



Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Masterarbeit

Untersuchung von Brandereignissen in der
österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und
Recyclingwirtschaft im Zuge eines
langfristigen Monitorings

Florentin Artner, BSc

September 2022



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Leoben, am 30.08.2022

Florentin Artner, BSc
01602733

DANKSAGUNG

Mein Dank gebührt jenen, die mir durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben. Bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Nigl bedanke ich mich für die Ermöglichung, sowie insbesondere für die fortlaufende Betreuung und das eingebrachte Fachwissen während der gesamten Erarbeitung dieser Masterarbeit. Des Weiteren danke ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger nicht nur für die Genehmigung zur Erarbeitung dieser Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, sondern im Speziellen für die gedankenreichen Vorträge im Laufe der absolvierten Lehrveranstaltungen an der Montanuniversität Leoben.

Kurzfassung

Untersuchung von Brandfällen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im Zuge eines langfristigen Monitorings

Die österreichische Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft hat eine starke Zunahme an Brandfällen zu verzeichnen. Grund dafür sind unter anderem Veränderungen in der Komposition von abfallwirtschaftlichen Schüttungen, insbesondere von Siedlungsabfällen. Auch Fehlwürfe, wie etwa Batterien in Restmülltonnen, sind zunehmend Auslöser für derartige Zwischenfälle. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde daher die Entwicklung der Brandfälle in der österreichischen Abfallwirtschaft sowie deren Ursachen untersucht. Dafür wurden entsprechende Ereignisse der Branche, die im Zeitraum von November 2019 bis Oktober 2020 auftraten, aus öffentlich verfügbaren Quellen erhoben. Auswertungen der erhobenen Brandfälle wurden für Fraktionen und Aggregate aber auch nach Regionen durchgeführt. Selbstentzündungen, also Brandfälle, die durch eine spontane Selbsterhitzung der abfallwirtschaftlichen Schüttung ausgelöst werden, wurden dabei eigenständig betrachtet und ihr Charakter bezüglich des zeitlichen und saisonalen Auftretens analysiert. Das Auftreten von Brandfällen ist ursachenübergreifend in wärmeren Monaten signifikant höher und, vice versa, in den kälteren Monaten signifikant niedriger. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde festgestellt, dass diese Erkenntnis auf Selbstentzündungen von abfallwirtschaftlichen Schüttungen nicht beziehungsweise nur bedingt zutrifft, da aufgrund der für diese Masterarbeit herangezogenen Daten erkannt wurde, dass diese in ihrem saisonalen Auftreten nicht signifikant voneinander abweichen.

Abstract

Investigation of fire incidents in the Austrian waste and recycling industry during long-term monitoring

The Austrian waste, disposal and recycling industry has seen a sharp increase in fire incidents over the past years. The reasons for this include changes in the composition of waste, especially municipal waste. Incorrectly disposed waste fractions, such as batteries in residual waste bins, are also increasingly triggering such events. Within the scope of this master thesis, the development of fire incidents in the Austrian waste management sector and their causes were therefore investigated. For this purpose, incidents in the relevant sector that occurred in the period from November 2019 to October 2020 were collected from publicly available sources. Data of the collected fire cases were evaluated by fractions, aggregates but also by region. Spontaneous ignitions of waste fractions were explicitly considered, and their character was analysed in terms of temporal and seasonal occurrence. Among other perceptions, it was found that the occurrence of fire incidents is significantly higher in warmer months and, vice versa, significantly lower in colder months. This does not apply to spontaneous combustion, or only to a limited extent, since it was determined based on the data used for this master's thesis that spontaneous combustion does not differ significantly in its seasonal occurrence.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	2
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	4
2 GRUNDLAGENTEIL.....	6
2.1 Ausgangssituation.....	6
2.2 Selbstentzündung abfallwirtschaftlicher Schüttgüter	8
2.2.1 Wärmetechnische Aspekte der Selbstentzündung	8
3 METHODIK.....	11
3.1 Erhebung von Brandereignissen.....	11
3.2 Analyse der Einflussparameter von AbER-Selbstentzündungen	12
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	20
4.1 Ergebnisse aus der Erhebung von AbER-Brandfällen	20
4.2 Ergebnisse der Ursachenermittlung von Selbstentzündungen	28
4.3 Diskussion der Ergebnisse	40
4.3.1 Diskussion zur Erhebung von AbER-Brandfällen 2019/20.....	40
4.3.2 Diskussion zur Ursachenermittlung von Selbstentzündungen	44
4.3.3 Betrachtung historischer Selbstentzündungsdaten.....	48
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	56
6 VERZEICHNISSE	58
6.1 Literatur.....	58
6.2 Abkürzungsverzeichnis	59
6.3 Tabellen	61
6.4 Abbildungen	62
ANHANG.....	I

1 Einleitung

In Österreich kommt es in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft, in weiterer Folge auch abgekürzt AbER, über die Jahre hinweg betrachtet zu einem deutlichen Anstieg der Brandfälle. Die Entwicklung ist allerdings kein regionales Phänomen, vielmehr sehen sich sämtliche Staaten und Regionen, die in der Aufbereitung von Abfällen einen hohen Standard verfolgen, mit der Veränderung im Brandverhalten von Abfällen und steigenden Brandzahlen konfrontiert und haben so unter anderem massive Investitionen in Brandschutz-Infrastrukturen zu tätigen, um der Entwicklung sowie der daraus resultierenden Schadensentwicklung entgegenzuwirken (Nigl et al. 2020). Neben den wirtschaftlichen Folgen kommt es bei Bränden abfallwirtschaftlicher Schüttungen aber auch zur Emission von umweltschädigenden Brandgasen in die Atmosphäre. Die Zusammensetzung der Gase kann je nach abgelagertem Material stark variieren. So können neben den typischen Verbrennungsprodukten CO₂, CO und H₂O auch Produkte einer unvollständigen Verbrennung, wie anorganische Säuren oder FCKW, freigesetzt werden (Schoßig et al. 2010).

Faktisch ist diese steigende Brandstatistik zumindest in Österreich nicht zwingend auf einen Anstieg der Abfallmassen zurückzuführen, sondern scheint ein Resultat der Veränderung der Zusammensetzung der verschiedenen Fraktionen zu sein. Bei Betrachtung der in Österreich aufgezeichneten Abfallströme fallen in Summe etwa 71,26 Mio. t. Abfall an, wovon 68,44 Mio. t. Primärabfälle sind, und 2,82 Mio. t. auf Sekundärabfälle entfallen, die aus der Behandlung von Primärabfällen, wie der Asche aus der Abfallverbrennung, resultieren. Zwar ist das Aufkommen der Primärabfälle von 57,10 Mio. t. im Jahr 2015 auf 68,44 Mio. t. im Jahr 2019, also um 20 %, gestiegen (BMK 2021). Jedoch ist zu berücksichtigen, dass dieser Zuwachs hauptsächlich aus den zunehmenden Mengen an Bodenaushubmaterialien und Baurestmassen resultiert. Siedlungsabfälle, also dem Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) zufolge Abfälle aus privaten Haushalten und andere Abfälle, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder Zusammensetzung den Abfällen aus privaten Haushalten ähnlich sind, schlagen in Österreich jährlich mit etwa 4,5 Millionen Tonnen zu Buche. Das relative Abfallaufkommen in Österreich ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Abfallaufkommen in Österreich nach Fraktionen (BMK 2021).

Abhängig ist das Aufkommen an Siedlungsabfall sowie die Zusammensetzung von den unterschiedlichen Faktoren wie Abfallsammelsystemen, Tourismus oder Zweitwohnsitzen (BMK 2021). Diese Betrachtung lässt vermuten, dass der Anstieg an Brandfällen in der Abfallwirtschaft, wie erwähnt, nur bedingt der Zunahme des absoluten Aufkommens zuzuschreiben ist. Eher müssen andere Faktoren, wie eine sich verändernde Zusammensetzung des Abfalls, und weitere Größen für die zunehmenden Brandfälle untersucht werden. Insbesondere haben Batterien in den letzten Jahren in der Abfallwirtschaftsbranche eine neue Gefahrenquelle dargestellt. Dies liegt sowohl an den steigenden Zahlen an batteriebetriebenen Geräten sowie an der Verwendung von Hochenergiebatterien auf Lithiumbasis. Von der Inverkehrsetzung bis zur Behandlung oder dem Recycling von Batterien wird das Risiko von Brandfällen weiter ansteigen (Nigl et al. 2019).

Aufgrund der Relevanz, welche das Thema mittlerweile erlangt hat, wurde im Rahmen der Erarbeitung dieser Masterarbeit das Monitoring von Brandfällen der österreichischen Abfallwirtschaft nach der später vorgestellten Methodik von Nigl et al. (2019/20) weiterbetrieben, um diese anschließend hinsichtlich verschiedener Parameter, wie etwa nach am Brand beteiligten Fraktionen, auszuwerten. Konkret wurden Brandfälle der AbER, welche im Zeitraum zwischen November 2019 und Oktober 2020 angefallen sind, erhoben und ausgewertet. Darüber hinaus wurden im Zuge einer eigenständigen Problemstellung Selbstentzündungen hinsichtlich ihrer Entstehungsursache untersucht. Diese zweite Problemstellung gründet auf den von Nigl et al. (2020) gewonnenen Erkenntnissen und der daraus aufgestellten Hypothese, nach der Niederschlagsereignisse gefolgt von einer Wärmephase die Wahrscheinlichkeit von Selbstentzündung in abfallwirtschaftlichen Schüttgütern erhöhen. Im folgenden Abschnitt werden die Problemstellungen genauer vorgestellt.

1.1 Problemstellung

Bei der Betrachtung von Brandfällen in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft, die in 12-Monats-Intervallen am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft an der Montanuniversität Leoben erhoben wurden, ist ein eindeutig erkennbarer Anstieg der Brandstatistik gemäß Abbildung 2 festzustellen. Im Rahmen der schon einleitend erwähnten Publikation von Nigl et al. (2019/2020) wurden Brandfälle der AbER aus unterschiedlichen Informationsquellen aufgezeichnet. Von Interesse war dabei die Ursachenergründung der einzelnen Brandereignisse der Branche, also aufgrund welcher Einflüsse diese zustande kamen. Daher gilt es im Zuge der Masterarbeit zwei unterschiedliche Problemstellungen zu analysieren. Einerseits werden mittels der von Nigl et al. (2019/2020) erarbeiteten Methode Brandfälle in der Abfallwirtschaftsbranche für den Zeitraum 2019/2020, genauer November 2019 bis Oktober 2020, erhoben und ausgewertet. Zum anderen wird an der Identifizierung der Einflussgrößen im Bereich von Selbstentzündungen gearbeitet. In der von Nigl et al. (2020) veröffentlichten Publikation konnte eine Brandsaison in den Monaten von März bis September festgestellt werden, welche durch die sommerbedingten Niederschlags- und Temperaturmaxima und der daraus folgenden höheren mikrobiellen Aktivität und

Selbsterwärmung erklärt werden könnte. Im Lichte dieser Feststellungen wurde die betreffend der Wärme- und Niederschlagsquantität nicht näher definierte Hypothese formuliert, wonach Niederschlagsereignisse gefolgt von einer Wärmephase die Wahrscheinlichkeit von Selbstentzündungen in abfallwirtschaftlichen Schüttgütern erhöhen. Daraus folgt unmittelbar die zweite zu erarbeitende Problemstellung, die Identifizierung von saisonalen Einflussfaktoren auf Selbstentzündungen abfallwirtschaftlicher Schüttungen.

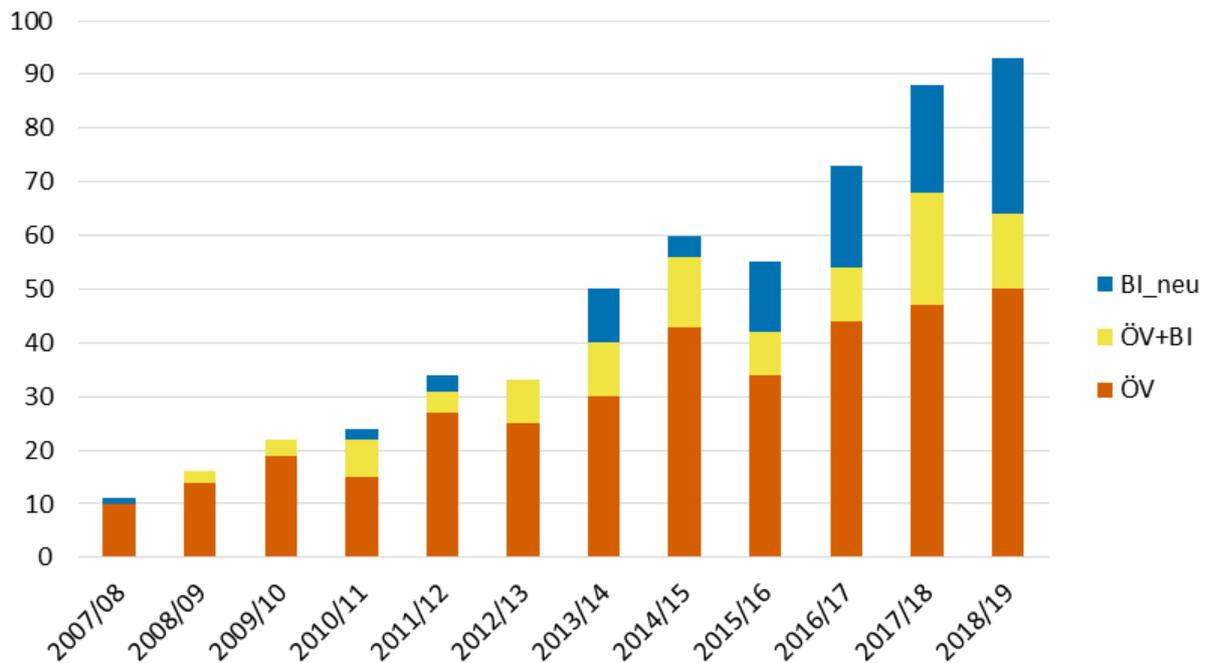


Abbildung 2: Zeitliche Verteilung von Brandereignissen durch Erhebung aus öffentlichen (ÖV) und betriebsinternen (BI) Quellen (Nigl et al. 2020).

Die aus den Problemstellungen definierten Ziele, die es im Rahmen dieser Arbeit zu erreichen gilt, sind im nächsten Abschnitt dargelegt.

1.2 Zielsetzung

Entsprechend der zwei eben vorgestellten Problemstellungen werden zuerst Brandfälle der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im Zeitraum November 2019 bis Oktober 2020, in weiterer Folge und sofern nicht näher beschrieben „Erhebungszeitraum“, erfasst und anschließend hinsichtlich entzündeter Fraktionen, Brandursachen, betroffener Aggregate und weiteren relevanten Größen sowie aufbauend auf der aus der bereits oben vorgebrachten Literatur bekannten Methodik ausgewertet. Dies soll zum einen dazu dienen, die Ursachen für Brandfälle im Erhebungszeitraum festzustellen und weitere Auswertungen, etwa nach entzündeten Fraktionen, anzustellen. Andererseits ist von Interesse, ob der oben vorgestellte Trend der sukzessiv steigenden Brandstatistik im Erhebungszeitraum fortgesetzt wird.

Die zweite Problemstellung umfasst die Analyse von Selbstentzündungen hinsichtlich ihrer Ursacheneinstehung. Ziel ist hierbei festzustellen, inwieweit wetterbedingte oder andere Einflussgrößen das zu erwartende Eintreten von Selbstentzündungen beeinflussen. Als Datengrundlage dienen dabei vom Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik- und

Abfallwirtschaft (AVAW) erhobene Selbstentzündungsereignisse. Gründe für mögliche wetterbedingte Einflüsse auf AbER-Brandereignissen werden im Theorieteil vorgestellt. Zur Erreichung der Zielsetzung dieser Masterarbeit wird der in Abbildung 3 dargestellte Prozessablauf gewählt.

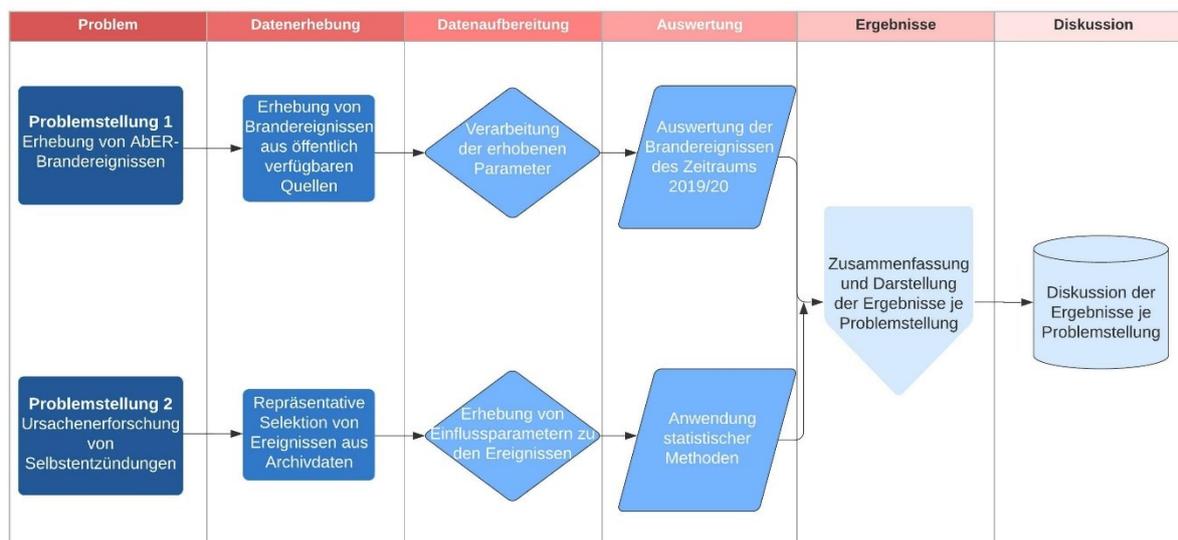


Abbildung 3: Workflow der Masterarbeit in grafischer Darstellung.

Nach der Auswertung werden die Ergebnisse je Problemstellung zusammengefasst und diskutiert. Zur Einführung in die Thematik folgt im nächsten Kapitel der Grundlagenteil dieser Arbeit.

2 Grundlagenteil

In Kapitel 2 wird die Problematik von Brandfällen in der Abfallwirtschaft vorgestellt und eine Einführung in theoretische Grundlagen gegeben, welche die Ausgangslage für die Erarbeitung dieser wissenschaftlichen Arbeit und Basis für die Diskussion der Ergebnisse des praktischen Teils sind.

2.1 Ausgangssituation

Brände in Abfallentsorgungsanlagen stellen ein erhebliches soziales, wirtschaftliches und ökologisches Problem dar und betreffen somit alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Mikalsen et al. 2021). Maßnahmen für die brandschutzgerechte Gestaltung von Anlagen, den Betrieb, die Abfallbehandlung und -lagerung sowie Maßnahmen zur Begrenzung der Folgen für die Umwelt und die Anlage während und nach einem Brand sind notwendig, um die Risiken in den drei angeführten Dimensionen zu minimieren (Mikalsen et al. 2021).

Obwohl das Bewusstsein für Brände in Abfallentsorgungsanlagen und deren Folgen in den letzten Jahren gestiegen ist, gibt es nach wie vor erhebliche Probleme beim Brandschutz. Zu den üblichen Ursachen für Brandfälle gehören unter anderem Selbstentzündung, thermisches Durchgehen von Batterien, Reibung, technische oder elektrische Gebrechen und ungünstige Kombinationen verschiedener Fraktionen bei der Lagerung (Mikalsen et al. 2021).

Nigl et al. (2019) untersuchten Brandfälle in Betrieben der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft. Aus den von Nigl et al. (2019) in Summe 285 ausgewerteten Brandfällen, welche der AbER-Branche zuzurechnen sind, entfielen knapp 38 % auf Lagerflächen, gefolgt von Transportaggregaten (23 %) und Abfallbehältern (16 %). Bei der Betrachtung von Behandlungsanlagen wurde festgestellt, dass Brände am ehesten in Shreddern auftraten. Der Großteil der die Brände verursachenden Fraktionen konnte nicht näher bestimmt werden, allerdings hatte Siedlungsabfall mit etwa 14 % einen beachtlichen Anteil (Nigl et al. 2019). Grund für den hohen Anteil an Restmüll oder Siedlungsabfall an AbER-Brandentstehungen ist die heterogene Zusammensetzung der Fraktionen und die damit verbundene vermehrte Anwesenheit potenzieller Zündquellen (Mikalsen et al. 2021). Dies ist im Übrigen länderübergreifend der Fall. Die Fraktionen, die sich etwa in Schweden am häufigsten entzünden, sind Restmüll und Shredderleichtfraktionen. Die für Norwegen erhobenen und ausgewerteten Daten ergaben ein ähnliches Bild. So sind sowohl in Schweden als auch in Norwegen Selbstentzündung, menschliches Versagen und elektrische Defekte als häufigste Ursachen für Brände in der Abfallwirtschaft angeführt (Mikalsen et al. 2021). In 18,8 % der Fälle wurde in der Publikation von Nigl et al. (2020) Selbstentzündung als Ursache für die beobachteten Brandfälle genannt, bei 56,9 % sind es jedoch unbekannte Brandursachen. Ebenfalls war die Brandursache der erhobenen Fälle in den skandinavischen Ländern zu einem großen Teil unbekannt. Sowohl in Schweden als auch in Norwegen wurde seitens der Befragten – die Datenerhebung erfolgte unter anderem über Fragebögen, die an Betriebe der skandinavischen Abfallwirtschaft ausgehändigt wurden – die zunehmende Bedeutung bzw. Problematik von Bränden verschiedener Batteriefraktionen genannt. Als Hauptproblem wurden dabei falsch entsorgte Batterien, die im Restmüll oder

Papierabfall landeten und in weiterer Folge mechanisch beschädigt wurden, identifiziert. Ungünstige oder falsche Lagerung betraf laut jener Erhebung allerdings nicht nur Batterien. Auch Zündquellen, die in unmittelbarer Nähe von brennbaren Stoffen gelagert waren, stellten sich als Brandverursacher heraus. Die Örtlichkeiten, an denen die in Schweden erhobenen Brandfälle auftraten, waren meistens Lager im Freien, gefolgt von Aufbereitungsanlagen. Bei den Brandfällen im Freien wurde Selbsterhitzung als häufigste Brandursache genannt, gefolgt von als unbekannt deklarierten Ursachen. Im Übrigen konnte festgestellt werden, dass der Zeitpunkt der meisten Brände von der Art des Abfalls und der Art und Weise, welche Prozessstufen der Abfall erfährt, abhängt. Hervorzuheben ist, dass aus jener Studie von unterschiedlichen Unternehmen drei völlig verschiedene Thesen zur Brandentstehung ins Treffen geführt wurden. Einige Abfallentsorgungsunternehmen wiesen darauf hin, dass die meisten Brände im Winter auftraten, wenn es zu großen Gradienten zwischen der Temperatur der Fraktion und der Umgebungstemperatur kommt. Andere Vertreter der von Bränden betroffenen Unternehmen in Schweden und Norwegen erkannten, dass derartige Ereignisse in jenen Monaten auftraten, die von hohen Temperaturen und starkem Wind gekennzeichnet waren. Nigl et al. (2019) stellten in Analogie dazu fest, dass die Anzahl der in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft je Monat aufgetretenen Brände mit der monatlichen Durchschnittstemperatur sowie dem Durchschnittsniederschlag korreliert, was auf das vermehrte Auftreten von Bränden in warmen und regnerischen Sommermonaten hindeuten würde. Jener Verlauf wird in Abbildung 4 dargestellt. Die unterdurchschnittliche Anzahl an Bränden in den Monaten von September bis Februar scheinen diese Beobachtung zumindest auf den ersten Blick zu unterstreichen.

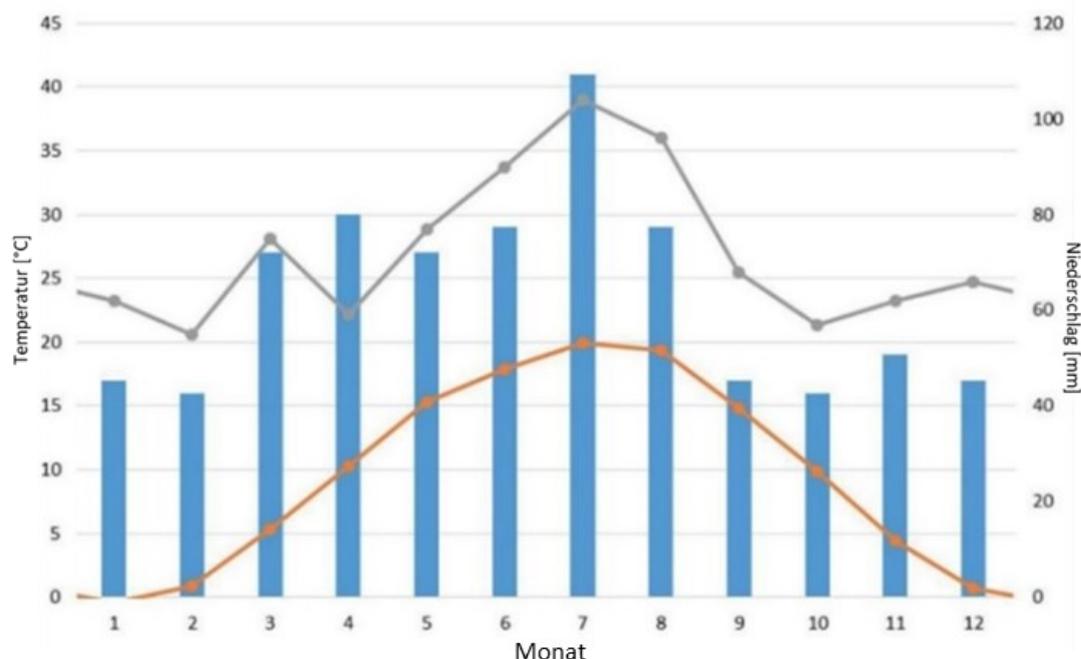


Abbildung 4: Verlauf von AbER-Brandereignissen mit Temperatur- und Niederschlagskurven (Nigl et al. 2019).

Wiederum andere Unternehmen zeichneten vermehrt Brände im Frühjahr auf, wenn in den Recyclinganlagen insbesondere Gartenabfälle anfallen. Zusammenfassend kann die

Ähnlichkeit der Situation in Schweden und Norwegen festgehalten werden. In Schweden tritt durchschnittlich mehr als ein Brand pro Woche in Abfallentsorgungsanlagen auf, der den Einsatz von Feuerwehren oder Rettungen notwendig macht (Mikalsen et al. 2021). Die eben vorgestellte Brandursache Selbstentzündung wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

2.2 Selbstentzündung abfallwirtschaftlicher Schüttgüter

Wie zuvor umfänglich beschrieben, stellen sich Selbstentzündungen als häufige Brandursache abfallwirtschaftlicher Güter heraus. Die Selbstentzündung eines Stoffes ist ein Vorgang langsamer Oxidation. Ein Material, das ihn erfährt, kann als Zündquelle wirken und einen Brand oder eine Explosion auslösen. Dies geschieht dann, wenn die Wärmeabfuhr aus dem Stoff geringer als die Wärmeproduktion durch den Vorgang der Oxidation ist. Die Selbstentzündungstemperatur ist dementsprechend jene Temperatur, bei der Wärmeproduktion und -abfuhr gleich sind und bei der ein weiterer Temperaturanstieg zur Selbstentzündung führt (Hauptmanns 2020). Aus den einleitend erwähnten Studien zu Brandfällen in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft wurde Selbstentzündung als häufiger Grund genannt. Konkret entstehen seit einigen Jahren vermehrt Brände entlang der gesamten Wertschöpfungskette bei der Aufbereitung von Abfällen. Fraktionsübergreifend brennen sowohl Sammelbehälter und Fahrzeuge als auch Lager und Anlagen. In Deutschland fanden im Jahr 2019 beispielsweise drei der zehn größten Brände in der Abfallwirtschaft statt (Schmidt 2020). Aus Nordamerika und England wird von ähnlichen Vorkommnissen berichtet und in der Steiermark kam es durch Brände in der Branche zwischen 2014 und 2019 zu Brandschäden von rund € 30 Mio. beziehungsweise $30 \frac{\text{€}}{t. \text{ Restmüll}}$ bei Bezug auf die entsprechende Fraktion. Einer Studie der Montanuniversität Leoben zufolge beträgt die Anzahl an Lithiumbatterien im Rest- und Gewerbemüll jährlich 1,4 Mio. Stück (Nigl & Pomberger 2018).

Insbesondere sind bei der Selbstentzündung wärmetechnische Aspekte zu berücksichtigen, weswegen in diesem Abschnitt Einflussgrößen auf die Selbstentzündung abfallwirtschaftlicher Schüttgüter erläutert und deren Einfluss auf die Brandentstehung diskutiert werden.

2.2.1 Wärmetechnische Aspekte der Selbstentzündung

Charakteristisch für Selbstentzündungen bei der Lagerung von Schüttgütern, etwa von Recyclingmaterial oder deponierten Abfällen, ist, dass meist große Mengen an Material betroffen sind, die erst nach langer Induktionszeit eine Selbstentzündung hervorrufen. Da die im Inneren auftretenden Temperaturgradienten von außen nicht messbar sind und auch Brandgase erst im fortgeschrittenen Stadium austreten, ist eine Früherkennung nur begrenzt realisierbar (Schoßig et al. 2010). Unter einer Verbrennung kann die selbsterhaltende, exotherme Reaktion zwischen Brennstoff und Oxidationsmittel verstanden werden, während eine Zündung als ein schneller Übergangsprozess bezeichnet wird, durch den eine exotherme Oxidationsreaktion und eine selbstunterstützte Verbrennung eingeleitet wird (Moqbel et al. 2010).

Die für Selbstentzündungen relevanten Parameter lassen sich in drei Gruppen gliedern:

- 1.) Materialeigenschaften des Schüttgutes wie Porosität, Partikelgröße, spezifische Oberfläche und chemische Struktur,
- 2.) Geometrie der Schüttung, also das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche (V/A), und
- 3.) Umgebungsbedingungen, wie Lagerungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sauerstoffvolumenanteil und Luftbewegungen (Lohrer et al. 2005).

Bereits bei geringen Temperaturen kann es zur Selbstentzündung kommen, da langsame Oxidationsreaktionen mit Luftsauerstoff an den Partikeloberflächen schon bei Raumtemperatur auftreten und in weiterer Folge Wärme freisetzen (Schoßig et al. 2010). Die Oxidationsrate steigt allerdings mit zunehmender Umgebungstemperatur, sodass entsprechend der Arrhenius-Beziehung eine höhere Wärmeentwicklung stattfindet. Das Vorhandensein von Wärme, Sauerstoff und Brennstoff schafft die notwendigen Bestandteile einer Entzündung. Wenn die Wärme nicht effizient abgeführt wird, steigt die Temperatur in der Schüttung so an, dass die Selbstentzündungstemperatur überschritten und ein Brand ausgelöst wird (Moqbel et al. 2010). Der Wärmeproduktion solcher chemischen Reaktionen steht der Wärmeverlust über der Oberfläche der Schüttung entgegen, die von den Schütteeigenschaften abhängt. Diese Charakterisierung erfolgt etwa über das Verhältnis aus Volumen zu Oberfläche, den physiko-chemischen Größen Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Schüttdichte, sowie anhand der Umgebungstemperatur. Für derartige Schüttungen können zwei Zustände festgelegt werden:

- Die Wärmeproduktion innerhalb der Schüttung ist geringer als die Rate der Wärmeabfuhr nach außen, die Schüttung wird thermisch unkritisch bleiben, oder
- die Wärmeproduktionsrate innerhalb der Schüttung ist größer als die Abfuhrate aus der Schüttung, sodass die Temperatur innerhalb der Schüttung exponentiell ansteigt und schließlich zu ihrer Entzündung führt (Schoßig et al. 2010).

Moqbel et al. stellten in diesem Zusammenhang im Rahmen einer Reihe von Laborexperimenten fest, dass Selbstentzündungen durch feste Materialien mit geringer Selbstentzündungstemperatur ausgelöst werden. Für die Versuche wurde ein programmierbarer Ofen verwendet, sodass die Umgebungstemperatur in der Ofenkammer sukzessive – bis über die Entzündungstemperatur hinaus und mit einer Geschwindigkeit von $\frac{3^\circ\text{C}}{\text{min}}$ – erhöht wurde. Um den Einfluss der Feuchtigkeit zunächst auszuschließen, wurde das für die Experimente verwendete Probematerial getrocknet. Dabei spielt die bei chemischen Oxidationen erzeugte Wärme eine wesentliche Rolle. Korrelationen zwischen dem spezifischen Gewicht und der Selbsterhitzung wurden festgestellt, wenngleich auch andere, nicht quantifizierbare Parameter einen Einfluss zu haben schienen. Daraus wurde abgeleitet, dass die Verdichtung bei der Lagerung von Schüttungen sinnvoll ist, da dichte Materialien mehr Energie benötigen, um eine höhere Temperatur anzunehmen und Sauerstoff zugänglich zu machen (Moqbel et al. 2010). Des Weiteren wurde festgestellt, dass Feuchtigkeit die chemische Selbsterhitzung fördert, da ein höherer Feuchtegehalt die

Durchlässigkeit des festen Abfalls senkt und mehr Energie absorbiert wird, sobald die Flüssigkeit verdampft. Tests mit unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen ergaben, dass die Wärmeerzeugung durch chemische Oxidation selbst bei Konzentrationen von nur 10 Vol.-% Sauerstoff stattfindet. Bei geringeren Sauerstoffkonzentrationen konnte aufgrund der Auswertung der Experimentreihe keine Selbsterwärmung festgestellt werden (Moqbel et al. 2010). Versuche zu den Einflüssen der Konvektion auf die Selbstentzündungstemperatur wurden von Lohrer et al. (2005) angestellt. Jedenfalls schien dabei die äußere Konvektion um eine Schüttung aus brennbarem Material sowohl Brandausbreitung als auch den Ort der Zündung zu beeinflussen. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei gleichförmiger Umströmung führte aufgrund der Wärmeabgabe in allen untersuchten Fällen zu einer Erhöhung der Selbstentzündungstemperatur. Eine Verringerung des Selbstentzündungsrisikos bei niedrigeren Umströmungsgeschwindigkeiten wurde allerdings nicht festgestellt (Lohrer et al. 2005).

Im nächsten Abschnitt werden nun Methoden, die für die Erarbeitung der Masterarbeit angewandt wurden, vorgestellt.

3 Methodik

Dieses Kapitel behandelt die Vorgehensweise für die Erhebung der Daten im Rahmen der Problemstellung 1 und die Methodik für die Ursachenanalyse der Selbstentzündungen von Problemstellung 2.

3.1 Erhebung von Brandereignissen

Aufbauend auf der am Lehrstuhl AVAW von Nigl et al. (2019/2020) entwickelten Methodik zur Erhebung von Brandereignissen in der Abfallwirtschaft wurden die im erwähnten Zeitraum angefallenen, aus öffentlichen Quellen erhebbaren Brandfälle dokumentiert und ausgewertet. Der Stichtag des Abschlusses der Erhebungstätigkeiten ist der 29.09.2021, weswegen mögliche den Erhebungszeitraum betreffende Veröffentlichungen, die nach dem Stichtag zugänglich wurden, in dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt werden. Von Interesse waren sämtliche Brandfälle, die sich in Anlagen oder Aggregaten von Unternehmen ereigneten, welche der Abfall,- Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft zuzuordnen sind. Zur Klarstellung bedeutet dies, dass Brandfälle, welche sich in Aggregaten oder Sammelbehältern aus Privathaushalten oder bei branchenfremden Unternehmen ereigneten, nicht erfasst wurden. Wie bereits erwähnt ermöglichen öffentliche Quellen die Erfassung von Brandfällen: Diese umfassen Zeitungsberichte, Feuerwehrberichte oder Einträge in einschlägigen Internetforen und -portalen. Folgende Parameter beschreiben ein Brandereignis und werden bei der Erhebung eines Brandfalles aus den genannten Quellen erfasst:

1. Datum,
2. die geografische Lage bestehen aus Ort, Postleitzahl und Bundesland,
3. Uhrzeit der Brandentstehung,
4. Uhrzeit des Endes des Brandes,
5. das vom Brand betroffene Unternehmen,
6. die vom Brand betroffene Anlage bzw. das betroffene Aggregat,
7. der durch den Brand entstandene Schaden,
8. in Brand gesetztes Abfallvolumen,
9. Anzahl der im Rahmen des Brandereignisses geschädigten Personen,
10. die vom Brand betroffenen Abfallfraktionen und
11. die Brandursache.

Als Uhrzeit der Brandentstehung wird, sofern nicht genauer verfügbar, die erste bei der Feuerwehr eintreffenden Meldung herangezogen. Der Methodik der Erhebung entsprechend werden für manche Brandereignisse nicht sämtliche Parameter erhebbar sein. Sofern in weiterer Folge Größen erwähnt werden, die oben nicht aufgezählt wurden, handelt es sich um Folgeparameter, die ausschließlich aus den oben genannten Werten resultieren. Als Beispiel dafür ist die Branddauer eines Ereignisses zu nennen, also die Differenz aus den Uhrzeiten von Brandbeginn und -ende. Betroffene Aggregate können meist den Bildern der Einsatzberichte entnommen werden, das Volumen kann daraus zumindest teilweise abgeschätzt werden. Die von den Brandereignissen betroffenen Unternehmen werden in

dieser Arbeit nicht veröffentlicht. Der gesamte Prozess der Erhebung kann zusammenfassend in folgende Schritte gegliedert werden:

- 1.) Anlegen einer Datenbank samt Eingabemaske,
- 2.) gezielte Suche nach Brandereignissen mit Suchmaschinen oder explizit auf einschlägigen Homepages, wie beispielsweise Feuerwehrportalen,
- 3.) Eingabe der erhebbaren Parameter des gefundenen Brandereignisses in die Eingabemaske und Übertragung in die Datenbank,
- 4.) Export der Datenbank im Excel-Format,
- 5.) Berechnung von Folgeparametern und
- 6.) Auswertung nach den gewünschten Parametern.

Belege für die gefundenen Brandereignisse wurden nachweislich gedruckt beziehungsweise gespeichert. Nach dem Auffinden eines Zwischenfalls wurde nach diesen mit Hilfe von Suchmaschinen erneut gesucht, um weitere Quellen und Informationen zu gewinnen, mit dem Ziel die oben genannten Parameter möglichst zu vervollständigen. Die Aufnahme eines Brandereignisses in die in Microsoft Access angelegte Datenbank erfolgte dann mittels des zuvor erstellten Formulars. Grund für die Erstellung eines solchen Formulars war die übersichtliche Eingabeoberfläche sowie die simple Exportmöglichkeit in beliebigen Dateiformaten, die für die Auswertung benötigt wird. Nach dem Befüllen des Formulars wurde dieses gespeichert, sodass das Ereignis in die Datenbank übernommen wurde. Die Datenbank wurde, nachdem sämtliche Ereignisse vollständig eingetragen wurden, exportiert und in Microsoft Excel ausgewertet.

3.2 Analyse der Einflussparameter von AbER-Selbstentzündungen

Im Bereich von Brandfällen in der Abfallwirtschaft, welche Selbstentzündungen zur Ursache hatten, konnte, wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, das vermehrte Auftreten von Brandereignissen in den auf die Temperatur bezogen warmen Monaten - von März bis September - festgestellt werden. Diese könnten durch die Niederschlags- und Temperaturmaxima, welche im beschriebenen Zeitraum vermehrt auftreten und zu einer höheren mikrobiellen Aktivität führen, im Zusammenspiel mit höherer Luftfeuchtigkeit bedingt werden. Daraus resultiert die zu beantwortende Fragestellung, ob Niederschlagsphasen gefolgt von Phasen hoher Temperaturen die Wahrscheinlichkeit für Selbstentzündungsereignisse von abfallwirtschaftlichen Schüttgütern aggregatübergreifend erhöhen. Um den Versuch diese These zu bearbeiten, anstellen zu können, bedarf es einer konkreten Einschränkung der genannten Phasen bzw. ist es notwendig, die Wetterabfolge, bestehend aus Niederschlags- und Temperaturparametern, zu definieren. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Datenqualität der Wetterparameter das Ergebnis entscheidend beeinflussen wird. Die daher getroffene Entscheidung bezüglich des Versuchs, die Fragestellung zu beantworten, war, dass die aus der erwähnten Literatur vorhandenen Ergebnisse genauer untersucht werden, um der Erarbeitung der Problemstellung sukzessive näher zu kommen. Im folgenden Abschnitt werden die für die Auswertung herangezogenen Methoden und Daten vorgestellt.

Poisson-Verteilung und -Regression

Der Ergebnisteil setzt Grundlagen der Statistik voraus, um Brandereignisse bzw. Selbstentzündungsereignisse im Kontext von saisonalen Abschnitten interpretieren zu können. Dennoch wird zunächst ein Überblick über die Theorie der Poisson-Verteilung gegeben, um die Methodik und Herangehensweise zugänglicher zu machen. Diese Verteilung wird in der Regel zur Modellierung von Zähldaten verwendet, was unter anderem daran liegt, dass die Verteilung nichtnegative ganzzahlige Werte annimmt. Angenommen eine Zufallsvariable Y nimmt derartige nichtnegative ganzzahlige Werte, wie etwa die erhobene Anzahl an Selbstentzündungen je Zeitraum, an. Wenn Y der Poisson-Verteilung folgt, so ist die Wahrscheinlichkeit für $Pr(Y)$ bei einer Anzahl k wie in Formel 1 dargestellt (James et al. 2021).

$$\Pr(Y = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \text{ für } k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Die durchschnittliche Anzahl an Ereignissen je Zeitintervall wird mit λ beschrieben. In der Realität kann erwartet werden, dass die durchschnittliche Anzahl an Ereignissen aber eine Funktion von weiteren Parametern, wie den Wetterbedingungen, ist. Anstatt also die Anzahl der Brandfälle Y als Poisson-Verteilung mit einem Mittelwert zu modellieren, kann der Mittelwert in Abhängigkeit von der Funktion variiert werden. Das Modell kann also für den Mittelwert $E(Y)$ in Abhängigkeit der Kovariaten X_1 bis X_p und den Schätzwerten β_i wie in Formel 2 dargestellt variiert werden (James et al. 2021).

$$\log(\lambda(X_1, \dots, X_p)) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad (2)$$

Analog dazu kann die durchschnittliche zu erwartende Anzahl λ , wie in Formel 3 dargestellt beschrieben werden.

$$\lambda(X_1, \dots, X_p) = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p} \quad (3)$$

Formel 2 und Formel 3 bilden gemeinsam das Regressionsmodell. Die in Formel 2 verwendete Form dient dazu, den Logarithmus von X_1 bis X_p als linear anzunehmen, anstatt die Kovariaten selbst linear darzustellen, sodass die Mittelwerte X_1 bis X_p für alle Werte der Kovariaten nichtnegative Werte annehmen.

Um die erklärenden Koeffizienten β_i zu schätzen, wird das Maximum-Likelihood-Verfahren angewandt. Bei einer Gesamtheit unabhängiger Beobachtungen aus dem Poisson-Regressionmodell wird der Likelihood über Formel 4 beschrieben (James et al. 2021).

$$l(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda(x_i)} \lambda(x_i)^{y_i}}{y_i!} \quad (4)$$

Dies bedeutet, dass jene die Wahrscheinlichkeit erhöhenden Koeffizienten maximiert werden, also die beobachteten Daten so wahrscheinlich wie möglich machen. Zusammenfassend ist

festzuhalten, dass der Ansatz der Poisson-Regression die Prädiktoren verwendet, um eine Antwort Y , wie etwa die Anzahl zählbarer Selbstentzündungen, zu schätzen. Während bei linearen Regressionen eine Gaußverteilung der Daten angenommen wird, folgt die Abhängige Variable Y einer Poisson-Verteilung (James et al. 2021). Die Gauß'sche-, Bernoulli- oder Poisson-Verteilung gehören allesamt zu einer breiteren Klasse von Verteilungen, die als Exponentialverteilungen bekannt sind. Generell kann mit allen genannten Verteilungen eine Regression gebildet werden, indem die Antwort Y aus einem bestimmten Mitglied der Exponentialfamilie modelliert und der Mittelwert der Antwort so transformiert wird, dass dieser eine lineare Funktion der Prädiktorvariablen ist. Jeder Regressionsansatz, der diesem Konzept folgt, wird als generalisiertes lineares Modell (glm) bezeichnet (James et al. 2021). Dementsprechend wird später mithilfe der Software R und der Funktion „glm“ eine Modellierung der gezählten Brandfälle vorgenommen, und zwar in Abhängigkeit des unten definierten Abschnittes. Im konkreten Fall wurde die Poisson-Regression sowohl für Brandfälle in der AbER-Branche generell als auch für Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019 angewandt. Die Brandereignisse wurden der Datenbank von Nigl et al. (2019/2020) entnommen und um die Zwischenfälle des Jahres 2019, welche in den aktuellen Erhebungszeitraum fallen, ergänzt. Zunächst wurden die vorhandenen Daten so vorbereitet, dass sie im Regressionsmodell verwendbar waren. Die Daten wurden als Zähldaten im Monatsintervall je Kalenderjahr zugeordnet; zur Klarstellung bedeutet dies, dass etwa sämtliche im Jänner 2014 gezählten Selbstentzündungen summiert wurden und einen Dateneintrag darstellen. Für die weitere Analyse wurde eine zusätzliche Variable eingeführt, die für alle Jahre konstante Werte zwischen eins und vier annimmt und die gezählten Selbstentzündungen dem zugehörigen Abschnitt entsprechend zuteilt. Die Variable *abschnitt* nimmt die unten angeführten Werte an und dient in weiterer Folge als erklärende Variable für die Anzahl an Selbstentzündungen. Die angenommenen Intervalle für die Abschnitte wurden evidenzbasiert aus dem in Abbildung 4 ersichtlichen Verlauf der AbER-Brandfälle über die Kalenderjahre hinweg abgeleitet.

- 1 = {Juni, Juli, August}
- 2 = {März, April, Mai}
- 3 = {September, Oktober, November}
- 4 = {Dezember, Jänner, Februar}

Eine weitere, zusätzlich eingeführte Variable ist *niveau*, welche die Anzahl der Selbstentzündungen (x) je Monat in Klassen einteilt. Diese Klasseneinteilung ist wiederum untenstehend definiert. Sie dient später dazu, etwaige Korrelationen zwischen der Anzahl an Selbstentzündungen und den Monatsabschnitten zu untersuchen.

- Niveau 1 für $x \in [0;1]$
- Niveau 2 für $x \in [2;5]$
- Niveau 3 für $x \in [6;7]$
- Niveau 4 für $x \in [8;\infty]$

Da aufgrund der bisherigen Erfahrungen auf dem Gebiet der Selbstentzündungen in der Abfallwirtschaft angenommen wird, dass die Ereignisse in bestimmten Monaten gehäuft auftreten, eignet sich außerdem die Zeitreihenanalyse, um die Anzahl der Brandfälle in den Monaten zu analysieren und zu versuchen Ereignisse darzustellen. Eine Zeitreihe besteht aus chronologisch angeordneten Beobachtungen oder Messungen, wobei die Information nicht nur in den einzelnen Messwerten enthalten ist, sondern ebenfalls in deren zeitlichen Anordnung (Deistler und Scherrer 2018). Darunter ist die Entwicklung eines Merkmals, wie etwa die Häufigkeit von Brandfällen über verschiedene Monate oder Jahre hinweg, zu verstehen, dessen Werte in bestimmten Intervallen oder für bestimmte Zeiträume erfasst und dargestellt werden (Holland und Scharnbacher 2010). Wie allgemein in der Statistik üblich, liegt ein Schwerpunkt dieser Art der Analyse in der datenbasierten Modellierung und stochastisch unterlegten Daten. In der Zeitreihenanalyse sind diese Modelle aufgrund ihrer Natur oft dynamisch und beschreiben die zeitliche Entwicklung der untersuchten Größe (Deistler und Scherrer 2018). Die anschließend gewonnenen Modelle eignen sich zur Analyse, Prognose, Filterung oder Regelung. Nicht nur die datengetriebene Modellierung ist aber alleine Zweck der Zeitreihenanalyse, sondern auch die Entstörung von Signalen oder die Extraktion von „Features“, wie von verborgenen Zyklen, sind nutzbare Teilgebiete (Deistler und Scherrer 2018). Jede Zeitreihe ist das Resultat der Symbiose verschiedener Einflussgrößen, die folgendermaßen unterteilt werden:

1. Trend T ,
2. Zyklische Komponente Z ,
3. Saisonkomponente S , und
4. Restkomponente R .

Der Trend gibt die Grundrichtung einer Zeitreihe an, der die langfristige Entwicklungsrichtung einer Zeitreihe angibt. Dies kann sowohl ein Wachstums- oder auch ein Verminderungsprozess sein. Die zyklische Komponente stellt mittelfristige Einflüsse dar, die auf eine Zeitreihe wirken, wie etwa der Konjunkturzyklus (Holland und Scharnbacher 2010). Wenn eine Zeitreihe nicht nur aus Jahreswerten, sondern wie bei der Aufzeichnung von Brandfällen etwa aus Monats- oder gar Tageswerten besteht, kann eine Saisonkomponente innerhalb des Jahres auftreten, die jahreszeitlich bedingte Einflüsse wiedergibt. In der Restkomponente werden alle einmaligen Einflüsse zusammengefasst. Die Zeitreihe wird zusammenfassend durch die vier Komponenten, wie in Formel 5 dargestellt, beschrieben (Holland und Scharnbacher 2010).

$$Y = f(T(t), Z(t), S(t), R(t)) \quad (5)$$

In weiterer Folge wurden Wetterparameter zu den Selbstentzündungsereignissen im Detail analysiert.

Aufgrund der im Rahmen der Poisson-Regression und der Zeitreihenanalyse gewonnenen Erkenntnisse wurde in weiterer Folge eine Datenbasis an Wetterparametern zu den vorhandenen Selbstentzündungsfällen der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft geschaffen, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

Untersuchung von Wetterparametern der Selbstentzündungsereignisse

Ausgehend von den durch Nigl et al. (2019/2020) am AVAW erfassten Selbstentzündungsereignissen, zumindest beschrieben durch Datum, Ort und Uhrzeit des jeweiligen Brandfalles, wurde eine wetterbasierte Datengrundlage für jedes Brandereignis geschaffen. Ziel war die weitere Untersuchung bezüglich wetterbedingter Einflüsse auf die Brandwahrscheinlichkeit. Da zunächst weder die Phase des lokalen Niederschlagsereignisses und der zugehörigen Phase des Temperaturanstieges definiert war, wurden sämtliche Parameter, die das Brandereignis später beschreiben sollten, im Stundentakt zehn Tage vor dem Brandereignis unter Berücksichtigung der Uhrzeit des Brandereignisses erfasst. Folgende Parameter wurden je Brandereignis für zehn aufeinanderfolgende Tage bis zum Tag des Brandereignisses erhoben:

- stündlicher Mittelwert der Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$,
- stündlicher Mittelwert der Luftfeuchtigkeit L in $\%$,
- stündlicher Mittelwert des Druckes in hPa,
- das Tagesmaximum der Temperatur, betrachtet für 24 Stunden,
- das Tagesmaximum der Luftfeuchtigkeit, betrachtet für 24 Stunden,
- die zugehörigen Minima für die eben beschriebenen Werte,
- die Differenz aus Maximum und Minimum für die Werte der Parameter Druck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur, und
- die Mittelwerte im 24-Stunden-Takt für die eben aufgelisteten Werte der Parameter.

Für die eben beschriebenen und aufgezeichneten Selbstentzündungsfälle konnten lediglich in 87 Brandfällen repräsentative Wetterparameter über den Wetterdienstleister Meteostat erhoben werden. Sämtliche eben genannten Parameter wurden unter Berücksichtigung der Uhrzeit des Brandfalles erhoben. Zur Klarstellung dient folgendes Beispiel: Wenn sich ein Brand beginnend um 03:50 ereignete, so wurden Mittelwerte, Maxima, Minima und Differenzwertepaare bis zum Vortag, also für neun Tage bis zum Ereignis, im 24-Stunden-Takt berechnet. Für den Tag des Brandes wurden die gleichen Werte unter Berücksichtigung der aufgerundeten Stunde, also bis 04.00, berechnet. Die standortspezifischen Wetterdaten konnten über Meteostat gewonnen und in eine Exceldatei eingepflegt werden. Anschließend wurden Sub-Datensätze erstellt, welche im genannten Zeitraum, also in den Tagen vor dem Brandereignis, variieren. So bestehen nunmehr Datensets für neun, vier und drei Tage vor dem jeweiligen Brandereignis. Diese bilden die Grundlage für die anschließenden Analysen auf Zusammenhänge zwischen Wetterkonditionen und Brandereignissen. Ziel war der Vergleich der Regressoren, also ob Niederschlagsphasen sowie Temperaturanstiege bei linearer Betrachtung verzeichnet werden können. Die angewendete Methodik wird untenstehend festgehalten. Hierzu wurde eine entsprechend große Datengrundlage an Wetterparametern für jedes bereits vorhandene, auf Selbstentzündung zurückzuführende Brandereignis geschaffen, um Überschneidungen oder Trends in den Datensätzen zu finden. Dazu wurden verschiedene Verfahren in Erwägung gezogen. Dabei wurde untersucht, ob für die Annahme linearer Zusammenhänge unter den Brandereignissen Trends zwischen den Selbstentzündungen auszulesen sind. Dafür wurden die Parameter für verschiedene

Zeiträume einer linearen Regression unterzogen und die Regressoren der Kurven anschließend verglichen. Tabelle 1 zeigt einen Auszug der eingespielten Daten für ein Selbstentzündungsereignis und das Vier-Tages-Intervall. Zu beachten ist, dass aus Darstellungsgründen nicht alle erhobenen Parameter ersichtlich sind. Die in Tabelle 1 ebenfalls ersichtliche Variable *binaer* wurde für den Ansatz der logistischen Regression verwendet und wird im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter thematisiert.

Tabelle 1: Auszug aus den erhobenen Daten zu Selbstentzündungsereignissen.

avg_t	tmax	tmin	lmax	lmin	pmax	binaer
17.62	20.9	14.2	0.89	0.53	1013.9	N
17.43	22	13.1	0.91	0.46	1016	N
15.89	18.6	12.5	0.93	0.64	1016.5	N
16.4	22	9.6	0.88	0.41	1017.3	Y

Um die Berechnung der Regressoren nicht manuell durchzuführen, wurde ein entsprechendes Hilfsprogramm geschrieben, welches aus den oben beschriebenen Datensätzen und ebenfalls aus den Sub-Datensätzen die gewünschten Regressoren automatisch ausgibt. Der gesamte zugehörige Programmcode ist dem Anhang zu entnehmen, jedoch wird nun näher auf jene Zeilen des Codes eingegangen, die für die korrekte Bedienung und das Verständnis der Ergebnisse notwendig sind. Das aus zwei Klassen bestehende Programm liest mit Hilfe der Klasse „CSVreader“ die gewünschte Exceldatei, über den Pfad, der in Zeile 107 einzutragen ist, ein und berechnet dann in der Klasse „LinearRegression“ die Steigung der gewünschten Größen über das angegebene Intervall. Beispiele für diese Größen sind etwa die Steigung der durchschnittlichen Temperatur, der Maximaltemperatur und den übrigen, bereits vorgestellten Parametern. Um dies zu ermöglichen, wird durch die Eingabe in Zeile 110 des Programmcodes das gewünschte Tagesintervall erfasst, über das die Regression gebildet werden soll und für welches Intervall der Wert des Regressors gültig ist. Zur Klarstellung wäre dies beispielsweise für den Fall des Subsets mit drei Tagen exklusive des Tags des Brandereignisses der Wert 4.

Das Hinzufügen der Werte aus der entsprechenden Datei erfolgt durch Angabe des Spaltenindex in den Zeilen 41 bis 45, hier beispielsweise für die durchschnittlichen Temperaturwerte, die sich in Spalte 1 wiederfinden:

```
avgTemp.add(Double.parseDouble(row[0]));    (i)
```

Der Pfad, in welchem die einzulesende Exceldatei gespeichert ist, wird in Zeile 107 eingelesen und als „testfile“ bezeichnet. Ein Datensatz ist, wie beispielsweise hier ersichtlich, nach den Tagen vor dem Brandereignis benannt:

```
String testfile = "C:|Users|artner|Master|Masterarbeit|java|set_V2_3_1.csv";    (ii)
```

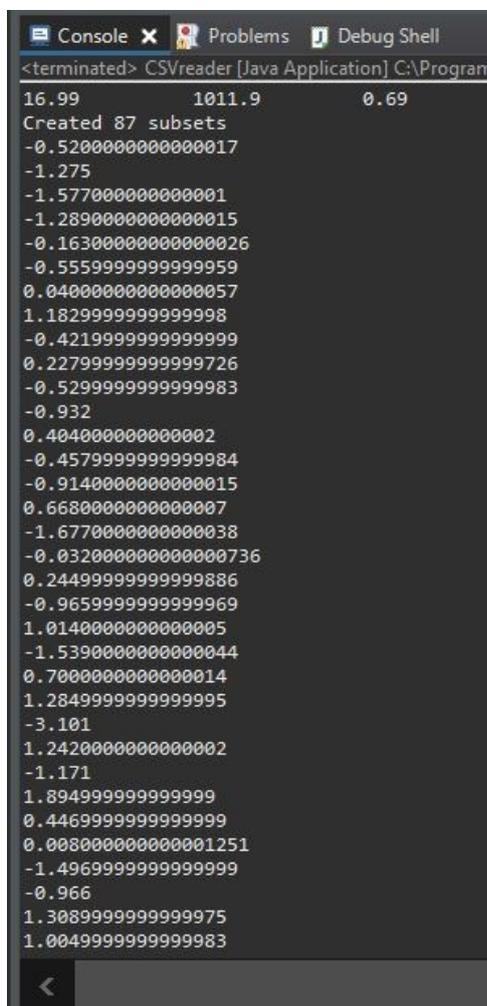
Wie oben erläutert, wird die Anzahl der zugehörigen Zeilen zu einem Brandereignis vorgegeben, sodass diese für das Subset den Index 4 in Zeile 110 erhält:

```
List<List<Double>> testlist = reader.cluster(4, reader.getAvgTemp());    (iii)
```

Abschließend wird über das nun eingelesene File und wie oben für den Index 4 beschrieben jeweils ein Regressionswert über vier Tage gebildet. Wie zu erkennen ist, wird dabei vorausgesetzt, dass die Daten der CSV-Datei in geordneter Reihenfolge, bezogen auf das Datum, vorliegen:

```
for (List<Double> dataset : testlist) {  
    System.out.println(LinearRegression.predictForValue(dataset)); }      (iv)
```

Nach Ausführung des Programmes wird in der Konsole eine Liste mit den errechneten Regressoren ausgegeben, was in Abbildung 5 dargestellt ist. Zusätzlich erfolgt eine Rückmeldung, wie viele Regressoren erstellt wurden, da die Anzahl der erstellten Regressoren sinngemäß immer gleich der Anzahl der Brandereignisse im eingelesenen File sein muss. Dies dient der Überprüfung des in Zeile 110 eingestellten Intervalls.



```
<terminated> CSVreader [Java Application] C:\Program  
16.99      1011.9      0.69  
Created 87 subsets  
-0.5200000000000017  
-1.275  
-1.577000000000001  
-1.2890000000000015  
-0.1630000000000026  
-0.5559999999999959  
0.0400000000000057  
1.1829999999999998  
-0.4219999999999999  
0.22799999999999726  
-0.5299999999999983  
-0.932  
0.404000000000002  
-0.4579999999999984  
-0.9140000000000015  
0.6680000000000007  
-1.6770000000000038  
-0.03200000000000736  
0.24499999999999886  
-0.9659999999999969  
1.0140000000000005  
-1.5390000000000044  
0.7000000000000014  
1.2849999999999995  
-3.101  
1.2420000000000002  
-1.171  
1.8949999999999999  
0.4469999999999999  
0.008000000000001251  
-1.4969999999999999  
-0.966  
1.3089999999999975  
1.0049999999999983
```

Abbildung 5: Beispiel für die Ausgabe der Regressoren in der Konsole.

Die ausgegebene Liste der Regressoren wurde anschließend in Excel übertragen, um die Werte näher zu analysieren. Zusammenfassend sind noch einmal die Instrumente festzuhalten, die im Rahmen der Bearbeitung dieser Problemstellung verwendet wurden. Diese umfassen die lineare Regression, Poisson-Regression und Zeitreihenanalysen. Weitere Methoden, die sich als nicht zielführend darstellten, werden in dieser Arbeit nicht erwähnt und

diskutiert. Diese sind aber dem Begleitpapier der Masterarbeit, welches am AVAW vorliegt, zu entnehmen.

Die aus der angewandten Methodik erhaltenen Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Abschnitt werden die zwei verschiedenen Problemstellungen ausgewertet und diskutiert. Diese umfassen die Auswertung der Brandfälle in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft sowie die Erkenntnisse aus den Auswertungen der Hypothese bezüglich der Erhöhung der Brandwahrscheinlichkeit nach bestimmten Wetterphasen.

4.1 Ergebnisse aus der Erhebung von AbER-Brandfällen

Im Erhebungszeitraum fielen zwischen 07.11.2019 und 22.10.2020 in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingbranche in Summe 70 Brandfälle an, sodass durchschnittlich fünf Tage zwischen den jeweiligen Brandereignissen lagen. Dies ist durch die Konstante in Abbildung 6 dargestellt. Die absolute Tagesdifferenz zwischen den chronologisch geordneten Ereignissen im oben genannten Zeitraum ist durch die zackige Linie der Abbildung 6 dargestellt. Dem dargestellten Verlauf zufolge liegen null bis 23 Tage zwischen den jeweiligen Brandereignissen.

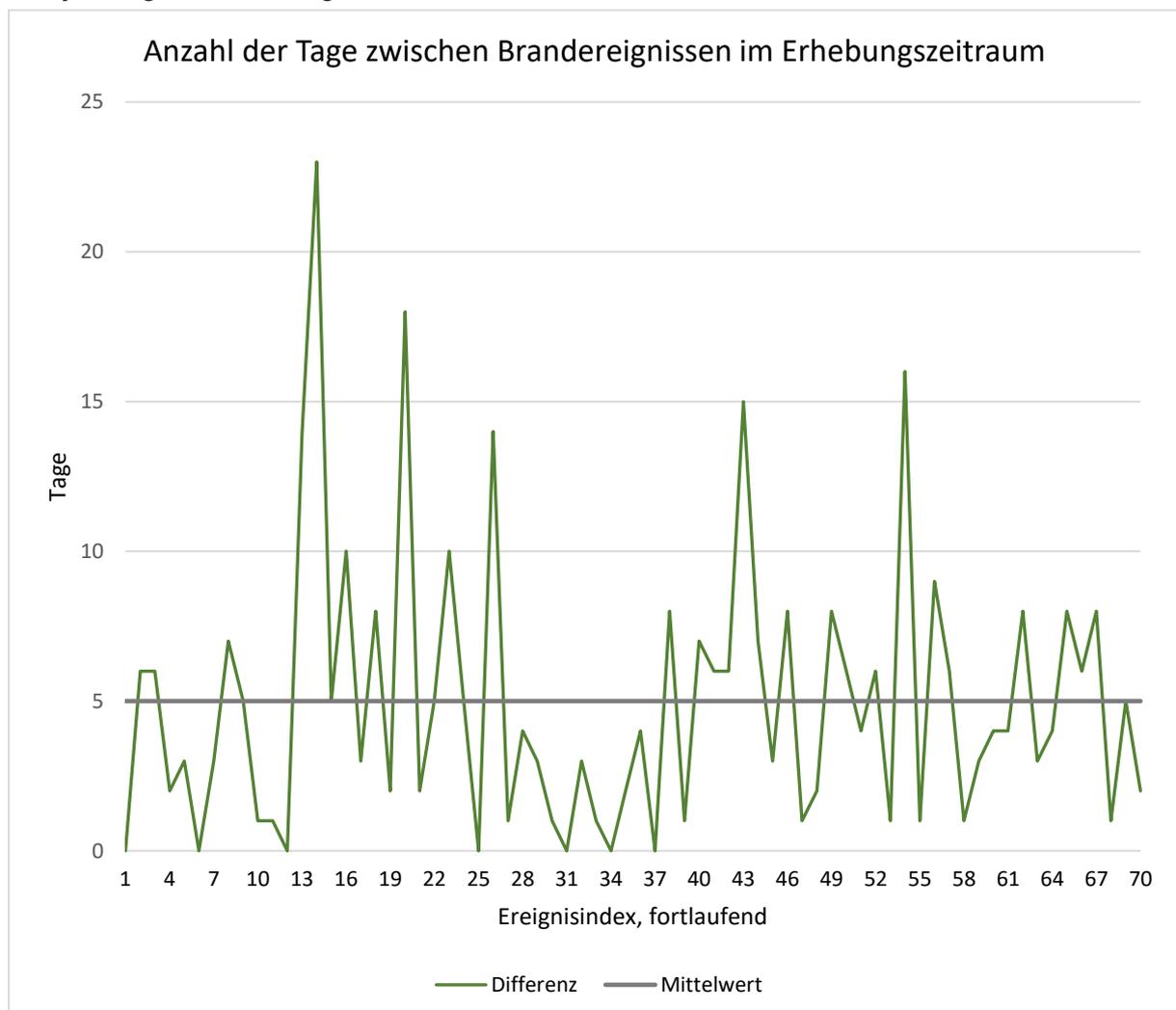


Abbildung 6: Zeitliche Differenz in Tagen zwischen den Brandereignissen im Erhebungszeitraum bei fortlaufendem Index.

Die am häufigsten in Brand gesetzte Fraktion war Siedlungsabfall beziehungsweise dem Siedlungsabfall ähnlicher Gewerbeabfall, welcher rund 52,9 % der an den Bränden beteiligten Fraktionen ausmachte. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass diese Fraktion auch die meisten Subkategorien umfasst, darunter die anhand der Anzahl an Bränden am häufigsten betroffene Fraktion Restmüll mit 12 Ereignissen. Im Übrigen war auch Grünschnitt relativ betrachtet häufig eine an Bränden in der AbER beteiligte Abfallfraktion. Zu den am seltensten von Bränden erfassten Fraktionen zählen unter anderem Batterien, Elektronikschrott oder Bauschutt. Bei rund 18,6 % bzw. 13 von den insgesamt 70 erhobenen Brandereignissen konnte aus den zur Verfügung stehenden Quellen keine Fraktion erhoben werden, daher wurden diese als unbekannt in die Statistik aufgenommen.

Die Auflistung aller im Erhebungszeitraum betroffenen Fraktionen sowie deren zugehörige, absolute Anzahl ist Tabelle 2 zu entnehmen. In zwei Fällen kam es in der AbER-Branche zu Bränden, die nicht direkt den Abfall betrafen. Dies war zum einen ein brennender Lastwagen, der vermutlich aufgrund eines elektrischen Defekts zu brennen begann; zum anderen traten in einem Aggregat Hydrauliköl und Diesel aus, was anschließend zu einer Entzündung führte. Auffällig ist, dass zunächst nur ein Brand an Batterien – betroffen war ein Container mit Lithium-Ionen-Batterien – in der Statistik aufscheint, obwohl von einem starken Anstieg an gesammelten Batterien auszugehen ist, und diese großes Potenzial zur Brandentwicklung aufweisen. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass Batterien in den weiteren in Tabelle 2 gelisteten Fraktionen als Brandverursacher nicht explizit ausgeschlossen werden können, insbesondere aufgrund des später vorgestellten Anteils an unbekanntem Brandursachen. In drei Fällen kam es zu Bränden von Chemikalien und Lösungsmitteln oder Farben und Lacken.

Tabelle 2: Bei den Bränden im Erhebungszeitraum 2019/20 entzündete Fraktionen.

Fraktion	Anzahl Brände
Batterien	1
Baurestmassen	1
Bauschutt	1
Chemikalien/Lösungsmittel, Farben und Lacke	3
Farben und Lacke	1
Gebinde	1
Laborabfall	1
Elektronikschrott	3
Ersatzbrennstoffe	1
Filtertücher	1
kein Abfall	2
Hydrauliköl und Diesel	1
Lastwagen	1
Kunststoff und Baumaterial	1
Problemstoffe	2
Schleifstaubabfall	1
Schrott	3
Siedlungsabfall oder ähnlicher Gewerbeabfall	37
biogene Siedlungsabfälle	2
Gewerbeabfall	3
Grünschnitt	7

Fraktion	Anzahl Brände
Kartonagen	3
Kunststoffabfall	3
Leichtverpackungen	4
Restmüll	12
Siedlungsabfall geshreddert	1
Sperrmüll	2
unbekannt	13
Werkstättenabfall	1
Gesamtergebnis	70

Auch in diesem Erhebungszeitraum war die Brandursache meist unbekannt, wie Tabelle 3 zeigt. Einmal wurde Gärung als Brandursache festgestellt. Dieses Brandereignis ist wahrscheinlich auf lange Induktionszeiten der Selbsterwärmung zurückzuführen. Ansonsten machen Selbstentzündungen einen erheblichen Anteil an den Zwischenfällen mit bekannten Brandursachen aus. Bei Vergleich von Tabelle 2 und 3 fällt auf, dass Batterien zwar als unmittelbar betroffene Fraktion lediglich einmal an einem Brand beteiligt waren. Jedoch waren diese zumindest in drei Fällen Auslöser einer Entzündung anderer Fraktionen, was wiederum auf Fehlwürfe bzw. falsche Entsorgung hindeutet.

Tabelle 3: Erhobene Brandereignisse in Darstellung nach Brandursache.

Ursache	Anzahl
Kurzschluss Batterie	2
heiße Asche	1
Kurzschluss	1
Mechanische Beanspruchung - Kurzschluss Batterie	1
Mechanische Beanspruchung - Abfall im Shredder	1
Selbstentzündung, nicht näher definiert	6
Selbstentzündung - Gärung	1
Selbstentzündung Lithium-Ionenbatterie	1
Explosion einer Spraydose	1
unbekannt	53
Verpuffung	2
Gesamtergebnis	70

Aus den fraktionsübergreifend acht Selbstentzündungen entfielen je zwei auf Kunststoffabfälle und Restmüll sowie jeweils ein Brandfall auf Grünschnitt, Stäube, Elektronikschrott und Filtertücher, wie in Tabelle 4 ersichtlich ist.

Tabelle 4: Übersicht der Selbstentzündungen im Erhebungszeitraum.

Fraktion	Brandursache
Grünschnitt	Selbstentzündung
Stäube	Selbstentzündung
Restmüll 1	Selbstentzündung
Restmüll 2	Selbstentzündung - Gärung

Fraktion	Brandursache
Filtertücher	Selbstentzündung
Kunststoffabfall 1	Selbstentzündung
Kunststoffabfall 2	Selbstentzündung
Elektronikschrott	Selbstentzündung Lithium-Ionenbatterie

Die Anteile der an den Bränden beteiligten Fraktionen sind auf der nächsten Seite im Querformat in Abbildung 7 dargestellt.

Brandfälle nach Fraktionen im Erhebungszeitraum 2019/20

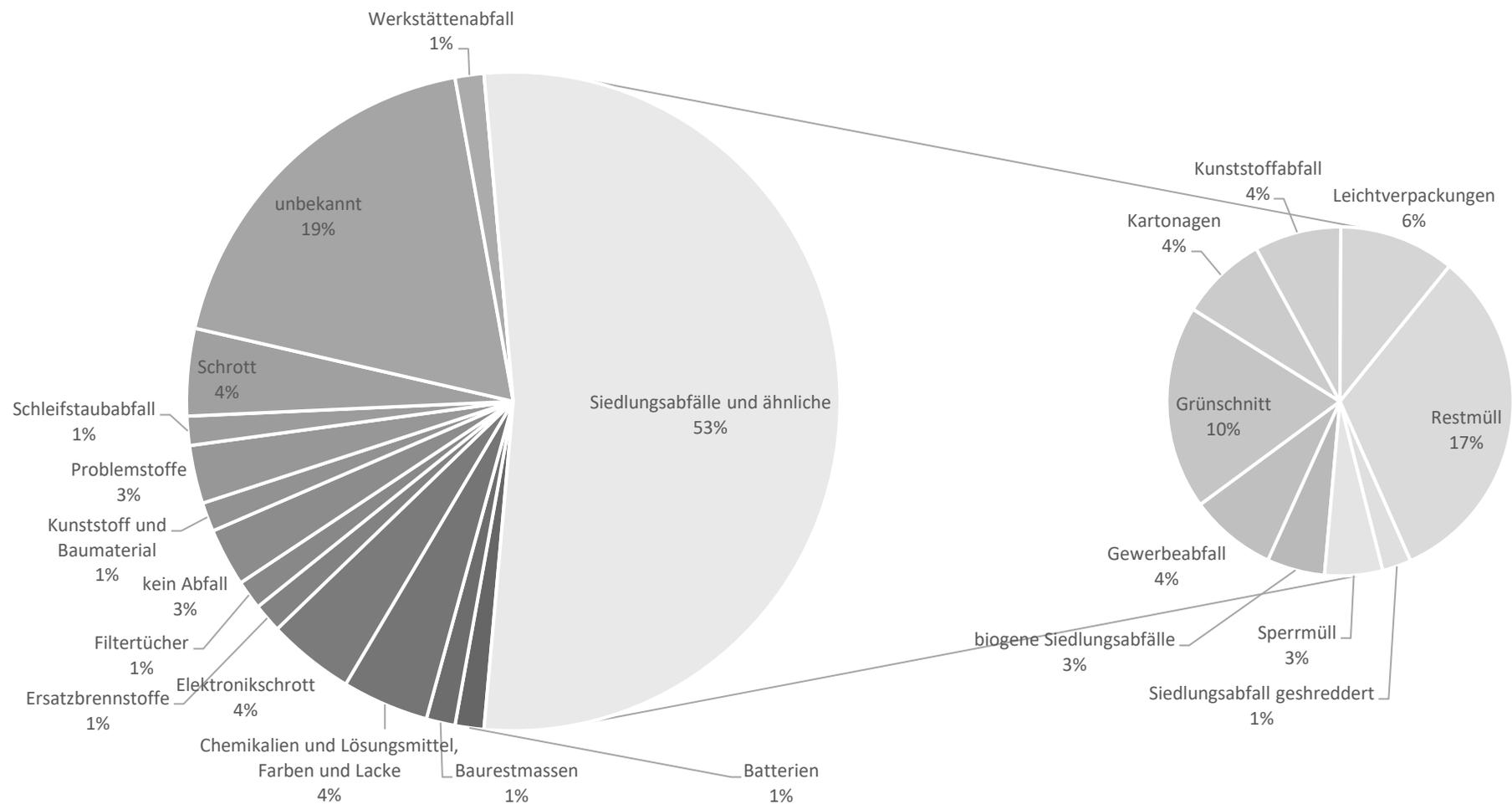


Abbildung 7: Verteilung der Brandfälle nach Fraktionen im Erhebungszeitraum von November 2019 bis Oktober 2020.

Aus der Auswertung nach Brandfällen und österreichischen Bundesländern ist ersichtlich, dass mehr als ein Drittel der Brandfälle des Erhebungszeitraumes auf Niederösterreich entfällt. Tabelle 5 zeigt die relativen und absoluten Anteile der Brandfälle in den neun österreichischen Bundesländern.

Tabelle 5: Anzahl der Brandfälle in Österreich im Erhebungszeitraum 2019/20.

Bundesland	Anzahl Brände, absolut	Anteil Brände, relativ
Burgenland	3	4%
Kärnten	1	1%
Niederösterreich	26	37%
Oberösterreich	17	24%
Salzburg	6	9%
Steiermark	8	11%
Tirol	7	10%
Vorarlberg	2	3%
Wien	0	0%
Summe	70	100%

Bei Betrachtung der Branddichte je Bundesland, also der Anzahl an Bränden pro Einwohner, ist wiederum in Niederösterreich die höchste Brandinzidenz im Vergleich mit den übrigen Bundesländern festzustellen. Die wenigsten Brände nach Bevölkerungsdichte gibt es in Kärnten (0,2), gefolgt von Vorarlberg mit nur 0,5 Bränden und der Steiermark (0,6 Brände je 100.000 Einwohner). Im Mittelfeld dieser Betrachtung liegen Tirol und das Burgenland, während die Brandinzidenz in Salzburg und Oberösterreich mit 1,1 Bränden je 100.000 Einwohner gleich hoch ist, wie in Abbildung 8 erkannt werden kann.

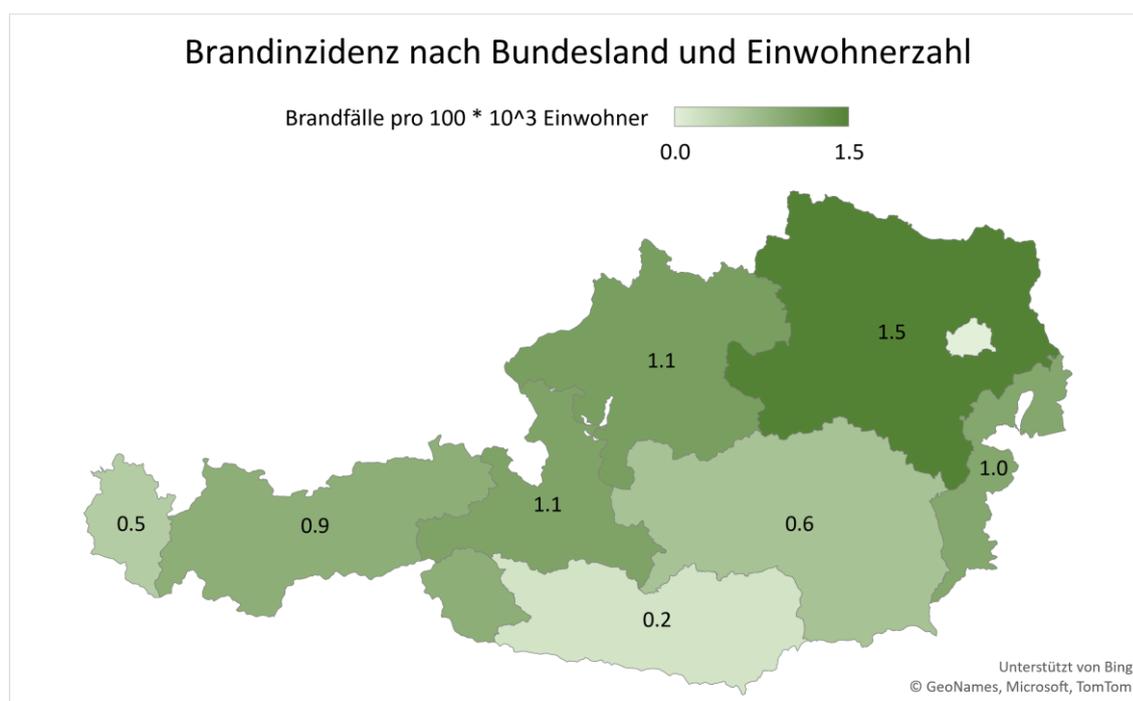


Abbildung 8: Inzidenzkarte der Brandfälle je Bundesland im Erhebungszeitraum.

Durch die Art der Erhebung konnte bei insgesamt 70 Brandfällen lediglich in 19 Fällen die Ursache erhoben werden, davon wurden acht Brände auf Selbstentzündung zurückgeführt. Am häufigsten, nämlich 28-mal, wurde der Brandort in Bereichen lokalisiert, die der Lagerung der Abfälle dienen, wie etwa in Lagerboxen, Lagerhallen oder freien Schüttungen. Dies entspricht einem Anteil von 40 %. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass Transportcontainer gesondert betrachtet wurden. Auf diesen Brandort entfallen rund 24 % der Ereignisse. Zu einem beachtlichen Anteil, nämlich in 14,3 % der Fälle, kam es in Kraftfahrzeugen, die der Abholung und dem Transport von Abfall dienen, zu Brandereignissen. Aufbereitungsaggregate waren im Erhebungszeitraum 2019/20 in Österreich sieben Mal von einem Brand betroffen, während sechs Mal aus den zugänglichen Quellen und verbundenen Daten aufgrund mangelhafter Berichterstattung kein näher lokalisierbarer Brandentstehungsort auszumachen war. Die Brandentstehungsorte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht der Brandentstehungsorte im Erhebungszeitraum.

Brandort/Anlage/Aggregat	Anzahl Brände
Aggregat	7
Ballenpresse	1
Förderband	1
Fördermaschine	1
Shredder	2
Sortierungsanlage	2
Betriebsgebäude	1
Fahrzeughalle	1
Lager	28
Betriebshalle	1
Fasslager	1
freie Schüttung	9
Lagerbox	10
Lagerhalle	7
Müllwagen	10
Transportcontainer	17
unbekannt	6
Gesamtergebnis	70

Die Analyse der zeitlichen Verteilung ergibt ein Maximum an Brandfällen im April 2020, wobei die übrigen Monate, insbesondere von Mai bis Oktober, eine ähnliche Anzahl an Brandfällen aufweisen. Besonders wenig Zwischenfälle, nämlich 2, konnten im Jänner 2020 verzeichnet werden, wie in Abbildung 9 ersichtlich ist.

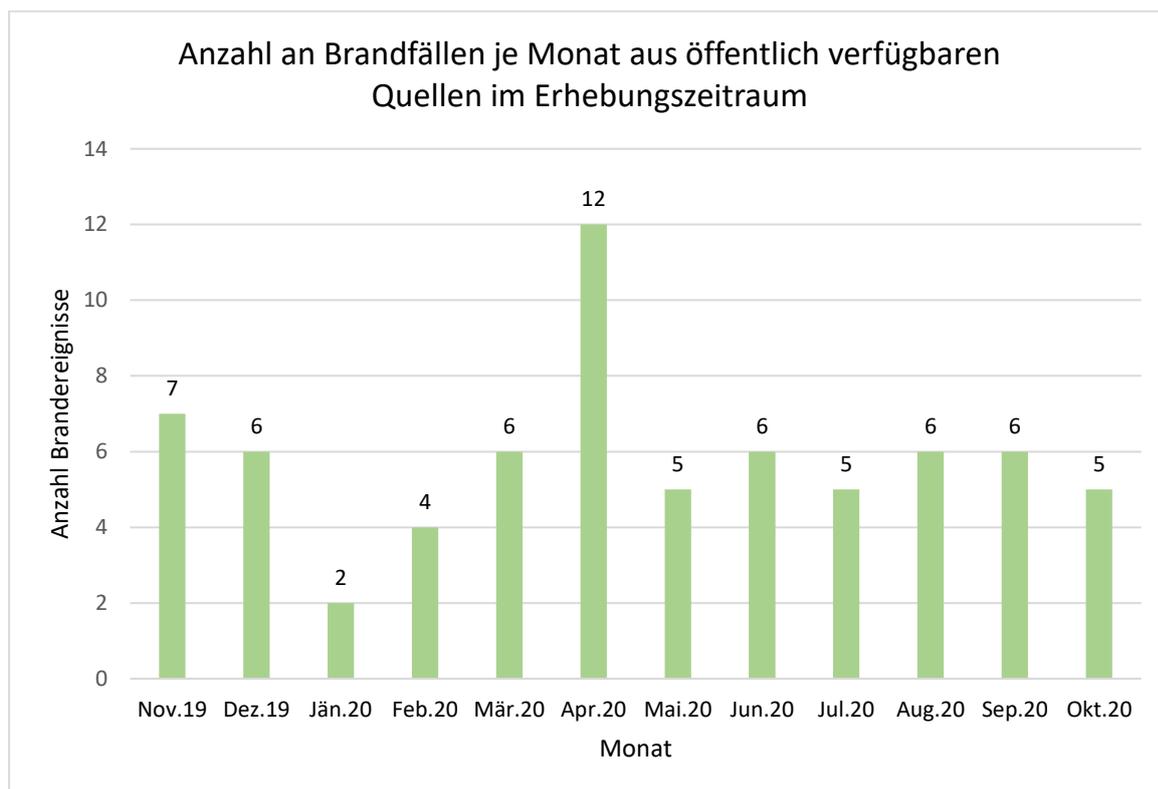


Abbildung 9: Darstellung der Anzahl an Brandfällen je Monat im Erhebungszeitraum.

Die deskriptive Auswertung der in Abbildung 9 dargestellten Daten ist Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Deskriptive Auswertung der im Erhebungszeitraum pro Monat aufgetretenen Brandereignisse.

Mittelwert	5.83
Standardfehler	0.67
Median	6
Modus	6
Standardabweichung	2.33
Stichprobenvarianz	5.42
Kurtosis	4.95
Schiefe	1.48
Wertebereich	10
Minimum	2
Maximum	12
Summe	70

Die Auswertung nach Wochentagen ist in Abbildung 10 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass an Wochenenden (Tage 6 und 7) am wenigsten Brandfälle auftraten.

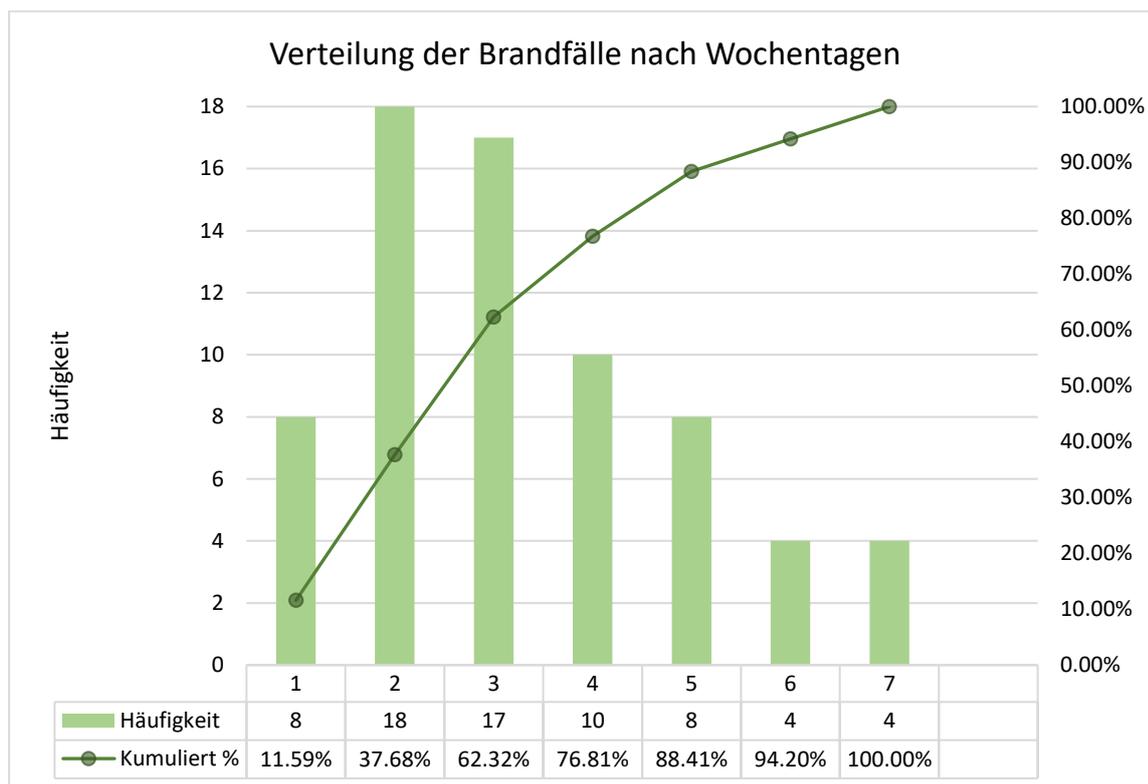


Abbildung 10: Verteilung der Brandfälle im Erhebungszeitraum nach Wochentagen.

Im folgenden Abschnitt wird die Auswertung der Ursachenerforschung von Einflussgrößen auf Selbstentzündungen in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft vorgestellt. Dazu wurden zunächst Brandfälle sämtlicher Entstehungsursachen einer Poisson-Regression unterzogen, um die Anzahl der gezählten Fälle je Abschnitt zu untersuchen. Im Zuge dessen wurde das Modell auf Selbstentzündungsereignisse, die im Zeitraum zwischen 2014 und 2019 auftraten, angewandt.

4.2 Ergebnisse der Ursachenermittlung von Selbstentzündungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der zweiten Problemstellung, welche die Analyse der Selbstentzündungen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft umfasst, präsentiert. Zunächst wird ein Überblick über die Brandentstehungsorte und vom Brand betroffenen Fraktionen gegeben, während in weiterer Folge die statistische Auswertung der AbER-Selbstentzündungen in den definierten Abschnitten vorgelegt wird.

Wie im Theorieteil umfänglich erörtert, wurde eine Saison vermehrt auftretender Brände festgestellt, die sich in den wärmeren Monaten zu ereignen scheinen. Die Erkenntnis hat insbesondere 285 beobachtete Brandfälle in der österreichischen Abfallwirtschaft zur Grundlage. Das Histogramm in Abbildung 11 zeigt die Verteilung von aus öffentlich verfügbaren Quellen erhobenen Brandereignissen, die sich im Zeitraum zwischen 2014 und 2019 ereigneten, und dient als Einstieg in den folgenden Abschnitt, um den Hintergrund dieser Brandsaison in Erinnerung zu rufen.

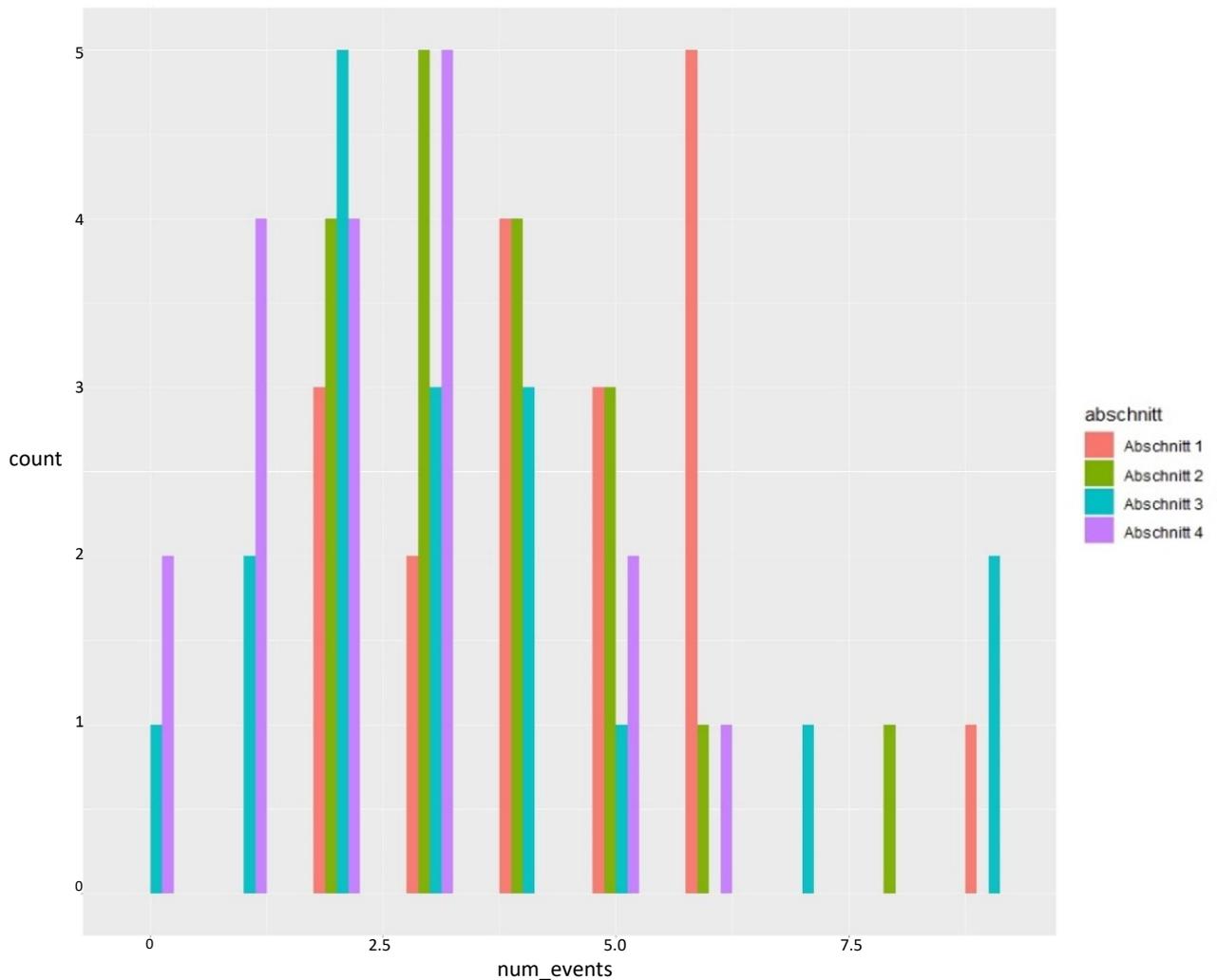


Abbildung 11: Histogramm von AbER-Brandfällen im Zeitraum 2014 bis 2019 nach Abschnitten.

Zur Klarstellung wird ausdrücklich festgehalten, dass es sich dabei zunächst nicht um Selbstentzündungen, sondern um generell aufgetretene Brandfällen in AbER-Betrieben handelt, da die Erkenntnisse aus den generell in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft auftretenden Brandfällen die Ausgangssituation für AbER-Selbstentzündungen darstellen. Wie im Kapitel zur Methodik bereits erläutert, wurden die zwölf Monate eines jeden Jahres auf Abschnitte unterteilt. Bereits grafisch ist zu erkennen, dass eine besonders hohe Anzahl an Ereignissen ausschließlich in Abschnitt 1, also in den Monaten Juni, Juli und August, aufgetreten ist. Wiederum in Einklang mit den im Literaturteil erwähnten Erwartungen finden sich Brandereignisse erfahrungsgemäß im kältesten Abschnitt weiter links im Diagramm, also in den Klassen mit niedriger Anzahl beobachteter Brandfälle je Monat. Die Abschnitte 2 und 3 sind in nachvollziehbarer Weise etwas nach rechts verschoben, also in Klassen höherer Anzahl beobachteter Ereignisse. Die Ansicht des Histogramms wird verdeutlicht, wenn dieses getrennt nach den Abschnitten gemäß Abbildung 12 aufgetragen wird. Die Variable *num_events* auf der Horizontalachse der Abbildungen 11 und 12 beschreibt die beobachtete Anzahl an Brandereignissen je Monat, auf der y-Achse ist die Zählweise des jeweiligen Abschnitts aufgetragen. Während im warmen Abschnitt 1 die Zählweise des Histogramms mit zunehmender Anzahl an Brandfällen steigt, sinkt diese in Abschnitt 4 nach rechts ab. Dieser Trend ist im Allgemeinen auch für die Abschnitte 2 und 3 festzuhalten.

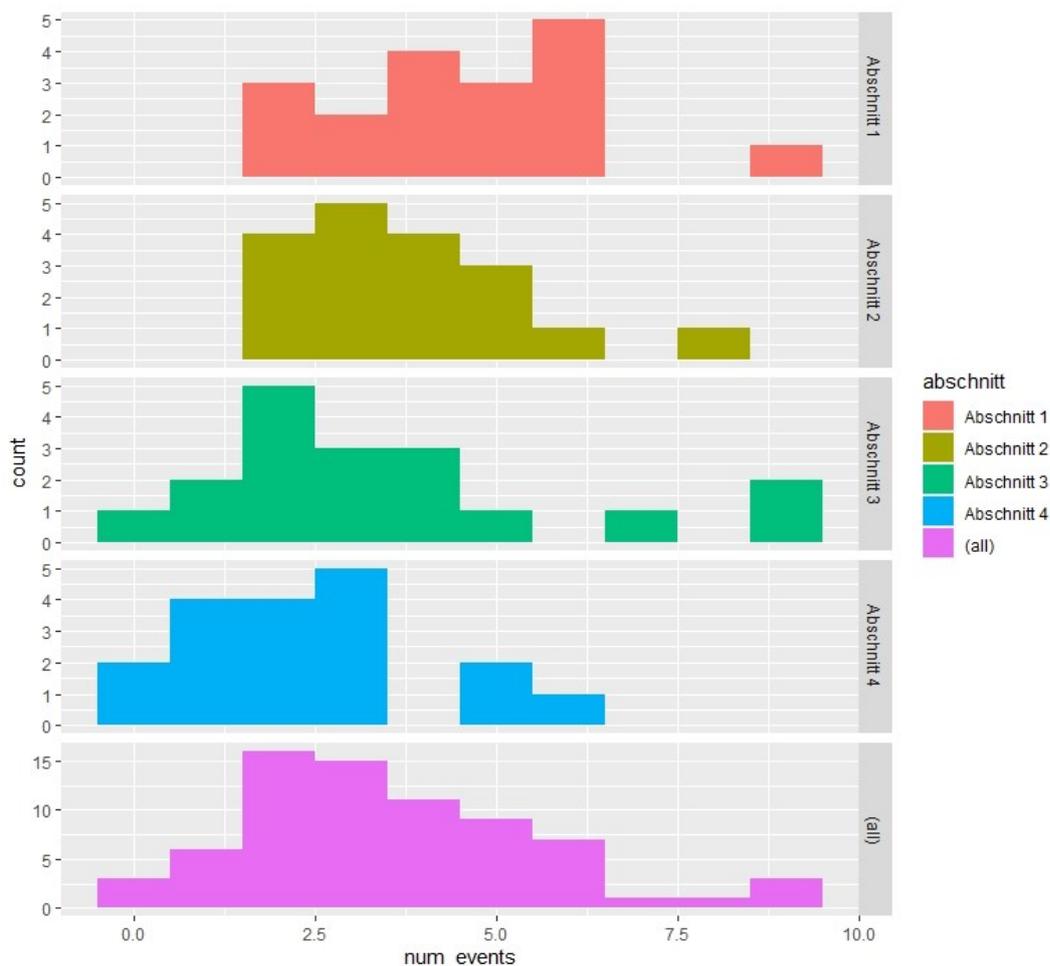


Abbildung 12: Histogramme von AbER-Brandfällen im Zeitraum 2014 bis 2019 (gegliedert).

Die ab dem Jahr 2014 und in Zählzeiten pro Monat aufbereiteten Brandereignisse wurden in weiterer Folge der Poisson-Regression unterzogen. Ziel war hierbei, die Anzahl der Brandereignisse nicht durch Wetterparameter, sondern lediglich durch die Monate des Auftretens, zusammengefasst in Abschnitten, entsprechend den Erkenntnissen aus der Literatur zu beschreiben. Dazu wurde zunächst die in Tabelle 8 ersichtliche Basisauswertung der Daten erstellt. Anzumerken ist, dass die Parameter *avg_t* und *avg_prec* für die nunmehr durchgeführte Analyse keine Bedeutung besitzen. Demnach kam es im Zeitraum 2014 bis 2019 in der österreichischen Abfallwirtschaft im Mittel zu 3,6 Brandereignissen pro Monat. Der Maximalwert lag bei neun aufgetretenen Brandfällen pro Monat. Die Variable *niveau* beschreibt die Anzahl der Brandfälle (*num_events*) in den jeweiligen, im Teil Methodik vorgestellten Klassen. Die meisten Monate liegen dem Mittelwert entsprechend in Stufe 2 vor.

Tabelle 8: Deskriptive Zusammenfassung der analysierten Datensätze.

num_events	avg_t	avg_prec	abschnitt	niveau
Min. :0.000	Min. :-5.700	Min. : 18.00	Abschnitt 1:18	Stufe 1: 9
1st Qu.:2.000	1st Qu.: 2.150	1st Qu.: 65.25	Abschnitt 2:18	Stufe 2:42
Median :3.000	Median : 8.050	Median : 86.00	Abschnitt 3:18	Stufe 3:16
Mean :3.556	Mean : 8.256	Mean : 90.44	Abschnitt 4:18	Stufe 4: 5
3rd Qu.:5.000	3rd Qu.:14.725	3rd Qu.:110.00		

num_events	avg_t	avg_prec	abschnitt	niveau
Max. :9.000	Max. :19.500	Max. :174.00		

Die untenstehende Tabelle 9 zeigt die zusammenfassende Statistik für die Abschnitte eins bis vier. Da die Mittelwerte über die Abschnitte hinweg zu variieren scheinen, ist davon auszugehen, dass die Variable *abschnitt* ein geeigneter Prädiktor ist, um die Anzahl an Brandereignissen in Abhängigkeit der Monatscluster zu beschreiben. Bei den eingeklammerten Werten in Tabelle 9 handelt es sich um die Varianzen.

Tabelle 9: Darstellung der Mittelwerte von Brandfällen je Abschnitt.

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
M (SD) = 4.56 (1.82)	M (SD) = 3.78 (1.59)	M (SD) = 3.50 (2.57)	M (SD) = 2.39 (1.69)

Im Anschluss zu den Basisauswertungen, die gerade vorgestellt wurden, wurde eine Poisson-Regression mit der abhängigen Variablen *num_events* gegen die beschreibende Variable *abschnitt* durchgeführt. Um die Passung des Modells zu erheben, muss dieses mit einem theoretischen Modell verglichen werden, welches die Daten ideal abbildet. Dies wird durch die Abweichung der Residuen beschrieben, die in Tabelle 10 dargestellt ist. Da die Medianabweichung nahe null ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Modell keine groben Verzerrungen aufweist (Friendly 2015).

Tabelle 10: Abweichung der Residuen des Regressionsmodells.

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.6458	-0.8727	-0.259	0.4348	2.4495

In Tabelle 11 sind die Poisson-Regressionskoeffizienten für jede der Variablen sowie Standardfehler, z-Werte, p-Werte und 95%-Konfidenzintervalle für die Koeffizienten dargestellt. Die Koeffizienten wurden als Ergebnis der Regression erhalten. Im Modell wird der erste Abschnitt als Basis herangezogen, der Parameter *Estimate* wird relativ zur Basis gemessen. Es handelt sich bei den Werten um die logarithmierten Differenzwerte. Der *Estimate*-Wert für die Variable Abschnitt 3 ist beispielsweise die erwartete logarithmierte Differenz zwischen Abschnitt 1 und Abschnitt 3. Die erwartete Zählwert nimmt demnach für Abschnitt 2 um 0,18 ab. Analog dazu nimmt diese bezugnehmend auf die Basis in Abschnitt 4 um 0,64 ab. Hochsignifikant sind dabei die geschätzten Werte für Abschnitt 1 und Abschnitt 4.

Tabelle 11: Ergebnisse des Regressionsverfahrens.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	signif. code
(Intercept)	1.5163	0.1104	13.731	< 2e-16	***
abschnitt_Abschnitt 2	-0.1872	0.164	-1.141	0.253692	
abschnitt_Abschnitt 3	-0.2636	0.1675	-1.573	0.115648	
abschnitt_Abschnitt 4	-0.6455	0.1883	-3.428	0.000607	***

Die Güte des Modells kann mittels des AIC (Akaike-Information-Criterion) verglichen werden (Long und Freese 2014). Würde die Regression etwa gegen mehrere beschreibende Variablen durchgeführt, müsste dies zu einem niedrigeren AIC führen, sofern die Parameter

in der Lage sind, die abhängige Variable besser zu beschreiben. An dieser Stelle ist anzumerken, dass im Poisson-Modell keine weiteren Wetterparameter als Prädiktoren für die Anzahl an Brandereignissen herangezogen werden konnten, da diese untereinander korrelieren würden. Mit der beschreibenden Variablen *abschnitt* konnten die besten Modellergebnisse erzielt werden. Die Modellparameter sind in Tabelle 12 angeführt.

Tabelle 12: Übersicht der Analyse der Modellgüte.

Null deviance	90.274 on 71 degrees of freedom
Residual deviance	77.569 on 68 degrees of freedom
AIC	297.02

Im Übrigen werden die in Tabelle 13 angeführten Abweichungen der Residuen angegeben. Die Restabweichung ist die Differenz zwischen der Abweichung des aktuellen Modells und der maximalen Abweichung des idealen Modells, bei dem die vorhergesagten Werte mit den beobachteten Werten identisch sind, wie bereits weiter oben erwähnt. Wenn die Residualabweichung klein genug ist, ist der Test der Anpassungsgüte nicht signifikant. Die Nullhypothese lautet, dass das Modell korrekt spezifiziert ist und aufgrund des p-Wertes von 0,2 wird diese nicht abgelehnt. Es besteht also Grund zur Annahme, dass das Modell in diesem Fall einigermaßen passend ist, da der Chi-Quadrat-Test der Anpassungsgüte statistisch nicht signifikant ist (Friendly 2015).

Tabelle 13: Darstellung der Güte des Modells anhand des Chi-Quadrat-Tests.

res.deviance	df	p
77.56872	68	0.200042

Tabelle 14 zeigt die Inzidenzen für die verschiedenen Abschnitte. Im Falle des Abschnittes 2 entspricht diese dem 0,82-fachen der Referenzgruppe, Abschnitt 1. Wiederum die niedrigste Inzidenz findet sich in Abschnitt 4, mit dem 0,52-fachen des Referenzabschnittes (Long und Freese 2014). Entsprechend der zuvor logarithmiert dargestellten Erwartungswerte sind diese nun als Schätzwerte abgebildet. Zur Veranschaulichung soll das folgende Beispiel dienen. Der in Tabelle 13 vorgestellte Wert für *abschnitt 1* (Intercept) beträgt 1,51. Daraus ergibt sich der Wert von 4,55, wie unten beispielhaft mit Formel 6 berechnet. Die verwendeten Ausdrücke wurden bereits im Literaturteil beschrieben.

$$\lambda_{abschnitt1} = \exp(\beta_{abschnitt1}) = e^{1,51} = 4,56 \quad (6)$$

Tabelle 14: Ergebnis der Modellschätzung für die Abschnitte 1 bis 4.

	Estimate	Robust SE	LL	UL
(Intercept)	4.555556	0.41738621	3.8067264	5.4516884
abschnitt_Abschnitt 2	0.8292683	0.11038247	0.6388384	1.076463
abschnitt_Abschnitt 3	0.7682927	0.14726218	0.5276792	1.1186221
Abschnitt_Abschnitt 4	0.5243902	0.09740778	0.3643655	0.7546958

Wie im Literaturteil dieser Masterarbeit bereits anhand der Brandereignisse in AbER-Betrieben ausführlich beschrieben, treten die meisten Brandfälle in den auf die Temperatur bezogen wärmeren Monaten auf und fallen, zumindest unter Betrachtung der Mittelwerte, sukzessive ab, sodass diese mit im Schnitt lediglich 2,39 Brandfällen pro Monat in Abschnitt 4 mit rund 1,2 Ereignissen unter dem Durchschnitt abschließen. Die grafische Darstellung des Ergebnisses ist aufgrund der Regression gegen die kategoriale Variable konstant, da der Maximum-Likelihood einer Poisson-Verteilung der Mittelwert der betrachteten Variablen ist. Abbildung 13 stellt die kumulierten Ergebnisse der Poisson-Regression für AbER-Brandereignisse zwischen 2014 und 2019 grafisch dar.

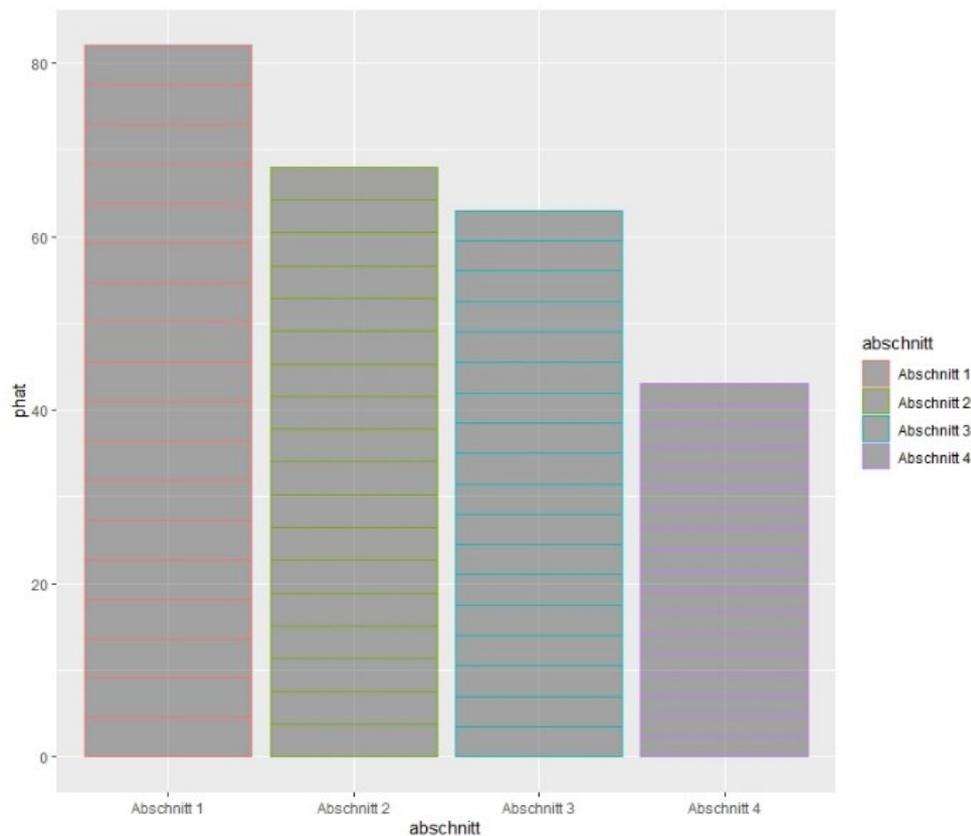


Abbildung 13: Kumulierte Branderwartungswerte der Ereignisse nach Abschnitten.

Zusammenfassend kann aufgrund der eben vorgestellten Ergebnisse festgehalten werden, dass der hier definierte Abschnitt jedenfalls eine geeignete Prädiktorvariable für die Anzahl an Brandereignissen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft darstellt. Es ist zunächst die Untersuchung anzustellen, ob die Brandsaison gleichermaßen auf Selbstentzündungen zutrifft, da die Verteilung der Brandereignisse nicht zwangsweise der Verteilung der Selbstentzündungen entsprechen muss. Daher wurden nun die Selbstentzündungsereignisse hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens in den bekannten Abschnitten untersucht. Um eine repräsentative Stichprobe zu wählen, wurden dieses Mal auch Aufzeichnungen herangezogen, die nicht öffentlichen Quellen entstammen und vom Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft bereitgestellt wurden.

Analyse der Selbstentzündungsereignisse

Analog zum Modell für Brandfälle sämtlicher Entstehungsursachen werden nachfolgend die Ergebnisse für Brandfälle, welche lediglich durch Selbstentzündung verursacht wurden, präsentiert. Zunächst folgt dies in Darstellung einer Zeitreihe. Die in Tabelle 15 dargestellten Daten wurden für die folgende Darstellung der Zeitreihenkomponenten der Selbstentzündungen verwendet.

Tabelle 15: Datensatz der je Monat vorliegenden Selbstentzündungen von 2014 bis 2019.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Summe
2014	0	0	0	1	1	0	3	1	2	0	3	4	15
2015	0	0	0	3	1	0	0	4	0	0	0	1	9
2016	0	0	0	1	1	1	0	3	1	1	1	0	9
2017	2	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	1	7
2018	1	0	1	1	1	1	3	0	1	0	0	0	9
2019	0	0	3	2	0	1	2	1	1	1	2	0	13
Summe													62

Die Reihe wurde in weiterer Folge in ihre Bestandteile, nämlich Trend, Saisonkomponente und Zufallskomponente, unterteilt und dargestellt. Die zackig verlaufende Saisonkomponente in Abbildung 14 zeigt, dass die Hochpunkte jeweils zur Jahresmitte auftraten. Der Trend steigt im Mittel von 2016 bis 2019 an.

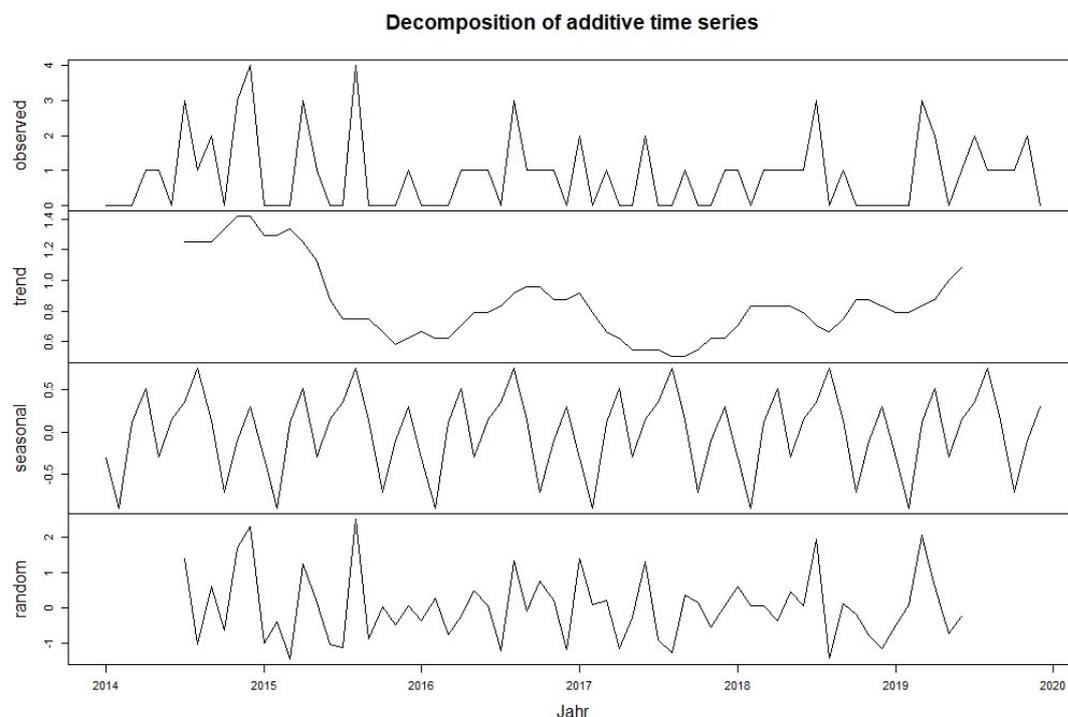


Abbildung 14: Dekomposition der Zeitreihe von Selbstentzündungen ab dem Jahr 2014.

Sowohl Zufalls- als auch Saisonkomponente verlaufen stationär. Da in weiterer Folge aber keine Prognose von zukünftigen Selbstentzündungsereignissen von Interesse war, wurden diesbezüglich keine weiteren Untersuchungen angestellt.

Das Histogramm in Abbildung 15 zeigt wiederum die Verteilung der Selbstentzündungen nach Abschnitten. Demzufolge sind wenige bzw. null Selbstentzündungen am öftesten gezählt worden. Daher ist das Histogramm entsprechend linkslastig. Am häufigsten wurden dabei null Ereignisse im kältesten Abschnitt gezählt. Sowohl in den Monaten Dezember, Jänner und Februar (Abschnitt 4) als auch im wärmsten Abschnitt wurden zumindest einmal vier Selbstentzündungen gezählt, also sowohl im kältesten als auch im wärmsten Abschnitt.

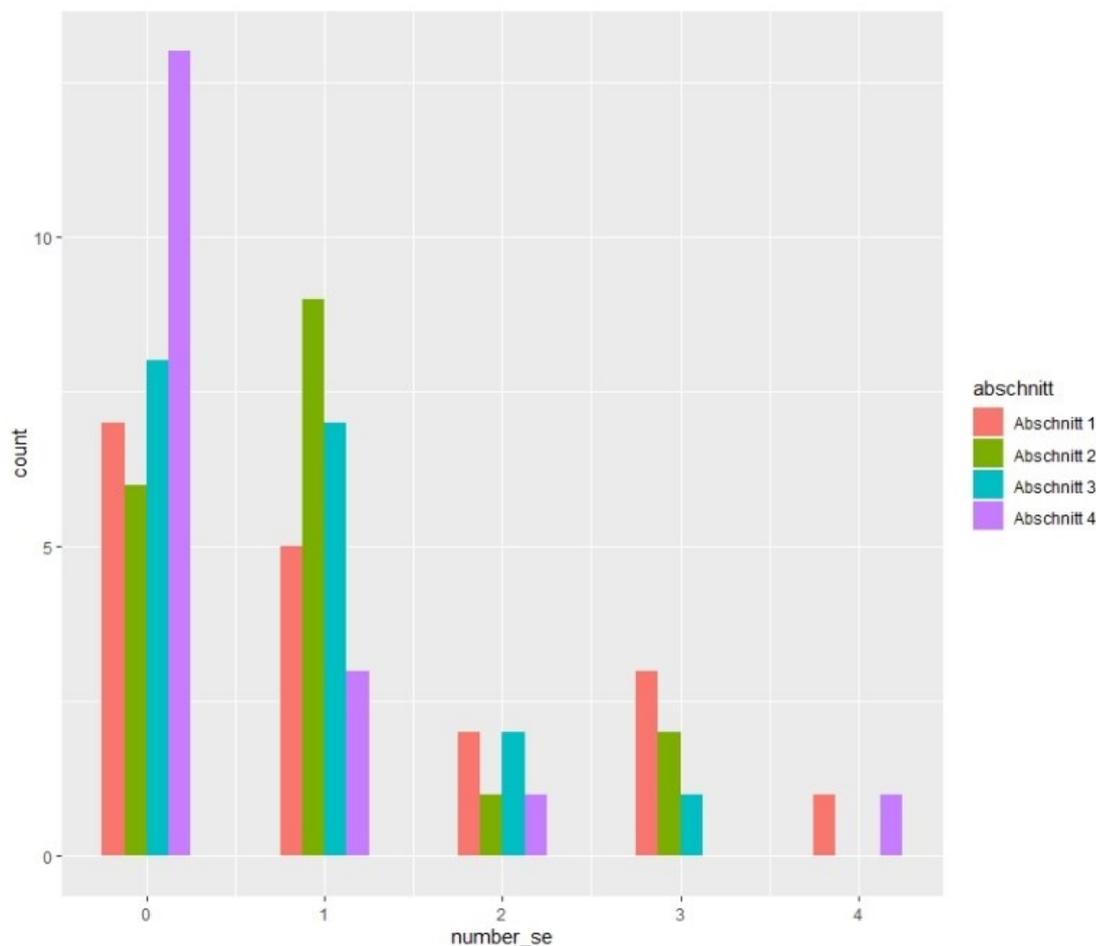


Abbildung 15: Histogramm der gezählten Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019.

Die Verteilung wird wiederum deutlicher erkenntlich, wenn die Abschnitte einzeln, wie in Abbildung 16, betrachtet werden.

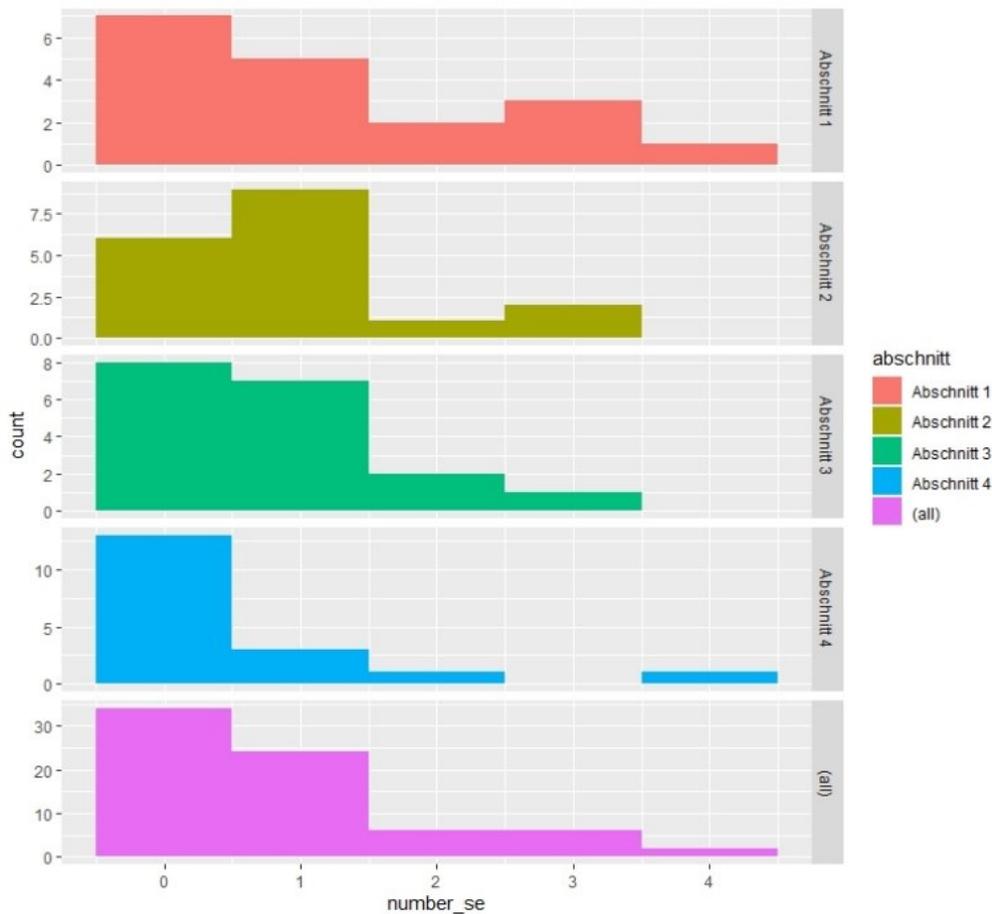


Abbildung 16: Histogramm der gezählten Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019 in separater Darstellung nach Abschnitten.

Tabelle 16 zeigt wiederum die deskriptive Auswertung der zugrunde liegenden Daten. Im Mittel kommt es demnach zu 0,86 Selbstentzündungen pro Monat, das Maximum liegt bei vier gezählten Fällen, wie auch aus dem Histogramm zuvor ersichtlich.

Tabelle 16: Deskriptive Auswertung der für die Regression herangezogenen Daten.

number_se	abschnitt	avg_t	ns_mm
Min. :0.0000	Abschnitt 1:18	Min. :-5.700	Min. : 18.00
1st Qu.:0.0000	Abschnitt 2:18	1st Qu.: 2.150	1st Qu.: 65.25
Median :1.0000	Abschnitt 3:18	Median : 8.050	Median : 86.00
Mean :0.8611	Abschnitt 4:18	Mean : 8.256	Mean : 90.44
3rd Qu.:1.0000		3rd Qu.:14.725	3rd Qu.:110.00
Max. :4.0000		Max. :19.500	Max. :174.00

Die meisten Brandfälle traten im Mittel wiederum in den Monaten Juni, Juli und August auf, wie in Tabelle 17 gezeigt wird.

Tabelle 17: Mittelwerte für Selbstentzündungsereignisse nach Abschnitt ab 2014.

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
M (SD) = 1.22 (1.31)	"M (SD) = 0.94 (0.94)"	"M (SD) = 0.78 (0.88)"	"M (SD) = 0.50 (1.04)"

Aus Tabelle 16 ist ebenfalls ersichtlich, dass die Varianzen jedes Abschnittes größer sind als deren Mittelwerte. Daher wurde zunächst mit einer negativ-binomialen Regression weitergearbeitet, da diese Überdispersion zulässt. Zur Erinnerung wird nochmals erwähnt, dass der Poisson-Regression die Annahme zugrunde liegt, dass die Varianzen ungefähr den Mittelwerten entsprechen. Wiederum sind die in Tabelle 18 dargestellten Abweichung der Residuen im Mittel nahe an null, was für die Güte des Modells spricht.

Tabelle 18: Abweichung der Residuen des Regressionsmodells.

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.4551	-1.1892	-0.1818	0.218	2.708

Die Koeffizienten der jeweiligen Abschnitte, wiederum mit Abschnitt 1 als Basis, sind in Tabelle 19 dargestellt. Erneut sinken die erwarteten log-Zahlen mit steigendem Abschnitt. Lediglich die Anzahl der Brandereignisse in Abschnitt 4 weicht signifikant von den anderen Werten ab. Die Güte des Modells ist allerdings an dieser Stelle zu hinterfragen.

Tabelle 19: Ergebnis des Regressionsmodells für Selbstentzündungen ab 2014.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	sign
(Intercept)	0.2007	0.2453	0.818	0.4134	
abschnitt_Abschnitt 2	-0.2578	0.3657	-0.705	0.4808	
abschnitt_Abschnitt 3	-0.452	0.3825	-1.182	0.2374	
abschnitt_Abschnitt 4	-0.8938	0.4313	-2.072	0.0382	*

Wie bereits erwähnt, wird bei negativen Binomialmodellen davon ausgegangen, dass die bedingten Mittelwerte nicht gleich den bedingten Varianzen sind. Diese Ungleichheit wird durch die Schätzung eines Dispersionsparameters erfasst, der in einem Poisson-Modell konstant gehalten wird. Zum Vergleich der Modelle mit Annahme einer negativ-binomialen Verteilung und Poisson-Verteilung wurde der Likelihood-Ratio-Test angewandt. Zu diesem Zweck wurde die Regression also wieder als Poisson-Modell ausgeführt, was bei Bezug der Ergebnisse auf das Negativbinomialmodell zu einem Log-Likelihood-Ratio von 0,224 führte. Unter Berücksichtigung des kritischen Wertes für ein 95 % -Konfidenzintervall und einem Signifikanzniveau von 5 % von 3,8414 für die Chi-Quadrat-Verteilung wird das Poisson-Modell für diese Daten bevorzugt, sodass das Poisson-Modell zur Schätzung besser geeignet scheint, obwohl, wie oben erwähnt, die Varianzen teilweise größer als die Mittelwerte sind. Die Hintergründe dafür, dass die Poisson-Verteilung trotz Varianzabweichungen besser zu den verwendeten Daten passt, sollen nicht Gegenstand dieser Masterarbeit sein. Festzuhalten ist allerdings, dass die Poisson-Regression große Robustheit gegenüber weiteren, nicht im Modell enthaltenen Einflussfaktoren besitzt. Der Gütetest des Modells ist wiederum in Tabelle 20 zusammengefasst. In diesem Fall gibt es aufgrund des p-Wertes von 0,03 Grund zur Annahme, dass die bereits erwähnte Nullhypothese des zugrundeliegenden abzulehnen ist, wenngleich die Mittelwerte der Abschnitte wieder deutlich variierten. Möglicherweise ist der Umfang der Daten aber zu gering, was später im Teil der Ergebnisdiskussion genauer erläutert wird.

Tabelle 20: Ergebnis des Chi-Quadrat-Test für die Anpassungsgüte der Regression von Selbstentzündungen ab 2014.

deviance	df	p
90.99361	68	0.03282444

An dieser Stelle muss vermutet werden, dass Selbstentzündungen den zugrundeliegenden Daten nach keine eindeutige Abhängigkeit gegenüber den definierten Abschnitten haben, wie es bei den Brandfällen sämtlicher Entstehungsursachen der Fall war. Gründe dafür werden später im Abschnitt der Ergebnisdiskussion thematisiert. Festzuhalten ist neuerlich, dass lediglich für Abschnitt 4 signifikante Zusammenhänge zu der Anzahl an Brandereignissen festgestellt werden konnten. Die Zusammenfassung des Regressionsmodells ist Tabelle 21 zu entnehmen.

Tabelle 21: Ergebnis des Regressionsmodells für Selbstentzündungen inklusive Standardfehler.

	Estimate	Robust SE	LL	UL
(Intercept)	1.2222222	0.41738621	0.755771	1.97656
abschnitt_Abschnitt 2	0.7727273	0.11038247	0.401176	1.488391
abschnitt_Abschnitt 3	0.6363636	0.14726218	0.316452	1.279683
abschnitt_Abschnitt 4	0.4090909	0.09740778	0.142751	1.172359

Grafisch werden die Ergebnisse der Poisson-Regression für Selbstentzündungen von Tabelle 21 in Abbildung 17 dargestellt.

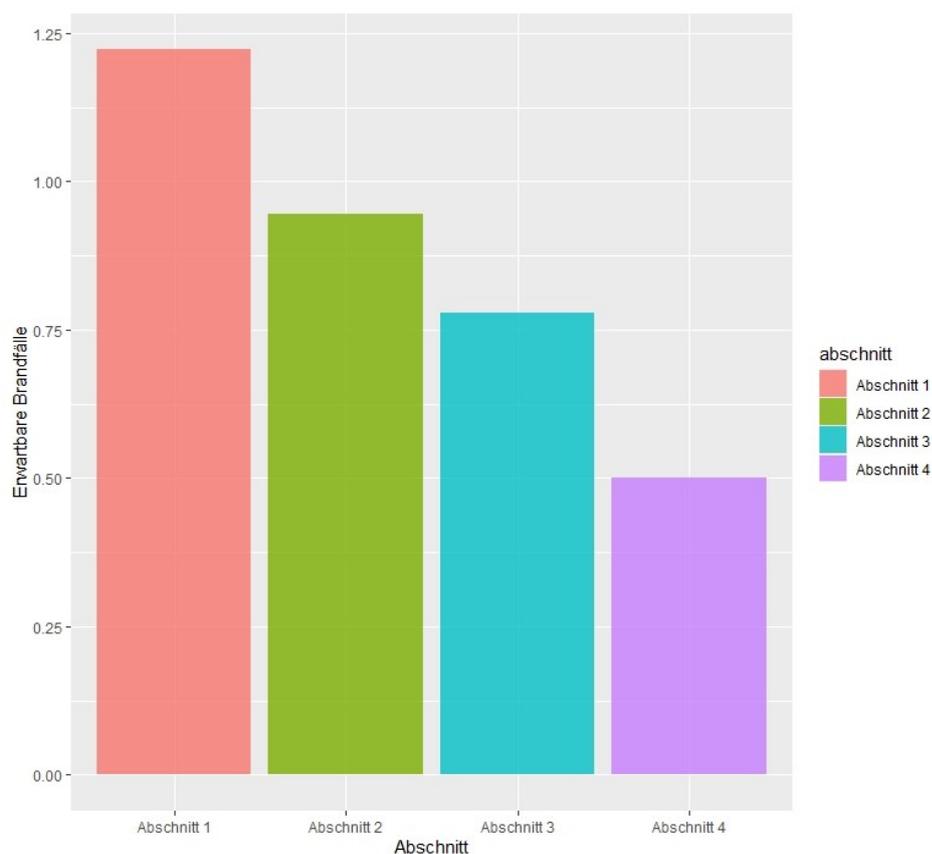


Abbildung 17: Erwartbare Brandfälle nach dem Regressionsmodell für Selbstentzündungen je Monat und Abschnitt.

Verlauf der Regressoren

Neben der bereits vorgestellten Methodik wurde auch ein linearer Ansatz verfolgt, um die erhobenen Wetterdaten abzubilden und auszuwerten. Die Verläufe der Regressoren diverser Wetterparameter wurden gebildet, da erwartet wurde, dass Selbstentzündungen nach zu definierenden Niederschlags- und Wärmephasen auftreten. Aufbauend auf der im Theorieteil vorgebrachten Literatur war die Untersuchung anzustellen, ob Niederschlagsphasen, gefolgt von einer Phase des Temperaturanstiegs die Wahrscheinlichkeit der Selbstentzündungen von abfallwirtschaftlichen Schüttungen erhöhen. Als problematisch stellt sich dabei bereits zu Beginn die vorhandene Datenlage heraus sowie die Frage, inwieweit eine Niederschlagsphase sowie Phasen des Temperaturanstiegs zu quantifizieren sind. Daher wurden zunächst aus der Datenbank des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft verfügbare Selbstentzündungsfälle herangezogen und die bereits im Abschnitt Methodik vorgestellten Parameter zu jedem Ereignis erhoben. Um nun grundsätzliche Trends in den Niederschlags- und Temperaturphasen identifizieren zu können, wurden diese für eine Variation an Tagen vor und bis zum jeweiligen Selbstentzündungsereignis einer linearen Regression unterzogen. Ziel war dabei aus den Regressoren eine Schwelle zu bilden, aus der denen die Phasen des Anstiegs von Temperatur oder Luftfeuchtigkeit definiert werden können, welche graphisch durch Splines geglättet werden könnten. So bedeutet beispielsweise ein negativer Regressor für das Vier-Tages-Intervall, dass der Wert der abhängigen Variablen sinkt. Es liegt über das Intervall ein abfallender Trend, etwa bezogen auf die Durchschnitts- oder Maximaltemperatur, vor. Nach Auswertung des zehntägigen Intervalls ist festzustellen, dass der Anstieg der durchschnittlichen Temperatur bis zum Brandereignis in 49 % der Fälle positiv ist. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit steigt in 51 % der Fälle, das sind 44 Ereignisse, während 52 % einen positiven Verlauf des Anstieges der maximalen Tagestemperatur aufweisen. Der Durchschnittswert des Regressors der Temperatur war mit 0,024 über den Zeitraum von zehn Tagen bis zum Brandereignis positiv. Das Datenset mit den Werten für vier Tage (drei Tage und der Tag des Brandereignisses) lieferte sowohl für die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit als auch für die Steigungen der Maximalwerte über die Tage im Durchschnitt positive Regressoren. Der Durchschnittsregressor für den Anstieg der maximalen Luftfeuchtigkeit ist mit -0,65 % negativ, der Regressor der durchschnittlichen Luftfeuchtigkeit steigt mit 0,93 % über das Vier-Tage-Intervall. Knapp negative durchschnittliche Abweichungen ergeben sich bei Betrachtung desselben Intervalls von Maximaltemperatur (-0,0065 °C) und Durchschnittstemperatur (-0,26 °C).

Von den beobachteten 87 Brandereignissen mit Selbstentzündung als Entstehungsursache gibt es bei den Temperaturparametern für die durchschnittliche Temperatur 38 positive Regressoren und somit 38 positive Steigungen. Im Gegensatz dazu sind 55 % der Regressoren für die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit positiv, 30 % oder in absoluten Zahlen 26 der Regressoren nehmen für die maximale Luftfeuchtigkeit einen positiven Wert an. Da sämtliche Verläufe ähnlich willkürliche Verläufe zeigen, wird die grafische Darstellung auf einen Verlauf beschränkt.

Dieses Ergebnis scheint nicht überzeugend, da – grob betrachtet – jeweils 50 % der Selbstentzündungsfälle positive Regressoren und 50 % negative Regressoren jeder Art

besitzen. Eine Glättung der Verläufe mit Splines, wie zu Beginn für möglich gehalten, erschien nicht zielführend und wurde nicht realisiert. Auf eine weitere Untersuchung in Richtung der zu Beginn aufgestellten Hypothese wurde in weiterer Folge verzichtet, da die derzeit verfügbaren Daten eine nähere Analyse nicht zuzulassen schienen. Der in Abbildung 18 dargestellte Verlauf zeigt die Regressoren der Durchschnittstemperaturen (t_{avg}) gegen die fortlaufenden Ereignisse für die Daten der Vier-Tages-Intervalle.

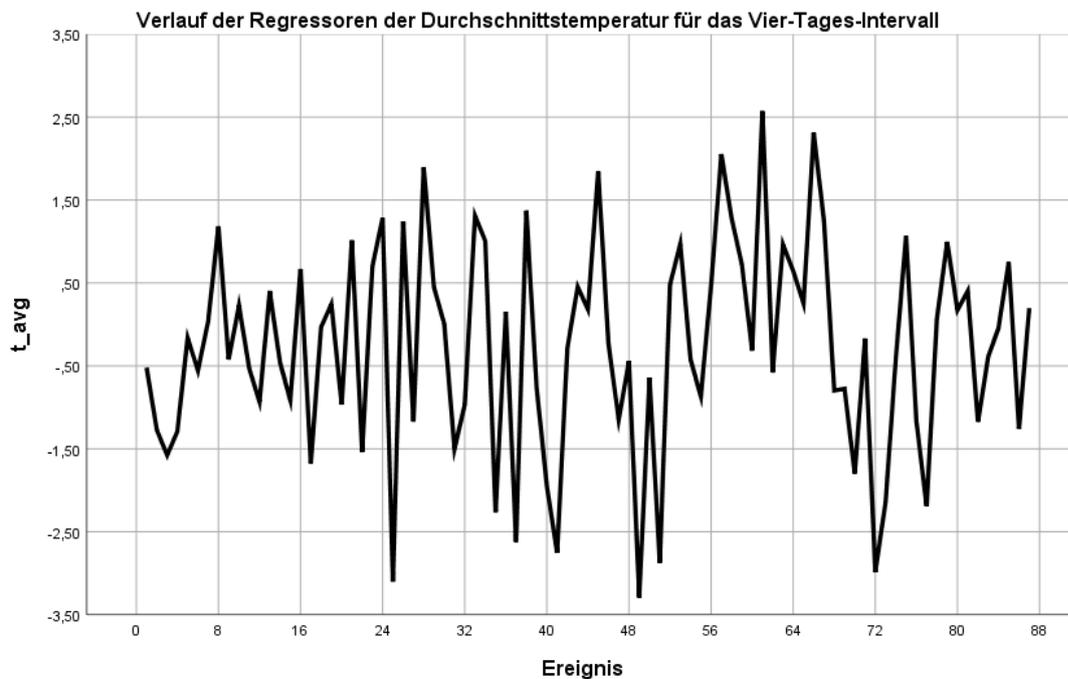


Abbildung 18: Verlauf der Regressoren der Durchschnittstemperaturen für das Vier-Tages-Intervall.

Im nächsten Kapitel folgt nun die Diskussion der Ergebnisse der Auswertungen, beginnend mit der Problemstellung im Rahmen derer die Brandereignisse im Erhebungszeitraum ausgewertet wurden.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Nachdem die Ergebnisse der beiden Problemstellungen vorgestellt wurden, wird auf diese in weiterer Folge eingegangen und auf zukünftige Möglichkeiten der Erhebung von Brandereignissen sowie der Beschreibung von Einflussgrößen auf Selbstentzündungen hingewiesen.

4.3.1 Diskussion zur Erhebung von AbER-Brandfällen 2019/20

Vorweg muss erwähnt werden, dass sich der erläuterte beobachtete Anstieg in der Brandstatistik der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft fortsetzt. Im gegenständlichen Erhebungszeitraum wurden 70 Brandfälle aus öffentlich verfügbaren Quellen aufgezeichnet. Wie aus der vorgebrachten Literatur bekannt ist, sind auch im Zeitraum November 2019 bis Oktober 2020 die meisten Ursachen der Brandfälle unbekannt und entfallen rund 45 % der bekannten Brandfälle auf Selbstentzündungen. Batterien waren, entgegen der im Theorieteil erörterten und erwarteten Probleme, zumindest als Primärfraktion

ein selten an Bränden beteiligtes Abfallgut. Dies könnte wie besprochen mit dem hohen Anteil unbekannter Brandursachen zusammenhängen. Erwartungsgemäß war Restmüll auch in diesem Erhebungszeitraum die am häufigsten in Brand gesetzte Fraktion. Der sich fortsetzende, linear abbildbare Trend ($R_{Trendlinie}^2 = 0,94$) der Brandstatistik ist in Abbildung 19 gezeigt.

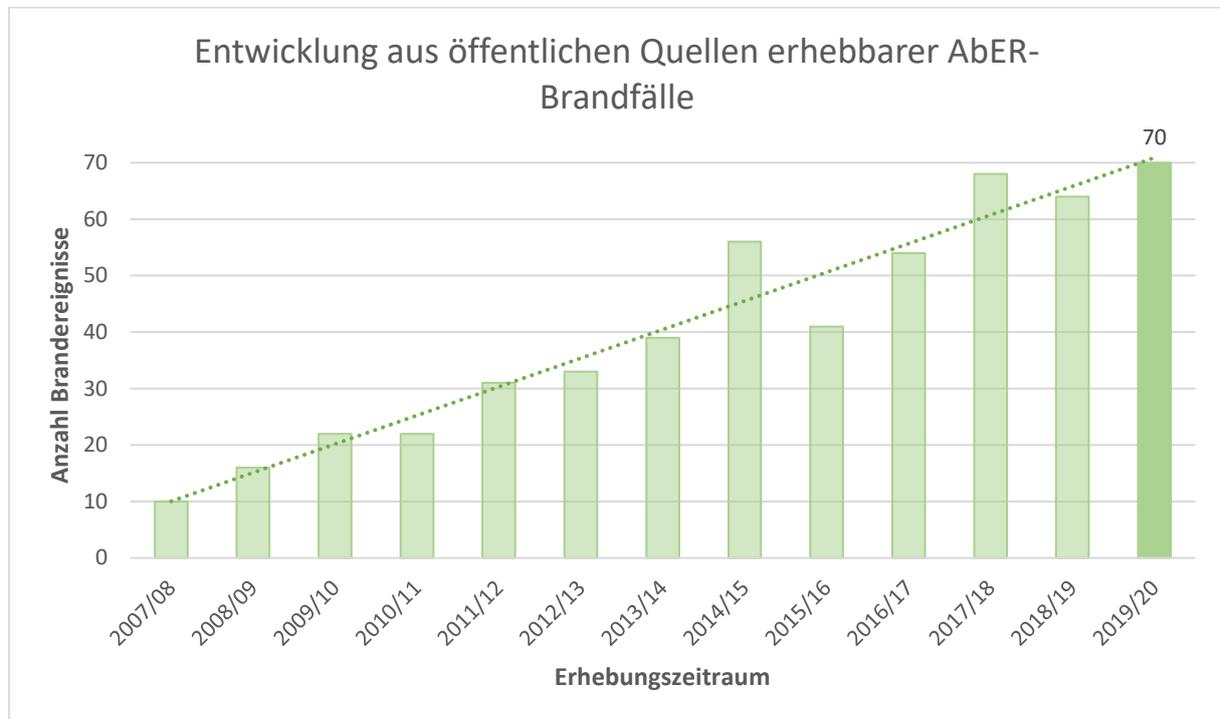


Abbildung 19: Entwicklung der Brandfälle aus öffentlich verfügbaren Quellen ab dem Jahr 2007.

Nicht außer Acht gelassen werden darf die mögliche Dunkelziffer an erfassten Brandfällen, da durch die Digitalisierung und der damit verbundenen, vermehrten Online-Berichterstattung mehr Brandereignisse zugänglich sein dürften. Analog zur im Ergebnisteil erläuterten Branddichte nach Bundesländern kann diese ebenfalls unter Bezug auf das Abfallaufkommen von Siedlungsabfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen je Bundesland veranschaulicht werden. Diese belaufen sich gemäß der Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich auf etwa 4,5 Millionen Tonnen im Jahr 2019. Das größte Aufkommen in kg pro Einwohner (EW) findet sich im Burgenland mit $569 \frac{kg}{EW}$, am wenigsten Abfall dieser Fraktion fällt pro Kopf in Vorarlberg mit lediglich $376 \frac{kg}{EW}$ an. Die Branddichte, bezogen auf den Anfall an Siedlungsabfällen, ist in Abbildung 20 dargestellt. Bis auf geringfügige Abweichungen ist diese Karte, aufgrund der logischen Korrelation der Menge an Siedlungsabfällen und Einwohnern, fast substitutiv für die Bevölkerungsanzahl verwendbar. Lediglich in Vorarlberg kommt es bezogen auf die Abfallmenge zu deutlich mehr Brandereignissen als unter Bezugnahme auf die Bevölkerungsanzahl. Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass für die Daten nur die Fraktionen Siedlungsabfall und ähnlicher Gewerbeabfall der im Erhebungszeitraum angefallenen Brandereignisse zur Auswertung herangezogen wurden.

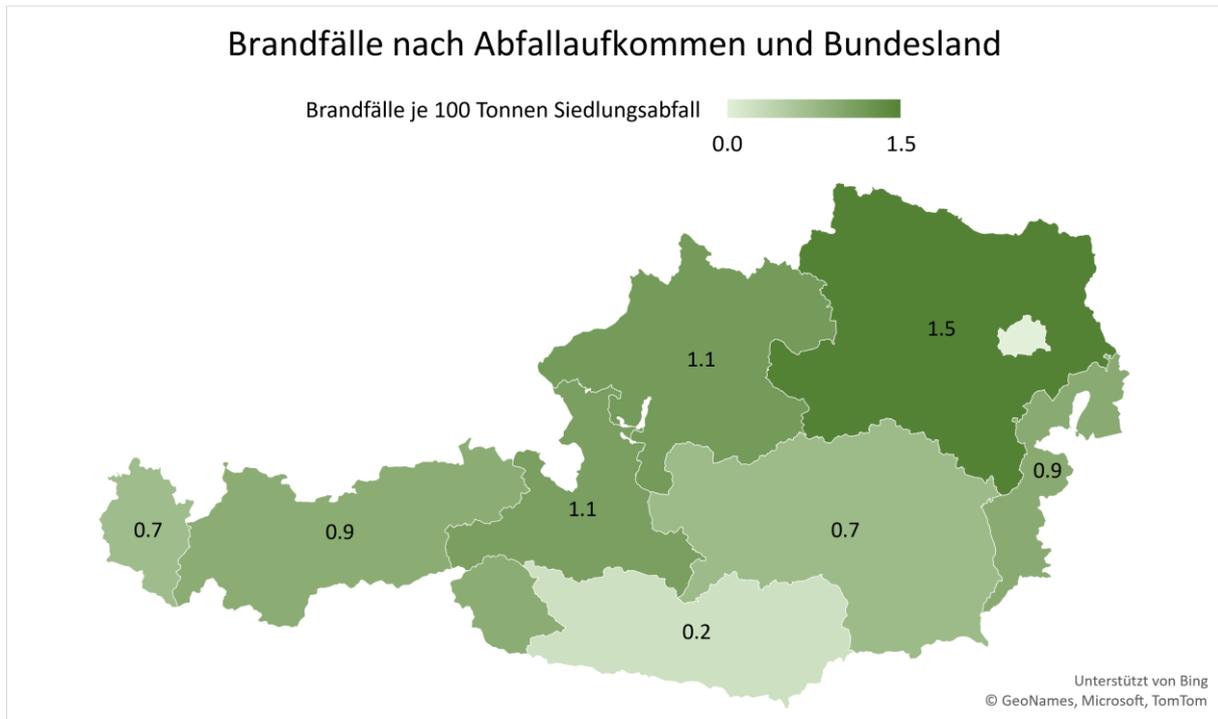


Abbildung 20: Brandfälle im Erhebungszeitraum nach Abfallaufkommen und Bundesland.

Im Gegensatz zur Beobachtung von Nigl et al. (2020), wonach es im Juli am häufigsten zu AbER-Brandfällen kommt, sind im Erhebungszeitraum im April zwölf und somit die meisten Brandfälle aufgetreten. Brandfälle an Wochenenden traten mit Abstand seltener auf als an den übrigen Wochentagen. Abbildung 10 im Ergebnisteil ist zu entnehmen, dass im Erhebungszeitraum lediglich 11,4 % der AbER-Brandfälle an Wochenenden auftraten. Die Verteilung der 285 aus der Literatur bekannten Brandfälle nach Wochentagen wird in Abbildung 21 dargestellt.

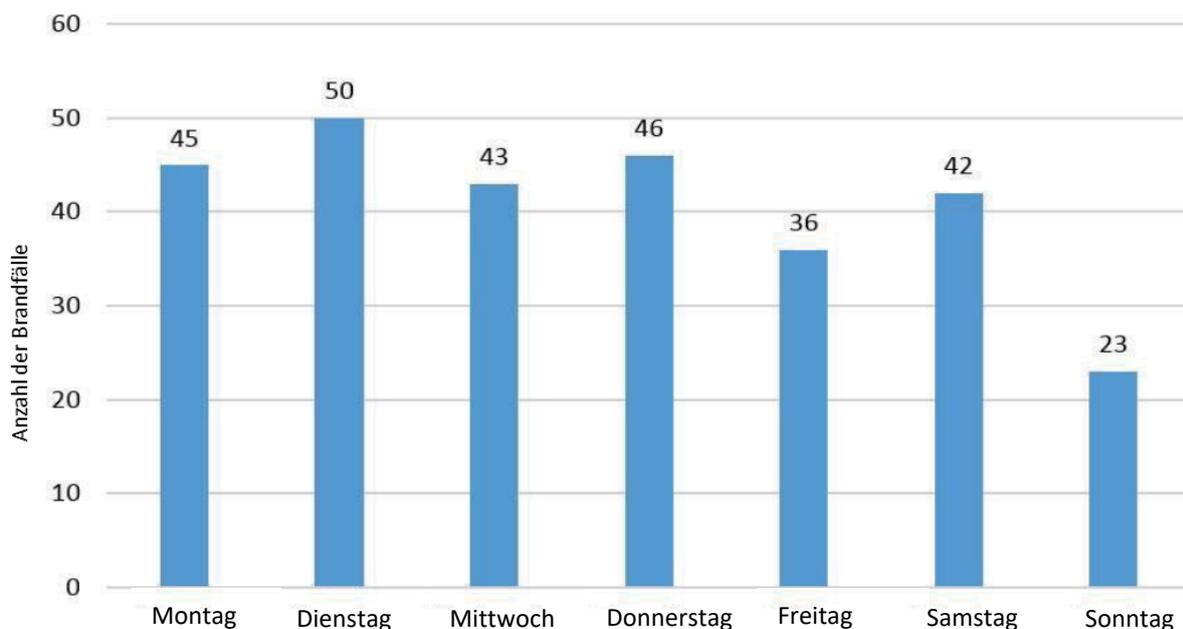


Abbildung 21: Anzahl der Brandfälle nach Wochentagen aus der Auswertung von Nigl et al. (2019).

Zur weiteren Klassifizierung von Brandfällen in der Abfallwirtschaft wäre eine weitere Ursachenerhebung notwendig, jedoch ist dies aufgrund der hohen Anzahl von 53 Brandereignissen unbekannter Ursache aus öffentlichen Quellen allein nicht möglich. Fraktionen, die am häufigsten an Selbstentzündungen beteiligt waren, sind Kunststoffabfälle und Restmüll. Erwartungsgemäß und wie in anderen westlichen Ländern ist Restmüll mit einem Anteil von 17 % die am häufigsten an Bränden beteiligte Fraktion. Im Erhebungszeitraum kam es zu 10 Brandfällen, die direkt in Müllwägen auftraten, was die Vermutung zulässt, dass es vermehrt zu mechanischen Beschädigungen von Abfallkörpern kommt, die sich aufgrund dessen entzünden. Mechanische Beschädigung scheint generell Ursache für die meisten Brandfälle zu sein, da auch Aggregate wie Ballenpressen, Shredder oder Sortieranlagen sieben Mal von Brandfällen betroffen waren. Im Vergleich dazu erfassten Nigl et al. (2019) knapp 38 % auf Lagerflächen, gefolgt von Transportaggregaten (23 %) und Abfallbehältern (16 %). Die meisten Fälle treten allerdings in Lageraggregaten mit 28 Brandfällen auf.

Bei der Betrachtung von Behandlungsanlagen wurde festgestellt, dass Brände am ehesten in Shreddern auftraten. Zudem wurde das Aggregat im Erhebungszeitraum als Brandentstehungsort lokalisiert. Wie in diesem Abschnitt konnten auch Nigl et al. (2019) den Großteil der im Rahmen der Brände entzündeten Fraktionen nicht näher bestimmen. Allerdings hatte die Fraktion Siedlungsabfall mit etwa 14 % einen beachtlichen Anteil, was wiederum auf die Heterogenität der Fraktion und der damit auftretenden, größeren Anzahl an Zündquellen zu tun hat. Während Nigl et al. (2020) in 18,8 % der Fälle Selbstentzündungen als Ursache erkannten, waren es dieses Mal rund 11,4 %. Das durchschnittliche Auftreten von Brandfällen an jedem fünften Tag zeigt die länderübergreifenden Gemeinsamkeiten des Auftretens von Brandfällen. So kam es bei den vorgestellten Daten zumindest einmal pro Woche zu einem Brand, der den Einsatz von Feuerwehr oder Rettung notwendig machte. Auch bei den durch die Erhebung aus öffentlichen Quellen erfassten Daten kann davon ausgegangen werden, dass diese jeweils den Einsatz von Blaulichtfahrzeugen zur Folge hatten. Wenn man das Eintreten von Brandfällen im Erhebungszeitraum mit der Grundgesamtheit vergleicht, ist zu erkennen, dass sich im Erhebungszeitraum noch einmal wesentlich weniger Brandfälle an Wochenenden ereigneten.

Die Erhebung der Ereignisse mit Suchmaschinen wird zwar den Großteil der in Österreich im Erhebungszeitraum aus öffentlichen Quellen erhebbaren Brandfälle abdecken, jedoch kann die Dunkelziffer nicht deklariert werden. Brände, die kein wesentliches Schadensausmaß verursachen oder bei denen es zu keinen Personenschäden kam, sowie Fälle, in denen es zu keinen Feuerwehreinsätzen gekommen ist, werden wohl seltener Teil der öffentlich zugänglichen Berichterstattung sein. Diese wären aber auch fundamental für die Ursachenanalyse, insbesondere der Brandentstehungsursachen von Selbstentzündungen. Speziell in der Vergangenheit wird es mangels fortgeschrittener Digitalisierung zu einer wesentlichen Dunkelziffer bei der Aufzeichnung von Brandereignissen gekommen sein. Dennoch ist der Trend einer steigenden Brandstatistik nicht zu verkennen, insbesondere weil die gezählten AbER-Brandereignisse, welche einen Feuerwehreinsatz zur Folge hatten und mediales Echo erfahren hatten, spätestens ab dem Erhebungszeitraum 2014/15 als repräsentativ angenommen werden können. Der aktuelle Erhebungszeitraum weist im

Vergleich zu 2014/15 einen 1,7-fache Anzahl an Brandereignissen aus öffentlich verfügbaren Quellen auf.

Im nächsten Abschnitt werden nun die Ergebnisse der statistischen Auswertung bezüglich Einflussparametern auf AbER-Selbstentzündungen diskutiert.

4.3.2 Diskussion zur Ursachenermittlung von Selbstentzündungen

Die Untersuchung der Selbstentzündungen nach wetterbedingten Einflussgrößen stellte sich als äußerst komplex heraus. Wie von Mikalsen et al. (2021) festgestellt wurde, musste auch in diesem Fall mit einer geringen Anzahl an Daten von Selbstentzündungen gearbeitet werden. Diese dezimierten sich bei der Erhebung noch weiter, da aus öffentlich verfügbaren Quellen nicht für alle Selbstentzündungsereignisse Wetterdaten für den entsprechenden Ort und das Datum erhebbare waren. Zahlreiche Versuche, Wetterparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck oder Windstärke in Zusammenhang mit den Selbstentzündungsereignissen zu setzen, konnten mangels Verfügbarkeit essenzieller Daten nicht ausgewertet werden. Im Übrigen spiegeln die erhobenen Wetterdaten niemals die tatsächlichen Wetterkonditionen wider, denen die abfallwirtschaftlichen Schüttungen im Aufbereitungs-, Lager- oder Transportaggregat ausgesetzt sind und waren. Die Verweilzeiten des von der Selbstentzündung betroffenen Abfalls sind meist gänzlich unbekannt. Des Weiteren muss bedacht werden, dass die Zusammensetzung der Schüttung im Laufe des Sammel- und Verwertungsprozesses veränderlich ist. Mechanische Beschädigungen von Batterien, etwa infolge von Fehlwürfen im Restmüll und aufgrund folgender Prozessschritte wie Kompaktierung oder Zerkleinerung, sind dabei nicht auszuschließen, sondern treten vermehrt auf. Die Poisson-Regressionen der Brandfälle aller Entstehungsursachen zeigte jedoch signifikante Zusammenhänge für Abschnitt 1 und Abschnitt 4, sodass in den kälteren Monaten mit signifikant weniger Brandfällen gerechnet werden kann, während in den Sommermonaten Brandfälle signifikant häufiger erwartet werden.

Bei Verwendung der definierten Abschnitte als Prädiktoren für die Anzahl an Brandereignissen ist zu hinterfragen, ob die eigens gewählte Zuteilung der Kalendermonate die Ergebnisse beeinträchtigen. Um einen derartigen Einfluss zu überprüfen, wurden die Abschnitte neu variiert und die Regression mit generalisierten, linearen Modellen neu durchgeführt. Die Definition der Abschnitte wurde dementsprechend wie folgt gewählt:

- 1 = {Juli, August, September}
- 2 = {April, Mai, Juni}
- 3 = {Oktober, November, Dezember}
- 4 = {Jänner, Februar, März}

Im Wesentlichen besteht die Variation der Abschnitte somit aus der Zuteilung des Monats September zum temperaturmäßig „wärmsten“ Abschnitt. Wiederum wird das Poisson-Modell sowohl auf Brandfälle sämtlicher Entstehungsursachen und anschließend auf Selbstentzündungsereignisse angewandt. Das Ergebnis dieser Variation der Monatszuteilung für sämtliche Entstehungsursachen ist in Abbildung 22 mit dem Vergleich der ursprünglichen Verteilung dargestellt.

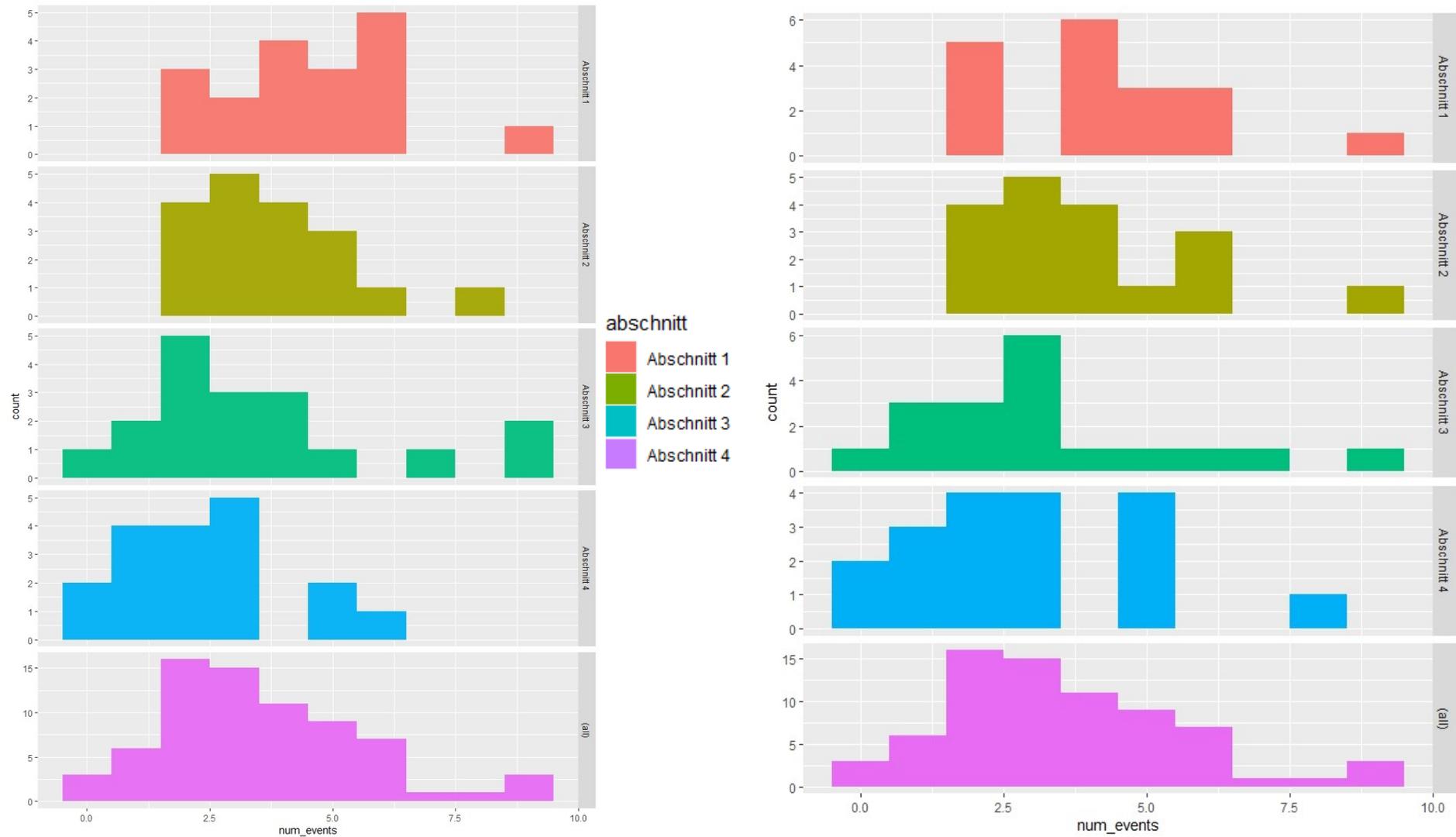


Abbildung 22: Verteilung der Brandfälle vor (links) und nach Variation der Abschnitte.

Wie der eben vorgestellten Abbildung entnommen werden kann, wurden zumindest zwei Brandereignisse in Abschnitt 3 am häufigsten gezählt. Wieder am deutlichsten nach rechts, also zu den häufigen gezählten Ereignissen verschoben ist Abschnitt 1, wenngleich das Maximum der neuen Verteilung in einer Klasse geringerer Anzahl an aufgezeichneten Ereignissen liegt. Die Mittelwerte der neuen Abschnitte sind Tabelle 22 zu entnehmen, welche sich im Vergleich zum ursprünglichen Modell optisch nur unwesentlich verändern.

Tabelle 22: Mittelwerte und Varianzen des Variationsmodells für AbER-Brandereignisse von 2014 bis 2019.

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
M (SD) = 4.22 (1.86)	"M (SD) = 3.94 (1.86)"	"M (SD) = 3.22 (2.29)"	M (SD) = 2.83 (2.09)

Entscheidend ist hinsichtlich der Auswertung, ob die Modellgüte ebenfalls für das variierte Modell gegeben ist. Zur Beurteilung wird analog zu den bisherigen Auswertungen der Chi-Quadrat-Test der Anpassungsgüte herangezogen, welcher mit einem p-Wert von 0,09 wiederum nicht signifikant ist. Ebenfalls in Analogie zum ursprünglichen Modell werden für die Abschnitte 1 und 2 signifikante Unterschiede in der Anzahl der Brandereignisse festgestellt. Diese sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Regressionsparameter des Variationsmodells für AbER-Brandereignisse von 2014 bis 2019.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	sign.
(Intercept)	1.44036	0.11471	12.557	<2e-16	***
Abschnitt_Abschnitt 2	-0.06805	0.16505	-0.412	0.6801	
Abschnitt_Abschnitt 3	-0.27029	0.17435	-1.55	0.1211	
Abschnitt_Abschnitt 4	-0.39891	0.18101	-2.204	0.0275	*

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der gewählte Ansatz selbst gegenüber einer Variation der Abschnittsgliederung robust ist. Wie erwähnt erfolgt dieser Vergleich mit den AbER-Selbstentzündungsereignissen. Die neuen Mittelwerte der Abschnitte sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Mittelwerte und Varianzen des Variationsmodells für AbER-Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019.

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
M (SD) = 1.28 (1.27)	"M (SD) = 0.94 (0.80)"	"M (SD) = 0.78 (1.17)"	"M (SD) = 0.44 (0.86)"

Da die in Abbildung dargestellte Verteilung bei Variation der Abschnitte nahezu unverändert bleibt (Abbildung 23), werden die Regressionsparameter nicht erneut dargestellt und für die Ergebnisse auf die ursprüngliche Auswertung verwiesen.

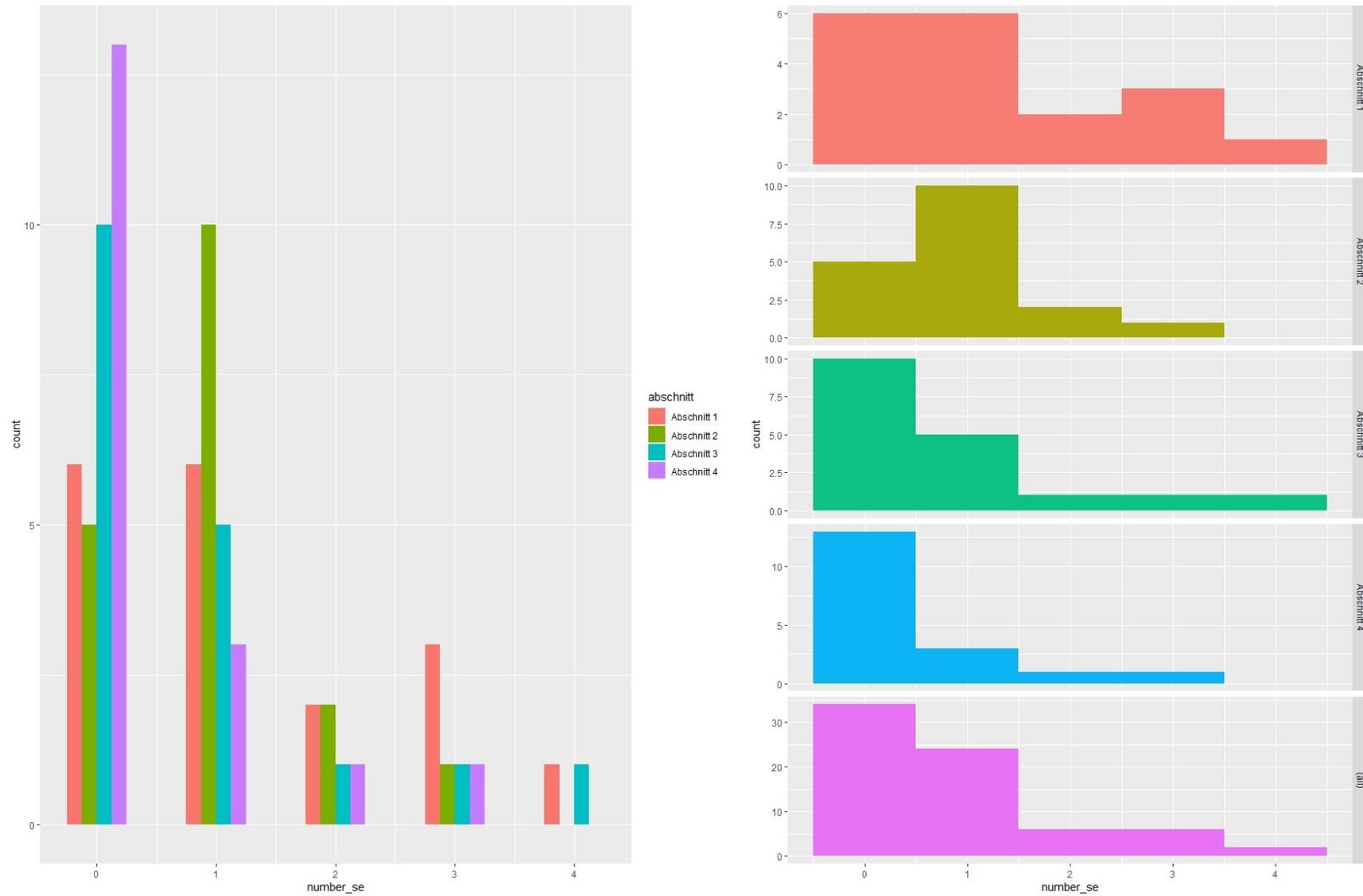


Abbildung 23: Verteilung der Selbstentzündungsereignisse nach Variation der Abschnitte.

4.3.3 Betrachtung historischer Selbstentzündungsdaten

Zunächst soll die deskriptive Auswertung der bereits in der Datenbank des AVAW vorliegenden Selbstentzündungsereignisse betrachtet werden. Aus den 112 Fällen ist ersichtlich, dass diese meist in Lager- oder Aufbereitungsaggregaten auftreten. Im Allgemeinen kann gemäß Abbildung 24 festgestellt werden, dass die relative Verteilung der von den Selbstentzündungen erfassten Fraktionen jenen der im Erhebungszeitraum 2019/20 erfassten Ereignisse sämtlicher Brandursachen gleicht. Wie gemäß der zu Beginn vorgebrachten Literatur zu erwarten ist, ist der Großteil (41 %) der entzündeten Fraktion Siedlungsabfall. In 8 % der Selbstentzündungsfälle war die von der Selbstentzündung erfasste Fraktion nicht erhebbar.

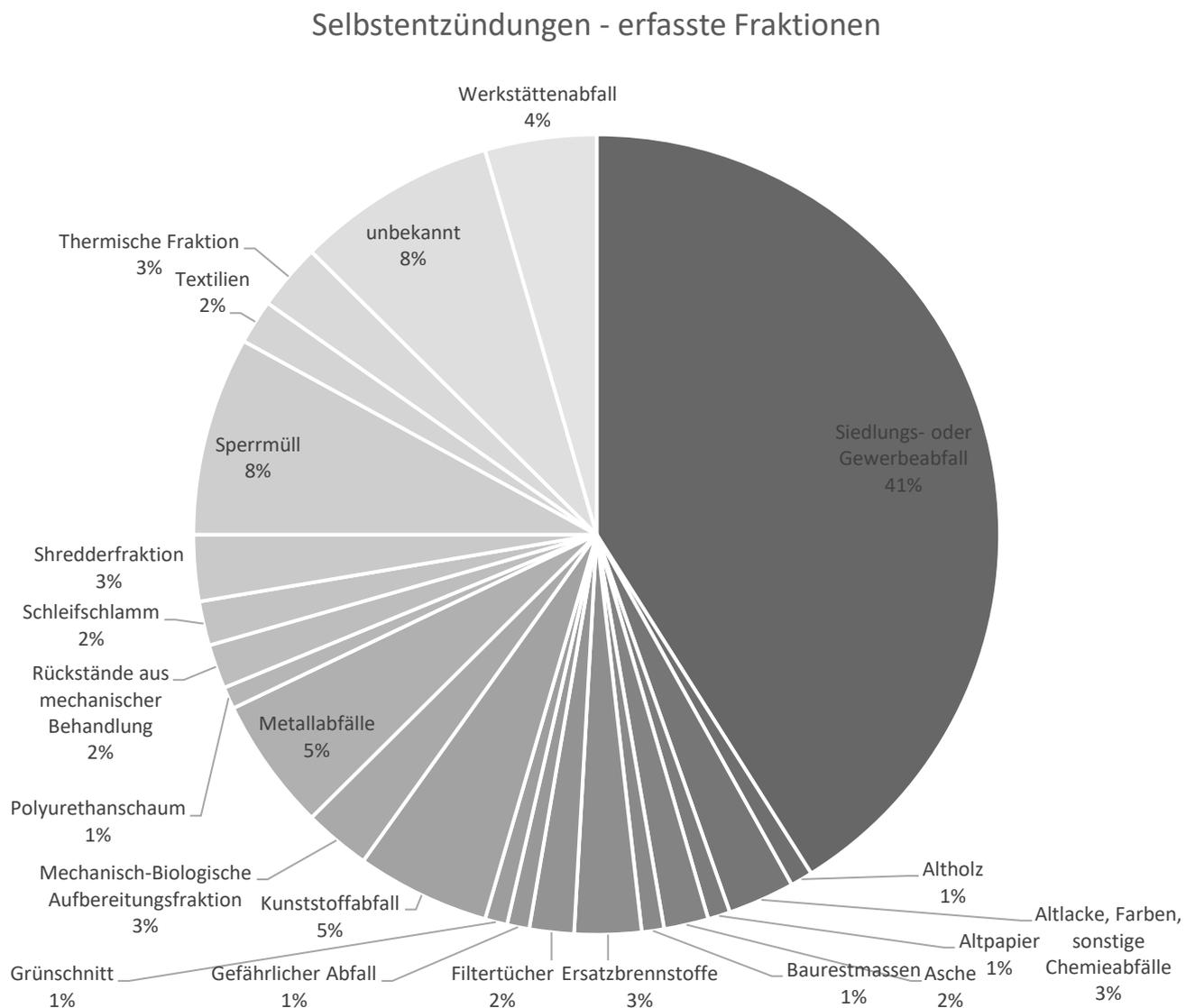


Abbildung 24: Verteilung der von AbER-Selbstentzündungen erfassten Fraktionen.

Unter der anderen Hälfte der erfassten Fraktionen, also unter all jenen, die keinen Siedlungs- oder Gewerbeabfall darstellen, kann kein Schwerpunkt erkannt werden. Ebenso treten Selbstentzündungsereignisse meist in Lagerbereichen wie Containern, Boxen oder Hallen auf. Mit 16 % sind Aufbereitungsanlagen ebenfalls häufig betroffen, jedoch wäre hier eine genauere Ursachenermittlung hinsichtlich vorangegangener mechanischer Einflüsse des Aggregats auf die Fraktion notwendig. Die relative Verteilung Brandentstehungsorte ist in Abbildung 25 dargestellt.

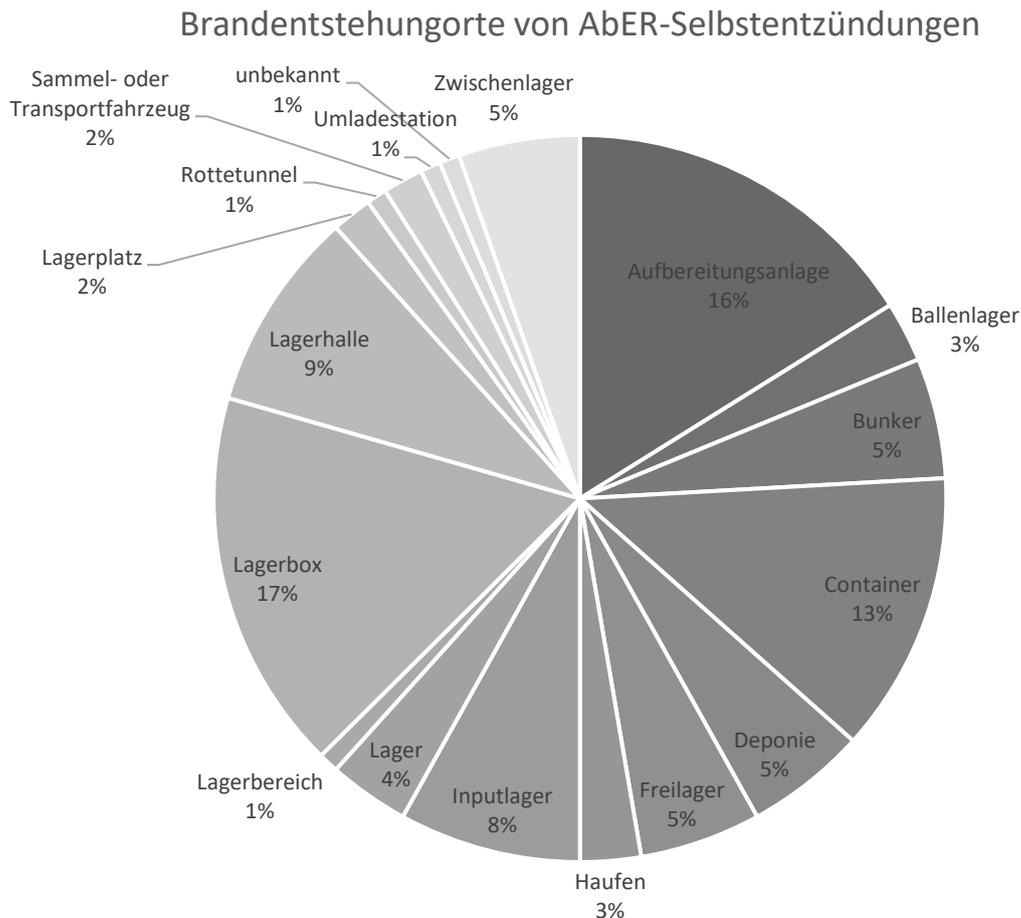


Abbildung 25: Brandentstehungsorte von AbER-Selbstentzündungen.

Die Behandlung der Ereignisse als Zählraten, welche österreichweit demselben vorhin definierten Abschnitten unterliegen, führte zu interessanten Ergebnissen hinsichtlich des saisonalen Auftretens von AbER-Selbstentzündungen. Festzuhalten ist dennoch die nicht zufriedenstellende Datenlage hinsichtlich zweier verschiedener Aspekte, nämlich der generellen Anzahl aufgezeichneter Brandfälle pro Abschnitt oder Monat und der Verfügbarkeit zugehöriger Wetterdaten- und Parameter. Eine Testung eines Wetterablaufes, welcher die Brandwahrscheinlichkeit erhöht, ist aus diversen Gründen derzeit nicht möglich. Zunächst sind standortspezifisch zu wenige Ereignisse aufgezeichnet, um eine repräsentative Analyse oder Trends zwischen den lokal auftretenden Selbstentzündungen durchzuführen. Durch die Auswertung der Brandfälle an verschiedenen Standorten können Wetterparameter nicht auf

Ereignisse umgelegt bzw. homogenisiert und verglichen werden; die Verwendung von österreichweit gültigen oder anzunehmenden Werten für Wetterparameter ist unter Beachtung der Individualität der Wetterabfolge, welche die abfallwirtschaftliche Schüttung beeinflussen könnte, nicht repräsentativ. Des Weiteren kann die einzigartig zusammengesetzte Schüttung eines Brandereignisses praktisch nicht mit anderen Schüttungen verglichen werden. Zwar treten in Lageraggregaten die meisten Selbstentzündungsereignisse auf, jedoch impliziert dieser Umstand nicht zwangsweise längere Induktionszeiten, welche die Schüttung erfahren hat und der Literatur nach notwendig sind, um eine Selbstentzündung auszulösen. Aus diesen Gründen wurde lediglich „Abschnitt“ als beschreibende Variable für das Auftreten eines aufgezeichneten Brandes herangezogen. Die Projektion des Modells auf Selbstentzündungsfälle ergab lediglich signifikante Ergebnisse für Abschnitt 4 bei gleichzeitiger schlechter Modellgüte. Ein signifikant niedrigeres Auftreten von Bränden ist allerdings auch in den kälteren Monaten feststellbar.

Aufgrund der im Rahmen dieser Masterarbeit erlangten Erkenntnisse scheint das wetterphasenbedingte Auftreten von Selbstentzündungen bei Siedlungsabfällen derzeit nicht feststellbar zu sein. Die vorgelegten Ergebnisse schließen einen solchen Zusammenhang jedoch nicht aus. Neben den bereits erläuterten Problemen der Datenverfügbarkeit sollen auch noch weitere Ursachen bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Unter anderem könnte der nicht nachgewiesene Zusammenhang zwischen Selbstentzündungen und Wetterphasen an der grundlegenden Charakteristik von derartigen Brandereignissen liegen, welche dadurch gekennzeichnet ist, dass große Mengen an deponiertem Material betroffen sind, die erst nach langer Induktionszeit eine Selbstentzündung hervorrufen. Zwar ist in wärmeren Monaten mit höheren Durchschnittstemperaturen zu rechnen und diverse Wärmeparameter nehmen häufiger Extremwerte an; gleichzeitig muss allerdings berücksichtigt werden, dass der Temperaturgradient, welcher mit zunehmendem Gefälle zu größerer Konvektion führt, in kalten Monaten höher ist. Durch telefonische Diskussion der vorliegenden Ergebnisse und abgeleiteten Vermutungen wurden diesen durch einen Standortleiter eines der größten österreichischen Unternehmen im Bereich Abfallentsorgung und -verwertung plausibilisiert.

Demnach würden die meisten als Selbstentzündungen deklarierten Vorfälle in jenem Unternehmen bei der direkten Behandlung des Abfalls auftreten. Lange Induktionszeiten in den abfallwirtschaftlichen Schüttungen wären aufgrund der im Unternehmen durchgeführten Aufbereitungsschritte nicht gegeben. Diese Vermutung unterstreicht die im Rahmen der Poisson-Regression verwendete und für passend empfundene Prädiktorvariable *abschnitt*, da wohl in den wärmeren Monaten mit der größten Intensität der Sonnenstrahlung und den meisten Sonnenstunden zu rechnen ist. Allerdings muss bedacht werden, dass die Zusammensetzung des Abfalls in den wärmeren Monaten schlicht derart gegeben sein könnte, dass sie ihrer Natur nach eher zur Entzündung neigt. Dabei sind regionale Unterschiede nicht zu unterschätzen. Insgesamt ist zu vermuten, dass die durch Selbstentzündung bedingten Brandfälle in den öftesten Fällen vom Abfallaufkommen abhängen, wonach diese von der Zusammensetzung des Abfalls bzw. von Fehlwürfen in der entzündeten Fraktion abhängen könnten. Die Anzahl an Selbstentzündungen und das Vorliegen kritisch zusammengesetzter

Fraktionen könnte über die Jahreszeiten oder Abschnitte hinweg aus diesen Gründen variieren. Dies würde bedeuten, dass nach einer gewissen Anzahl an Zufallsereignissen, wie Fehlwürfen, und damit unmittelbar zusammenhängend, bei einer zu definierenden gesammelten Menge an Abfall, die wiederum von der Zeit, also den Tagen der Abfallanlieferung abhängig ist, ein Grenzwert überschritten wird, an dem die durch die Zusammensetzung des Abfalls bedingte Selbstentzündung eintritt. Die Risikolaufzeit für ein Selbstentzündungsereignis wäre dann überschritten. Nach dieser Überlegung wären Selbstentzündungen deswegen eine Funktion der Zeit, da die Entsorgungsintervalle bzw. Stoff- und Abfallströme der betroffenen Branche als konstant angenommen werden können. So würde dieser These zufolge bei einer bestimmten Anzahl an Sammel- oder Ablieferungszyklen der Abfälle in Österreich eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für die Selbstentzündung vorliegen, da jene kritische Zusammensetzung des Abfalls - begründet etwa wie erwähnt durch Fehlwürfe oder ungünstige Kombinationen von verschiedenen Fraktionen - im Zeitintervall zumindest einmal vorliegt. Von Interesse ist im Lichte dieser Überlegung also die Anzahl der Selbstentzündungen in AbER-Betrieben nach den Monaten, die repräsentative Analyse der Zusammensetzung des Abfalls nach Standort und Monat sowie ein – schwierig erscheinendes – Monitoring von Fehlwürfen in der am häufig von Selbstentzündungen betroffenen Restmüllfraktion. Bei Vorliegen solcher Daten könnte eine Proportionalität der Selbstentzündungen zur Risikolaufzeit, in Abhängigkeit der Abschnitte und der Anzahl an Fehlwürfen, modelliert werden. Die Datengrundlage für im Rahmen der Masterarbeit herangezogene Selbstentzündungsfälle kann aufsummiert wie in Abbildung 26 dargestellt werden.

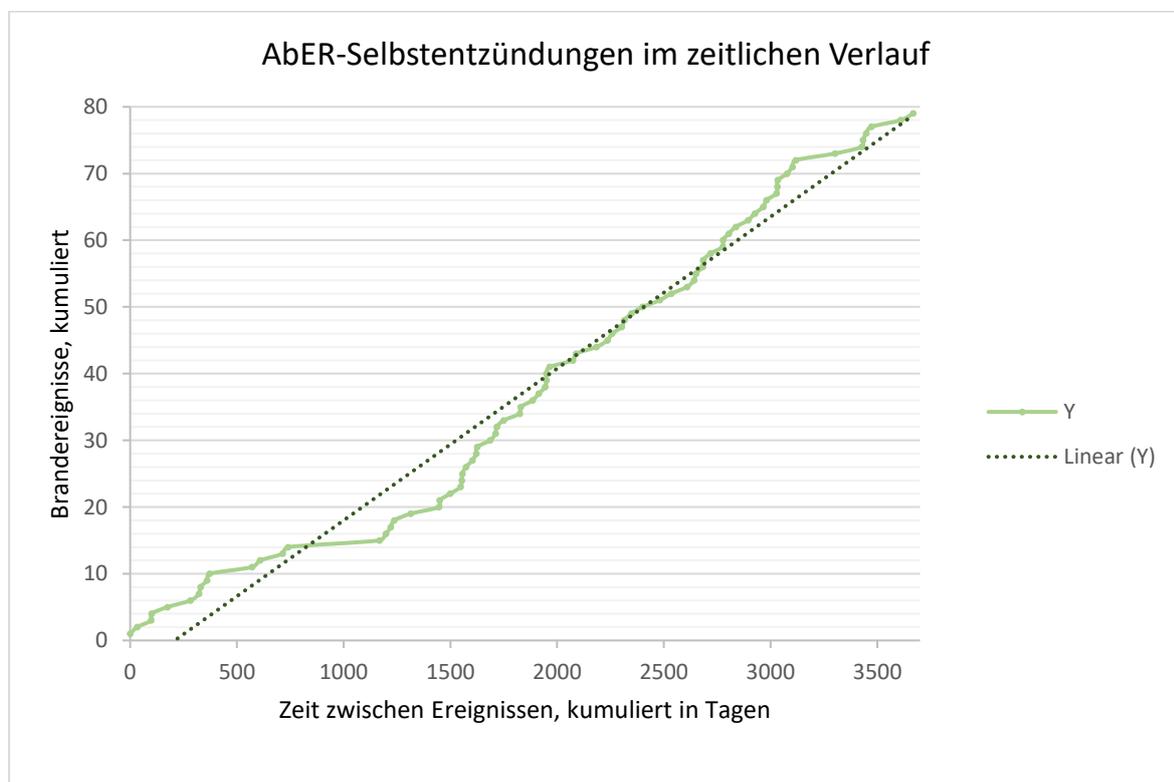


Abbildung 26: Anzahl der Tage zwischen Selbstentzündungen in kumulierter Darstellung.

Die eben gezeigte lineare Summenkurve soll nicht den Eindruck erwecken, dass Selbstentzündungen mit der Steigung der Kurve vorhergesagt oder abgeschätzt werden können. Es handelt sich dabei eher um die Darstellung der Wartezeit auf Ereignisse – so liegen mehr Ereignisse vor, desto länger gewartet wird. Zwar wurde, wie bisher umfassend diskutiert, festgestellt, dass in Abschnitt 1, oder anders formuliert, in den Monaten Juni, Juli und August die meisten Selbstentzündungen zu erwarten sind. Diese Tatsache legt allerdings nicht fest, dass bestimmte Wetterabläufe die Wahrscheinlichkeit für Selbstentzündungen erhöhen. Weitere Ursachen, wie etwa die erwähnten saisonalen Variationen in der Abfallzusammensetzung, könnten eine Rolle spielen. Abbildung 27 zeigt die Tage zwischen den Ereignissen, wiederum aufgeteilt nach den Abschnitten. Die eingezeichneten Whisker zur Definition der durch Punkte gekennzeichneten Ausreißer entsprechen hierbei dem 1,5-fachen Interquartilsabstand.

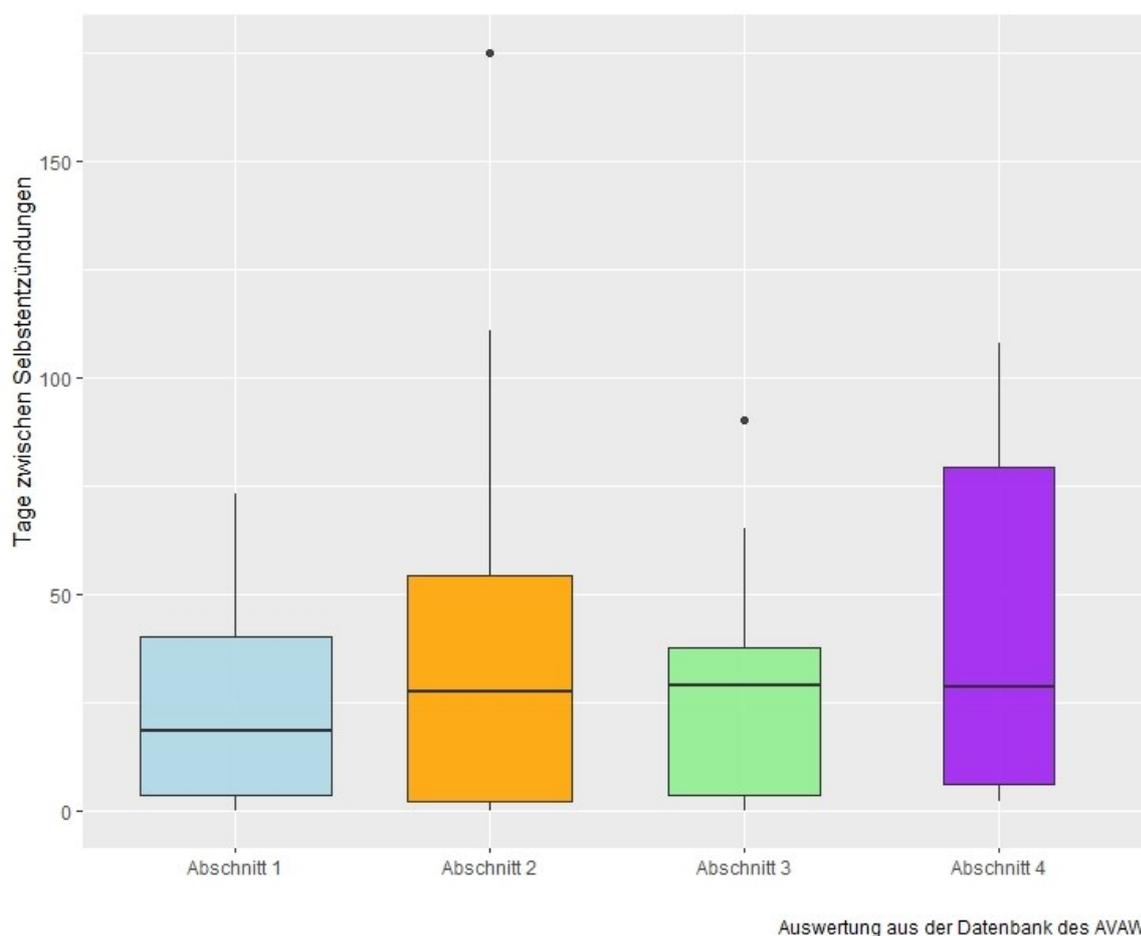


Abbildung 27: Darstellung der Tage zwischen Selbstentzündungsereignissen als Boxplot.

Wenn die Anzahl der Selbstentzündungen (*numev*), wiederum pro Monat im betrachteten Zeitraum, gegen die Häufigkeit (*freq*) aufgetragen wird, so ergibt sich das in Abbildung 28 dargestellte Ergebnis. Zum Verständnis für die vorgestellte Grafik bedeutet dies etwa, dass eine Selbstentzündung pro Monat etwa 24-mal aufgetreten ist, und mehr als vier Selbstentzündungen pro Monat niemals auftraten. Für die Darstellung dieser Kurve wurden wieder die in Tabelle 15 dargestellten Selbstentzündungsereignisse zwischen 2014 und 2019 je Monat herangezogen.

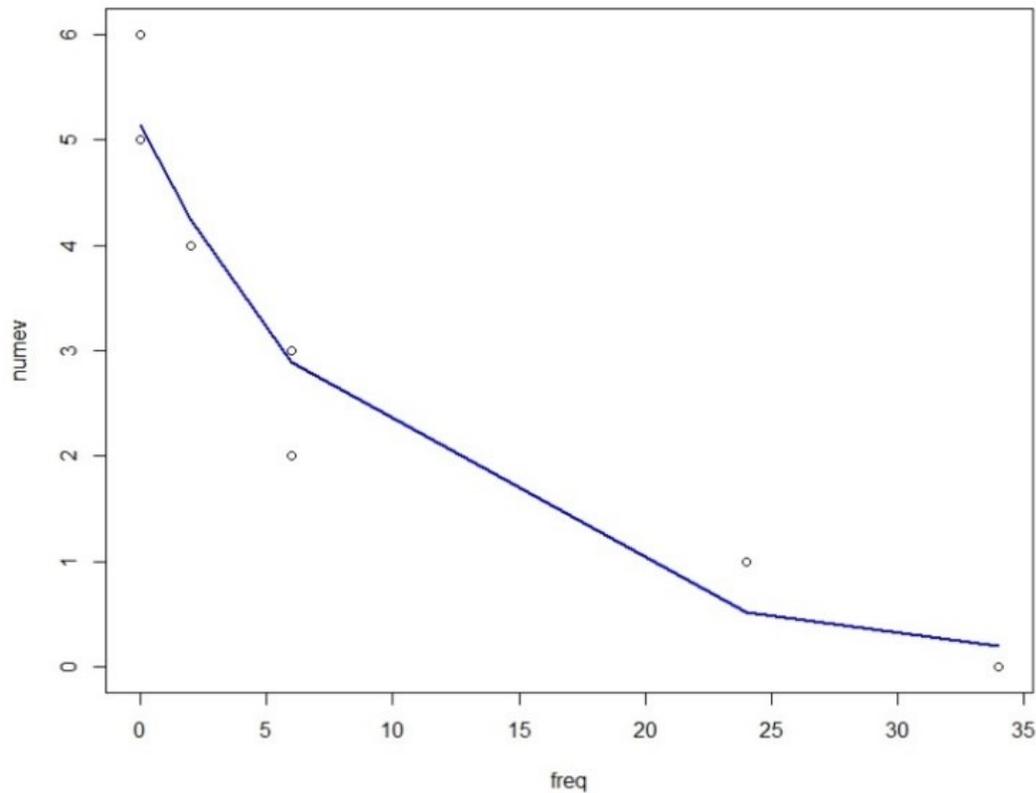


Abbildung 28: Poisson-Punktprozess der Anzahl an Brandfällen gegen die Frequenz.

Die Grundaussage, welche aus der Darstellung abgeleitet werden kann lautet somit, dass mit der steigenden Anzahl an gezählten Selbstentzündungen pro Monat die gezählte Anzahl auf null fällt, beziehungsweise wird häufiger eine geringe Anzahl an Selbstentzündungen pro Monat gezählt. Der Kurvenverlauf lässt also berechtigte Zweifel aufkommen, inwiefern eine quantitativ ausreichende Datenbasis zu der Beginn aufgestellten Hypothese in Zukunft geschaffen werden kann.

Die eben dargestellte Kurve wurde hinsichtlich ihrer Passung auf eine Poisson-Annahme überprüft. Abbildung 29 stellt die Anzahl der Zählungen gegen den Metameter der angegebenen Verteilung dar. Durch die Poissoness-Darstellung kann festgestellt werden, wie gut die vorliegenden Häufigkeiten einer Poisson-Verteilung folgen. Wenn die Verteilung zu den Daten passt, so stellt die Kurve eine gerade Linie dar (Friendly 2015). In diesem Diagramm zeigen die offenen Punkte die beobachteten Zählparameter, die gefüllten Punkte die Konfidenzintervallzentren und die gestrichelten Linien die Konfidenzintervalle für jeden Punkt. Weichen die Daten von einer Poisson-Verteilung ab, sind die Punkte gekrümmt (Friendly 2015). Erkennbar ist, dass der Maximum-Likelihood für die oben dargestellten Zählparameter von Anzahl und Frequenz einen Wert von 0,861 annimmt, was 0,861 zu erwartenden Selbstentzündungen pro Monat bei den zugrundeliegenden Daten entspricht und nur einigermaßen zum berechneten Wert aus der Steigung von 1,12 ($\lambda = e^{0,11}$) passt. Außerdem liegt die Linie für das Modell für die Zählwerte 0 und 2 außerhalb des gekennzeichneten Konfidenzintervalls.

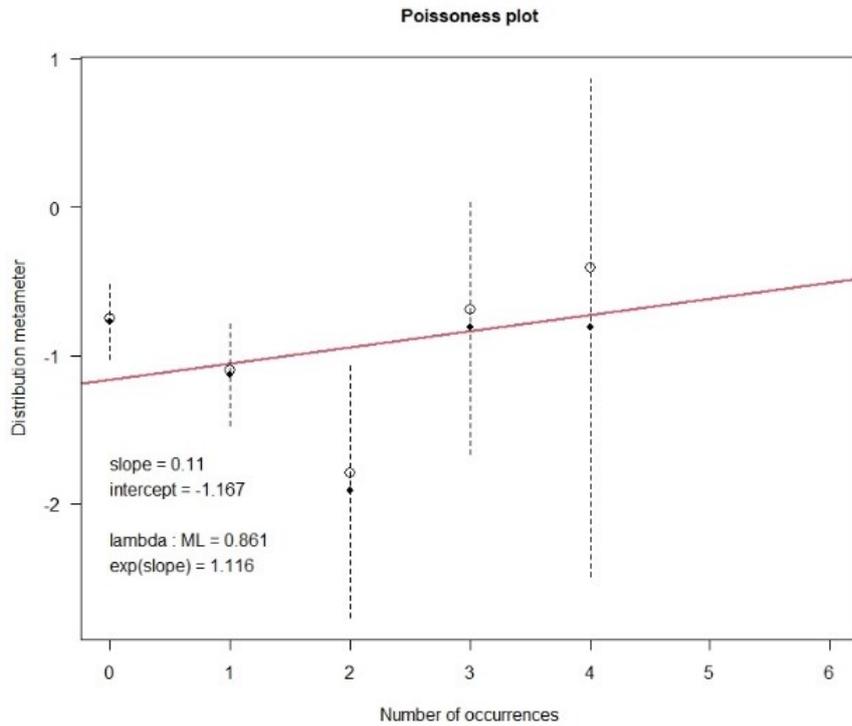


Abbildung 29: Poissonness-Plot der gezählten Selbstentzündungsereignisse.

Dieselben Daten sehen in einer Form der Poisson-Verteilung, genauer der bereits vorgestellten Negativbinomialverteilung, wie in Abbildung 30 aus.

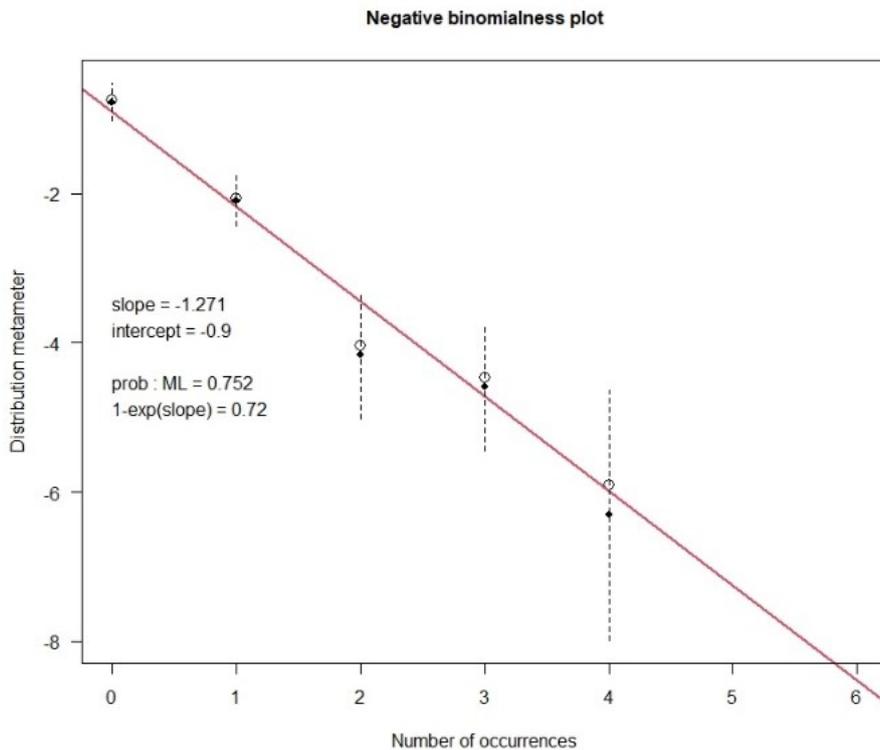


Abbildung 30: Negative-binomialness-Plot für die gezählten Selbstentzündungsereignisse.

Demnach kann zukünftig auch die Negativbinomialverteilungen bzw. deren Regression zur Untersuchung von Brandereignissen in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft

herangezogen werden, die Gerade liegt nämlich für sämtliche Datenpunkte und besser passend als im Poisson-Modell im Konfidenzintervall.

Abschließend ist festzuhalten, dass bei der Datenauswahl für Selbstentzündungen nicht zwischen Fraktionen unterschieden wurde, geschweige denn Materialeigenschaften wie Porosität, Partikelgröße und chemische Struktur berücksichtigt wurden, da eine solche Abgrenzung die Datenlage wiederum einschränken würde. Auch die Geometrie der vom Brand erfassten Schüttungen könnten in der Auswertung als Einflussgrößen herangezogen werden. Wie Mikalsen et al. (2019) erkannten, ist die Gesamtzahl der Brände, insbesondere der Selbstentzündungsfälle, zu gering, um zu diesem Zeitpunkt wesentliche Feststellungen hinsichtlich der mehrfach erwähnten, zu Beginn formulierten Hypothese zu treffen. Jedenfalls kann die angewandte Methodik bei einer zukünftig verbesserten Datenlage zielführend eingesetzt werden.

Die weitere Erarbeitung der Problematik muss dringend den Aspekt der Induktionszeit bis zum Eintreten der Selbstentzündung berücksichtigen. Fraglich bleibt, ob diese Induktionszeiten beispielsweise bei der Behandlung von Siedlungsabfällen gegeben sind, um eine Selbstentzündung im Sinne der im Literaturteil erläuterten Definition zu realisieren. Andererseits steht fest, dass Feuchtigkeit die Selbstentzündung von abfallwirtschaftlichen Schüttungen fördert, da ein höherer Feuchtegehalt die Durchlässigkeit des festen Abfalls senkt und mehr Energie absorbiert wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Datenlage allerdings mangelhaft und nicht ausreichend, um die Einflussgröße auf AbER-Selbstentzündungen festzustellen.

Abschließend werden im nächsten Abschnitt die im Rahmen der Erarbeitung der Masterarbeit erlangten Erkenntnisse zusammengefasst.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde zwei unterschiedlichen Problemstellungen nachgegangen. Die zu Beginn definierten Ziele waren dabei einerseits die Erhebung von Brandereignisse im Zeitraum November 2019 bis Oktober 2020 sowie die Untersuchung eines wetterbedingten Auftretens von Selbstentzündungen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingbranche.

Mit 70 gezählten Brandereignissen aus öffentlich verfügbaren Quellen wird der Anstieg der Brandstatistik im Erhebungszeitraum 2019/20 fortgesetzt und erreicht ein neues Maximum. Entsprechend der vorgestellten Auswertungen traten diesen am häufigsten, mit über 17 % an der Gesamtanzahl, im Monat April auf. Die Übrigen Zwischenfälle ereigneten sich in etwa gleichverteilt zwischen Mai und Oktober. Besonders wenige Brandereignisse traten in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft im Jänner und März auf. Die Erhebung und Auswertung von AbER-Brandfällen zeigte einen klaren Schwerpunkt im Auftreten von Brandfällen nach Fraktionen. Konkret sind im Erhebungszeitraum Restmüllfraktionen am häufigsten von Brandfällen betroffen, was, wie umfänglich diskutiert, an der heterogenen Zusammensetzung und dem damit verbundenen, gehäuftem Auftreten von Zündquellen liegt. Insgesamt entfallen auf Siedlungsabfälle bzw. dem Siedlungsabfall ähnliche Fraktionen mehr als die Hälfte der Brandereignisse. Bei rund 20 % unbekanntem, an Bränden beteiligten Fraktionen, wurden Grünschnittablagerung am zweithäufigsten entzündet. Der Auswertung nach kommt es dabei durchschnittlich an jedem fünften Tag zu einem Brand in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft. Die regionale Auswertung der Brandfälle brachte hervor, dass die Branddichte je 100.000 Einwohner in Niederösterreich am höchsten ist, dabei sind Lageraggregate von Bränden am öftesten erfasst. Ebenfalls hervorzuheben ist die große Anzahl an Bränden, welche sich im Erhebungszeitraum in Sammel- und Transportfahrzeugen ereignete. Lediglich 10 % der aufgezeichneten Ereignisse traten in Aufbereitungs- oder Förderaggregaten auf. Drastisch häufig waren die Brandursachen, genauer in knapp 76 % der Fälle, aus öffentlich verfügbaren Quellen zwar nicht erhebbar. Allerdings sind rund 35 % der Brandereignisse mit bekannter Ursache auf Selbstentzündung zurückzuführen.

Wohl auch zukünftig werden AbER-Betriebe, dem Anstieg der Brandstatistik nach, weitere Investitionen in Brandschutz- und Früherkennungssysteme tätigen. Maßnahmen zur Überwachung von Fehlwürfen bei der Sammlung von Siedlungsabfällen wären zielführend, um das Gefahrenpotenzial, welches von Batterien ausgeht, zu verringern. Die Erstellung einer Online-Plattform für das gesammelte, zentrale Reporting von AbER-Brandfällen ist zukünftig mit Sicherheit notwendig, da die manuelle Erhebung eine hohe Zeitintensität mit sich bringt und so effizienter gestaltet werden könnte.

Die Auswertung der Selbstentzündungsereignisse im Rahmen der Problemstellung 2 erwies sich als diffizil. Verfügbarkeit und Qualität der Daten ließen eine Quantifizierung der Grenzparameter für die Wetterabfolgen und eine tiefgehende Analyse der zu Beginn aufgestellten Hypothese nicht zu. Nichtsdestotrotz wurde bei hoher Modellgüte festgestellt, dass Brandfälle in der Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft vermehrt in den

Sommermonaten auftreten. Diese Erkenntnis konnte auf Selbstentzündungsereignisse nicht übertragen werden, bzw. liegen lediglich in den drei kältesten Monaten signifikant weniger Zwischenfälle vor als in den übrigen Quartalen.

Festzuhalten ist, dass die Behandlung von Selbstentzündungen als Zähldaten und poissonverteilt auch künftig zu empfehlen ist. Wie erwähnt wurde festgestellt, dass die Anzahl der vorliegenden Fälle an Selbstentzündungen nicht signifikant mit der Saison variiert, wie es der Fall ist, wenn Brandfälle sämtlicher Ursachen einbezogen werden. Auch dieser Erkenntnis ist mit Vorsicht zu begegnen, da die Anzahl an erhobenen Selbstentzündungen im Vergleich zur Gesamtzahl schlicht sehr viel geringer ist. In jedem Fall konnten im Rahmen der Masterarbeit Methoden angewandt und aufgezeigt werden, die für die zukünftige Verfolgung der Thematik und des Monitorings von Selbstentzündungsereignissen nützlich sein werden. Dabei ist die Regression mittels generalisierter linearer Modelle von verschiedenen nichtlinearen Modellfamilien, wie etwa der Poisson-Verteilung, hervorzuheben. Gezählte Brandfälle könnten zukünftig so einer Regression gegen weitere Parameterkombinationen, wie Fraktion, Transport- oder Lagerort und einer Temperaturvariablen, unterzogen werden, um Einflussparameter zu untersuchen. So können im Regressionsmodell geeignete Prädiktorvariablen gewählt werden. Vorausgesetzt wird dabei eine massive Entwicklung hinsichtlich verfügbarer Daten zu den jeweiligen Ereignissen.

Zur Erarbeitung der zweiten Problemstellung wurden weitere Methoden angewandt, die in dieser Masterarbeit keinen Platz gefunden haben. Diese sind in einem Begleitpapier zur Masterarbeit, das dem Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik- und Abfallwirtschaft an der Montanuniversität Leoben zur Verfügung gestellt wird, zusammengefasst. Dem Anhang zu entnehmen sind die Programmcodes für die automatisiert durchgeführte lineare Regression. Nachweise für die aus öffentlichen Quellen erhobenen Brandfälle sind im Archiv des AVAW abgelegt.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

BMK (2021) Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021; Statusbericht 2021 (Referenzjahr 2019)

Deistler M, Scherrer W (2018) Modelle der Zeitreihenanalyse. Springer International Publishing, Cham

Friendly M (2015) Discrete Data Analysis with R; Visualization and Modeling Techniques for Categorical and Count Data. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton

Hauptmanns U (2020) Prozess- und Anlagensicherheit. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

Holland H, Scharnbacher K (2010) Grundlagen der Statistik; Datenerfassung und -darstellung, Maßzahlen, Indexzahlen, Zeitreihenanalyse. Gabler, Wiesbaden

James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R (2021) An introduction to statistical learning; With applications in R. Springer, New York

Lohrer C, Krause U, Steinbach J (2005) Einfluss der Konvektion auf das Selbstentzündungs- und Abbrandverhalten von Schüttgütern und Stäuben. Chemie Ingenieur Technik 77:1984–1991. doi:10.1002/cite.200500044

Long JS, Freese J (2014) Regression models for categorical dependent variables using Stata. Stata Press, College Station, Texas.

Mikalsen RF, Lönnermark A, Glansberg K, McNamee M, Storesund K (2021) Fires in waste facilities: Challenges and solutions from a Scandinavian perspective. Fire Safety Journal 120:103023. doi:10.1016/j.firesaf.2020.103023

Moqbel S, Reinhart D, Chen R-H (2010) Factors influencing spontaneous combustion of solid waste. Waste management (New York, N.Y.) 30:1600–1607. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.006

Nigl T, Pomberger R (2018), Recy & DepoTech 2018; Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft & Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, internationale Abfallwirtschaft & spezielle Recyclingthemen : Vorträge-Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz, 7.-9. November 2018 in Leoben, Österreich. Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft, Eigenverlag

Nigl T, Rübenbauer W, Pomberger R (2019) Cause-Oriented Investigation of the Fire Incidents in Austrian Waste Management Systems. Detritus Volume 09:213–220. doi:10.31025/2611-4135/2019.13872

Nigl T, Bäck T, Pomberger R (2020) Vertiefende Ursachenermittlung zu Brandereignissen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft. Recy & Depotech 2020 (November 2020)

Schmidt G (2020) Entwicklungen und Trends in der Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen. Berg Huettenmaenn Monatsh 165:399–401. doi:10.1007/s00501-020-01002-0

Schoßig J, Anka Berger, Marcus Malow, Ulrich Krause (2010) Beurteilung und Verhinderung von Selbstentzündung und Brandgasemissionen bei der Lagerung von Massenschüttgütern und Deponiestoffen; Forschungsbericht 291

6.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
%	Prozent
1Q	unteres Quantil
3Q	oberes Quantil
AbER	Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft
AIC	Akaike information criterion
AVAW	Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
avg_prec	Variable für den durchschnittlichen Niederschlag
avg_t	Variable für die durchschnittliche Temperatur
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BI	betriebsinterne Quellen
binaer	binär codierte Variable
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
bzw.	beziehungsweise
CSV	Comma-separated values
et al.	und andere
EW	Einwohner
freq	Frequenz
hPa	Hektopascal
k	10 ³
kg	Kilogramm
L	Luftfeuchtigkeit
lmax	Variable für die maximale Luftfeuchtigkeit
lmin	Variable für die minimale Luftfeuchtigkeit
M	Mittelwert
Mio.	Millionen

ns_mm	Variable für den durchschnittlichen Niederschlag
num_events	Variable für die Anzahl gezählter Ereignisse
ÖV	öffentlich verfügbare Quellen
phat	Variable für errechnete Schätzwerte
pmax	Variable für den maximalen Druck
p-Wert	Signifikanzwert
R	Restkomponente einer Zeitreihe
S	Saisonkomponente einer Zeitreihe
SD	Varianz
SE	Standardfehler
T	Trendkomponente einer Zeitreihe
t.	Tonnen
tmax	Variable für die Maximaltemperatur
tmin	Variable für die Minimaltemperatur
V	Volumen
Vol.	Volumen
Z	Zufallskomponente einer Zeitreihe
Jan	Jänner
Feb	Februar
Mar	März
Apr	April
May	Mai
Jun	Juni
Jul	Juli
Aug	August
Sep	September
Oct	Oktober
Nov	November
Dec	Dezember

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Auszug aus den erhobenen Daten zu Selbstentzündungsereignissen.	17
Tabelle 2: Bei den Bränden im Erhebungszeitraum 2019/20 entzündete Fraktionen.	21
Tabelle 3: Erhobene Brandereignisse in Darstellung nach Brandursache.	22
Tabelle 4: Übersicht der Selbstentzündungen im Erhebungszeitraum.	22
Tabelle 5: Anzahl der Brandfälle in Österreich im Erhebungszeitraum 2019/20.	25
Tabelle 6: Übersicht der Brandentstehungsorte im Erhebungszeitraum.	26
Tabelle 7: Deskriptive Auswertung der im Erhebungszeitraum pro Monat aufgetretenen Brandereignisse.	27
Tabelle 8: Deskriptive Zusammenfassung der analysierten Datensätze.	30
Tabelle 9: Darstellung der Mittelwerte von Brandfällen je Abschnitt.	31
Tabelle 10: Abweichung der Residuen des Regressionsmodells.	31
Tabelle 11: Ergebnisse des Regressionsverfahrens.	31
Tabelle 12: Übersicht der Analyse der Modellgüte.	32
Tabelle 13: Darstellung der Güte des Modells anhand des Chi-Quadrat-Tests.	32
Tabelle 14: Ergebnis der Modellschätzung für die Abschnitte 1 bis 4.	32
Tabelle 15: Datensatz der je Monat vorliegenden Selbstentzündungen von 2014 bis 2019.	34
Tabelle 16: Deskriptive Auswertung der für die Regression herangezogenen Daten.	36
Tabelle 17: Mittelwerte für Selbstentzündungsereignisse nach Abschnitt ab 2014.	36
Tabelle 18: Abweichung der Residuen des Regressionsmodells.	37
Tabelle 19: Ergebnis des Regressionsmodells für Selbstentzündungen ab 2014.	37
Tabelle 20: Ergebnis des Chi-Quadrat-Test für die Anpassungsgüte der Regression von Selbstentzündungen ab 2014.	38
Tabelle 21: Ergebnis des Regressionsmodells für Selbstentzündungen inklusive Standardfehler.	38
Tabelle 22: Mittelwerte und Varianzen des Variationsmodells für AbER-Brandereignisse von 2014 bis 2019.	46
Tabelle 23: Regressionsparameter des Variationsmodells für AbER-Brandereignisse von 2014 bis 2019.	46
Tabelle 24: Mittelwerte und Varianzen des Variationsmodells für AbER- Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019.	46

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Abfallaufkommen in Österreich nach Fraktionen (BMK 2021).....	2
Abbildung 2: Zeitliche Verteilung von Brandereignissen durch Erhebung aus öffentlichen (ÖV) und betriebsinternen (BI) Quellen (Nigl et al. 2020).	4
Abbildung 3: Workflow der Masterarbeit in grafischer Darstellung.	5
Abbildung 4: Verlauf von AbER-Brandereignissen mit Temperatur- und Niederschlagskurven (Nigl et al. 2019).....	7
Abbildung 5: Beispiel für die Ausgabe der Regressoren in der Konsole.	18
Abbildung 6: Zeitliche Differenz in Tagen zwischen den Brandereignissen im Erhebungszeitraum bei fortlaufendem Index.	20
Abbildung 7: Verteilung der Brandfälle nach Fraktionen im Erhebungszeitraum von November 2019 bis Oktober 2020.....	24
Abbildung 8: Inzidenzkarte der Brandfälle je Bundesland im Erhebungszeitraum.....	25
Abbildung 9: Darstellung der Anzahl an Brandfällen je Monat im Erhebungszeitraum.	27
Abbildung 10: Verteilung der Brandfälle im Erhebungszeitraum nach Wochentagen.....	28
Abbildung 11: Histogramm von AbER-Brandfällen im Zeitraum 2014 bis 2019 nach Abschnitten.	29
Abbildung 12: Histogramme von AbER-Brandfällen im Zeitraum 2014 bis 2019 (gegliedert).	30
Abbildung 13: Kumulierte Branderwartungswerte der Ereignisse nach Abschnitten.	33
Abbildung 14: Dekomposition der Zeitreihe von Selbstentzündungen ab dem Jahr 2014.	34
Abbildung 15: Histogramm der gezählten Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019.	35
Abbildung 16: Histogramm der gezählten Selbstentzündungsereignisse von 2014 bis 2019 in separater Darstellung nach Abschnitten.....	36
Abbildung 17: Erwartbare Brandfälle nach dem Regressionsmodell für Selbstentzündungen je Monat und Abschnitt.....	38
Abbildung 18: Verlauf der Regressoren der Durchschnittstemperaturen für das Vier-Tages- Intervall.	40
Abbildung 19: Entwicklung der Brandfälle aus öffentlich verfügbaren Quellen ab dem Jahr 2007.....	41
Abbildung 20: Brandfälle im Erhebungszeitraum nach Abfallaufkommen und Bundesland...42	
Abbildung 21: Anzahl der Brandfälle nach Wochentagen aus der Auswertung von Nigl et al. (2019).....	42

Abbildung 22: Verteilung der Brandfälle vor (links) und nach Variation der Abschnitte.	45
Abbildung 23: Verteilung der Selbstentzündungsereignisse nach Variation der Abschnitte. .	47
Abbildung 24: Verteilung der von AbER-Selbstentzündungen erfassten Fraktionen.	48
Abbildung 25: Brandentstehungsorte von AbER-Selbstentzündungen.	49
Abbildung 26: Anzahl der Tage zwischen Selbstentzündungen in kumulierter Darstellung. ...	51
Abbildung 27: Darstellung der Tage zwischen Selbstentzündungsereignissen als Boxplot. ...	52
Abbildung 28: Poisson-Punktprozess der Anzahl an Brandfällen gegen die Frequenz.	53
Abbildung 29: Poissoness-Plot der gezählten Selbstentzündungsereignisse.	54
Abbildung 30: Negative-binomialness-Plot für die gezählten Selbstentzündungsereignisse.	54

Anhang

```
package combustion;
```

```
import java.io.BufferedReader;
```

```
import java.io.FileReader;
```

```
import java.io.IOException;
```

```
import java.util.*;
```

```
public class CSVreader {
```

```
    private String file;
```

```
    private List<Double> avgTemp;
```

```
    private boolean headerDone;
```

```
    private List<Double> avgHum;
```

```
    private List<Double> avgP;
```

```
    private List<Double> Tmax;
```

```
    private List<Double> HumMax;
```

```
    public CSVreader(String file) {
```

```
        this.file = file;
```

```
        this.avgTemp = new ArrayList<>();
```

```
        this.avgHum = new ArrayList<>();
```

```
        this.avgP = new ArrayList<>();
```

```
        this.Tmax = new ArrayList<>();
```

```
        this.HumMax = new ArrayList<>();
```

```
    }
```

```
    public void readData() {
```

```
        BufferedReader reader = null;
```

```
        String line = "";
```

```
        headerDone = false;
```

```
try {  
    reader = new BufferedReader(new FileReader(file));  
  
    while ((line = reader.readLine()) != null) {  
  
        if (headerDone) {  
            String[] row = line.split(";");  
            avgTemp.add(Double.parseDouble(row[0]));  
            avgHum.add(Double.parseDouble(row[2]));  
            avgP.add(Double.parseDouble(row[1]));  
  
            Tmax.add(Double.parseDouble(row[7]));  
            HumMax.add(Double.parseDouble(row[9]));  
  
            for (String index : row) {  
                System.out.printf("%-15s", index);  
            }  
            System.out.println();  
        }  
        headerDone = true;  
    }  
  
} catch (Exception e) {  
    e.printStackTrace();  
  
}  
  
finally {  
  
    try {  
        reader.close();
```

```
} catch (IOException e2) {  
    e2.printStackTrace();  
}  
}  
}  
  
public List<List<Double>> cluster(int clusterSize, List<Double> toCluster) {  
    List<List<Double>> result = new ArrayList<>();  
    int start = 0;  
    while (start + clusterSize <= toCluster.size()) {  
        result.add(toCluster.subList(start, start + clusterSize));  
  
        start += clusterSize;  
    }  
    System.out.println("Created " + result.size() + " subsets");  
    return result;  
}  
  
public List<Double> getAvgTemp() {  
    return avgTemp;  
}  
  
public List<Double> getAvgHum() {  
    return avgHum;  
}  
  
public List<Double> getAvgP() {  
    return avgP;  
}
```

```
public List<Double> getTmax() {
    return Tmax;
}

public List<Double> getHumMax() {
    return HumMax;
}

public static void main(String[] args) {

    String testfile = "path"
    CSVreader reader = new CSVreader(testfile);
    reader.readData();
    List<List<Double>> testlist = reader.cluster(10, reader.getHumMax());
    for (List<Double> dataset : testlist) {
        System.out.println(LinearRegression.predictForValue(dataset));
    }
}
}
```

```
package combustion;

import java.util.List;
import java.util.stream.Collectors;
import java.util.stream.IntStream;

import static java.util.Arrays.asList;

import java.util.ArrayList;

public class LinearRegression {

    static Double predictForValue(List<Double> y) {

        List<Integer> x = IntStream.range(0, y.size()).boxed().collect(Collectors.toList());

        if (x.size() != y.size())
            throw new IllegalStateException("Must have equal X and Y data points");

        Integer numberOfDataValues = x.size();

        List<Double> xSquared = x.stream().map(position -> Math.pow(position,
2)).collect(Collectors.toList());

        List<Double> xMultipliedByY = new ArrayList<>();
        for(int i=0;i<x.size();i++) {
            xMultipliedByY.add(x.get(i) * y.get(i));
        }

        Integer xSummed = x.stream().reduce((prev, next) -> prev + next).get();
```

```
Double ySummed = y.stream().reduce((prev, next) -> prev + next).get();

Double sumOfXSquared = xSquared.stream().reduce((prev, next) -> prev + next).get();

double sumOfXMultipliedByY =
xMultipliedByY.stream().collect(Collectors.summarizingDouble(Double::doubleValue)).getSum();

double slopeNominator = numberOfDataValues * sumOfXMultipliedByY - ySummed *
xSummed;

Double slopeDenominator = numberOfDataValues * sumOfXSquared -
Math.pow(xSummed, 2);

Double slope = slopeNominator / slopeDenominator;

return slope;
}
}
```

//in Anlehnung an <https://gist.github.com/imjacobclark/2698d0f41835d97c724e4197f3dd9be0>,
aufgerufen am 24.07.2021