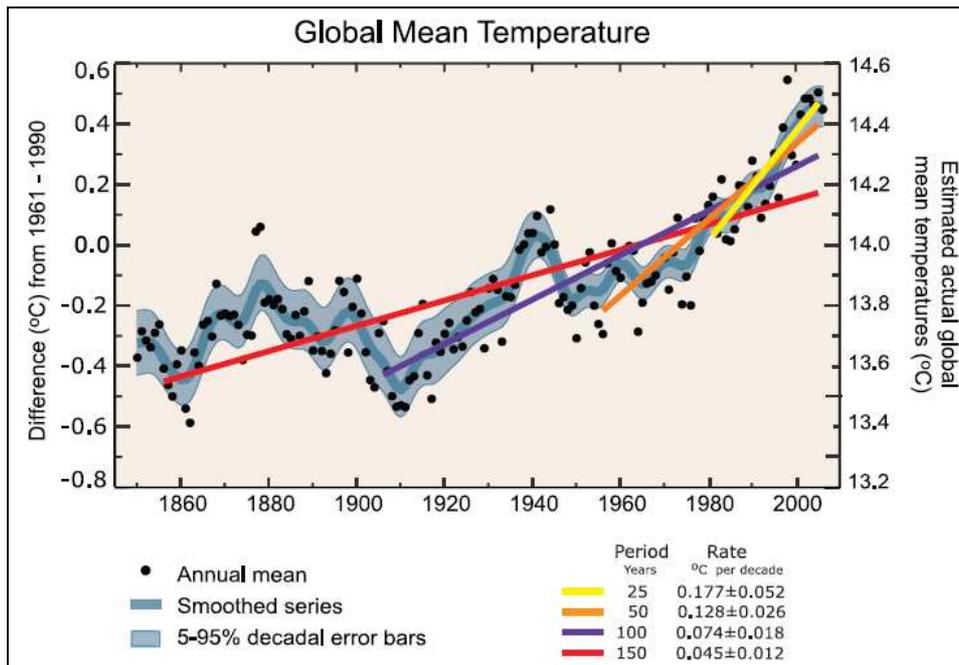


Abbildung 3: Beobachtete jährliche globale Durchschnittstemperatur (schwarze Punkte). Die linke y-Achse gibt Temperatur-anomalien im Vergleich zur mittleren Temperatur des Zeitraumes 1961-1990 an. Die rechte y-Achse gibt die berechneten eigentlichen Temperaturwerte an. Zudem wird der lineare Trend der letzten 25 (gelbe Linie), 50 (orange Linie), 100 (lila Linie) und 150 Jahre (rote Linie) relativ zum Bezugszeitraum 1981-2005, 1956-2005, 1906-2005 und 1856-2005 dargestellt. Wie man sehen kann ist die Neigung der Linie für die kürzeren jüngsten Zeiträume steiler. Dies deutet auf eine beschleunigte Erwärmung hin. Die blaue Kurve gibt eine geglättete Darstellung der Temperaturänderung wieder. Modelle deuten an, dass es bis etwa 1915 nur geringe Temperaturänderungen gab. Ein Großteil der Änderungen im frühen 20. Jahrhundert ist auf natürliche Einflüsse zurückzuführen (Änderungen der Solarstrahlung, vulkanische Aktivitäten und natürliche Variabilität). Die steigende Industrialisierung zwischen etwa 1940 und 1970 und der Zweite Weltkrieg erhöhten die Verschmutzung in der Nordhemisphäre, was zunächst zu einer Abkühlung führte. Die ansteigenden Kohlenstoffdioxid- und andere Treibhausgas-konzentrationen führten dann etwa ab Mitte der 1970er zu einer Erwärmung (Quelle: IPCC, 2007^a: 253).

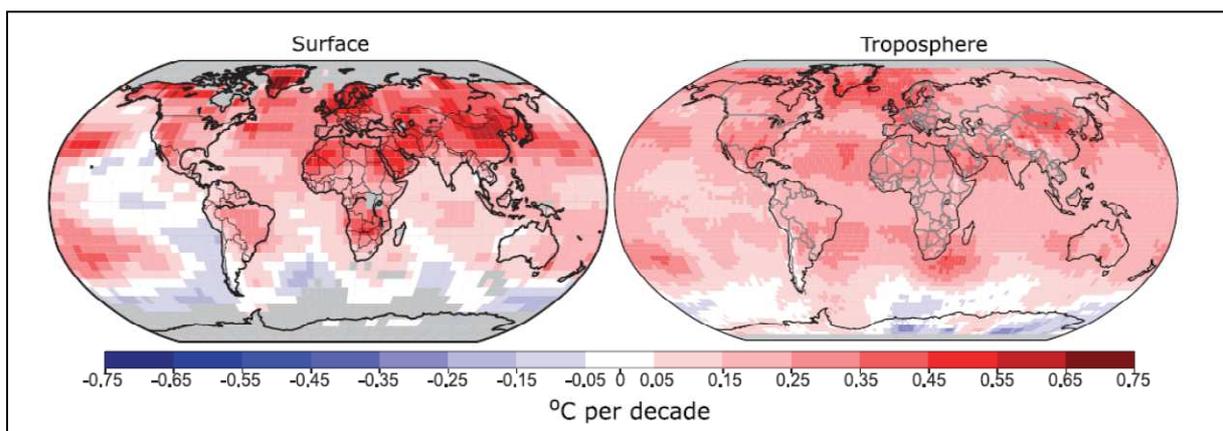


Abbildung 4: Lineare globale Temperaturtrends 1979 – 2005 an der Erdoberfläche (links) und in der Troposphäre in 10 km Höhe (rechts). Die grauen Bereiche deuten auf fehlende Daten hin. Wie zu sehen ist, zeigt die Troposphäre eine einheitlichere Erwärmung. Bei der Änderung der Erdoberflächentemperatur ist über den Landmassen ein deutlicher Anstieg zu sehen (Quelle: IPCC, 2007^a: 253).

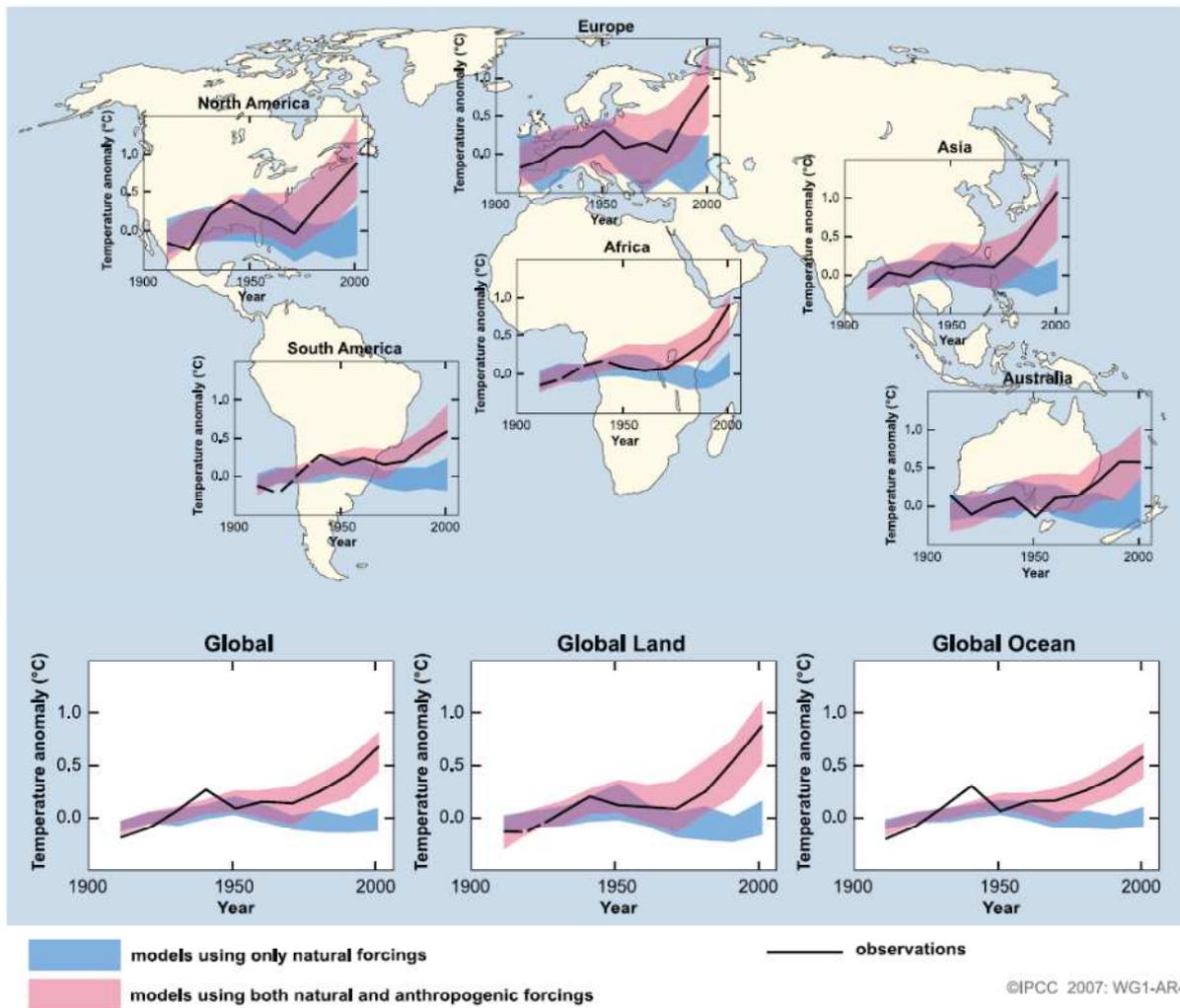


Abbildung 5: „Vergleich der beobachteten Änderungen der Erdoberflächentemperatur auf kontinentaler und globaler Skala mit den von Klimamodellen auf Grund natürlicher und anthropogener Antriebe berechneten Resultaten. Die Jahrzehnt-Mittel der Beobachtungen sind für den Zeitraum 1906–2005 (schwarze Linie) im Zentrum des Jahrzehnts und relativ zum entsprechenden Mittel von 1901–1950 eingezeichnet. Die Linien sind gestrichelt, wenn die räumliche Abdeckung weniger als 50% beträgt. Blau schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 19 Simulationen von 5 Klimamodellen, welche nur die natürlichen Antriebe durch Sonnenaktivität und Vulkane berücksichtigen. Rot schattierte Bänder zeigen die 5–95%-Bandbreite für 58 Simulationen von 14 Klimamodellen unter Verwendung sowohl der natürlichen als auch der anthropogenen Antriebe“ (IPCC, 2007^b: 11) (Quelle: IPCC, 2007^b: 11)

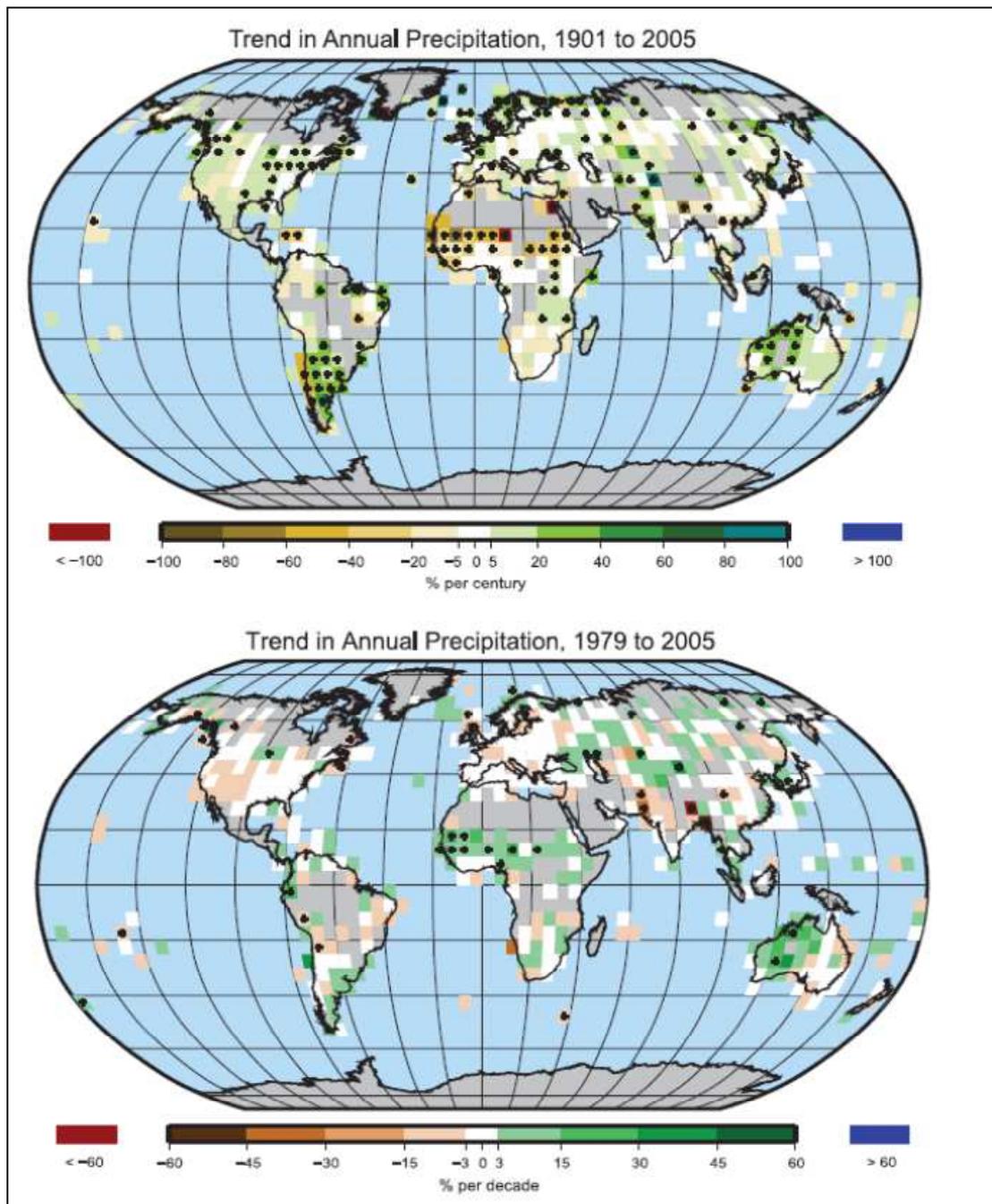


Abbildung 6: Trend der jährlichen Landniederschlagsmengen für den Zeitraum 1901 bis 2005 (oben, % pro Jahrhundert) und 1979 bis 2005 (unten, % pro Jahrzehnt). Der prozentuale Anteil wurde auf der Basis des Mittelwertes des Zeitraums 1961-1990 berechnet (IPCC, 2007²: 256).

2.4.2 Klimaänderungen im 21. Jahrhundert

Der erste IPCC Sachstandsbericht von 1990 sagte einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 0,15°C bis 0,3°C für den Zeitraum 1990 bis 2005 voraus. Mittlerweile gibt es beobachtete Werte für diesen Zeitraum, welche bei 0,2°C lagen. Dadurch wird das Vertrauen in solche kurzfristigen Projektionen gestärkt (vgl. IPCC^a, 2007: 12).

Modelle zeigen, dass selbst wenn alle Strahlungsantriebsfaktoren im Jahre 2000 auf dem gleichen Niveau geblieben wären, dennoch ein Erwärmungstrend von 0,1 °C pro Dekade in

den folgenden beiden Jahrzehnten stattfinden würde. Dies ist hauptsächlich auf die langsame Reaktion der Ozeane zurückzuführen. Die Erwärmung wäre etwa doppelt so hoch (0,2 °C pro Dekade), wenn die Emissionen einem der Emissionsszenarien entsprechen würden (vgl. IPCC^a, 2007: 12).

Treibhausgaskonzentrationen mit der gleichen oder einer höheren Rate, wie sie momentan zu beobachten sind, würden zu einer weiteren Erwärmung führen und viele Änderungen des globalen Klimasystems während des 21. Jahrhunderts hervorrufen, die sehr wahrscheinlich noch größer wären, als die des 20. Jahrhunderts. Würden die Emissionen innerhalb der Bandbreite der SRES-Szenarien liegen, wäre eine Erwärmung von etwa 0,2 °C pro Jahrzehnt möglich (vgl. IPCC^a, 2007: 12). *„Die besten Schätzwerte der Modellprojektionen weisen darauf hin, dass die über ein Jahrzehnt gemittelte Erwärmung bis 2030 auf allen bewohnten Kontinenten nicht von der Wahl des SRES-Szenarios abhängig ist. Sie wird sehr wahrscheinlich mindestens doppelt so groß wie die von den Modellen geschätzte natürliche Schwankung während des 20. Jahrhundert sein“* (IPCC, 2007^b: 13).

Dank Fortschritten in der Modellierung von Klimaänderungen sind sehr gute Schätzungen und Angaben über *wahrscheinliche* Unsicherheitsbereiche für projizierte Erwärmungen verschiedener Szenarien möglich. Tabelle 1 zeigt die projizierten durchschnittlichen globalen Oberflächenerwärmungen für das Ende des 21. Jahrhunderts (d.h. 2090 – 2099) im Vergleich zum Zeitraum 1980 – 1999. Abbildung 7 zeigt zudem die Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche (vgl. IPCC^a, 2007: 13).

Auf Abbildung 8 sind die projizierten Änderungen der Erdoberflächentemperatur für das frühe und späte 21. Jahrhundert im Vergleich zum Zeitraum 1980-1999 zu sehen. Die Grafiken in der Mitte und rechts zeigen die Multimodell-Mittel-Projektionen für das B1-, A1B- und A2-Emissionsszenario. Die links abgebildeten Grafiken zeigen die entsprechenden Unsicherheiten als relative Wahrscheinlichkeiten der geschätzten mittleren globalen Erwärmung aus verschiedenen Studien für die gleichen Zeiträume (vgl. IPCC^a, 2007: 15).

Tabelle 1: „Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts“ (IPCC, 2007^b: 13) (Quelle: IPCC, 2007^b: 13)

Fall	Temperaturänderung (°C; 2090–2099 verglichen mit 1980–1999) ^a	
	Beste Schätzung	Wahrscheinliche Bandbreite
Konstante Jahr-2000-Konzentrationen ^b	0.6	0.3 – 0.9
B1-Szenario	1.8	1.1 – 2.9
A1T-Szenario	2.4	1.4 – 3.8
B2-Szenario	2.4	1.4 – 3.8
A1B-Szenario	2.8	1.7 – 4.4
A2-Szenario	3.4	2.0 – 5.4
A1FI-Szenario	4.0	2.4 – 6.4

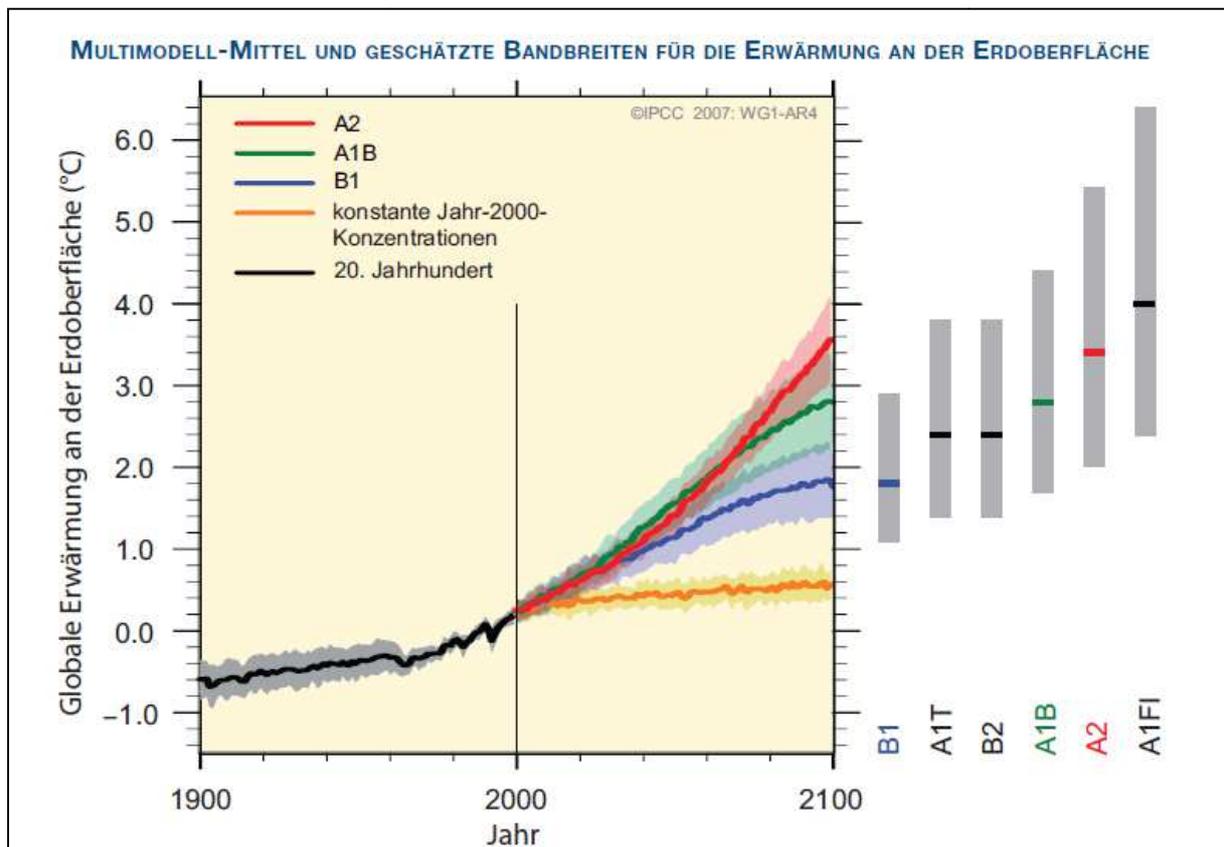


Abbildung 7: Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche. Die durchgezogenen Linien stellen die globale Multimodell-Mittel der Erwärmung an der Erdoberfläche für die Szenarien A2, A1B und B1 dar. Diese werden als Verlängerungen der Simulationen für das 20. Jahrhundert dargestellt. Die Schattierung gibt die Bandbreite einer Standardabweichung der einzelnen Modell-Jahresmittel an. Die orangene Linie zeigt das Ergebnis des Experiments an, bei dem die Konzentrationen auf den besten Werten des Jahres 2000 konstant gehalten wurden. Die durchgezogene Linie innerhalb der grauen Balken zeigen die besten Schätzungen an. Die grauen Balken geben die abgeschätzte wahrscheinliche Bandbreite der sechs SRES-Szenarien wieder (Quelle: IPCC, 2007^b: 14)

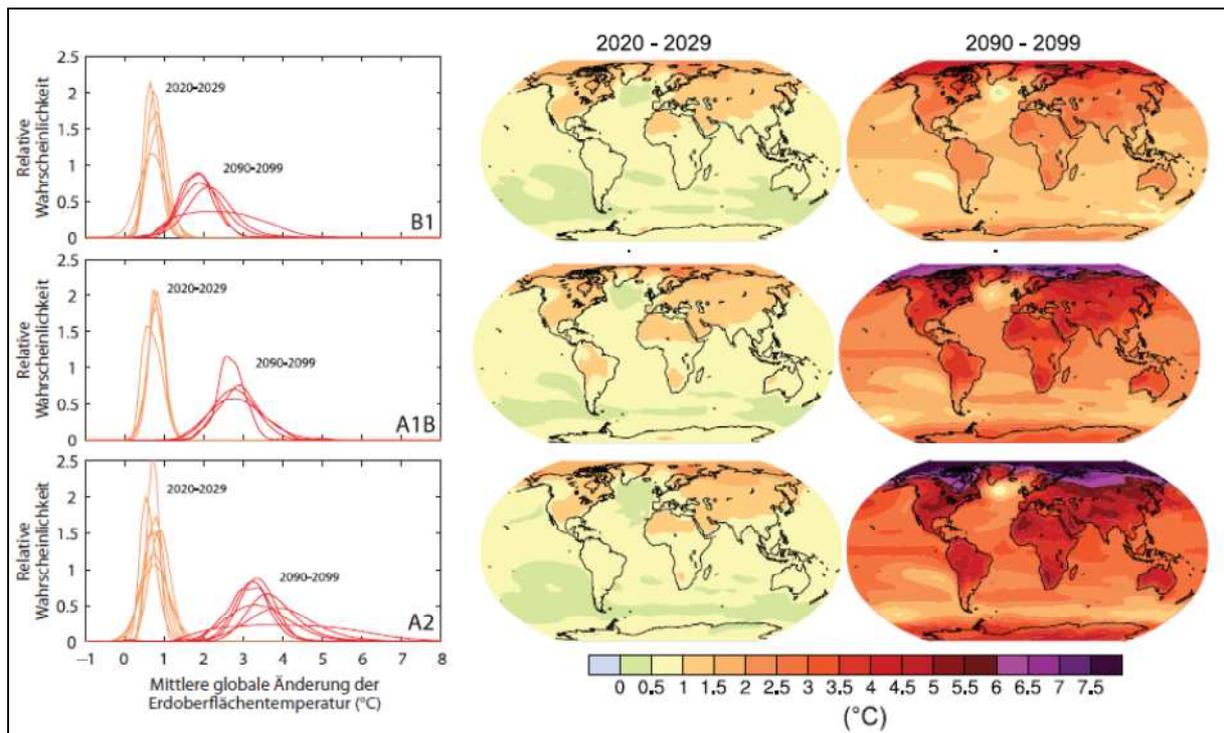


Abbildung 8: Modellprojektionen der Erdoberflächentemperatur (Quelle: IPCC, 2007^b: 15)

Eine Erwärmung führt tendenziell zu einer verringerten Aufnahme atmosphärischen Kohlenstoffdioxids durch Land und Ozeane. Dadurch erhöht sich der Anteil anthropogener Emissionen, die in der Atmosphäre verweilen (vgl. IPCC^a, 2007: 13).

Die projizierte Erwärmung im 21. Jahrhundert zeigt geographische Muster die ähnlich der der letzten Dekaden sind. Das heißt, es wird erwartet, dass die Erwärmung über Landflächen und in den meisten Regionen der nördlichen Breiten am höchsten ist. Über den südlichen ozeanischen Regionen und Teilen des Nordatlantischen Ozeans, werden die geringsten Veränderungen erwartet (vgl. IPCC^a, 2007: 15).

Sehr wahrscheinlich kommt es zu einer Häufung heißer Extreme, Hitzewellen und Starkniederschlägen (vgl. IPCC^a, 2007: 15).

Basierend auf einer Reihe von Modellen, ist es *wahrscheinlich*, dass zukünftige tropische Zyklone (Taifune und Hurrikane) stärker werden (d.h. höhere Spitzenwindgeschwindigkeiten, mehr Starkniederschläge und eine Erhöhung der tropischen Meeresoberflächentemperaturen) (vgl. IPCC^a, 2007: 15).

In hohen Breitengraden kommt es *sehr wahrscheinlich* zu einer Zunahme der Niederschlagsmenge. In den meisten subtropischen Landregionen kommt es hingegen wahrscheinlich zu einer Abnahme des Niederschlags. Abbildung 9 zeigt die relativen Änderungen der Niederschläge in % für den Zeitraum 2090-2099 im Vergleich zu 1980-1999. Bei den Werten handelt es sich um Multimodell-Mittel auf der Basis des A1B-Szenarios für Dezember bis Februar (links) und Juni bis August (rechts). Für die weißen Flächen stimmten bezüglich des Vorzeichens der Änderung weniger als 66% der Modelle überein. Bei den

punktierten Flächen stimmten über 90% der Modelle bezüglich des Vorzeichens der Änderungen überein (nach IPCC^a, 2007: 16).

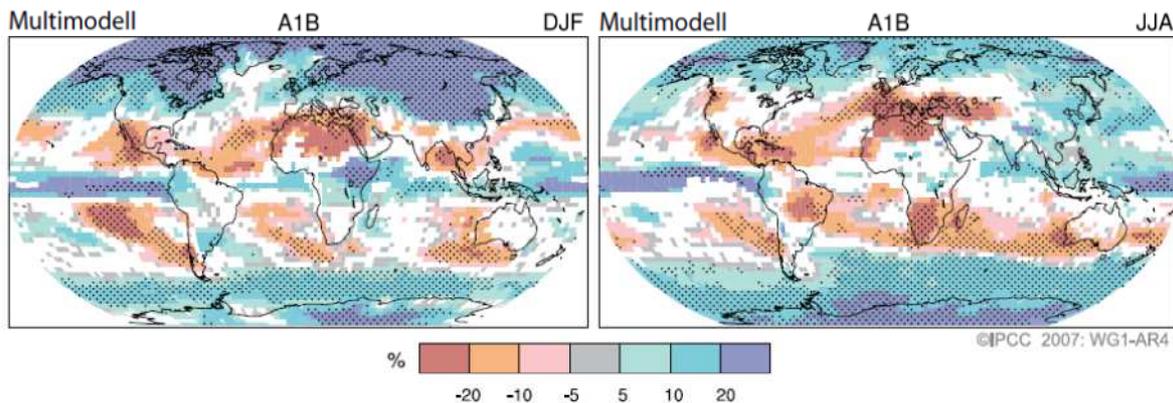


Abbildung 9: Projizierte Änderungsmuster der Niederschläge für den Zeitraum 2090-2099 im Vergleich zu 1980-1999 (Quelle: IPCC, 2007^b: 15)

Bei einer Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 auf B1- oder A1B-Niveau, würde immer noch mit einem weiteren Anstieg der mittleren globalen Temperatur um 0,5°C, bis etwa 2200 zu rechnen sein. Bei einer Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 auf A1B-Niveau würde die thermische Ausdehnung des Meeres zu einem Anstieg des Meeresspiegels von 0,3 auf 0,8 m bis zum Jahr 2300 führen (vgl. IPCC^a, 2007: 17).

2.5 Treibhauseffekt

In diesem Kapitel wird das Grundverständnis geschaffen, um den Prozess der globalen Erwärmung in seiner Komplexität besser zu verstehen. Dazu wird zunächst erläutert wie es zu der Erdtemperatur kommt, was der Treibhauseffekt ist und was dieser dabei für eine Rolle spielt.

Houghton (1997) erklärt dies an einem vereinfachten Modell. Wenn man aus der Atmosphäre alle Wolken, Wasserdampf, CO₂, alle weiteren Spurengase und Staub entfernen würde, blieben nur mehr der Stickstoff und Sauerstoff über. Anhand einer einfachen Strahlungsbilanz lässt sich die Erdtemperatur unter solchen Bedingungen berechnen. Die Sonne besitzt eine Strahlungsenergie von 1370 Watt pro Quadratmeter, wenn diese senkrecht auf die Erdoberfläche trifft. Da zumindest eine Hälfte der Erde der Sonne abgewandt ist, fällt im Schnitt auf ein Quadratmeter Fläche nur ein Viertel der Strahlung, also 343 Watt. Beim Passieren der Strahlung durch die Atmosphäre wird etwa 6 % derselben durch atmosphärische Moleküle ins All zurückgestrahlt. Desweiteren werden etwa 10 % von der Landoberfläche und den Ozeanen reflektiert. Die restlichen 84 % entsprechen 288 W/m², die übrig bleiben, um die Erdoberfläche zu erwärmen. Die aufgenommene Energie muss wiederum ausgeglichen werden, indem die Erde im Durchschnitt die gleiche Energiemenge in Form von Wärmestrahlung abgibt. Die Menge der abgegebenen Strahlung steht in direktem Zusammenhang mit der

Temperatur der Erdoberfläche. Je höher also die Temperatur, desto mehr Strahlung wird abgegeben. Die emittierte Strahlungsmenge ist zudem von der Absorptionsfähigkeit einer Oberfläche abhängig. Je mehr Strahlung eine Oberfläche absorbiert, desto größer ist wiederum die Abstrahlung. Der größte Teil der Erdoberfläche würde im Infrarotbereich schwarz erscheinen. Dieser würde also die einfallende Strahlung fast komplett absorbieren. Die mittlere Temperatur, die für die Erdoberfläche nötig wäre, um die eingehende Sonnenenergie durch die Abgabe von Wärmestrahlung auszugleichen, läge bei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die tatsächliche Jahresdurchschnittstemperatur liegt jedoch bei etwa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Differenz von $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ lässt sich durch die zuvor ausgeklammerten Faktoren erklären (vgl. Houghton, 1997: 13 f.).

Stickstoff und Sauerstoff machen den Hauptanteil der Atmosphäre aus. Diese absorbieren und emittieren jedoch keine Wärmestrahlung. Wasserdampf, CO_2 und weitere Spurengase absorbieren hingegen einen Teil der von der Erde emittierten Wärmestrahlung. Dadurch schränken sie die ungehinderte Abstrahlung ins All ein und verursachen somit die oben genannte Differenz von etwa $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Abschirmung wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet (im Gegensatz dazu steht der anthropogene Treibhauseffekt). Die Gase, die zu diesem beitragen, sind die sogenannten Treibhausgase. Der natürliche Treibhauseffekt wird im Wesentlichen durch die in ihrer natürlichen Menge vorkommenden Gase, Wasserdampf und CO_2 , bestimmt. Der in der Atmosphäre enthaltene Wasserdampf wird hauptsächlich durch die Oberflächentemperaturen der Ozeane determiniert. Der Großteil des Wasserdampfs entsteht durch Verdunstung an den Meeresoberflächen. Hierauf hat der Mensch keinen direkten Einfluss. Auf den CO_2 Gehalt hingegen wirkt der Mensch maßgeblich ein. Seit der industriellen Revolution ist dieser angestiegen, was zum einen auf die Industrie und zum anderen auf die Abholzung der Wälder zurückzuführen ist (vgl. Houghton, 1997: 14 f.).

2.5.1 Treibhausgase

„Als Treibhausgase werden jene atmosphärischen Gase bezeichnet, die die Erdoberfläche durch die Absorption der von ihr ausgehenden Wärmestrahlung einhüllen und erwärmen“ (Houghton, 1997: 25). Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre. Dessen Anteil wird jedoch nicht durch menschliche Aktivitäten verändert. Zu den wichtigsten Treibhausgasen, die durch menschliche Aktivitäten beeinflusst werden, zählen Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Halogenkohlenwasserstoffe. Diese Gase sammeln sich in der Atmosphäre an, wodurch ihre Konzentrationen mit der Zeit zunehmen. Seit dem Industriezeitalter haben alle diese Gase signifikant zugenommen und können menschlichen Aktivitäten zugeschrieben werden (vgl. Houghton, 1997: 25).

Kohlenstoffdioxid hat durch den Gebrauch fossiler Brennstoffe (im Verkehr, Heizen und Kühlen von Gebäuden, Herstellung von Zement und anderen Gütern) zugenommen. Durch Abholzung kommt es ebenfalls zur Freisetzung von CO_2 und gleichzeitig zur Verminderung der

Aufnahme durch reduzierte Pflanzenbestände. CO₂ wird auch bei natürlichen Prozessen, wie dem Abbau von Pflanzenmaterial, frei gesetzt (vgl. Houghton, 1997: 25).

Aufgrund menschlicher Aktivitäten die mit Landwirtschaft, Verteilung von Erdgas und Depo- nien in Verbindung stehen, hat die Konzentration an **Methan** zugenommen. Methan kann aber auch durch natürliche Prozesse freigesetzt werden, z.B. in Feuchtgebieten. Momentan steigen CH₄-Konzentrationen in der Atmosphäre nicht an, da Wachstumsraten in den letzten beiden Dekaden abnahmen (vgl. Houghton, 1997: 36 ff.).

Lachgas wird zum Beispiel beim Gebrauch von Düngemitteln und beim Verbrennen fossiler Energieträger emittiert. Natürliche Prozesse in Böden und den Ozeanen setzen ebenfalls N₂O frei (vgl. Houghton, 1997: 38).

Die Konzentrationen von **Halogenkohlenwasserstoffen** haben vor allem aufgrund menschlicher Aktivitäten zugenommen, aber auch natürliche Prozesse stellen dabei eine kleine Quelle dar. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW-11 und FCKW-12) stellen die wichtigsten Halogenkohlenwasserstoffe dar. Diese wurden v.a. als Kühlmittel in Kühlschränken und anderen industriellen Prozessen eingesetzt. Jedoch fand man heraus, dass diese zum Abbau des stratosphärischen Ozons in der Atmosphäre führten. Dadurch kam es auch zu dem Ozonloch über der Antarktis. Internationale Vorschriften zum Schutz der Ozonschicht bewirkten, dass sich die Menge an FCKW momentan verringert (vgl. Houghton, 1997: 38 f.).

Ozon entsteht in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen und wird dabei kontinuierlich produziert und zerstört. Emissionen von Gasen wie z.B. Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoff und Stickoxiden führen in der Troposphäre zu einem Anstieg des Ozons. Freigesetzte Halogenkohlenwasserstoffe zerstören das Ozon in der Stratosphäre, wodurch es zur Entstehung des Ozonloches kommt (vgl. Houghton, 1997: 39 f.).

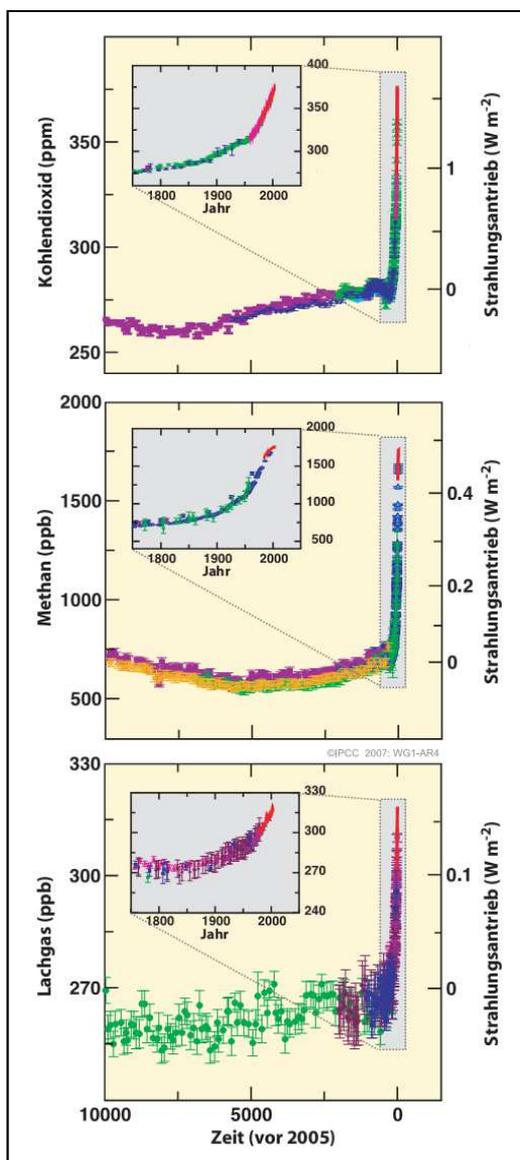
Wasserdampf gehört zu dem häufigsten und wichtigsten Treibhausgas, auf das Menschen jedoch nur einen geringen direkten Einfluss haben. Durch eine Änderung des Klimas hat der Mensch jedoch indirekt erheblichen Einfluss auf den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Eine wärmere Atmosphäre enthält z.B. mehr Wasserdampf. Durch die Freisetzung von Methan durch menschliche Aktivitäten haben die Menschen ebenfalls Einfluss auf den Wasserdampfgehalt. Methan wird in der Stratosphäre chemisch abgebaut, wobei geringe Mengen an Wasserdampf entstehen (vgl. Houghton, 1997: 25).

Aerosole sind kleine Partikel in der Atmosphäre, die in verschiedenen Größen, Konzentrationen und chemischen Zusammensetzungen vorkommen. Manche Aerosole werden direkt in die Atmosphäre emittiert, andere formen sich erst aus emittierten Stoffen. Sie beinhalten sowohl Stoffe natürlichen Ursprungs, als auch anthropogen bedingten Ursprungs. Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Biomasse führte zu vermehrten Aerosolen, die Schwefelverbindungen, organische Verbindungen und Ruß (schwarzer Kohlenstoff) enthalten. Durch menschliche Aktivitäten wie Tagebau und Industrieprozesse,

nahm der Staub in der Atmosphäre zu. Natürliche Aerosole sind z.B. mineralischer Staub von der Erdoberfläche, Meersalzaerosole, biogene Emissionen von Land und Ozeanen und Sulfat- und Staubaerosole, die durch vulkanische Eruptionen gebildet werden (vgl. Houghton, 1997: 41 f.).

2.5.2 Treibhausgase und Klimaänderung

Das vorangegangene Kapitel hat die wichtigsten Treibhausgase kurz vorgestellt und die wesentlichen Ursachen für die Änderungen dieser in der Atmosphäre genannt. Im Folgenden werden nun konkrete Zahlen dargestellt, basierend auf dem vierten Sachstandsbericht des IPCC.



Aufgrund menschlicher Aktivitäten seit 1750 nahmen globale atmosphärische Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, Methan und Stickstoffoxiden markant zu. Mittlerweile überschreiten sie bei Weitem die vorindustriellen Werte, die aus Eisbohrkernen über viele Jahrtausende hinweg bestimmt wurden (Abbildung 10). Der weltweite Anstieg von Kohlenstoffdioxid ist in erster Linie auf den Gebrauch fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen zurückzuführen. Der Anstieg von Methan und Stickstoffoxiden ist primär auf die Landwirtschaft zurückzuführen (vgl. IPCC, 2007^a: 2).

Kohlenstoffdioxid ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas (Abbildung 11). Während die vorindustriellen globalen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen bei etwa 280 ppm lagen, waren diese bis zum Jahre 2005 auf 379 ppm angestiegen. Die atmosphärische Konzentration von Kohlenstoffdioxid überschritt im Jahr 2005 bei Weitem die natürliche Bandbreite der letzten 650 000 Jahre (180 bis 300 ppm). Die jährliche Wachstumsrate von Kohlenstoffdioxid war während des Zeitraums 1995-2005 höher als sie je zuvor, seit dem Beginn kontinuierlicher Messungen, gewesen war (1995-2005 durchschnittlich 1,9 ppm pro Jahr; 1960-2005

Abbildung 10: Änderungen der Treibhausgase basierend auf Eisbohrkernen und modernen Daten (Quelle: IPCC, 2007: 3)

durchschnittliche 1,4 ppm pro Jahr), auch wenn die Wachstumsrate von Jahr zu Jahr schwankt (vgl. IPCC, 2007^a: 2).

Die Hauptquelle erhöhter Kohlenstoffdioxidkonzentration seit der vorindustriellen Zeit ist auf den Gebrauch fossiler Brennstoffe zurückzuführen. Desweiteren haben auch Landnutzungsänderungen einen signifikanten, wenn auch kleineren Anteil, an diesem Anstieg. Die jährlichen fossilen Kohlenstoffdioxidemissionen lagen in den 1990er Jahren durchschnittlich bei 6,4 Gt Kohlenstoff pro Jahr. Zwischen 2000 bis 2005 lagen diese im Schnitt bei bereits 7,2 Gt Kohlenstoff pro Jahr. Kohlenstoffdioxidemissionen, die mit Landnutzungsänderungen in Verbindung stehen werden für die 1990er Jahre auf 1,6 Gt Kohlenstoff pro Jahr geschätzt, wobei hier jedoch große Unsicherheiten bestehen (vgl. IPCC, 2007^a: 2)

Die globalen atmosphärischen Methankonzentrationen lagen in der vorindustriellen Zeit bei etwa 715 ppb. Bis in die frühen 1990er Jahre stiegen diese auf etwa 1732 ppb an und lagen 2005 bei bereits 1774 ppb. Diese atmosphärischen Methankonzentrationen überschreiten bei Weitem die natürliche Bandbreite der letzten 650 000 Jahre (320 bis 790 ppb). Seit den frühen 1990er Jahren sind die Wachstumsraten jedoch kleiner geworden, wie auch die der gesamten Emissionen. Der beobachtete Anstieg ist sehr wahrscheinlich auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen, insbesondere auf Landwirtschaft und den Gebrauch fossiler Brennstoffe (vgl. IPCC, 2007^a: 3).

Die globale atmosphärische Stickstoffoxidkonzentration stieg seit der vorindustriellen Zeit von ca. 270 ppb bis zum Jahre 2005 auf 319 ppb an. Seit 1980 ist die Wachstumsrate etwa konstant. Mehr als ein Drittel aller Stickstoffoxidemissionen sind anthropogenen Ursprungs, vor allem aufgrund der Landwirtschaft (vgl. IPCC, 2007^a: 3).

Der globale durchschnittliche Nettoeffekt menschlicher Aktivitäten seit 1750 führte zu einer Erwärmung, mit einem Strahlungsantrieb von +1,6 W/m² (zwischen +0,6 und 2,4 W/m²) (vgl. IPCC, 2007^a: 3).

Der Strahlungsantrieb aufgrund der Zunahme von CO₂, CH₄, und Stickstoffoxide beträgt +2,30 W/m². Der CO₂ Strahlungsantrieb hat zwischen 1995 und 2005 um 20 % zugenommen. Dies war die höchste Änderung innerhalb einer Dekade seit mindestens 200 Jahren. Der anthropogene Beitrag zu Aerosolen (hauptsächlich Sulfate, organische Kohlenstoffe, Ruß, Nitrate und Staub) resultiert in einer Abkühlung, mit einem direkten Strahlungsantrieb von -0,5 W/m² und einer indirekten Wolkenalbedo von -0,7 W/m². Signifikante anthropogene Beiträge zum Strahlungsantrieb stammen jedoch von anderen Quellen. Troposphärische Ozonänderungen aufgrund ozonbildender Chemikalien (Stickoxide, CO, Kohlenwasserstoffe) erzeugen einen Strahlungsantrieb von +0,35 W/m². Änderungen von Halogenkohlenwasserstoffen tragen +0,34 W/m² zum Strahlungsantrieb bei. Änderungen der Oberflächenalbedo aufgrund Landnutzungsänderungen und der Ablagerung von Rußpartikeln auf Schnee ma-

chen $-0,2 \text{ W/m}^2$ aus. Seit 1750 machen Änderungen der Solarstrahlung etwa $+0,12 \text{ W/m}^2$ am Strahlungsantrieb aus (vgl. IPCC, 2007^a: 3 ff.).

Abbildung 11 zeigt die „Schätzungen und Bandbreiten des global gemittelten Strahlungsantriebs (SA) im Jahr 2005 für anthropogenes Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und andere wichtige Faktoren und Mechanismen, zusammen mit der typischen geographischen Ausdehnung (räumliche Skala) des Antriebs und der Beurteilung des Grades des wissenschaftlichen Verständnisses (GDWV)“ (IPCC 2007^b: 4).

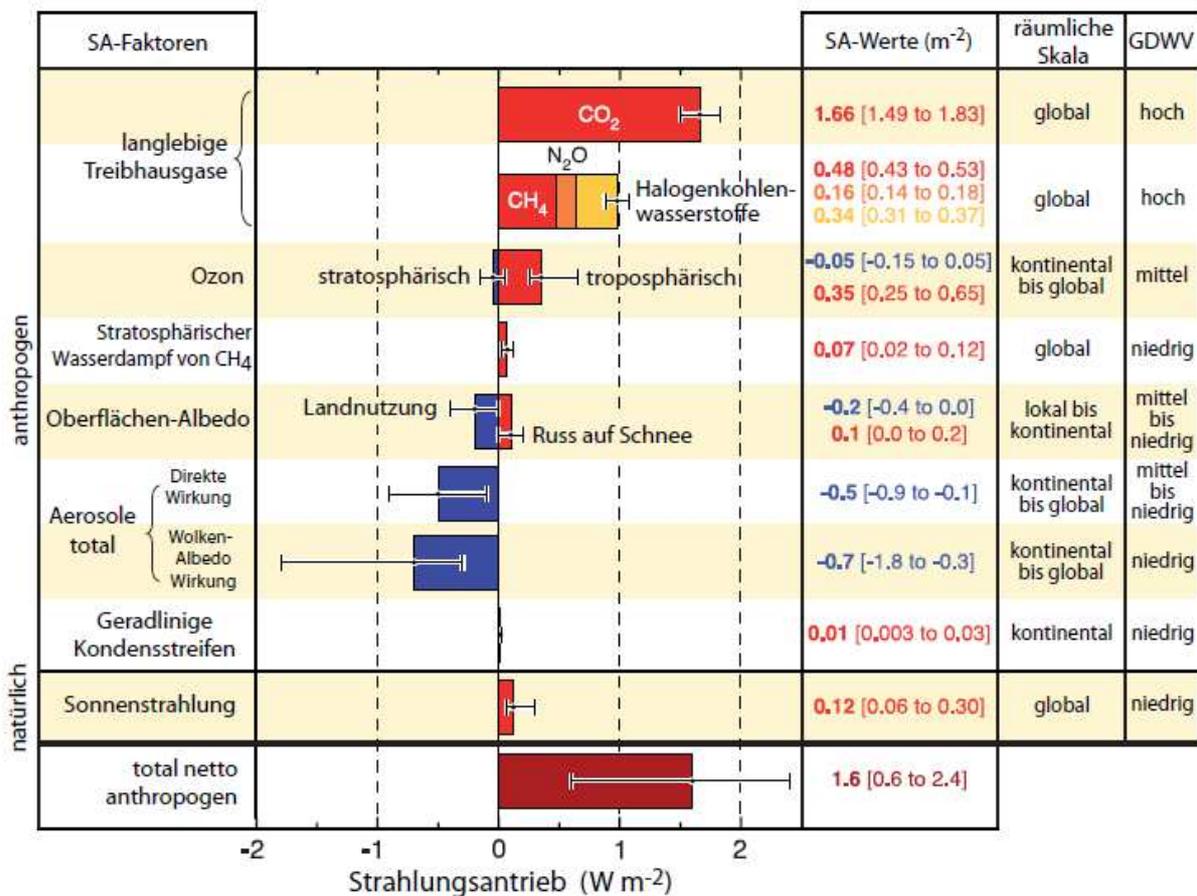


Abbildung 11: Komponenten des Strahlungsantriebs (Quelle: IPCC^b, 2007: 4)

3. Feuer

3.1 Gebrauch von Feuer

Die ersten Hominiden lebten im östlichen Afrika vor etwa 2,5 Millionen Jahren. Feuer war in den verschiedenen Phasen der Evolution immer ein bedeutender Faktor. Es wird angenommen, dass sich der Homo Erectus nur von seinen Vorfahren weiterentwickeln konnte, da er die Fähigkeit des Kochens und somit den Gebrauch von Feuer erlernte. Garte Nahrung ermöglicht eine bessere Energieaufnahme. Das und die entgiftende Wirkung des Kochens (was auch dazu führte, dass das Nahrungsangebot vielfältiger wurde) lieferte den frühen Menschen gesundheitliche und körperliche Vorteile. Desweiteren kam es durch das Kochen zu einer Verzögerung der Nahrungsaufnahme. Dadurch wurde die Entwicklung sozialer Fähigkeiten notwendig, die Aufgaben in der Gruppe mussten verteilt werden (z.B. Jagen, Sammeln, Kochen, Verteidigen). Durch das abendliche Versammeln am Feuer, hatte dieses auch einen Sozialisierungseffekt. Man nimmt an, dass diese Faktoren zur Evolution größerer Gehirne und Körper, kleinerer Zähne, der Körperproportionen und auch menschlicher Charakterzüge beitrugen, darunter auch viele soziale Aspekte (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 596 f.).

Diese frühen Hominiden haben sich in Afrika verbreitet und somit auch ihre Feuertechnologie. Durch den Gebrauch von Feuer konnten Menschen nun auch kältere Gegenden besiedeln und sich vor Beutetieren schützen (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 597).

Während des Paläolithikums und des Mesolithikums wurde Feuer als sogenanntes „fire-stick farming“ extensiv genutzt (u.a. Ermöglichung von Reisen, Nutzbarmachung des Bodens für Lebensraum, Töten von Schädlingen, Jagen, Kriegsführung zwischen Stämmen). Diese Praktiken wirkten sich nicht nur auf die Feuerregime aus, sondern auch auf die Vegetationsmuster und Biodiversität. In weiterer Folge hatten diese Änderungen auch Auswirkungen auf Ökosystemfunktionen. So hat z.B. das „fire-stick farming“ der Aborigines feinkörnige Landschaftsmosaik gebildet, in denen die Diversität kleiner Tiere größer war und eine erhöhte Jagdproduktivität gegeben war (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 597).

Die Ausweitung der menschlichen Lebensräume und begleitend dazu Klimaänderungen, haben zum massiven Wegfall von Megafauna (z.B. Mammuts und andere große Pflanzenfresser) beigetragen. Durch das Aussterben mancher Tiere kam es auch zu einer Änderung des Brennmaterials und somit auch der Feueraktivität. Das „fire-stick farming“ war wahrscheinlich nötig, um eine bewohnbare Umgebung zu schaffen, aber auch um katastrophale Feuer, die eine Gefahr für den Menschen darstellten, zu minimieren und Samenressourcen zu erhöhen, da die Menschen dazu gezwungen wurden, auf eine weniger fleischabhängige Ernährung umzusteigen (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 597).

In der agrarwirtschaftlichen Revolution im Neolithikum beeinflussten Feuer die Vegetation. Natürliche Vegetation mit hauptsächlich perennierenden Pflanzen wurde zu Vegetation mit vorwiegend einjährigen Pflanzen. Menschen bevorzugten es in Feuer anfälligen Gebieten zu leben, da das Feuer ihnen Vorteile für die Jagd, die Nahrungssuche, die Kultivierung und für das Hüten des Viehs bot. Selbst heute benötigen noch viele Agrar- und Forsttechniken Feuer, zum Beispiel bei der Brandrodung. Kohle-Beweise deuten einen gleichbleibenden Anstieg von Biomassenverbrennung seit dem letzten glazialen Maximum (ca. 21000 Jahre BP) bis zum Beginn der landwirtschaftlichen Phase (ca. 10000 Jahre BP) an. Dieser Trend ist an eine klimatische Erwärmung und an die Ausweitung der Vegetation aufgrund schwindender Eisdecken gebunden. Die tendenzielle Zunahme globaler Feueraktivität wurde durch die Entstehung der Landwirtschaft unterbrochen. Mit wachsender Bevölkerung hat sich die Landwirtschaft weiter verbreitet und viele Landschaften modifiziert. In der jüngeren Vergangenheit der Menschheitsgeschichte führten steigende Bevölkerungszahlen tendenziell in vielen Landschaften zu einer Einschränkung von Brennstoffen und einer Störung der Brennstoffkontinuität, bedingt durch die Auswirkungen von Landwirtschaft und Viehwirtschaft (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 597).

Ein Anstieg der menschlichen Bevölkerung, zusammen mit der Austrocknung im Holozän, führte zu einer Debatte, ob größere Veränderungen der Vegetation in den letzten 6000 bis 7000 Jahren eher ein Ergebnis menschlicher Aktivitäten seien, als eine Auswirkung des Klimawandels. Es ist schwer zu unterscheiden welche Feuerregimeänderungen im Holozän auf den Menschen oder auf natürliche Ursachen zurückzuführen sind. Wie die Landschaft ohne menschlichen Einfluss ausgesehen hätte ist, wenn überhaupt, nur sehr schwer festzustellen. Der Anstieg der menschlichen Zivilisation geschah jedoch zeitgleich mit der Erwärmung im Holozän. Demnach haben sowohl Klima als auch die Menschen die aktuellen Landschaften verändert und geformt (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 597 f.).

Auf globaler Maßstabsebene müssen sowohl klimatische als auch anthropogene Faktoren einbezogen werden, um Variationen der globalen Biomasseverbrennung der letzten zwei Jahrtausende zu erklären. Der Rückgang von Holzkohlesedimenten zwischen 1 n. Chr. und 1750 n. Chr. wird der globalen Abkühlung zugeschrieben. Die geringste Biomasseverbrennung war während des kleinen Eiszeitalters (1400 – 1800 AD). Der starke Anstieg danach kann jedoch nur durch den exponentiellen Anstieg der Weltbevölkerung erklärt werden (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 598).

Zeitliche Skalen verändern ebenfalls die relative Wichtigkeit menschlicher gegenüber klimatischer Effekte auf Feuerregime. Die Bevölkerungsdichte und Feuer in amerikanischen Gesellschaften vor Kolumbus sind miteinander in Verbindung zu setzen. Zudem waren die klimatischen Einflüsse auf Feuerregime in den letzten 500 Jahren in Patagonien auf kurzfristiger Basis signifikant (jährliche Variabilität). Jedoch zeichnet sich bei der Betrachtung über

Jahrzehnte und Jahrhunderte die Bedeutung der Rolle des Menschen ab. Es ist jedoch klar, dass Menschen und Änderungen in menschlichen Gesellschaften (z.B. von präindustriellen zu postindustriellen) Feuerregime über Jahrtausende beeinflusst haben (vgl. Pausas J.G. und Keeley J.E., 2009: 598).

Heute wird Feuer noch immer viel genutzt, v.a. von Viehhaltern in Afrika und Nutzern des Wanderfeldbaus. Als Beispiel wäre das malaysische und indonesische „ladang“ System und das „milpa“ System der Mayas in Lateinamerika zu nennen. Diese bereiteten ihre Felder zur Bepflanzung durch Fällen und Abtöten des Waldes auf. Dabei ließ man den Brandschutt in der heißen Jahreszeit trocknen und brannte ihn noch vor dem Beginn der Regensaison wieder ab. Mit dem ersten Regen wurden mit Stöcken Löcher in die weiche, aschebedeckte Erde gebohrt. Dieses System eignet sich für Gebiete mit geringer Bevölkerungsdichte, mit ausreichend viel Wald, um lange Wachstumsintervalle des Waldackers zwischen den Bränden zu ermöglichen. Auf Land, das zu oft abgebrannt wurde, wuchs mit der Zeit beständiges Gras, wodurch das Bewirtschaften mit einfachen Werkzeugen erschwert wurde. Zu lange bewirtschaftetes Land wurde schnell weniger fruchtbar, abgebranntes Land war kurzzeitig reich an Nährstoffen (vgl. Goudie, 1993: 31).

Der Gebrauch von Feuer beschränkt sich jedoch nicht nur auf Naturvölker in den Tropenregionen. In neolithischen Bodenprofilen in den britischen Bergländern wurden beispielsweise Reste von Kohle gefunden. In großen Teilen Nordamerikas gab es noch vor der europäischen Besiedlung Brände in regelmäßigen Abständen. Auch in Südamerika wurde von Magellan eine große Anzahl an Bränden beobachtet (vgl. Goudie, 1993: 31 f.).

Feuer war auch im Lebensstil der australischen Aborigines, sowie in Tasmanien, von zentraler Bedeutung. Das Mitsichführen von Fackeln war gängige Praxis.

In Neuseeland, setzten die Polynesier noch vor der europäischen Besiedelungszeit Bodenflächen extensiv in Brand. Jäger nutzten Feuer um Vegetation abzubrennen und so das Reisen zu ermöglichen und um eine Hauptnahrungsquelle, den flugunfähigen Moa, zu fangen. Die Veränderungen in der Vegetation waren dadurch beachtlich. Die Waldbedeckung verringerte sich von 79 % auf 53 %. Brände waren vor allem in den trockeneren Wäldern der zentralen und östlichen Südinsel, welche im Regenschatten der südlichen Alpen lagen, effektiv. Diese Praktiken wurden über einen Zeitraum von etwa 1000 fortgeführt, bis zu dem Zeitpunkt der Europäischen Besiedelung (vgl. Goudie, 1993: 32).

3.2 Brandverhalten und Temperaturen von Feuer

Das Brandverhalten wird oft durch Intensität und Ausbreitung definiert. Dieses wird von vielen Faktoren beeinflusst. Zu den Faktoren die die Intensität eines Feuers beeinflussen, gehören das verfügbare Brennmaterial, Feuchte und Temperatur, die Zusammensetzung des Brennmaterials, Wind und Topographie. Das **verfügbare Brennmaterial** wird durch Größe

und Anordnung quantifiziert. Das heißt je mehr verfügbares Brennmaterial vorhanden ist, desto intensiver ist das Feuer. Kühles, feuchtes Brennmaterial verbrennt langsamer als heißes, trockenes Brennmaterial. Die **Beschaffenheit des Brennmaterials** hat ebenfalls Einfluss auf die Intensität von Feuer. Öle und Harze erhöhen die Wärmeausbeute der Reaktion und führen dazu, dass ein Feuer intensiver brennt. Andere chemische Faktoren hingegen, wie z.B. hohe Konzentration an Mineralen, können die Brennbarkeit verringern. **Wind** erhöht die Sauerstoffverfügbarkeit, überträgt Hitze und kann „Fleckenfeuer“ erzeugen, aus Bestandteilen, die vom Wind heran geweht wurden. Auch die **Topographie** hat Einfluss auf die Intensität des Feuers. Ein Feuer, welches am oberen Ende eines Hanges ausbricht, wird sich eher langsamer hangabwärts ausbreiten. Ein Feuer, das am unteren Ende des Hanges ausbricht, wird sich eher schnell ausbreiten und eine Eigendynamik entwickeln. Da warme Luft nach oben steigt und weiter oben liegendes Brennmaterial vorwärmt, wird sich das Feuer aufwärts fortbewegen. Viele der Faktoren, die sich auf die Intensität auswirken, wirken sich auch auf die Ausbreitungsrate des Feuers aus. So weiten sich Feuer beispielsweise unter trockenen, windigen Bedingungen mit einer hohen Menge an Brennstoff schnell aus. Brennstoffkontinuität und Topographie spielen ebenfalls bei der Verbreitung eine Rolle. Topographische Eigenschaften wie Bäche und Seen können Feuer aufhalten und folglich die Verteilung der Brände entlang der Landschaft beeinflussen. Die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaft bedingt ebenfalls die Ausweitung von Bränden, da manche Spezies entzündlicher sind als andere (vgl. Goudie, 1993: 36 ff.).

Die Auburn University (o.J.) erweitert die von Goudie (1993) genannten Einflussfaktoren um weitere Faktoren, nämlich die Stabilität der Atmosphäre, den Niederschlag und die Tageszeit. Die **Stabilität der Atmosphäre** gibt den Widerstand der Atmosphäre gegenüber vertikalen Bewegungen an. In einer instabilen Atmosphäre können sich Luftmassen besser vertikal bewegen, was die Feueraktivität begünstigt. Der **Niederschlag** (Regen oder Schnee) hat einen direkten und sofortigen Einfluss auf die relative Feuchte und die Feuchte des Brennmaterials. Für gewöhnlich sinkt bei Niederschlag auch die Temperatur und die Winde beruhigen sich. Niederschlagsmuster sind zudem wichtige Faktoren, die die Feuersaison mitbestimmen. Nachdem sich alle Wetterelemente innerhalb eines Tages ändern können, hat auch die **Tageszeit** einen Einfluss auf das Brandverhalten. Demnach sind Feuer tendenziell während der Mittagszeit und am frühen Nachmittag am stärksten. Auch die Verbreitung des Feuers geschieht hier in der Regel am schnellsten. Aufgrund der Verzögerungszeit von Brennmaterialien gegenüber abgegebener Feuchte, sind diese in der Mittagszeit bis zum späten Nachmittag am trockensten.

Die Auswirkungen von Feuer auf die Umgebung hängen von ihrer Größe, Dauer und Intensität ab. Manche Feuer sind schnell und haben einen geringen Hitzegrad und zerstören nur die Bodenvegetation. Andere Feuer, wie Baumkronenfeuer, wirken sich auf gesamte Wälder bis

in den Bereich der Baumkronen aus und erzeugen sehr hohe Temperaturen (siehe Tabelle 2). Die beiden Werte beim Chaparral Buschwerk kommen dadurch zustande, da unterschiedliche Quellen (einmal Ahlgren, 1974 und einmal Mooney und Parsons, 1973) herangezogen wurden (vgl. Goudie, 1993: 37 ff.).

Tabelle 2: Temperaturen die in Feuern erreicht werden können (Datengrundlage: Goudie, 1993: 36)

Vegetationsform	Temperatur in °C
Minnesota Strauchkiefer	800
Chaparral Buschwerk	538 und 1100
Britisches Heidekraut	840
Senegalesische Savanne	715
Japanisches Grasland	887
Nigerianische Savanne	> 538 – 640
Sudanesische Savanne	850

Im Allgemeinen sind Waldbrände heißer als Graslandbrände. Feuer die gehäuft in einem Gebiet auftreten, erlangen nicht so hohe Temperaturen, weil nicht genügend entflammbares Material verfügbar ist. Wenn Menschen gezielt Feuer unterdrücken, können sich große Mengen an entflammbarem Material ansammeln. Wenn dann ein Feuer ausbricht, entwickelt sich oftmals ein heißes Kronenfeuer. Aus ökologischer Sicht können solche Feuer verheerend sein. Deswegen gibt es immer wieder Debatten über die Sinnhaftigkeit der Feuerunterdrückung, da in vielen Wäldern Feuer unter sogenannten natürlichen Bedingungen vorkommen und dies ein relativ häufiges und regelmäßig vorkommendes Phänomen ist (vgl. Goudie, 1993: 38).

3.3 Typen von Bränden

Die verschiedenen Arten von Bränden lassen sich generell in drei Kategorien einteilen: „surface, crown, and ground fires“ (Ainsworth & Doss, 1995). Der Typ eines Brandes hängt im Wesentlichen vom Brennmaterial und dessen Verfügbarkeit ab, sowie von der Intensität des Brandes. **Oberflächenbrände** („surface fires“) haben normalerweise eine geringe Intensität. Sie sind schnell, erreichen aber nur selten hohe Temperaturen. Dieser Brandtyp verbrennt leichtes Brennmaterial und stellt für tiefliegende Teile, Wurzelstämme und Wurzelknollen im Boden nur eine geringe Gefahr dar (vgl. Ainsworth & Doss, 1995).

Baumkronenbrände („crown fires“) kommen im oberen Bereich von Bäumen vor und entstehen in der Regel aus Oberflächenbränden. Während solcher Brände, stehen Oberflächenmaterialien und Bäume in großen Flammen und es herrscht eine starke Hitze. In Nadelwäldern kann das dazu führen, „dass Harze und ätherische Öle aus den Bäumen ausbrechen.

Der Wald wird sozusagen wie ein Lappen getränkt“ (Mignot & Zbinden, 2010: 22). Zudem kann es zu Druckanstiegen in den Gewächsen kommen, wodurch Tannenzapfen „abgeschossen“ werden und diese „auf einmal gefährliche ‚Brandbomben‘“ darstellen können (Mignot & Zbinden, 2010: 22). Auch herabfallende glühende Äste und Kohle können das Feuer zusätzlich anheizen. Starke Winde und geringe Luftfeuchtigkeit begünstigen außerdem ein solches Feuer (vgl. Mignot & Zbinden, 2010: 22).

Bodenbrände kommen seltener vor. Sie haben normalerweise sehr intensive Flammen, welche Vegetation und organisches Material soweit abbrennen können, bis nur noch die bloße mineralische Erde übrig bleibt. Die Hitze und Intensität solcher Feuer kann Wurzeln, Wurzelknollen und Wurzelstöcke, die unterhalb der Oberfläche liegen, zerstören und kann komplette Pflanzengesellschaften vernichten (vgl. Ainsworth & Doss, 1995).

3.4 Ursachen von Bränden

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ursachen von Bränden. Die Entstehung von Bränden ist sowohl auf natürliche als auch anthropogene Ursachen zurückzuführen. Zu den natürlichen Auslösern gehören dabei in erster Linie Blitze und Vulkane, aber auch Selbstentzündung von Heu kann als natürlicher Auslöser von Feuer genannt werden. Im Gegensatz dazu gibt es auch anthropogene Ursachen von Bränden, wie z.B. Brandstiftung oder gezieltes Abbrennen von Wäldern.

3.4.1 Natürliche Auslöser und deren Häufigkeiten

Bevor die Rolle des Menschen und dessen Einfluss auf Brände betrachtet wird, soll zunächst auf natürlichen Ursachen von Bränden eingegangen werden. Insbesondere Blitze haben eine große Bedeutung, da diese auf der Erdoberfläche etwa 100 000-mal pro Tag einschlagen (vgl. Goudie, 1993: 35). Abbildung 12 zeigt die durchschnittliche jährliche Anzahl von Blitzeinschlägen pro Quadratkilometer. Die Daten wurden von NASA Satelliten zwischen 1995 und 2003 aufgenommen. Über den Kontinenten treffen Blitze viel öfter auf, als über den Ozeanen. Dies ist auf die schnellere und stärkere Erwärmung der Kontinente zurückzuführen. Die warme Oberfläche erwärmt die darüber liegende Luft. Dies führt zu stärkerer Konvektion, Gewittern und Blitzen. Auf der Karte ist auch zu sehen, dass nahe des Äquators häufiger Blitze einschlagen als an den Polen. Dies ist ebenfalls auf die unterschiedlich starke Erwärmung zurückzuführen (am Äquator ist es wärmer als an den Polen) (King, o.J.).

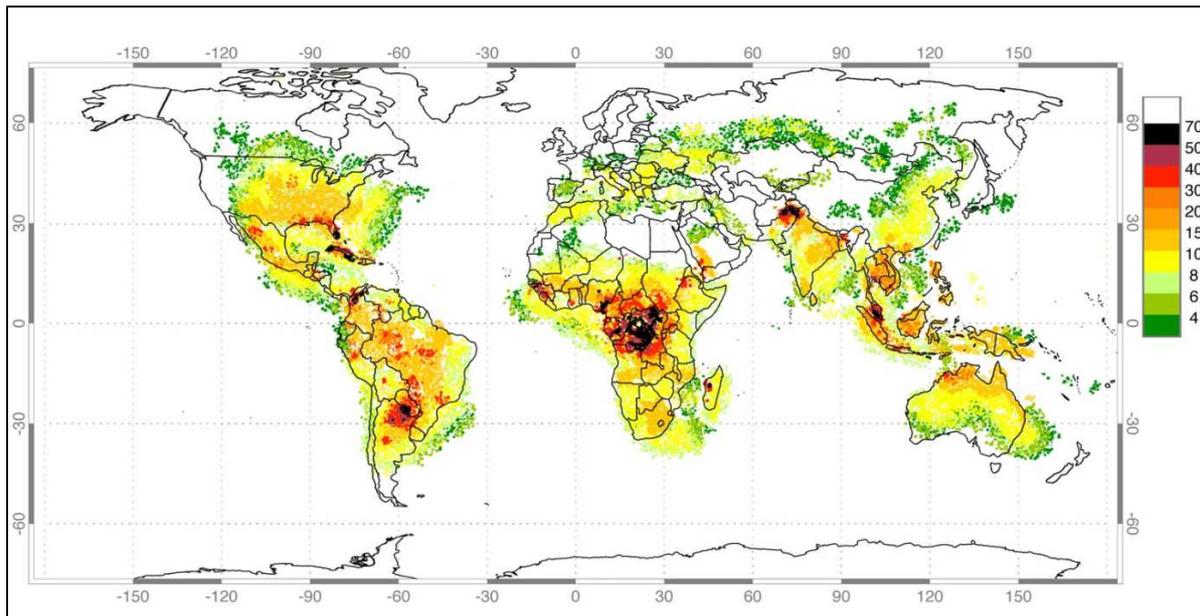


Abbildung 12: Weltweite Verteilung von Blitzen April 1995 – Februar 2003 (Quelle: Brightex, 2012)

Tabelle 3 zeigt die Anzahl von Bränden die durch Blitzeinschläge in den Vereinigten Staaten verursacht wurden. In Arizona und New Mexico ist die prozentuale Anzahl der Brände, die durch Blitze verursacht wurden mit 84% bzw. 79% am höchsten. In Kalifornien ist die absolute Anzahl an Bränden mit 3608 am höchsten, jedoch werden davon nur etwa 26% von Blitzeinschlägen verursacht.

Tabelle 3: Durchschnittliche Anzahl an Bränden in den USA (Datengrundlage: Goudie, 1993: 34)

Bundesstaat	gesamte jährliche durchschnittliche Anzahl an Bränden	von Blitzen verursacht in Prozent
Arizona	1486	84
California	3608	26
Colorado	413	36
Idaho	1458	69
Montana	852	71
Nevada	86	34
New Mexico	614	79
Oregon	1860	52
South Dakota	173	62
Utah	236	35
Washington	1807	28
Wyoming	157	62

Welchen Einfluss haben nun Klimaelemente auf Blitze? Villarini und Smith (2013) untersuchten in ihrer Studie die zeitliche und räumliche Variabilität von Wolken-Erde-Blitzen des Kernlandes der USA für den Zeitraum 1995 bis 2010. Die meisten positiven Blitze („Spannungsausgleich zwischen der stark positiv geladenen Wolkenoberseite und der leicht negativ geladenen Erdoberfläche“ (Unwetternetzwerk, o.J)) treten zwischen den Rocky Mountains und den Appalachen auf. Bei der Untersuchung aller, sowie nur der negativen Blitze („Potentialausgleich (Blitz) zwischen der stark negativ geladenen Wolkenunterseite und dem leicht negativ geladenem Erdboden“ (Unwetternetzwerk, o.J)), gibt es eine verstärkte Aktivität in den zentral gelegenen Regionen der USA, in der Ohio Valley und in den Küstengebieten von Louisiana bis Carolina. Des Weiteren traten die meisten positiven Blitze zwischen 2008 und 2010 auf. Die zeitliche Verteilung aller Blitze gesamt und nur der negativen Blitze ist in dem Untersuchungszeitraum von 16 Jahren gleichmäßiger. Die meisten positiven Blitze traten zwischen Mai und August auf, mit einem Höchstwert im Juni. Für alle Blitze sowie nur die negativen Blitze, ist die saisonale Verteilung enger zwischen Juni und August konzentriert, mit dem Höchstwert im Juli. Zudem konnte östlich der Rocky Mountains eine ansteigende Tendenz von Blitzen festgestellt werden, westlich davon hingegen eine abnehmende Tendenz (vgl. Villarini und Smith, 2013: 146).

In einer anderen Studie beschäftigte sich Price (2009: 483) mit der Frage, ob ein trockeneres Klima zu einer erhöhten Blitzaktivität führe und traf dabei auf ein interessantes Paradoxon. Offenbar gibt es einen Widerspruch bei der Betrachtung der regional zeitlich gemittelten Blitz- und Niederschlagsbeziehungen. Es ist seit Jahren bekannt, dass Blitze und Niederschläge in einzelnen Stürmen positiv miteinander korrelieren und, dass Gewitter, in denen mehr Blitze auftreten, tendenziell mehr Niederschlag erzeugen. Jedoch zeigt sich bei größeren räumlichen und zeitlichen Skalen eine gegensätzliche Beziehung. Die Studie bringt sowohl auf der Grundlage von Beobachtungen als auch anhand von Modellierungen Beweise, dass die regionale Blitzaktivität ansteigt, wenn Regionen heißer und trockener an der Oberfläche werden.

Dieses Phänomen ist auch in den tropischen kontinentalen Zentren zu beobachten. Afrika hat z.B. die höchste Blitzaktivität der drei „chimney regions“ (die drei Regionen, in denen die meisten Blitze auftreten, also Afrika, Südamerika und Südostasien), jedoch den geringsten Niederschlag. Bei der Betrachtung des Einflusses des El Niño-Kreislaufs auf Blitze und Niederschlag in den Tropen kann eine ähnliche negative Beziehung beobachtet werden. Während der El Niño-Jahre in Südostasien, die von Dürren durchzogen sind, treten mehr Blitze auf als in den La Niña-Jahren (vgl. Price, 2009: 483).

Klimamodelle liefern einen Einblick in dieses Paradoxon, da diese ebenfalls einen Anstieg der Blitzaktivität bei trockener werdendem Klima prognostizieren. Sowohl regionale als auch globale Klimamodelle prognostizieren einen Anstieg der Blitzaktivität in einem wärmeren

Klima, obwohl die Atmosphäre stabiler wird und die Oberfläche bei einer Erwärmung des Klimas tendenziell trockener wird. Diese Beziehungen zwischen trockenerem Klima und erhöhter Blitzaktivität könnte mit der Annahme erklärt werden, dass in einem trockenerem Klima zwar weniger Gewitter auftreten, jedoch die, die sich bilden, viel intensiver auftreten. Dies wurde zum Beispiel im Mittelmeerraum der letzten 50 Jahre dokumentiert, wo der Gesamtniederschlag abnahm, Starkregenereignisse hingegen zunahm. Jedoch gibt es auch andere Ergebnisse, die zeigen, dass auf jährlicher Zeitskala des gegenwärtigen Klimas die globale Blitzaktivität eher aufgrund steigender Anzahl an Gewittertagen zunimmt und weniger aufgrund der veränderten Blitzhäufigkeit dieser Gewitter (vgl. Price, 2009: 483).

Weitere Studien deuteten zudem an, dass eine erhöhte Blitzaktivität die obere Troposphäre befeuchten würde. Folglich wäre eine trockenere Oberfläche, die in einer feuchteren oberen Atmosphäre resultieren würde, ebenfalls ein Widerspruch. Jedoch gäbe es in einem wärmeren Klima eine von den Ozeanen ausgehende erhöhte Evaporation, begleitet von einer erhöhten feuchtehaltenden Kapazität der Atmosphäre. Wenn sich in dieser feuchten Umwelt Gewitter entwickeln, ist mehr Wasserdampf für einen erhöhten Transport in die obere Troposphäre verfügbar. Da die obere Troposphäre naturgemäß extrem trocken ist, würde ein Anstieg der Intensität von Gewittern in einem wärmeren Klima die obere Troposphäre befeuchten, obwohl die atmosphärische Grenzschicht aufgrund erhöhter Evapotranspiration und/oder verringerter Niederschlagsmenge trockener wäre (vgl. Price, 2009: 483).

Ein Faktor, der bisher nicht beachtet wurde, ist die Rolle von Aerosolen in der Elektrifizierung von Gewittern. Es wäre möglich, dass in einem trockeneren Klima mehr Schwebstoffe und Kondensationskeime auftreten und in weiterer Folge die Mikrophysik und Elektrifizierung der Wolken beeinflussen (vgl. Price, 2009: 483).

Neben Blitzen können natürliche Brände auch durch spontane Selbstentzündung entstehen. In manchen Ökosystemen mit hoher vegetativer Akkumulation können Pflanzen verrotten und vergären und in weiterer Folge dadurch Hitze erzeugen (vgl. Goudie, 1993).

3.4.2 Anthropogene Einflüsse

Heutzutage wird ein Großteil von Bränden durch Menschen verursacht. Dies geschieht entweder absichtlich, z.B. zur Nutzbarmachung von Land, oder unabsichtlich (z.B. fahrlässige Brandstiftung). Die beiden Begriffe „menschliche Unachtsamkeit“ und „Brandrodung“ beschreiben die zwei Seiten des anthropogenen Einflusses am passendsten.

a) Menschliche Unachtsamkeit

Durch menschliche Unachtsamkeit erzeugte Brände können verschiedene Ursachen haben: beispielsweise durch Wegwerfen von heißer Asche oder brennender Zigarettenstummel in den Papiermüll, offenes Feuer in Waldgebieten oder durch Feuerwerke. Oftmals kommt es

aber auch zu technisch bedingten Bränden, z.B. durch Kurzschlüsse. Dabei kann dem Menschen im Normalfall keine Schuld zugewiesen werden (vgl. Feuerwehr Mainz, o.J: 2f.).

b) Brandrodung

Der Großteil der durch Menschen verursachten Brände ist heutzutage jedoch auf gezieltes Abbrennen von Land und Wäldern zurückzuführen. Die beiden englischen Begriffe „slash and burn“ und „prescribed burning“ fassen dies gut zusammen. Während „slash and burn“ eher dem landwirtschaftlichen Sektor zur Nutzbarmachung von Land zuzuordnen ist, umfasst „prescribed burning“ das absichtliche, gezielte Abbrennen von Vegetation. Es gibt verschiedene Gründe für das gezielte Abbrennen. In Gegenden in denen Brände unterdrückt wurden, werden gezielte Brände eingesetzt um das natürliche Feuerregime wieder herzustellen. Dies kann je nach Ökosystem etwas Zeit und mehrere Feuer benötigen. Deswegen werden bei dieser Maßnahme auch nur Feuer geringer Intensität eingesetzt. In Gebieten, in denen viel Brennmaterial vorhanden ist und dies als Gefahr für einen Großbrand angesehen werden kann, wird auch dieses Material gezielt abgebrannt (vgl. ESA, 2002: 3 f.).

Bei der „slash and burn“ Bewirtschaftung wird die Vegetation in einem bestimmten Gebiet gezielt abgebrannt. Blätter werden ebenfalls in Brand gesetzt und die daraus resultierende Asche liefert wertvolle Nährstoffe für den Boden und die Agrargüter. Dieses Gebiet wird aber nur für einen relativ kurzen Zeitraum (ein paar Jahre bis die Fruchtbarkeit des Bodens abnimmt) bewirtschaftet und anschließend zurückgelassen. Dadurch kann sich die Vegetation im besten Fall wieder regenerieren, was aber auch bis zu zehn oder mehr Jahre dauern kann (vgl. Stief, 2012).

Diese Form der Agrarwirtschaft wird von etwa 200 bis 500 Millionen Menschen praktiziert, was etwa 7% der Weltbevölkerung entspricht. Sie ist deswegen so beliebt, da sie die Möglichkeit bietet in Gegenden Landwirtschaft zu betreiben, in denen es normalerweise aufgrund von dichter Vegetation, Bodenfruchtbarkeit, geringem Nährstoffgehalt im Boden, unkontrollierbarer Pestizide und anderen Gründen, nicht möglich wäre (vgl. Stief, 2012).

Natürlich sind mit der Brandrodung auch Probleme verbunden. Wenn sie in großem Umfang praktiziert wird oder wenn der Vegetation nicht genügend Zeit gegeben wird, um sich zu regenerieren, kann es zu einem zeitweisen oder permanenten Verlust der Vegetation kommen. Werden Felder, die nebeneinander liegen in kurzen Abständen nacheinander bewirtschaftet, werden Wurzeln vernichtet und Nährstoffe gehen verloren. Geht die ursprüngliche Fruchtbarkeit des Bodens ebenfalls verloren kann es zu Desertifikationsprozessen kommen und das Land wird unfruchtbar. Zudem kann es auch zu Biodiversitätsverlust kommen. Beim Abbrennen eines Areals werden Pflanzen vernichtet und dort lebende Tiere verscheucht. Geschieht dies in einem Bereich, in dem nur eine bestimmte Spezies vorkommt, kann dies zum Aussterben dieser Spezies führen (vgl. Stief, 2012).

Neben diesen Gründen gibt es noch eine weitere Anzahl von Gründen für das gezielte Abbrennen (vgl. USDA Forest Service Southern Region, 1989):

- Verbesserung der Habitats der Tierwelt
- Management konkurrierender Vegetationsspezies
- Kontrolle von Insekten, Pestiziden und Krankheiten
- Verbesserung des Futtermittels für Weidevieh
- Verbesserung des Erscheinungsbildes
- Verbesserung des Zugangs in dichte Gebiete

3.5 Feuer im Ökosystem

Brände können sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Natur haben. In manchen Ökosystemen spielen Brände eine wichtige ökologische Rolle, indem sie biogeochemische Kreisläufe aufrechterhalten. In den Savannen der Tropen und Subtropen beispielsweise gibt es jährlich oder in Intervallen mehrerer Jahre Brände. Diese Brände sind wichtig, damit das Grasland sich regenerieren kann und um dessen Wachstum zu fördern. Zudem erhalten sie die Habitatstruktur wildlebender Spezies und heimischer Arten aufrecht. Außerdem fördern solche Brände die Pflanzenproduktivität sowie Pflanzen- und Tierbiodiversität (vgl. Emergency Management Australia, 2000: 1).

Feuer kann aber auch extrem destruktiv auf Ökosysteme wirken. Die tropischen Regenwälder sind z.B. während extremer Dürreereignisse (während der El Niño-Jahre) sehr verwundbar. Die Regenwaldbäume müssen sich dabei vor Wasserverlust schützen, indem sie ihre Blätter abwerfen. Dadurch können mehr Sonnenstrahlen zum Waldboden durchdringen und die abgeworfenen Blätter trocknen. Diese werden dadurch leicht entzündbar. Folglich können Brände von landwirtschaftlichen Gegenden oder Weidelandbränden auf den Wald übergreifen, was zu Biodiversitätsverlust und/oder zu langzeitlicher Degradation führen kann. In den Jahren 1997/1998 beispielsweise wurden während des El Niño große Bereiche des Regenwaldes in Asien und Amerika durch Feuer zerstört. Ein Hauptgrund dafür waren absichtlich gelegte Feuer um Wald oder sekundäre Vegetation für die Landwirtschaft zu präparieren (vgl. Emergency Management Australia, 2000: 1).

3.5.1 Auswirkung auf Landschaft und Vegetation

Durch Waldbrände entstehen oftmals sogenannte Brandmosaik, die aus komplett verbrannten, teilweise verbrannten und nicht verbrannten Bereichen bestehen. Die unterschiedlichen Grade der Verbrennung ergeben sich durch verschiedene Einflussfaktoren, wie der Windrichtung, den täglichen Temperaturschwankungen, dem Feuchteanteil und der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der Vegetation. Aus einem Brandmosaik ent-

stehen unterschiedliche Wiederwüchse, welche wiederum ein Vegetationsmosaik erzeugen. Dabei werden auch verschiedene Haupttypen von Vegetationen ausgebildet. Das trifft beispielsweise auf manche Savannen, Graslandschaften mittlerer Breite und Buschländer (z.B. Garigue und Maquis im Mittelmeerraum oder Chaparral im Süd-Westen der Vereinigten Staaten) zu (vgl. Goudie, 1993: 38).

Brände tragen zudem zum Saataufgang bei. Die stärkere Keimung von „dormant seeds“ an kürzlich abgebrannten Chaparral-Standorten wurde beobachtet. Scheinbar benötigen manche der Samen von Chaparral-Spezies für deren Einkerbung Feuer (vgl. Goudie, 1993: 39).

Desweiteren verändert Feuer Die Qualität des Saatbodens. Wenn genügend Streu und Humus abgebrannt wird, können sich große Flächen reichhaltiger Asche, nackten Bodens oder dünnen Humus bilden. Manche Bäume, wie die Douglasie und der Riesenmammutbaum könne von solchen Saatböden profitieren. Manchmal löst Feuer die Ausgabe von Samen aus. Zudem scheint es manchmal die vegetative Reproduktion vieler holz- und krautartiger Spezies zu stimulieren. Feuer kann auch Insekten, Parasiten und Pilzbefälle kontrollieren. Dieser Prozess wird auch „sanitization“ genannt (vgl. Goudie, 1993: 39).

Feuer stimuliert auch den blüten- und fruchtbildenden Prozess vieler Büsche und Kräuter. Es modifiziert auch die physiochemische Umgebung der Pflanzen. Mineralisierende Elemente werden sowohl als Asche, als auch durch erhöhte Verwitterungsraten organischer Schichten freigesetzt. Zudem gibt es in Gebieten mit Feuer oftmals eine höhere Diversität von Spezies (vgl. Goudie, 1993: 39).

3.5.2 Effekte auf Böden

Feuer haben Auswirkungen auf Bodencharakteristik und Bodenerosion. Feuer wird oft dazu verwendet um gezielt Veränderungen in den Bodeneigenschaften hervorzurufen. Dabei will man Nährstoffe durch Feuereinsatz freisetzen. Die sich dabei bildende Asche hat ebenfalls einen Wert. Dies gilt vor allem für diejenigen, die Wanderwirtschaft auf der Basis von Brandrodung betreiben. Bei nachfolgender Kultivierung werden Nährstoffe ausgewaschen und es kommt zu schneller Erosion. Nachdem die Nährstoffe erschöpft sind, geben Landwirte bereits nach ein paar Jahren ihre Felder auf und erschließen neue Standorte. Feuer verändert schnell die Menge, Form und Verteilung von Pflanzennährstoffen in Ökosystemen. Verglichen mit einem „normalen“ biologischen Verfall von Pflanzenresten, setzen Brände schnell Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form frei. Die Mengen an Phosphor, Magnesium, Kalium und Kalzium, die durch Brandrodung in Wäldern und in der Buschvegetation freigesetzt werden, sind hoch, sowohl im Bezug auf die gesamte als auch die verfügbare Menge dieser Elemente im Boden. In Wäldern führen Brände oft dazu, dass der pH-Wert des Bodens um drei Einheiten oder mehr ansteigt. Dadurch wird der ehemals saure Boden basisch. Zu direktem Nährstoffverlust durch Brände kann es durch Verflüchtigung und durch konvektiven Aus-

tausch der Asche führen. Aber auch durch Abtrag der Asche durch Wassererosion und Winddeflation können wertvolle Stoffe verloren gehen. Durch die Entfernung von Bäumen in Wäldern nimmt auch die Bodentemperatur aufgrund fehlenden Schattens zu. Dadurch wird Humus oftmals schneller ab- als aufgebaut (vgl. Goudie, 1993: 159 f.).

Da durch Brände Vegetation verloren geht und somit der Boden freigelegt wird, kommt es auch leichter zu Bodenerosion. Bei Waldbränden kann es insbesondere in den ersten Jahren eines Brandereignisses zu erhöhtem Bodenverlust kommen. Verbrannte Wälder haben oftmals viel höhere Bodenverlustraten als geschützte Bereiche (vgl. Goudie, 1993: 170).

Wasserscheideexperimente in den Chaparral-Buschländern von Arizona, in denen Denudation durch Feuer üblich ist zeigten, dass dort, wo vor einem Brand die Erosionsverluste bei nur 43 Tonnen pro Quadratkilometer und Jahr lagen, diese nach einem Feuer bei zwischen 50 000 und 150 000 Tonnen pro Quadratkilometer und Jahr lagen (vgl. Goudie, 1993: 170).

Die Ursachen der Erosionen, die in Verbindung mit Bränden von Chaparral stehen, sind besonders interessant. Normalerweise gibt es eine deutliche nicht benetzbare Schicht in den Böden, die die Entstehung von Chaparral begünstigen. Diese Schicht setzt sich aus Bodenpartikeln zusammen, die von hydrophoben Substanzen bedeckt sind, welche von der Streu der Büsche stammen. Die Schicht wird normalerweise mit den oberen Teilen des Bodenprofils in Verbindung gebracht und baut sich mit der Zeit in nicht verbranntem Chaparral auf. Die hohen Temperaturen, die mit den Bränden in den Chaparral-Regionen einhergehen, bringen die hydrophoben Substanzen zum destillieren. In weiterer Folge kondensieren diese in tieferen Bodenschichten. Dieser Prozess endet in einer seichten, benetzbaren Schicht im Boden, welche über einer nicht benetzbaren Schicht liegt. Solche Bedingungen können insbesondere an steilen Hängen zu erheblicher Oberflächenerosion führen (vgl. Goudie, 1993: 170 f.).

In Gebieten mit Chaparral ist es möglich brandbedingte Sedimentzyklen vorherzusagen. Dieser Zyklus beginnt mit einem Feuer, welches das Buschwerk und das Wurzelnetz zerstört. Dadurch werden die Bedingungen des Oberbodens, wie bereits erwähnt, verändert. Nach dem Feuer ist bereits ein Niederschlagsereignis geringen Ausmaßes ausreichend, um extensive „sheet and rill erosion“ einzuleiten. Infolgedessen wird genügend Boden abgetragen um Vegetationsbedeckung zu verhindern. Bei einem größeren Niederschlagsereignis werden dann aufgrund geringer Vegetationsbedeckung heftige Hangrutschungen verursacht. Mit der Zeit erholt sich die Vegetationsbedeckung wieder eigenständig und die Erosionsrate nimmt wieder ab. Wenn jedoch erneut genügend Vegetation vorhanden ist um ein Brandereignis auszulösen, beginnt der ganze Prozess wieder von neuem (vgl. Goudie, 1993: 170 f.).

3.5.3 Feuer und Tiere

Auf Tierpopulationen können sich Feuer auf verschiedene Weisen auswirken. Während manche Tiere von Bränden profitieren, können sie anderen wiederum das Leben kosten.

Letzteres trifft vor allem auf kleine Tiere, Insekten und ältere und schwächere Individuen zu. Auf Habitate haben jedoch Brände im Vergleich zu Individuen mehr Einfluss. Größere Tiere haben zwar oft die Möglichkeit, Bränden zu entfliehen, jedoch können Populationen in den Monaten nach einem Brandereignis aufgrund von Nahrungsknappheit abnehmen. Zum einen zerstört das Feuer die Nahrung der Tiere direkt und zum anderen kommen viele der natürlichen Brände vor der Wintersaison vor, wenn Nahrung sowieso schon knapp ist (ESA, 2002: 2).

Von solchen Habitatsveränderungen profitieren wiederum andere Tiere. Plündernde Tiere finden mehr Futterquellen vor. Aufgrund der geringeren Waldbedeckung haben Raubtiere einen Vorteil gegenüber den Beutetieren, welche sich nicht mehr im Dickicht verstecken können. Viele Tiere profitieren auch von nährstoffreichem Neuwachstum. Manche Tiere wie zum Beispiel der Hirsch, essen sogar die nährstoffreiche Holzkohle und Asche. Auch Vögel können von Bränden profitieren. Für sie gibt es mehr Nahrung in Form von Samen und reichliche Nistplätze in Baumstumpfen (ESA, 2002: 2).

3.6 Brandbekämpfung und der Gebrauch von „wildland fire“ in den USA

3.6.1 Allgemeines

Jegliche beabsichtigte Maßnahmen der Feuerunterdrückung haben Auswirkungen auf die Vegetation im Ökosystem. Feuerunterdrückung kann die Nebenwirkungen von Bränden vergrößern. Studien haben gezeigt, dass starre Feuerschutzmaßnahmen oftmals unerwünschte Resultate erzielten. Als Folge betonen viele Förster die Notwendigkeit des „environmental restoration burning“. In den Nadelwäldern der mittleren und oberen Höhenlagen der Sierra Nevada-Bergen in Kalifornien beispielsweise gibt es seit 1890 Feuerschutz. Dadurch wurden die Bestände dichter, schattiger und weniger „park-like“ und Mammutbaumkeimlinge wurden weniger. Auswirkungen des Rückhalts von Feuer haben sich auch in geringeren Höhenlagen der semi-ariden Mittelmeer-Buschländer, den Chaparral, gezeigt. Die Vegetation wurde dichter, die Menge an Brennstoff stieg an, feuer tolerante Spezies siedelten sich an und die Vegetationsdiversität nahm ab. Dies führte zu einer Monotonie von alten Beständen, anstelle eines Mosaiks verschiedener zusammenhängender Stadien.

In Alaska wurden ebenfalls ungünstige Veränderungen der Vegetation durch Feuerunterdrückung beobachtet. Beim Ausschluss von Feuer aus Tiefländern kann sich ein isolierender Teppich aus Moos anhäufen und zu einer Vergrößerung der Permafrostschicht führen. Oberflächennaher Permafrost begünstigt das Wachstum von Schwarzfichten, einer langsam wachsenden Spezies mit nur geringem Holzwert. Im Kruger Nationalpark in Südafrika traten nach der Errichtung von Wildreservaten, nachdem das Land also unbewohnbar für Eingeborene und Jäger war, Feuer weniger oft auf. Als Folge dessen kam

es dort zu einem Zuwachs von Büschen wo ehemals Grasland dominierte. Dadurch verringerte sich jedoch die Belastbarkeit durch Weidetiere. Letzendlich wurde kontrolliertes Abbrennen als nötige Maßnahme eingeführt (vgl. Goudie, 1993: 37 f.).

3.6.2 Geschichte und Evolution des „wildland fire use“ in den USA

Diese Kapitel behandelt die historische Entwicklung des Gebrauchs von „wildland fire“ in den USA. Das Global Fire Monitoring Center (2010: 357) definiert „wildland fire“ als „Feuer in einer Landschaft mit naturnaher, natürlicher oder bewirtschafteter Vegetationsbedeckung“ welches weitgehend unerschlossen ist.

a) Einführung

Die Ureinwohner Nordamerikas waren die ersten Menschen die Feuerregime beeinflusst haben. Sie kontrollierten Feuer nahe ihrer Dörfer und nutzten es um die Produktion von Nahrungsgütern und Materialien für die Flechtarbeit zu verbessern. Ihr Einfluss war auf bestimmte Landschaften begrenzt und variierte je nach deren Lage. Es wurden hauptsächlich Gebiete nahe Wohnstätten verändert, entlegene Gebiete überließ man sich. Demnach blieben Feuerregime großer Gebiete vom Menschen unbeeinflusst (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 3 f.).

Als die Europäer in Nordamerika eintrafen, verursachten sie dramatische Veränderungen der Feuerregime. Sie holzten Wälder für die Landwirtschaft ab und bearbeiteten große Flächen von Graslandschaften. Holzurückstände fingen oft Feuer und rücksichtsloses Abbrennen führte in Gegenden und in Zeiten zu Bränden, in denen es Brände natürlichen Ursprungs zu dem damaligen Zeitpunkt nicht gegeben hätte. Auch wenn es keine „offizielle“ Brandschutzorganisation gab versuchte man lokal durch Menschen oder Blitzeinschläge verursachte Brände in der Nähe von Siedlungen zu löschen. Bis zu den späten 1800er Jahren als bundesstaatliche Gebiete zu Parks und Naturschutzgebieten erklärt wurden, gab es kein „wildland fire management“ (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 4).

b) 1872 – 1967: Die Zeit des Brandschutzes

1872 wurde der Yellowstone Nationalpark zum weltweit ersten Nationalpark erklärt. 1886 wurde der amerikanischen Armee die Verantwortung den Park zu beschützen übertragen. Die Armee fand zahlreiche Brände in entwickelten Gegenden vor, aber auch in Gegenden in denen es nicht sinnvoll gewesen wäre diese zu kontrollieren. Der leitende Offizier bestimmte, dass Feuer, die durch Menschen entlang von Straßen verursacht wurden, die größte Gefahr darstellten. Demnach versuchte man insbesondere diese Brände unter Kontrolle zu bringen. Jedoch gab es nicht genügend Leute um all diese Feuer zu bekämpfen und es wurden die ersten bewussten Entscheidungen getroffen, manche Feuer unkontrolliert brennen

zu lassen und andere zu kontrollieren. 1890 wurden der Sequoia, General Grant und Yosemite Nationalpark eingeführt und auch hier wurde die Brandbekämpfung angewandt. 1916 wurde der „National Park Service“ gegründet und übernahm die leitende Verantwortung von der US-Armee. Für die nächsten fünf Jahrzehnte blieb die Brandbekämpfung die einzige strategische Maßnahme (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 4).

1905 wurde der „U.S. Forest Service“ gegründet, dessen primäre Aufgabe es war, alle Feuer in den Waldreservaten zu bekämpfen die unter ihre Administration fielen. Bis 1910 etablierte sich der „U.S. Forest Service“ als führende Feuerkontrollorganisation. Das Ziel war die flächendeckende Brandbekämpfung. Zwischen 1916 und 1919 wurde von Roy Headley (stellvertretender Revierförster Kaliforniens) kurzzeitig ein Programm eingeführt, in dem Feuer geringer Intensität in entlegenen Gebieten nicht bekämpft werden sollte, es sei denn, es bestand die Gefahr, dass hochwertige Hölzer durch das Feuer zerstört würden. 1934 wurde von ihm und Elers Koch (Forstaufseher des „Lolo National Forest“) zudem vorgeschlagen, dass in entlegene Gebiete nicht das gleiche Maß an Feuerkontrolle angewandt werden sollte wie in belebteren Gebieten. Dieser Vorschlag wurde jedoch abgelehnt. Stattdessen verfolgte man die Strategie der Löschung aller Brände bis 10 Uhr der nächsten Brandperiode. Diese Strategie wurde bis in die 1970er Jahre verfolgt (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 4).

1964 wurde von George Briggs (stellvertretender Forstleiter des Yosemite National Parks) ein Feuer in 2860 m Höhe entdeckt, dass nur 0,04 ha Land in drei bis vier Tagen verbrannte. Ausgehend von dieser Beobachtung schlug er vor, dass alle Feuer die über 2438 m Höhe auftreten nicht bekämpft werden sollten, wenn eine Aufklärung und Evaluierung zeigten, dass die Feuer durch natürliche „fuel breaks“ zurückgehalten würden, nur wenig Brennmaterial vorhanden war und wenn nur kleinere Schäden geschehen würden. Obwohl eine verringerte Brandbekämpfung hauptsächlich aus Kostengründen empfohlen wurde, betonte er, dass natürliche Brände auch Vorzüge hätten (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 5).

c) 1968-1977: Die Versuchsjahre

1962 veranlasste der Innenminister ein Komitee, sich der Probleme im „wildlife management“ der Nationalparks anzunehmen. Das Komitee propagierte, dass Nationalparks als Ökosysteme geleitet werden sollten. Im Jahre 1968 verkündete der „National Park Service“ daraufhin, dass Feuer als ökologischer Prozess akzeptiert werden sollten. Feuer sollten sich ungestört ausbreiten können, solange es innerhalb der Brandmanagementeinheiten zurückgehalten werden konnte und Managementziele erreicht wurden (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 5).

Nachdem 1968 die Strategie geändert wurde, führten der Sequoia und Kings Canyon Nationalpark eine natürliche Feuermanagement Zone ein. Diese Zone wurde auch als die „Let Burn Zone“ bezeichnet und schloss Gebiete über 3000 m Höhe ein. Ausgenommen wurden

jedoch Gebiete entlang der Parkgrenze in denen es kontinuierlich Brennmaterial gab (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 5).

Der Saguaro Nationalpark war das nächste Gebiet, das 1971 ein „wildland fire use“ Programm einführte. Das Programm sah vor, dass alle natürlichen Feuer gelöscht werden sollten, außer diejenigen, die zwischen dem 1. Juli und 15. September auftraten und eine Reihe von Bedingungen erfüllten (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 5).

1972 begann der Yosemite Nationalpark mit seinem natürlichen Brandmanagementprogramm. Die natürliche Feuerzone wurde auf Flächen beschränkt, die in Gebieten oberhalb 2440 m lagen (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 5 ff.).

In der Gila Wildnis in New Mexico wurde als nächstes ein „wildland fire use“ Programm initiiert.

1978 beendete der „Forest Service“ die 10 Uhr-Regelung zu Gunsten einer neuen Strategie, welche den Nutzen von „wildland fire“ bestätigte (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 7 f.).

d) 1978-1989: Erneute Evaluierungen

Zwischen 1978 und 1988 gab es drei Ereignisse die eine bedeutende Veränderung der Brandbekämpfungspolitik herbeiführten: das Ouzel-Feuer im Rocky Mountain Nationalpark, die Feuer in und um den Yellowstone Nationalpark und das Canyon Creek Feuer in der Bob Marshall Wildnis im Lewis and Clark Nationalwald (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 8).

Der Feuermanagementplan für den Rocky Mountain Nationalpark wurde ursprünglich 1973 geschrieben und 1974 und 1975 abgeändert. Der Plan von 1977 sah eine vorgeschriebene natürliche Feuerzone über 3048 m Höhe vor. Hier galten die Risiken, die durch Feuer entstünden, als gering. Desweiteren wurde eine mäßige Risikozone festgelegt, in der Feuer nur brennen durften, wenn bestimmte vorgeschriebene Bedingungen eingehalten würden. Außerdem gab es eine hohe Risikozone, in der alle Feuer sofort bekämpft werden mussten. Am 19. August 1978 wurde das Ouzel-Feuer durch einen Blitz in der geringen Risikozone ausgelöst. Es wurde für über einen Monat lang überwacht, ehe es wegen starker Winde eine Gemeinde außerhalb der Parkgrenzen zu gefährden drohte. Nachdem das Feuer im Oktober unter Kontrolle gebracht wurde, wurden die Umstände, die das Ereignis umgaben, untersucht. Man kam zu dem Entschluss, dass der Feuerplan nicht sachgemäß umgesetzt wurde, dieser nicht die genauen ökologischen Informationen des Parks beinhaltete und äußere Betrachtungen nicht genügend beachtet wurden. Des Weiteren waren zu wenige Brandbekämpfungsressourcen verfügbar um das Feuer zu bekämpfen. Das Rocky Mountain Nationalpark-Programm wurde eingestellt (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 8).

1988 brannte ein Feuer im Yellowstone Nationalpark 562 310 ha Land nieder woraufhin es zu einer bedeutenden Kontroverse kam. 1972 wurde ein Entwurf geschaffen, der vorsah mehrere Feuer, die durch Blitze verursacht wurden, in entfernten Ecken des Parks im späten

Juni brennen zu lassen. Zum selben Zeitpunkt beobachteten die Leiter des „Forest Service“ der Absaroka-Beartooth-Wildnis im Norden vom Yellowstone Park das Storm Creek-Feuer. Ende Juli war es ungewöhnlich trocken und sehr windig, was die Manager beider Parks dazu veranlasste alle aktuelle brennenden Feuer und alle, die neu ausbrachen, zu bekämpfen. Feuer, die durch Menschen verursacht wurden, waren ein weiteres Problem. Das North Fork-Feuer beispielsweise, das die Old Faithful Village bedrohte, wurde durch eine Zigarette eines Holzfällers im angrenzenden Taghee-Nationalwald ausgelöst. 95% der verbrannten Fläche, wurden durch neun größere Feuer verbrannt. Sechs dieser Feuer wurden außerhalb des Parks ausgelöst und vier davon aufgrund menschlichen Verschuldens. Oftmals wurde das unverantwortliche Management in den Parks beschuldigt, was für den „National Park Service“ ein schlechtes Öffentlichkeitsbild hinterließ (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 8).

Zum selben Zeitpunkt, als es im Yellowstone Nationalpark brannte, brannte das Canyon Creek-Feuer in der Bob Marshall-Wildnis im Lewis and Clark-Nationalwald. Es brannte auch über die Wildnis heraus und verbrannte über 100 000 ha Land. Die Stadt Augusta in Montana wurde dadurch gefährdet und privater Besitz wurde beschädigt, ehe das Feuer bekämpft werden konnte (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 8).

Landwirtschafts- und Innenminister beriefen ein Team zur Untersuchung und Evaluierung der Brandbekämpfungspolitik des „National Park Service“ und des „Forest Service“. Das Team beteuerte erneut die Wichtigkeit des natürlichen Einflusses des Feuers. Sie empfahlen aber auch, dass Feuermanagementpläne verstärkt werden sollten, indem man eindeutige Entscheidungskriterien und Kompetenzen bestimmt. Zudem sollte die Zusammenarbeit zwischen den Ämtern verbessert werden. Bis neue Feuermanagementpläne entworfen wurden, stellten die Minister alle vorgeschriebenen natürlichen Feuerprogramme in den Park- und Wildnisbereichen ein (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 8 f.).

e) 1989 – 1999: Weiterentwicklung der Brandbekämpfungspolitik

Nach der Überprüfung im Jahre 1989 wurden langsam wieder die „wildland fire use“ Programme eingeführt. Die Programme des Yosemite, Sequoia und Kings Canyon Nationalpark sowie verschiedene andere nationale Wald- und Wildnisbereiche wurden 1990 wieder belebt, in anderen Gegenden dauerte es hingegen länger. Es gab eine komplette Überprüfung und Erneuerung der staatlichen Brandbekämpfungspolitik und –programme. „Wildland fire use“ wurde als legitimes Programm erneut bestätigt. Nach der Überprüfung nahm die Zahl der „Forest Service“ und „National Park Service“ zu, da auch die Anzahl an Feuern und verbrannten Gebieten anstieg (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 9).

Am 2. Juli 1994 wurde das South Canyon Feuer durch einen Blitz in einer Brandabsperrenzzone in Colorado ausgelöst. Innerhalb von zwei Tagen wurde begonnen das Feuer zu bekämpfen. Jedoch kam es zu einer Vergrößerung des Feuers und 14 Feuerwehrmänner kamen

ums Leben. Ein überbehördliches Team wurde zusammengestellt und veröffentlichte im August ihren Bericht. Sie gaben verschiedene direkte und mitwirkende Ursachen der Todesfälle an, wie das Feuerverhalten, das persönliche Profil der Männer und die angewandten Brandbekämpfungsmaßnahmen (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 9).

Dieser Zwischenfall führte zur ersten umfassenden Überprüfung und Erneuerung der staatlichen Brandbekämpfungspolitik seit Jahrzehnten. Der Bericht wiederholte ständig, dass die oberste Priorität aller staatlichen Brandbekämpfungsprogramme die Sicherheit der Feuerwehrmänner und der Öffentlichkeit darstelle. Im Hinblick auf vorgeschriebene Feuer und vorgeschriebene natürliche Feuer gab der Bericht an, dass „wildland fire“ genutzt werden sollten um Ressourcen zu schützen, zu bewahren und zu vergrößern und soweit es möglich ist, das Feuer in seiner natürlichen ökologischen Rolle zu belassen. Es gab zudem empfohlene Aktionen für die bundesstaatlichen Behörden zur Wiedereinführung von Feuer:

- 1) die Entwicklung von Kriterien und Bedingungen für ein Ökosystem um Feuer wieder einzuführen
- 2) die Implementierung von ökosystembasierten Feuermanagementprogrammen und
- 3) die Durchführung gemeinschaftlicher Feuer-Forschungs-Programme.

1998 riefen die Behörden eine Arbeitsgruppe zusammen um einen Leitfaden zu erstellen, der die Prozeduren, die zur Umsetzung der Strategien nötig waren, beinhaltete. In diesem Leitfaden wurde „wildland fire use“ als das genannt, was zuvor als „natural prescribed fire“ bezeichnet wurde (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 9).

Bis zum Ende des Jahrzehnts wurden die „wildland fire use“-Programme wieder belebt und den Leitern wurde die Unterstützung gegeben, die sie brauchten, um die Programme umzusetzen und weiter zu entwickeln. Zwischen 1996 und 1999 gab es im Bereich des „Forest Service“ durchschnittlich 122 Feuer und 23 000 ha verbranntes Land pro Jahr. Im Bereich des „National Park Service“ gab es im Schnitt 98 Feuer und 8 540 ha verbranntes Land pro Jahr (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 9 ff.).

f) 2000 – 2006: Die Zeit nach dem Cerro Grande-Feuer

Im Jahr 2000 wurde von Feuermanagern ein vorgeschriebenes Feuer im Bandelier National Monument entfacht und als „wildfire“ deklariert. Dieses weitete sich bis zum angrenzenden Santa Fe-Nationalwald aus. Das Feuer drang bis in das Los Alamos National Laboratory und die Stadt Los Alamos vor. Über 19 400 ha wurden verbrannt und 255 Wohnungen zerstört, ehe es gelöscht werden konnte. Es kam sofort zum öffentlichen Aufschrei woraufhin der „National Park Service“ eine Untersuchung veranlasste. Das Verschulden lag in der ungenauen Anwendung des vorgeschriebenen Abbrennens und der ungenügenden Ressourcen das Feuer erfolgreich zu bekämpfen (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 11).

Der Landwirtschafts- und Innenminister beriefen erneut eine Arbeitsgruppe zur Untersuchung ein. Die Gruppe fand heraus, dass die Strategie im Allgemeinen einwandfrei war und fuhr fort, eine solide Grundlage für „wildland fire management“ Aktivitäten zu liefern. Die Gruppe empfahl jedoch mehrere Änderungen gegenüber der Strategie von 1995. Die Aussage über den Gebrauch von „wildland fire“ blieb die gleiche wie 1995, ausgenommen mit einem Satz: „Use of fire will be based on approved Fire Management Plans and will follow specific prescriptions contained in operational plans“ (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 11).

Die Strategieempfehlungen von 2001 veranlassten ein überbehördliches Team den „wildland fire use“ Leitfaden zu überprüfen, der auf der Strategie von 1995 basierte. Das neue Dokument beinhaltet Richtung, Führung und Unterstützung zum Planen und Umsetzen von „wildland fire use“ für jede der fünf staatlichen „wildland fire agencies“ (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 11).

Die Umsetzung der „wildland fire use“ Programme ging in den fünf Behörden unterschiedlich schnell von statten. Statistiken zu „wildland fire use“ waren schwer zu erhalten, da jede Behörde die Feuer unterschiedlich meldet. Das National Interagency Fire Center hat „wildland fire“ Statistiken, die bis zum Jahre 1998 zurückreichen, zusammengestellt. Tabelle 4 zeigt für jede Behörde die Anzahl von „wildland fire use fires“ die auftraten und das abgebrannte Gebiet für den Zeitraum 1998 bis 2006 (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 11).

Tabelle 4: Anzahl der „wildland fire use fires“ und verbrannte Fläche der Feuer der fünf Landmanagementbehörden für den Zeitraum 1998-2006 (Quelle: Van Wagtenonk, 2007: 12)

Year	Bureau of Indian Affairs			Bureau of Land Management			Forest Service		
	fires	ha	ac	fires	ha	ac	fires	ha	ac
1998	4	3	8	25	0	0	255	19,600	48,432
1999	2	0	1	43	542	1,339	195	13,715	33,891
2000	0	0	0	0	0	0	60	15,333	37,889
2001	3	0	0	56	4,165	10,293	143	25,318	62,562
2002	0	0	0	26	3,706	9,158	269	16,177	39,974
2003	10	17	42	32	669	1,652	193	105,555	260,831
2004	0	0	0	45	2,912	7,195	196	13,532	33,437
2005	1	1,489	3,680	78	1,045	2,582	279	116,954	288,999
2006	1	42	105	12	1,225	3,026	264	58,354	144,196
Total	21	1,552	3,836	317	14,263	35,245	1,854	384,538	950,211
Average	2	172	426	35	1,585	3,916	206	42,726	105,579

Year	Fish and Wildlife Service			National Park Service			Total		
	fires	ha	ac	fires	ha	ac	fires	ha	ac
1998	0	0	0	73	5,059	12,501	357	24,662	60,941
1999	0	0	0	94	16,365	40,439	334	30,623	75,670
2000	0	0	0	22	622	1,538	82	15,956	39,427
2001	1	19	48	70	8,394	20,743	273	37,897	93,646
2002	0	0	0	111	3,291	8,131	406	23,174	57,263
2003	1	17,321	42,800	106	10,363	25,608	342	133,924	330,933
2004	3	119	295	65	32,946	81,410	309	49,508	122,337
2005	2	11,018	27,225	74	66,427	164,145	434	196,933	486,631
2006	2	124	307	79	7,046	17,412	358	66,792	165,046
Total	9	28,601	70,675	694	150,514	371,927	2,895	579,469	1,431,894
Average	1	3,178	7,853	77	16,724	41,325	322	115,894	286,379

g) Ausblick

Die Luftqualität stellt eine der größten Herausforderungen für Leiter der „wildland fire use“-Programme dar. Feuer, die wochen- oder sogar monatelang andauern, erzeugen Rauchwolken über bewohnten Gebieten und können dazu führen, dass Luftqualitätsstandards gebrochen werden. Demnach müssen aktive Maßnahmen getroffen werden (vgl. Van Wagtenonk, 2007: 14).

Da sich Ökosysteme mit dem Feuer entwickeln, entwickeln sich auch die Pflanzen und Tiere. Menschliche Aktivitäten haben viele Beziehungen zwischen Feuer und Pflanzen bzw. Tieren verändert. Der Ausschluss von Feuer könnte zur Ausrottung von Spezies führen, die an das Feuer angepasst waren. Zudem kann die Zersplitterung von Habitaten gepaart mit der Ansammlung von Brennmaterial dazu führen, dass Pflanzen und Tiere gegenüber Feuer eine höhere Vulnerabilität aufweisen. Daher ist äußerste Vorsicht geboten, wenn es zum einen

darum geht, Feuer als einen natürlichen ökologischen Prozess zu erhalten und zum anderen Pflanzen- und Tierspezies zu erhalten, die von Habitaten abhängig sind, die durch Feuer geschaffen werden (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 14).

Viele fremde Neophyten sind dem Feuer angepasst. Die Invasion von Pflanzen in das Ökosystem stellen für viele Feuermanager ein besonders ärgerliches Problem dar. Feuer verschärft oft die Pflanzeninvasion, die zu Änderungen der Feuerregime führen. Feuer kann aber auch ein wichtiges Werkzeug sein um Pflanzeninvasionen zu kontrollieren.

Feuer kann zudem Einflüsse auf nicht brennbare Artefakte haben (z.B. Bildzeichen, Felszeichnungen oder aus vulkanischem Gesteinsglas bestehende Werkzeuge). Hierbei können durch Feuer Informationen verloren gehen, indem beispielsweise Flüssigkeitszufuhrdaten innerhalb des Obsidian verändert werden, die die Schätzung des Datums der Herstellung zuließen. Auch Zeichnungen auf Felsen oder in Felsen eingeritzt können durch Feuer verdeckt oder zerstört werden. Demnach sollten Untersuchungen in „wildland fire use zones“ durchgeführt werden, um Pläne zu schaffen diese Ressourcen zu erhalten (vgl. Van Wagtendonk, 2007: 14 f.).

h) Fire Suppression Costs in the U.S.

Die Bekämpfung des Feuers ist immer mit erheblichen Kosten verbunden. Tabelle 5 zeigt die Ausgaben der staatlichen Feuerwehrmänner, die nur durch Brandbekämpfung zustande kamen. Zu den Behörden des Innenministeriums („DOI Agencies“) gehören das „Bureau of Indian Affairs“, das „Bureau of Land Management“, der „National Park Service“ und der „U.S. Fish and Wildlife Service“. Der „U.S. Forest Service“ ist ein Amt des Landwirtschaftsministeriums. Die jährlichen Feuer und verbrannten Acre beinhalten privates, staatliches (Bundesland) und bundesstaatliches Land. Abbildung 13 zeigt die aus Tabelle 5 entnommene Fläche und Kosten der Brandbekämpfung anhand eines Liniendiagramms. Es ist zu sehen, dass generell mit einer größeren zu bekämpfenden Fläche auch erhöhte Kosten einhergehen. Desweiteren ist ein Zuwachs bei den bekämpften Flächen zu beobachten. Wie in Abbildung 14 zu sehen ist eine erhöhte Anzahl an Feuern nicht notwendigerweise auch mit einer erhöhten Fläche an bekämpften Bränden verbunden. Im Jahr 2000 gab es z.B. vergleichsweise wenige Feuer (9225). Die bekämpfte Fläche war jedoch vergleichsweise hoch (7383493 Acre). In anderen Jahren wiederum gab es relativ viele Feuer, jedoch wurde nur eine relativ kleine Fläche bekämpft (z.B. 1998: 81043 Feuer und 1329704 Acre). Dafür könnte es zwei Gründe geben. Zum einen könnten die wenigen Feuer so intensiv und groß gewesen sein und haben somit eine vergleichsweise hohe Fläche verbrannt. Zum anderen könnten auch einige der Feuer bewusst nicht bekämpft worden sein, da es sich um kontrollierte Brände handelte.

Tabelle 5: Bundesstaatliche Feuerbekämpfungskosten 1985 – 2012 (Quelle: National Interagency Fire Center, 2013⁹)

Year	Fires	Acres	Forest Service	DOI Agencies	Total
1985	82,591	2,896,147	\$161,505,000	\$78,438,000	\$239,943,000
1986	85,907	2,719,162	\$111,625,000	\$91,153,000	\$202,778,000
1987	71,300	2,447,296	\$253,657,000	\$81,452,000	\$335,109,000
1988	72,750	5,009,290	\$429,609,000	\$149,317,000	\$578,926,000
1989	48,949	1,827,310	\$331,672,000	\$168,115,000	\$499,787,000
1990	66,481	4,621,621	\$253,700,000	\$144,252,000	\$397,952,000
1991	75,754	2,953,578	\$132,300,000	\$73,820,000	\$206,120,000
1992	87,394	2,069,929	\$290,300,000	\$87,166,000	\$377,466,000
1993	58,810	1,797,574	\$184,000,000	\$56,436,000	\$240,436,000
1994	79,107	4,073,579	\$757,200,000	\$161,135,000	\$918,335,000
1995	82,234	1,840,546	\$367,000,000	\$110,126,000	\$477,126,000
1996	96,363	6,065,998	\$547,500,000	\$153,683,000	\$701,183,000
1997	66,196	2,856,959	\$179,100,000	\$105,048,000	\$284,148,000
1998	81,043	1,329,704	\$306,800,000	\$109,904,000	\$416,704,000
1999	92,487	5,626,093	\$361,100,000	\$154,416,000	\$515,516,000
2000	92,250	7,383,493	\$1,076,000,000	\$334,802,000	\$1,410,802,000
2001	84,079	3,570,911	\$683,122,000	\$269,574,000	\$952,696,000
2002	73,457	7,184,712	\$1,279,000,000	\$395,040,000	\$1,674,040,000
2003	63,629	3,960,842	\$1,023,500,000	\$303,638,000	\$1,327,138,000
2004	65,461	8,097,880	\$726,000,000	\$281,244,000	\$1,007,244,000
2005	66,753	8,689,389	\$690,000,000	\$294,054,000	\$984,054,000
2006	96,385	9,873,745	\$1,501,337,000	\$424,058,000	\$1,925,395,000
2007	85,705	9,328,045	\$1,373,919,000	\$470,491,000	\$1,844,410,000
2008	78,979	5,292,468	\$1,458,805,000	\$392,783,000	\$1,851,588,000
2009	78,792	5,921,786	\$1,018,329,000	\$218,418,000	\$1,236,747,000
2010	71,971	3,422,724	\$897,686,000	\$231,214,000	\$1,128,900,000
2011	74,126	8,711,367	\$1,414,379,000	\$318,789,000	\$1,733,168,000
2012	67,774	9,326,238	\$1,436,614,000	\$465,832,000	\$1,902,446,000

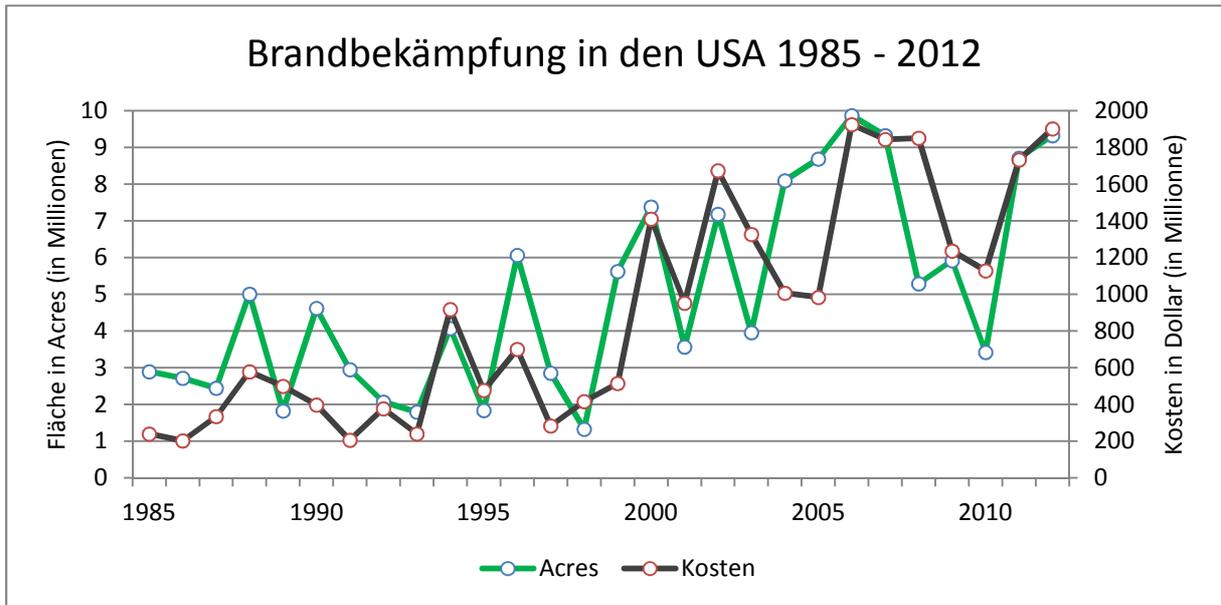


Abbildung 13: Brandbekämpfung in den USA 1985 – 2012 nach Flächen und Kosten (Datengrundlage: National Interagency Fire Center, 2013^o)

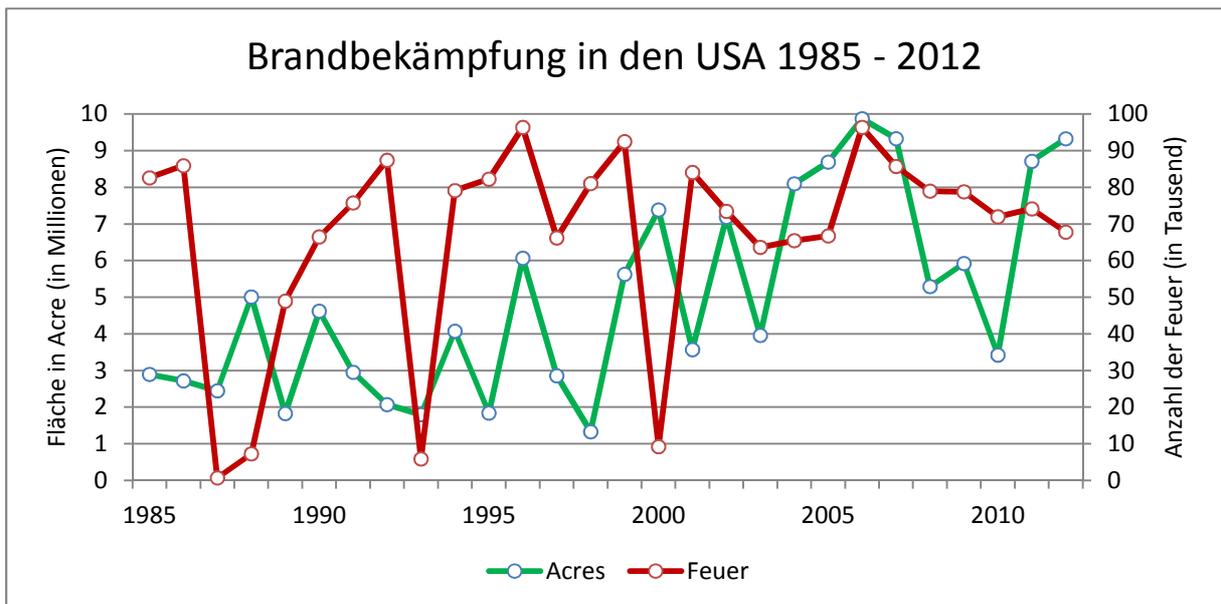


Abbildung 14: Brandbekämpfung in den USA 1985 – 2012 nach Flächen und Anzahl der Feuer (Datengrundlage: National Interagency Fire Center, 2013^o)

3.7 Feuerregime

Die „Ecological Society of America“ (2002:3) definiert Feuerregime als „[...] patterns of wildland fires that include factors such as frequency, extent, intensity, type, and season“. Feuerregime variieren je nach Ökosystem, da jedes Ökosystem eine andere Beschaffenheit hat, die von den Klimabedingungen, Vegetationstypen und Quelle der Entzündung bestimmt werden. Viele Eigenschaften der natürlichen Feuerregime wurden mit der Zeit durch den Menschen verändert. Durch die Vielfalt an Ökosystemen und Regimen, sollte es ebenso eine Vielzahl an Techniken und Praktiken geben, die in der Betriebspolitik angewandt werden. Daher ist das Verstehen von Feuerregimen in der Betriebspolitik von großer Wichtigkeit (vgl. ESA, 2002: 3).

„Fire regimes are a critical foundation for understanding and describing effects of changing climate on fire patterns and characterizing their combined impacts on vegetation and the carbon cycle [...]. In general a fire regime characterizes the spatial and temporal patterns and ecosystem impacts of fire on the landscape [...]“ (Sommers et al., 2011: 27). Der Vegetationstyp (oder das Ökosystem) und das Wetter bzw. Klima sind die zwei wichtigsten Faktoren die Feuerregime bestimmen. Die Geschichte des Feuers liefert Beweise vergangener Beziehungen zwischen Feuer und Klima. Diese zeigen deutlich, dass der Klimawandel die Häufigkeit und den Schweregrad von Bränden in vielen Regionen und Ökosystemen beeinflusst (z.B. aufgrund früherer Schneeschmelze oder längerer Dürreperioden). Zudem verändert der Klimawandel die Zunahme und das Wachstum existierender Vegetation, was zu einer Veränderung der Brennstoffstruktur und -menge führt (vgl. Sommers et al., 2011: 27).

3.7.1 Allgemeine Konzepte von Feuerregimen

Brände zeigen verschieden Verhaltensweisen und Charakteristiken auf. Diese hängen von verschiedenen Faktoren ab wie z.B. der Vegetationszusammensetzung und Brennstoffstruktur, Stadium der Sukzession nach einem vorherigen Brand oder vorheriger Störung, vergangenem Management, Klima und Wetter, Terrain und Landschaft. Das Konzept des Feuerregimes dient dazu, die Einflüsse dieser verschiedenen räumlichen und zeitlichen Muster von Bränden und Einflüsse von Bränden auf das Ökosystem auf landschaftlicher Ebene zu klassifizieren. Es ist wichtig historische und potentielle Feuerregime verschiedener Vegetationstypen und die Faktoren, die diese Feuerregime verändern können, zu verstehen. Dies ist notwendig um potentielle Interaktionen zwischen Feuer und Klima zu verstehen und zu prognostizieren. Das Klima beeinflusst direkt die Häufigkeit, Größe und den Schweregrad des Brandes, aber es beeinflusst auch das Feuerregime durch seinen Einfluss auf Vegetationswuchs, -struktur und -zusammensetzung (vgl. Sommers et al., 2011: 27).

Auf lokaler bis regionaler Ebene können Feuerregime zudem durch Geländeeigenschaften, Hangexposition, Managementregime, Landschaftsmuster und Zündstoffmenge beeinflusst werden. Feuerregime werden mindestens dadurch unterschieden wie oft Brände normalerweise vorkommen (Häufigkeit, Brandintervall, Brennzyklus) und durch Einschätzungen des Einflusses auf Ökosysteme (z.B. Mortalität des Kronendachs oder Oberflächenvegetation). Einige Feuerregimeklassifikationen beinhalten zusätzliche Eigenschaften, wie zum Beispiel Feuercharakteristik (z.B. Oberflächenfeuer, Kronenbrand, Bodenfeuer), übliches Ausmaß (Größe) des Feuers, Schweregrad des Feuers (Einfluss des Feuers auf das Ökosystem), Intensität des Feuers und weitere Verhaltensweisen des Feuers, Saisonalität, topographische Lage und der Grad der Variabilität der Feuercharakteristik innerhalb eines Ökosystems oder Feuerregimes (vgl. Sommers et al., 2011: 27).

3.7.2 Komponenten von Feuerregimen

Flannigan et al. (2000) nennen sechs Komponenten von Feuerregimen, nämlich Häufigkeit, Größe, Intensität, Saisonalität, Typ und Schweregrad. Einige dieser Komponenten haben eine wichtige ökologische Bedeutung. **Feuerhäufigkeit** kann z.B. den Lebenszyklus einzelner Individuen unterbrechen oder beenden. Wenn Feuer mehr oder weniger regelmäßig auftreten, profitieren davon die Organismen die sich besser daran anpassen können. Die **Größe** des Feuers bestimmt die Lückenhaftigkeit der Landschaft und die Distanz die Samen überwinden müssen, um sich zu regenerieren. Die **Feuerintensität** ist äquivalent zu der Menge an freigegebener Energie während eines Brandes. Innerhalb eines einzelnen Brandes kann diese u.a. je nach Brennmaterial und -ladung, Topographie, meteorologischen Einfluss und Eigenschaften vorheriger Störungen sehr unterschiedlich sein. Die **Saison**, in der im Jahr Brände auftreten ist eine bestimmende Größe für die darauf folgenden Zustände, welches Ökosystem sich nach einem Feuer entwickelt. Zudem kann der Zeitpunkt eines Brandes, durch unterschiedlichen Feuchtegehalt des Brennmaterials am Boden oder in der Baumkrone Einfluss auf die Intensität des Feuers haben. Saisonale phänologische Stadien der verbrannten Pflanzen bestimmen die Eigenschaften der vegetativen Reproduktion bzw. die der Saat und haben einen deutlichen Effekt auf die Struktur von Ökosystemen und Landschaften, die sich nach einem Feuer entwickeln. Der **Typ des Brandes** bezieht sich auf Kronen-, Oberflächen- und Bodenfeuer (siehe Kapitel 3.3), welcher stark durch Feuerintensität und die Eigenschaften des Brennmaterials (Struktur, Menge und Feuchte) bestimmt werden. Der **Schweregrad** des Feuers wird durch den Brennmaterialverbrauch bestimmt, insbesondere durch die Tiefe des Brandes in organischen Schichten der Bodenoberfläche. Daher ist dies eine wichtige Steuergröße von Ökosystemstrukturen nach einem Brand. Zudem hat der Schweregrad des Feuers Einfluss auf die Wurzeln und das Gewebe der Pflanzen, die Bodendiasporenbanken und den mikrobiellen Bestand des Waldbodens. Diese Komponenten von Feuerregimen sind wieder-

rum eng mit Wetter und klimatischen Bedingungen verknüpft. Feuerregime reagieren schnell auf Klimaänderungen. Durch veränderte klimatische Bedingungen in diesem Jahrhundert hätten veränderte Feuerregime wohl den unmittelbarsten Einfluss auf Ökosysteme (vgl. Flannigan et al., 2000: 221 f.).

3.7.3 Klassifizierung von Feuerregimen in den USA

Die allgemeinen zeitlichen und räumlichen Verhaltensmuster und die Auswirkungen von Feuer innerhalb eines bestimmten Vegetationstyps oder Ökosystems über mehrere Feuerzyklen (d.h. Jahrzehnte oder Jahrhunderte) hinweg bestimmen das Feuerregime für eine bestimmte Zeitspanne für das gegebene Ökosystem. Feuerregime dienen dazu, die jeweilige Rolle des Feuers in verschiedenen Ökosystemen zu vergleichen, den Grad der Abweichung von historischen Bedingungen zu beschreiben und um potentielle Auswirkungen von Managementaktivitäten, Klimaänderungen oder veränderter Muster von Entzündungen zu projizieren (vgl. Sommers et al., 2011: 28 f.).

In der Literatur gibt es eine Reihe von Feuerregimeklassifikationen für Nordamerika. Diese unterscheiden sich in der Anzahl an Feuerregimetypen, in den Charakteristiken, die verwendet werden, um die Klassifikationen zu entwickeln und den Typen von dargestellten Ökosystemen. Der Großteil der Klassifikationssysteme konzentriert sich primär auf Wälder und nur wenige beinhalten auch Graslandschaften, Wüstenvegetation, Buschökosysteme (wie z.B. Chaparral) oder Ökosysteme mit tiefen organischen Bodenbrennmaterialien (z.B. Torf) (vgl. Sommers et al., 2011: 30). Im Folgenden wird beispielhaft die LANDFIRE-Feuerregimeklassifikation vorgestellt.

LANDFIRE (Landscape Fire and Resource Management Planning Tools) „is a vegetation, fire, and fuel characteristics mapping and modeling system that is sponsored by the United States Department of the Interior (DOI) and the United States Department of Agriculture, Forest Service (USFS). LANDFIRE was initiated based on the need for consistent national geospatial data to support prioritization of hazardous fuel reduction, ecological conservation activities, and strategic resource management initiatives, fire management planning, as well as stewardship of public and private lands, and natural resource management.“ (SOMMERS et al., 2011: 33). Als die LANDFIRE Datenbestände und Modelle entwickelt und national in den letzten Jahrzehnten implementiert wurden, wurde es deutlich, dass diese Produkte zusätzlich zum Feuermanagement, zur Klimawandelforschung, zur Planung von Kohlenstoffbindung und öko-regionalen Bewertungen für eine weitere Reihe von Zwecken nützlich waren. Die teilnehmende Behörden haben sich dazu bereit erklärt die LANDFIRE Daten für die gesamte USA regelmäßig zu aktualisieren um die Verfügbarkeit aktueller und historischer Daten zu gewährleisten und die Verbesserung der Qualität der Datenprodukte auch zukünftig zu garantieren (vgl. Sommers et al., 2011: 33).

Karten und raumbezogene Datenbestände der Vegetation, des Brennmaterials und von Feuerregimen sind essentiell um ökologische Beziehungen zwischen „wildland fire“ und Landschaftsstruktur, -zusammensetzung und -funktion zu verstehen und zu modellieren und um die Gefahr und das Risiko das von „wildland fires“ ausgeht aus einer ökosystematischen Perspektive zu bewältigen. Vor LANDFIRE gab es keine standardisierten Methoden um diese Karten zu erstellen. Zudem waren räumliche Daten, die diese wichtigen Charakteristika von „wildland fire“ darstellen, in vielen Bereichen nicht vollständig. LANDFIRE bietet einen ganzheitlichen Ansatz um Vegetation, Brennmaterialien und Feuerregime kartographisch darzustellen. Dies geschieht auf der Basis von extensiven Feldbegehungen, Fernerkundung und „biophysical gradient modeling“ um voraussagende Landschaftskarten von Brennmaterialien und Feuerregimen zu kreieren (vgl. Sommers et al., 2011: 33). Abbildung 15 zeigt die LANDFIRE Feuerregimeklassifikation. In Tabelle 6 wird die Legende erläutert.

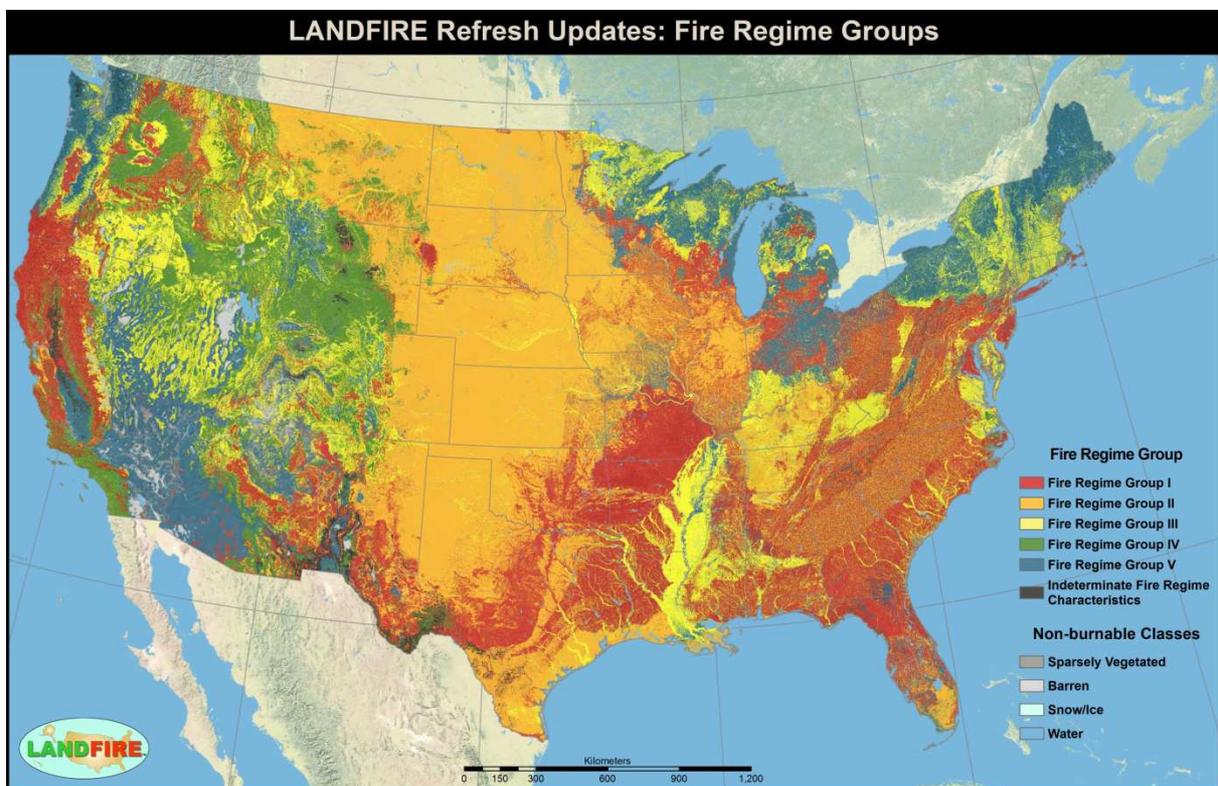


Abbildung 15: LANDFIRE Feuerregimeklassifikation (Quelle: LANDFIRE, 2008)

Tabelle 6: Erläuterung der Feuerregimegruppen (Quelle: Interagency Fire Regime Condition Class (FRCC) Guidebook Version 3.0 (2010) und Skinner (o.J.); eigene Darstellung)

Feuerregimegruppe	Häufigkeit	Schweregrad	Beschreibung des Schweregrades	Vegetationstypen
I	0 – 35 Jahre	gering / gemischt	Generell Feuer mit einem geringen Schweregrad, die weniger als 25 % der dominierenden Kronendachvegetation verdrängen; kann Feuer gemischten Schweregrades beinhalten die bis zu 75 % des Kronendaches verdrängen	Gelb-Kiefer, gemischter Nadelwald, Douglasie, Riesenmammutbaum, Eichenwälder
II	0 – 35 Jahre	Verdrängung	Generell Feuer mit einem hohen Schweregrad die mehr als 75% der dominierenden Kronendachvegetation verdrängen	Auen, Büsche, Sträucher
III	35 – 200 Jahre	gemischt / gering	Generell Feuer gemischten Schweregrades; kann auch Feuer geringen Schweregrades enthalten	Colorado-Tanne, Pracht-Tanne, feuchte gemischte Nadelbäume, amerikanisches Rotholz
IV	35 – 200 Jahre	Verdrängung	Feuer mit hohem Schweregrad	Chaparral, immergrüner Kiefer, Zypressen, Hemlocktannen, Douglasie, Küsten-Kiefer, Wacholder
V	> 200 Jahre	Verdrängung/ jeder Schweregrad	Generell Feuer mit einem Schweregrad der zur Verdrängung führt; kann jeden Schweregrad enthalten	Subalpine Vegetation, Wüsten, Regenwald
Indeterminate Fire Regime Characteristics	Vegetationstypen ohne definiertes Brandverhalten; Vegetationstypen mit einer extrem geringen Wahrscheinlichkeit zur Entzündung			
Sparsely Vegetated	spärlich bewachsen			
Barren	Ödland			
Snow/Ice	Schnee- oder eisbedecktes Land			
Water	Wasser			

3.7.4 Regionale Muster von Feuerregimen in den USA

Sommers et al. (2011:36 ff.) verweisen auf Malamud und Kollegen, die berichteten, dass die Größe von „wildfires“ und ihre Schweregradmuster deutliche regionale Unterschiede in den USA zeigen. Die Forscher klassifizierten die „wildfire“ Daten in verschiedene Ökoregionen (= Gebiete die eine gemeinsames Klima, eine gemeinsame Vegetation und Höhenlage besitzen). Sie verglichen verbrannte Fläche, Anzahl der Feuer und das Wiederkehrintervall und erstellten Karten um die „wildfire“ Muster und Gefahren für die gesamten USA darzustellen. Im Westen der USA gibt es demzufolge einen höheren Anteil an großen Feuern als im Osten (Abbildung 16 A). Die längsten Feuerintervalle treten zudem im pazifischen Nordwesten, um die Great Lakes und im extremen Nordosten (d.h. Vermont, New Hampshire und Maine) auf

(Abbildung 16 B). In den östlichen USA und in manchen Gebirgsbereichen des inneren Westens treten auch längere Feuerintervalle auf. Die im Allgemeinen geringere Feuerhäufigkeit und das seltener Auftreten von großen Feuern in vielen Regionen der östlichen USA könnten auf die größere Bevölkerungsdichte und erhöhte Fragmentierung der Wälder zurückzuführen sein. Die Unterschiede unter den Ökoregionen sind jedoch am ehesten auf natürliche Auslöser zurückzuführen. Regelmäßige Dürren, entzündbare Vegetation und steiles Terrain, schaffen Bedingungen für große „wildfire“ im Westen der USA. Die geringere Feuerhäufigkeit im Osten ist demnach auf beträchtliche Niederschläge im Sommer und die Dominanz von Laubbäumen in weiten Teilen des Ostens zurückzuführen.

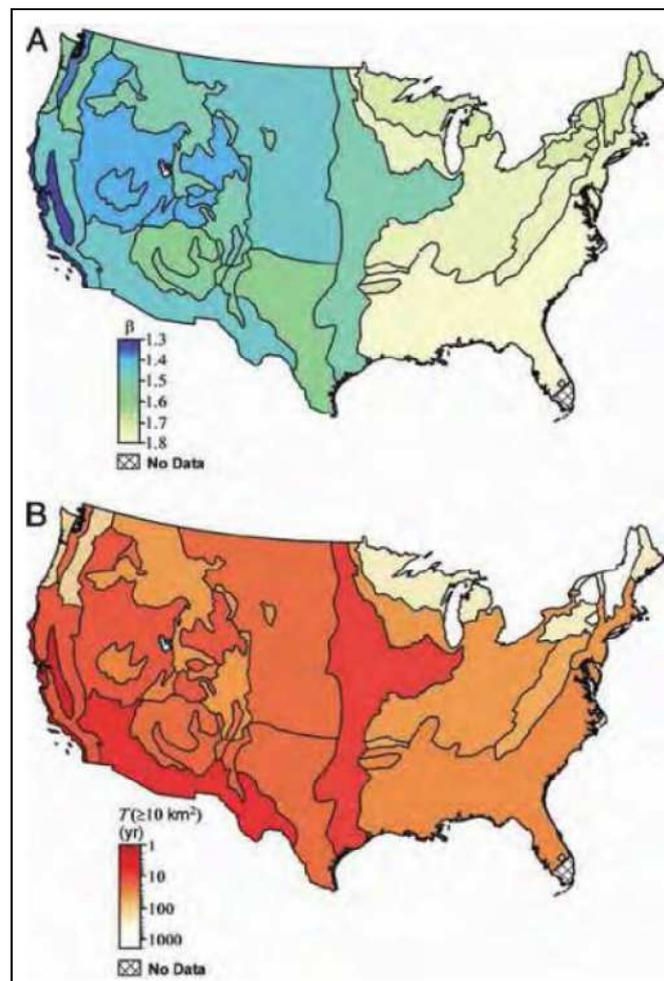


Abbildung 16: „Wildfire“ Muster in den USA für die Jahre 1970 bis 2000 für die U.S. Forest Service „wildfire“, klassifiziert nach Ökoregion. (A) Verhältnis großer zu kleiner „wildfire“. Je dunkler die Farbe, desto höher die Anzahl großer Feuer. (B) Wiederkehrintervall von Feuer. Dunkelrot bedeutet „hohe Gefahr“, weiß bedeutet „geringe Gefahr“ (Quelle: SOMMERS et al., 2011: 40)

3.7.5 Anthropogenbedingte Änderung von Feuerregimen

Seit ihrer frühesten Geschichte haben Menschen Feuerregime verändert. In den letzten Jahrzehnten kam es zu weiteren rapiden Änderungen von Feuerregimen. Verlagerungen menschlicher Bevölkerungen, teilweise mit Bevölkerungswachstum verbunden, sozioökonomische Faktoren und Landmanagement waren dabei wesentliche Ursachen (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 598).

Während des 20. Jahrhunderts haben sich Feuerregime in gemäßigten Breiten in verschiedener Weise verändert, sowohl im Bezug auf Ökosystemcharakteristik als auch im Bezug auf Landnutzungsänderungen. Im Mittelmeerraum in Europa, führte die Industrialisierung zu einer Abwanderung der ländlichen Bevölkerung hin zu Industriezentren. Dadurch kam es zu plötzlichen Aufgabern von Farmen und einer Verringerung des Drucks auf die Viehwirtschaft. Die veränderte Landnutzung gepaart mit einem Wachstum von Baumpflanzungen hat die Anhäufung von Brennstoff stark erhöht. Diese Ansammlung von Brennstoff führte zu großen Bränden, was sich auch in dem Anstieg der Menge jährlich verbrannter Fläche in den letzten Jahrzehnten widerspiegelt. Im gleichen Zeitraum kam es in den Wäldern im Westen der USA zu einem gefährlichen Anstieg von Brennmaterial. Dieser war auf die sehr effektive Brandbekämpfungsstrategie zurückzuführen. Gemeinsam mit fragwürdigen Abholzungspraktiken kam es zu einer ungewöhnlich hohen Akkumulierung von Brennmaterial. Ehemalige Feuerregime die sich durch eine hohe Frequenz und einen geringen Schweregrad auszeichneten wurden durch solche ersetzt, die sich durch eine geringe Frequenz und einer sehr hohen Intensität von Kronenbränden auszeichneten, was jedoch untypisch für das dortige Ökosystem war. Im Gegensatz dazu führte die Feuerbekämpfung im Osten der USA zum einem Rückgang von Eichen und Kiefern und zu einer Verbreitung von mesophytischen Harthölzern, wodurch sich Brennbarkeit und Feueraktivität verringerten (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 598).

Im selben Zeitraum kam es in Europa, Nordamerika, Australien und andernorts zu einer Ausweitung urbaner Gebiete in Waldgebieten. Dadurch wurden mehr Zündquellen (Brandstiftung oder Versehen) erzeugt und mehr Menschen wurden Feuern ausgesetzt. Besonders in Gegenden, in denen sich Bevölkerungen ausweiteten und in denen sehr intensive Kronenfeuer vorkommen, kam es immer wieder zu verheerenden Folgen (z.B. in Griechenland, Kalifornien, Chile und Australien) (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 598).

Die Ausweitung der Bevölkerung in diesen feueranfälligen Kronenfeuer-Ökosystemen hatte auch unerwünschte Einwirkungen auf natürliche Ressourcen. Vor allem das Buschland im westlichen Nordamerika war davon stark betroffen. Obwohl in diesen Regionen Feuerbekämpfung ausgeübt wurde, gab es hier häufiger Feuer, teilweise aufgrund vermehrter menschlicher Auslöser. Diese Ökosysteme reagieren sensibel auf Feuer mit kurzen Wiederkehrintervallen und wandelten sich vom ursprünglichen Buschland hin zu einjährigen Gras-

landschaften. Dies geschah in weiten Teilen des „Great Basin“, welches nun von aufdringlichen Dach-Trespen dominiert wird und in Kalifornien, wo große Landschaftsteile von verschiedenen fremdartigen einjährigen Gräsern und Stauden dominiert werden. Der anthropogene Einfluss bei dem ursprüngliche Vegetation durch fremdartige ersetzt wurde führte zu einer Destabilisierung der Ökosysteme. Änderungen der Vegetation können u.a. zum Verlust von Habitaten, zu einer Verdrängung funktioneller Pflanzen und zu einem Rückgang des Kohlenstoffspeicherpotentials führen (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 599).

In vielen tropischen Wäldern gab es seit dem letzten glazialen Maximum größtenteils keine Feuer. Die Menschen fanden jedoch heraus, dass durch die Öffnung der Beschirmung der Bäume die oberflächigen Brennmaterialien trocknen können und Feuer zur Entwaldung genutzt werden könnten. Durch Entwaldung weitet sich das Potential für Agrar- und Forstwirtschaft eines Gebietes aus. Dabei wird jedoch auch der Kohlenstoffhaushalt beeinflusst. Durch diese Landmanagementpraktiken und extreme Dürren, die in Verbindung mit dem El Niño stehen, kam es zu massiven Verlusten von bewaldeten Gebieten, wie die deutlichen Verluste des Feuers in Indonesien im Jahre 1997 zeigten. Die Feuer in Indonesien brachten „wildfires“ in einen globalen Kontext. Während der Brände verdoppelte sich der in die Atmosphäre emittierte Kohlenstoffdioxidgehalt und erreichte den bis dato höchsten Stand. Kohlenstoffemissionen dieser Feuer entsprachen 13 bis 40 % der globalen durchschnittlichen Emissionen, die aus fossilen Brennstoffen entstehen, obwohl sie aus einem relativ kleinen Teil der Erde kamen. Diese großen Mengen an Kohlenstoff entwichen jedoch nicht nur aus verbrannten Bäumen, sondern stammten auch von verbranntem Torf (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 599).

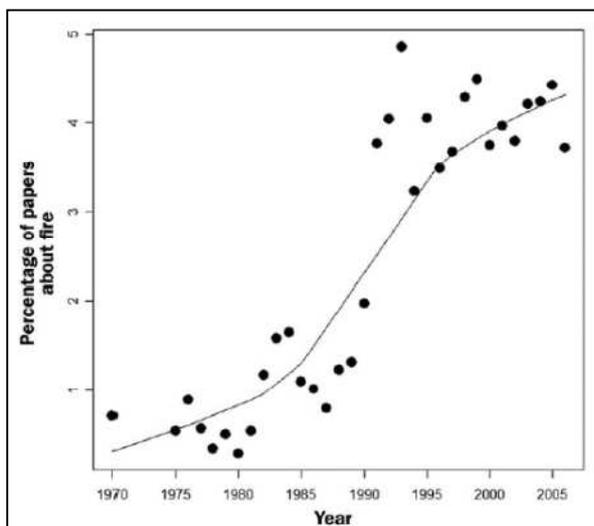


Abbildung 17: Anteil wissenschaftlicher Artikel in Fachzeitschriften zur Ökologie mit Bezug zum Feuer für den Zeitraum 1970 bis 2006. Das „International Journal of Wildland Fire“ wurde nicht mit einbezogen, da dieses erst ab 1991 existierte und somit die Kurve hier verfälscht hätte. Die Kurve stellte eine nichtparametrische Glättung dar (Quelle: Pausas und Keeley, 2009: 599).

1988 gab es eines der größten Feuer in jüngster Vergangenheit. Das Feuer im Yellowstone-Nationalpark dauerte über drei Monate an und verbrannte über 1 400 000 ha. Trotz den hohen Investitionen in die Feuerbekämpfung (120 Millionen Dollar und 25 000 Feuerwehrmänner) wurde das Feuer erst Mitte September gelöscht, als es anfang zu schneien. Das Feuer im Yellowstone-Nationalpark war ein natürliches Ereignis, welches in diesen Ökosystemen nur alle 200 bis 300 Jahre auftritt (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 599).

Es war eines der ersten Feuer, das weltweit in den Medien behandelt wurde. Dieses und die Buschfeuer in Australien im Jahre 1983 haben

die Problematik der „wildfire“ vielen Wissenschaftlern und Landbewirtschaftern erst bewusst gemacht. In Folge dieser Ereignisse wurde die Wissenschaft des Feuers immer bedeutender (Abbildung 17) und es kam zu Änderungen des Verständnisses von Feuer als natürlicher Prozess im Ökosystem. Wie diese verschiedenen Studien zeigen, hinterließen Menschen weltweit ihre Spuren in natürlichen Feuerregimen (vgl. Pausas und Keeley, 2009: 599).

4. Einfluss des Klimas auf Brandereignisse im Allgemeinen

In Kapitel 3.2 wurde bereits auf das Brandverhalten eingegangen und es wurden einige Faktoren genannt, die Intensität und Ausbreitung des Feuers beeinflussen. Von den genannten Faktoren stellen Temperatur, Feuchte (bzw. Niederschlag) und der Wind Klimaelemente dar. Der primäre meteorologische Einflussfaktor auf Brände auf globaler Skala stellt im Allgemeinen die Temperatur dar. Die relative Feuchte, die selbst stark durch die Temperatur bedingt ist, stellt den zweitwichtigsten Faktor dar, der die Brandgefahr beeinflusst. Auf globaler Ebene lässt sich über die Richtung und das Ausmaß der Änderungen dieser Faktoren bessere Aussagen treffen als über das Ausmaß von Niederschlagsänderungen und Windgeschwindigkeiten. Über Änderungen von Windverhältnissen (Richtung, Stärke, Geschwindigkeit) lässt sich am wenigsten aussagen. Es scheint jedoch den geringsten Einfluss auf Änderungen des Brandrisikos zu haben (vgl. Caesar und Golding, 2011: 26; Gillett et al., 2004: 2).

4.1 Temperatur

Kapitel 2.4 behandelte bereits Temperaturänderungen. Aufgrund veränderter Temperaturen wird projiziert, dass die Brandgefahr in den meisten Teilen der Erde im Vergleich zu heute zunehmen wird. Ein Großteil der Zunahme ist auf erhöhte Temperaturen zurückzuführen, die zu erhöhten täglichen Maximaltemperaturen und verringerter relativer Luftfeuchte führen. Erhöhte Windgeschwindigkeiten und verringerter Niederschlag tragen in manchen Regionen ebenfalls zu einer Erhöhung des Brandrisikos bei. Der prognostizierte Anstieg der Brandgefahr wird in manchen Regionen jedoch aufgrund erhöhten Niederschlags oder erhöhter relativer Luftfeuchte und verringerter Windgeschwindigkeiten abgeschwächt (vgl. Caesar und Golding, 2011: 26).

Neben diesen allgemeinen Aussagen von Caesar und Golding (2011) gibt es eine Reihe von Studien, die sich mit dem Einfluss der oben genannten Klimafaktoren auf Brände und auf die Brandgefahr befassen. Bei der Recherche solcher Studien fällt auf, was bereits oben genannt wurde. Die Temperatur stellt den wichtigsten Einflussfaktor dar. Dementsprechend liegt das Hauptaugenmerk vieler Studien gerade auf diesem Klimaelement. In verschiedenen Studien wird auch immer wieder ganz allgemein auf eine globale Erwärmung und die damit verbundene erhöhte Häufigkeit von Bränden, den erhöhten Schweregrad von Bränden und die erhöhte Gefahr von Feuerausbrüchen verwiesen (z.B. Carvalho et al., 2011: 5545; Podur und Wotton, 2010: 1301; Wastl et al., 2012: 12).

Aber auch auf regionaler Ebene wird immer wieder der Einfluss projizierter steigender Temperaturen untersucht. In Portugal führt z.B. die globale Erwärmung zu einer erhöhten Brandaktivität und in weitere Folge zu einer Zunahme der dadurch verbrannten Flächen (vgl. Carvalho et al., 2011: 5545). In weiten Teilen des Mittelmeerraums projizieren Giannakopoulos

et al. (2009: 209) für den Zeitraum 2031-2060 einen durchschnittlichen Anstieg der Temperaturen von 2°C. Aufgrund dessen steigt auch das Brandrisiko in dieser Region. Im Allgemeinen ist dieses im Sommer höher, mit dem höchsten Risiko im August im Inland der nördlichen Mittelmeerregion. Die Balkanstaaten, Maghreb, das nördliche Adriagebiet, zentrales Spanien und die Türkei stellen dabei die anfälligsten Regionen dar. Auch im Süden von Frankreich, jedoch nur im August und September, kommt es zu einer starken Erhöhung des Brandrisikos (vgl. Giannakopoulos et al., 2009: 219).

Die globale Erwärmung findet nicht überall auf der Erde gleichmäßig statt, sondern variiert deutlich zwischen verschiedenen Regionen. Aufgrund verschiedener Rückkopplungsmechanismen (z.B. schmelzende Eiskappen und Gletscher, Vegetationsänderungen etc.) wird in den höheren Breitengraden und in Gebirgsregionen, wie z.B. den Alpen in Europa, eine stärkere Erwärmung erwartet (vgl. Wastl et al., 2012: 1). Demnach wird in manchen Gegenden der Alpen ebenfalls eine Zunahme der Brände aufgrund erhöhter Temperaturen projiziert (vgl. Wastl et al., 2012: 12).

Pitman et al. (2007: 396) bestätigen ebenfalls den bereits erwähnten geringeren Einfluss von Windgeschwindigkeiten. Der deutliche Anstieg der Brandgefahr in Wäldern und Graslandschaften in Australien bis zum Jahr 2050 bzw. 2100 geht vor allem von erhöhten Temperaturen und Änderungen der relativen Feuchte aus. In Kanada konnten zudem Podur und Wotton (2010: 1301) und Gillett et al. (2004: 1) eine Erhöhung des Schweregrads des Feuerwetters und der Länge der Brandsaison aufgrund erhöhter Temperaturen (und der damit verbundenen erhöhten Evapotranspiration) und veränderter Niederschlagsmuster feststellen. Diese Studien stehen beispielhaft für zahlreiche Untersuchungen. Wie man jedoch sieht, haben alle diese Studien eines gemeinsam, nämlich die erhöhte Brandgefahr aufgrund steigender Temperaturen.

4.2 Niederschlag und relative Feuchte

Die relative Feuchte und der Niederschlag stellen ebenfalls wichtige Klimaelemente dar, die die Brandgefahr beeinflussen. Die Atmosphäre enthält immer einen gewissen Feuchtegehalt in Form von Wasserdampf. Die Menge an Feuchte, die in der Atmosphäre vorhanden ist, beeinflusst den Feuchtegehalt des Brennmaterials. Je geringer die relative Feuchte ist, desto eher kann ein Feuer ausbrechen und umso heftiger kann dieses brennen. Die Feuchte im Brennmaterial absorbiert Wärme und verringert die Intensität des Feuers. Wenn die relative Feuchte also gering ist, kann die Feuchte aus dem Brennmaterial besser evaporieren. Ein höherer relativer Feuchtegehalt erschwert dies. Im Allgemeinen ist die relative Feuchte am frühen Morgen, bevor die Sonne aufgeht, am höchsten und am frühen Nachmittag am geringsten. Dies ist auf die Änderung der relativen Feuchte bei steigenden Temperaturen zurückzuführen. Wenn sich die Luft erwärmt, weitet diese sich aus und kann mehr Feuchte

halten. Die eigentliche Menge an Feuchte hat sich dadurch zwar nicht verändert, jedoch ist diese über einem größeren Gebiet verteilt. Der prozentuale Anteil der Feuchte in der Luft ist gering. Globale Niederschlagsänderungen und Änderungen des Feuchtegehalts der Atmosphäre wurden ebenfalls in Kapitel 2.4 besprochen.

Niederschlagsänderungen sind jedoch meist nicht so eindeutig zu bestimmen wie Temperaturänderungen. Niederschlagsänderungen sind stark regional abhängig, wobei es in manchen Regionen zu einem Anstieg und in anderen Regionen zu einer Abnahme des Niederschlags kommt. Zusätzlich unterliegt dieser auch noch einer starken saisonalen Variabilität. Dies erschwert die Bestimmung des Einflusses von Niederschlagsänderungen auf die Brandgefahr (vgl. Bergeron et al., 2010: 1134; Giannakopoulos et al., 2009: 219).

Jedoch gibt es auch hier zahlreiche Studien, die den Einfluss dieser beiden Klimaelemente untersuchen. Reinhard et al. (2005: 1) entdeckten in ihrer Studie einen Zusammenhang zwischen einer erhöhten Periode von niederschlagsfreien Tagen und einem Rückgang der relativen Feuchte und einem Anstieg des Risikos für Waldbrände.

Die jährliche Menge und der Zeitpunkt des Niederschlags, insbesondere in den Monaten vor der Brandsaison, können ebenfalls einen starken Einfluss auf die anschließende Feueraktivität haben. Dies steht oftmals in enger Verbindung mit der Ansammlung von feinem trockenem Brennmaterial, das zu Feuerausbrüchen führen kann (vgl. Ganteaume und Jappiot, 2013: 83). Gaunteaume und Jappiot (2013: 76) stellten zudem einen Zusammenhang erhöhter verbrannter Flächen und trockenerer Bedingungen fest.

Wastl et al. (2012: 10) konnten in Teilen Süddeutschlands hingegen einen Zusammenhang eines Anstiegs von Niederschlägen und einer Abnahme der Brandgefahr feststellen.

Pitman et al. (2007: 383) berichten in ihrer Studie, dass das Brandrisiko in weiten Teilen Australiens, auf ansteigende Temperaturen und auf die Verringerung der relativen Feuchte zurückzuführen ist.

Carvalho (o.J.: 244) verweist ebenfalls auf einen Anstieg der Brände in Portugal im Sommer, wenn die relative Luftfeuchte und die Feuchte des Brennmaterials gering ist. Im Frühling konnte hingegen eine leichte Abnahme der Brände festgestellt werden, aufgrund des tendenziell erhöhten Niederschlags in dieser Jahreszeit.

Ein erhöhter Niederschlag kann jedoch unter Umständen zu einer erhöhten Brandgefahr führen. Das kann dann geschehen, wenn erhöhte Niederschläge das Vegetationswachstum begünstigen. Folgt daraufhin eine Trockenphase steht mehr verfügbares Brennmaterial zur Verfügung und führt, bei anhaltenden Trockenphasen, somit zu einem erhöhten Brandrisiko (vgl. Van der Werf et al., 2008: 4).

Auch diese Studien wurden hier nur exemplarisch ausgewählt und sollen die theoretischen Überlegungen bestätigen.

4.3 Wind

Wind hat im Allgemeinen durch seinen anfachenden Effekt Einfluss auf das Brandverhalten. Er kann zudem seine Richtung und Intensität während des Tages verändern. Diese Änderungen können sehr abrupt sein und unvorhersehbare Konsequenzen nach sich ziehen. Wind stellt zudem mehr Sauerstoff für den Verbrennungsprozess zur Verfügung und verringert die Brennstoffeuchte durch eine Erhöhung der Evaporation. Außerdem können von Wind verlagerte Funken auf anderes Brennmaterial gelangen, das dann Feuer fängt (vgl. Auburn University, o.J.).

IPCC (2007^a: 8) berichtet, dass sich die Westwinde der mittleren Breiten seit den 1960er Jahren in beiden Hemisphären verstärkt haben. Desweiteren gab es in den Tropen und Subtropen Änderungen der Windmuster. Für die Änderungen von Windmustern waren mit einer Wahrscheinlichkeit von über 66% anthropogene Antriebskräfte verantwortlich. Mit derselben Wahrscheinlichkeit nehmen auch zukünftige Spitzengeschwindigkeiten von tropischen Zyklonen (Taifune und Hurrikans) zu. Dies sind jedoch alles großskalige Phänomene, anhand derer die Entwicklung von Winden auf kleiner Maßstabsebene und deren Einflüsse auf Feuer nicht erklärt werden können. Insgesamt ist es schwer, einen Trend in der Änderung von Windverhalten festzustellen, wie dies zum Beispiel bei den Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen der Fall ist. Es gibt über das Windverhalten und dessen Einfluss auf Brände wenn überhaupt nur wenige Studien, die dies im Detail behandeln, da beobachtete Langzeitwerte von regionalen Windmustern sehr selten sind.

5. Klimawandel und Brände in den USA

Dieses Kapitel behandelt den Klimawandel und dessen Einfluss auf Brände in den USA seit den 1980er Jahren. Anhand von Diagrammen, Karten und Statistiken soll hier im Weiteren ein möglicher Zusammenhang zwischen Temperatur- und Niederschlagsänderungen und Änderungen von Brandvorkommen in den USA im Zeitraum 1980 bis 2012 dargestellt werden. Zunächst wird erläutert wieso die USA für diese Untersuchungen gewählt wurden und geeignet sind. Anschließend wird vorgestellt, was zu dieser Thematik bereits in der Fachliteratur behandelt wurde. Dabei werden exemplarisch anhand von Fallstudien Ergebnisse präsentiert. Anschließend werden die Brandereignisse in den USA im Zeitraum 1980 bis 2012 analysiert. Es wird zunächst die verwendete Datengrundlage und Methodik vorgestellt. Anschließend werden Ergebnisse zu Brandstatistiken in den USA dargestellt. Desweiteren werden Temperatur- und Niederschlagsänderungen während des Untersuchungszeitraumes aufgezeigt. Anschließend werden Brandereignisse und Temperatur- und Niederschlagsänderungen zusammenhängend diskutiert und interpretiert. Das abschließende Unterkapitel soll zudem einen Ausblick bieten wie sich zukünftige Klimaänderungen auf Brandereignisse in den USA auswirken könnten. Dafür werden Ergebnisse von verschiedenen Studien aus der Fachliteratur präsentiert.

5.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Bundesstaaten des Kernlandes der Vereinigten Staaten. Alaska und Hawaii wurden aufgrund unzureichender Daten bewusst nicht in die Analyse integriert. Das Kernland der USA liegt zwischen dem 26. und 49. nördlichen Breitengrad und dem 67. und 125. westlichen Längengrad (Google Earth, 2013). Aufgrund seiner Größe und Lage weisen die USA ein äußerst vielfältiges Klima auf (Abbildung 18). Die Südoststaaten der USA weisen im Allgemeinen ein gemäßigtes, immer feuchtes Klima mit heißen Sommern auf (Cfa). Im mittleren Westen bis zur Atlantikküste herrscht ein kaltes, humides Klima mit warmen bis heißen Sommern (Dfb / Dfa). Der Südwesten der USA ist im Allgemeinen von einem ariden Steppen- und Wüstenklima geprägt (BWh, BSk, BSh). Zur kalifornischen Pazifikküste hin findet man ein gemäßigtes Klima mit trockenen, warmen bis heißen Sommern vor (Csa / Csb). Im Nordosten dominiert ein kaltes, humides Klima (Dfb). Aufgrund der vielen Klimazonen der USA stellen diese ein interessantes Untersuchungsgebiet dar. Somit können Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf Brandereignisse, in verschiedenen Klimazonen der USA, untersucht werden. Ein zweiter wesentlicher Grund für die Wahl des Untersuchungsgebietes war die Datenverfügbarkeit. Die für den Untersuchungszeitraum notwendigen Daten über Brände, Temperaturen und Niederschläge, sind alle im Internet frei verfügbar.

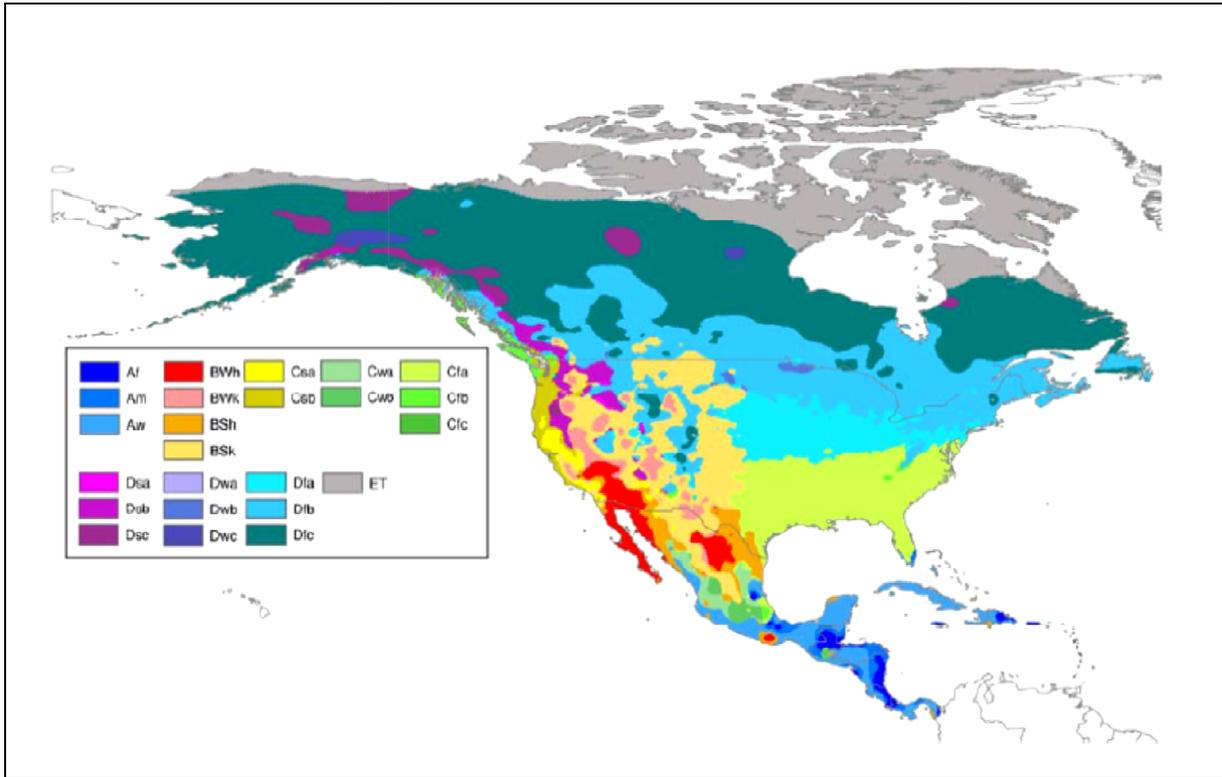


Abbildung 18: Karte der Klimatypen in Nordamerika (Quelle: Peel et al., 2007: 1639)

Tabelle 7: Beschreibung der Köppen Klimasymbole und die dazugehörigen Kriterien. „MAP = mean annual precipitation, MAT = mean annual temperature, T_{hot} = temperature of the hottest month, T_{cold} = temperature of the coldest month, T_{mon10} = number of months where the temperature is above 10, P_{dry} = precipitation of the driest month, P_{sdry} = precipitation of the driest month in summer, P_{wdry} = precipitation of the driest month in winter, P_{swet} = precipitation of the wettest month in summer, P_{wwet} = precipitation of the wettest month in winter, $P_{threshold}$ = varies according to the following rules (if 70% of MAP occurs in winter then $P_{threshold} = 2 \times MAT$, if 70% of MAP occurs in summer then $P_{threshold} = 2 \times MAT + 28$, otherwise $P_{threshold} = 2 \times MAT + 14$). Summer (winter) is defined as the warmer (cooler) six month period of ONDJFM and AMJJAS“ (Peel et al., 2007: 1636) (Quelle: Peel et al., 2007: 1636)

1st	2nd	3rd	Description	Criteria*
A			Tropical	$T_{cold} \geq 18$
	f		- Rainforest	$P_{dry} \geq 60$
	m		- Monsoon	Not (Af) & $P_{dry} \geq 100 - MAP/25$
	w		- Savannah	Not (Af) & $P_{dry} < 100 - MAP/25$
B			Arid	$MAP < 10 \times P_{threshold}$
	W		- Desert	$MAP < 5 \times P_{threshold}$
	S		- Steppe	$MAP \geq 5 \times P_{threshold}$
		h	- Hot	$MAT \geq 18$
		k	- Cold	$MAT < 18$
C			Temperate	$T_{hot} > 10$ & $0 < T_{cold} < 18$
	s		- Dry Summer	$P_{sdry} < 40$ & $P_{sdry} < P_{wwet}/3$
	w		- Dry Winter	$P_{wdry} < P_{swet}/10$
	f		- Without dry season	Not (Cs) or (Cw)
		a	- Hot Summer	$T_{hot} \geq 22$
		b	- Warm Summer	Not (a) & $T_{mon10} \geq 4$
		c	- Cold Summer	Not (a or b) & $1 \leq T_{mon10} < 4$
D			Cold	$T_{hot} > 10$ & $T_{cold} \leq 0$
	s		- Dry Summer	$P_{sdry} < 40$ & $P_{sdry} < P_{wwet}/3$
	w		- Dry Winter	$P_{wdry} < P_{swet}/10$
	f		- Without dry season	Not (Ds) or (Dw)
		a	- Hot Summer	$T_{hot} \geq 22$
		b	- Warm Summer	Not (a) & $T_{mon10} \geq 4$
		c	- Cold Summer	Not (a, b or d)
		d	- Very Cold Winter	Not (a or b) & $T_{cold} < -38$
E			Polar	$T_{hot} < 10$
	T		- Tundra	$T_{hot} > 0$
	F		- Frost	$T_{hot} \leq 0$

5.2 Aktueller Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden exemplarisch aktuelle Ergebnisse zum Stand des Klimas und des Klimawandels und dessen Einfluss auf Brände in den USA präsentiert. Diese Ergebnisse basieren auf beobachteten Veränderungen jüngster Vergangenheit. Prognosen zukünftiger Klimaänderungen und deren Einflüsse auf Brände in den USA werden eigenständig in Kapitel 5.8 behandelt.

5.2.1 Temperatur und Niederschlag

In Kapitel 2.4 wurden bereits globale Klimaänderungen präsentiert. Im Folgenden werden etwas detaillierter Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den USA untersucht. Der vierte Sachstandsbericht vom IPCC beinhaltet kontinentale Temperaturänderungen. Demnach stieg die Temperatur in Nordamerika seit dem Beginn der Temperatureaufzeichnungen an (Abbildung 19).

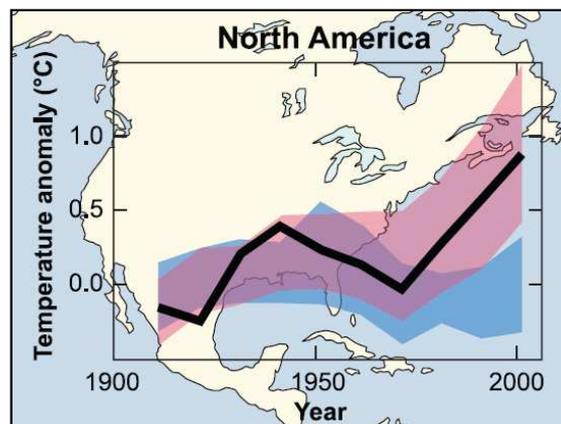


Abbildung 19: Temperaturänderungen in Nordamerika für den Zeitraum 1906 – 2005 im Vergleich zum Zeitraum 1901 – 1950 (Quelle: IPCC, 2007²: 11)

Karl et al. (2009: 27 ff.) befassten sich hingegen umfassender mit dem Einfluss des globalen Klimawandels in den USA. Die Durchschnittstemperatur ist demnach in den Vereinigten Staaten in den vergangenen 50 Jahren um mehr als 2 °F ($1\text{ °F} \triangleq 0,556\text{ °C}$) angestiegen und wird voraussichtlich weiter ansteigen. In den Jahren 1993 bis 2008 war die Temperatur im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1979 in den meisten Gebieten der USA um 1 bis 2° F wärmer (Abbildung 20) (vgl. Karl et al., 2009: 28). Bei dieser Darstellung sollte jedoch auf die untersuchten Zeiträume verwiesen werden. Die Basisperiode beträgt nur 18 Jahre (1961 bis 1979) und die durchschnittlichen Änderungen beziehen sich auf den Zeitraum 1993 bis 2008, was 15 Jahren entspricht. Wie in Kapitel 2.1.1 erwähnt wurde, wird ein Klima gewöhnlich für einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren bestimmt. Demnach sollten Untersuchungen bezüglich Klimaänderungen mindestens einen Zeitraum von 30 Jahren umfassen.

Brandereignisse werden des Weiteren durch klimatische Extremereignisse geprägt. Hierbei sind Dürren von zentraler Bedeutung. Dürren unterliegen einer starken regionalen Variabilität. In weiten Teilen des Südosten und des Westen der USA nahm die Häufigkeit von Dürren, koinzident mit steigenden Temperaturen, in den letzten 50 Jahren zu. In anderen Regionen wie zum Beispiel im mittleren Westen und den Great Plains nahm die Häufigkeit von Dürren hingegen ab. Insgesamt kam es aufgrund steigender Temperaturen zu strengeren und ausgedehnteren Dürreperioden. Die Zunahme und Ausweitung strenger bis extremer Dürren

wäre, ohne den Anstieg des Niederschlags im gesamten Staatsgebiet, sogar noch um etwa 30 % höher gewesen (vgl. Karl et al., 2009: 33).

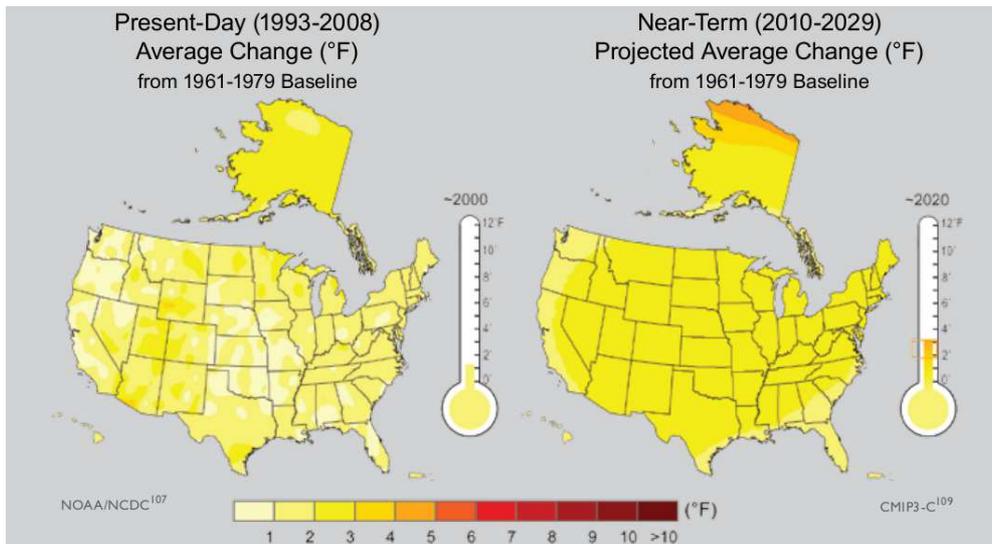


Abbildung 20: Temperaturänderung zwischen 1993 und 2008 (links) bzw. 2010 und 2029 (rechts) im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1979.

In den meisten Regionen Nordamerikas kam es zudem zu einem Anstieg der Niederschläge. Der Südwesten bildet hierbei eine Ausnahme. Hier kam es zu einer Abnahme der Niederschläge (Abbildung 21). (vgl. IPCC, 2007^a: 257)

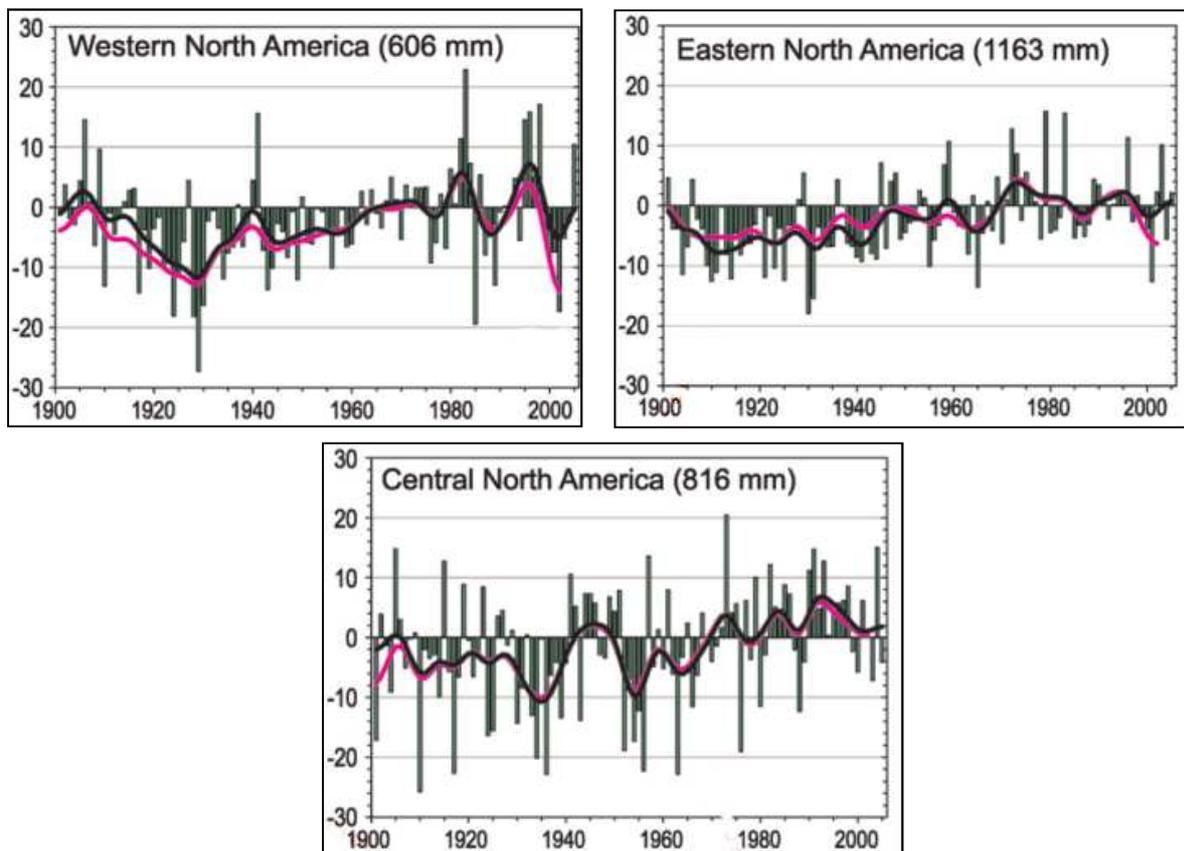


Abbildung 21: Niederschlagsentwicklung in verschiedenen Regionen Nordamerikas. Die Säulen geben die Abweichungen in % vom langjährigen Mittel 1961 – 1990 an (Quelle: IPCC, 2007^a: 257)

Karl et al. (2009: 30) untersuchten ebenfalls die Niederschlagstrends in den USA. Demnach nahm der Niederschlag in den USA, in den vergangenen 50 Jahren, um etwa 5% zu. Im Allgemeinen wird prognostiziert, dass in den nördlichen Gegenden mehr Niederschlag fallen wird und in den südlichen Gebiete, insbesondere im Westen, weniger (Abbildung 22). Karl et al. (2009) erwähnen jedoch nicht auf welche Basisperiode sich diese Änderungen beziehen.

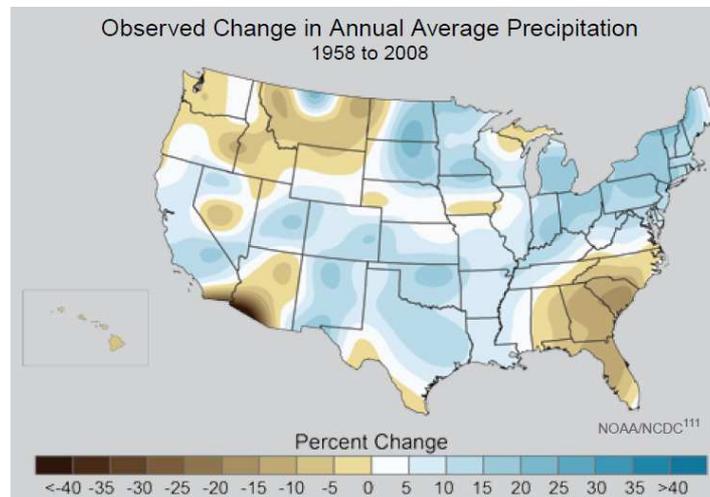


Abbildung 22: Beobachtete Änderungen des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags für den Zeitraum 1958 bis 2008 (Quelle: Karl et al., 2009: 30)

Im Gesamten hat der Niederschlag in den USA zwar zugenommen, jedoch gibt es bedeutende saisonale und regionale Unterschiede. Im Nordosten, in großen Teilen der Great Plains und des mittleren Westen wurden fast über das ganze Jahr hinweg positive Niederschlagstrends beobachtet. Niederschlagsrückgänge gab es in weiten Teilen des Südosten (außer im Herbst) und im Nordwesten (außer im Frühling). Weiterhin nahm im Allgemeinen der Niederschlag im Sommer und Herbst im Südwesten ab. Im Winter und Frühling nahm der Niederschlag in Staaten wie Kalifornien und Nevada zu (Karl et al., 2009: 30).

Des Weiteren gab es in den USA eine ansteigende Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen. Die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen war im Wesentlichen für den Großteil des festgestellten erhöhten Gesamtniederschlags in den Staaten, in den letzten 50 Jahren verantwortlich. Näher betrachtet gab es in den vergangenen 30 Jahren geringe Änderungen oder einen Rückgang von leichten und moderaten Niederschlägen, während starke Niederschlagsereignisse zunahm. Während den vergangenen 50 Jahren, gab es die größten Anstiege von Starkniederschlagsereignissen im Nordosten und mittleren Westen. Es kam jedoch auch in andere Regionen der USA vermehrt zu Starkniederschlagsereignissen. Während der Gesamtniederschlag in den USA im vergangenen Jahrhundert um etwa 7 % zu nahm, nahm das obere 1 % der heftigsten Niederschlagsereignisse hingegen um fast 20 % zu. (Karl et al., 2009: 32).

5.2.2 Brände

Flannigan et al. (2000: 222 f.) untersuchten Brände in den USA für den Zeitraum 1989 bis 1998. In diesem Zeitraum gab es in den USA jährlich schätzungsweise 100 000 Brände mit einer Gesamtgröße von 3 300 000 Acre ($\approx 1\,335\,462$ ha). Innerhalb dieser Zeitspanne gibt es eine hohe jährliche Variabilität von Brandereignissen. 1992 zum Beispiel, brannten Flächen einer Größe von insgesamt 1 000 000 Acre ab. Im Jahr 1996 zum Beispiel verbrannten Flächen von 6 500 000 Acre Größe. Die meisten der verbrannten Flächen lagen im Westen der USA (inklusive Alaska) und im Südosten. Die meisten Brände geschahen im Südwesten und Südosten im Mai und Juni, im Nordwesten und Alaska im Juli und August. Ein Großteil der Brände werden von Menschen verursacht, sei es absichtlich oder aus Versehen. Aus der Sicht der Brandbekämpfung stellen Brände, die durch Blitze verursacht werden, die größte Gefahr dar. Die Zeit die es benötigt diese Brände zu entdecken und auf sie zu reagieren ist ein signifikanter Faktor. Diese Brände brechen oftmals in abgelegenen, teilweise schwer zu erreichenden, Gebieten aus. Statistisch gesehen ist ein relativ kleiner Prozentsatz von Bränden für den Großteil der verbrannten Fläche verantwortlich. Zum Beispiel sind 1% aller „wildfire“ in den westlichen USA für 98% der verbrannten Fläche verantwortlich. Von einem historischen Standpunkt betrachtet scheint jedoch die momentane Menge an Bränden, im Vergleich zu den letzten 500 Jahren, relativ gering zu sein.

Des Weiteren untersuchten Karl et al. (2009:82) die Brandereignisse im Westen der USA. Hier hat sowohl die Häufigkeit von großen Waldbränden, als auch die Länge der Waldbrand-saison in den vergangenen Jahrzehnten signifikant zugenommen. Dies ist vor allem auf die frühere Schneeschmelze im Frühjahr und die höheren Temperaturen im Frühling und Sommer zurückzuführen. Diese Veränderungen des Klimas, führten zu einer Verringerung der Luftfeuchte, wodurch Vegetation austrocknete und als Brennmaterial dienen konnte. Auch in Alaska hat die Anzahl an großen Bränden in den vergangenen Jahrzehnten um mehr als das Doppelte zugenommen. Dafür waren ebenfalls zu einem großen Maß die erhöhten Temperaturen verantwortlich. Etwa 38 % des Anstiegs jährlich, zwischen 1950 und 2003, verbrannter Fläche war hier auf die hohen Temperaturen im Juni zurückzuführen.

Auch Westerling et al. (2006: 941) untersuchten Brandereignisse in den USA. Sie erstellten eine umfassende Datenbank von Bränden in den westlichen USA, die seit 1970 stattfanden. Diese verglichen sie mit hydroklimatischen Daten und Daten bezüglich der Landoberfläche in dieser Region. Mitte der 1980er Jahre nahm die Feueraktivität plötzlich und deutlich zu. Innerhalb bewaldeter Gebiete kam es zu einer Zunahme von Bränden mit einer Größe von über 400 ha. Zudem stellten sie einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Feuern und der regionalen Frühlings- und Sommertemperaturen fest. In heißeren Jahren kam es demgemäß öfters zu Bränden als in kühleren Jahren (Abbildung 23 A).

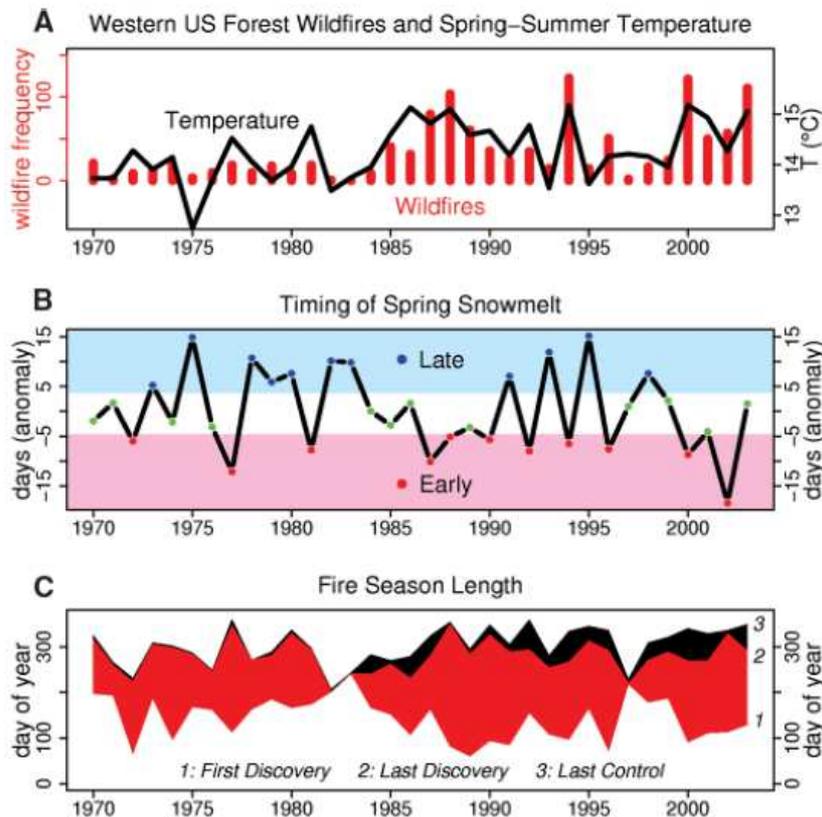


Abbildung 23: (A) Brandhäufigkeit in den westlichen Wäldern der USA im Zeitraum 1970 – 2003 (schwarze Linie) und die jährliche Durchschnittstemperatur von März – August (rote Balken); (B) Zeitpunkt der Schneeschmelze; (C) Länge der Brand-saison (= Zeit zwischen dem ersten entdeckten und gemeldeten Brand und dem letzten Kontrollzeitpunkt) (Quelle: Westerling et al., 2006: 941).

Desweiteren nahm die Länge der Brandsaison („wildfire season“) in den 1980ern zu. Die durchschnittliche Länge der Feuersaison (Zeitpunkt zwischen dem ersten entdeckten, gemeldeten Brand und dem letzten Kontrollzeitpunkt) nahm im Zeitraum 1987 bis 2003, im Vergleich zum Zeitraum 1970 bis 1987, um 78 Tage (64 %) zu (Abbildung 23 C). Die größte Zunahme der Brandaktivität fand in den nördlichen Rocky Mountains statt. 60 % aller großen Brände traten hier auf. Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen Brandaktivität und einer früheren Schneeschmelze im Frühling festgestellt werden. In Jahren, in denen es eine frühere Schneeschmelze gab, ereigneten sich insgesamt 56 % der Brände und verbrannten 72 % der Fläche. In Jahren mit späterer Schneeschmelze traten hingegen nur 11 % der Brände auf, die nur 4 % der insgesamt verbrannten Fläche ausmachten (Abbildung 23 B) (vgl. Westerling et al., 2006: 941).

Des Weiteren konnten Litschert et al. (2012: 124) zwischen 1930 und 2006 eine Zunahme von Bränden in der Ökoregion der südlichen Rocky Mountains feststellen. Zudem nahm hier seit den 1970er Jahren die Zahl großer Feuer zu.

Bachelet et al. (2007: 1) konnten in ihren Untersuchungen einen Rückgang von „wildfire“ seit 1950 in den USA feststellen. Während die Anzahl an Bränden jedoch abnahm, nahm die Größe der Brände hingegen zu. Hauptursache für die Zunahme von großen Feuern war dem-

nach die Brandbekämpfung. Dadurch kam es zu einer Akkumulation von Vegetation und somit zu einer Zunahme potentiell verfügbaren Brennmaterials. In Wäldern, in denen es hingegen keinen Eingriff vom Menschen gab, konnte eine Zunahme von Bränden beobachtet werden.

5.2.3 Blitze

Das National Lightning Detection Network von Vaisala (2013) erstellte für den Zeitraum 1997 bis 2010 eine Karte der USA, auf der die Blitzdichte pro Quadratkilometer gesehen ist (Abbildung 24). Die meisten Blitze treten demnach im Südosten der USA auf, mit der höchsten Anzahl an Blitzen in Florida. Die wenigsten Blitzeinschläge geschahen im Westen der USA, mit den wenigsten Einschlägen an der Pazifikküste. Auf der Karte lässt sich ein generelles Muster erkennen. Von Florida ausgehend wird die Anzahl an Blitzeinschlägen nach Norden und Westen hin immer geringer. Die durchschnittliche Menge an Blitzen, die in einem Gebiet auftreten, variiert jedoch signifikant von Jahr zu Jahr (vgl. Vaisala, 2013).

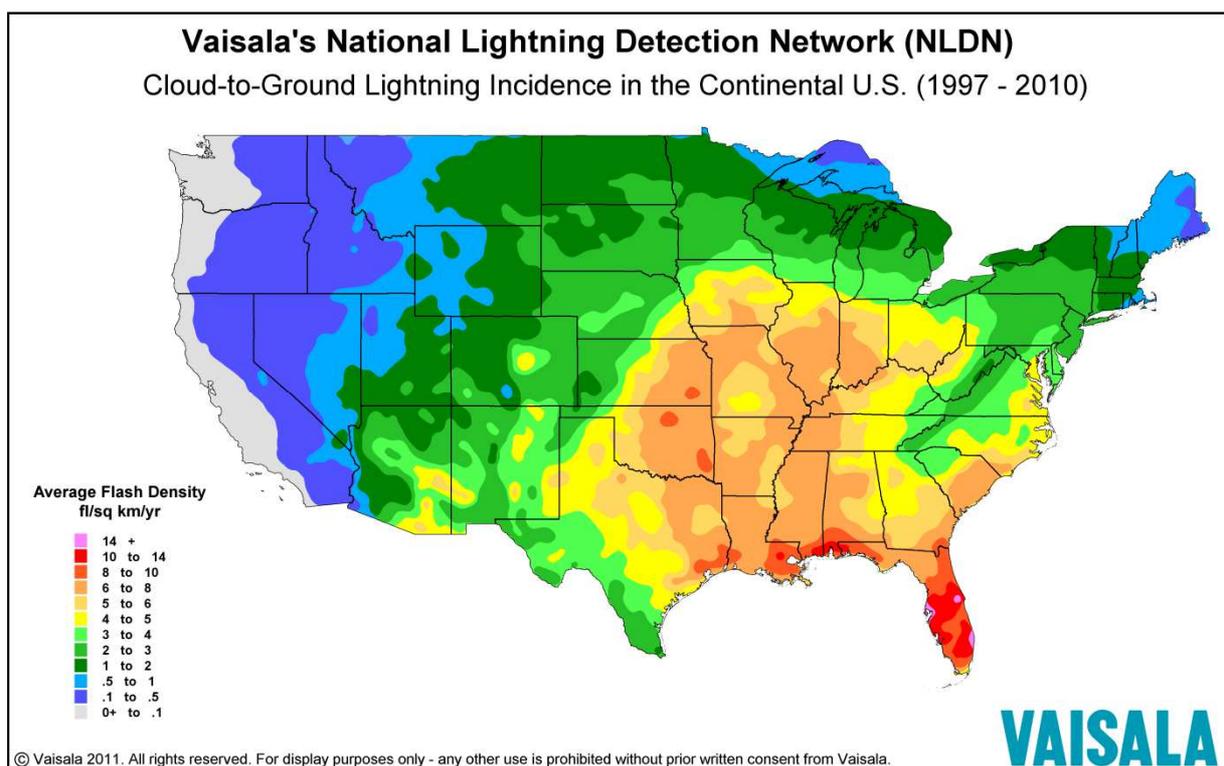


Abbildung 24: Blitzeinschläge in den USA 1997 – 2010 (Quelle: Vaisala, 2013)

Holle und Cummins (2010: 2 ff.) untersuchten für den Zeitraum 2004 bis 2008 die monatliche Blitzdichte in den USA. Etwa zwei Drittel aller Blitze treten im Juni, Juli und August auf (Abbildung 25). Das Maximum während der warmen Monate des Jahres, insbesondere in den südöstlichen Staaten, ist auf die Erhitzung der unteren und mittleren Atmosphäre tagsüber zurückzuführen. Desweiteren ist die große Menge an Feuchte in der unteren und mittleren Atmosphäre von Bedeutung. Die Feuchte begünstigt den täglichen Unwetterzyklus. Ein

Großteil der Feuchte kommt aus den angrenzenden warmen Ozeanen des Süden und Ostens. Auf Abbildung 26 bis Abbildung 37 ist die Blitzdichte in einzelnen Monaten zu sehen.

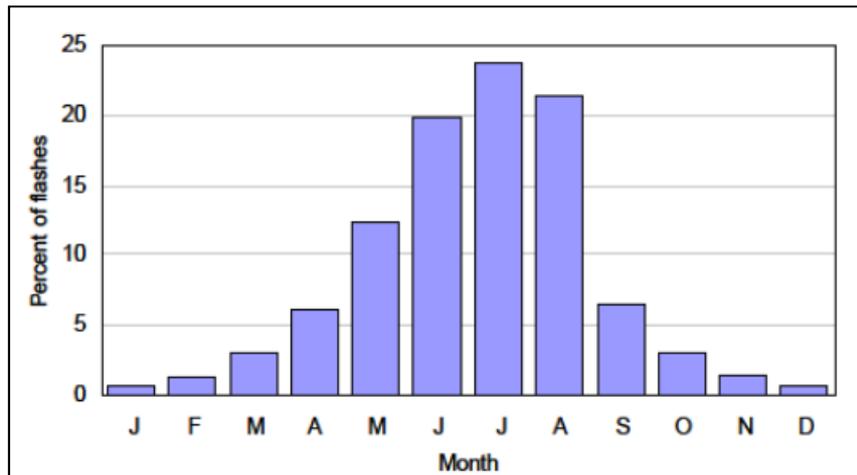


Abbildung 25: Wolken-Boden-Blitze in den USA pro Monat im Zeitraum 2004-2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)

Im Januar gab es zwischen 2004 und 2008 zumindest in der östlichen Hälfte des Landes ein paar Blitze (Abbildung 26). In den nördlichen Rocky Mountains und den nördlichen Ebenen gab es in diesem Zeitraum fast keine Blitze (vgl. Holle und Cummins, 2010: 2).

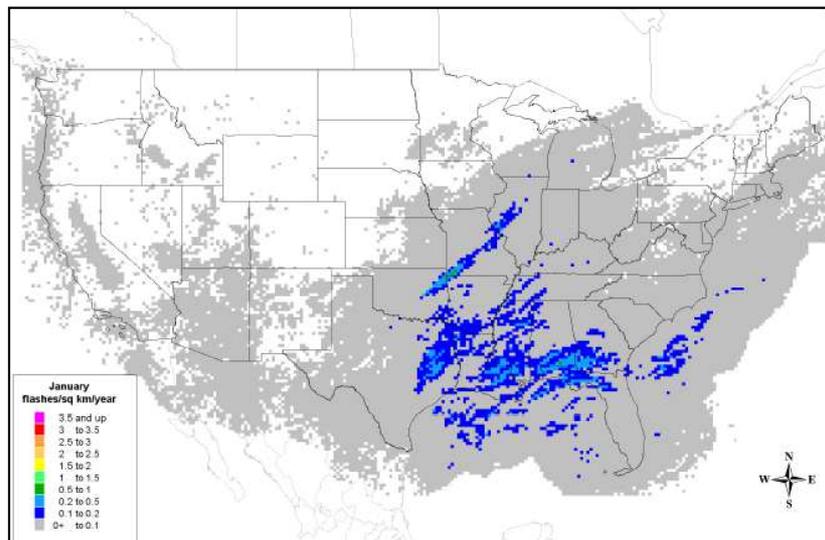


Abbildung 26: Durchschnittliche Blitzdichte im Januar in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)

Die Verteilung der Blitze im Februar war ähnlich der im Januar (Abbildung 27). Das Gebiet mit einer Blitzdichte von 0,1 Blitzen pro Quadratkilometer und Jahr war im Vergleich zum Januar etwa doppelt so hoch. Zudem gab es in Louisiana und den Staaten an der Golfküste vermehrt Blitze (vgl. Holle und Cummins, 2010: 2).

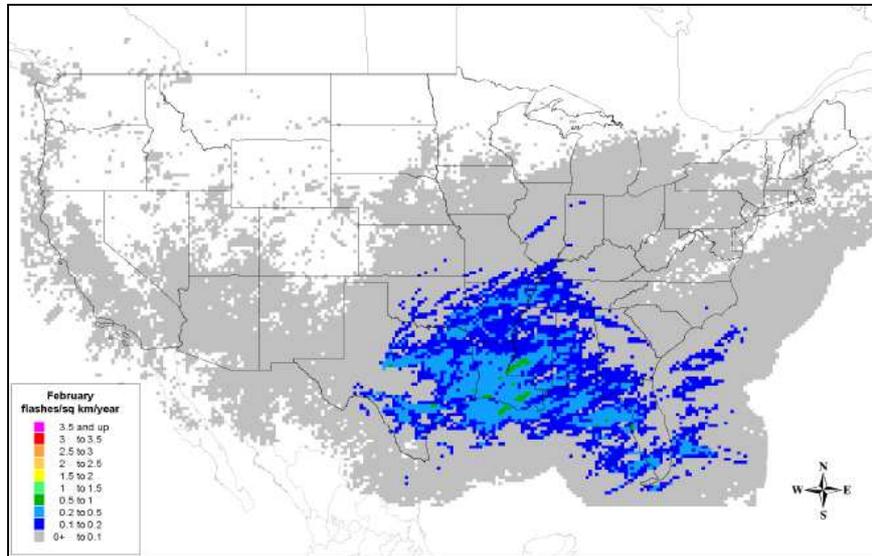


Abbildung 27: Durchschnittliche Blitzdichte im Februar in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)

Im März gab es eine nordwärts gerichtete Ausweitung von Blitzen über 0,1 Blitzen pro Quadratkilometer und Jahr und denen zwischen 0,5 und 1,0 Blitzen pro Quadratkilometer und Jahr (Abbildung 28). Zudem gab es im Nordwesten und in den Weststaaten eine etwas höhere Blitzaktivität (vgl. Holle und Cummins, 2010: 3).

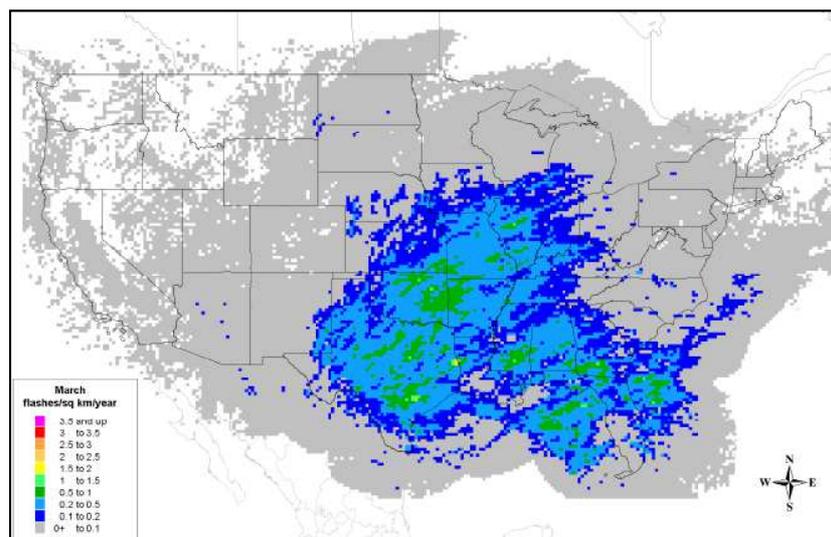


Abbildung 28: Durchschnittliche Blitzdichte im März in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3)

Im April kam es in den meisten Regionen zu einem weiteren Anstieg der Blitzdichte (Abbildung 29). Nordwärts kam es zu einer Ausweitung der Blitzraten von 0,5 bis 1,0. Entlang der Golfküste und im Osten Oklahomas traten Blitzdichten von 1,0 und 1,5 Blitzen pro km² und Jahr auf, in manchen Gegenden sogar bis über 2,5 (vgl. Holle und Cummins, 2010: 3).

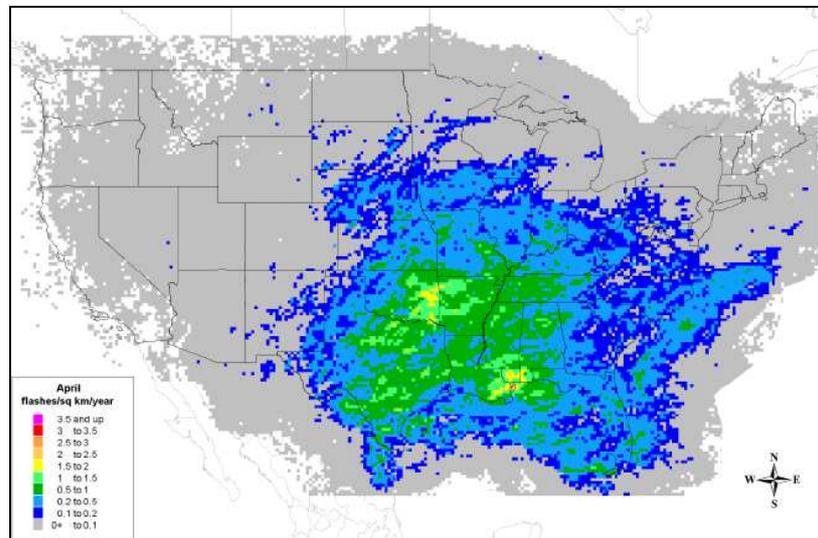


Abbildung 29: Durchschnittliche Blitzdichte im April in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3)

Im Mai gab es, außer im Inland an der Westküste und im Südwesten Arizonas, in den meisten Teilen des Landes Blitze (Abbildung 30). Die höchsten Blitzdichten liegen bei über 2,0 Blitzen pro km² und Jahr. Im Süden Floridas startet zudem die Sommerblitzsaison. Oberhalb des Golfstroms nahmen die Blitzdichtemaxima weiter zu (vgl. Holle und Cummins, 2010: 3).

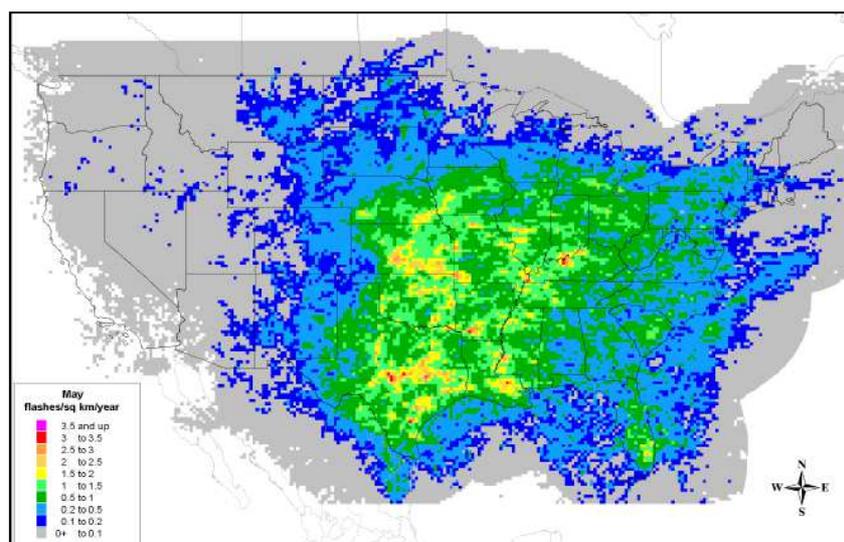


Abbildung 30: Durchschnittliche Blitzdichte im Mai in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3)

Im Juni kam es zu einer Ausweitung der Gebiete hoher Blitzdichten (Abbildung 31). Insbesondere in Florida war ein Anstieg zu beobachten. Die höchsten Blitzdichten lagen bei über 3,0 (vgl. Holle und Cummins, 2010: 4).

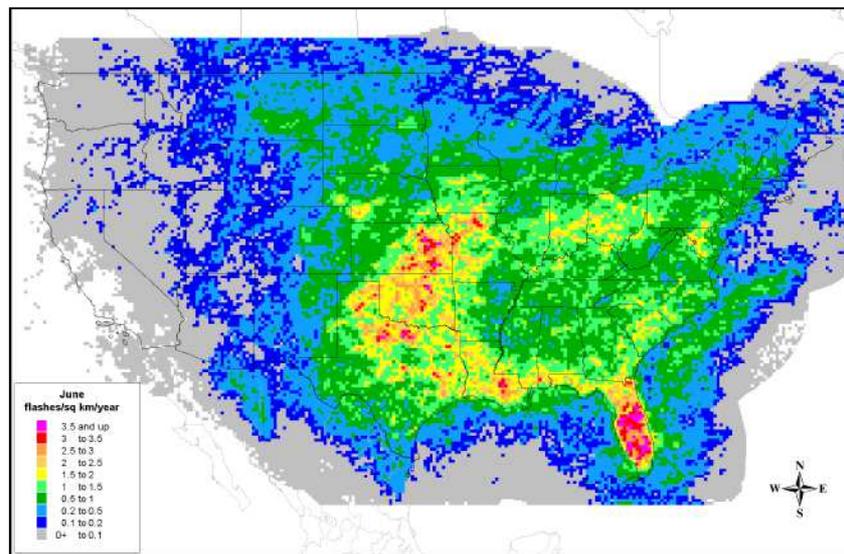


Abbildung 31: Durchschnittliche Blitzdichte im Juni in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4)

Im Juli kam es, aufgrund des Beginns des Südwest-Monsuns, zu einem plötzlichen Auftreten zweier Blitzmaxima in Arizona (Abbildung 32). Wegen des monsonalen Feuchteflusses gab es zudem einen hohen Anstieg an Blitzen in Colorado und New Mexico. Die Blitzdichte in Florida überschreitet nun 3,5 Blitze pro Quadratkilometer und Jahr. Das Maximum der Great Plains verschiebt sich nach Osten. Zudem gab es in der südöstlichen Küstenregion häufiger Blitze (vgl. Holle und Cummins, 2010: 4).

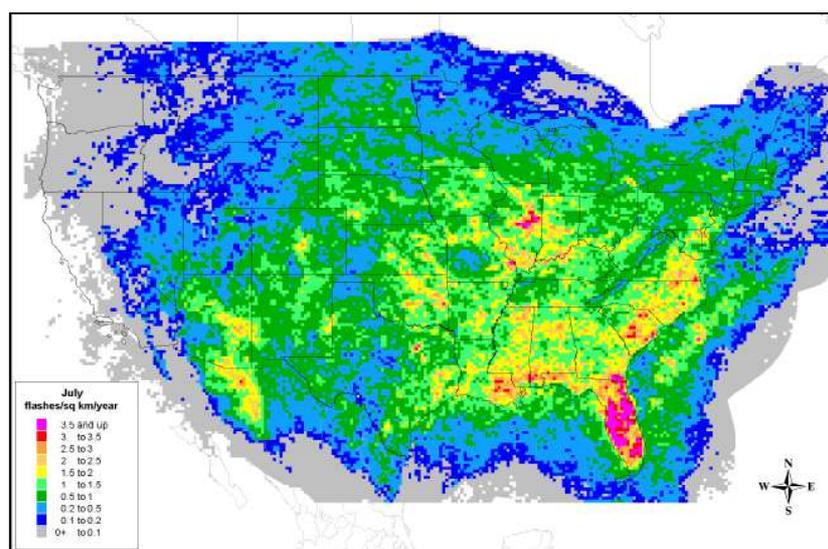


Abbildung 32: Durchschnittliche Blitzdichte im Juli in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4)

Im Augsut kam es zu einem leichten Rückgang der Blitzvorkommnisse in Arizona, Florida und an der Südostküste (Abbildung 33). Einzig in Iowa und den angrenzenden Staaten kam es, aufgrund eines mesoskalischen konvektiven Systems, vermehrt zu Blitzen (vgl. Holle und Cummins, 2010: 4).

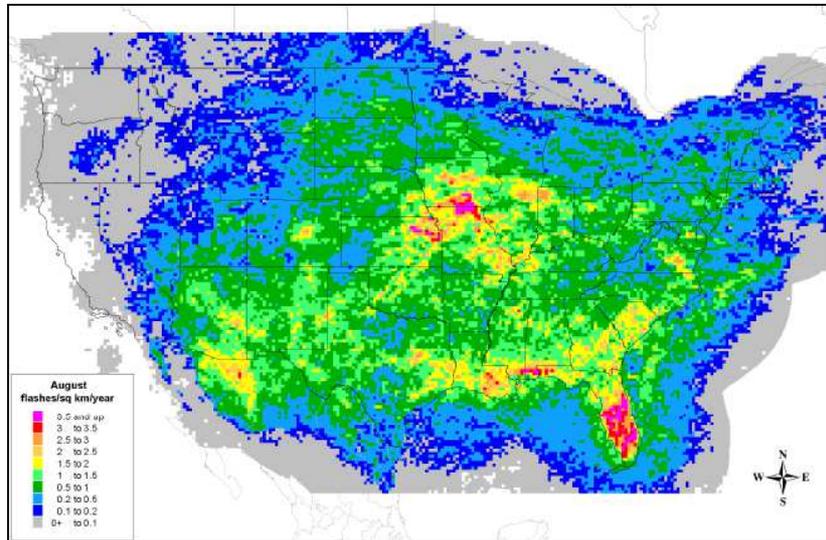


Abbildung 33: Durchschnittliche Blitzdichte im August in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4)

Im September kam es im gesamten Staatsgebiet zu einem Rückgang der Blitzdichte. Insbesondere Florida, Arizona, die Plains und der mittlere Westen waren hiervon betroffen (Abbildung 34) (vgl. Holle und Cummins, 2010: 4).

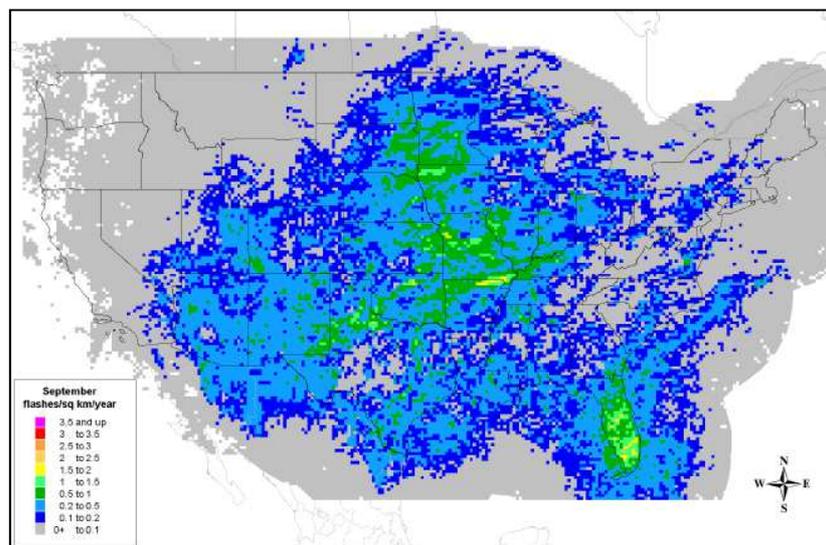


Abbildung 34: Durchschnittliche Blitzdichte im September in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)

Im Oktober gab es einen weiteren Rückgang der Blitzvorkommnisse (Abbildung 35). Im Süden der Great Plains und in Texas gab es noch höhere Blitzdichten. Die wenigsten Blitze gab es im westlichen Washington und Oregon, Montana, an der Küste des nördlichen Kaliforniens, im Westen North Dakotas und im Norden Maines (vgl. Holle und Cummins, 2010: 5).

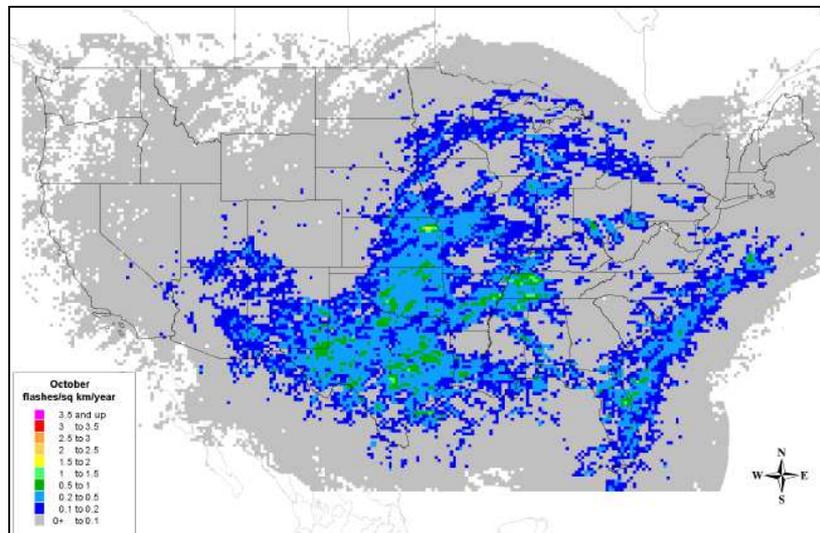


Abbildung 35: Durchschnittliche Blitzdichte im Oktober in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)

Im November hatte die nordwestliche Hälfte der USA und die nordöstlichsten Staaten kaum Blitzvorkommnisse (Abbildung 36). Die einzigen Maximas traten in Texas und Louisiana auf. Erstmals seit Februar treten wieder einzelne, teils von Schnee begleitete, Unwetter auf (vgl. Holle und Cummins, 2010: 5).

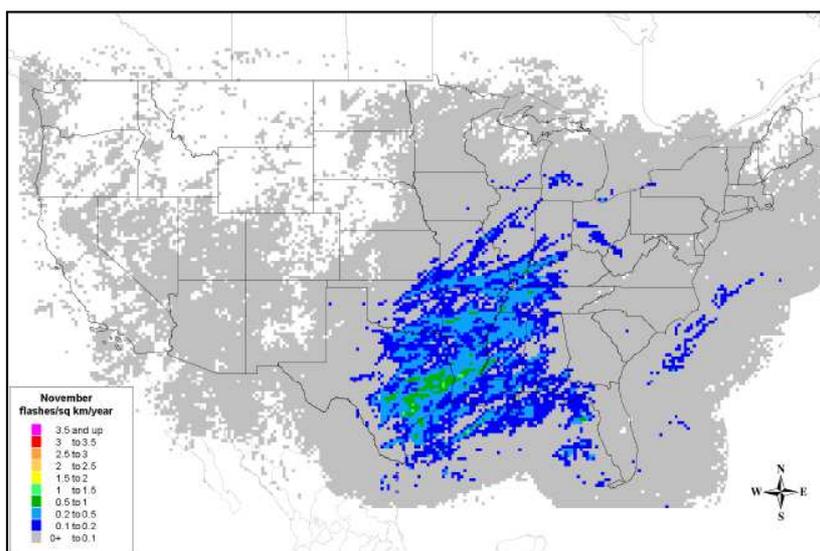


Abbildung 36: Durchschnittliche Blitzdichte im November in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)

Die Blitzdichte im Dezember ist ähnlich der im Januar, mit ein paar Blitzen in der östlichen Hälfte des Landes (Abbildung 37) (vgl. Holle und Cummins, 2010: 5).

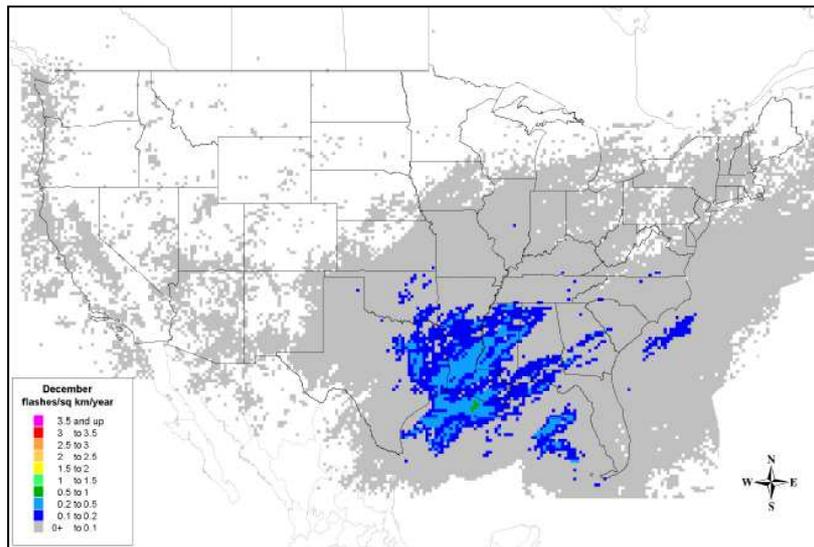


Abbildung 37: Durchschnittliche Blitzdichte im Dezember in den USA (Blitz/km²/Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)

5.3 Brandereignisse in den USA im Zeitraum 1980 - 2012

5.3.1 Datengrundlage

Die, in der Analyse verwendeten Daten, stammen von der „Federal Fire Occurrence Website“. Die „Federal Fire Occurrence Website“ ist eine offizielle, staatliche Website, die „wildland fire occurrence“ Daten zur Verfügung stellt. Die Daten enthalten 677 650 Aufzeichnungen von Bränden in den Vereinigten Staaten, die von den staatlichen Landmanagementbehörden für den Zeitraum 1980 bis 2012 aufgenommen wurden. Die Daten für den Zeitraum sind als shapefile-Format oder als komprimiertes Geodatenbankenformat verfügbar. Die sechs Landmanagementbehörden, die die Daten zur Verfügung stellen, sind das „Bureau of Land Management (BLM)“, das „Bureau of Reclamation“, das „Bureau of Indian Affairs (BIA)“, der „U.S. Fish and Wildlife Service (FWS)“, der „National Park Service (NPS)“ und der „U.S. Forest Service (USFS)“.

Von den 677 650 Aufzeichnungen wurden zunächst 542 205 als „brauchbar“ definiert. „brauchbar“ ist eine eigene Definition in Anlehnung an diejenige von Brown et al. (2002: 2f.). Als „unbrauchbar“ wurden die Aufzeichnungen definiert, denen kein „cause“ zugewiesen wurde, die kein „start date“ hatten und „no record“ bei der „size class“ aufwiesen.

Der Datensatz enthält eine Reihe von Attributen. Die wichtigsten Attribute, die auch für die spätere Analyse von Bedeutung waren, werden in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Auswahl an Attributen der Branddaten und deren Beschreibung (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Attribut	Beschreibung
CAUSE	Auslöser des Brandes <ul style="list-style-type: none">▪ Human▪ Natural
SIZECLASS	Größenklasse des Feuers; verbrannte Fläche in Acre <ul style="list-style-type: none">▪ 0.0 to 0.2 acres▪ 0.3 to 9.9 acres▪ 10.0 to 99.9 acres▪ 100.0 to 299.9 acres▪ 300.0 to 999.9 acres▪ 1000.0 to 4999.9 acres▪ larger than 5,000.0 acres
STARTDATED	Entdeckungsdatum des Brandes
STATE	Staat in dem das Feuer vorkam
SPECCAUSE	Ursache des Feuers <ul style="list-style-type: none">▪ Lightning▪ Aircraft▪ Vehicle▪ Exhaust▪ Exhaust-other

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Logging line ▪ Brakes ▪ Cooking/Warming ▪ Warming fire ▪ Smoking ▪ Trash burning ▪ Burning dump ▪ Field burning ▪ Land clearing ▪ Slash burning ▪ Right-of-way burning ▪ Resource mgt burning ▪ Grudge fire ▪ Recurrent ▪ Smoke bees or game ▪ Insect/snake control ▪ Employment ▪ Blasting ▪ Burning building ▪ Powerline ▪ Fireworks ▪ Ignition devices ▪ Repel predators ▪ House/stove parks ▪ Other
STATCAUSE	<p>Ursache des Feuers (weitere Kategorie, die nur vom USFS zusätzlich zum „CAUSE“ und „SPECCAUSE“ verwendet wird)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lightning ▪ Equipment ▪ Smoking ▪ Campfire ▪ Debris burning ▪ Railroad ▪ Arson ▪ Children ▪ Miscellaneous
YEAR_	Jahr in dem das Feuer statt fand

5.3.2 Methodik

a) Datenaufbereitung

Nachdem die Daten von der „Federal Fire Occurrence Website“ heruntergeladen waren, mussten diese zunächst noch für die Zwecke der Masterarbeit aufbereitet werden. Zunächst wurden die Daten auf Vollständigkeit geprüft und diejenigen, die nach eigener Definition nicht als „brauchbar“ bestimmt werden konnten, wurden aus dem Datensatz gelöscht. Da in der Analyse nur Brände mit einbezogen wurden, bei denen als Auslöser eine natürliche Ursache festgestellt werden konnte, wurden zunächst all diejenigen Daten aus dem Datensatz

entfernt, denen kein „cause“ zugewiesen wurde. Als nächstes wurden die Aufzeichnungen aus dem Datensatz gelöscht, die kein „start date“ aufwiesen. Diese Daten sind wichtig, um mögliche saisonale Unterschiede bei den Brandereignissen feststellen zu können. Desweiteren sollten die Aufzeichnungen einer „size class“ zugeordnet sein. Die „size class“ gibt die Größe eines Feuers an bzw. die Fläche, die dieses Feuer verbrannte. Anhand der „size class“ kann untersucht werden, ob es im Untersuchungszeitraum Veränderungen der Anzahl an Feuern in verschiedenen Größenklassen gegeben hat. Zuletzt mussten die Aufzeichnungen auch Längen- und Breitenangaben aufweisen. Aufzeichnungen, die weder räumliche („latitude/longitude“) noch zeitliche („start date“) Informationen besitzen, sind zwar für die gesamte Anzahl von Brandereignissen interessant, geben jedoch keine Auskunft über die Lokalität der Brände. (vgl. Brown et al., 2002: 4).

Der Datensatz enthielt ursprünglich 677 650 Aufzeichnungen. Nachdem die „unbrauchbaren“ Aufzeichnungen aus dem Datensatz entfernt wurden, enthielt dieser noch 542 205 Aufzeichnungen. Von diesen Aufzeichnungen gab es 305 134 Aufzeichnungen, deren Ursache auf menschlichen Einfluss zurückzuführen war. Diese Daten wurden ebenfalls nicht verwendet. Da untersucht werden soll, ob Temperatur- oder Niederschlagsänderungen Einfluss auf Brandereignisse hatten, waren die Brände, die durch Menschen verursacht wurden, nicht weiter von Interesse und wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Demnach blieben noch 237 071 Aufzeichnungen. Das sind die Aufzeichnungen, bei denen die Brandursache einen natürlichen Auslöser hatte. Wie in Tabelle 8 ersichtlich ist, gibt es jedoch eine spezifische und statistische Ursache. In der Analyse werden jedoch nur die Aufzeichnungen in Betracht gezogen, bei denen der Auslöser eines Brandes eindeutig auf natürliche Ursachen, ohne zusätzlichen menschlichen Einfluss zurückgeführt werden kann. Demnach wurden für die Analyse nur die Aufzeichnungen verwendet, bei denen sowohl der statistische, als auch der spezifische Auslöser auf Blitze („lightning“) zurückzuführen war. Nach weiterer Filterung blieben in weiterer Folge noch 132 513 Aufzeichnungen übrig. Vom gesamten Datensatz von 677 650 Aufnahmen, werden in der Analyse also 132 513 Aufnahmen verwendet, was 19,55 % vom ursprünglichen Gesamtdatensatz entspricht.

b) Abbildungen

Die Abbildungen Abbildung 40 bis Abbildung 48 wurden mit Microsoft Office Excel 2007 erstellt. Die auf den Abbildungen zu sehenden Trendlinien wurden ebenfalls mit diesem Programm hinzugefügt. Dabei handelt es sich um lineare Trendlinien die anhand der linearen Regression bestimmt wurde. Zudem lässt sich mit Excel das Bestimmtheitsmaß r^2 ausgeben welches den Anteil der Varianzen, der durch die lineare Regression erklärt wird, angibt (vgl. Kohn, 2005: 147).

Desweiteren wurde für die Anzahl der Brände die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate berechnet. Hierzu wurde folgende Formel verwendet:

$$\text{Wachstumsrate in Prozent } (t_0, t) = \left(\left(\frac{A(t)}{A(t_0)} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \right) * 100$$

t_0 = Anfangszeitpunkt t = Endzeitpunkt A = Größe zum Zeitpunkt t N = Anzahl der Jahre

5.3.3 Ergebnisse

a) Vorkommen der Brandereignisse in den USA (räumliche Dimension)

Im Zeitraum 1980 bis 2012 gab es im Kernland der USA 132 513 Brände, die durch Blitze ausgelöst wurden (Abbildung 38). Dies sind die Brände, die einzig durch natürliche Gegebenheiten ausgelöst wurden.

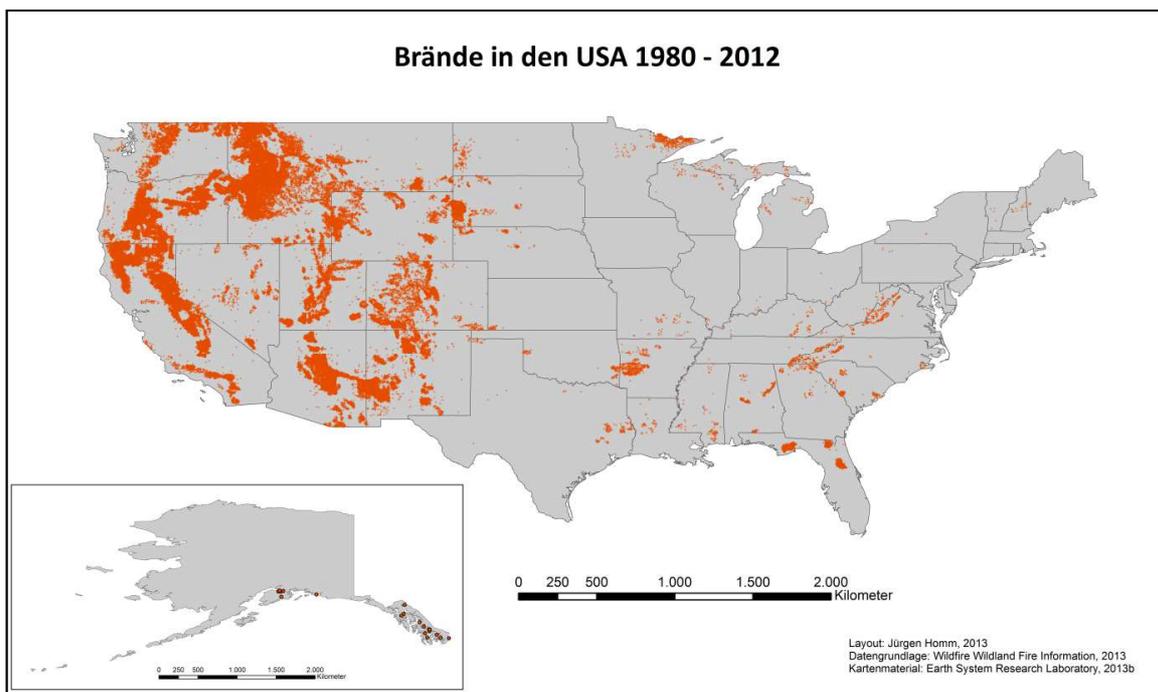


Abbildung 38: Vorkommen von Bränden in den USA im Zeitraum 1980 - 2012, die durch Blitze ausgelöst wurden (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013^b; eigene Darstellung)

Im Untersuchungszeitraum gab es die meisten Brände im Westen der USA (Abbildung 38). In diesen Regionen befindet sich zudem der Großteil der US-Amerikanischen Nationalwälder (Abbildung 39). Über 94 % der Brände traten in den westlich gelegenen Bundesstaaten auf (Abbildung 40). Knapp 80 % aller Brände fanden in den Bundesstaaten Kalifornien (24418 Brände), Arizona (19593), Oregon (19 460), Idaho (18 390), Montana (12 039) und New Mexico (11 012) statt (Abbildung 40). Dies sind auch die einzigen Staaten, in denen zwischen 1980 und 2012 jeweils mindestens über 10 000 Brände auftraten.

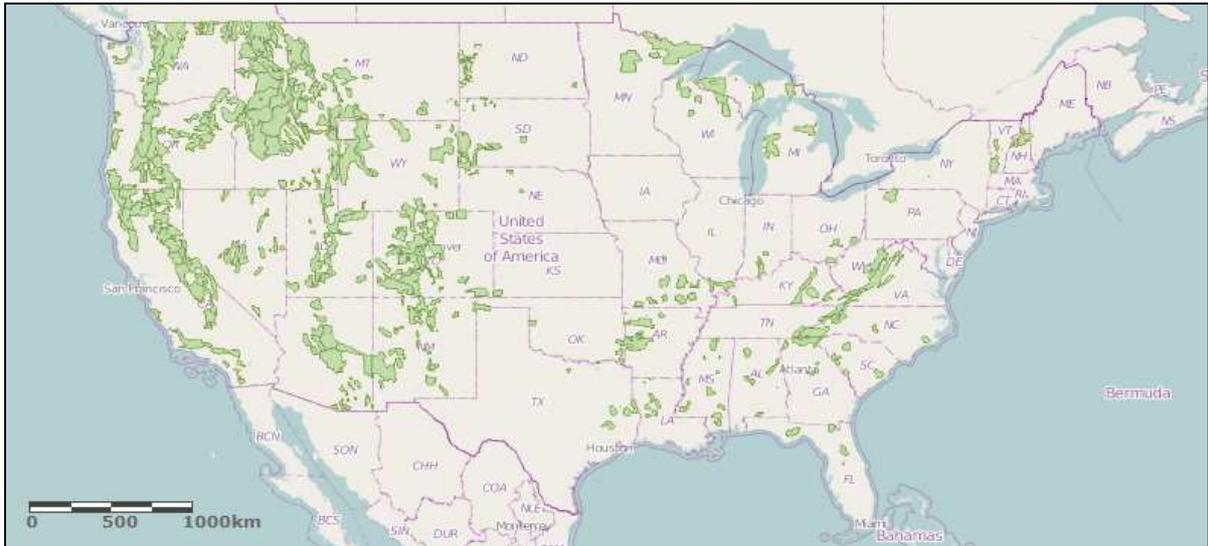


Abbildung 39: Administrative Waldgrenzen in den USA (Quelle: US Forest Service, 2013)

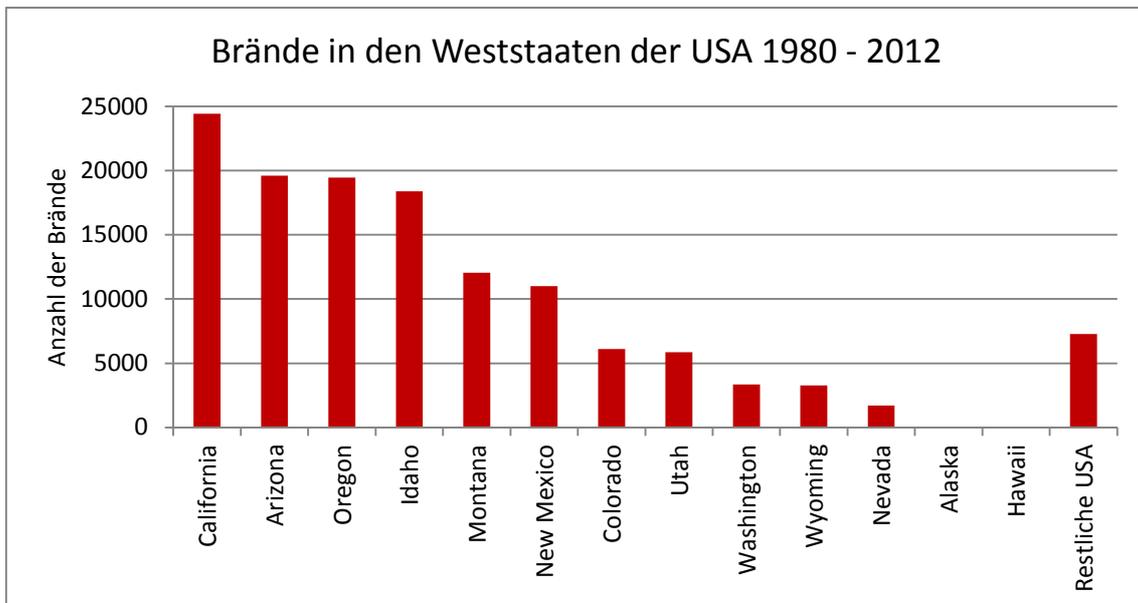


Abbildung 40: Anzahl der Brände in den Weststaaten der USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

b) Zeitliches Auftreten der Brandereignisse in den USA

Abbildung 41 zeigt die Anzahl der jährlich durch Blitze verursachten Brände, des Zeitraums 1980 bis 2012. Insgesamt gab es im Untersuchungszeitraum einen Anstieg von Brandereignissen. Der durchschnittliche jährliche Anstieg lag bei 2,06%. 2003 (6886 Brände), 2000 (6872 Brände) und 2006 (6514 Brände) fanden die meisten Brände statt. In den Jahren 1983, 1982 und 1993 gab es die wenigsten Brände (1296, 1453 bzw. 1686 Brände). Zudem nahm die Anzahl der Brände von Jahrzehnt zu Jahrzehnt zu (Tabelle 9). Fast 40% der Brände fanden in den ersten neun Jahren des 21. Jahrhunderts statt, 33% in den 1990er Jahren und knapp 20% in den 1980er Jahren. Bei genauerer Betrachtung konnte jedoch im 21. Jahrhundert

insgesamt ein rückschreitender Trend von Bränden beobachtet werden. Während in den 1980er Jahren die Zahl der Brände um 9,84% und in den 1990er Jahren noch um 1,29% zunahm, ging die Zahl der Brände zwischen 2000 und 2012 um 5,34% zurück.

Tabelle 9: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Zeitraum	Brände	Brände in Prozent
1980 – 1989	26260	19,8
1990 – 1999	43731	33,0
2000 – 2009	52597	39,7
2010 – 2012	9925	7,5

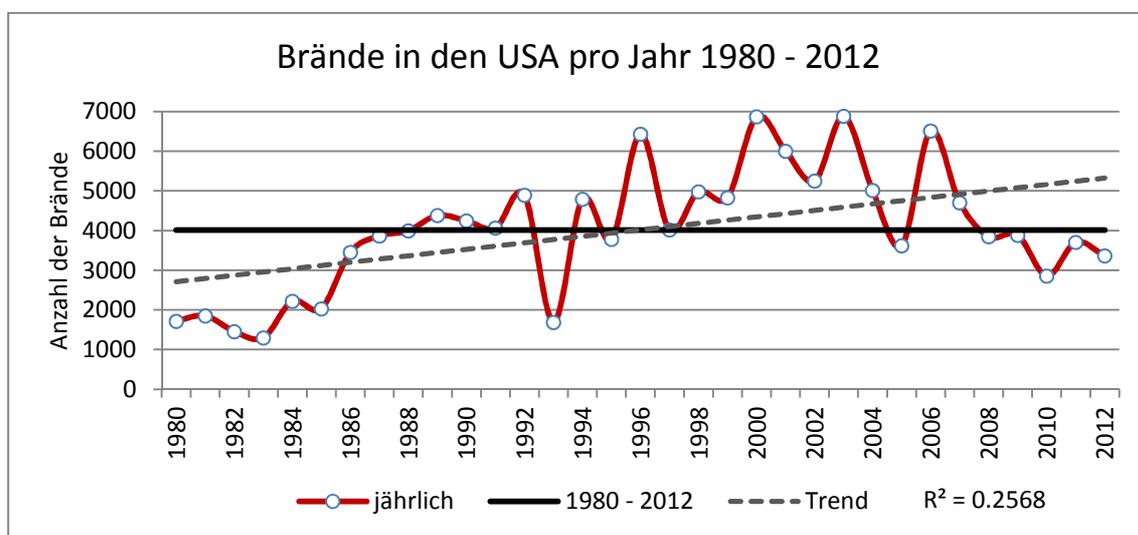


Abbildung 41: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Des Weiteren traten die meisten Brände, die durch Blitze verursacht wurden, in den Sommermonaten Juni (17279 Brände), Juli (45045 Brände) und August (47081 Brände) auf, was etwa 82 % aller Brände ausmacht. Die wenigsten Brände traten erwartungsgemäß in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar auf (22, 32 bzw. 63 Brände; unter 1 % aller Brände) (Abbildung 42, Abbildung 43 und Tabelle 10). Insgesamt konnte jedoch in jedem Monat ein tendenzieller Anstieg des Brandvorkommens beobachtet werden (Abbildung 44 bis Abbildung 47). In manchen Monaten (Januar, Februar, November, Dezember) gab es jedoch insgesamt nur wenige Brände, weswegen statistische Aussagen unzureichend wären.

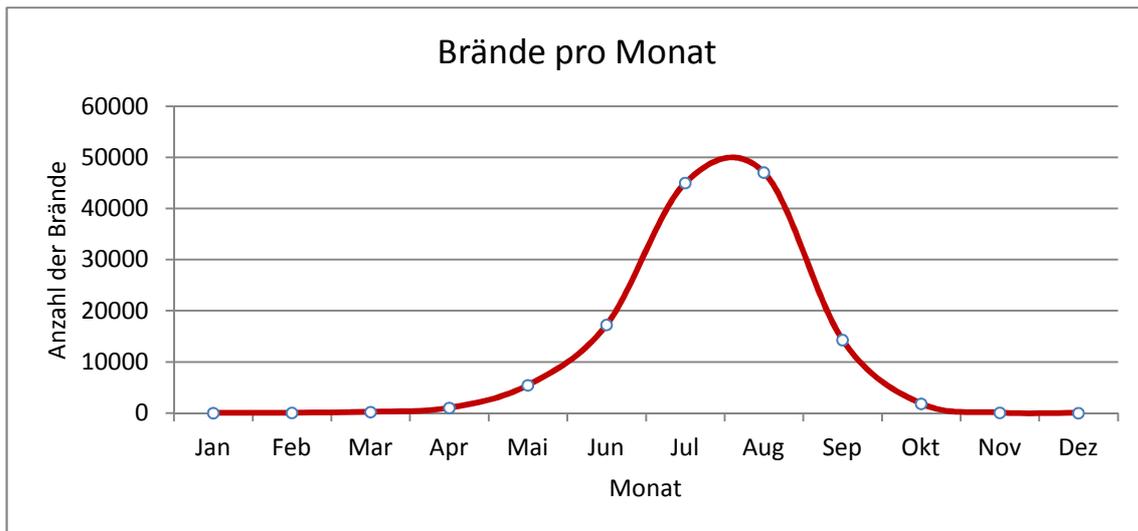


Abbildung 42: Monatliche Verteilung der Brände in den USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

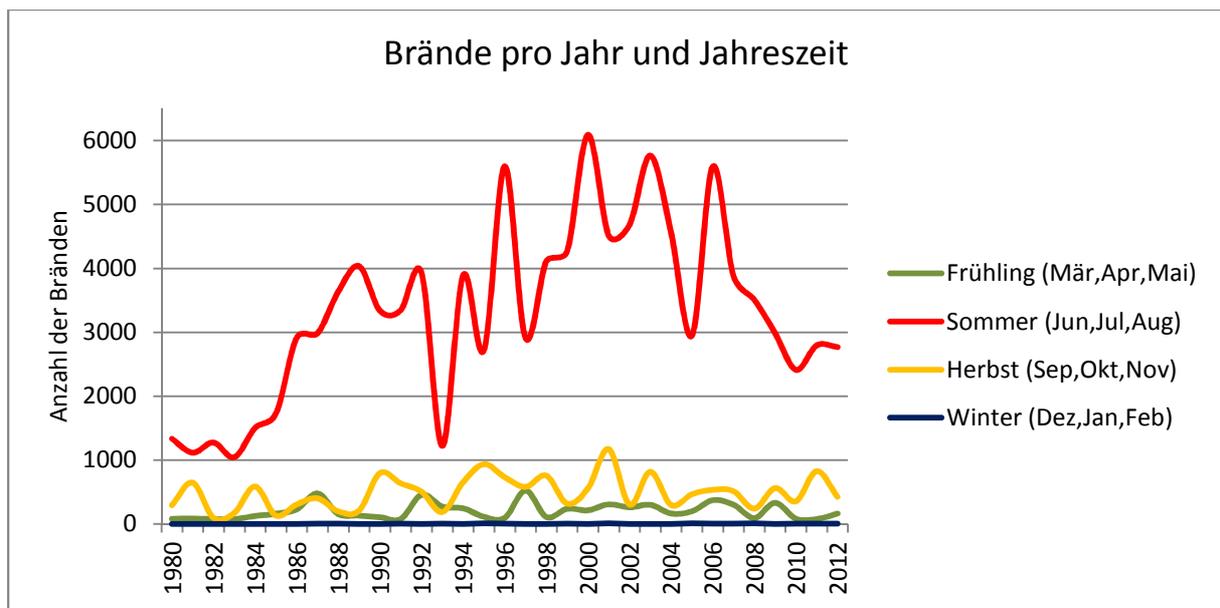


Abbildung 43: Entwicklung der saisonalen, jährlichen Anzahl an Bränden in den USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 10: Absolute und prozentuale, saisonale Anzahl an Bränden in den USA 1980 – 2012 (Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Jahreszeit	Absolute Anzahl	in Prozent
Frühling	6737	5,1
Sommer	109405	82,6
Herbst	16254	12,2
Winter	145	0,1

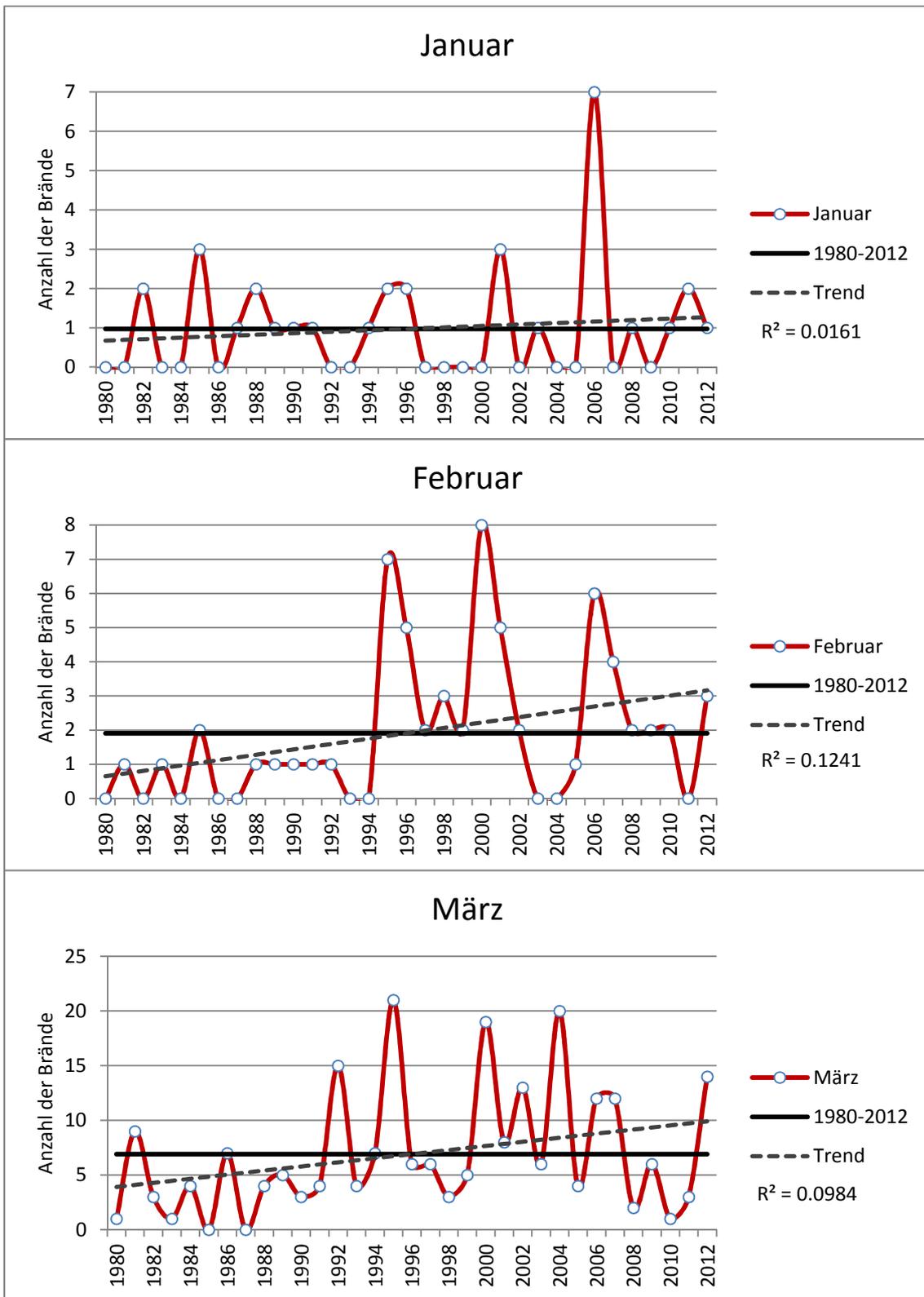


Abbildung 44: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Januar, Februar und März in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

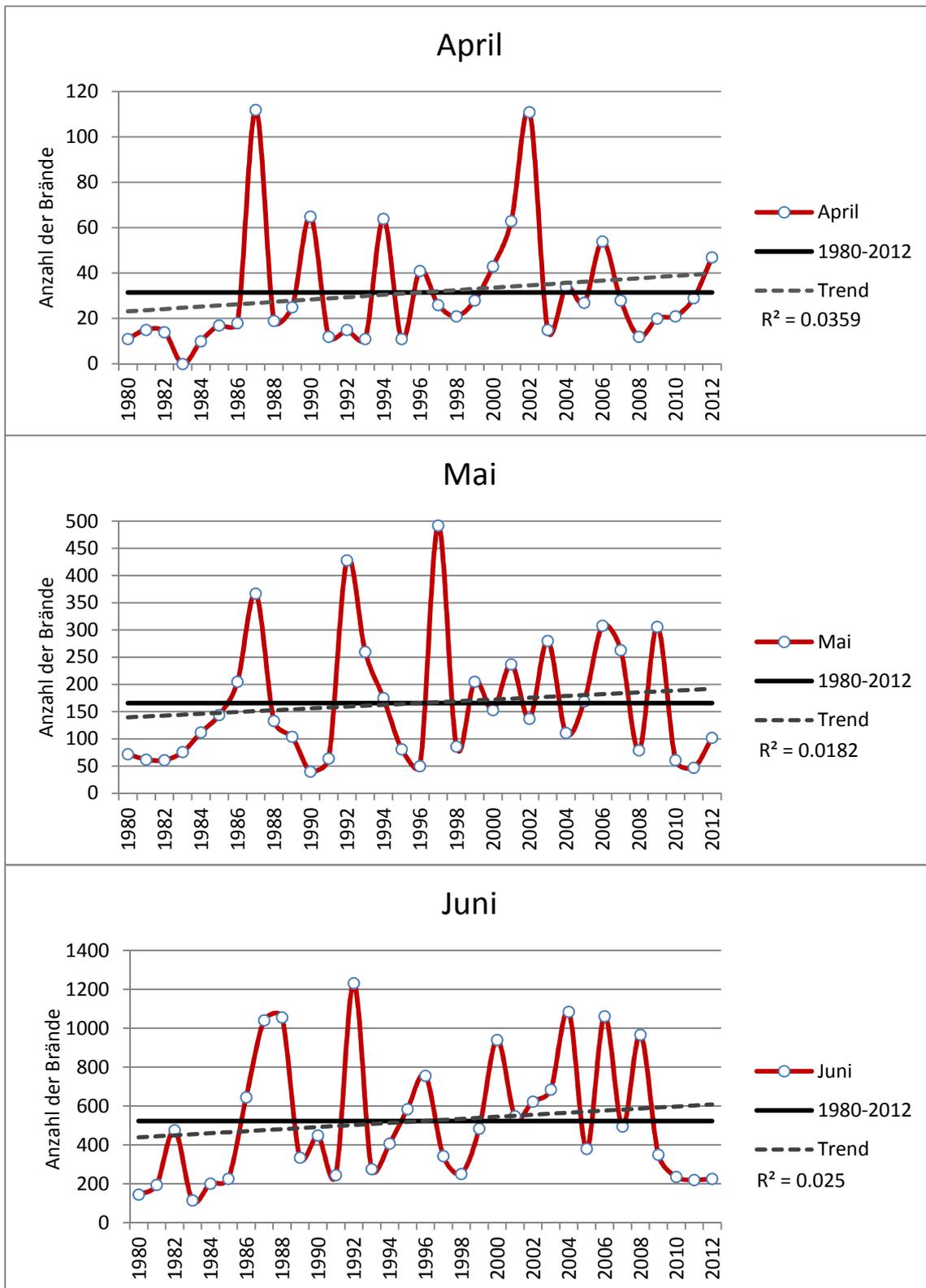


Abbildung 45: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten April, Mai und Juni in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

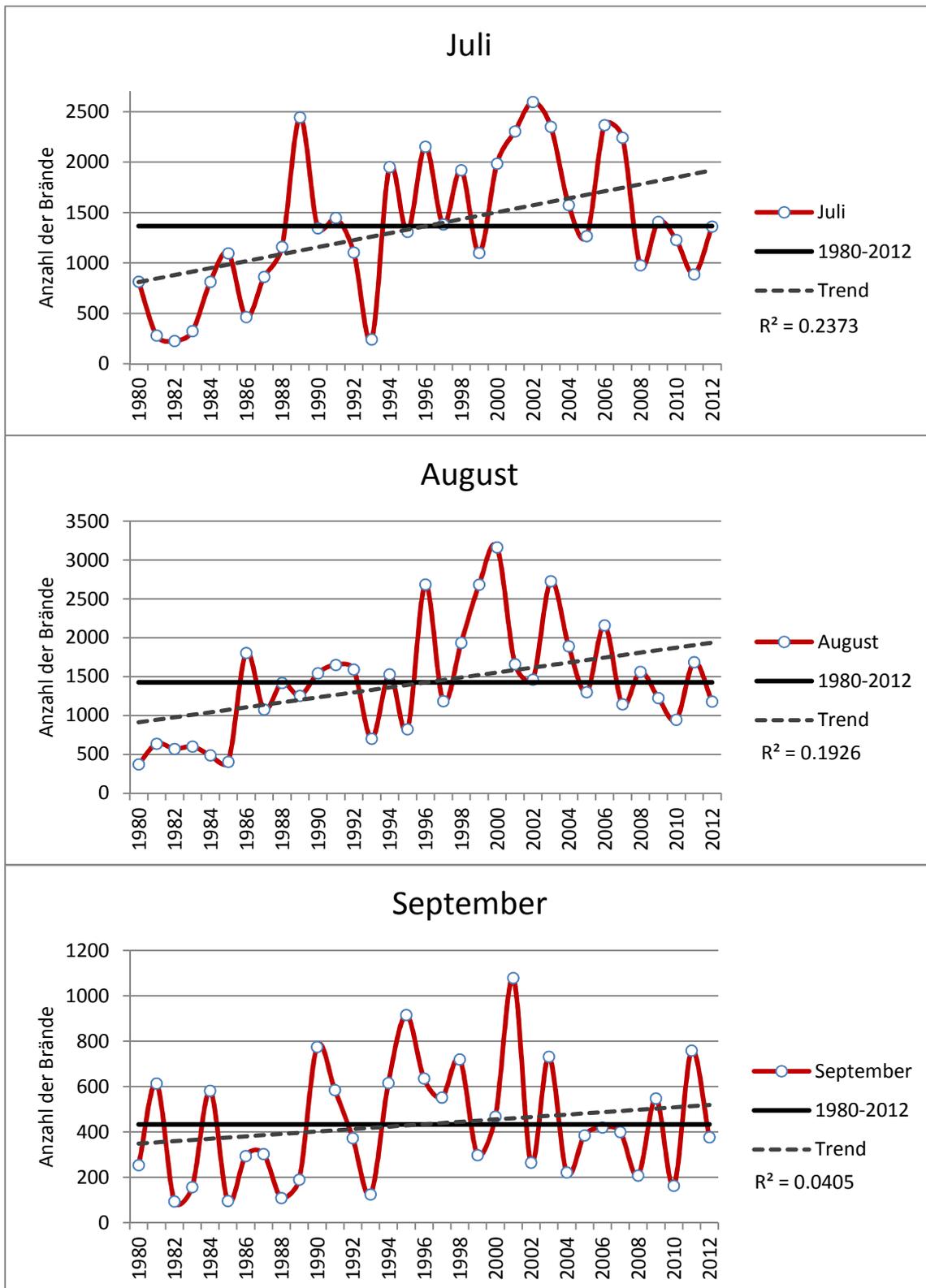


Abbildung 46: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Juli, August und September in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

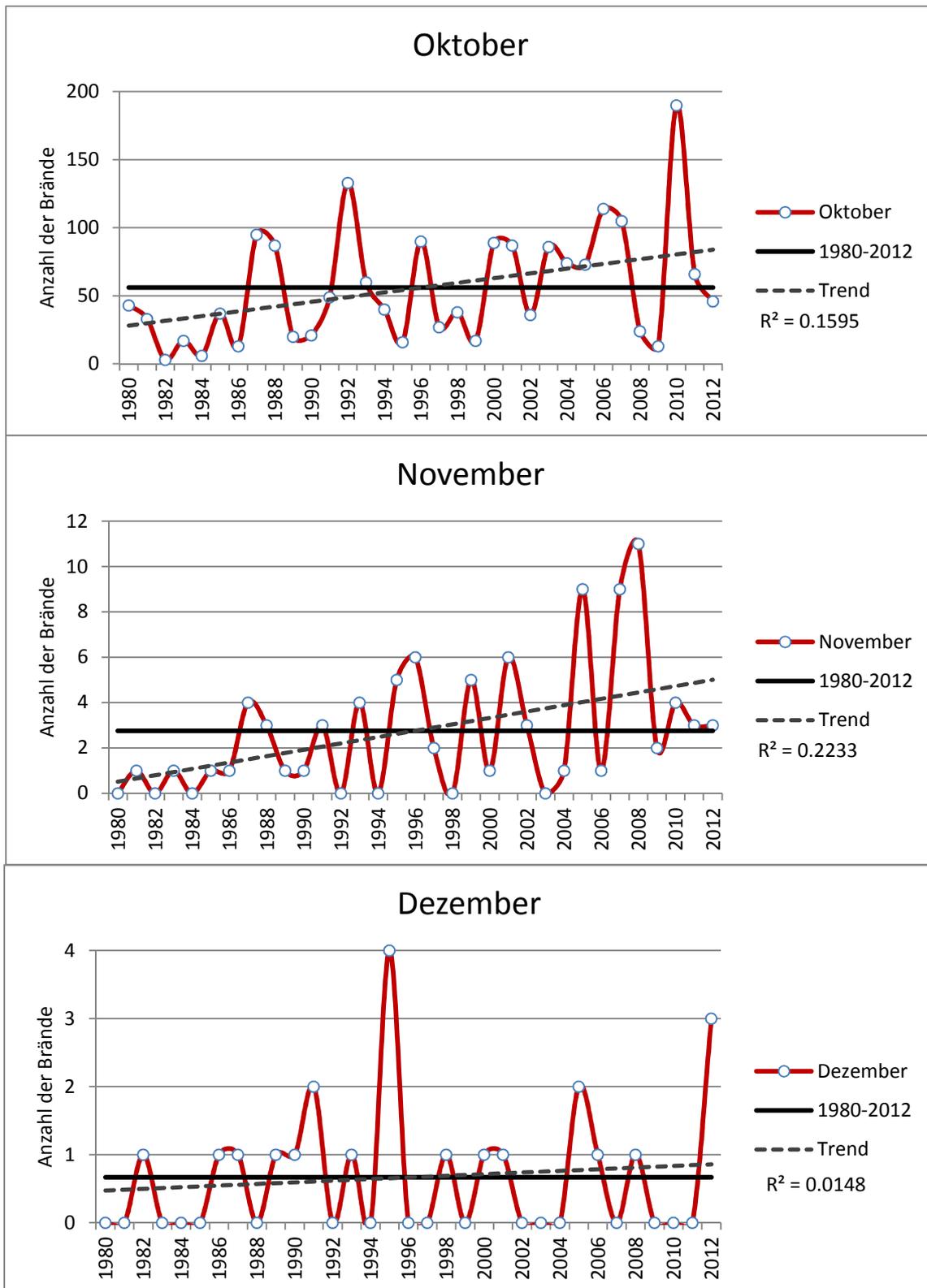


Abbildung 47: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Oktober, November und Dezember in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

c) *Verbrannte Flächen*

Insgesamt nahm im Untersuchungszeitraum die Menge verbrannter Flächen zu (Abbildung 48). Der durchschnittliche jährliche Anstieg zwischen 1980 und 2012 liegt bei 17,22%. Der größte Anstieg verbrannter Flächen gab es in den 1980er Jahren (34,9 %), gefolgt von 1990er Jahren (12,62 %). Seit 2000 nahm die Menge verbrannter Flächen kaum mehr zu (0,73 %). Zudem gibt es eine starke jährliche Variabilität. Im Zeitraum 2000 bis 2009 wurden mit Abstand die meisten Flächen verbrannt. 61 % aller Flächen wurden in dieser Dekade verbrannt. Des Weiteren fällt auf, dass in den ersten drei Jahren seit 2010 schon mehr Fläche verbrannt wurde als in den gesamten 1980er Jahren und fast so viel wie in den 1990er Jahren (Tabelle 12).

Jedem Brandereignis wurde im Datensatz eine Größenklasse zugeordnet (Tabelle 11). Bei etwa 65 % der Brände handelt es sich um Brände die maximal eine Fläche von etwa 0,08 ha verbrannten. Fast 28 % der Brände verbrannten Flächen von zwischen etwa 0,12 und 4 ha. Im Allgemeinen nimmt die Anzahl an Bränden mit der Größe des Feuers ab. Demnach gab es zwischen 1980 und 2012 in den USA nur 691 Brände (0,52 %), die eine Fläche von über 2032 ha verbrannten. Des Weiteren konnte in jeder Größenklasse eine Zunahme der Brände beobachtet werden. Eine Ausnahme bilden jedoch die Brände der Größenklasse A. Zwar konnte auch hier, absolut gesehen, eine Zunahme von Bränden beobachtet werden, prozentual betrachtet nahmen die Brände dieser Größe jedoch ab. Dafür gab es bei Bränden der Größenklasse B einen starken Anstieg. Dennoch haben knapp 93% aller Brände eine Größe von unter 10 Acre (ca. 4 ha).

Tabelle 11: Absolute und prozentual Anzahl an Bränden nach Größenklassen in den USA 1980 - 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Größenklasse	in Acres (in Hektar)	Brände	Brände in Prozent
A	bis 0.2 acres (\approx 0.0 bis 0.08 ha)	86177	65.03
B	0.3 bis 9.9 acres (\approx 0.12 bis 4 ha)	37047	27.96
C	10.0 bis 99.9 acres (\approx 4 bis 40 ha)	5303	4.00
D	100.0 bis 299.9 acres (\approx 40 bis 121 ha)	1265	0.95
E	300.0 bis 999.9 acres (\approx 121 bis 400 ha)	1063	0.80
F	1000.0 bis 4999.9 acres (\approx 400 bis 2032 ha)	967	0.73
G	> 5,000.0 acres (\approx > 2032 ha)	691	0.52

Tabelle 12: Absolut und prozentual Anzahl an verbrannter Fläche in den USA 1980 - 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Zeitperiode	Fläche in Acre	Fläche in Prozent
1980 – 1989	1761084	9
1990 – 1999	2995863	15
2000 – 2009	12093870	61
2010 – 2012	2972753	15

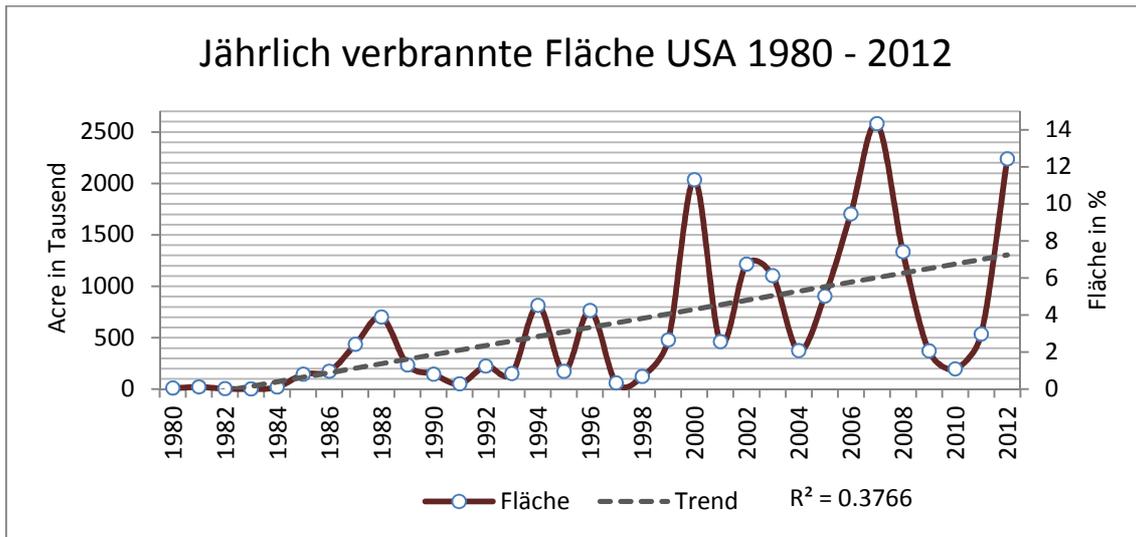


Abbildung 48: Jährlich verbrannte Fläche in den USA im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

5.4 Klimawandel in den USA

5.4.1 Datengrundlage

Es gibt eine Reihe von Klimaelementen, die das Klima beeinflussen und bestimmen (siehe Kapitel 2.2). Für die meisten Menschen sind Temperatur und Niederschlag der Inbegriff von Klima. Aber auch weitere Elemente wie Windgeschwindigkeit und –richtung, Wolkentyp und –menge, Sonnenscheindauer, atmosphärischer Feuchtegehalt und Luftdruck sind wichtige Faktoren (vgl. Robinson und Henderson-Sellers, 1999: 9). Aufgrund der Datenverfügbarkeit konnten für die nachfolgende Analyse des Klimawandels in den USA nicht alle dieser Klimaelemente einbezogen werden. Für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag gab es hingegen frei verfügbare Daten. Diese wurden vom „Earth System Research Laboratory“ der „National Oceanic and Atmospheric Administration“ bezogen (Earth System Research Laboratory (2013^a)). Hierbei handelt es sich um die „U.S. Climate Divisional Database“. Die „Climate Divisional Database“ war lange Zeit die einzige zeitlich und räumlich langfristige, vollständige Datenbank, anhand derer auch historische Klimaanalysen für das Kernland der USA durchgeführt wurden (National Climatic Data Center (2013^a)). Insgesamt wird das Kernland der USA in 344 „U.S. Climate Divisions“ eingeteilt (Abbildung 49).

Für die Analyse wurde für jede „Climate Division“ der monatliche Mittelwert von Temperatur und Niederschlag eines jeden Jahres zwischen 1980 und 2012 im CSV-Dateiformat heruntergeladen. Die Temperaturdaten wurden in °C, die Niederschlagswerte in cm angegeben.

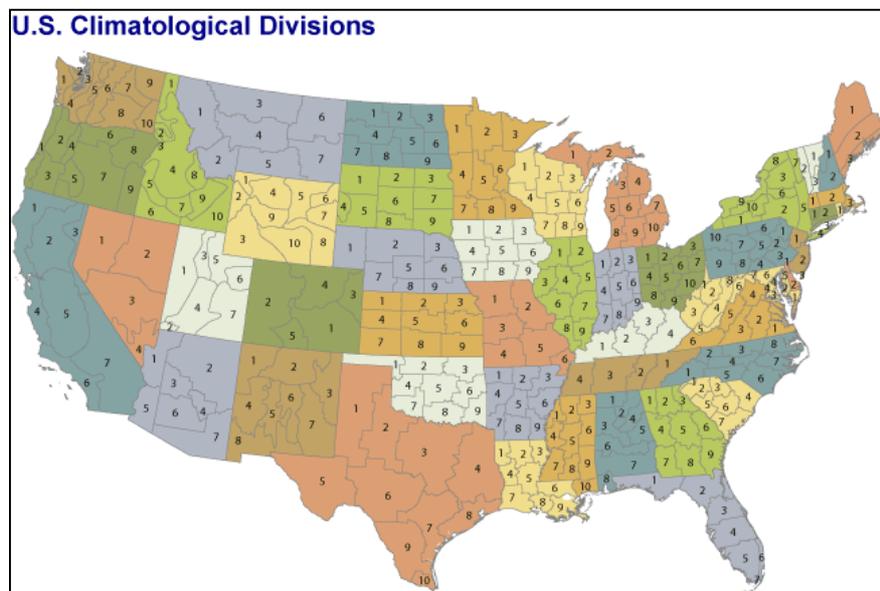


Abbildung 49: Climate Divisions der USA (Quelle: National Climatic Data Center (2003))

5.4.2 Methodik

a) Temperatur

Die Temperaturdaten im CSV-Dateiformat wurden zunächst in Microsoft Excel importiert. Da diese schon in °C vorhanden waren, mussten diese nicht weiter aufbereitet, sondern lediglich auf eine Nachkommastelle gerundet werden. In verschiedenen Publikationen (z.B. Smith et al., 2005 oder IPCC, 2007^a) werden Temperaturänderungen in der Regel als Abweichungen relativ zu einem Bezugszeitraum dargestellt. Demnach wurde zunächst ein Bezugszeitraum ermittelt, anhand dessen Temperaturänderungen im Kernland der USA festgestellt werden konnten. Zunächst wurde für jede „Climate Division“ und jedes Jahr zwischen 1980 und 2012 die jährliche Durchschnittstemperatur ermittelt. Anschließend wurde der Mittelwert aller jährlichen Durchschnittstemperaturen jeder „Climate Division“ berechnet. Dieser Wert stellt die langjährige jährliche Durchschnittstemperatur der jeweiligen „Climate Division“ dar und somit die Temperaturwerte des Bezugszeitraumes. Anhand dieses Wertes können jährliche Abweichungen vom langjährigen Mittel des Kernlandes der USA im Zeitraum 1980 – 2012 dargestellt werden. Dadurch können überdurchschnittlich warme oder kühle Jahre mit den Brandhäufigkeiten in diesen Jahren in Relation gebracht werden.

In einem weiteren Schritt wurde die monatliche Durchschnittstemperatur der einzelnen „Climate Divisions“ für den gesamten Zeitraum 1980 bis 2012 berechnet. Dafür wurde für jeden Monat die mittlere Temperatur des Zeitraumes 1980 – 2012 ermittelt. Anhand dieser Temperatur konnte für jede einzelne „Climate Division“ analysiert werden, in welchen Monaten und in welchem Jahr die durchschnittliche Temperatur höher oder geringer, als das langjährige Mittel des jeweiligen Monats war.

Des Weiteren wurde für jedes Jahr und jede „Climate Division“ das langjährige saisonale Mittel ermittelt. Dafür wurde für jede Jahreszeit (Frühling, Sommer, Herbst und Winter) das langjährige Mittel errechnet. Dies ergibt sich aus dem Durchschnitt der Mittelwerte jeden Jahres und jeder „Climate Division“ für die Monate März, April, Mai (Frühling), Juni, Juli, August (Sommer), September, Oktober, November (Herbst) und Dezember, Januar, Februar (Winter).

b) Niederschlag

Die Niederschlagsdaten im CSV-Dateiformat wurden ebenfalls zunächst in Microsoft Excel eingelesen. Die Daten wurden im ersten Schritt von Zentimeter in Millimeter konvertiert. Niederschlagsänderungen werden in diversen Publikationen in der Regel als Abweichung, relativ zu einem Bezugszeitraum, dargestellt. Demnach wurde zunächst ein Bezugszeitraum ermittelt, anhand dessen Niederschlagsänderungen im Kernland der USA festgestellt werden konnten. Für jede „Climate Division“ und jedes Jahr zwischen 1980 und 2012 wurde zunächst

der jährliche Gesamtniederschlag ermittelt. Anschließend wurde aus den Gesamtniederschlägen der „Climate Divisions“ der Jahre 1980 bis 2012 ein Mittelwert gebildet, der den langjährigen mittleren Gesamtniederschlag des Bezugszeitraumes für jede einzelne „Climate Division“ wiedergibt. Anhand dieser Werte können die durchschnittlichen Niederschlagswerte einzelner Jahre und „Climate Divisions“ mit dem langjährigen durchschnittlichen Niederschlag des Kernlandes der USA im Zeitraum 1980 – 2012 verglichen werden. Dadurch können überdurchschnittlich trockene oder feuchte Jahre im Datensatz festgestellt und mit den Brandhäufigkeiten verglichen werden.

Desweiteren wurde der durchschnittliche monatliche Niederschlag der einzelnen „Climate Divisions“ für den gesamten Zeitraum 1980 bis 2012 berechnet. Dafür wurde für jeden Monat und jede „Climate Division“ der mittlere Niederschlag des Zeitraumes 1980 bis 2012 ermittelt. Anhand dieser Temperatur kann für jede einzelne „Climate Division“ analysiert werden, in welchen Monaten und in welchem Jahr der durchschnittliche Niederschlag höher oder geringer als das langjährige Mittel des jeweiligen Monats war.

Zuletzt wurde für jedes Jahr und jede „Climate Division“ das langjährige saisonale Mittel ermittelt. Dafür wurde für jede Jahreszeit (Frühling, Sommer, Herbst und Winter) das langjährige Mittel errechnet. Dies ergibt sich aus dem Durchschnitt der Mittelwerte jeden Jahres und jeder „Climate Division“ für die Monate März, April, Mai (Frühling), Juni, Juli, August (Sommer), September, Oktober, November (Herbst) und Dezember, Januar, Februar (Winter).

c) Abbildungen

Die Abbildungen zu Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen wurden mit Microsoft Excel 2007 erstellt. Die Trendlinien auf den Abbildungen wurden auf der Basis des Korrelationskoeffizienten von Pearson erstellt. Das Bestimmtheitsmaß r^2 wurde ebenfalls mit Microsoft Excel 2007 berechnet (siehe auch Kapitel 5.6).

5.4.3 Ergebnisse

a) Temperatur

Die jährliche Durchschnittstemperatur der „Climate Divisions“ der USA im Zeitraum 1980 bis 2012 rangiert zwischen 2,2 °C im Bundesstaat Wyoming und 25,3 °C im Bundesstaat Florida (Abbildung 50). Über alle Staaten des Kernlandes der USA gemittelt beträgt die Durchschnittstemperatur 11,7 °C. Im Allgemeinen erreichen die südlich gelegenen Staaten die höchsten Durchschnittstemperaturen, die Staaten im Norden und Nordosten haben im Allgemeinen geringere Durchschnittstemperaturen. Die Temperatur nimmt im Allgemeinen von den nördlichen Staaten zu den südlichen Staaten hin zu (Abbildung 50).

Im gesamten Kernland der USA konnte im Mittel ein Anstieg der Durchschnittstemperatur beobachtet werden (Abbildung 51). Das wärmste Jahr im Untersuchungszeitraum 1980 bis 2012 war, mit einer Durchschnittstemperatur von 13 °C, das Jahr 2012. Dieses stellt auch gleichzeitig das wärmste Jahr des Kernlandes der USA in der Geschichte der Temperaturlaufzeichnungen dar und hat damit das Jahr 1998 (12,7° C) als wärmstes Jahr abgelöst (vgl. National Climatic Data Center (2013^b)). Die kältesten Jahre im Untersuchungszeitraum waren 1993 (10,88 °C), 1996 (10,94 °C) und 1985 (10,95 °C).

Von den insgesamt 16 Jahren, die relativ zum Bezugszeitraum überdurchschnittlich hoch waren, gab es zehn im 21. Jahrhundert, vier in den 1990er Jahren und zwei in den 1980er Jahren. Von den insgesamt 17 überdurchschnittlich kühlen Jahren waren acht in den 1980er Jahren, sechs in den 1990er Jahren und drei in den 2000er Jahren vertreten (Abbildung 51).

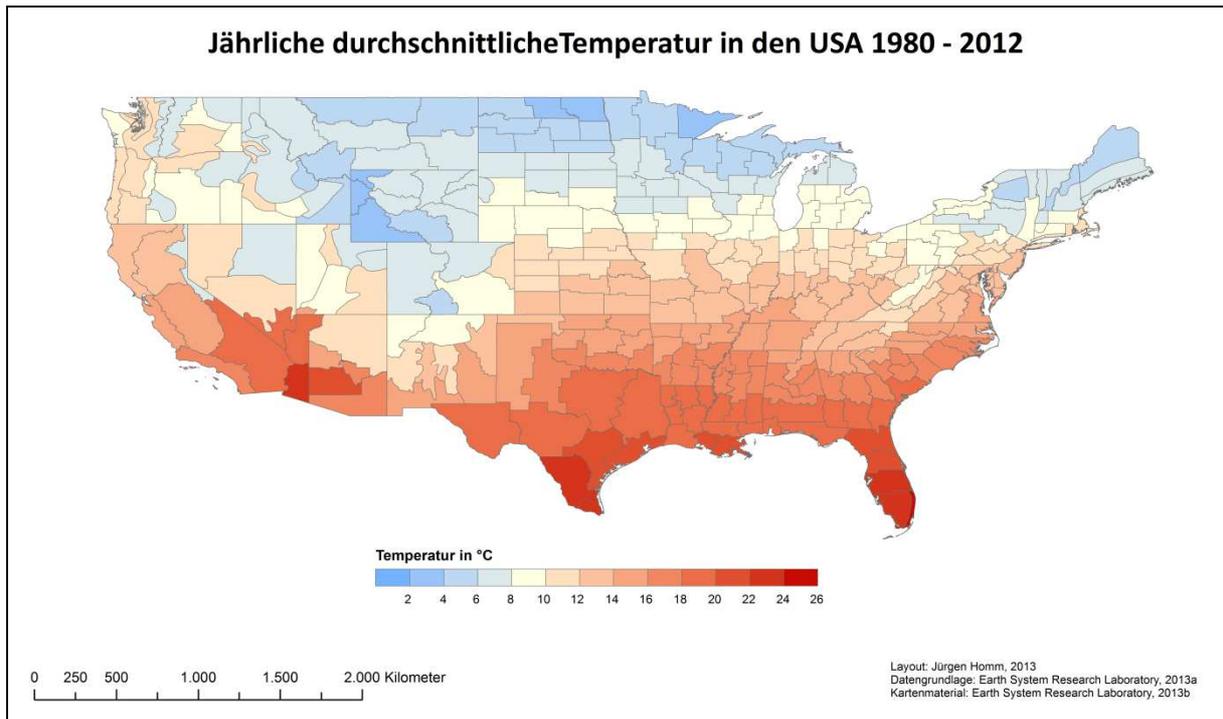


Abbildung 50: Jährliche durchschnittliche Temperatur im Kernland der USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

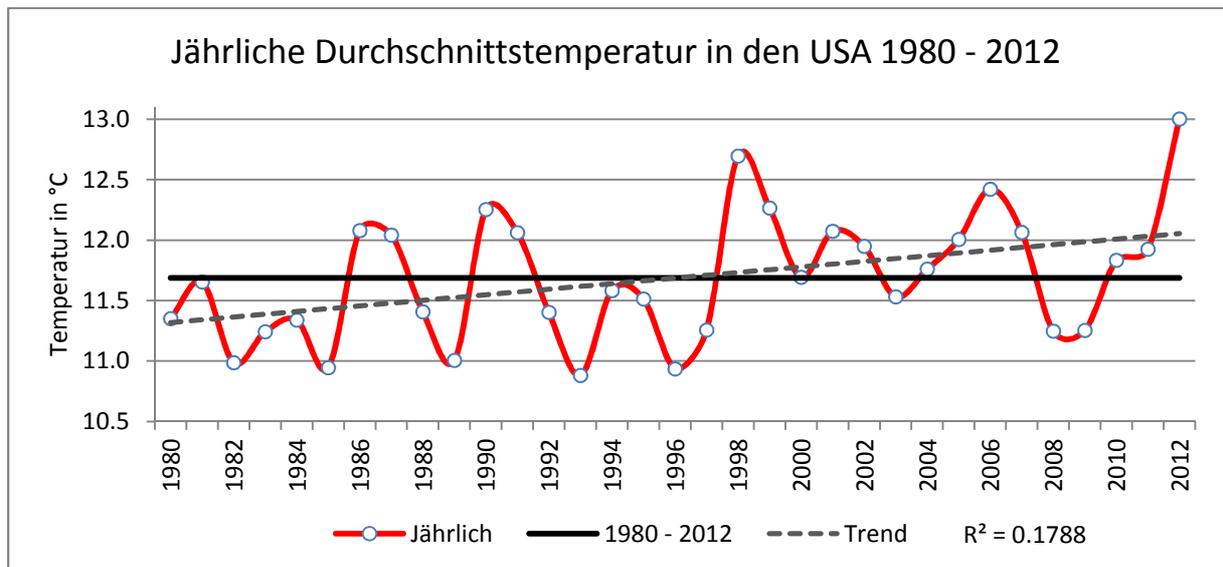


Abbildung 51: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Saisonale Unterschiede

Die durchschnittliche Temperatur im Frühling (März, April, Mai) im Zeitraum 1980 bis 2012 lag in den USA bei 11,2 °C. In diesem Zeitraum gab es 16 überdurchschnittlich warme Frühlinge (sieben im 21. Jahrhundert, fünf in den 1990er Jahren und vier in den 1980er Jahren).

17 Jahre waren überdurchschnittlich kühl (sechs in den 1980er Jahren, sechs im 21. Jahrhundert und fünf in den 1990er Jahren) (Abbildung 52). Der wärmste Frühling fand 2012 statt (13,8 °C; 2,5 °C wärmer als das langjährige Mittel). Den kältesten Frühling gab es 1984 mit 9,8 °C (1,4 °C kühler als das langjährige Mittel) (Tabelle 13).

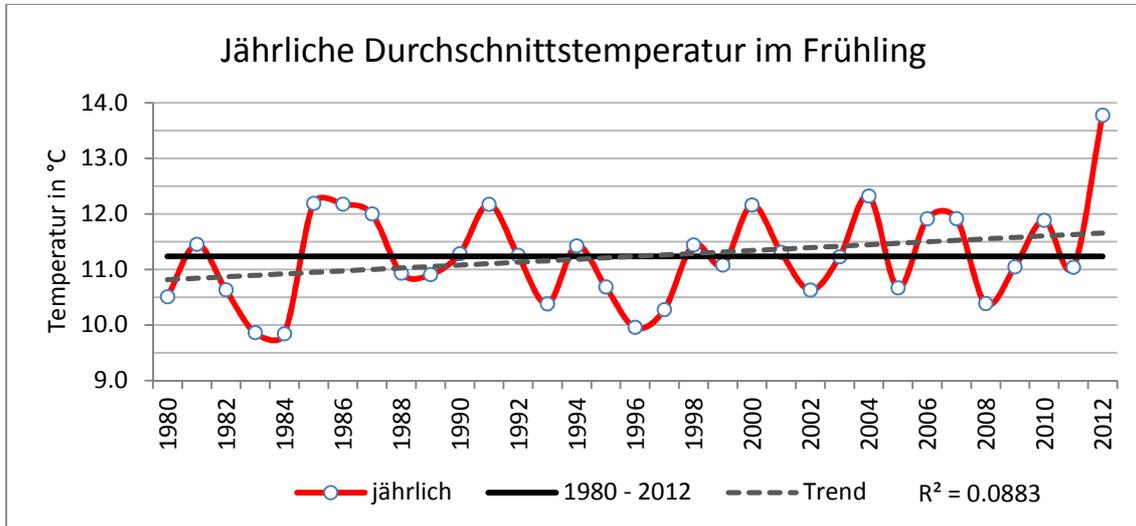


Abbildung 52: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA im Frühling (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Im Sommer liegt die langjährige Durchschnittstemperatur im Kernland der USA bei 22,4 °C. In 18 Jahren lag die Durchschnittstemperatur der USA über dem langjährigen Mittel, davon neun im 21. Jahrhundert, fünf in den 1980er Jahren und vier in den 1990er Jahren. Von den 15 überdurchschnittlich kühlen Jahren fanden sechs in den 1990er Jahren, fünf in den 1980er Jahren und vier im 21. Jahrhundert statt (Abbildung 53). Der wärmste Sommer war im Jahr 2010 mit 23,4 °C (1,0 °C über dem langjährigen Mittel), der kälteste im Jahr 1992 (20,9 °C; 1,5 °C unter dem langjährigen Mittel). Hierbei fällt auf, dass die wärmsten drei Sommer in den vergangenen drei Jahren stattfanden (Tabelle 13).

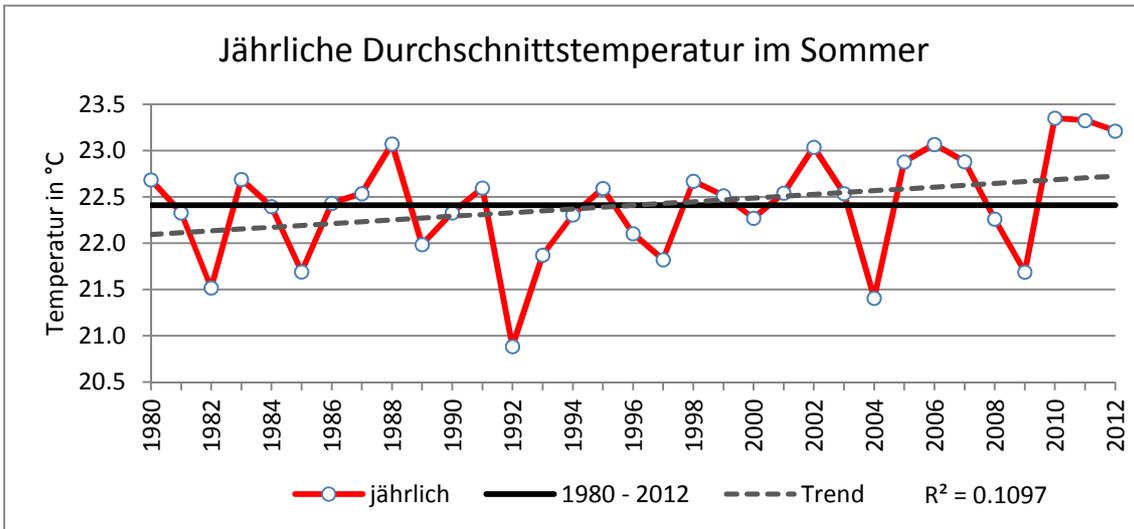


Abbildung 53: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA im Sommer (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Die langjährige Durchschnittstemperatur liegt in den Herbstmonaten bei 12,4 °C. Insgesamt gab es 13 Jahre, in denen der Herbst überdurchschnittlich warm war (acht im 21. Jahrhundert, vier in den 1990er Jahren und ein Jahr in den 1980er Jahren). Demnach gab es wiederum 20 Jahre in denen der Herbst überdurchschnittlich kühl war (neun in den 1980er Jahren, sechs in den 1990er Jahren und fünf in den 2000er Jahren) (Abbildung 54). Der wärmste Herbst fand 1998 statt (13,8 °C; 1,4 °C wärmer als das langjährige Mittel), der kühlfte Herbst 1984 mit 11,3 °C (-1,1 °C kühler als das langjährige Mittel) (Tabelle 13).

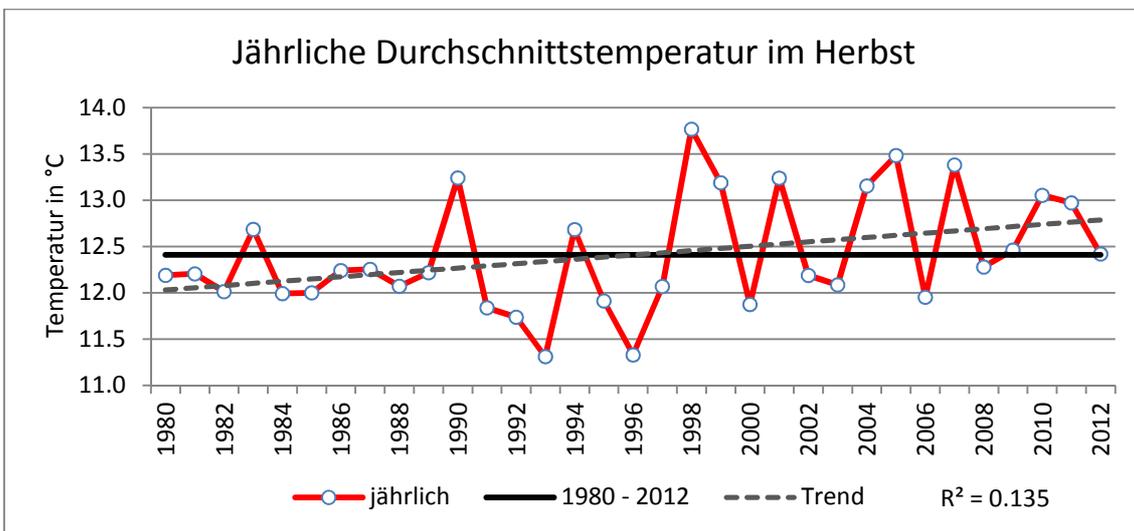


Abbildung 54: Entwicklung der jährliche Durchschnittstemperatur in den USA im Herbst (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Im Winter lag die Durchschnittstemperatur der USA im Untersuchungszeitraum bei 0,7 °C. Fünfzehnmal gab es überdurchschnittlich warme Winter, darunter sieben in den 1990er Jahren, fünf im 21. Jahrhundert und drei in den 1980er Jahren. 18 Winter waren überdurchschnittlich kühl (acht im 21. Jahrhundert, sieben in den 1980er Jahren und drei in den 1990er Jahren) (Abbildung 55). Der wärmste Winter fand 1998 statt und lag mit 2,9 °C, 2,2 °C über dem langjährigen Mittel. Der kälteste Winter fand 1984 statt (-2,1 °C; 2,8° kühler als das langjährige Mittel) (Tabelle 13)

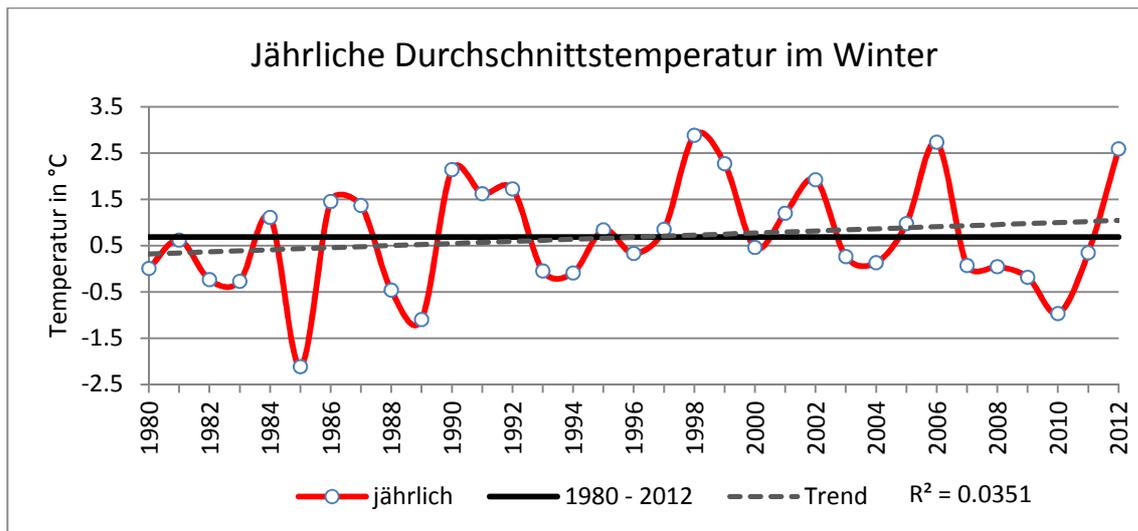


Abbildung 55: Entwicklung der jährliche Durchschnittstemperatur in den USA im Winter (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 13: Die drei wärmsten und kältesten Jahre im Zeitraum 1980 – 2012 nach Jahreszeit. Die Zahl in Klammern gibt die langjährige Durchschnittstemperatur der jeweiligen Jahreszeit an. °C = Durchschnittstemperatur des Jahres in °C, Δ°C = Abweichung der Durchschnittstemperatur vom langjährigen Mittel in °C (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

	Frühling (11,2 °C)			Sommer (22,4 °C)			Herbst (12,4 °C)			Winter (0,7 °C)		
	Jahr	°C	Δ°C	Jahr	°C	Δ°C	Jahr	°C	Δ°C	Jahr	°C	Δ°C
wärmste Jahre	2012	13,8	+2,5	2010	23,4	+1,0	1998	13,8	+1,4	1998	2,9	+2,2
	2004	12,3	+1,1	2011	23,3	+0,9	2005	13,5	+1,1	2006	2,7	+2,0
	1985	12,2	+1,0	2012	23,2	+0,8	2007	13,4	+1,0	2012	2,6	+1,9
kälteste Jahre	1996	10,0	-1,2	1982	21,5	-0,9	1992	11,7	-0,7	2010	-1,0	-1,7
	1983	9,9	-1,3	2004	21,4	-1,0	1996	11,3	-1,1	1989	-1,1	-1,8
	1984	9,8	-1,4	1992	20,9	-1,5	1993	11,3	-1,1	1985	-2,1	-2,8

b) Niederschlag

Der durchschnittliche jährliche Gesamtniederschlag im Kernland der USA im Zeitraum 1980 bis 2012 beträgt 912 mm. Den geringsten durchschnittlichen Niederschlag gab es in diesem Zeitraum im Südwesten in Arizona (126 mm), den höchsten Niederschlag im Bundesstaat Washington (2442 mm). Im Allgemeinen fällt in den westlich gelegenen Staaten der USA weniger Niederschlag, als in den östlich gelegenen Staaten. Eine Ausnahme stellt jedoch der Nordwesten dar. Hier gibt es mit die höchsten Niederschläge im Kernland der USA (Abbildung 56).

Im Untersuchungszeitraum fiel in den USA im Durchschnitt im Jahr 1988 der geringste Niederschlag (734 mm). Das Jahr 1983 war mit 1020 mm das feuchteste Jahr in diesem Zeitraum.

Insgesamt gab es im Untersuchungszeitraum 15 Jahre, in denen der Niederschlag überdurchschnittlich niedrig war (davon sieben im 21. Jahrhundert, sieben in den 1980er Jahren und eines in den 1990er Jahren). In 18 Jahren gab es überdurchschnittlich viel Niederschlag (neunmal in den 1990er Jahren, sechsmal im 21. Jahrhundert und dreimal in den 1980er Jahren). Insgesamt deutet die Trendlinie im Untersuchungszeitraum eine leichte Zunahme des durchschnittlichen jährlichen Gesamtniederschlags an (Abbildung 57). Im Durchschnitt nahm der Niederschlag jedoch um -0,08% ab.

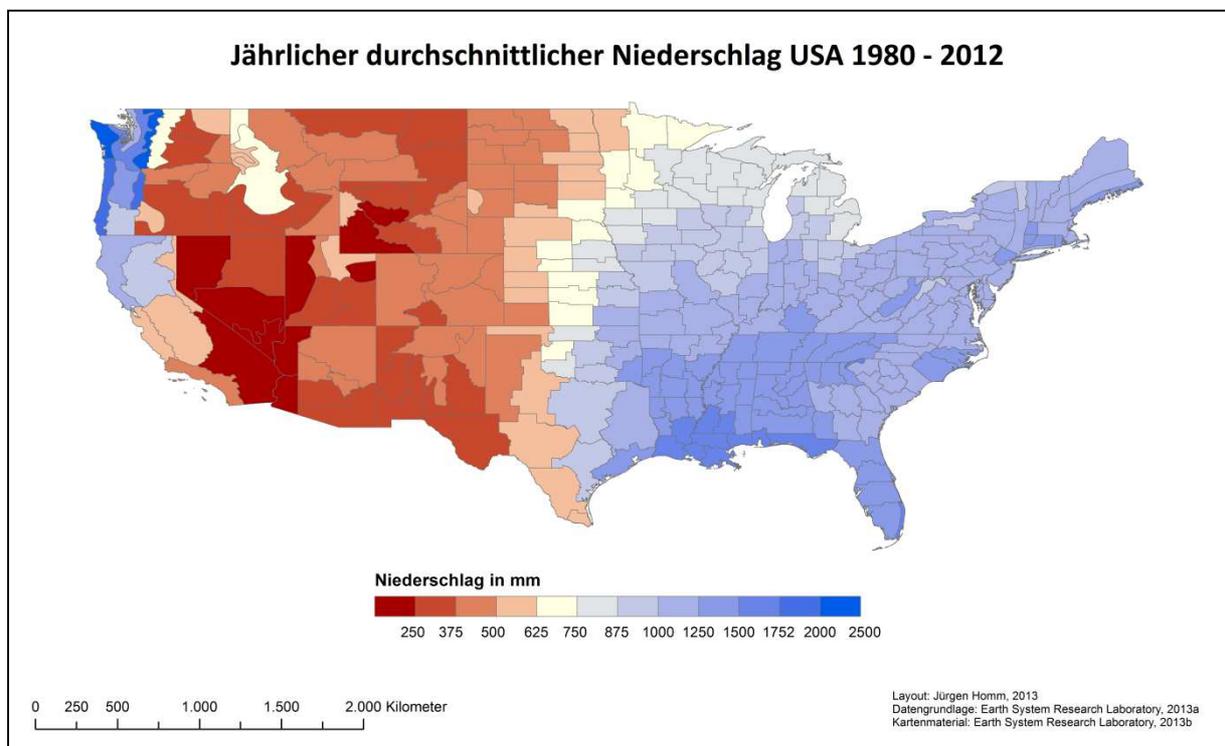


Abbildung 56: Langjähriger durchschnittlicher Niederschlag in den USA im Zeitraum 1980-2012 (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

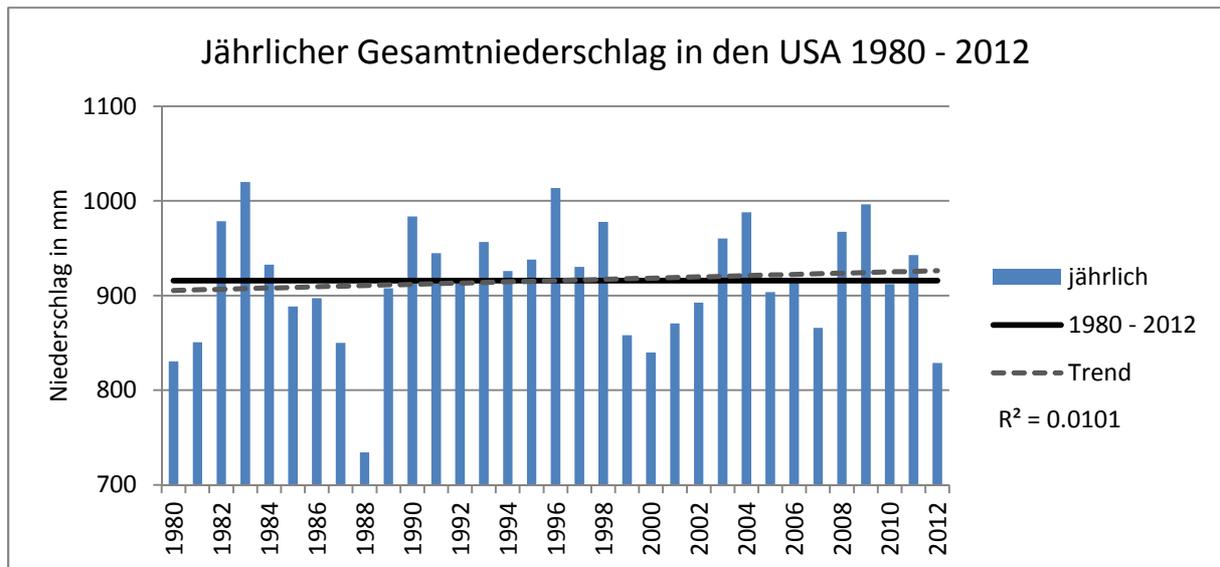


Abbildung 57: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Gesamtniederschlags in den USA 1980 – 2012 (blaue Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Saisonale Unterschiede

Der durchschnittliche Niederschlag im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 beträgt 242 mm. In 17 Jahren in diesem Zeitraum gab es überdurchschnittlich wenig Niederschlag (acht Jahre im 21. Jahrhundert, sechs in den 1980er Jahren und drei in den 1990er Jahren). In 16 Jahren gab es überdurchschnittlich viel Niederschlag (fünfmal im 21. Jahrhundert, siebenmal in den 1990er Jahren und viermal in den 1980er Jahren) (Abbildung 58). Der feuchteste Frühling war mit 317 mm Niederschlag im Jahr 1983 (75 mm über dem langjährigen Durchschnitt), der trockenste Frühling war mit 187 mm Niederschlag im Jahr 1988 (55 mm unter dem langjährigen Durchschnitt).

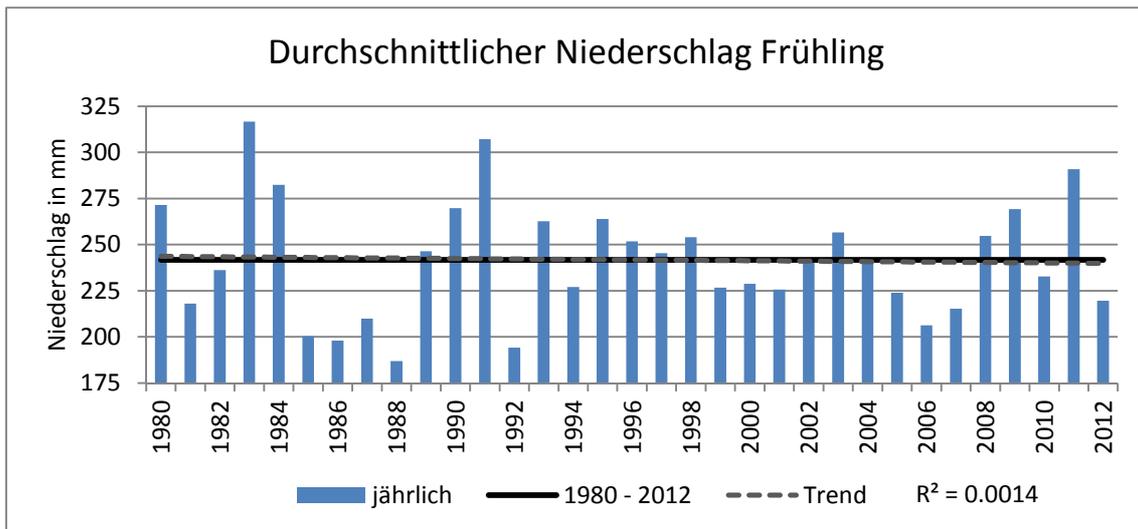


Abbildung 58: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Frühling (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Im Sommer gab es 15 Jahre, die überdurchschnittlich trocken waren (sechs davon im 21. Jahrhundert, fünf in den 1980er Jahren und vier in den 1990er Jahren). 18 Sommer waren überdurchschnittlich feucht (sieben im 21. Jahrhundert, sechs in den 1990er Jahren und fünf in den 1980er Jahren). Insgesamt nahm der Niederschlag im Zeitraum 1980 bis 2012 zu (Abbildung 59). Im Jahr 1992 gab es mit 299 mm den meisten Sommerniederschlag im Untersuchungszeitraum (43 mm mehr als der langjährige Durchschnitt), im Jahr 1988 den geringsten Sommerniederschlag mit 205 mm (51 mm weniger als der langjährige Durchschnitt) (Tabelle 14).

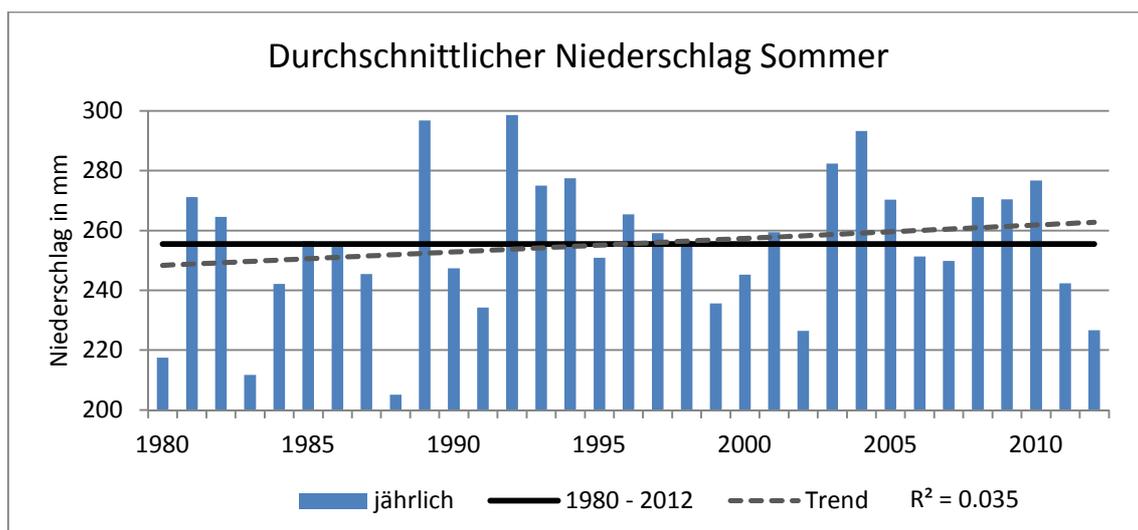


Abbildung 59: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Sommer (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Im Untersuchungszeitraum gab es einen minimalen Anstieg der Herbstniederschläge (Abbildung 60). In den Herbstmonaten gab es 20 Jahre, in denen der Niederschlag überdurchschnittlich gering war (sieben davon im 21. Jahrhundert, sieben in den 1990er Jahren und sechs in den 1980er Jahren). 13 Herbste waren überdurchschnittlich feucht (sechs im 21. Jahrhundert, vier in den 1980er Jahren und drei in den 1990er Jahren). Der feuchteste Herbst war im Jahr 1985 (282 mm; 60 mm über Durchschnitt), der trockenste im Jahr 1987 (184 mm; 38 mm unter Durchschnitt) (Tabelle 14).

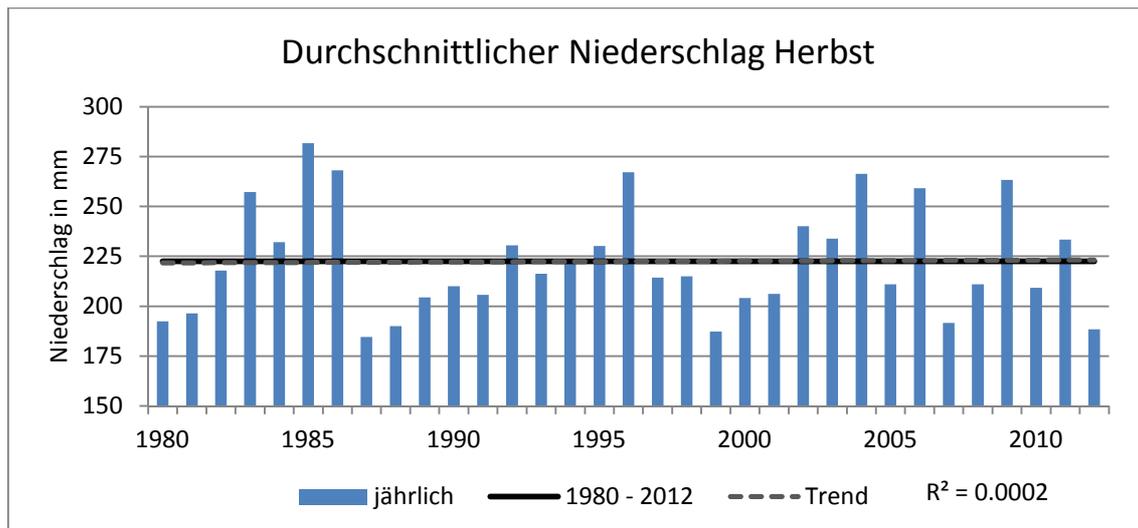


Abbildung 60: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Herbst (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Insgesamt nahm der Niederschlag im Winter im Untersuchungszeitraum zu (Abbildung 61). Es gab 18 Winter die überdurchschnittlich trocken waren (neun davon im 21. Jahrhundert, zwei davon in den 1990er Jahren und sieben in den 1980er Jahren). 15 Winter waren überdurchschnittlich feucht (acht davon in den 1990er Jahren, vier im 21. Jahrhundert und drei in den 1980er Jahren). 1982 war mit 260 mm Niederschlag das feuchteste Jahr im Untersuchungszeitraum (64 mm über dem langjährigen Mittel), 1980 war mit 149 mm das trockenste Jahr des Untersuchungszeitraums (47 mm unter dem langjährigen Mittel) (Tabelle 14).

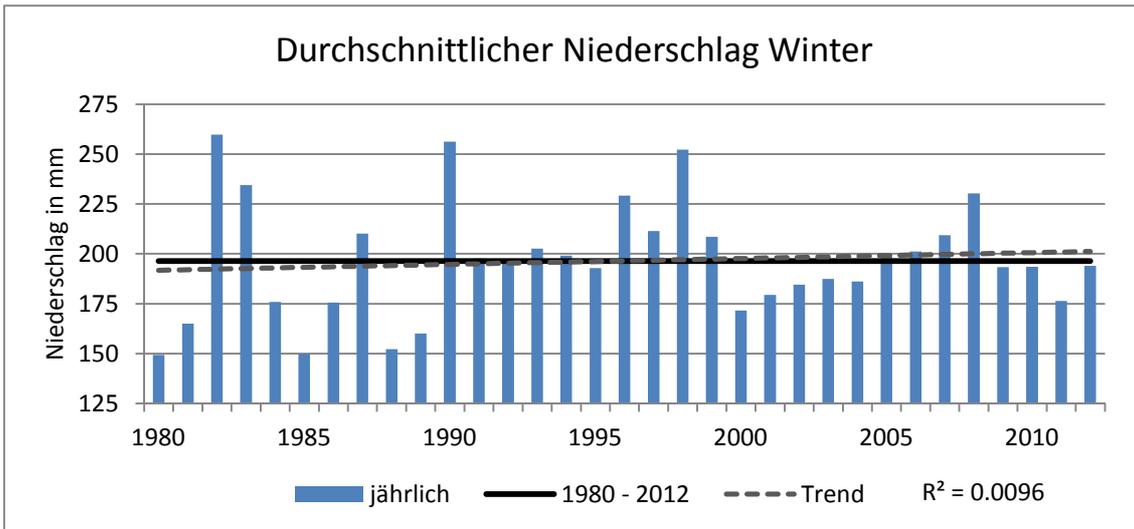


Abbildung 61: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Winter (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 14: Die drei „feuchtesten“ und „trockensten“ Jahre im Zeitraum 1980 – 2012 nach Jahreszeit. Die Zahlen in Klammern geben den langjährigen Durchschnittsniederschlag der jeweiligen Jahreszeit an. mm = Niederschlagsmenge des Jahres in mm, Δ mm = Abweichung der Durchschnittsniederschlag vom langjährigen Mittel in mm (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

	Frühling (242 mm)			Sommer (256 mm)			Herbst (222 mm)			Winter (196)		
	Jahr	mm	Δ mm	Jahr	mm	Δ mm	Jahr	mm	Δ mm	Jahr	mm	Δ mm
Jahre mit höchstem Niederschlag	1983	317	75	1992	299	43	1985	282	60	1982	260	64
	1991	307	65	1989	297	41	1986	268	46	1990	256	60
	2011	291	49	2004	293	37	1996	267	45	1998	252	56
Jahre mit wenigstem Niederschlag	1986	198	-44	1980	217	-39	2012	188	-34	1988	152	-44
	1992	194	-48	1983	212	-44	1999	187	-35	1985	150	-46
	1988	187	-55	1988	205	-51	1987	184	-38	1980	149	-47

5.5 Regionale Einflüsse des Klimas auf Brände in den USA

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Brandereignisse sowie Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf nationaler Ebene untersucht. Ein Großteil der Brände fand im Untersuchungszeitraum jedoch in den westlichen Bundesstaaten statt. Daher sind Klimaänderungen in den Bundesstaaten, in denen keine oder nur wenige Brände auftraten, für den Großteil der Änderungen von Brandaktivitäten, weniger relevant.

Im Folgenden werden daher Brandereignisse, Temperatur- und Niederschlagsänderungen in ausgewählten Bundesstaaten untersucht. Diese wurden zunächst nach einem Kriterium für die detaillierte Analyse ausgewählt: sie sollten eine gewisse Anzahl an Bränden im Untersuchungszeitraum aufweisen, um statistische Untersuchungen zuzulassen. In einem Bundesstaat sollten im Untersuchungszeitraum mindestens 10 000 Brände aufgetreten sein. Dieser Schwellenwert wurde willkürlich gewählt und trifft auf sechs Staaten zu: Kalifornien, Arizona, Oregon, Idaho, Montana und New Mexico.

Des Weiteren sollte untersucht werden, wie sich Temperatur- und Niederschlagswerte in verschiedenen Klimazonen entwickelten und wie diese Entwicklungen Einfluss auf die Brandereignisse hatten. Kalifornien repräsentiert dabei den gemäßigten Klimatyp mit trockenen warmen bis heißen Sommern (Csa und Csb). Arizona steht im Allgemeinen für ein trockenes Wüsten- und Steppenklima (Bsk, BWh und BSh). Oregon weist in dem Bereich, in dem Brände stattfanden, primär ein gemäßigtes Klima mit trockenen, warmen Sommern auf (Csb). Idaho kennzeichnet sich durch einen kalten Klimatyp mit warmen Sommern (Dsb und Dfb). Montana hat ebenfalls ein kaltes Klima ohne eine ausgeprägte Trockensaison (Dfb und Dfc). In New Mexico herrscht ein arides, kaltes Wüsten- und Steppenklima (Bsk und BWk). Im Norden dominiert jedoch ein kaltes Klima ohne ausgeprägte Trockensaison und mit warmen Sommern.

Im Folgenden werden, ausgehend von den oben genannten Kriterien, die Bundesstaaten Kalifornien, Arizona und Idaho analysiert. Mit der Analyse dieser drei Staaten wird jede Klimaregion in den Bundesstaaten abgedeckt werden, in denen über 10 000 Brände vorkamen. Insgesamt fand knapp die Hälfte aller Brände in diesen drei Staaten statt.

5.5.1 Kalifornien

Die meisten Brände, die durch Blitze verursacht wurden, gab es im Untersuchungszeitraum in Kalifornien. Die vorherrschenden Klimatypen in Kalifornien, in den Gegenden, in denen auch Brände stattfanden, lauten Csa und Csb (= gemäßigttes Klima mit trockenen, warmen bis heißen Sommern) (vgl. Abbildung 18). Zwischen 1980 und 2012 gab es insgesamt 24 418 Brände. Die meisten Brände fanden in den 1980er Jahren statt (7994 Brände). In den 1990er kam es zu einer leichten Abnahme der Brandereignisse (7424 Brände) und in den 2000er Jahren wieder zu einem leichten Anstieg (7701 Brände) (Tabelle 15). Insgesamt konnte jedoch eine Abnahme der Brandereignisse seit 1980 um -1,5% festgestellt werden (Abbildung 62). Dieser Rückgang konnte jedoch nur bei Bränden, die Flächen bis 0,2 Acre verbrannten, festgestellt werden (Abbildung 63). In allen anderen Größenklassen kam es hingegen zu einem Anstieg der Brandereignisse. Des Weiteren nahm zwar die absolute Zahl aller Brände zwischen 1980 und 2012 ab, die Menge der dadurch verbrannten Flächen nahm in diesem Zeitraum hingegen im jährlichen Durchschnitt um 10% pro Jahr zu (Abbildung 64).

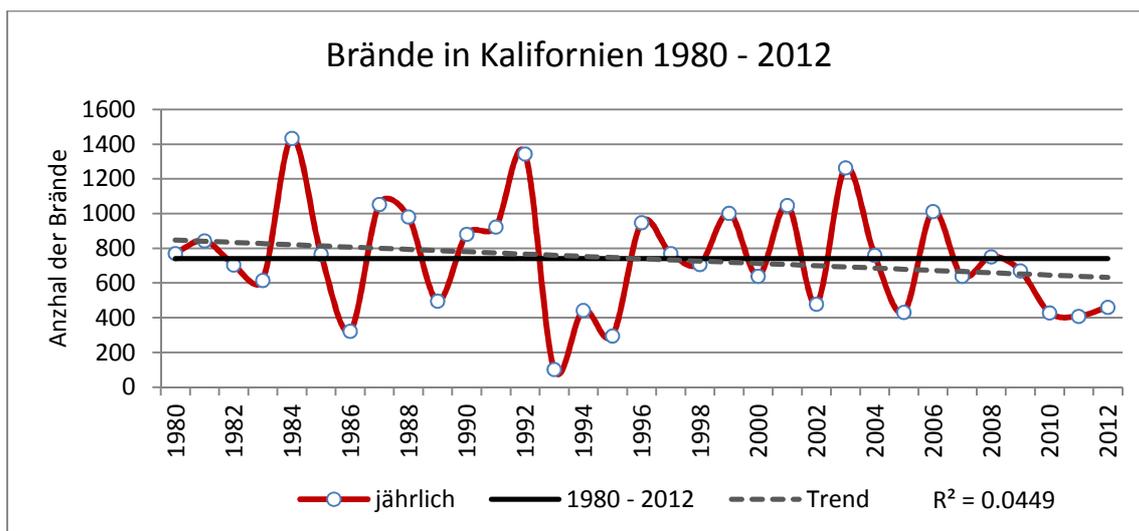


Abbildung 62: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 15: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Zeitperiode	Brände	Brände in %	Durchschnittstemperatur	Niederschlag in mm	
				Gesamt	Mittel
1980 – 1989	7994	32,74	11.3 °C	6183	618
1990 – 1999	7424	30,40	11.3 °C	6458	646
2000 – 2009	7701	31,54	11.4 °C	5467	547
2010 – 2012	1299	5,32	11.3 °C	1905	635
1980 – 2012	24418	100	11.3 °C	20013	606

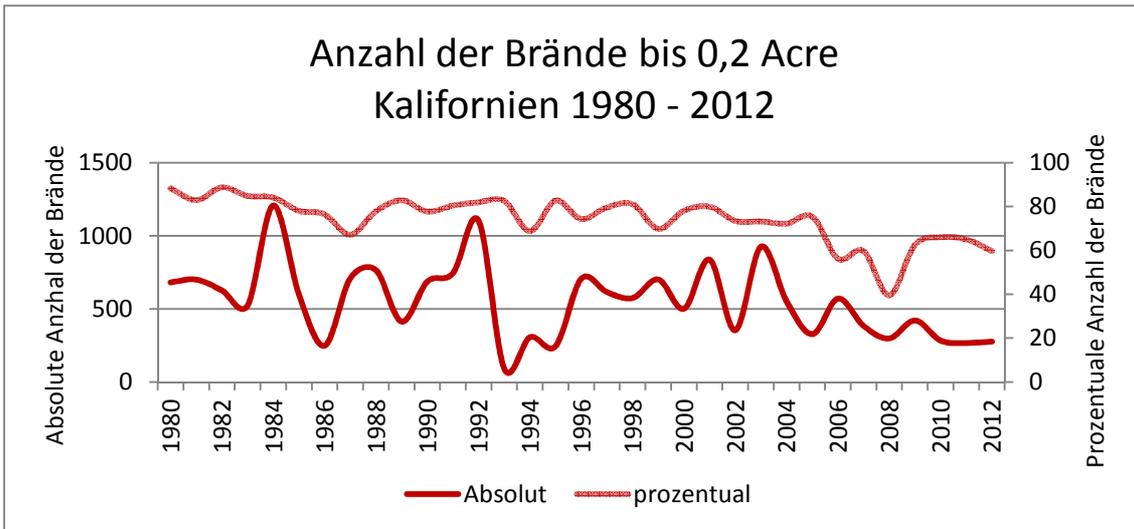


Abbildung 63: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

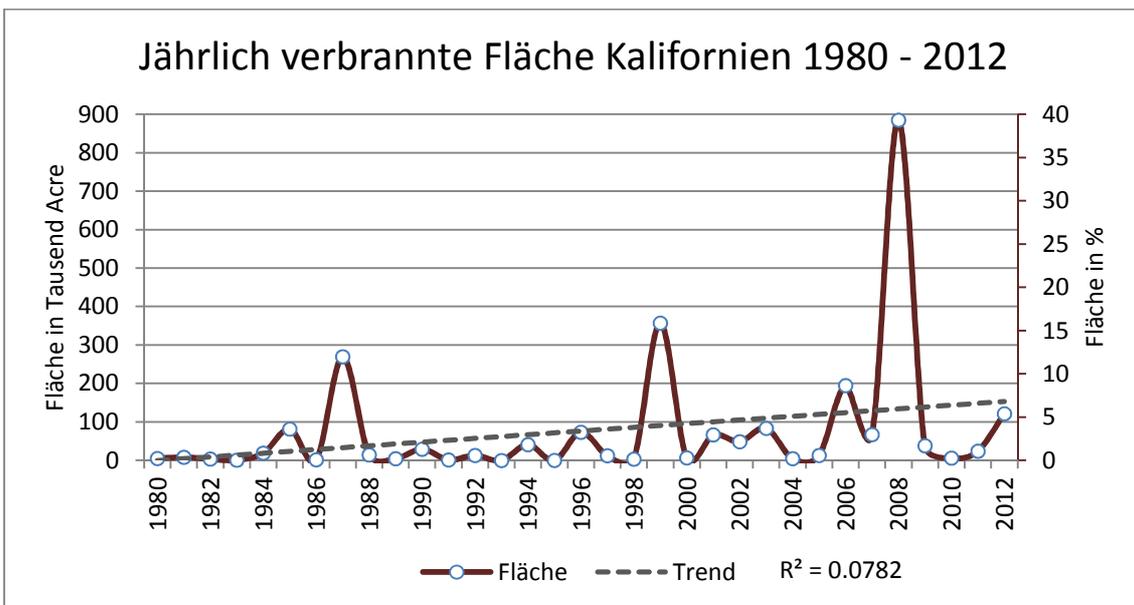


Abbildung 64: Jährlich verbrannte Fläche in Kalifornien im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Zwischen 1980 und 2012 konnte ein leichter Anstieg der Durchschnittstemperatur festgestellt werden. Die drei wärmsten Jahre des Untersuchungszeitraums waren 1996 (11,81°C), 1981 (11,79°C) und 2012 (11,78°C). Die drei kühlfsten Jahre waren 1982 (10,50 °C), 1998 (10,66 °C) und 1985 (10,90 °C) (Abbildung 65).

Im Untersuchungszeitraum konnte zudem eine leichte Abnahme des jährlichen Gesamtniederschlags beobachtet werden. Den meisten Niederschlag gab es 1983 (996 mm), 1998 (995 mm) und 1995 (926 mm). In den Jahren 1985 (331 mm), 1984 (350 mm) und 2007 (356 mm) fiel der geringste Niederschlag (Abbildung 66).

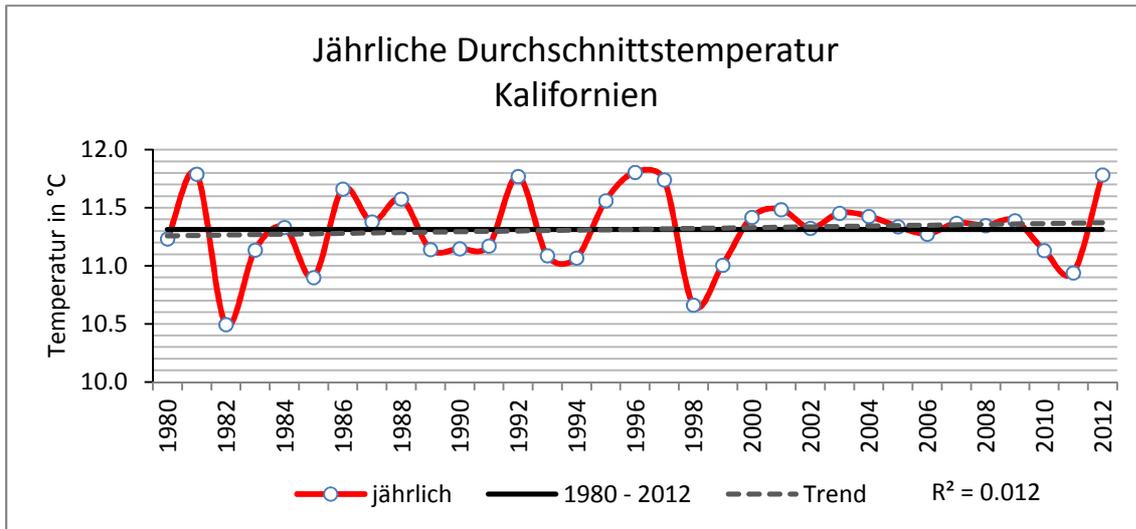


Abbildung 65: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

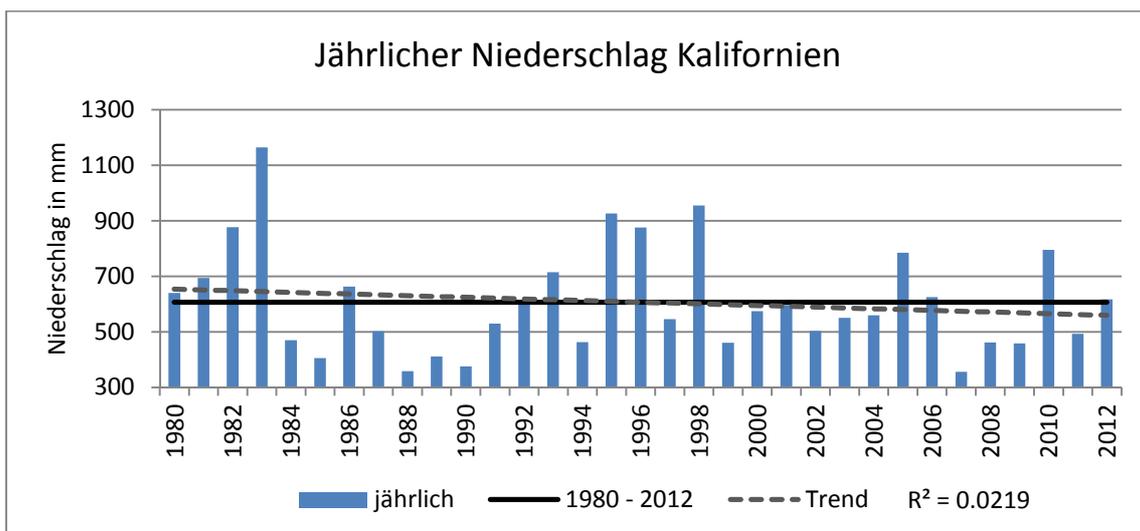


Abbildung 66: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Saisonale Unterschiede

Die meisten Brände traten in Kalifornien in den Sommermonaten Juni, Juli und August auf. In diesem Zeitraum traten 73 % aller Brände auf. Im Herbst traten 22 % aller Brände auf, wobei der Großteil dieser Brände im September stattfand. Im Frühling fanden noch 4,9 % der Brände statt. Im Winter gab es nur vereinzelt Feuer (24 Brände; 0,1%) (Tabelle 16).

Tabelle 16: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Jahreszeit	Brände	Brände in Prozent	Durchschnitts-temperatur	Mittlerer Niederschlag
Frühling	1192	4,9	13.0 °C	161 mm
Sommer	17832	73	12.9 °C	172 mm
Herbst	5370	22	13.1 °C	125 mm
Winter	24	0,1	12.1 °C	200 mm

In den Frühlingsmonaten März, April und Mai konnte ein Rückgang der Brände festgestellt werden (durchschnittlich -3,11% pro Jahr; Abbildung 67). Zudem wurde eine leichte Abnahme der Temperatur und des Niederschlags seit 1980 beobachtet (Abbildung 68 und Abbildung 69). Die meisten Brände traten in den 1990er Jahren auf. Die Durchschnittstemperatur entsprach hier der des langjährigen Mittels, die Niederschläge waren überdurchschnittlich hoch. In den 2000er Jahren waren die Frühlinge überdurchschnittlich warm und trocken. Hier traten jedoch nur 28 % aller Frühlingsbrände auf (Tabelle 17). Die drei Jahre mit den meisten Bränden (1987, 1992 und 1997) waren überdurchschnittlich warme und trockene Jahre. In den Jahren, in denen die wenigsten Brände stattfanden (1993, 1998, 2010 und 2011) waren, zumindest in den letzten drei genannten, die Temperaturen überdurchschnittlich gering und die Niederschläge überdurchschnittlich hoch. 1993 hingegen waren die Temperaturen überdurchschnittlich hoch und die Niederschläge gering.

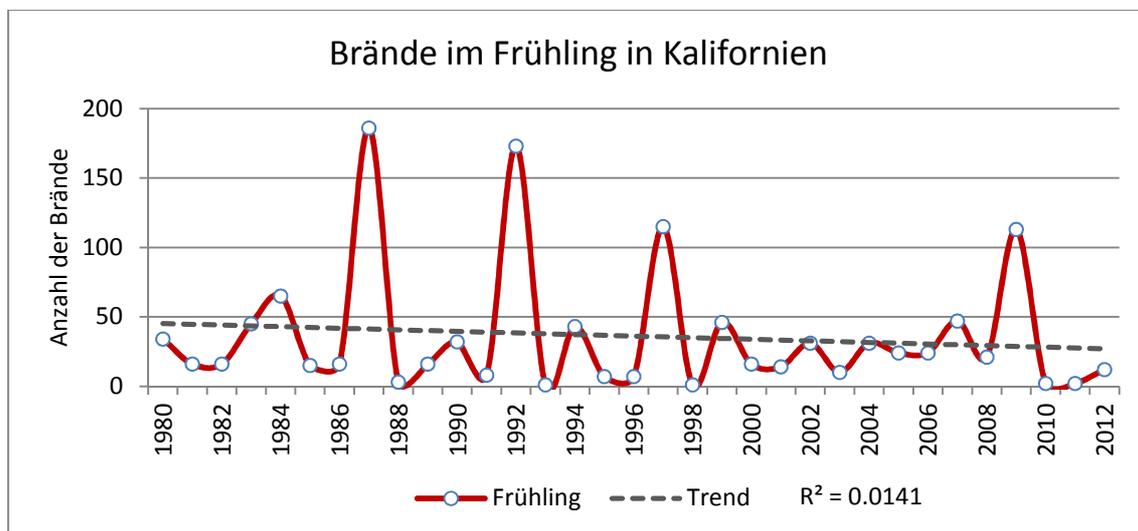


Abbildung 67: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

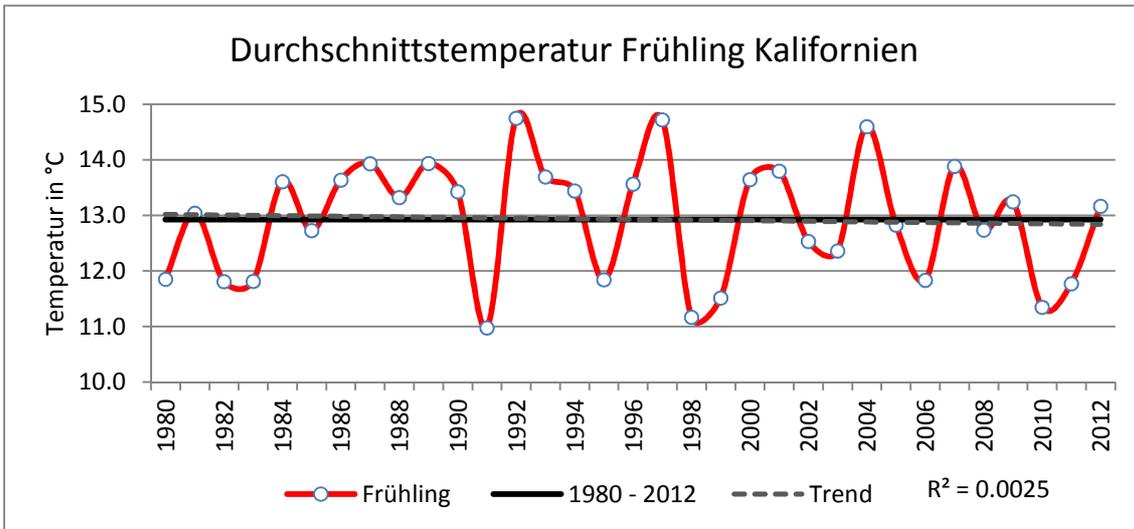


Abbildung 68: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

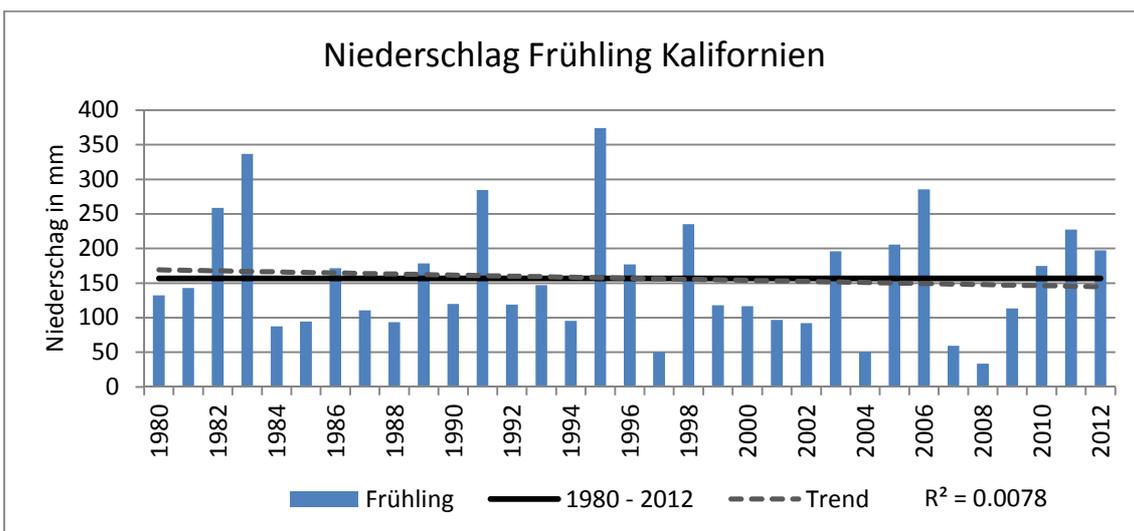


Abbildung 69: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 17: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Frühling				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	412	35	13.0 °C	161 mm
1990 - 1999	433	36	12.9 °C	172 mm
2000 - 2009	331	28	13.1 °C	125 mm
2010 - 2012	16	1	12.1 °C	200 mm

In den Sommermonaten kam es ebenfalls zu einem Rückgang der Brandereignisse (durchschnittlich -0,8% pro Jahr; Abbildung 70). Die Anzahl der Brände war zwischen den Jahrzehnten relativ ausgeglichen. Die meisten Brände gab es in den 2000er Jahren. In dieser Zeitperiode war die Durchschnittstemperatur überdurchschnittlich hoch und die mittleren Niederschläge überdurchschnittlich gering (Tabelle 18). Des Weiteren gab es einen Anstieg der Durchschnittstemperatur seit 1980, sowie eine Abnahme des mittleren Niederschlags (Abbildung 71 und Abbildung 72), was im Allgemeinen die Feueraktivität begünstigen würde. Es ist jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer erhöhten Anzahl an Brände und erhöhten Temperaturen und/oder verringerten Niederschläge im Sommer erkennbar.

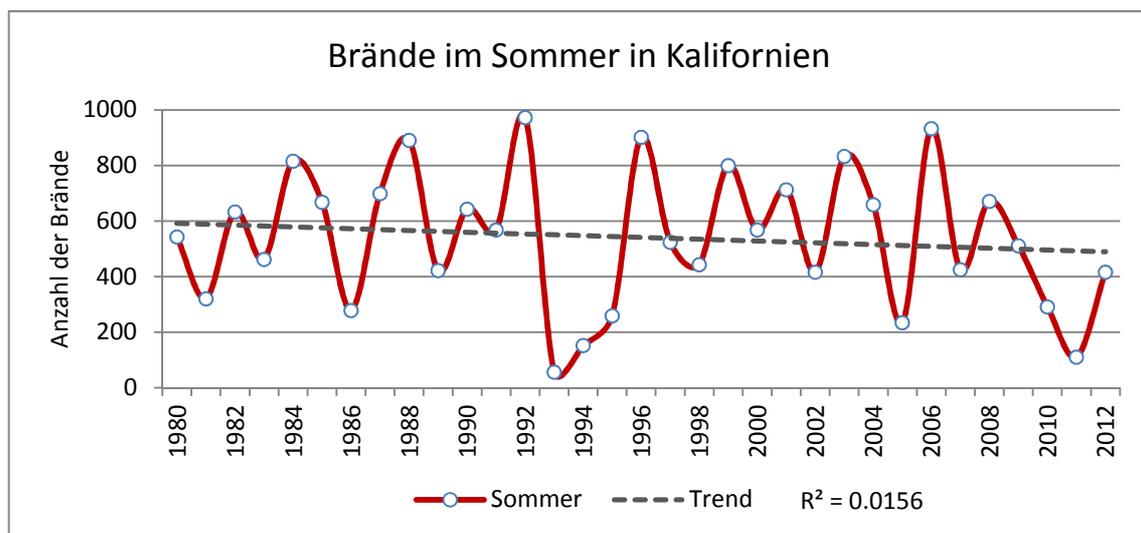


Abbildung 70: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Sommer im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

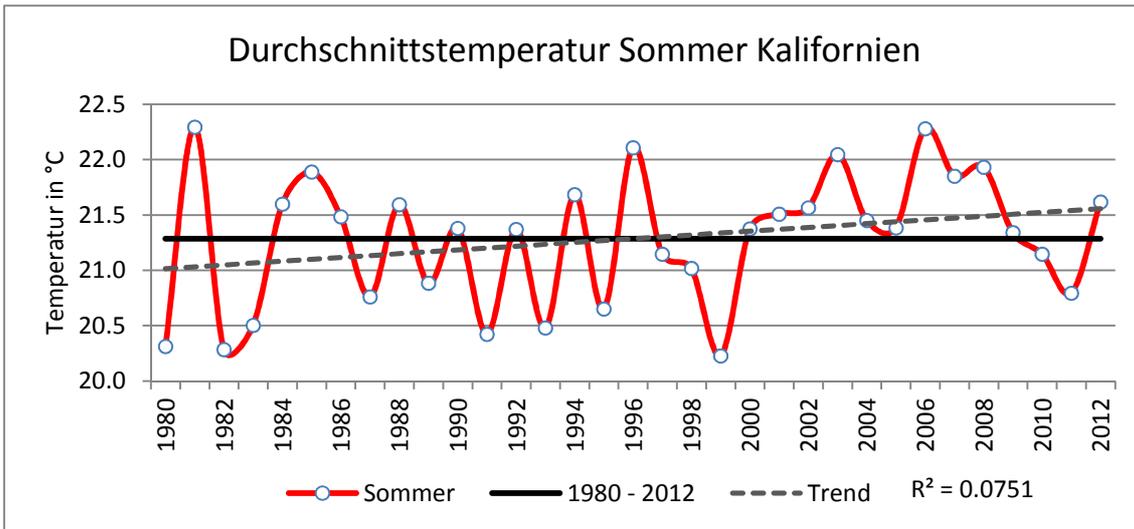


Abbildung 71: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

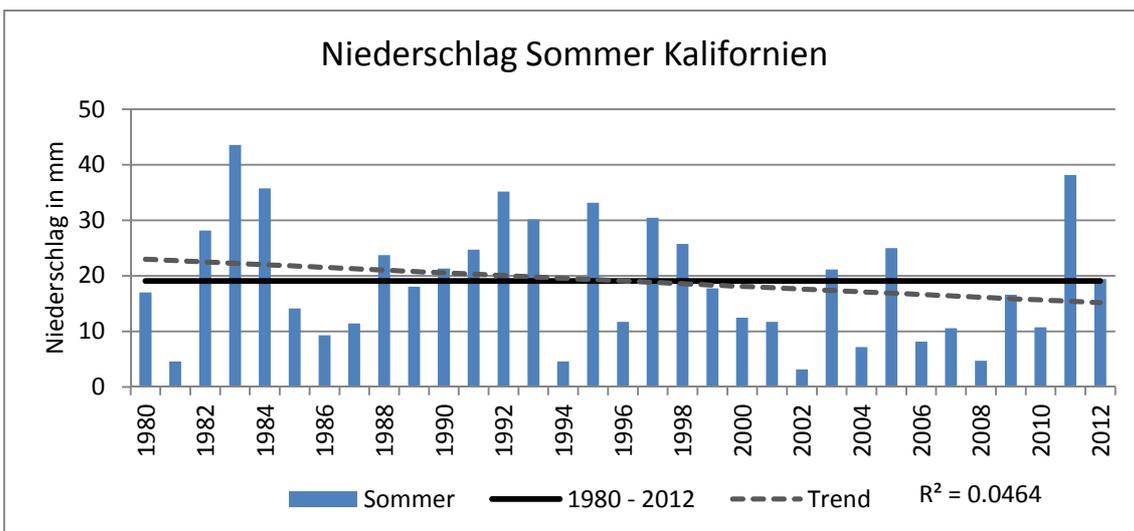


Abbildung 72: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 18: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Sommer				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	5732	32	21.2 °C	21 mm
1990 - 1999	5320	30	21.1 °C	23 mm
2000 - 2009	5963	33	21.7 °C	12 mm
2010 - 2012	817	5	21.2 °C	23 mm

Im Herbst nahm die Anzahl an Bränden in Kalifornien seit 1980 ab (durchschnittlich -5,2% pro Jahr; Abbildung 73). Bezüglich der Durchschnittstemperatur konnte kein Trend festgestellt werden. Der jährliche Niederschlag nahm zwischen 1980 und 2012 ab (Abbildung 74 und Abbildung 75). Dies spiegelt sich auch in der Entwicklung der absoluten und prozentualen Anzahl an Bränden in verschiedenen Dekaden wieder. In den 1980er Jahren traten etwa 34% aller Brände auf, in den 2000er waren es nur 26% (Tabelle 19). Die drei Herbste mit den meisten Bränden (1984, 1981 und 2003) waren alle überdurchschnittlich kühle Herbste. Zudem waren die Jahre 1984 und 1981 überdurchschnittlich feuchte Herbste. Das wären Bedingungen, die die Brandaktivität im Allgemeinen verringern würden. 1995 war zum Beispiel ein überdurchschnittlich warmer und trockener Herbst, was günstige Bedingungen für Brände gewesen wären. In diesem Herbst gab es jedoch äußerst wenige Brände (29 Brände).

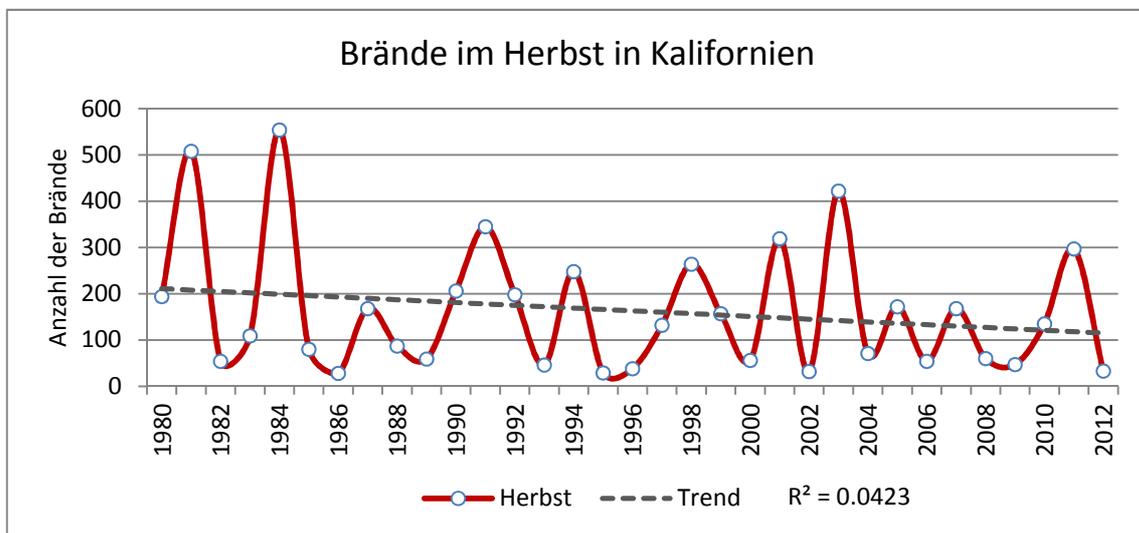


Abbildung 73: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

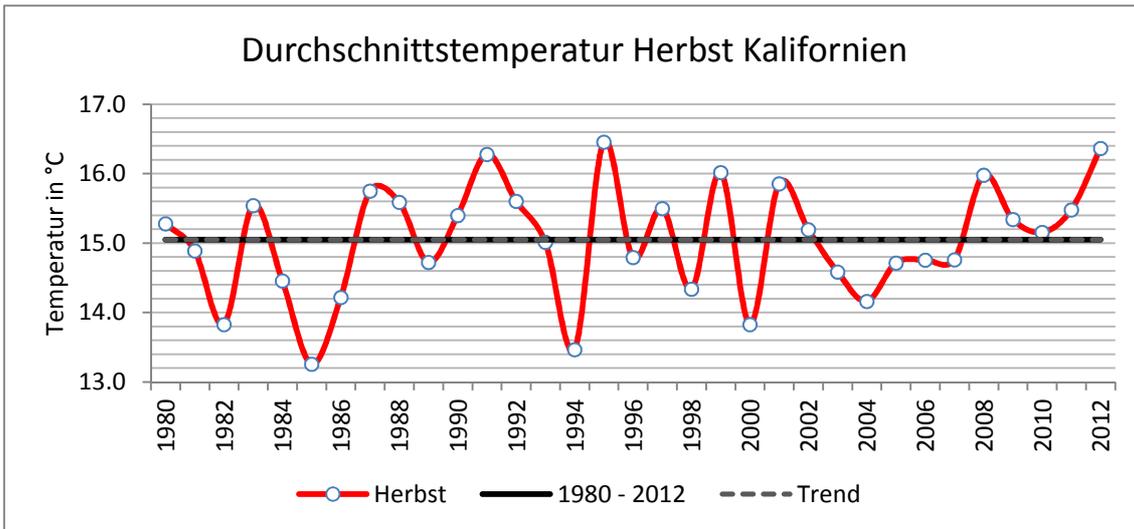


Abbildung 74: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

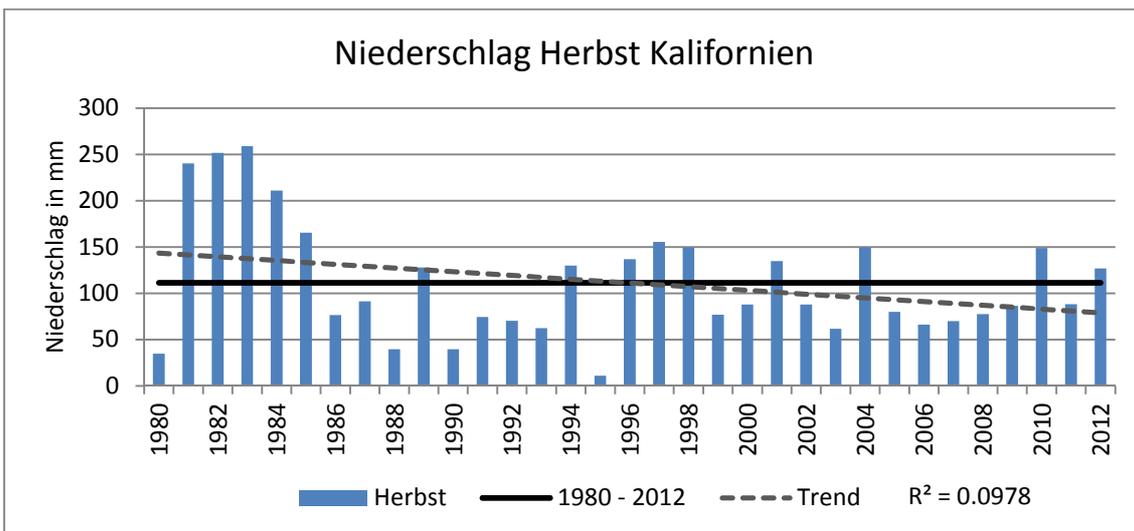


Abbildung 75: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 19: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Herbst				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	1841	34	14.8 °C	150 mm
1990 - 1999	1663	31	15.3 °C	91 mm
2000 - 2009	1401	26	14.9 °C	90 mm
2010 - 2012	465	9	15.7 °C	121 mm

Auch im Winter ging die Anzahl an Bränden tendenziell zurück (Abbildung 76 und Tabelle 20). Jedoch ist die gesamte Anzahl an Bränden so gering, dass darüber keine statistisch signifikanten Aussagen getroffen werden können. Im Untersuchungszeitraum konnte zudem eine Abnahme der jährlichen Durchschnittstemperatur und eine Zunahme des jährlichen mittleren Niederschlags festgestellt werden (Abbildung 77 und Abbildung 78).

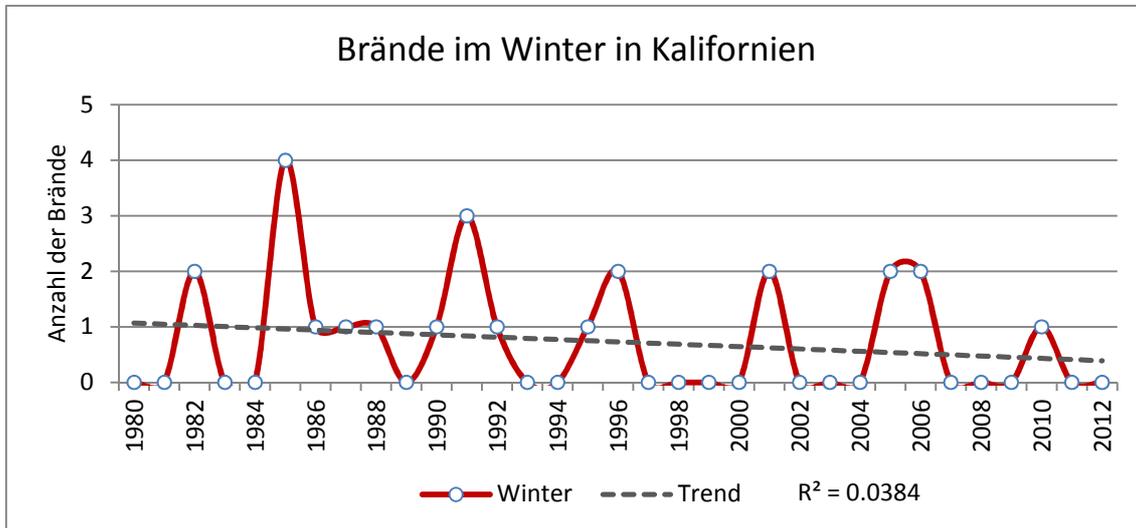


Abbildung 76: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Winter im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

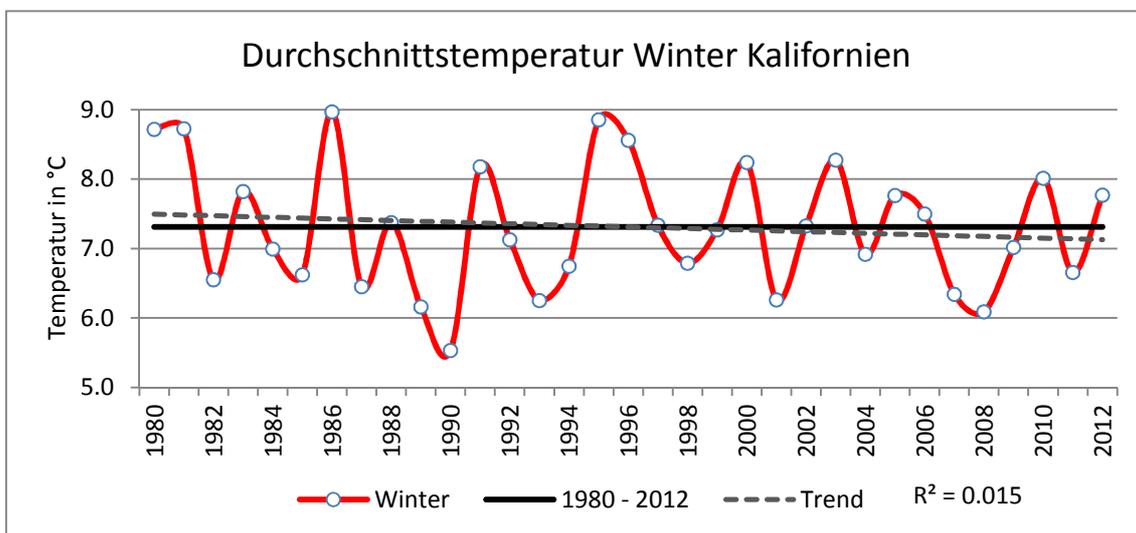


Abbildung 77: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

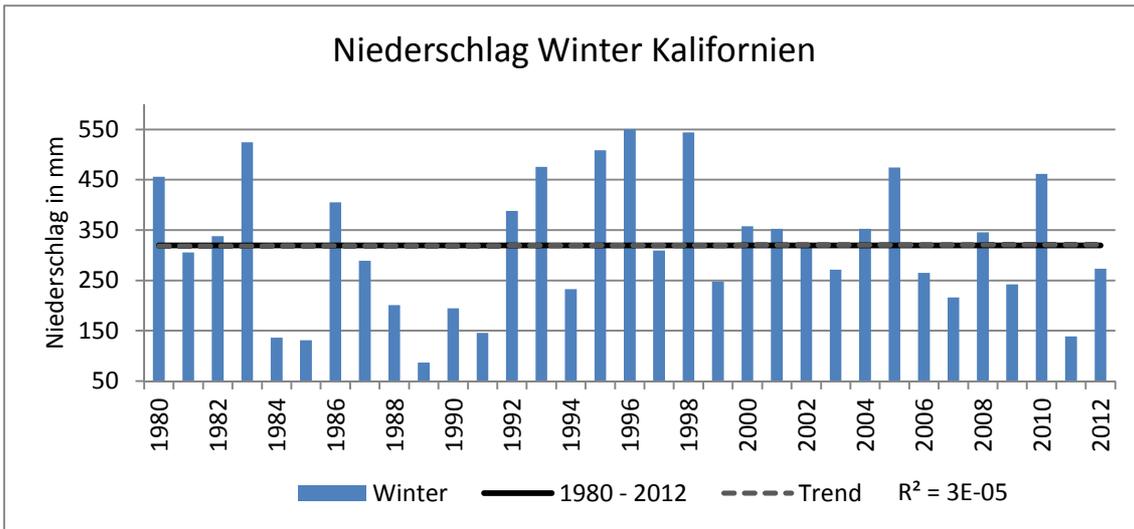


Abbildung 78: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 20: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Winter				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	9	38	7.4 °C	287 mm
1990 - 1999	8	33	7.3 °C	360 mm
2000 - 2009	6	25	7.2 °C	320 mm
2010 - 2012	1	4	7.5 °C	291 mm

5.5.2 Arizona

Die zweitmeisten Brände fanden zwischen 1980 und 2012 in Arizona statt (19 593 Brände). Arizona weist im Allgemeinen ein arides Wüsten- und Steppenklima auf (BWh, BSk und BSh) (vgl. Abbildung 18). Im Untersuchungszeitraum konnte ein Anstieg der Brände festgestellt werden (Abbildung 79). Dieser Anstieg betrug durchschnittlich 4,25% pro Jahr. In den 1980er Jahren traten etwa 15 % der Brände auf, in den 1990er Jahren bereits 35 % und zwischen 2000 und 2009 traten etwa 42 % aller Brände auf (Tabelle 21). Jedoch nahmen die Brände im jährlichen Durchschnitt seit 2000 um -8,46% ab.

Der ansteigende Trend konnte auch in jeder Größenklasse beobachtet werden, mit einer Ausnahme. Zwar nahm die absolute Anzahl an Bränden in der Größenklasse A seit 1980 insgesamt zu, der prozentuale Anteil an allen Bränden nahm hingegen ab. Dies kann primär auf den starken Anstieg von Bränden in der Größenklasse B zurückgeführt werden. In den ersten Jahren der 1980er Jahre, lag der prozentuale Anteil an Bränden der Größenklasse A noch bei um die 90 %, die der Größenklasse B bei unter 10 %. Bis zum Jahr 2000, als es die meisten Brände gab, lag der prozentuale Anteil an kleinsten Bränden bei knapp 70 %, der der Brände der Größenklasse B bereits bei knapp 25%. Insgesamt handelt es sich doch in jedem Jahr bei etwa 90 % der Brände um solche der Größenklasse A und B (bis 0,2 Acre bzw. 9,9 Acre). Außerdem konnte eine Zunahme der jährlich verbrannten Flächen beobachtet werden (Abbildung 80).

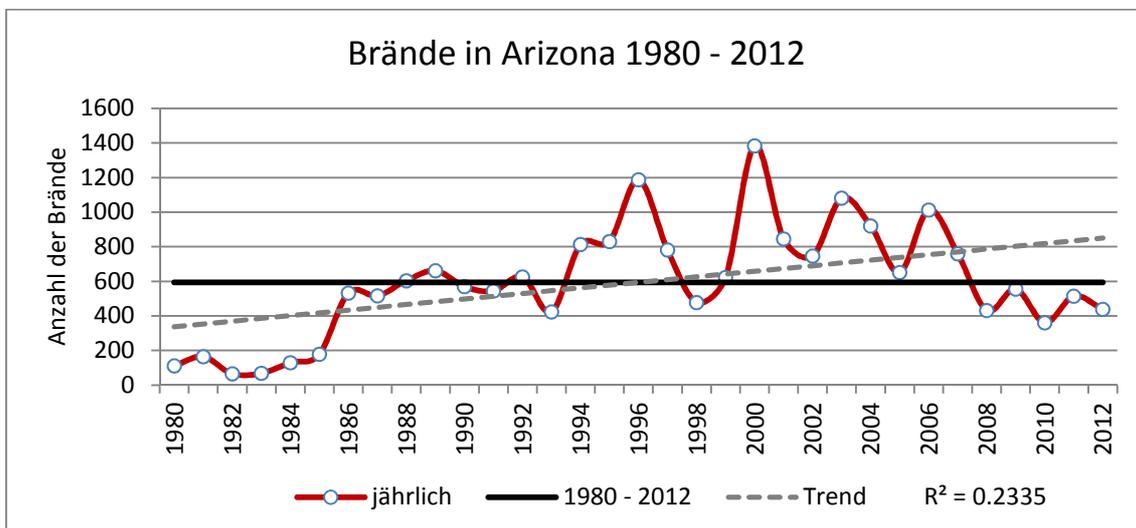


Abbildung 79: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 21: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Arizona im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Zeitperiode	Brände	Brände in %	Durchschnittstemperatur	Niederschlag in mm	
				Gesamt	Mittel
1980 – 1989	3027	15,5	13.9 °C	3456	346
1990 – 1999	6871	35,1	14.1 °C	3395	340
2000 – 2009	8383	42,8	14.4 °C	2797	280
2010 – 2012	1312	6,6	14.1 °C	882	294
1980 – 2012	19593	100	14.1 °C	10530	319

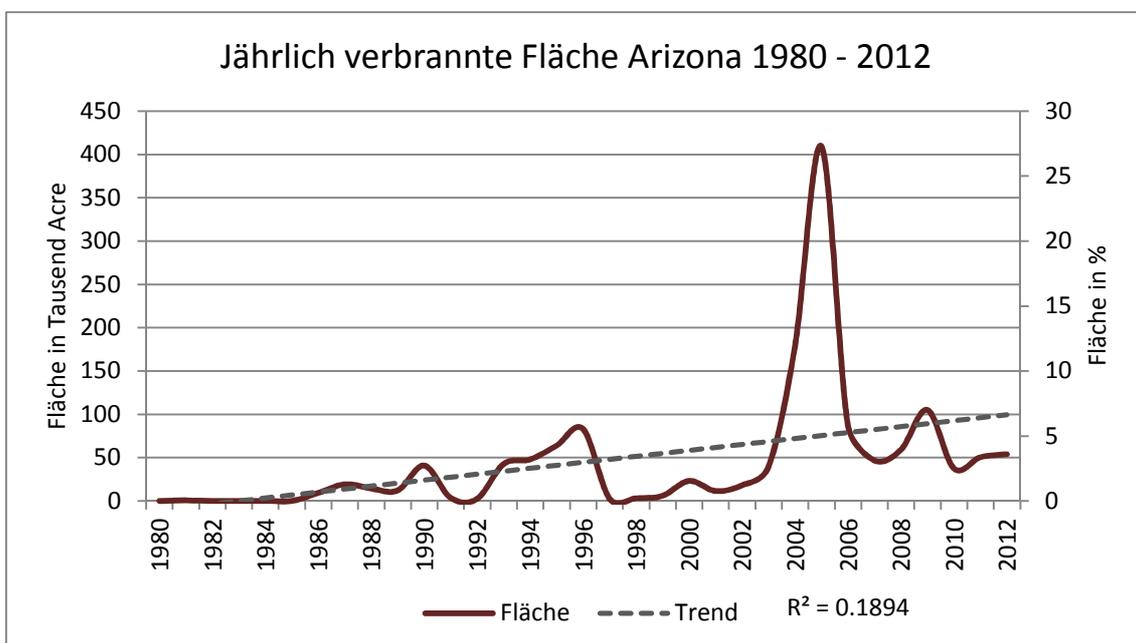


Abbildung 80: Jährlich verbrannte Fläche in Arizona im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Zwischen 1980 und 2012 konnte in Arizona eine Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperatur festgestellt werden (Abbildung 81). Die wärmsten Jahre in diesem Zeitraum waren 1996 (14,8°C), 2000 (14,7°C) und 2003 (14,6°C). Die kühlest Jahre waren 1982 (13,3°C), 1983 (13,5°C) und 1985 (13,6°C). Die 2000er Jahre waren im Untersuchungszeitraum die wärmsten. Bis auf 2008 war in dieser Dekade jedes Jahr überdurchschnittlich warm.

Seit 1980 wurde bei den Niederschlägen insgesamt ein Rückgang verzeichnet (Abbildung 82). Die meisten Niederschläge verzeichneten die Jahre 1992 (490mm), 1993 (458mm) und 1983 (436mm). Die trockensten Jahre waren 2002 (159mm), 2009 (190mm) und 1989 (200mm).

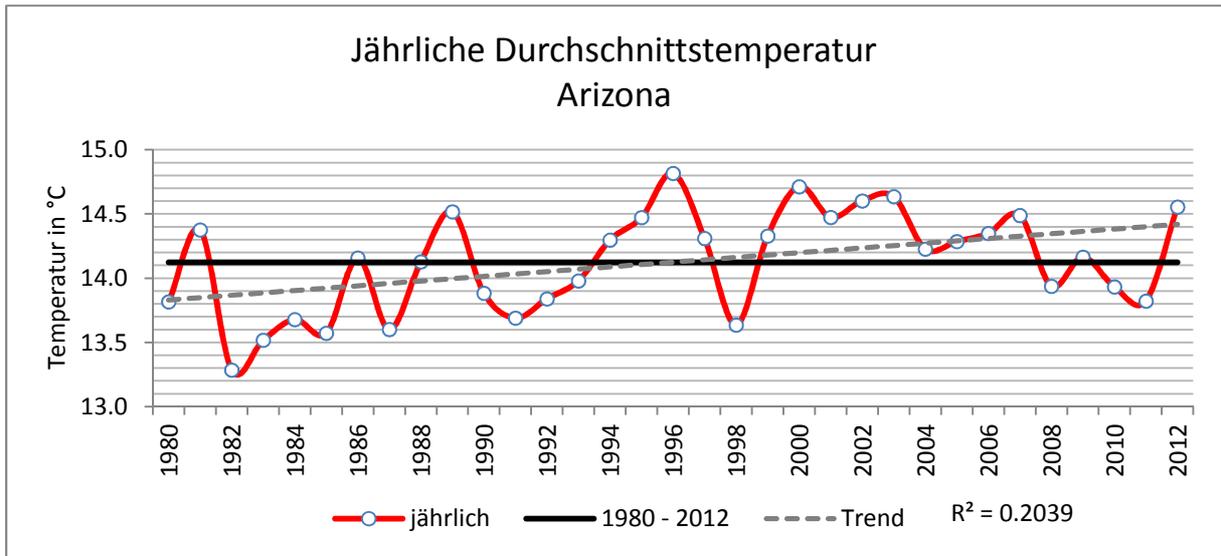


Abbildung 81: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

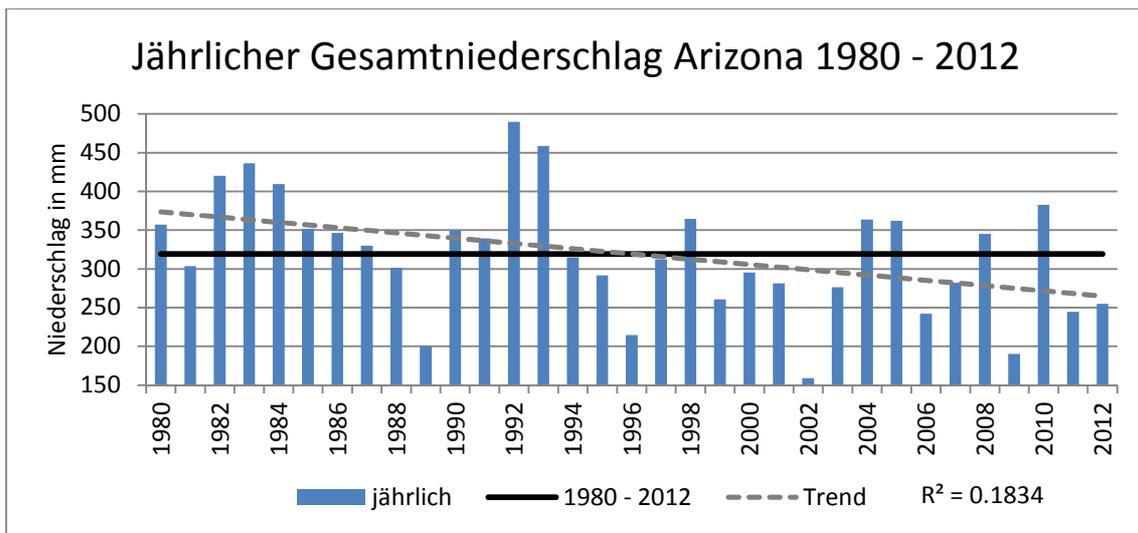


Abbildung 82: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Saisonale Unterschiede

Der Großteil der Brände in Arizona trat im Untersuchungszeitraum im Sommer auf (etwa 83%). Im Herbst traten die zweitmeisten Brände auf, im Frühling die drittmeisten. Im Winter gab es nur vereinzelt Brände (Tabelle 22).

Tabelle 22: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Arizona im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Jahreszeit	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
Frühling	1345	6,9	16,6 °C	50 mm
Sommer	16404	83,7	27,6 °C	98 mm
Herbst	1825	9,3	18,2 °C	71 mm
Winter	19	0,1	8,3 °C	100 mm

Generell konnte in Arizona in den Frühlingsmonaten ein Anstieg der Brände festgestellt werden (durchschnittlich +6,88%; Abbildung 83). Seit 2000 konnte jedoch ein durchschnittlicher jährlicher Rückgang der Brände von -3,85% beobachtet werden. Die Durchschnittstemperatur nahm ebenfalls seit 1980 zu (Abbildung 84). Der Niederschlag hat im Untersuchungszeitraum jedoch abgenommen (Abbildung 85). Im Jahr 1997 gab es mit Abstand die meisten Brände (201 Brände). Dieser Frühling war mit einer Durchschnittstemperatur von 18°C und einem Gesamtniederschlag von knapp 28 mm ein überdurchschnittlich warmer und trockener Frühling. 1992 und 1986 gab es mit 106 bzw. 102 Bränden ebenfalls viele Brände. Diese Frühlinge waren ebenfalls überdurchschnittlich warm (17,1 bzw. 17,3 °C). Aber auch die Niederschläge in diesen beiden Frühlingen, insbesondere 1992, waren überdurchschnittlich hoch (141,6 bzw. 62,1 mm). Ebenfalls auffällig ist die geringe Anzahl an Bränden Anfang der 1980er Jahre ehe es 1986 die drittmeisten Brände im Untersuchungszeitraum gab.

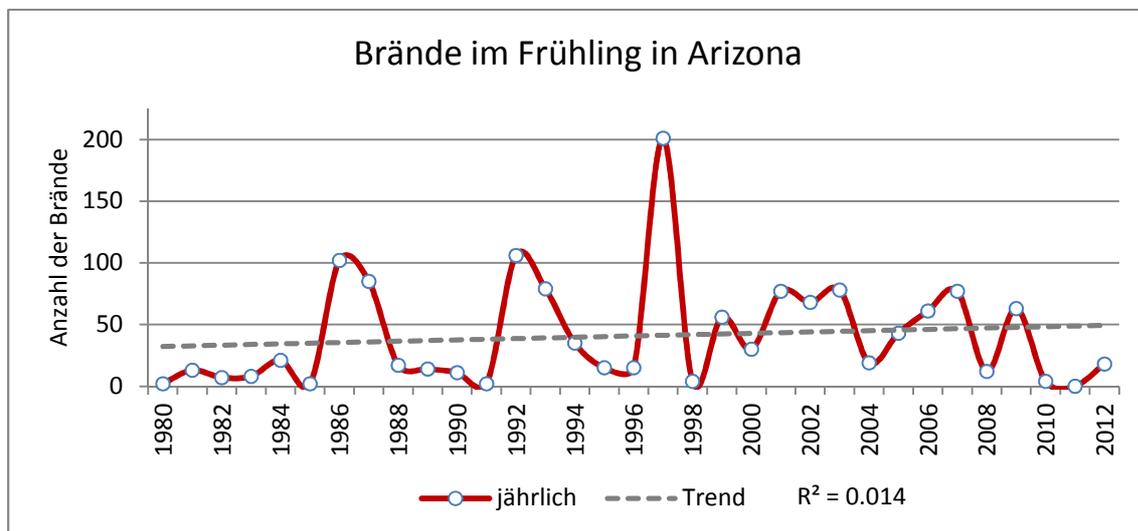


Abbildung 83: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Arizona im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

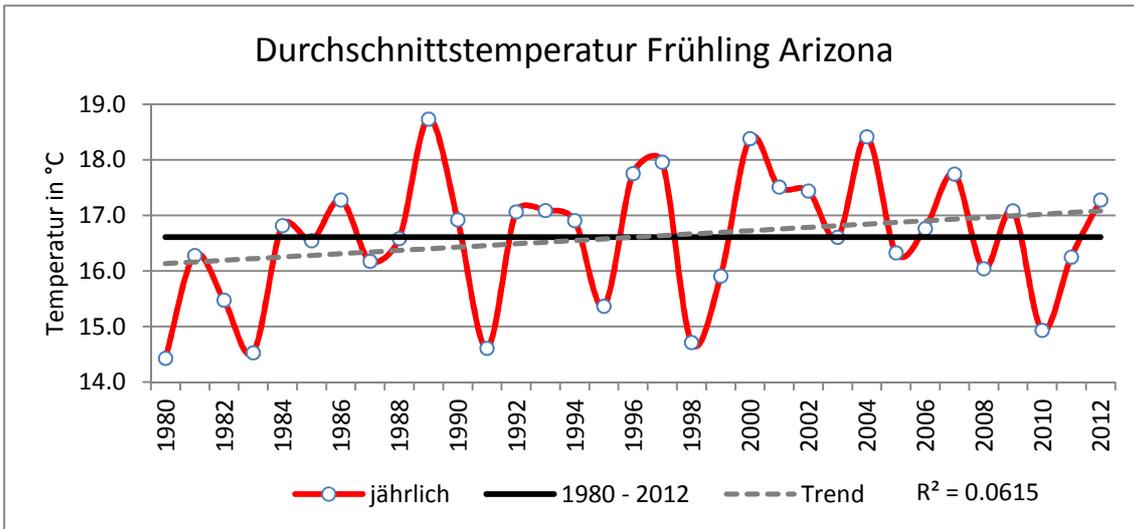


Abbildung 84: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

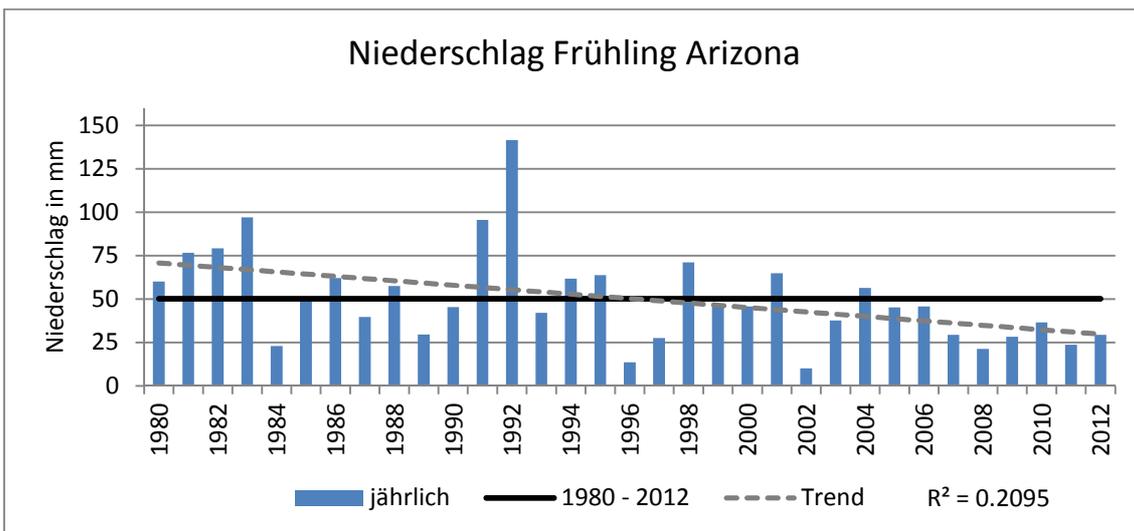


Abbildung 85: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 23: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Frühling				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	271	20	16.3 °C	57 mm
1990 - 1999	524	39	16.4 °C	61 mm
2000 - 2009	528	39	17.2 °C	38 mm
2010 - 2012	22	2	16.2 °C	30 mm

Im Sommer nahm die Anzahl der Brände in Arizona zwischen 1980 und 2012 im Allgemeinen um 4,03% pro Jahr zu (Abbildung 86). Bei der genaueren Betrachtung fällt jedoch auf, dass dieser Anstieg bis zum Jahr 2000 anhält (1250 Brände). Danach kam es zu einer Abnahme der Brandereignisse um durchschnittlich -8,77% pro Jahr. Dennoch gab es insgesamt in dieser Dekade die meisten Brände (7165; 44 % aller Brände). In diesem Zeitraum waren zudem die Temperaturen im Mittel überdurchschnittlich hoch und die Niederschläge überdurchschnittlich gering (Tabelle 24)

Die Temperaturen sind in den Sommermonaten zwischen 1980 und 2012 ebenfalls angestiegen (Abbildung 87). Bei den Niederschlägen wurde hingegen ein leichter Rückgang registriert (Abbildung 88).

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass die Sommer mit den meisten Brandereignissen, überdurchschnittlich hohe Temperaturen und überdurchschnittlich geringe Niederschläge aufwiesen.

Wie auch im Frühling gab es zudem zu Beginn der 1980er Jahre deutlich wenige Brände wie in den darauffolgenden Jahren. Des Weiteren hat sich die Anzahl an Bränden seit 2008 auf einem Niveau zwischen etwa 300 und 400 Bränden pro Jahr eingependelt.

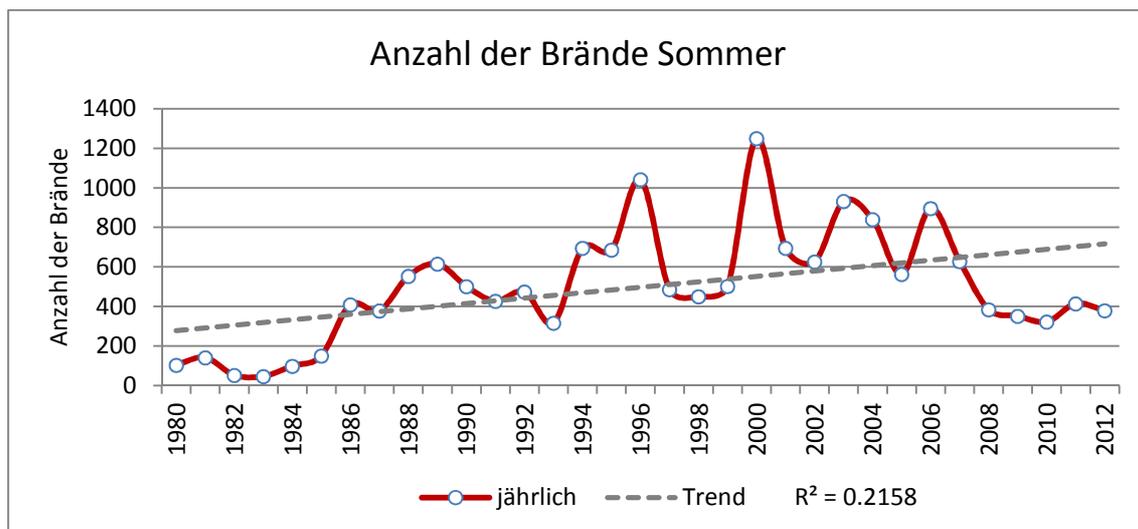


Abbildung 86: Entwicklung der jährlichen Anzahl von Bränden im Sommer in Arizona im Zeitraum 1980 bis 2012 (Daten-grundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

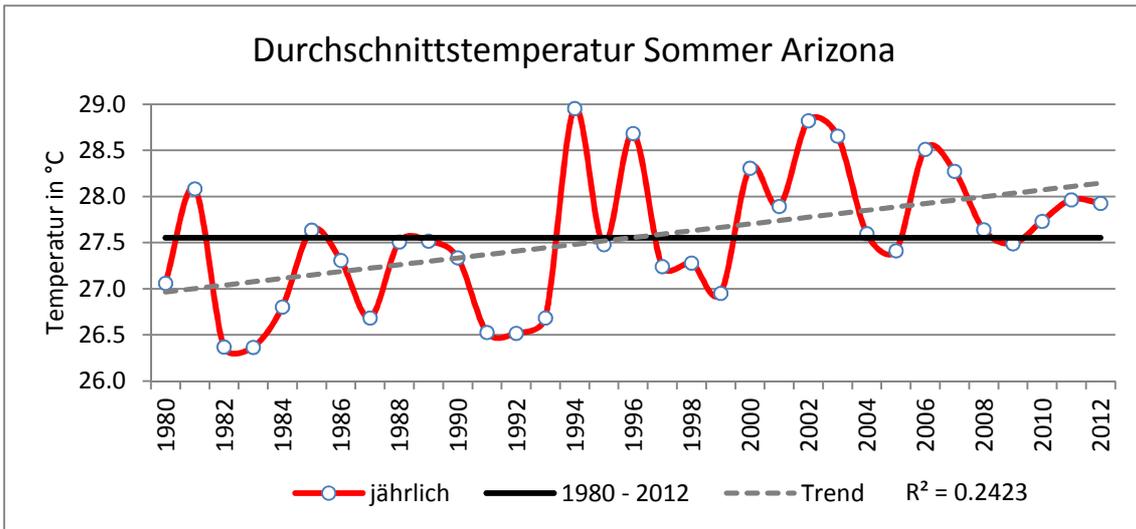


Abbildung 87: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

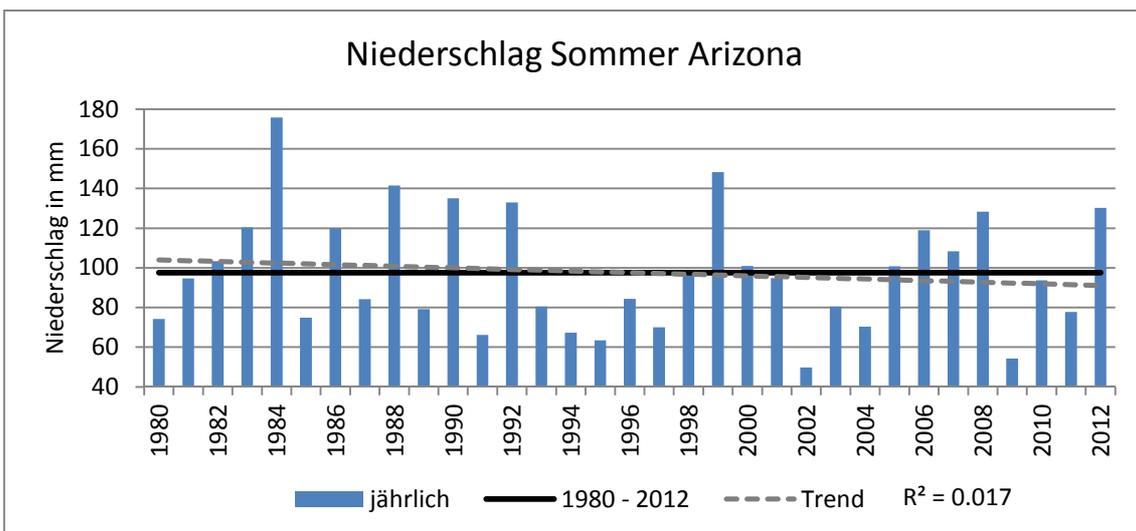


Abbildung 88: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 24: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Sommer				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	2545	16	27.1 °C	107 mm
1990 - 1999	5579	34	27.4 °C	94 mm
2000 - 2009	7165	44	28.1 °C	91 mm
2010 - 2012	1115	7	27.9 °C	101 mm

In den Herbstmonaten nahm die Zahl der Brandereignisse seit 1980 generell zu (Abbildung 89). In den 2000er Jahren kam es jedoch zu einem Rückgang der durchschnittlichen jährlichen Brandereignisse um -6,6%. Des Weiteren konnte ein Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur und eine Abnahme des jährlichen Niederschlags in den Herbstmonaten festgestellt werden (Abbildung 90 und Abbildung 91) Die meisten Brände gab es in den 1990er Jahren. Diese Dekade war zudem überdurchschnittlich warm (Tabelle 25). Eine weitere Auffälligkeit ist die geringe Anzahl an Bränden in den ersten Jahren der 1980er Jahre.

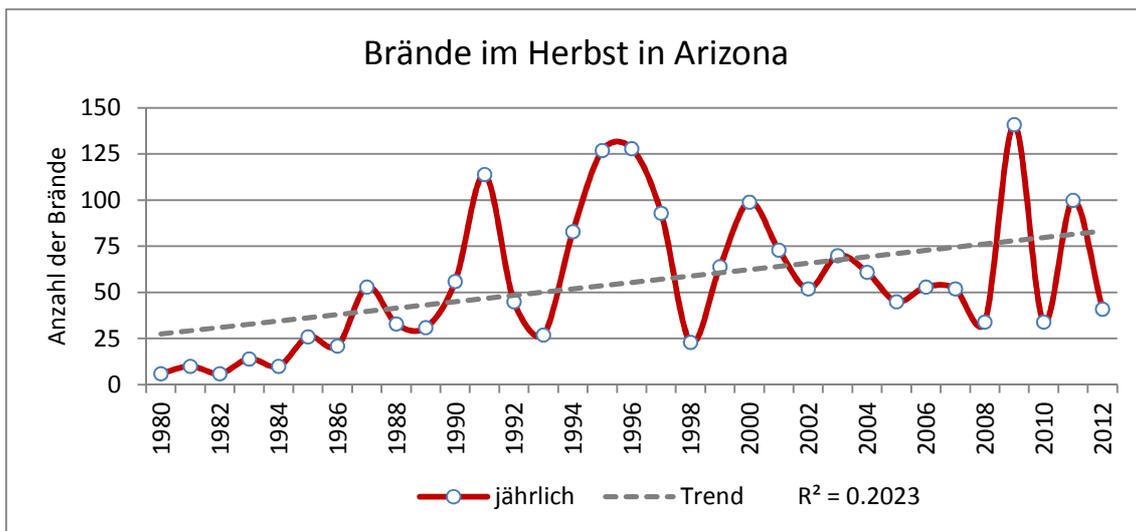


Abbildung 89: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

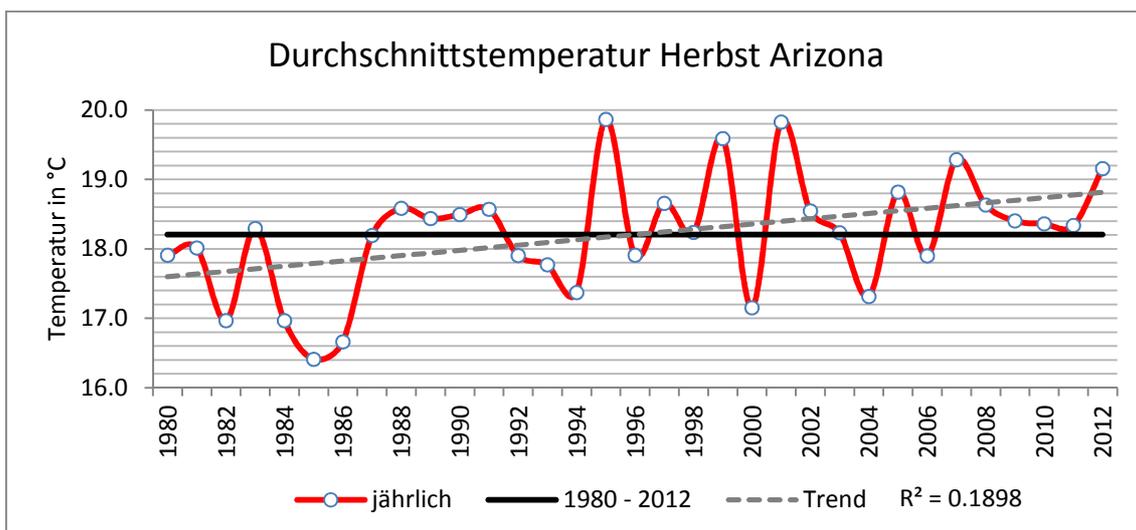


Abbildung 90: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

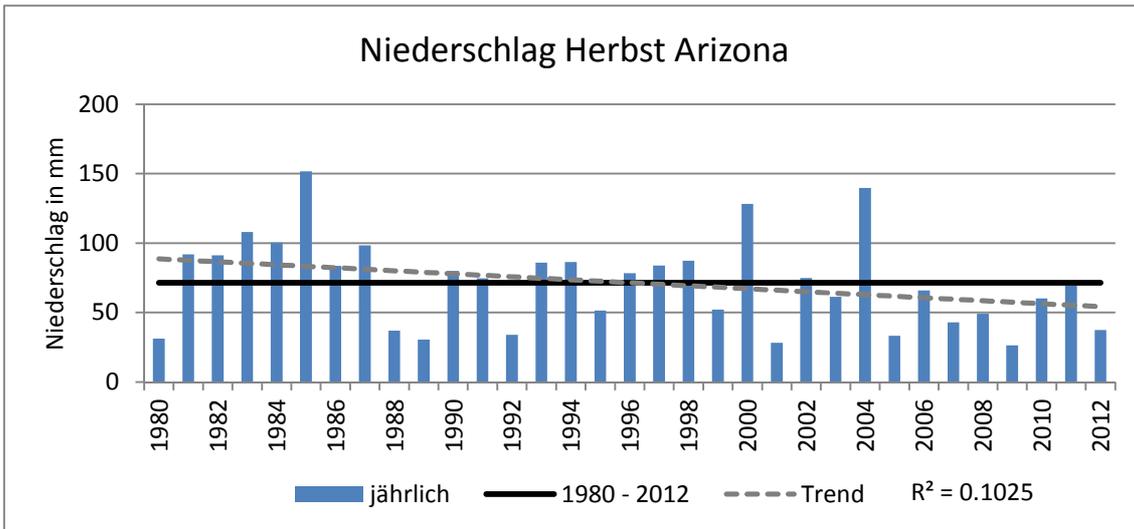


Abbildung 91: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 25: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Herbst				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	210	12	17.6 °C	82 mm
1990 - 1999	760	42	18.4 °C	71 mm
2000 - 2009	680	37	18.4 °C	65 mm
2010 - 2012	175	10	18.6 °C	56 mm

Im Winter gab es im Untersuchungszeitraum 19 Brände, wobei die erste Aufzeichnung eines Brandes erst 1989 gab (Abbildung 92). Zehn davon fanden in den 2000er Jahren statt. In den 1980er Jahren gab es hingegen nur einen Brand (Tabelle 26). Es gab also insgesamt eine Zunahme der Brandereignisse seit 1980.

Zudem nahm im Untersuchungszeitraum sowohl die jährliche Durchschnittstemperatur, als auch die Niederschläge in den Wintermonaten ab (Abbildung 93 und Abbildung 94).

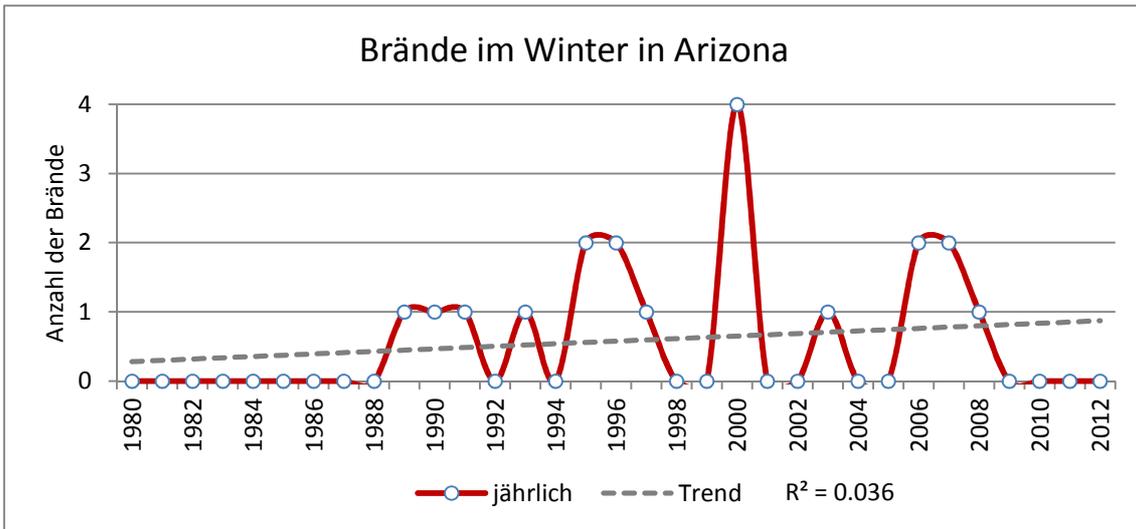


Abbildung 92: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Winter im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

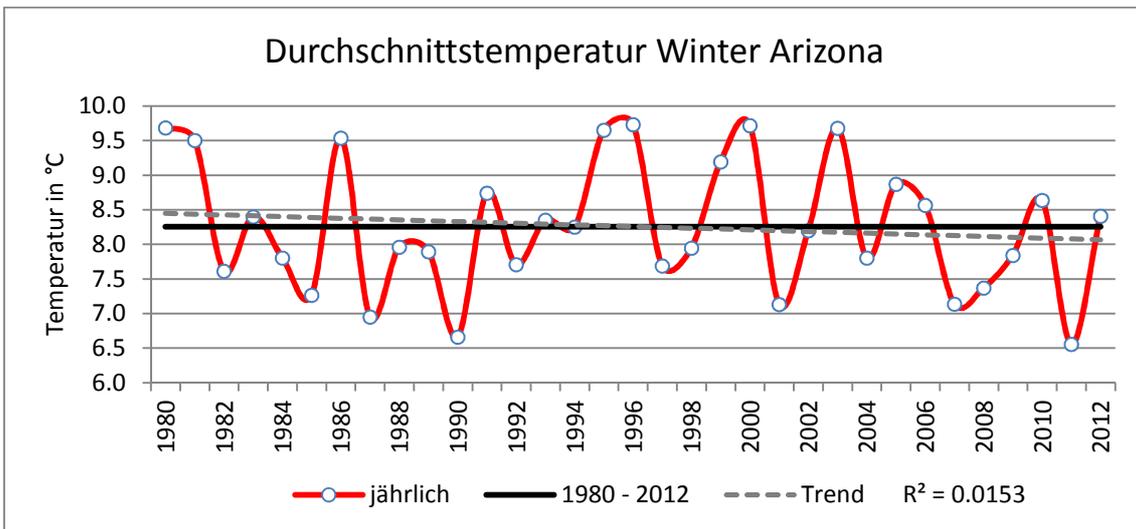


Abbildung 93: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

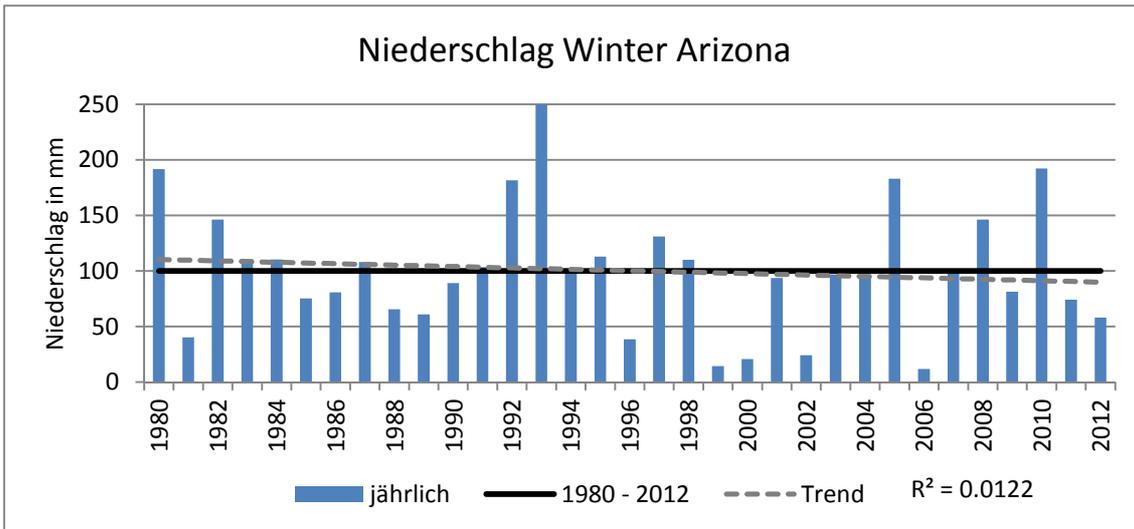


Abbildung 94: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 26: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Winter				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	1	5	8.3 °C	99 mm
1990 - 1999	8	42	8.4 °C	113 mm
2000 - 2009	10	53	8.2 °C	86 mm
2010 - 2012	0	0	7.9 °C	108 mm

5.5.3 Idaho

Zwischen 1980 und 2013 gab es in Idaho 18 390 Brände, die durch Blitze verursacht wurden. In Idaho herrscht im Allgemeinen ein kaltes Klima mit warmen Sommern vor (Dsb und Dfb). Im Süden des Bundesstaates herrscht in manchen Regionen eine kalt-arides Steppenklima (BSk). Die meisten Brände traten jedoch in den Regionen mit dem Klimatyp Dsb und Dfb auf. Durchschnittlich nahm die Anzahl an Bränden seit 1980 jährlich um +8,97% zu (Abbildung 95). Die meisten Brände fanden in den 1990er Jahren statt (7385 Brände; 40,2 %). In den 2000er Jahren ging die Zahl der Brände auf 6489 zurück (35,3 %) (Tabelle 27).

Alle Feuer verbrannten insgesamt über 5,4 Millionen ha Land. Insgesamt nahm die Fläche die durch Feuer verbrannt worden zu (Abbildung 96). Fast 60 % der gesamten Flächen wurden in den Jahren 2008, 2000 und 2012 verbrannt.

Insgesamt nahm die absolute Anzahl an Bränden in jeder Größenklasse zu. Bei Bränden der Größenklasse A gab es jedoch, wie in Arizona auch, eine prozentuale Abnahme. Bei allen anderen Größenklassen, insbesondere bei der Größenklasse B, gab es auch prozentual Zunahmen. Über 90 % der Brände konnten jedoch den Größenklassen A oder B zugeordnet werden.

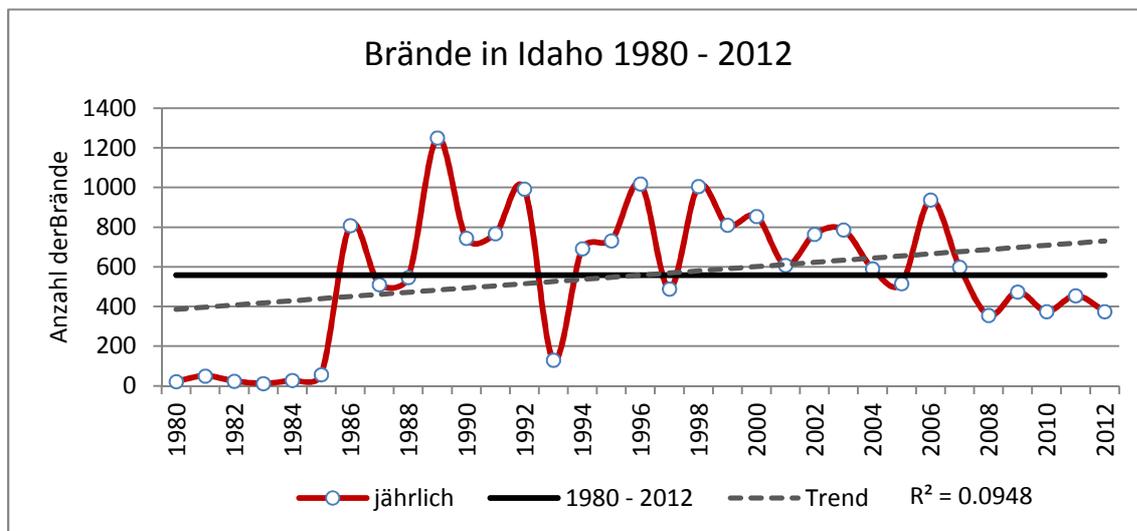


Abbildung 95: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 27: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Idaho im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Zeitperiode	Brände	Brände in %	Durchschnittstemperatur	Niederschlag in mm	
				Gesamt	Mittel
1980 – 1989	3311	17,9 %	7,6 °C	4511	451
1990 – 1999	7385	40,2 %	8,1 °C	4673	467
2000 – 2009	6489	35,3 %	8,1 °C	4133	413
2010 – 2012	1205	6,6 %	8,1 °C	1424	475
1980 - 2012	18390	100 %	7,9 °C	14740	447

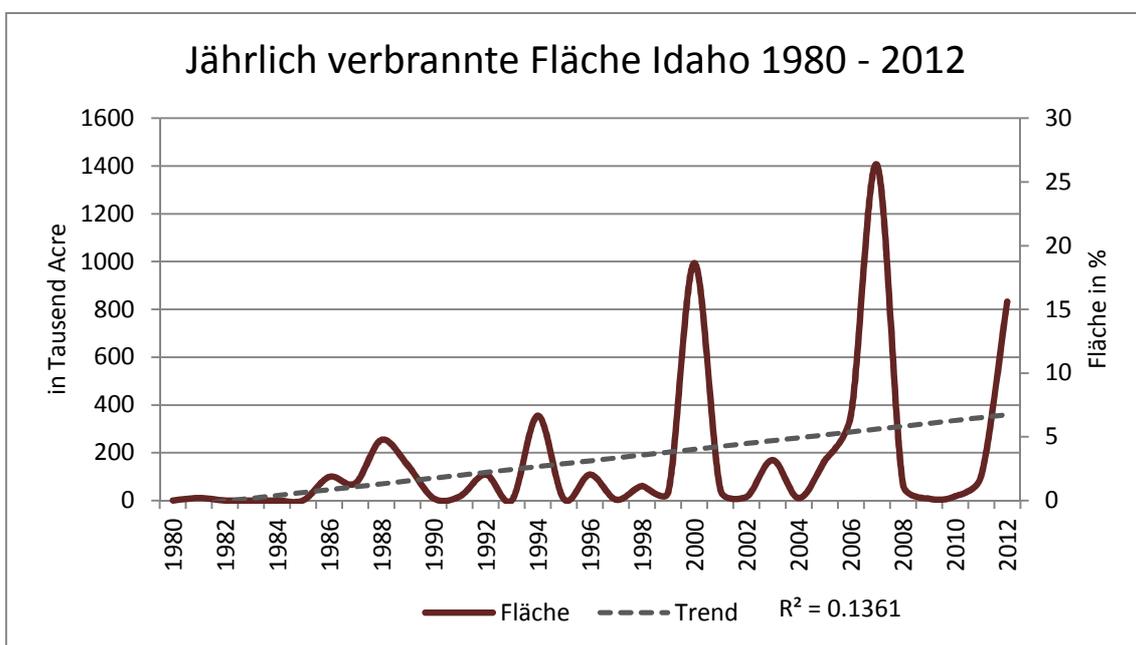


Abbildung 96: Jährlich verbrannte Fläche in Idaho im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

Zwischen 1980 und 2012 wurde ein Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur in Idaho festgestellt (Abbildung 97). Zwischen 1990 und 2010 waren über zwei Drittel der Jahre überdurchschnittlich warm. Die wärmsten Jahre waren 1992 (8,9 °C), 2012 und 2003 (je 8,8°C). 1985, 1993 und 1982 stellten die kältesten Jahre dar (5,9, 6,5 und 6,7 °C).

Bei den Niederschlägen wurde zwischen 1980 und 2012 hingegen eine Abnahme registriert (Abbildung 98). In den 2000 Jahren fiel sowohl in Summe als auch im jährlichen Mittel der geringste Niederschlag im Untersuchungszeitraum. Die meisten Niederschläge gab es in den Jahren 1992 (490mm), 1993 (458mm) und 1983 (436mm). In den Jahren 2002, 2009 und 1989 fielen hingegen die geringsten Niederschläge (159, 190 und 200 mm).

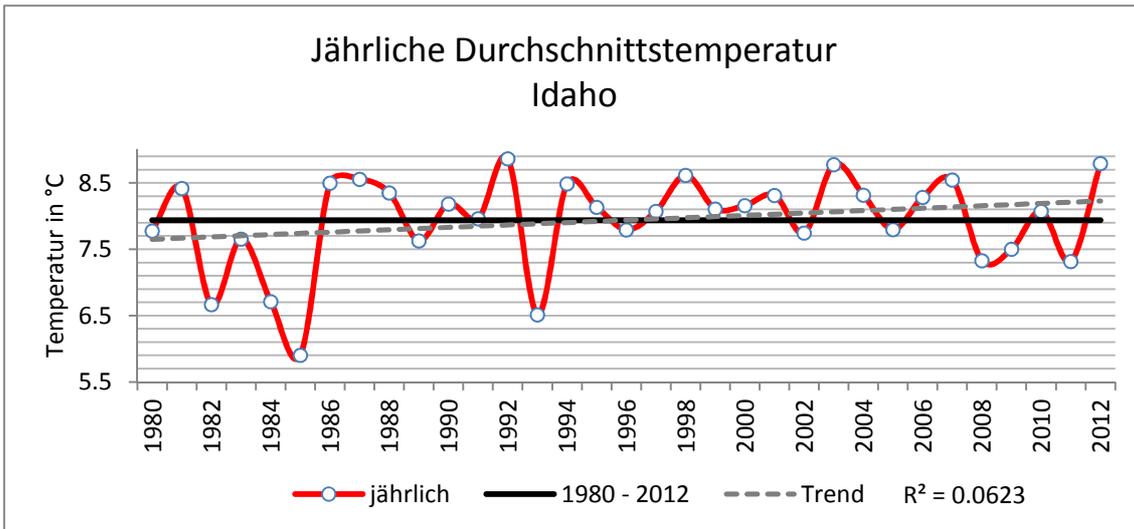


Abbildung 97: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

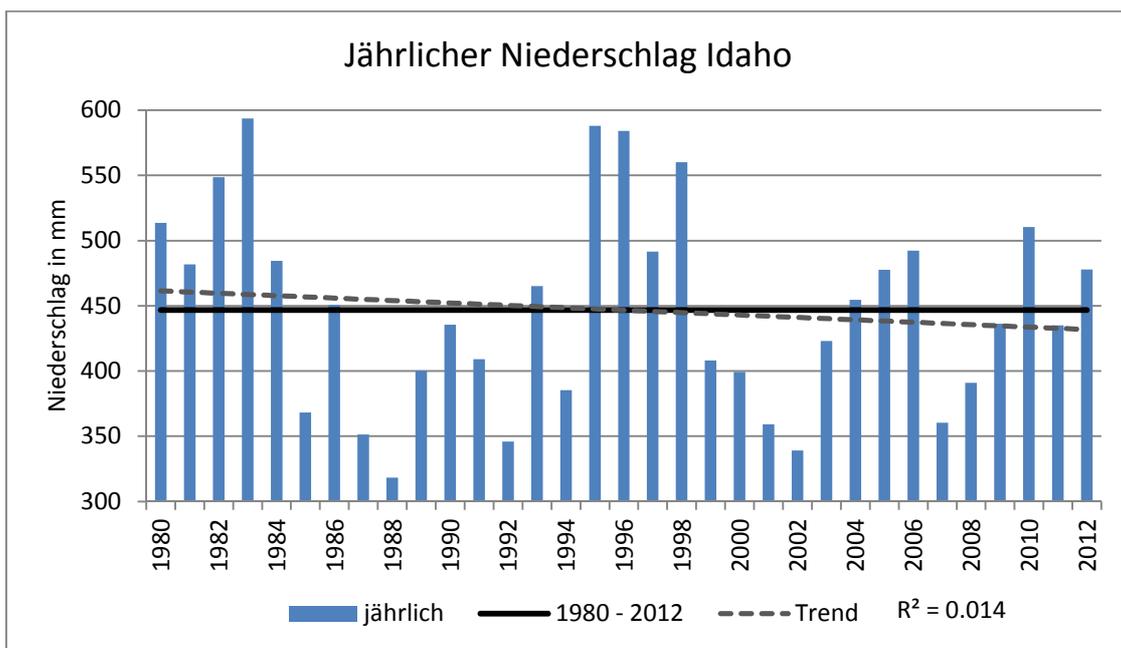


Abbildung 98: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Saisonale Muster

Die meisten der Brände in Idaho traten im Sommer auf. Etwa 87 % aller Brände traten in dieser Jahreszeit auf. Im Herbst traten mit 2065 Bränden die zweitmeisten auf. Etwa 1 % der Brände fand zudem im Frühling statt. Im Winter gab es im gesamten Untersuchungszeitraum nur zwei Brände (Tabelle 28).

Tabelle 28: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Idaho im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Jahreszeit	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
Frühling	179	1	7,5 °C	135 mm
Sommer	16144	87,8	18,5 °C	77 mm
Herbst	2065	11,2	8 °C	104 mm
Winter	2	<1	-2,2 °C	130 mm

Insgesamt nahm die Anzahl der Brände in den Frühlingsmonaten etwas ab (Abbildung 99). Die jährliche Durchschnittstemperatur ging ebenfalls zurück (Abbildung 100). Des Weiteren gab es einen marginal kleinen Anstieg des Niederschlags im Untersuchungszeitraum (Abbildung 101). Die Anzahl an Bränden zwischen den jeweiligen Jahrzehnten ist relativ ausgeglichen (57 in den 1980er, 62 in den 1990er und 60 in den 2000er) (Tabelle 29).

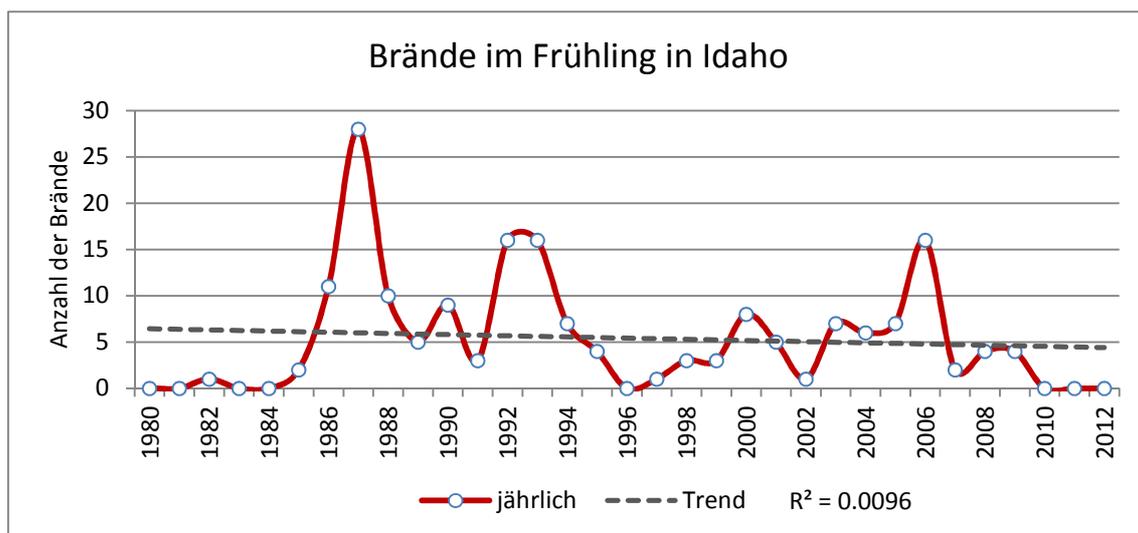


Abbildung 99: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

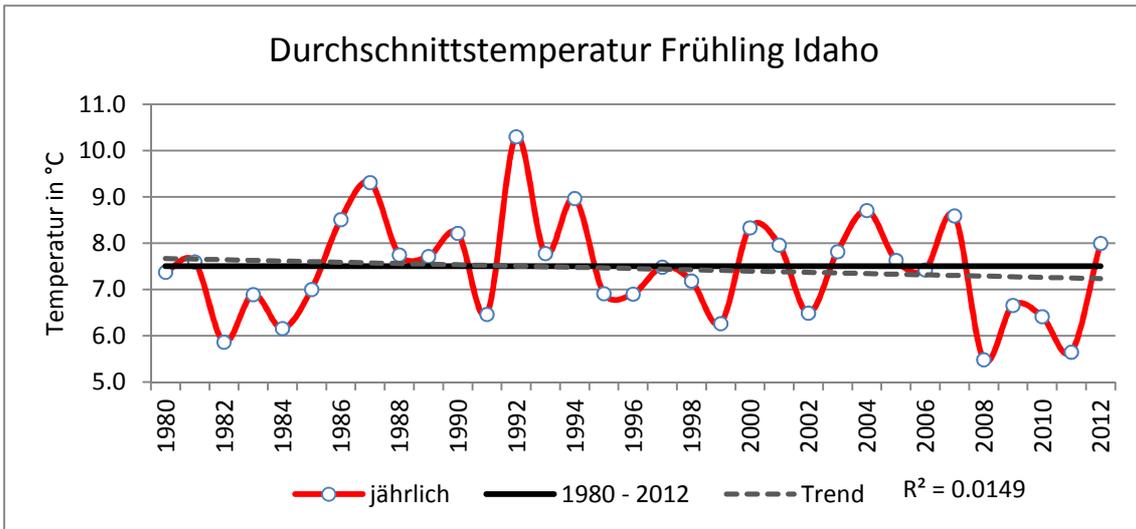


Abbildung 100: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

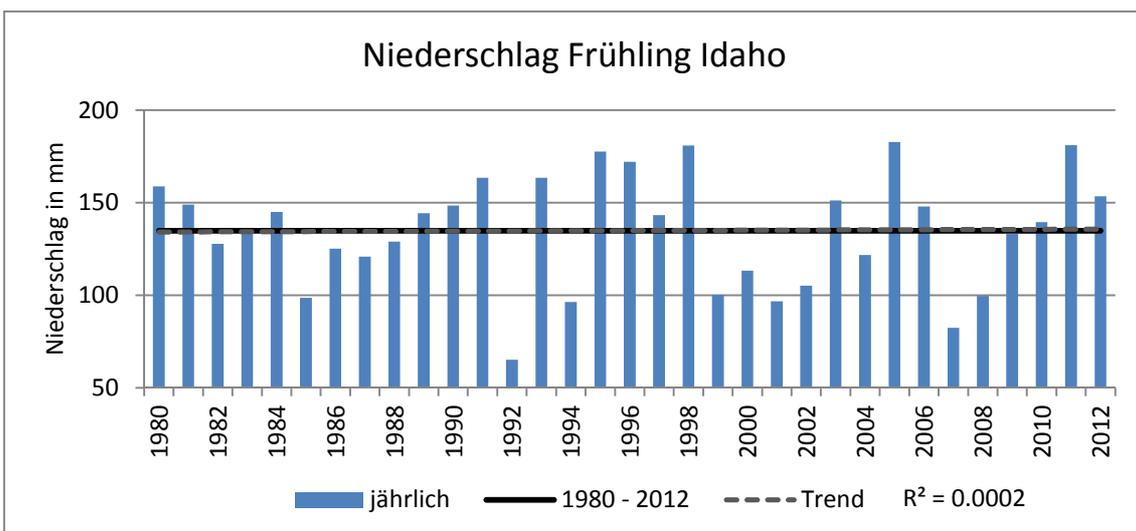


Abbildung 101: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 29: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Frühling				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	57	32	7.4 °C	133 mm
1990 - 1999	62	35	7.6 °C	141 mm
2000 - 2009	60	34	7.5 °C	123 mm
2010 - 2012	0	0	6.7 °C	158 mm

In den Sommermonaten nahmen die Anzahl an Bränden und die Durchschnittstemperatur im Sommer in Idaho im Allgemeinen zu (Abbildung 102 und Abbildung 103). Der durchschnittliche jährliche Anstieg an Bränden betrug zwischen 1980 und 2012 +8,78%. In den 2000er Jahren ging die Anzahl der Brände jedoch im Durchschnitt um -6,46% pro Jahr zurück. Die Niederschläge im Sommer gingen im Allgemeinen zurück (Abbildung 104). Es fällt jedoch auf, dass die meisten Brände in den 1990er Jahren auftreten, in einem Jahrzehnt, in dem die Sommer überdurchschnittlich kühl waren (0,4°C kühler als die langjährige Mitteltemperatur) und die Niederschläge überdurchschnittlich hoch (85 mm im Mittel) (Tabelle 30). Dennoch traten in den Jahren die überdurchschnittlich warm und/oder trocken waren generell deutlich mehr Brände auf, als in den kühlen und/oder feuchten Jahren.

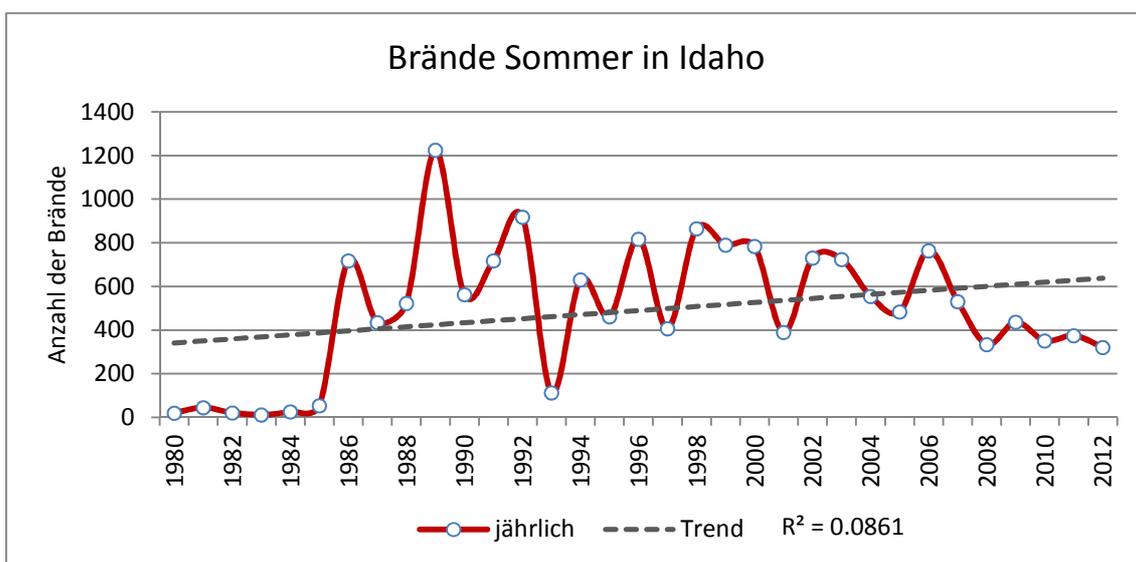


Abbildung 102: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Sommer im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

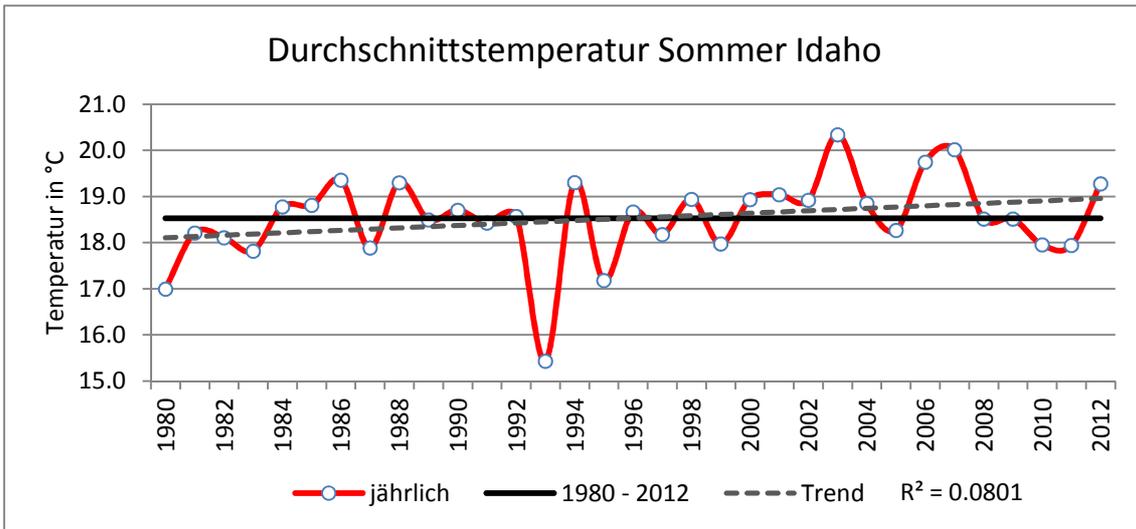


Abbildung 103: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

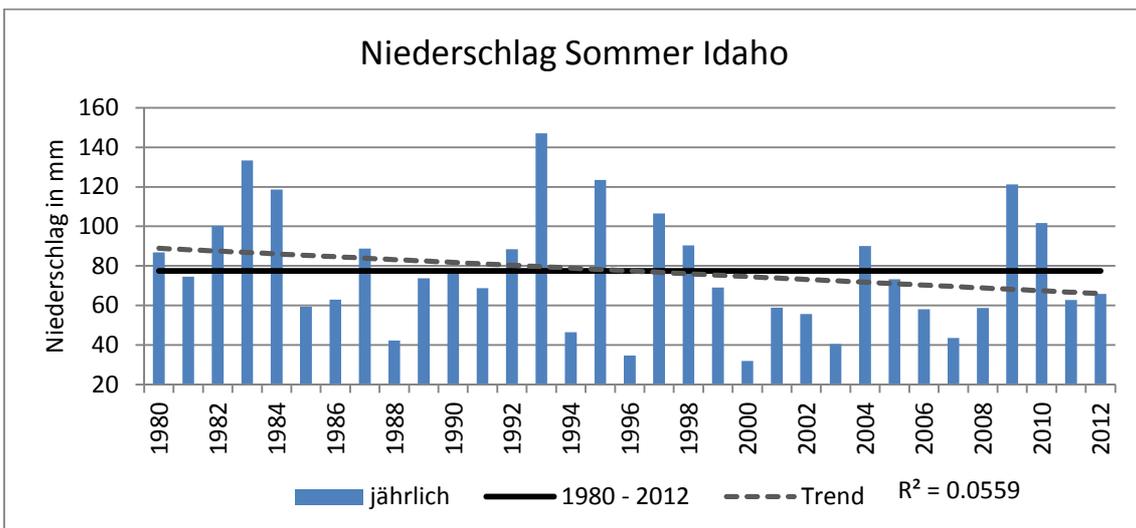


Abbildung 104: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 30: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Sommer				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	3079	19	18.4 °C	84 mm
1990 - 1999	6284	39	18.1 °C	85 mm
2000 - 2009	5734	36	19.1 °C	63 mm
2010 - 2012	1047	6	18.4 °C	77 mm

Im Herbst gab es in Idaho 2065 Brände. Es konnte im Untersuchungszeitraum generell ein Anstieg der Brandereignisse beobachtet werden (durchschnittlich +10,44% pro Jahr, Abbildung 105). Zudem gab es einen Anstieg der Durchschnittstemperatur im Herbst (Abbildung 106). Bei den Niederschlägen konnte ein Rückgang verzeichnet werden (Abbildung 107). Etwa die Hälfte aller Brände fand in den 1990er Jahren statt (Tabelle 31). Diese Dekade war im Allgemeinen eine überdurchschnittlich warme Dekade. Generell konnte erneut ein Zusammenhang zwischen einer höheren Anzahl an Bränden und erhöhten Temperaturen und/oder geringen Niederschlägen festgestellt werden.

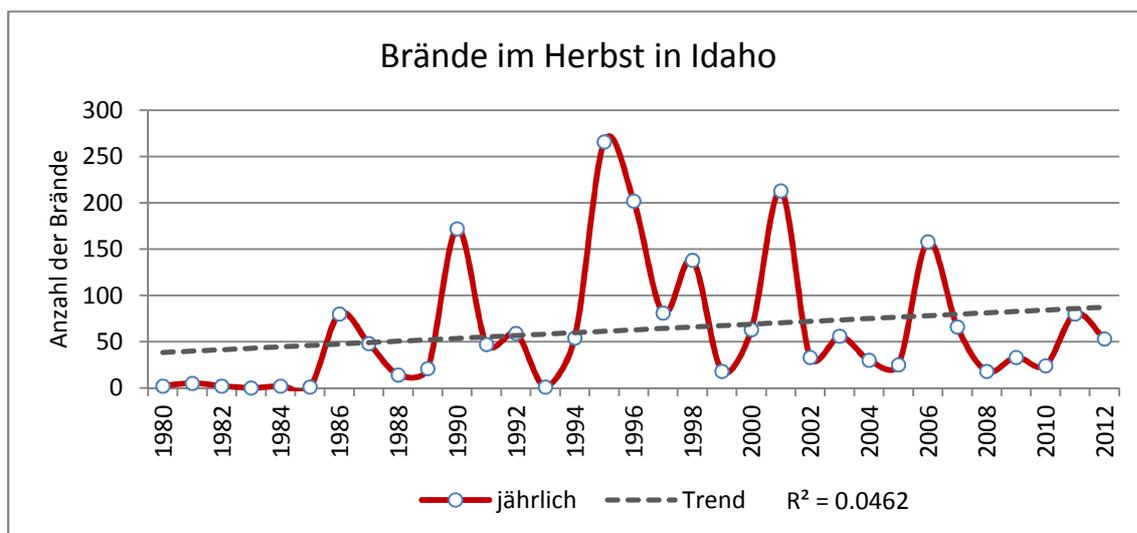


Abbildung 105: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)

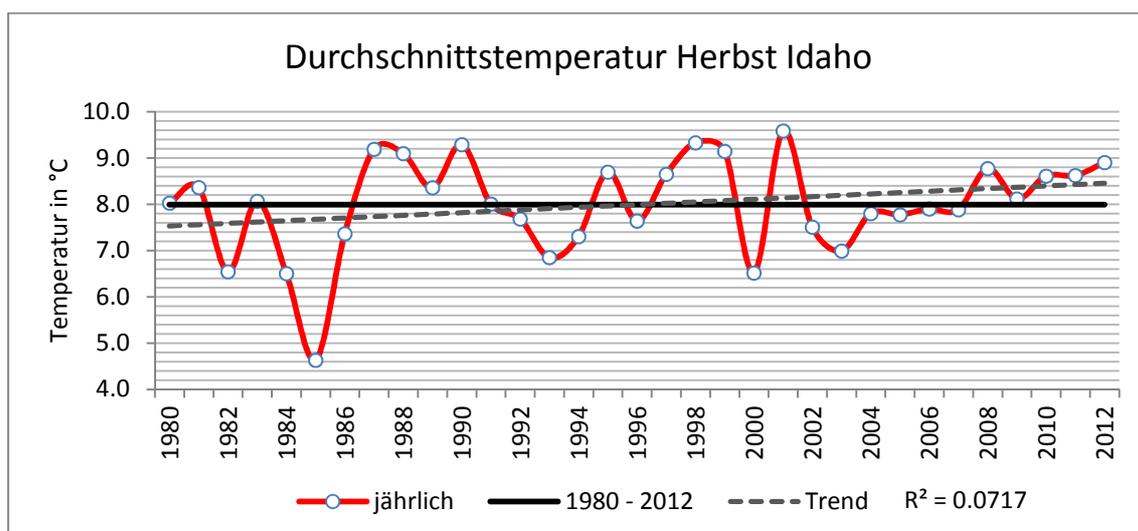


Abbildung 106: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

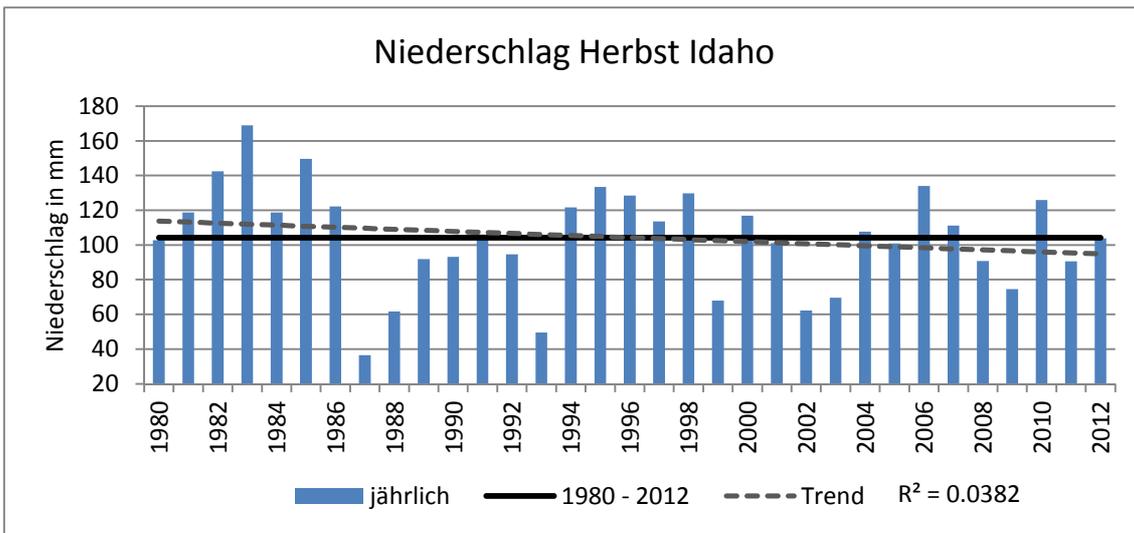


Abbildung 107: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 31: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Idaho in (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Herbst				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	175	8	7.6 °C	111 mm
1990 - 1999	1038	50	8.3 °C	104 mm
2000 - 2009	695	34	7.9 °C	97 mm
2010 - 2012	157	8	8.7 °C	107 mm

Im Winter konnten keine Aussagen über einen Zusammenhang von Bränden und Temperaturen bzw. Niederschlägen getroffen werden, da hierzu die Anzahl an Bränden viel zu gering war. Insgesamt gab es in Idaho zwischen 1980 und 2012 nur zwei Brände (1989 und 1990) (Tabelle 32). Vollständigkeitshalber werden aber die Temperatur- und Niederschlagsdiagramme des Winters in Idaho abgebildet. Insgesamt konnte ein Anstieg der Wintertemperaturen und eine Abnahme des Winterniederschlags festgestellt werden (Abbildung 108 und Abbildung 109).

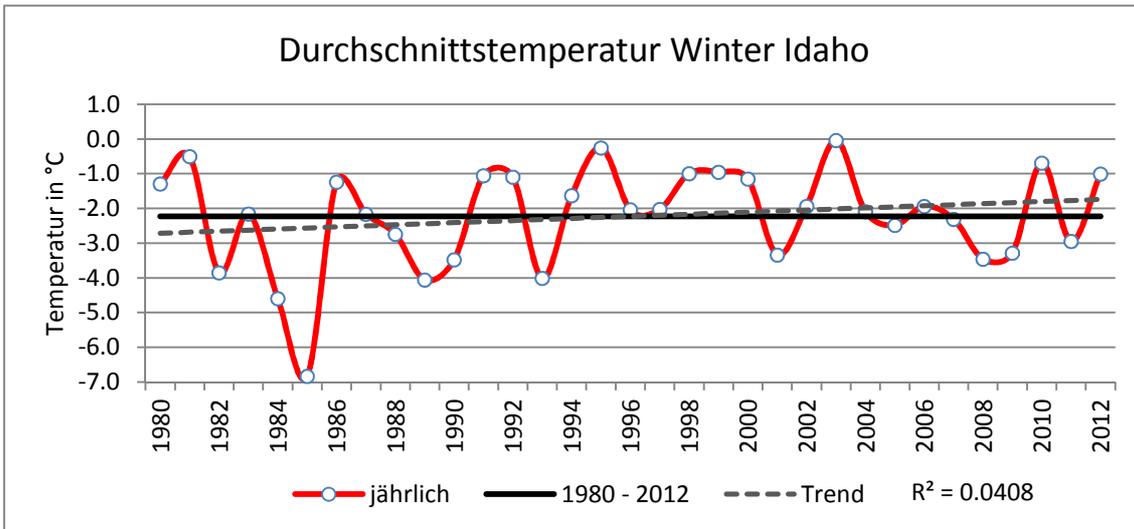


Abbildung 108: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und lang-jähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

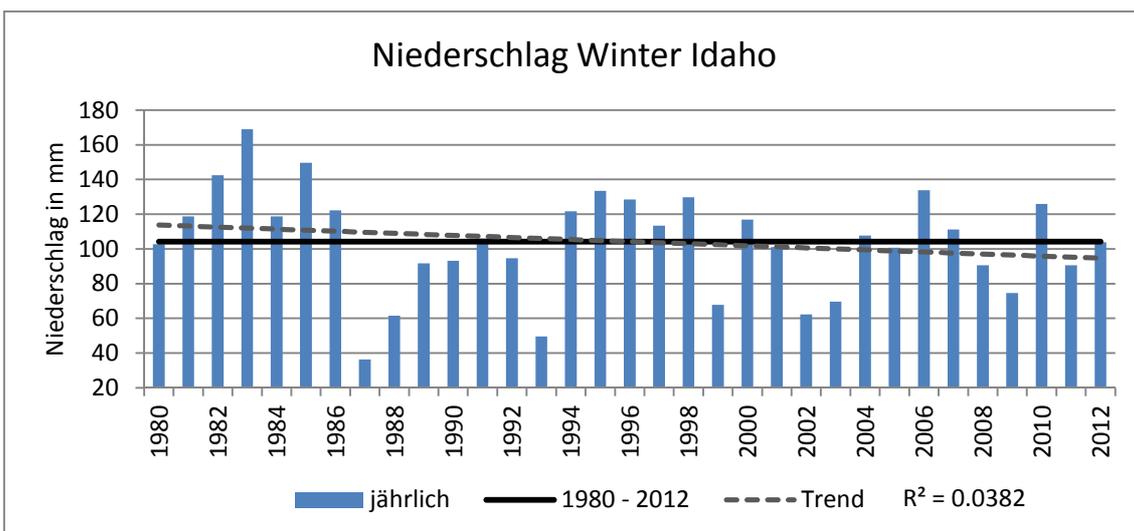


Abbildung 109: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Tabelle 32: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)

Winter				
Zeitperiode	Brände	Brände in Prozent	Durchschnittstemperatur	Mittlerer Niederschlag
1980 - 1989	1	50	-2.9 °C	122 mm
1990 - 1999	1	50	-1.8 °C	137 mm
2000 - 2009	0	0	-2.2 °C	130 mm
2010 - 2012	0	0	-1.5 °C	133 mm

5.6 Statistische Analyse

Bevor die Ergebnisse des vorherigen Kapitels diskutiert werden können, wurde zunächst noch eine statistische Analyse mittels Microsoft Office Excel 2007 durchgeführt. Anhand einer Regressionsanalyse wurde untersucht, ob die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag mit der Anzahl der Brände korrelieren. Die Anzahl der Brände stellt dabei die abhängige Variable dar, Temperatur bzw. Niederschlag die unabhängige Variable. Um den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen der Anzahl an Bränden und den Klimavariablen Temperatur und Niederschlag festzustellen, wurde der Korrelationskoeffizient von Bravais-Pearson (im Folgenden als „ r “ bezeichnet) anhand der entsprechenden Funktion in Excel berechnet. Der Wert des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen -1 (perfekter negativer Zusammenhang) und +1 (perfekter positiver Zusammenhang). Je nach Autor werden verschiedene Schwellenwerte bezüglich der Stärke des linearen Zusammenhangs verwendet. Koch (2005: 129) verwendet zum Beispiel folgende Schwellenwerte, die auch in vorliegender Arbeit verwendet wurden:

0 bis < 0,5 : schwache Korrelation

0,5 bis < 0,8 : mittlere Korrelation

≥ 0,8 : starke Korrelation

Desweiteren gibt die Regressionsanalyse in Excel das Quadrat des Korrelationskoeffizienten, das Bestimmtheitsmaß r^2 , aus. Dieser Wert gibt an, wie viel Prozent der auftretenden Varianzen im Hinblick auf einen statistischen Zusammenhang erklärt werden, wie viel Prozent der Werte folglich auf der Trendlinie liegen.

Anschließend wurde mittels Signifikanztest überprüft, ob lineare Zusammenhänge zufällig oder systematisch zustande kamen. Hierbei liefert der bei der Regressionsanalyse ausgegebene p-Wert Auskunft. Dieser Wert spiegelt die Signifikanz der Ergebnisse wieder. Bei einem p-Wert $\leq 0,05$ sind die Zusammenhänge signifikant, bei einem p-Wert $\leq 0,01$ sehr signifikant und bei einem p-Wert $\leq 0,001$ höchst signifikant.

Für die Wintermonate wurde aufgrund der geringen Anzahl der Brände keine statistische Analyse durchgeführt.

5.7 Diskussion

a) USA im Allgemeinen

Die statistischen Untersuchungen der vorherigen Ergebnisse lieferten folgende Ergebnisse: Zwischen Temperatur und Anzahl der Brände besteht ein schwacher positiver Zusammenhang ($r: 0,45$; $r^2: 0,2$). Dieser Zusammenhang ist signifikant auf dem 1%-Niveau (p -Wert: $0,009$). Zwischen Niederschlag und Anzahl der Brände gab es einen sehr schwachen negativen Zusammenhang ($r: -0,16$; $r^2: 0,03$). Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant (p -Wert: $0,18$). Des Weiteren wurde ein schwacher positiver Zusammenhang zwischen der Anzahl der Brände und der Größe, der dadurch verbrannten Fläche festgestellt ($r: 0,49$; $r^2: 0,24$). Dieser Zusammenhang ist sehr signifikant auf dem 1%-Niveau (p -Wert: $0,004$). Wie jedoch zu sehen ist, weisen alle Analysen einen geringen r^2 -Wert auf. Demnach wird nur ein geringer Teil der auftretenden Varianzen im Hinblick auf einen statistischen Zusammenhang erklärt.

Wie Flannigan et al. (2002: 222 f.) bereits bestätigten, gibt es eine hohe jährliche Variabilität von Brandereignissen. Diese Variabilität bezieht sich neben der absoluten Anzahl an Bränden auch auf die Größe der dadurch verbrannten Fläche. Eine hohe Anzahl an Bränden innerhalb eines Jahres lässt nicht automatisch auf eine große Fläche verbrannten Gebietes rückschließen. So gab es beispielsweise im Jahr 2012 überdurchschnittlich wenige Brände (3365), jedoch wurden in diesem Jahre die zweitmeisten Flächen verbrannt. Zudem ist auch nur ein sehr geringer Teil aller Brände für den Großteil aller verbrannten Flächen verantwortlich.

Weiterhin ist die Größe eines Brandereignisses indirekt proportional zu dessen Häufigkeit. Kleine Brandereignisse kommen also öfter vor, größere Brandereignisse seltener. Dies hängt vermutlich mit der Brennmaterialverfügbarkeit zusammen. Für die Entfaltung kleinerer Brände ist nicht so viel Brennmaterial nötig wie für große Brände. Sie kommen somit öfter vor. Des Weiteren kommt hierbei dem Menschen eine entscheidende Rolle zu. Dieser erkennt und reagiert auf kleine Feuer und löscht diese, bevor sie sich ausweiten und zu großen Bränden heranwachsen können.

Neben der jährlichen Variabilität der Anzahl und Größe der Brände gibt es zudem eine hohe saisonale Variabilität. Bereits Westerling et al. (2006: 941) stellten einen Zusammenhang zwischen höheren Temperaturen im Sommer und einem erhöhten Brandaufkommen zu dieser Jahreszeit fest. Demnach traten die meisten Brände (82,6 %) in den USA in den Sommermonaten auf, wenn auch die Temperaturen generell am höchsten sind und die Niederschläge, zumindest in den Staaten, in denen die meisten Brände vorkommen, gering sind. Der Zusammenhang zwischen hohen Sommertemperaturen und einer erhöhten Anzahl an Bränden ist jedoch sehr gering ($r: 0,28$; $r^2: 0,08$). Zudem ist dieser Zusammenhang nicht signifikant (p -Wert: $0,13$). Zwischen den Sommerniederschlägen und der Anzahl der Brände

konnte ebenfalls ein positiver Zusammenhang festgestellt werden. Dieser ist jedoch sehr gering ($r: 0,07$; $r^2: 0,005$) und nicht signifikant. Bei der Betrachtung der Brandereignisse in einzelnen Monaten gibt es ebenfalls eine starke jährliche Variabilität. Es konnte in jedem Monat ein Anstieg der Brandereignisse beobachtet werden. Die Anstiege variieren stark von Monat zu Monat. Zudem ist der Anteil der erklärten Varianzen in jedem Monat gering (am höchsten im Juli mit 23,7%, am geringsten im Dezember mit 1,5%).

Im Kernland der USA konnte des Weiteren eine Zunahme der Durchschnittstemperatur festgestellt werden. Dieser Anstieg wurde zu jeder Jahreszeit beobachtet. Auch bei den Niederschlägen war ein Anstieg im Sommer, Herbst und Winter zu verzeichnen. Im Frühling kam es hingegen zu einer Abnahme der Niederschläge. Bei den beiden Klimavariablen sind ebenfalls sehr geringe r^2 -Werte zu beobachten. Demnach liefern die Trendlinien keine gute Aussage über den Anstieg oder die Abnahme von Temperatur- bzw. Niederschlagswerten.

Die meisten Brände (94%) gab es in den Weststaaten. Obwohl in dieser Region die wenigsten Blitze zu verzeichnen sind, gibt es dennoch ein erhöhtes Vorkommen von Blitzen in den Sommermonaten Juni, Juli und August, in denen auch die meisten Brände stattfinden (Abbildung 24).

Da es in den Weststaaten die meisten Brände gibt, wurden bei der Analyse des Zusammenhangs von Temperatur- und Niederschlagsänderungen und Brandereignissen, nur die Klimadaten dieser Staaten herangezogen. Temperatur – und Niederschlagswerte von Staaten im Osten der USA, in denen keine oder nur verhältnismäßig wenig Brände auftraten, verfälschen das Ergebnis der Analyse. In den östlich gelegenen Staaten fällt tendenziell mehr Niederschlag als in den Weststaaten (Abbildung 56). Nach Norden sind zudem die mittleren Temperaturen vergleichsweise gering (Abbildung 50).

Für die detaillierte Analyse der Temperatur- und Niederschlagsänderungen und deren Einfluss auf Brandereignisse wurden exemplarisch drei Bundesstaaten ausgewählt. Kalifornien, Arizona und Idaho werden jeweils einem anderen Klimatyp zugeordnet. Dadurch konnte auch der Einfluss des Klimawandels auf Brandereignisse im Untersuchungszeitraum in verschiedenen Klimazonen untersucht werden.

b) Kalifornien

In Kalifornien konnte entgegen dem allgemeinen Trend der USA ein Rückgang der Anzahl von Bränden beobachtet werden. Hierbei wird nur ein sehr geringer Teil der Varianzen erklärt (etwa 4,5%). Seit den 1980er Jahren nahm die Größe der verbrannten Flächen zu, wobei auch hier nur etwa 7,8% der Varianzen erklärt werden. Dies ist auf die starke Abnahme von kleinen Bränden bis 0,2 Acre bei gleichzeitigem Anstieg von größeren Bränden zurückzuführen.

Des Weiteren konnte eine Zunahme der Temperaturen ($r^2: 0,01$) und eine Abnahme des Niederschlags ($r^2: 0,02$) im Untersuchungszeitraum in Kalifornien festgestellt werden. Zwischen der Abnahme der Brandereignisse und der Zunahme der Temperatur besteht nur ein sehr schwacher Zusammenhang ($r: 0,19$; $r^2: 0,04$), der nicht signifikant ist (p -Wert: $0,29$). Der Zusammenhang zwischen Bränden und Niederschlägen ist ebenfalls schwach ($r: 0,28$; $r^2: 0,07$) und nicht signifikant (p -Wert: $0,15$). In den Sommermonaten deuten die Trendlinien ebenfalls einen Trend von abnehmenden Bränden und zunehmende Temperaturen bzw. verringerte Niederschlägen an, was normalerweise die Brandaktivität begünstigen würde. Eine Abnahme der Brandereignisse ist hier also auf andere Faktoren als Niederschlag und Temperatur zurückzuführen und könnte möglicherweise durch Brandbekämpfungsmaßnahmen erklärt werden. Die Anwendung von Brandbekämpfungsstrategien kann selbst unter „feuerfreundlichen“ Bedingungen zu einer Abnahme der Brände führen, wenn diese beispielsweise ein schnelles Eingreifen bei Brandvorkommen vorsehen. Zudem könnte es im Untersuchungszeitraum zu einer Verbesserung der Brandbekämpfung in Kalifornien gekommen sein. Eine erhöhte Anzahl von Feuerwehrmännern oder verbesserte Technologien zum schnelleren und präziseren Lokalisieren von Bränden könnten zu einer erhöhten Erfolgsquote bei der Brandbekämpfung geführt haben.

Weiterhin waren Feuer in bestimmten Jahren für einen großen Teil der gesamt verbrannten Fläche verantwortlich. Die Feuer der Jahre 2008, 1999 und 1987 waren für etwa 60% der gesamten verbrannten Flächen im Untersuchungszeitraum verantwortlich. Außerdem ist für die verbrannten Flächen nicht nur die Anzahl der Feuer ausschlaggebend. 2008 gab es durchschnittlich viele Brände. Diese verbrannten jedoch die meiste Fläche im gesamten Untersuchungszeitraum. 1994 gab es hingegen die meisten Brände im Untersuchungszeitraum, die jedoch nur relativ wenig Fläche verbrannten.

Tabelle 33 zeigt im Überblick die Ergebnisse der statistischen Analyse für Kalifornien. Es ist zu sehen, dass es in Kalifornien sowohl insgesamt als auch zu allen Jahreszeiten nur schwache Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Brände und den Klimavariablen Temperatur und Niederschlag gibt. Desweiteren war nur in den Frühlingsmonaten ein signifikanter Zusammenhang zwischen Temperatur und Bränden auf dem 1%-Niveau und ein signifikanter Zusammenhang zwischen Niederschlag und Bränden auf dem 10%-Niveau zu beobachten.

Tabelle 33: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Kalifornien

			Temperatur	Niederschlag
		Brände	Gesamt	Korrelationskoeffizient r
Bestimmtheitsmaß r ²	0,04			0,07
Signifikanzwert p	0,29			0,15
Frühling			Temperatur	Niederschlag
	Korrelationskoeffizient r		0,47	-0,33
	Bestimmtheitsmaß r ²		0,22	0,11
	Signifikanzwert p		0,005	0,06
Sommer			Temperatur	Niederschlag
	Korrelationskoeffizient r		0,27	-0,05
	Bestimmtheitsmaß r ²		0,07	0,001
	Signifikanzwert p		0,14	0,78
Herbst			Temperatur	Niederschlag
	Korrelationskoeffizient r		-0,02	0,24
	Bestimmtheitsmaß r ²	0,00002	0,06	
	Signifikanzwert p	0,93	0,17	

c) Arizona

In Arizona nahm im Untersuchungszeitraum sowohl die Anzahl der Brände, als auch die dadurch verbrannte Fläche zu. Im Hinblick auf Varianzen werden bei der Anzahl der Brände etwa 23% erklärt, bei der verbrannten Fläche sogar nur etwa 18%. Zudem konnte eine Zunahme der jährlichen Durchschnittstemperatur (20% erklärte Varianzen) und eine Abnahme des jährlichen Niederschlags (18% erklärte Varianzen) beobachtet werden.

Insgesamt konnte in Arizona ein positiver Zusammenhang zwischen erhöhten Temperaturen und einer erhöhten Anzahl an Bränden beobachtet werden ($r: 0,76$; $r^2: 0,58$). Dieser Zusammenhang ist zudem höchst signifikant auf dem 0,1%-Niveau. Zwischen der Anzahl der Brände und den Niederschlägen gab es nur einen schwach negativen aber sehr signifikanten Zusammenhang ($r: -0,49$; $r^2: 0,24$). Der positive Zusammenhang zwischen Temperatur und Anzahl der Brände war in den einzelnen Jahreszeiten unterschiedlich stark, im Allgemeinen jedoch schwach. Der Zusammenhang war jedoch immer sehr bis höchst signifikant. Der schwach negative Zusammenhang zwischen Niederschlägen und Anzahl der Brände war auch im Frühling und Sommer zu beobachten. Im Herbst gab es hingegen einen schwach positiven Zusammenhang zwischen Niederschlägen und der Anzahl an Bränden. Diese Zusammenhänge waren allesamt nicht signifikant. Diese Ergebnisse zeigen also, dass nur vereinzelt erhöhte Temperaturen oder verringerte Niederschläge mit einer erhöhten Anzahl an Bränden korrelieren.

In den Jahren 2000, 1996, 2003 und 2006 gab es in Arizona verhältnismäßig viele Brände (1383, 1187, 1018 und 1012 Brände). In diesen Jahren waren die Temperaturen überdurchschnittlich hoch bzw. die Niederschläge überdurchschnittlich gering. Die wenigsten Brände gab es Anfang der 1980er Jahre. Dies waren generell überdurchschnittlich kühle und feuchte Jahre.

Seit dem Jahr 2000 konnte ein rückschreitender Trend der Brandereignisse beobachtet werden. Betrachte man zudem die Temperatur- und Niederschlagsentwicklung der 2000er Jahre isoliert, fällt auf, dass es seit 2000 eine Abnahme der jährlichen Durchschnittstemperatur, sowie eine leichte Zunahme des jährlichen Niederschlags gab. Dennoch waren bis auf 2008, 2010 und 2011 alle Jahre seit 2000 überdurchschnittlich warme Jahre und bis auf 2004, 2005, 2008 und 2010 überdurchschnittlich trockene Jahre. Dies lässt die Vermutung zu, dass es durch menschliche Eingriffe zu einem Rückgang der Brandereignisse seit 2000 kam. Eine genauere Erklärung wurde bereits weiter oben gegeben.

Tabelle 34: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Arizona

Brände			Temperatur	Niederschlag
	Gesamt	Korrelationskoeffizient r	0,76	-0,49
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,58	0,24
		Signifikanzwert p	0,0000003	0,004
	Frühling		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,43	-0,05
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,18	0,003
		Signifikanzwert p	0,01	0,78
	Sommer		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,64	-0,18
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,41	0,03
		Signifikanzwert p	0,00005	0,3
	Herbst		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,33	0,12
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,11	0,01
		Signifikanzwert p	0,06	0,5

d) Idaho

In Idaho konnte im Untersuchungszeitraum eine Zunahme der absoluten Zahl der Brände, sowie eine Zunahme der dadurch verbrannten Flächen festgestellt werden. Allerdings werden hierbei nur 9% bzw. 13% aller Varianzen erklärt. Außerdem kam es zu einem Anstieg der durchschnittlich jährlichen Temperatur und zu einer Abnahme des jährlichen Niederschlags. Diese waren äußerst schwach mit einem geringen Anteil erklärter Varianzen (r^2 : 0,06 bzw. 0,01). Insgesamt konnte in Idaho ein schwach positiver Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Anzahl der Brände festgestellt werden (r : 0,55; r^2 : 0,3). Dieser Zusammenhang ist höchst signifikant auf dem 0,1%-Niveau. Zudem konnte auch in den Frühlings-,

Sommer- und Herbstmonaten jeweils ein schwach positiver Zusammenhang beobachtet werden. Diese Zusammenhänge waren sehr bis höchst signifikant.

Des Weiteren wurde insgesamt in den Frühlings- und Sommermonaten ein schwach negativer Zusammenhang zwischen Anzahl der Brände und den Niederschlägen beobachtet. Dieser Zusammenhang war aber nur in den Sommermonaten sehr signifikant auf dem 1%-Niveau. Im Herbst gab es sogar einen schwach positiven Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und der Anzahl der Brände, wobei dieser nicht signifikant war.

Bei genauerer Betrachtung kam es etwa um die Jahrtausendwende zu einer Abnahme der Brandereignisse. In diesem Zeitraum gab es auch bei der jährlichen Durchschnittstemperatur einen negativen Trend, während bei den Niederschlägen ein Anstieg beobachtet werden konnte.

Tabelle 35: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Idaho

Brände			Temperatur	Niederschlag
	Gesamt	Korrelationskoeffizient r	0,55	-0,21
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,3	0,05
		Signifikanzwert p	0,001	0,23
	Frühling		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,62	-0,19
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,39	0,04
		Signifikanzwert p	0,0001	0,29
	Sommer		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,43	-0,46
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,18	0,22
		Signifikanzwert p	0,01	0,007
	Herbst		Temperatur	Niederschlag
		Korrelationskoeffizient r	0,36	0,19
		Bestimmtheitsmaß r^2	0,13	0,04
		Signifikanzwert p	0,04	0,29

e) Zusammenfassung

Für die gesamte USA, für Arizona und für Idaho konnten schwach positive Zusammenhänge zwischen Temperaturen und Bränden festgestellt werden, die zudem signifikant sind. In Kalifornien gab es ebenfalls einen schwach positiven Zusammenhang, welcher jedoch nicht signifikant ist. Die Arbeitshypothese, dass es einen Zusammenhang zwischen steigenden Temperaturen und einer erhöhten Anzahl an Bränden in den USA zwischen 1980 und 2012 gab, kann demnach zumindest teilweise bestätigt werden. Je nach Jahreszeit sind zudem die positiven Zusammenhänge mehr oder weniger stark ausgeprägt und signifikant bzw. überhaupt nicht signifikant (siehe Tabelle 33 bis Tabelle 35).

Des Weiteren konnte für die gesamte USA, für Arizona und Idaho schwach negative Zusammenhänge zwischen den Niederschlägen und der Anzahl an Bränden beobachtet werden,

wobei dieser Zusammenhang nur für Arizona auch signifikant war. Die Arbeitshypothese, dass ein Zusammenhang zwischen verringerten Niederschlägen und einer erhöhten Anzahl an Bränden in den USA zwischen 1980 und 2012 besteht, kann bezüglich der Gesamtwerte demnach weitestgehend verworfen werden. Vereinzelt lieferte die statistische Analyse aber auch Ergebnisse, anhand derer die Hypothese bestätigt werden konnte, zum Beispiel im Frühling in Kalifornien, in Arizona und im Sommer in Idaho (siehe Tabelle 33 bis Tabelle 35). Es besteht jedoch weder beim Zusammenhang der Temperaturen mit den Bränden, noch beim Zusammenhang der Niederschläge mit den Bränden eine starke Korrelation. Zudem gab es eine Besonderheit, die an dieser Stelle nochmals hervorgehoben werden sollte. Betrachtet man die Anzahl der Brände nach Jahrzehnten kann für nahezu alle Daten ein Rückgang der Brände seit Beginn des 21. Jahrhunderts festgestellt werden. Die r^2 -Werte der Trendlinie für die gesamte USA liegen hier bei 0,64, für Kalifornien bei 0,23, für Arizona bei 0,66 und für Idaho bei 0,53. Eine erste Vermutung, dass dies mit einem Rückgang der Temperaturen oder einer Zunahme des Niederschlags zusammenhängt, konnte anhand einer erneuten Regressionsanalyse für den Zeitraum 2000 bis 2012 nicht bestätigt werden. Die Analyse ergab ähnliche Ergebnisse wie für den gesamten Untersuchungszeitraum weswegen diese hier nicht näher erläutert werden. Demnach hängt die Abnahme der Brände seit etwa der Jahrtausendwende von anderen Faktoren ab. Womöglich nahm seit Beginn des 21. Jahrhunderts die Brandbekämpfung durch den Menschen zu, was zu einer Verringerung der Brände führte. Diese Vermutung kann jedoch nicht eindeutig bestimmt werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

5.8 Klimawandel im 21. Jahrhundert und dessen Einfluss auf Brandaktivität

In diesem Kapitel werden anhand ausgewählter Fallbeispiele, potentielle Klimaänderungen und deren Einflüsse auf Brände im Verlauf des 21. Jahrhunderts präsentiert. Klimaänderungen beeinflussen Feuerregime direkt und indirekt. Direkt durch Änderungen des Wetters, das für die Brandentstehung förderlich wäre. Indirekt durch sich ändernde Vegetationszusammensetzung und –struktur. Trotz der Unsicherheiten beim Gebrauch von Klimamodellen wird davon ausgegangen, dass durch zukünftige Klimaänderungen die Brandaktivität, der Schweregrad der Brände und deren Ausmaß ansteigen wird (vgl. N.N., o.J.: 2).

Durch Klimaänderungen kommt es zu einer Änderung der Größe verbrannter Flächen. Price und Rind (1994: 1484) untersuchten Änderungen der Brandhäufigkeit und der verbrannten Fläche, unter einem Klimaszenario in dem die CO₂-Werte sich verdoppelt hätten. Die jährliche Anzahl von Bränden, die durch Blitze verursacht würden, würde um 44 % ansteigen. Die dadurch verbrannte Fläche würde sogar um 78 % ansteigen.

Selbst unter milden Klimawandelszenarios würde sich die, durch Feuer verbrannte Fläche, im Westen der USA und in borealen Wäldern bis zum Ende des Jahrtausends verdoppeln. Erhöhte Temperaturen würden zudem zu längeren Brandsaisonen führen und Landschaften, die ohnehin anfällig für Brände sind, würden über das ganze Jahr hinweg durch Brände gefährdet werden (vgl. N.N., o.J.:2).

Litschert et al. (2012: 124) untersuchten die Brandaktivität in der Ökoregion der südlichen Rocky Mountains. Anhand historischer Aufzeichnungen stellten sie einen Anstieg der jährlichen Brände zwischen 1930 und 2006 und eine Zunahme von großen Bränden seit 1970 fest. Unter dem A2 und B2 Emissionsszenario würde es einen weiteren Anstieg verbrannter Fläche in der Region im Zeitraum 2010 bis 2070 geben.

Des Weiteren projizieren Spracklen et al. (2009: 1) einen Anstieg der jährlich verbrannten Fläche um 54 % bis zum Jahre 2050 unter wärmeren Bedingungen. Die Größe der verbrannten Fläche ist ökosystemabhängig und von Region zu Region unterschiedlich (Abbildung 110). Im Nordwesten der USA käme es beispielsweise zu einem Anstieg der verbrannten Flächen von 78 %, in den Rocky Mountains zu einem Anstieg von 175 %.

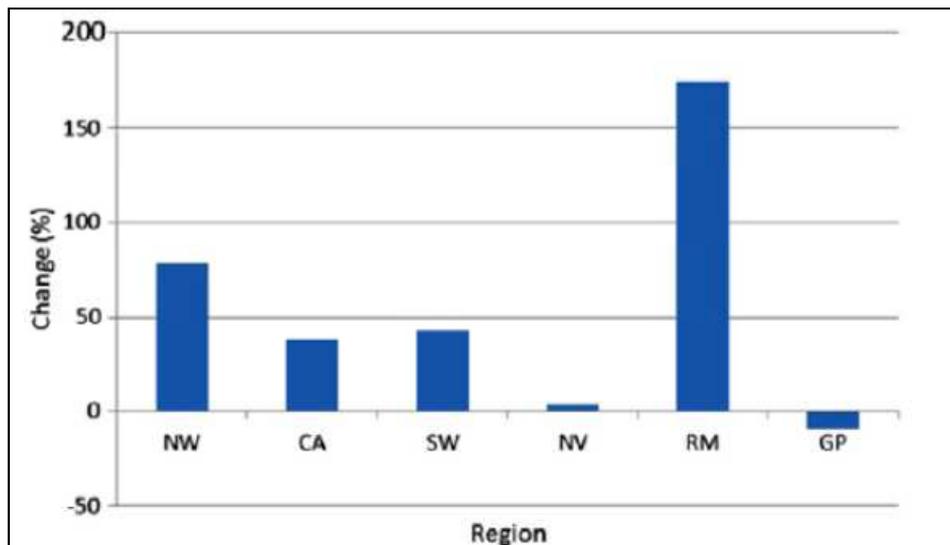


Abbildung 110: Prozentuale Änderungen verbrannter Flächen durch „wildfire“ im Westen der USA. Es werden die Änderungen zwischen dem Zeitraum 1980-2004 zum Zeitraum 2046-2055 dargestellt. NW = Pacific Northwest, CA = California Coastal Shrub, SW = Desert Southwest, NV = Nevada Mountains/Semi-Desert, RM = Rocky Mountain Forest, GP = Eastern Rocky Mountain/Great Plains (Quelle: Liu et al., 2013: 11)

Durch Klimaänderungen kommt es zudem zu Änderungen des Feuerwetters. Brown et al. (2004: 365) untersuchten beispielsweise Änderungen der Brandgefahr in den westlichen vereinigten Staaten aufgrund projizierten Klimaänderungen im 21. Jahrhundert. Demnach käme es zu Änderungen der relativen Luftfeuchte, die vor allem in weiten Teilen des Westens zu einer erhöhten Anzahl an Tagen mit hoher Brandgefahr führen würde. Die am meisten betroffenen Regionen wären die nördlichen Rocky Mountains, das „Great Basin“ und der Südwesten.

In Kalifornien wird beispielsweise ein Anstieg von Küstenwinden zum Ende der Brandsaison projiziert. Dies würde zu extremen Feuerwettern führen und somit zu einer erhöhten Brandgefahr (vgl. Flannigan et al., 2009: 494).

Des Weiteren wird ein Anstieg der Feuerintensität projiziert. Fried et al. (2004: 169) beschäftigen sich mit Bränden im Westen der USA. Sie untersuchten den Einfluss des Klimawandels auf Brände und die Effektivität von Brandbekämpfung im nördlichen Kalifornien. In einem Szenario, in dem der CO₂-Gehalt zweimal so hoch wäre wie heute, gäbe es windigere und wärmere Bedingungen. Brände, die sich unter solchen Bedingungen entwickeln würden, würden intensiver brennen und sich meist schneller verbreiten.

Klimaänderungen haben zudem Einfluss auf die Länge der Brandsaison. Wimberly und Liu (2013:1) prognostizieren zum Beispiel für die Regionen im Nordwesten eine längere, heißere und trockenere Brandsaison. Dadurch würde zudem auch die Fläche, die durch Brände verbrannt würde, zunehmen.

Durch den Klimawandel verändert sich zudem die Häufigkeit von Blitzereignissen, die die häufigsten natürlichen Auslöser für Brände darstellen. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts würde die Zahl der durch Blitze verursachten Brände um 80 % ansteigen. Zudem käme es

dabei zu einem Anstieg der verbrannten Flächen. In den südlichen USA lag im Jahr 2002 die Fläche, der durch Blitze verursachten Brände, bei 43000 ha. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts würde diese Fläche bei 124 000 ha liegen (vgl. Liu et al., 2013: 12).

Klimaänderungen beeinflussen nicht nur direkt die Brandaktivität. Durch klimawandelbedingte Vegetationsänderungen wird das Brandpotential auch indirekt beeinflusst. Verschiedene Studien befassten sich mit zukünftigen Änderungen von Vegetation und Feuer in den USA, insbesondere den westlichen USA und Alaska. Die simulierte Vegetationsverteilung wird durch Laubbaumwälder in Florida, in südöstlichen Mischwäldern an der Golfküste zwischen Texas und Südcarolina, temperierten sommergrünen Wäldern im restlichen Südosten, Mischwald im Nordosten und Graslandschaften, Savannen und Waldgebiete im östlichen, mittleren Westen geprägt. Zukünftige Änderungen der Vegetationszusammensetzung würden das Vorkommen und die Verteilung von Bränden signifikant verändern. Es wird ein Anstieg der verbrannten Anbauflächen und der verbrannten Biomasse in den USA projiziert. Bis zum Ende des 21. Jahrhundert, werden zudem 75-90 % der Tundra in Alaska durch boreale und gemäßigte Wälder ersetzt (vgl. Liu et al., 2013: 13).

Neben klimawandelbedingten Änderungen der Brandaktivität könnte diese auch durch Änderungen im Waldmanagement und durch Vegetationsänderungen, beeinflusst werden. Brandaktivität und -verhalten wird im Wesentlichen durch Vegetationsstruktur und -zusammensetzung geprägt. Auf diese hat der Mensch durch sein Eingreifen direkten Einfluss. Durch das Eingreifen in Vegetationsstrukturen kann der Mensch potentielles Brennmaterial verringern, umformen und/oder isolieren, was eine Möglichkeit wäre die Menge an verbrannten Gebieten in Zukunft zu verringern. Dies ist jedoch nur für Gebiete bis 100 000 ha realistisch (vgl. Liu et al., 2013: 13).

6. Einfluss von Bränden auf das Klima

In den bisherigen Kapiteln wurde untersucht wie sich das Klima im Allgemeinen und vergangene, sowie zukünftige Klimaänderungen, auf Brandereignisse auswirken können. Brände wiederum haben selbst Einfluss auf das Klima. Im Folgenden wird ein Überblick, über die Rückkopplungsmechanismen von Bränden auf das Klima, gegeben.

Brände und das Klima stehen in enger Beziehung zueinander. Atmosphärische Bedingungen sind ein wichtiger Umweltfaktor für Brände. Atmosphärische Bedingungen für Brände, werden entsprechend der Terminologie für Klima und Wetter, in Feuerwetter und Feuerklima unterteilt. Feuerwetter ist einer der Faktoren, der das Auftreten und Verhalten einzelner Feuer innerhalb einer Waldbrandsaison, bestimmt. Das Feuerklima hingegen ist eine Darstellung des täglichen Feuerwetters, welches statistische Eigenschaften (Durchschnitt, Variation etc.) des Feuerwetters beschreibt. Das Feuerklima bestimmt die atmosphärischen Bedingungen für die Brandaktivität und die Zeiträume, die über eine Brandsaison hinaus reichen (vgl. Liu et al., 2013: 1).

Brände beeinflussen atmosphärische Bedingungen in unterschiedlichem zeitlichem und räumlichem Ausmaß. Sie emittieren Gase, Partikel, Wasser und Hitze (Tabelle 36).

Tabelle 36: Emissionen von Feuern. „Mass“ = Gramm pro Emission/Kilogramm des verbrannten Brennmaterials; d = Partikeldurchmesser (Quelle: Liu et al., 2013: 2)

Emissions	Mass	%
Carbon Dioxide	1564.8	71.44
Carbon Monoxide	120.9	5.52
Organic Carbon	5.2	0.24
Elemental Carbon	0.4	0.02
Particulate matter $d < 2.5\mu$	10.3	0.47
Particulate matter $2.5\mu < d < 10\mu$	1.9	0.09
Particulate Matter $d > 10\mu$	3.8	0.17
Nitric Oxide	8.5	0.39
Methane	5.9	0.27
Non-methane Hydrocarbon	4.3	0.20
Volatile Organic Compounds	5.2	0.24
Water	459.2	20.97

Bei Bränden werden Großteils Kohlenstoffdioxide emittiert (Tabelle 36). Die prozentuale Zusammensetzung der einzelnen Komponenten variiert jedoch von Brandereignis zu Brandereignis. Abbildung 111 zeigt ein Diagramm der wesentlichen physikalischen Prozesse von Bränden und deren Einfluss auf das Wetter bzw. das Klima: Rauchpartikel können den atmosphärischen Strahlungstransfer direkt beeinflussen, indem sie Strahlung (vor allem kurzwellige Strahlung) streuen und absorbieren. Des Weiteren haben sie einen indirekten Einfluss, indem sie Wolkeneigenschaften verändern. Rauchpartikel können dabei als Kondensationskeime agieren. Änderungen des Strahlungsantriebs wirken sich auf Lufttemperatur, Feuchte

und Windverhältnisse aus. Zudem absorbiert das Kohlenstoffdioxid die vom Erdoberflächen-Atmosphären-System emittierte, atmosphärische, langwellige Strahlung und ist demnach einer der Hauptverursacher globaler Erwärmung. Die Wärmeenergie die von Bränden freigesetzt wird kann zudem die lokale, atmosphärische, thermodynamische Struktur, atmosphärische Turbulenzen, Windverhältnisse und andere atmosphärische, thermale und dynamische Eigenschaften und Prozesse verändern. Wasserdampf, der von einem Feuer freigesetzt wird, kann zudem die Feuchte in der Atmosphäre erhöhen, was zu Wolken- und Nebelbildung führen kann. Zusätzlich können freigesetzte Hitze und Wasser die atmosphärischen Bedingungen kurzfristig beeinflussen. Zudem können Brände bestimmte Vegetationsbedeckungen zerstören oder die Vegetationsdichte verringern. Dies hat wiederum Auswirkungen auf den Wärme-, Wasser- und Spurengasaustausch mit der Atmosphäre. Dies beeinflusst wiederum das Wetter und das Klima (vgl. Liu et al., 2013: 1 f.).

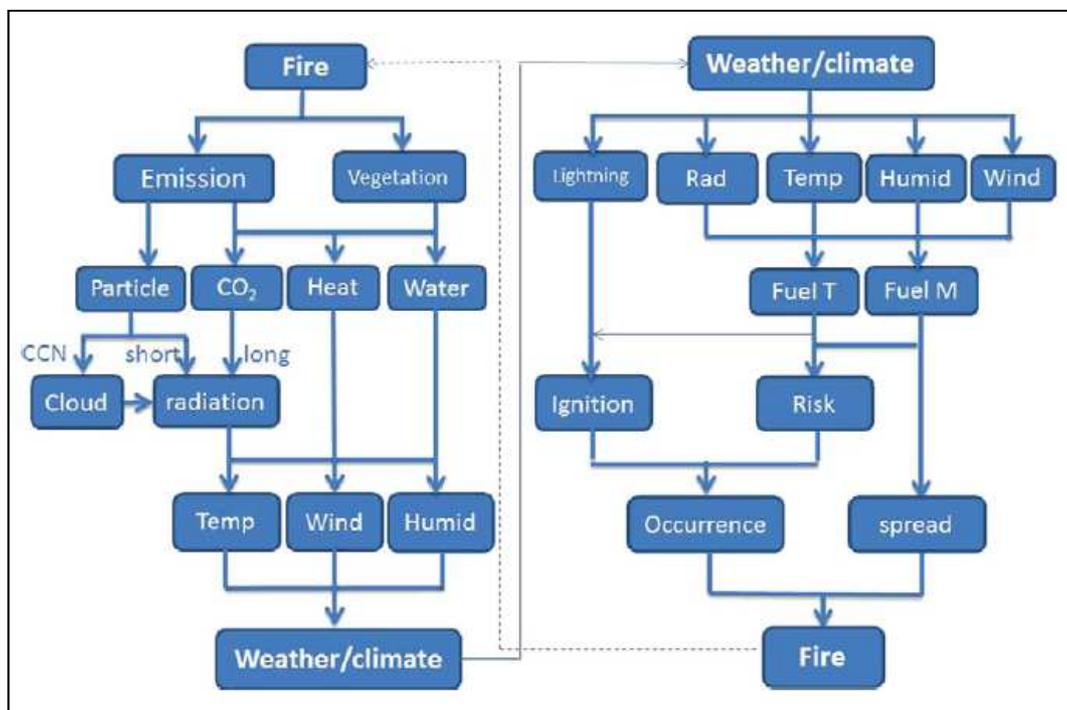


Abbildung 111: Physikalische Prozesse von Bränden und deren Einfluss auf Wetter und Klima (Quelle: Liu et al., 2013: 2)

Auf regionaler Ebene ist vor allem das Ausmaß an Emissionen, die durch Brände verursacht werden, von zentraler Bedeutung. Einer der wichtigsten Bestandteile von Feueremissionen stellt der Kohlenstoff dar. Dieser kommt sowohl in Gasen (z.B. CO_2 , CO , CH_4) als auch in Partikeln vor (organischer Kohlenstoff und Ruß). Zwischen 1997 und 2009 lag die gemittelte globale Kohlenstoffemissionsberechnung im Bereich von 1,4 bis 2,8 Pg Kohlenstoff pro Jahr. Im Global Fire Emission Dataset von 2010 lag der Wert im Zeitraum 1997 bis 2009 bei 2,0 Pg Kohlenstoff pro Jahr. Dies macht etwa ein Drittel der gesamten weltweiten Kohlenstoffemissionen aus (vgl. Liu et al., 2013: 3).

In den USA stammen, aktuellen Schätzungen zufolge, 20 bis 40 % der gesamten Kohlenstoffabsonderung aus den Wäldern im Westen. Ein weiterer Anstieg der Brandaktivität in dieser Region würde zu einer erhöhten Kohlenstoffabgabe führen. Die westlichen Wälder der USA könnten selbst unter moderaten Klimaszenarien eher zu einer Kohlenstoffdioxidquelle als zu einer Kohlenstoffdioxidsenke werden. Des Weiteren zeigten jüngste Studien, dass es aufgrund wärmerer, längerer Wachstumsperioden zu einer verringerten CO₂-Aufnahme in höher gelegenen Wäldern kommen könnte (vgl. Westerling et al., 2006: 943). Spracklen et al. (2009:1) projizieren einen Anstieg verbrannter Flächen im Westen der USA. Dieser Anstieg würde fast zu einer Verdopplung kohlenstoffhaltiger Aerosole bis zum Jahr 2050 führen. Des Weiteren würde es zur Sommerzeit zu einem Anstieg von 40 % organischen Kohlenstoffs in der Region kommen (vgl. Spracklen et al., 2009:1).

Gas- und partikelförmige Emissionen haben nicht zuletzt auch Auswirkungen auf die Luftqualität. Diese hat wiederum gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Eine verschlechterte Luftqualität kann sowohl kurzfristige als auch langfristige Folgen haben. Folgen können beispielsweise Hustreize, eine beeinträchtigte Funktion der Atemwege, eine Verschlechterung der Lungenfunktion oder Atemwegserkrankungen sein. Im schlimmsten Falle kann es in weitere Folge auch zum Tode kommen.

Des Weiteren können Emissionen zu Verschmutzung von Gebäuden und Kulturgütern, zum öffentlichen Ärgernis und einer Verschlechterung der Sichtverhältnisse führen. Dies kann in weiterer Folge zu erheblichen kulturellen und monetären Schäden führen.

7. Fazit

Der Einfluss des Klimawandels auf Brände stellt sowohl auf globaler als auch auf regionaler Ebene ein hochaktuelles Thema dar. Die USA stellen dabei ein interessantes Untersuchungsgebiet dar, da hier Jahr für Jahr eine große Anzahl an Bränden mit teilweise verheerenden Folgen auftreten.

Die in Kapitel 1 formulierten Arbeitshypothesen konnten Anhand der statistischen Untersuchungen und anhand der Auswertung verschiedener Fallstudien zumindest teilweise bestätigt werden. Demnach kam es zu einem klimawandelbedingten Anstiegs der Brände in den USA in der jüngsten Vergangenheit, sowie eines weiteren Anstiegs der Brandaktivität unter zukünftigen projizierten Klimabedingungen. Dieser Anstieg konnte für die Anzahl der Brände, die Menge verbrannter Flächen und für das Brandpotential bzw. die Brandgefahr im Allgemeinen festgestellt werden.

Da Brandaktivität und Brandverhalten durch sogenannte Feuerregime bestimmt werden gibt es deutliche regionale Unterschiede. Des Weiteren sind sie einer jährlichen, saisonalen und monatlichen Variabilität unterlegen. Zudem ist nur ein geringer Teil aller Feuer für den Großteil der verbrannten Flächen verantwortlich.

Die klimawandelbedingten Änderungen wurden in dieser Masterarbeit durch Temperatur- und Niederschlagsänderungen repräsentiert. Jedoch gibt es noch eine Reihe weiterer natürlicher Einflussfaktoren (Windverhältnisse, atmosphärische Stabilität, Wolkenbildung, Tageszeit, Topographie, Vegetationsbeschaffenheit), die das Brandverhalten bzw. die Brandaktivität in den USA zusätzlich beeinflussen. Diese Einflussfaktoren sind jedoch nicht in der Qualität und Quantität vorhanden, wie das bei Temperatur- und Niederschlagsaufzeichnungen der Fall ist. Für eine detailliertere Analyse unter Einbeziehung weiterer Einflussfaktoren, müssten daher weitere aufwendige Voruntersuchungen bzw. instrumentelle Aufzeichnungen durchgeführt werden. Für zukünftige Untersuchungen wäre die Einbeziehung weiterer Einflussfaktoren jedoch durchaus sinnvoll und wünschenswert.

Neben natürlichen Faktoren hat außerdem nicht zuletzt der Mensch entscheidenden Einfluss auf die Brandaktivität und das Brandverhalten. Brandbekämpfungsstrategien und das Vermögen auf unvorhergesehene Brände zu reagieren gehören zu den entscheidenden anthropogenen Einflussfaktoren. Des Weiteren beeinflussen Menschen durch ihr Eingreifen ganze Feuerregime und können somit Brandaktivitäten und –verhalten nachhaltig verändern. Diese Faktoren sollten in zukünftigen Analysen ebenfalls in Betracht gezogen werden. Brände wirken des Weiteren auch rückwirkend auf das Klima ein und können den Klimawandel unterschiedlich beeinflussen. Rauchpartikel können den Anteil der Solarstrahlung, der von der Erde absorbiert wird, auf lokaler und regionaler Ebene verringern. Durch Brände wird jedoch auch CO₂ freigesetzt. Somit sind Brandemissionen eine der wichtigsten atmo-

sphärischen Kohlenstoffdioxidquellen und tragen somit nachhaltig zum globalen Treibhaus-effekt bei.

Man sieht also, dass es sehr sinnvoll wäre weitere Untersuchungen mit zusätzlichen Einfluss-faktoren durchzuführen. Dennoch bietet vorliegende Arbeit einen guten Überblick über den Einfluss von zwei der bedeutendsten Klimaelemente und deren Einwirkung auf Brände im Kernland der USA.

8. Quellenverzeichnis

8.1 Literatur

- Bachelet D., Lenihan J.M. und Neilson R.P. (2007): Wildfires and global climate change. The importance of climate change for future wildfire scenarios in the western United States.- In: Regional Impacts of Climate Change: Four Case Studies in the United States, 28 Seiten.
- Bergeron Y., Cyr D., Girardin M.P. und Carcaillet C. (2010): Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: Collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data.- In: International Journal of Wildland Fire 19(8), 1127-1139.
- Bowman D.M.J.S, Balch J.K., Artaxo P., Bond W.J., Carlson J.M., Cochrane M.A., D'Antonio C.M., DeFries R.S., Doyle J.C., Harrison S.P., Johnston F.H., Keeley J.E., Krawchuk M.A., Kull C.A., Marston J.B., Moritz M.A., Prentice I. C., Roos, C.I., Scott A.C., Swetnam T.W., Van der Werf T.W. und Pyne S.J. (2009): Fire in the earth system.- In: Science 324, 481-484.
- Brown T.J., Hall B.L. und Westerling A.L. (2004): The Impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the western United States: An application perspective.- In: Climate Change 62, 365-388.
- Brown T.J., Hall B.L., Mohrle C.R. und Reinbold H.J. (2002): Coarse Assessment of Federal Wildland Fire Occurrence Data. Report for the National Wildfire Coordinating Group.- Program for Climate, Ecosystem and Fire Applications Desert Research Institute, Reno.
- Carvalho A. (2010): Climate change, forest fires and air quality in Portugal in the 21st century.- In: Simard S. (Hrsg.): Climate Change and Variability, Published Online, 486 Seiten.
- Carvalho A., Monteiro A., Flannigan M., Solman S., Miranda A.I. und Borrego C. (2011): Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality.- In: Atmospheric Environment 45, 5545-5553.
- Ecological Society of Fire (2002): Fire Ecology. – Washington D.C.
- Flannigan M.D., Krawchuk M.A., de Groot W.J., Wotton B.M. und Gowman L.M. (2009): Implications of changing climate for global wildland fire.- In: International Journal of Wildland Fire 18, 483-507.
- Flannigan M.D., Stocks B.J. und Wotton B.M. (2000): Climate change and forest fires.- In: The Science of the Total Environment, 221-229.
- Fried J.S., Torn M.S. und Mills E. (2004): The Impact of Climate Change on wildfire severity: A regional forecast for Northern California.- In: Climatic Change 64, 169-191.
- Ganteaume A. und Jappiot M. (2013): What causes large fires in Southern France.- In Forest Ecology and Management 294, 76-85.

- Giannakopoulos C., Le Sager P., Bindi M., Moriondo M., Kostopoulou E. und Goodess C.M. (2009): Climatic changes associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming.- In: *Global and Planetary Change* 68, 209-224.
- Gillett N.P., Weaver A.J., Zwiers F.W. und Flannigan M.D. (2004): Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires.- In: *Geophysical Research Letters* 31; online first 29.09.2004, DOI: 10.1029/2004GL020876.
- Global Fire Monitoring Center (GFMC) (Hrsg.) (2010): *International Multi-Lingual Fire Management Terminology*.- Freiburg.
- Goudie, A. (1993): *The Human Impact on the Natural Environment*.- Oxford.
- Holle R.L. und Cummins K.L. (2010): Monthly distributions of U.S. NLDN Cloud-To-Ground Lightning.- 21st International Lightning Detection Conference und 3rd International Lightning Meteorology Conference, Orlando, Florida.
- Houghton J. (1997): *Globale Erwärmung. Fakten, Gefahren und Lösungswege*.- Heidelberg.
- IPCC (2007^a): *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. – Cambridge, New York.
- IPCC (2007^b): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. – In *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. – Bern/Wien/Berlin.
- IPCC (2007^c): Häufig gestellte Fragen.- In *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. – Bern/Wien/Berlin.
- Karl T.R., Melillo J.M. und Peterson T.C. (Hrsg.) (2009): *Global Climate Change Impacts in the United States*. – New York
- Kohn W. (2005): *Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*.- Heidelberg.
- Krawchuk M.A., Moritz M.A., Parisien M.-A., Van Dorn J. und Hayhoe K. (2009): Global Pyrogeography: the current and future distribution of wildfire.- In: *PLoS ONE* 4; online first 8.04.2009, doi:10.1371/journal.pone.0005102.
- Litschert S.E., Brown T.C. und Theobald D.M. (2012): Historic and future extent of wildfires in the Southern Rockies Ecoregion, USA.- In: *Forest Ecology and Management* 269, 124-133.
- Liu Y., Goodrick S. und Heilman W. (2013): Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire-climate interactions. - In: *Forest Ecology and Management*; online first 30.03.2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.020>.
- Pausas J.G. und Keeley J.E. (2009): A Burning Story: The role of fire in the history of life.- In: *Bioscience* 59 (7), 593 – 601.
- Peel M.C., Finlayson B.L. und McMahon T.A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.- In: *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633-1644.

- Pitman A.J., Narisma G.T. und McAneney J. (2007): The impact of climate change on the risk of forest and grassland fires in Australia.- In: *Climatic Change* 84, 383-401.
- Podur J. und Wotton M. (2010): Will climate change overwhelm fire management capacity?- In: *Ecological Modelling* 221, 1301-1309.
- Price C. (2009): Will a drier climate result in more lightning?- In: *Atmospheric Research* 91, 479-484.
- Price C. und Rind D. (1994): The impact of a 2XCO₂ climate on lightning-caused fires.- In: *Journal of Climate* 7, 1484-1494.
- Reinhard M., Rebetz M. und Schlaepfer R. (2005): Recent climate change: Rethinking drought in the context of Forest Fire Research in Ticino, South of Switzerland.- In: *Theoretical and Applied Climatology*, 17-25.
- Robinson P.J. und Henderson-Sellers A. (1999): *Contemporary Climatology*.- Harlow.
- Sandberg D.V., Roger O.D., Peterson J.L. und Core J. (2002): *Wildland fire on ecosystems: effects of fire on air*.- United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 86 Seiten.
- Schönwiese C.D. (1995): *Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen*.- Berlin, Heidelberg.
- Schönwiese, C-D. (2007): *Klimaänderungen*.- In: Gebhardt H., Glaser R., Radtke U. und Reuber P. (Hrsg.): *Geographie. Physische und Humangeographie*.- Heidelberg, 246 – 252.
- Smith S.J., Thomson A.M., Rosenberg N.J., Izaurrealde R.C., Brown R.A. und Wigley T.M.L. (2005): Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment. Part 1: Scenarios and Context.- In: *Climate Change* 69, 7-25.
- Sommers W.T., Coloff S.G. und Conard S.G. (2011): *Synthesis of knowledge: Fire history and climate Change*. – Report Submitted to the Joint Fire Science Program for Project 09-2-01-09.
- Spracklen D.V., Mickley L.J., Logan J.A., Hudman R.C., Yevich R., Flannigan M.D. und Westerling A.L. (2009): Impacts of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States.- In: *Journal of Geophysical Research* 114; online first: 20.10.2009, DOI: 10.1029/2008JD010966.
- Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Gobron N. und Dolman A.J. (2008): Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics.- In: *Global Biogeochemical Cycles* 22; online first 5.09.2008, DOI: 10.1029/2007GB003122.
- Van Wagtenonk J.W. (2007): The History and Evolution of Wildland Fire Use.- In: *Fire Ecology Special Issue* 3 (2), 3-17.
- Villarini G. und Smith J.A. (2013): Spatial and temporal variability of cloud-to-ground-lightning over the continental U.S. during the period 1995 – 2010.- In: *Atmospheric Research* 124, 137-148.
- Wastl C., Schunk C., Leuchner M., Pezzatti G.B. und Menzel A. (2012): Recent climate change: Long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps.- In: *Agricultural and Forest Meteorology* 162-163, 1-13.

- Westerling A.L., Hidalgo H.G., Cayan D.R. und Swetnam T.W. (2006): Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity.- In: Sciencemag 313, 940-943.
- Wimberly M.C. und Liu Z. (2013): Interactions of climate, fire, and management in future forests of the Pacific Northwest.- In: Forest Ecology and Management; online first: 17.10.2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.043>.

8.2 Onlinequellen

- Ainsworth, J. & T.A., Doss (1995): Natural History of Fire & Flood Cycles; unter: <http://www.coastal.ca.gov/fire/ucsbfire.html> (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- Auburn University (o.J.): Fire Behavior; unter: <https://fp.auburn.edu/fire/> (letzter Zugriff: 9.10.2013)
- Brightex (2012): Lightning Hot Zones; unter: <http://www.brightexlightning.com/lightning-info/lightning-hot-zones/> (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- Cal Fire (2013): Top 20 largest california wildfires; unter: http://www.fire.ca.gov/communications/downloads/fact_sheets/20LACRES.pdf (letzter Zugriff: 21.10.2013)
- Cone T. (2013): Yosemite Wildfire Started By Hunter's Illegal Fire, U.S. Forest Service Announces; online 5.9.2013; unter: http://www.huffingtonpost.com/2013/09/05/yosemite-wildfire-cause_n_3874394.html (letzter Zugriff: 20.10.2013)
- Ecological Society of America (ESA) (2002): Fire Ecology; unter: http://www.esa.org/education_diversity/pdfDocs/fireecology.pdf (letzter Zugriff: 24.07.2012)
- Emergency Management Australia (2000): Global Fire -A Message from the Global Fire Monitoring Center; unter: http://www.unisdr.org/2000/campaign/PDF/Articulo_1_Goldammer_eng.pdf (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- Feuerwehr Mainz (o.J.): Brandursachen; unter: <http://www.berufsfeuerwehr-mainz.de/brandursachen.pdf> (letzter Zugriff: 8.10.2013)
- Google Earth (2013); (letzter Zugriff: 03.09.2013)
- Interagency Fire Regime Condition Class (FRCC) Guidebook Version3.0 (2010); unter: http://www.fire.org/nifft/released/FRCC_Guidebook_2010_final.pdf (letzter Zugriff: 8.10.2013)
- King Hobart (o.J.): World Lightning Map; unter: <http://geology.com/articles/lightning-map.shtml>

- LANDFIRE (2008): Fire Regime Groups; unter: http://www.landfire.gov/geoareasmaps/CONUS/CONUS_FRG_c00.pdf (letzter Zugriff: 10.08.2013)
- Mignot, C. & P. Zbinden (2010): Rubrik und Fachgruppe Vorgehen im Einsatz. Wertvoller Wissens- und Erfahrungsaustausch; unter: <https://agv.picturepark.com/Website/Download.aspx?DownloadToken=b4f34a15-c83f-4521-b5d0-66dcc400d288&Purpose=AssetManager&mime-type=application/pdf> (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- N.N. (o.J.): Climate Change, Fire and Ecosystems in the U.S.; unter: <http://www.wilderness.net/toolboxes/documents/climate/Summary-Climate%20Change,%20Fire%20and%20Ecosystems%20in%20the%20US.pdf>; (letzter Zugriff: 18.10.2013)
- National Climatic Data Center (2013^b): NCDL Announces Warmest Year on Record for Contiguous U.S.; unter: <http://www.ncdc.noaa.gov/news/ncdc-announces-warmest-year-record-contiguous-us> (letzter Zugriff: 19.09.2013)
- National Interagency Fire Center (2013^a): Suppression Costs (1985 – 2012); unter: http://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_documents/SuppCosts.pdf (letzter Zugriff: 14.08.2013)
- Skinner C. N. (o.J.): Fire Regimes & Fuels; unter: <http://ucanr.org/sites/Prepostwildfire/files/2632.pdf> (letzter Zugriff: 8.10.2013)
- Stief, C. (2012): Slash and Burn Agriculture; unter: <http://geography.about.com/od/urbaneconomicgeography/a/slashburn.htm> (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- Unwetternetzwerk (o.J.): Physik eines Gewitters (Elektrizität); unter: <http://unwetternetzwerk.net/wordpress/archiv/physik-eines-gewitters-elektrizitat/> (letzter Zugriff: 7.10.2013)
- US Forest Service (2013): Administrative Forest Boundaries; unter: <http://usfs.maps.arcgis.com/home/> (letzter Zugriff: 16.10.2013)
- USDA Forest Service Southern Region (1989): Reasons For Prescribed Fire In Forest Resource Management; unter: <http://www.bugwood.org/pfire/reasons.html> (letzter Zugriff: 24.07.2013)
- Vaisala (2013): U.S. National Lightning Detection Network® (NLDN); unter: <http://www.vaisala.com/en/products/thunderstormandlightningdetectionsystems/Pages/NLDN.aspx> (letzter Zugriff: 15.10.2013)

8.3 Datenquellen

- Earth System Research Laboratory (2013^a): US Climate Division Data Set Mapping Page; unter: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/usclimdivs/> (letzter Zugriff: 19.09.2013)
- Earth System Research Laboratory (2013^b): Get Climate Division Boundaries; unter: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/usclimdivs/boundaries.html> (letzter Zugriff: 20.09.2013)
- National Climatic Data Center (2013^a): U.S. Climate Divisions; unter: <http://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/maps/us-climate-divisions.php> (letzter Zugriff: 19.09.2013)
- Wildfire Wildland Fire Information (2013): Federal Wildland Occurrence Data; unter: <http://wildfire.cr.usgs.gov/firehistory/data.html> (letzter Zugriff: 20.09.2013)

8.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abschätzung der jährlich und global gemittelten Energiebilanz der Erde (Quelle: IPCC, 2007 ^c : 4)	13
Abbildung 2: Änderung der gemittelten bodennahen Lufttemperatur der Nordhemisphäre in der letzten Jahrmilliarde, der letzten Jahrmillion, der letzten 100 00 Jahre, der letzten 10 000 Jahre und des letzten Jahrtausends (Quelle: Schönwiese, 2007: 247)	15
Abbildung 3: Beobachtete jährliche globale Durchschnittstemperatur (Quelle: IPCC, 2007 ^a : 253).....	17
Abbildung 4: Lineare globale Temperaturtrends 1979 – 2005 an der Erdoberfläche (links) und in der Troposphäre in 10 km Höhe (rechts) (Quelle: IPCC, 2007 ^a : 253).	17
Abbildung 5: Vergleich der beobachteten Änderungen der Erdoberflächentemperatur auf kontinentaler und globaler Skala mit den von Klimamodellen auf Grund natürlicher und anthropogener Antriebe berechneten Resultaten (Quelle: IPCC, 2007 ^b : 11).....	18
Abbildung 6: Trend der jährlichen Landniederschlagsmengen für den Zeitraum 1901 bis 2005 (oben, % pro Jahrhundert) und 1979 bis 2005 (unten, % pro Jahrzehnt) (Quelle: IPCC, 2007 ^a : 256).....	19
Abbildung 7: Multimodell-Mittel und geschätzte Bandbreiten für die Erwärmung an der Erdoberfläche (Quelle: IPCC, 2007 ^b : 14)	21
Abbildung 8: Modellprojektionen der Erdoberflächentemperatur (Quelle: IPCC, 2007 ^b : 15)	22

Abbildung 9: Projizierte Änderungsmuster der Niederschläge für den Zeitraum 2090-2099 im Vergleich zu 1980-1999 (Quelle: IPCC, 2007 ^b : 15)	23
Abbildung 10: Änderungen der Treibhausgase basierend auf Eisbohrkernen und modernen Daten (Quelle: IPCC ^b , 2007: 3)	26
Abbildung 11: Komponenten des Strahlungsantriebs (Quelle: IPCC ^b , 2007: 4).....	28
Abbildung 12: Weltweite Verteilung von Blitzen April 1995 – Februar 2003 (Quelle: Brightex, 2012).....	35
Abbildung 13: Brandbekämpfung in den USA 1985 – 2012 nach Flächen und Kosten (Datengrundlage: National Interagency Fire Center, 2013 ^a)	52
Abbildung 14: Brandbekämpfung in den USA 1985 – 2012 nach Flächen und Anzahl der Feuer (Datengrundlage: National Interagency Fire Center, 2013 ^a)	52
Abbildung 15: LANDFIRE Feuerregimeklassifikation (Quelle: LANDFIRE, 2008).....	56
Abbildung 16: „Wildfire“ Muster in den USA für die Jahre 1970 bis 2000 für die U.S. Forest Service „wildfire“, klassifiziert nach Ökoregion. (A) Verhältnis großer zu kleiner „wildfire“. Je dunkler die Farbe, desto höher die Anzahl großer Feuer. (B) Wiederkehrintervall von Feuer. Dunkelrot bedeutet „hohe Gefahr“, weiß bedeutet „geringe Gefahr“ (Quelle: SOMMERS et al., 2011: 40).....	58
Abbildung 17: Anteil wissenschaftlicher Artikel in Fachzeitschriften zur Ökologie mit Bezug zum Feuer für den Zeitraum 1970 bis 2006 (Quelle: Pausas und Keeley, 2009: 599).....	60
Abbildung 18: Karte der Klimatypen in Nordamerika (Quelle: Peel et al., 2007: 1639).....	67
Abbildung 19: Temperaturänderungen in Nordamerika für den Zeitraum 1906 – 2005 im Vergleich zum Zeitraum 1901 – 1950 (Quelle: IPCC, 2007 ^a : 11).....	68
Abbildung 20: Temperaturänderung zwischen 1993 und 2008 (links) bzw. 2010 und 2029 (rechts) im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1979.	69
Abbildung 21: Niederschlagsentwicklung in verschiedenen Regionen Nordamerikas. Die Säulen geben die Abweichungen in % vom langjährigen Mittel 1961 – 1990 an (Quelle: IPCC, 2007 ^a : 257)	69
Abbildung 22: Beobachtete Änderungen des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags für den Zeitraum 1958 bis 2008 (Quelle: Karl et al., 2009: 30)	70
Abbildung 23: (A) Brandhäufigkeit in den westlichen Wäldern der USA im Zeitraum 1970 – 2003 (schwarze Linie) und die jährliche Durchschnittstemperatur von März – August (rote Balken); (B) Zeitpunkt der Schneeschmelze; (C) Länge der Brandsaison (= Zeit zwischen dem	

ersten entdeckten und gemeldeten Brand und dem letzten Kontrollzeitpunkt) (Quelle: Westerling et al., 2006: 941).	72
Abbildung 24: Blitzeinschläge in den USA 1997 – 2010 (Quelle: Vaisala, 2013).....	73
Abbildung 25: Wolken-Boden-Blitze in den USA pro Monat im Zeitraum 2004-2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)	74
Abbildung 26: Durchschnittliche Blitzdichte im Januar in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)	74
Abbildung 27: Durchschnittliche Blitzdichte im Februar in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 2)	75
Abbildung 28: Durchschnittliche Blitzdichte im März in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3).....	75
Abbildung 29: Durchschnittliche Blitzdichte im April in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3).....	76
Abbildung 30: Durchschnittliche Blitzdichte im Mai in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 3).....	76
Abbildung 31: Durchschnittliche Blitzdichte im Juni in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4).....	77
Abbildung 32: Durchschnittliche Blitzdichte im Juli in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4).....	77
Abbildung 33: Durchschnittliche Blitzdichte im August in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 4)	78
Abbildung 34: Durchschnittliche Blitzdichte im September in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)	78
Abbildung 35: Durchschnittliche Blitzdichte im Oktober in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)	79
Abbildung 36: Durchschnittliche Blitzdichte im November in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)	79
Abbildung 37: Durchschnittliche Blitzdichte im Dezember in den USA (Blitz/km ² /Jahr) im Zeitraum 2004 bis 2008 (Quelle: Holle und Cummins, 2010: 5)	80
Abbildung 38: Vorkommen von Bränden in den USA im Zeitraum 1980 - 2012, die durch Blitze ausgelöst wurden (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013 ^b ; eigene Darstellung).....	84

Abbildung 39: Administrative Waldgrenzen in den USA (Quelle: US Forest Service, 2013)....	85
Abbildung 40: Anzahl der Brände in den Weststaaten der USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	85
Abbildung 41: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	86
Abbildung 42: Monatliche Verteilung der Brände in den USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	87
Abbildung 43: Entwicklung der saisonalen, jährlichen Anzahl an Bränden in den USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	87
Abbildung 44: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Januar, Februar und März in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	88
Abbildung 45: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten April, Mai und Juni in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	89
Abbildung 46: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Juli, August und September in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	90
Abbildung 47: Entwicklung der Anzahl an Bränden in den Monaten Oktober, November und Dezember in den USA 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	91
Abbildung 48: Jährlich verbrannte Fläche in den USA im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	93
Abbildung 49: Climate Divisions der USA (Quelle: National Climatic Data Center (2003))	94
Abbildung 50: Jährliche durchschnittliche Temperatur im Kernland der USA im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	98

Abbildung 51: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 98

Abbildung 52: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA im Frühling (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 99

Abbildung 53: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in den USA im Sommer (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 100

Abbildung 54: Entwicklung der jährliche Durchschnittstemperatur in den USA im Herbst (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 100

Abbildung 55: Entwicklung der jährliche Durchschnittstemperatur in den USA im Winter (rote Linie) und Abweichungen vom langjährigen Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 101

Abbildung 56: Langjähriger durchschnittlicher Niederschlag in den USA im Zeitraum 1980-2012 (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 102

Abbildung 57: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Gesamtniederschlags in den USA 1980 – 2012 (blaue Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 103

Abbildung 58: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Frühling (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 104

Abbildung 59: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Sommer (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 104

Abbildung 60: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Herbst (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	105
Abbildung 61: Entwicklung des jährlichem durchschnittlichen Gesamtniederschlags im Winter (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	106
Abbildung 62: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	108
Abbildung 63: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung) ...	109
Abbildung 64: Jährlich verbrannte Fläche in Kalifornien im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	109
Abbildung 65: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	110
Abbildung 66: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	110
Abbildung 67: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	111
Abbildung 68: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	112
Abbildung 69: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	112

Abbildung 70: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Sommer im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	113
Abbildung 71: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	114
Abbildung 72: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	114
Abbildung 73: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	115
Abbildung 74: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	116
Abbildung 75: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	116
Abbildung 76: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Winter im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	117
Abbildung 77: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	117
Abbildung 78: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	118

Abbildung 79: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	119
Abbildung 80: Jährlich verbrannte Fläche in Arizona im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	120
Abbildung 81: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	121
Abbildung 82: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	121
Abbildung 83: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Arizona im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	122
Abbildung 84: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	123
Abbildung 85: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	123
Abbildung 86: Entwicklung der jährlichen Anzahl von Bränden im Sommer in Arizona im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	124
Abbildung 87: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Arizona 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	125
Abbildung 88: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte	

Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	125
Abbildung 89: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	126
Abbildung 90: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	126
Abbildung 91: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Arizona 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	127
Abbildung 92: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Kalifornien im Winter im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	128
Abbildung 93: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	128
Abbildung 94: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	129
Abbildung 95: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie), langjähriges Mittel (schwarze Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	130
Abbildung 96: Jährlich verbrannte Fläche in Idaho im Zeitraum 1980 bis 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	131
Abbildung 97: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	132

Abbildung 98: Entwicklung des jährliche durchschnittlichen Niederschlags in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt zudem den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 132

Abbildung 99: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Frühling im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)..... 133

Abbildung 100: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Frühling in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 134

Abbildung 101: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Frühling in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 134

Abbildung 102: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Sommer im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)..... 135

Abbildung 103: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Sommer in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 136

Abbildung 104: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Sommer in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung) 136

Abbildung 105: Entwicklung der jährlichen Anzahl an Bränden in Idaho im Herbst im Zeitraum 1980 bis 2012 (rote Linie) und linearer Trend (gestrichelte Linie) (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)..... 137

Abbildung 106: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Herbst in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)..... 137

Abbildung 107: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Herbst in Kalifornien 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	138
Abbildung 108: Entwicklung der jährlichen Durchschnittstemperatur im Winter in Idaho 1980 – 2012 (rote Linie) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Temperaturentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	139
Abbildung 109: Entwicklung des jährlichen durchschnittlichen Niederschlags im Winter in Idaho 1980 – 2012 (blaue Balken) und langjähriges Mittel (schwarze Linie). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend der Niederschlagsentwicklung an (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	139
Abbildung 110: Prozentuale Änderungen verbrannter Flächen durch „wildfire“ im Westen der USA. Es werden die Änderungen zwischen dem Zeitraum 1980-2004 zum Zeitraum 2046-2055 dargestellt. NW = Pacific Northwest, CA = California Coastal Shrub, SW = Desert Southwest, NV = Nevada Mountains/Semi-Desert, RM = Rocky Mountain Forest, GP = Eastern Rocky Mountain/Great Plains (Quelle: Liu et al., 2013: 11)	149
Abbildung 111: Physikalische Prozesse von Bränden und deren Einfluss auf Wetter und Klima (Quelle: Liu et al., 2013: 2)	152

8.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: „Projizierte mittlere globale Erwärmung an der Erdoberfläche und Meeresspiegelanstieg am Ende des 21. Jahrhunderts“ (IPCC, 2007 ^b : 13) (Quelle: IPCC, 2007 ^b : 13).....	21
Tabelle 2: Temperaturen die in Feuern erreicht werden können (Datengrundlage: Goudie, 1993: 36).....	33
Tabelle 3: Durchschnittliche Anzahl an Bränden in den USA (Datengrundlage: Goudie, 1993: 34).....	35
Tabelle 4: Anzahl der „wildland fire use fires“ und verbrannte Fläche der Feuer der fünf Landmanagementbehörden für den Zeitraum 1998-2006 (Quelle: Van Wagtenonk, 2007: 12).....	49
Tabelle 5: Bundesstaatliche Feuerbekämpfungskosten 1985 – 2012 (Quelle: National Interagency Fire Center, 2013 ^a)	51

Tabelle 6: Erläuterung der Feuerregimegruppen (Quelle: Interagency Fire Regime Condition Class (FRCC) Guidebook Version3.0 (2010) und Skinner (o.J.); eigene Darstellung)	57
Tabelle 7: Beschreibung der Köppen Klimasymbole und die dazugehörigen Kriterien. (Quelle: Peel et al., 2007: 1636).....	67
Tabelle 8: Auswahl an Attributen der Branddaten und deren Beschreibung (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung).....	81
Tabelle 9: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	86
Tabelle 10: Absolute und prozentuale, saisonale Anzahl an Bränden in den USA 1980 – 2012 (Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	87
Tabelle 11: Absolute und prozentual Anzahl an Bränden nach Größenklassen in den USA 1980 - 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; eigene Darstellung)	92
Tabelle 12: Absolut und prozentual Anzahl an verbrannter Fläche in den USA 1980 - 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	93
Tabelle 13: Die drei wärmsten und kühlestn Jahre im Zeitraum 1980 – 2012 nach Jahreszeit. (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	101
Tabelle 14: Die drei „feuchtesten“ und „trockensten“ Jahre im Zeitraum 1980 – 2012 nach Jahreszeit. (Datengrundlage: Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	106
Tabelle 15: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	108
Tabelle 16: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Kalifornien im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	111
Tabelle 17: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	112

Tabelle 18: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	114
Tabelle 19: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	116
Tabelle 20: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Kalifornien (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	118
Tabelle 21: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Arizona im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	120
Tabelle 22: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Arizona im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	122
Tabelle 23: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	123
Tabelle 24: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	125
Tabelle 25: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	127
Tabelle 26: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Arizona (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	129
Tabelle 27: Absolute und prozentuale Anzahl an Bränden, Durchschnittstemperatur und Niederschlag in Idaho im Zeitraum 1980 – 2012 (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013 und Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	131
Tabelle 28: Saisonale, absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag in Idaho im Zeitraum 1980 – 2012	

(Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung).....	133
Tabelle 29: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Frühling in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	134
Tabelle 30: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Sommer in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	136
Tabelle 31: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Herbst in Idaho in (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	138
Tabelle 32: Absolute und prozentuale Anzahl der Brände, Durchschnittstemperatur und mittlerer Niederschlag im Winter in Idaho (Datengrundlage: Wildfire Wildland Fire Information, 2013; Earth System Research Laboratory, 2013; eigene Darstellung)	139
Tabelle 33: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Kalifornien.....	144
Tabelle 34: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Arizona	145
Tabelle 35: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Idaho	146
Tabelle 36: Emissionen von Feuern. „Mass“ = Gramm pro Emission/Kilogramm des verbrannten Brennmaterials; d = Partikeldurchmesser (Quelle: Liu et al., 2013: 2).....	151

Anhang

ABSTRACT

Feuer ist ein globales Phänomen, dessen Nutzen bereits seit der Altsteinzeit bekannt ist. Es beeinflusst globale Ökosystemmuster und –prozesse, Vegetationszusammensetzung und –verteilung, den Kohlenstoffkreislauf und nicht zuletzt das Klima. Das Klima wiederum beeinflusst seinerseits die geographische Verteilung von Bränden und die Brandaktivität. In den Wäldern der USA stellt Feuer einen der größten Störfaktoren dar. Die Struktur und Zusammensetzung von Wäldern werden durch sogenannte Feuerregime beeinflusst. Diese werden wiederum durch anthropogene Eingriffe und Umweltveränderungen geprägt. Brände, obgleich natürlichen oder anthropogenen Ursprungs, können sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben. In Ökosystemen spielen Brände oft eine wichtige ökologische Rolle, indem sie biogeochemische Kreisläufe aufrechterhalten und die Biodiversität fördern. Sie können auch destruktive Auswirkungen haben (z.B. Biodiversitätsverlust und Degradation). Brände werden in erster Linie durch Menschen verursacht. Zu den wichtigsten natürlichen Auslösern gehören Blitze. In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss von Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf Brände, die durch Blitze verursacht wurden, im Kernland der USA untersucht. Zwischen 1980 und 2012 konnte ein genereller Anstieg der Brandhäufigkeit und der dadurch verbrannten Flächen festgestellt werden. Von verschiedenen Autoren wird selbst unter moderaten Klimawandelszenarien eine Zunahme der Brandaktivität bis zum Ende des 21. Jahrhunderts prognostiziert. Die Brandaktivität ist zudem einer starken zeitlichen und räumlichen Variabilität unterlegen.

Fire is a global phenomenon, which is being used since the Old Stone Age. It affects global ecosystem patterns and processes, the composition and distribution of vegetation, the carbon cycle and the climate. The climate itself affects the distribution of fire and fire activity. Fire is one of the major disturbing factors in the United States forests. Forest structure and composition is determined by fire regimes, which are influenced by human actions and environmental change. Fires have positive or negative effects. In some ecosystems fires play an important ecological role by maintaining biogeochemical cycles and stimulating the biodiversity. In other ecosystems fires can be destructive (e.g. diversity loss or degradation). Fires are primarily caused by humans. The major natural cause of fire is lightning. This master thesis examines the influence of temperature and precipitation change in the conterminous USA on lightning fire. Between 1980 and 2012 there was a general increase of lightning fires and areas burned in the USA. In addition, different studies project a further increase of fire activity by the end of the 21st century even under moderate climate scenarios. Furthermore there is a strong temporal and spatial variability of fire activity.

CURRICULUM VITAE

Zur Person

Name	Jürgen Homm
Nationalität	Deutsch
Kontakt	juergen.homm@gmx.net

Schulische Ausbildung / Studium

1996-2006	St. Anna Gymnasium in München
Jun 2006	Abitur am St. Anna Gymnasium in München
Okt 2007-Mär 2011	Bachelorstudium Geographie an der Universität Wien
Sep 2011	Bachelorabschluss (B.Sc.) in Geographie an der Universität Wien
Okt 2011 – Nov 2013	Masterstudium in Physischer Geographie an der Universität Wien

Berufliche Erfahrung

Okt 2006 - Jul 2007	Aushilfstätigkeit als Hauswart im Hotel Admiral, München
Sep 2011	Praktikum bei Green City e.V., München
Apr 2012 und Mär 2013	Eventmitarbeiter beim Basketball Osterturnier, Wien

Auslandaufenthalt

Aug - Sep 2007	Kultur- und Sprachaufenthalt in den USA
Jul - Aug 2010	Studienexkursion in British Columbia, Kanada
Apr - Jul 2011	Kulturaufenthalt in Thailand, Vietnam und Malaysia
Aug 2012	Studienexkursion in Rumänien

Sprachkenntnisse

Deutsch	Muttersprache
Englisch	fließend in Wort und Schrift
Französisch	Grundkenntnisse

EDV-Kenntnisse:

Sehr gute Kenntnisse	Microsoft Word, Excel, Powerpoint, Expression; Esri ArcGis
Grundkenntnisse	Erdas Imagine, TNTmips, ILWIS, Quantum GIS, SAGA GIS, Cinema4d, Google Sketch Up, SPSS, Adobe Photoshop, HTML, CSS, Adobe Director, Morph Age Pro, Omni Suite Pro, Pano2VR