

TLEs – Die Gewitter der mittleren Atmosphäre

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Peter
Dr. Fiona Tummon

Art der Arbeit: Grosse Bachelorarbeit im Bereich der Umweltwissenschaften

Titelbild: Eine Übersicht der TLEs inklusiv der Temperatur und der Elektronendichte vom Erdboden bis in 100 km Höhe. Aus Neubert (2003).

Danksagung:

Mein Dank für das Zustandekommen dieser Arbeit richtet sich allen voran an meine beiden Betreuer – Prof. Dr. Thomas Peter und Dr. Fiona Tummon – die mich beim Ideen sammeln, Recherchieren, Schreiben und schliesslich beim Vollenden dieser Arbeit äusserst tatkräftig unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Blue Jets.....	7
2.1 Eigenschaften und Formen	7
2.2 Entstehung.....	8
2.2.1 BJ als Produkt eines Streamers mit nur negativer oder nur positiver Ladung	9
2.2.2 BJ als Folge eines „runaway electron breakdown“	9
2.2.3 BJ als Folge eines Bi-Leaders.....	10
2.3 Verteilung.....	11
2.4 Einfluss auf die Chemie der Stratosphäre.....	12
2.4.1 Methode Laborexperiment.....	12
2.4.2 Methode BJ-Simulation im Modell	13
3. Rote Kobolde.....	15
3.1 Eigenschaften und Formen	15
3.2 Entstehung.....	16
3.2.1 Gewöhnliche Entladung mittels Streamer.....	17
3.2.2 Entladung mittels „runaway electron breakdown“	17
3.3 Verteilung.....	18
3.4 Einfluss auf die Chemie	19
3.4.1 Resultate aus dem Modell für Kobolde in der Nacht.....	19
3.4.2 Resultate aus dem Labor	20
3.4.3 Resultate aus dem Modell für Kobolde am Tag.....	20
4. Rote Elfen.....	22
4.1 Eigenschaften und Formen	22
4.2 Entstehung.....	22
4.3 Verteilung.....	23
4.4 Einfluss auf die Chemie	25
4.4.1 Einfluss auf die Elektronendichte.....	25
4.4.2 Einfluss auf die OH – Schicht	25
5. Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse	27
5.1 Vergleich der drei Untergruppen	27
5.2 Diskussion von Blue Jets	28
5.3 Diskussion von roten Kobolden.....	29

5.4 Diskussion von roten Elfen.....	31
6. Fazit.....	32
7. Glossar	34
8. Literaturverzeichnis.....	36

1. Einleitung

In dieser Arbeit geht es um gewisse Phänomene, die Blitzentladungen ähneln, jedoch mehrere Kilometer weiter oben, in der Stratosphäre und Mesosphäre, stattfinden. Die Entladungen werden durch heftige Gewitter in der Troposphäre ausgelöst. Der Oberbegriff dieser Phänomene lautet TLEs und leitet sich aus dem Englischen ab. TLE steht für „Transient Luminous Events“ und bedeutet etwa so viel wie „flüchtig leuchtende Erscheinungen.“ Zu den drei Haupttypen der TLEs gehören die „Blue Jets“ (Ein englischer Begriff, der mangels Übersetzung im Folgenden so verwendet wird), die roten Kobolde (vom Englischen „red sprites“) und die roten Elfen (vom Englischen „red elves“). Anhand des Titelbilds sollte man eine ungefähre Ahnung erhalten, wie diese TLEs aussehen und wo sie ungefähr auftreten.

Die TLEs sind in der Wissenschaft ein noch ziemlich unerforschtes Gebiet, da sie erst seit 1992 mit Hilfe von Videokameras auf Spaceshuttles aufgezeichnet- und somit bestätigt werden konnten. Darum ist es aus wissenschaftlicher Perspektive wichtig, dass man mehr über diese Ereignisse herausfindet und die gewonnenen Informationen hin und wieder zusammenfasst. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die einzelnen TLEs zu geben und aufzuzeigen, in welcher Form und mit welchen Eigenschaften sie erscheinen. Des Weiteren wird dargestellt, was man über den Ursprung dieser Entladungen weiss, also über die Mechanismen, die zur Entstehung von TLEs führen. Da es sich um einen neuen Zweig der Wissenschaft handelt, sind die hier beschriebenen Mechanismen teilweise noch mit grossen Unsicherheiten verbunden. Es sind sich nämlich fast alle Wissenschaftler in diesem Bereich einig, dass keine der Theorien die Entstehung der einzelnen TLEs vollständig erklärt.

Ein zweiter Aspekt, der sich zu untersuchen lohnt, ist der Einfluss der TLEs auf die Chemie der Stratosphäre bzw. der Mesosphäre. Da Blitzentladungen durch ihre hohen Temperaturen und Ladungen Moleküle spalten und neue Moleküle bilden können, wird davon ausgegangen, dass dies auch hier geschieht. Bei Blitzentladungen handelt es sich meist um die Entstehung von NO_x (NO und NO_2) und HO_x (H , OH , sowie peroxy Radikale) Gasen, welche durch die Spaltung von atmosphärischem Stickstoff und Wasser gebildet werden. Diese Gase, die zu den Radikalen gehören, können wiederum einen Einfluss auf die Ozonbildung und -zerstörung haben und sind daher in den Atmosphärenwissenschaften von Interesse. Um jedoch eine Aussage über den Einfluss der Chemie machen zu können, muss man zuerst herausfinden, wie häufig diese TLEs auftreten. Dazu gehört unter anderem die geographische Verteilung, da auch diese einen Einfluss auf die Häufigkeit hat.

Zuletzt wird eine Beurteilung vorgenommen, um herauszufinden, ob der Einfluss auf die Chemie hinreichend relevant ist, um in einem Globalen Chemie Klima Modell, kurz CCM (abgeleitet vom Englischen „Chemistry-Climate-Model“) eine Anpassung vorzunehmen. Im Moment werden die TLEs in CCMs nicht beachtet und es stellt sich die Frage, ob allenfalls eine Parametrisierung notwendig wird.

Um gewisse Punkte der Arbeit zu verstehen, sind einige technische Begriffe vonnöten, die hier eingeführt werden: Bei einem Gewitter gibt es immer 2 Typen von Blitzentladungen. Zum einen gibt es die Wolkenblitze, kurz CC (vom Englischen „Cloud to Cloud“), die positiv oder negativ geladen sein können. Zum anderen gibt es die Blitzschläge, kurz CG (vom Englischen „Cloud to Ground“), die ihrerseits auch positiv oder negativ sein können. Positive CGs schreibt man auch als +CG, sie haben viel grössere Ladungen als die negativen CGs und beeinflussen somit auch das elektrische Feld stärker. Um später etwas über die Verteilung von TLEs herauszufinden, folgt hier ein kleiner Exkurs zu den dynamischen Systemen, die TLEs entstehen lassen: Damit sich diese bilden können, reicht eine Gewitterzelle meist nicht aus, sondern es muss sich um ein Gewitter-System handeln.

- *Multizelluläre Systeme*: Das kleinstmögliche System sind Multizelluläre Systeme, die immerhin eine Ausdehnung von 100-1000 km² besitzen (Füllekrug et al., 2006; Siingh et al., 2012).
- *Superzellen*: Die nächst stärkere Kategorie sind Superzellen, welche für die Produktion von TLEs bekannt sind, da über ihnen gelegentlich TLEs entdeckt werden. Superzellen können über mehrere Stunden bestehen und beinhalten die stärksten Erscheinungsformen von Gewittern, wie zum Beispiel Hagel, Extremniederschlag und Sturm- bis Orkanböen. Sie bedecken eine Fläche von ca. 5000-10'000 km² (Füllekrug et al., 2006; Siingh et al., 2012).
- *Squall Lines*: „Squall Lines“ (zu Deutsch Sturmwalzen) sind in der nächst stärkeren Kategorie und bestehen entweder aus Zonen mit konstanter Konvektion oder einzelnen Superzellen, die sich quasi zu einem Multizellulären System von Superzellen zusammenfügen. Sie bedecken eine Fläche von typischen 10'000-20'000 km² (Füllekrug et al., 2006; Siingh et al., 2012).
- *Mesoskalische Konvektive Systeme*: MCSs (aus dem Englischen abgeleitet von „Mesoscale Convective Systems“) sind die höchste Kategorie von Gewittersystemen und bekannt für die Entwicklung von zerstörerischen Tornados und Hagel-Extremereignissen. Als MCSs werden solche Anhäufungen von Superzellen definiert, die eine Fläche von 20'000 km² und mehr erfassen. MCSs haben einen konvektiven Kern, in welchem die Aufwinde und somit die Hagelbildung am stärksten ist und der mit der Zeit von den heftigsten stratiformen Niederschlägen begleitet wird. „Mesoscale Convective Complexes“ (MCCs) sind die grösste Form dieser MCSs und beinhalten eine Fläche von 100'000 km² (Füllekrug et al., 2006; Siingh et al., 2012).

Die Arbeit gliedert sich in einen ersten Teil über eine Untergruppe der TLEs, den sogenannten Blue Jets, einen zweiten Teil über eine weitere Untergruppe, den roten Kobolden und in einem dritten Teil über die Roten Elfen, die dritte Untergruppe. Alle drei Teile behandeln die Eigenschaften und Formen, Entstehungsmechanismen und Verteilung der TLEs, sowie schliesslich deren Einfluss auf die Chemie. Ein vierter

Teil der Arbeit diskutiert die Ergebnisse bezüglich etwaiger Anpassungen in CCMs, gefolgt von einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.

2. Blue Jets

Das erste Phänomen, um welches es in dieser Arbeit geht, sind die sogenannten Blue Jets (im Folgenden BJ genannt). Der Begriff kommt daher, dass die Erscheinung dieses Phänomens einem blauen Blitzkanal ähnelt, der sich in Richtung Stratosphäre entlädt. Einen BJ kann man zwar mit blossen Auge sehen, jedoch braucht es dafür optimale Bedingungen, welche die Gewitterzelle, die Distanz zur Zelle, die Sichtverhältnisse und noch einige andere Dinge umfassen. Wenn man jedoch mit Hilfe von Kameras genauer hinschaut, wird klar, dass BJs genau genommen keine Blitze sind, sondern eher einem Leuchten ähneln, wie demjenigen des Nordlichts (Aurora Borealis).

2.1 Eigenschaften und Formen

BJs sind Entladungen, die sich nach oben in die Stratosphäre ausbreiten und sich im Bereich von 15-40 km Höhe oberhalb von Gewitterzellen befinden. Die Erscheinungsform ist ein in blaues Licht getauchter Kegel, der am oberen Ende der Gewitterwolke beginnt und von dort aus nach oben expandiert. Als Veranschaulichung dient hier Abb. 1. Das blaue Licht, das den BJs ihren Namen gibt, kommt von angeregten N_2 -Molekülen, die in ihren Grundzustand zurückspringen (Sukhorukov & Stubbe, 1998). Die Geschwindigkeit, mit der sich BJs aufwärts bewegen, beträgt etwa 10^5 m/s, was in etwa vergleichbar ist zur Geschwindigkeit eines Vorblitzes in einer CG-Entladung. Der Durchmesser liegt im Bereich von einigen hundert Metern an der Basis und nimmt mit der Höhe zu (Winkler & Notholt, 2015), ist also viel breiter als bei einem troposphärischen CG (ca. 1 cm). Im Mittel beträgt der Ausbreitungswinkel des Kegels 14.7° . Die Helligkeit von BJs beträgt an der Spitze des Kegels (=bei der Wolkenobergrenze) gemäss Schätzungen etwa 0.5 Mega Rayleigh¹ (MR) und nimmt mit der Höhe bis auf etwa 7 kR in den obersten Bereichen ab (Rakov & Uman, 2006). BJs können bis zu einem GJ Energie von der Troposphäre in die Stratosphäre transferieren (Heavner et al., 2000). Sie haben meist eine Lebensdauer im Bereich von 200-300 ms (Siingh et al., 2012), was ungefähr derjenigen einer normalen Blitzentladung entspricht. BJs sind nur mit Mühe auf dem Erdboden zu erkennen, weil die geradlinige Ausbreitung von blauem Licht in der Atmosphäre durch Rayleigh-Streuung stark geschwächt wird (Pasko & George, 2002).

¹ Rayleigh: Rayleigh [R] ist eine Einheit für das Nachthimmelsleuchten (=“night airglow“), zu der auch die Aurora Borealis gehört. $1 \text{ Rayleigh} = 10^{10} \text{ photonen} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Sukhorukov et al., 1996).

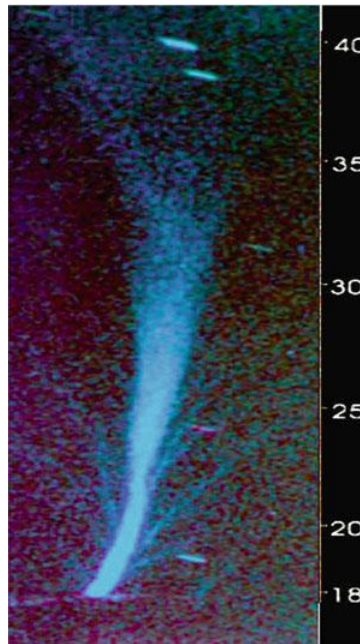


Abb.1 Foto eines Blue Jet wobei rechts die Höhe in km angegeben ist. Aus Surkov and Hayakawa, 2014.

Es gibt noch eine weitere Klasse von BJs, die man gigantische Jets nennt (aus dem Englischen von „Gigantic Jet“). Im Unterschied zu den BJ reichen die „Gigantic Jet“ bis in die untere Ionosphäre, also bis zu einer Höhe von 90 km. Zudem sind sie langlebiger als BJs und von blossem Auge besser erkennbar (da Silva & Pasko, 2013). Andererseits sind sie extrem seltene Ereignisse. Deshalb wird auf die „Gigantic Jet“ hier nicht näher eingegangen, weil dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

2.2 Entstehung

Es existieren mehrere Theorien, die als Erklärung für das Phänomen BJ erstellt wurden. Bevor man diese jedoch erklären kann, braucht es einige Grundbegriffe, die man zuerst verstehen muss.

- *Streamer*: „Streamer“ sind kurzlebige faserartige Plasmen (d.h. teil-ionisierte Gase), deren Dynamik stark durch örtlich begrenzte nichtlineare Wellen mit Ladungsänderungen im Raum bestimmt sind (Pasko et al., 1996).
- *Leitkanal*: Ein Leitkanal, im Folgenden „Leader“ genannt, ist ein dünner leitender Kanal, dessen Leitfähigkeit um einige Grössenordnungen höher ist als die eines Streamers. Der Leader-Kopf besitzt ein so starkes elektrisches Feld, dass das umgebende Medium ionisiert wird und daraus ein Ionisationskanal gebildet wird (Siingh et al., 2012).

Die ersten Theorien gehen davon aus, dass BJs wie gewöhnliche Blitzentladungen (vom Englischen „conventional breakdown“) entstehen, und dass dabei Streamer mit entweder nur positiven oder nur negativen Ladungen eine Rolle spielen. Ein zweiter, etwas anderer Ansatz war die Idee eines „runaway electron breakdown“ (auf Deutsch

„Runaway-Elektronen-Entladung“ genannt), bei dem von einer Elektronen-Kettenreaktion ausgegangen wird. Schliesslich gibt es noch die dritte und im Moment am meisten akzeptierte Theorie, dass ein sogenannter Bi-Leader für die Entwicklung eines BJs verantwortlich ist (Winkler & Notholt, 2015). Diese drei Theorien werden nun ganz kurz vorgestellt, wobei erwähnt werden muss, dass bis jetzt noch keine Theorie existiert, die alle Erscheinungsformen und Eigenschaften eines BJs voll umfasst. Deshalb muss auf diesem Gebiet in näherer Zukunft noch einiges erforscht werden.

2.2.1 BJ als Produkt eines Streamers mit nur negativer oder nur positiver Ladung

Beide Theorien gehen davon aus, dass bei der Entwicklung des BJs ein Streamer vorangeht. Beim Streamer mit nur positiver Ladung wurde angenommen, dass entweder metastabile Sauerstoffmoleküle, die aufwärts gerichtet sind, oder stark geladene Hagelkörner eine Instabilität von geladenen Tröpfchen auslösen, die zu einer Ionisation führen. Einst geformt, kann die ionisierte Region als Auslöser für die Entwicklung eines aufwärts gerichteten positiven Streamers dienen, der sich dann weiter nach oben bewegt (Pasko et al., 1996). Die Autoren haben ihre Theorie danach in einem Modell getestet, um einen BJ zu simulieren. Die Ergebnisse waren zufriedenstellend und stimmten mit den bekannten Beobachtungen von BJs überein. So waren beispielsweise die Maximalhöhe der modellierten BJs bei ungefähr 50 km und die Entladungen bei 300-400 C², was dem Durchschnitt eines BJs entspricht (Pasko et al., 1996). Beim Streamer mit nur negativer Ladung wurde angenommen, dass ein positiver CG oder ein CC mit der richtigen Ladung eine Inhomogenität in den höheren Teilen der Gewitterwolke auslösen kann. Durch diese kann eine Elektronen-Lawine ausgelöst werden, die sich aufwärts in Richtung reine Luft bewegt (Sukhorukov et al., 1996). Daraus kann dann je nach Anfangsbedingung ein negativer Streamer entstehen oder andere Formen, auf die hier nicht näher eingegangen wird (für Details siehe: Sukhorukov et al., 1996).

2.2.2 BJ als Folge eines „runaway electron breakdown“

Die Grundidee des Konzepts „runaway electron breakdown“ beruht darauf, dass es ein so starkes elektrisches Feld gibt, dass die elektrische Kraft auf freie Elektronen die Reibungskraft, welche durch Stösse mit Molekülen zustande kommt, übersteigt. Dabei entstehen Elektronen mit höherer Energie, die noch weiter beschleunigt werden. Die Theorie beruht nun darauf, dass in einer Gewitterzelle genügend starke elektrische Felder vorhanden sind, die eine Beschleunigung der Elektronen auslösen und schliesslich zu höher geladenen Elektronen führen. Diese energetisch höheren Elektronen ionisieren die Luft weiter, was zur Entstehung von sogenannten Sekun-

² Vgl. Glossar.

därelektronen führt. Diese können wiederum die Luft ionisieren, zu tertiären Elektronen führen, und es entsteht somit eine Elektronenlawine, die sich exponentiell weiterentwickelt. Der Zusammenhang mit der Entstehung eines BJs liegt nun darin, dass die Autoren der Theorie davon ausgehen, dass eine Änderung der Richtung des elektrischen Felds der Gewitterwolke eine Elektronenlawine auslösen kann. Dabei kann zum Beispiel ein negativer CC dazu führen, dass das gesamte Feld nach unten gerichtet ist und die Elektronen dabei nach oben beschleunigt werden. Eine gute Veranschaulichung dazu liefert die Abbildung 2. Weil die Elektronen durch Stösse Stickstoffmoleküle anregen, wird der BJ sichtbar (Roussel-Dupré & Gurevich, 1996).

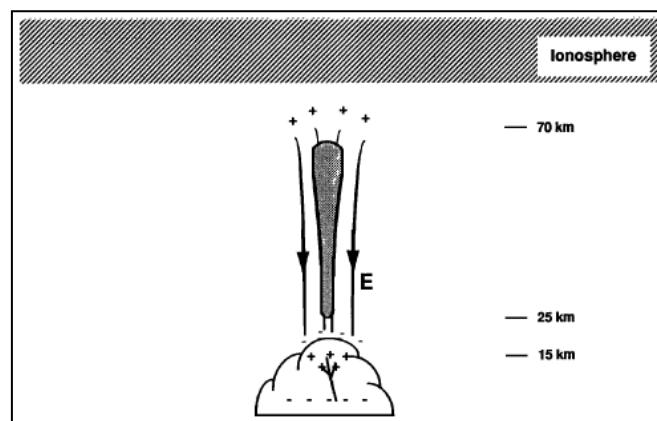


Abb.2 Elektrische Felder zwischen der Troposphäre und der oberen Mesosphäre aus Roussel-Dupré and Gurevich, 1996.

2.2.3 BJ als Folge eines Bi-Leaders

Diese Theorie für BJs geht davon aus, dass für die Bildung eines Streamers ein Leader nötig ist. Aus diesen Leader-Köpfen entstehen gemäss der Theorie von Milikh et al., 2007 die Streamer, welche dann den oberen Teil der BJs bilden, wie in Abb.3 zu erkennen ist. Der Leader aus besagter Theorie ist ein Bi-Leader. Das heisst, dass es zwei Leader mit unterschiedlichen Ladungen gibt, die sich gegenseitig durch ihre Ladungen und Strömungen erhalten. Einer der Leader geht jedoch in Richtung Erde, während der andere sich aufwärts in Richtung Stratosphäre bewegt und dort einen Streamer erzeugt (Milikh et al., 2007).

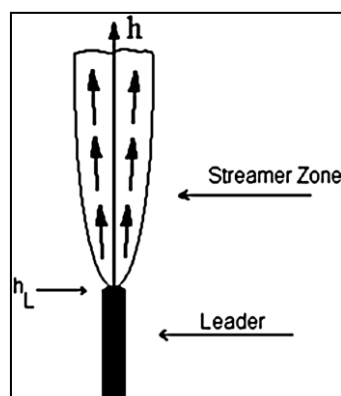


Abb.3 Schematische Figur eines BJ aus Milikh et al., 2007.

Der Beweis, dass Leader an der Entstehung von BJs beteiligt sind, geht aus zwei Gründen hervor: Erstens würde sich jedes kalte Leader-Plasma in einer Höhe von 18 km innerhalb von 10 μ s auflösen und könnte den BJ-Streamer während einer Lebenszeit von 0.3 s nicht unterstützen. Zweitens kann eine Gewitterwolke ohne Hilfe eines Leaders kein so hohes elektrisches Feld (134 V/m) erzeugen, wie es für einen Streamer benötigt würde (Milikh et al., 2007).

2.3 Verteilung

In der Einleitung wurde über die einzelnen Gewittersysteme berichtet, auf die nun Bezug genommen wird. BJs entstehen über Superzellen, Squall lines und MCSs. Am wahrscheinlichsten ist die Entstehung von BJs jedoch bei Squall lines, da Superzellen meist der Auslöser von BJs sind (Füllekrug et al., 2006). Für BJs braucht es nämlich eine hohe elektrische Ladung in der Wolkenobergrenze-Region, wofür Hagelbildung ein Hinweis ist. Je extremer der Hagelniederschlag, umso wahrscheinlicher ist das Auftreten eines BJs. BJs entstehen unabhängig von positiven oder negativen CGs. Sie treten öfters in der Startphase der Lebenszeit einer Gewitterzelle auf (Pasko & George, 2002). Bei MCSs entstehen BJs am ehesten in den konvektiven Kernen. Das lässt sich dadurch erklären, dass in diesen Kernen die Geschwindigkeit, mit der ein elektrisches Feld aufgebaut wird, sehr schnell ist. Diese Erkenntnis resultiert daraus, dass dort die Aufwärtsbewegung am stärksten ist und die grössten Hagelkörner dort entstehen. Diese sind - wie bereits erwähnt - ein Indikator für die hohen Ladungen (Füllekrug et al., 2006).

So viel zu den Bedingungen, wann BJs auftreten können. Über die geografische Verteilung und mit welcher Häufigkeit auf globaler Skala diese auftreten, ist bislang sehr wenig bekannt. Diverse Autoren erwähnen dies auch in ihren Publikationen, und zwar besonders diejenigen, welche sich mit den chemischen Auswirkungen von BJs auf die Stratosphärenchemie befassen. So schreiben z.B. Peterson et al. (2009) in ihrer Publikation: Zwei Probleme existieren, wenn man die gemessenen NO_x -Resultate verwenden möchte, um die TLE- NO_x -Produktion zu bestimmen. Erstens ist die Form eines BJ zwar einfach zu definieren, aber die globale Häufigkeit von BJs ist nicht bekannt (Peterson et al., 2009). Trotzdem gibt es eine Zahl, die ab und zu erwähnt wird und die von einigen Autoren bei ihren Berechnungen verwendet wird: Bei den ersten, wissenschaftlich dokumentierten Beobachtungen von BJs mit Hilfe von Flugzeugen, die durch Wescott et al. 1995 durchgeführt wurde, die den BJ ihren Namen gaben, wurden innerhalb von 22 Minuten 56 BJs aufgezeichnet. Daher kamen sie bei ihrer Untersuchung auf die Zahl von 3 BJ pro Minute (Wescott et al., 1995). Diese Zahl ist eine sehr unsichere Schätzung und deshalb wird darauf nicht mehr weiter eingegangen.

2.4 Einfluss auf die Chemie der Stratosphäre

In diesem Unterkapitel geht es darum, herauszufinden, ob BJs einen Einfluss auf die Chemie der Stratosphäre haben oder nicht. Insbesondere ist hier die Familie der NO_x -Gase interessant, da diese auch einen Einfluss auf die Ozon-Produktion/-Zerstörung haben. Ein Hinweis, dass NO_x von TLEs kommen kann, ist das Profil der Konzentration von NO_x in der Höhe. Die Konzentration nimmt von der Tropopause an immer mehr zu, bis zu einem Maximum bei ca. 40 km Höhe, und nimmt danach wieder ab (Peterson et al., 2002). Es wurden bisher einige wissenschaftliche Artikel, welche dieses Thema behandeln, veröffentlicht, jedoch wurde bis heute nur der Einfluss von Leader und Streamer auf die Stratosphärenchemie betrachtet. Es gibt zwei unterschiedliche Vorgehensweisen, um diesen Einfluss zu bestimmen, und zwar einerseits Modelle, welche BJs simulieren oder Laborexperimente, die versuchen, einen BJ nachzustellen. Im Nachfolgenden werden die Vorgehensweisen und die Resultate kurz vorgestellt.

2.4.1 Methode Laborexperiment

Peterson et al. (2009) gingen in ihrer Überlegung davon aus, dass Laborexperimente zu TLEs aufzeigen können, was für einen Einfluss diese auf den NO_x -Haushalt in der mittleren Atmosphäre haben können. Ihre Methode war es, in einer Kammer, deren Druck kontrolliert wurde, elektrische Ladungen zu initiieren, die BJs sehr nahe kommen sollten. Zudem gab es an ihrer Apparatur einen NO_x -Detektor, der die Konzentration der Gase NO und NO_2 mit Hilfe von Chemilumineszenz bestimmen sollte. Für die BJs wählten sie zwei Druckeinheiten, wovon die eine der BJ-Basis entsprach, bei 100 mb^3 (~15 km Höhe) und die andere dem mittleren Teil des BJs bei etwa 10 mb (~30 km Höhe). Die Messungen sollten den Zeitraum von 30 s bis 60 s nach dem BJ-Ereignis simulieren.

Folgende Resultate kamen dabei heraus: In der 100 mb Kammer wurden durch den im Labor produzierten BJ zwischen $1.27 \cdot 10^{17}$ und $6.4 \cdot 10^{17}$ Moleküle NO_x pro Entladung produziert. In der 10 mb Kammer hingegen wurden nur zwischen $0.17 \cdot 10^{17}$ und $2.78 \cdot 10^{17}$ Moleküle NO_x pro Entladung produziert. Nun gab es zwei Möglichkeiten, um von diesen Zahlen auf die gesamte Anzahl NO_x -Moleküle, die ein BJ produziert, zu kommen. Die Energiemethode, bei der man die Anzahl der Moleküle in Abhängigkeit von der Energie, die ein BJ produziert, angibt, oder die Geometrische Methode, bei der man vom Volumen eines BJs ausgeht. Schlussendlich lagen die erhaltenen Werte von beiden Methoden zusammengenommen zwischen $1.7 \cdot 10^{22}$ und $7.4 \cdot 10^{26}$ Molekülen NO_x , die bei einem einzigen BJ produziert werden (Peterson et al., 2009). Wie bereits vorhin angesprochen, gibt es keine genaue Zahl für die globale Verteilung von BJs. Somit haben die Autoren in ihrem wissenschaftlichen Artikel

³ Vgl. Glossar.

keine Hochrechnung für den Einfluss von BJs im globalen Rahmen erstellt. Doch über die Resultate und ihre Auswirkungen wird später in Kapitel 5.1 die Rede sein.

2.4.2 Methode BJ-Simulation im Modell

Winkler und Notholt (2015) berechneten in ihrem wissenschaftlichen Artikel mit Hilfe eines numerischen Modells die chemischen Einflüsse von Streamer/Leader eines BJs. Wichtig und darum bereits im Vorhinein zu erwähnen, ist, dass diese Ergebnisse nicht direkt den Einfluss eines BJs wiedergeben, sondern nur einzelne Teile. Bei ihrer numerischen Simulation berechneten sie separat die chemischen Reaktionen im Streamer und danach die Reaktionen im Leader, gemäss der Einteilung der BJ-Theorie von Milikh et al., 2007 (siehe Kapitel 2.2.3 BJ als Folge eines Bi-Leaders).

Folgende Resultate kamen bei der Modellierung der Reaktionen im Streamer heraus: In den ersten 100 ms nach der Entladung entsteht durch Ionisation ein energetisch höher geladenes Sauerstoff-Atom, welches durch die bekannte Reaktion mit einem Stosspartner und atmosphärischem Sauerstoff zu einer Ozon-Produktion führt (Gleichung 1).



Nach wenigen Sekunden nimmt die Ozonkonzentration jedoch langsam wieder ab durch die ebenfalls allgemein bekannte Reaktion mit NO (Gleichung 2). So viel zu den Reaktionen, nun folgen die Produkte und ihre Abhängigkeit von der Höhe auf 100 s, nach dem BJ-Ereignis berechnet. Die relative Ozonzunahme mit der Höhe beträgt ca. 7% auf 27 km Höhe und 300% auf 18 km Höhe. Die relative NO_x-Zunahme beträgt ca. 4000% auf 27km Höhe und 15'000% auf 18 km Höhe und übertrifft somit jegliche Erwartungen.

Folgende Resultate kamen bei der Modellierung der Reaktionen im Leader heraus: Was beim Leader besonders auffällt, ist, dass nicht nur NO_x-Gase häufig gebildet werden, sondern dass auch Lachgas eine grössere Rolle spielt. Es wird vor allem durch die Reaktion von Sauerstoff mit Stickstoff wegen der hohen Temperaturen im Leader gebildet (Gleichung 3). Die Zunahme von Lachgas im Leader ist ziemlich extrem und beträgt fast 10¹⁸ Moleküle/cm³ auf 18 km Höhe. Das Ozon nimmt im Gegensatz zu den Streamer-Resultaten um 5 Potenzen ab und das gibt im Netto einen Ozonverlust. Der Verlust von Ozon geschieht hauptsächlich durch Gleichung 2 und darum ist die NO_x-Zunahme (auch auf 18 km Höhe) im Leader sogar noch höher als im Streamer: Eine Zunahme von 10¹⁶ Moleküle/cm³ Vergleich zu 10¹² Moleküle/cm³ beim Streamer (Winkler & Notholt, 2015).

Auch wenn die erhaltenen Zahlen im Vergleich zu der Methode mit den Laborexperimenten klein erscheint, muss nochmals betont werden, dass mit dem Streamer und dem Leader nicht der ganze BJ abgedeckt ist, sondern nur einzelne Stadien. Zudem wurde ein Zeitlimit von 100 s nach dem BJ-Ereignis gewählt und das sagt leider nichts darüber aus, wie lange die Störung der umliegenden Stratosphäre nachher noch andauern kann. Wiederum kommt hier der Verweis auf Kapitel 5, wo später die Resultate besprochen werden.

3. Rote Koblolde

Die zweite Untergruppe von TLEs, die in dieser Arbeit behandelt wird, sind die Koblolde, die rot erscheinen und in der Höhe der Mesosphäre stattfinden. Koblolde sind Entladungen, die sich nach unten oder oben bewegen und gleich wie Schneeflocken immer eine andere Form einnehmen. Sie sind vom Erdboden aus nicht von blossen Auge zu erkennen, da sie zu kurzlebig und auch weniger hell als BJs sind. Es gibt jedoch Berichte von Piloten, die solche Koblolde schon viel früher gesehen haben, deren Schilderungen aber als Sinnestäuschung abgestuft wurden.

3.1 Eigenschaften und Formen

Koblolde sind Entladungen, die in etwa 75 km Höhe entstehen und sich von dort meist abwärts bis etwa 40 km Höhe ausbreiten. Es gibt jedoch auch aufwärts gerichtete Koblolde, die seltener erscheinen (Siingh et al., 2012). Wie eine Schneeflocke ist kein Kobold in seiner Erscheinung wie ein anderer, jedoch gibt es eine gewisse Einteilung, zu der sich ähnelnde Koblolde gehören. Es gibt gemäss der Einteilung von Bor (2013) fünf Kategorien von Kobolden, eingeteilt in ihre morphologischen Erscheinungen: (1) säulenförmige Koblolde („columniform sprites“), (2) gegabelte und baumförmige Koblolde („wishbones and trees“), (3) engelförmige Koblolde („angels“), (4) karottenförmige Koblolde („carrots“) und (5) andersförmige Koblolde. Die vier bestimmten der fünf Kategorien sind in Abbildung 4 zum Vergleich aufgelistet. Es kann vorkommen, dass mehrere Koblolde in einer Gruppe auftreten und einen sogenannten Cluster bilden, der dann durch einen mehrkanaligen +CG ausgelöst wird (Bor, 2013).

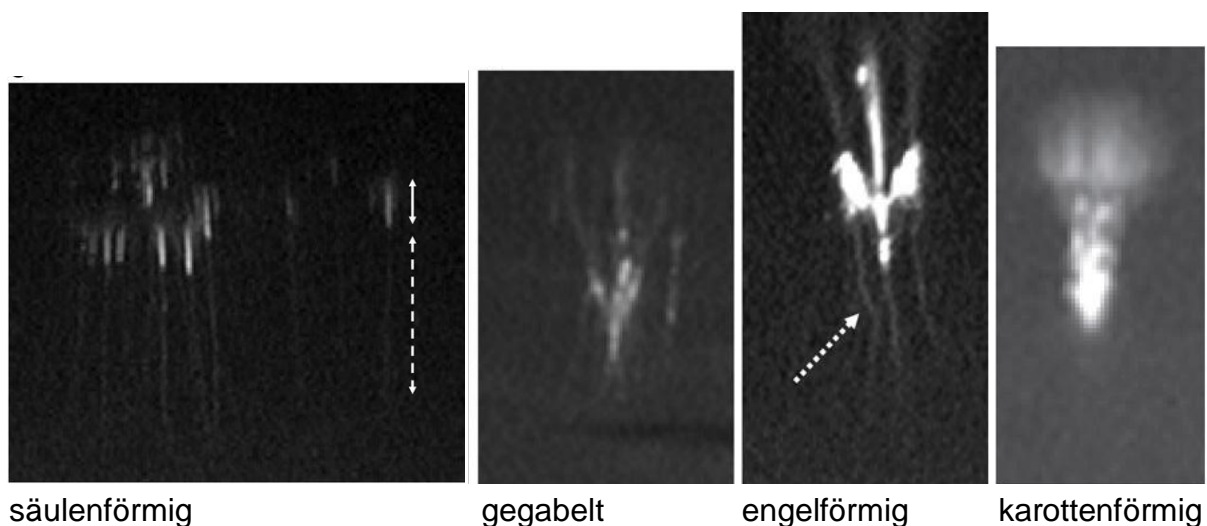


Abb. 4 Verschiedene Erscheinungsformen eines Kobolds, zusammengestellt aus Bor, 2013.

Was alle Koboldtypen gemeinsam haben ist, dass jeder einzelne Kobold in drei Teilbereiche unterteilt werden kann. Es gibt den obersten Teil, der als diffuse Region bezeichnet wird, danach folgt in der Mitte die Übergangsregion und zuunterst gibt es die Streamer Region. (Winkler & Notholt, 2014). Man sieht diese Unterteilung anhand eines fotografierten Koboldes sehr schön in Abbildung 5(b). Die Emissionen von Licht liegen normalerweise im roten Spektrum, können aber in den unteren Teilen der Streamer Region blau erscheinen. Für die roten Emissionen ist das geladene Molekül N_2^+ zuständig und für die blauen Emissionen wie bei den BJs eine höher geladene Art von Stickstoffmolekülen ($N_2(2P)$). Die mittlere Helligkeit liegt im Bereich von 0.5-1 MR. Es gibt jedoch auch einzelne Ausreisser, die sehr hell – bis zu mehreren 100 GR – dafür aber auch sehr kurzlebig sind (Siingh et al., 2012). Kobolde können eine durchschnittliche Energie von 22 MJ pro Kobold produzieren und in die Mesosphäre deponieren (Hsu et al., 2009). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Kobolden beträgt im Mittel etwa 10^7 m/s und das erklärt auch warum Kobolde im Vergleich zu BJs von sehr kurzer Dauer sind, nämlich 1-2 ms (Füllekrug et al., 2006).

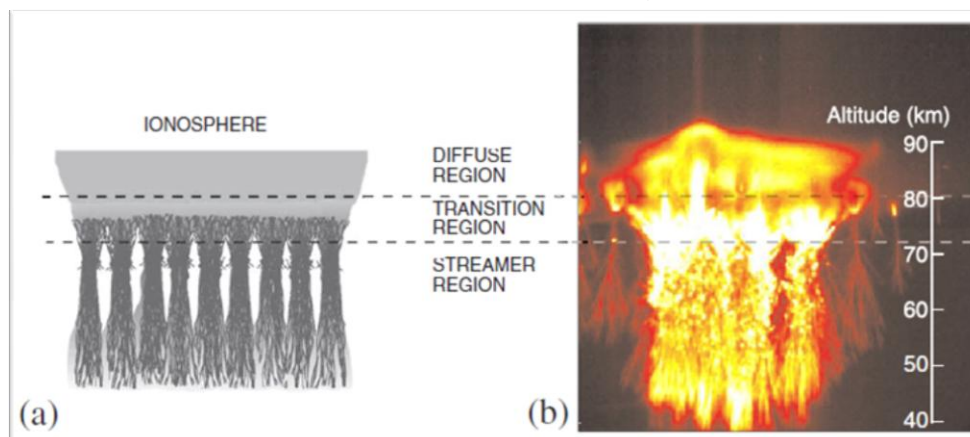


Abb. 5 Die unterschiedlichen Regionen eines Koboldes aus Pasko and Stenbaek-Nielsen, 2002.

3.2 Entstehung

Die Mechanismen, die dazu führen, dass ein Kobold entsteht, basieren auf zwei verschiedenen Theorien, die sich jedoch nicht wesentlich unterscheiden. Wie bei den BJs stehen sich die Theorie der gewöhnlichen Blitzentladung und die Theorie des „runaway electron breakdown“ gegenüber. Beide Theorien haben aber denselben Ursprung. Für die Entstehung eines Koboldes braucht es nämlich +CGs, die sehr stark sein müssen (mehr dazu in 3.3 Verteilung), um sie zu initialisieren. Je nach Art des auslösenden +CGs entstehen die oben erwähnten Erscheinungsformen von Kobolden. Es kommt dabei vor allem auf die Intensität der Entladung des +CGs an (Surkov & Hayakawa, 2014).

3.2.1 Gewöhnliche Entladung mittels Streamer

Ein +CG in einer Gewitterwolke entlädt sich von viel weiter oben als ein -CG. Das liegt daran, dass eine Gewitterwolke von der Natur aus im unteren Teil immer negativ und im oberen Teil immer positiv geladen ist. Als +CG wird nun die Entladung des obersten Teils einer Wolke bezeichnet. Vor dieser Entladung entsteht über der Gewitterwolke eine Art geladene negative Zone, die von der obersten Wolken-schicht angezogen wird. Nach der Entladung durch den +CG fehlen in der obersten Schicht die positiven Ladungen und das erzeugt ein quasi elektrostatisches Feld das sich von der Wolkenobergrenze aus vertikal nach oben ausdehnt, jedoch abwärts gerichtet ist. Zur Veranschaulichung dieser Prozesse dient Abbildung 6. Durch das entstandene aufwärts gerichtete Elektrische Feld können ab einer gewissen Höhe Streamer entstehen. Das geschieht deshalb in 75 km Höhe, weil die mittlere freie Weglänge⁴ eines Elektrons in dieser Höhe etwa 1 cm beträgt und das Zusammenstossen von diesen Elektronen mit anderen Molekülen zu einer Erwärmung und Ionisierung der umgebenden Luft führt. Das ist wie bereits oben erwähnt die Funktionsweise eines Streamers und der lässt nun einen Kobold entstehen (Pasko et al., 1997).

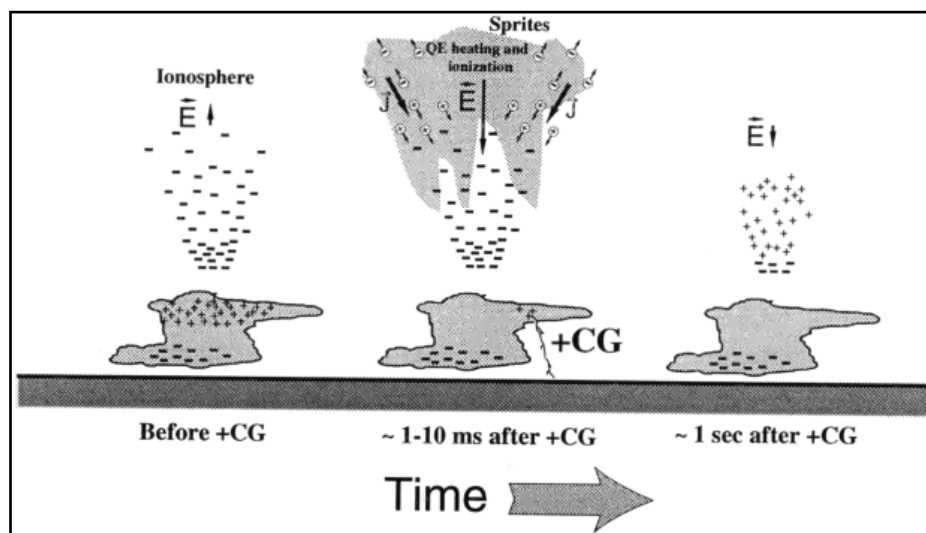


Abb. 6 Entwicklung des quasi elektrostatischen Felds oberhalb einer Gewitterwolke mit der Zeit aus Pasko et al., 1997.

3.2.2 Entladung mittels „runaway electron breakdown“

Bis zur Entstehung des elektrischen Feldes unterscheiden sich die beiden Theorien nicht. Ab dann besagt aber die „runaway electron breakdown“ Theorie, dass durch das nun abwärts gerichtete Feld das Ladungsmoment der schnellen, abwärts gerichteten Elektronen aus dem Weltall geändert wird. Wenn nun diese Keimelektronen,

⁴ Die mittlere freie Weglänge $[\bar{\lambda}]$ ist die Länge, die ein Teilchen oder ein Elektron zurücklegen kann, ohne sich an einem anderen Teilchen zu stossen. $\bar{\lambda}$ beträgt auf der Erdoberfläche 100 nm, ist umgekehrt proportional vom Druck abhängig und nimmt daher mit abnehmendem Druck zu (Chemie.de).

wie sie auch genannt werden, auf grosse Kerne von Molekülen treffen, werden sie von ihrer Fluglinie abgelenkt und fliegen in Richtung der Ionosphäre. Da aber einige Elektronen auch gestreut werden, fliegen diese in alle Richtungen weiter und können eine Elektronenlawine auslösen, wenn das elektrische Feld hierfür genügend hoch ist. Das geschieht nun schon bereits etwas tiefer, da im Unterschied zur gewöhnlichen Entladung mittels eines Streamers die Entladung mittels eines „runaway electron breakdown“ schon bei elektrischen Feldern mit weniger hohen Ladungen stattfindet. Das erklärt gerade, warum nicht alle Koboide auf derselben Höhe stattfinden, denn es ist in wissenschaftlichen Kreisen so, dass beide Theorien gleich anerkannt sind (Surkov & Hayakawa, 2012).

3.3 Verteilung

Da Koboide mit dem Auftreten von +CGs zusammenhängen, folgt logischerweise der Schluss, dass diese für die Verteilung sehr wichtig sind. Nicht alle +CGs lösen einen Kobold aus, denn die limitierende Grösse ist die Änderung des elektrischen Dipolmoments (ΔMq), das grösser als 600 C km^5 sein muss. Das elektrische Dipolmoment in Gewitterwolken⁶ ist als das Produkt von der Höhe von der die Ladung zum Grund entladen wird mit der Menge gerade dieser Ladung definiert. Mit folgender Gleichung (4) wird das etwas verständlicher.

$$\Delta Mq(t) = Zq \times Q(t) \quad (4),$$

wobei Zq die Höhe und $Q(t)$ die Ladung in Abhängigkeit von der Zeit ist (Lyons et al., 2008).

Koboide kommen bei Superzellen vereinzelt vor, sind dort aber eher selten, weil das ΔMq meist kleiner als die benötigte Mindestgrösse ist. Bei Squall lines ist die Chance hoch, dass viele Koboide in unterschiedlichen Variationen vorkommen, und zwar vor allem dann, wenn die Fläche des stratiformen Niederschlags besonders gross ist. MCSs und insbesondere MCCs sind die am besten bekannten Kobold-Produzenten. Hier gilt die Regel, dass je kräftiger und grösser die MCSs sind, umso wahrscheinlicher das Auftreten von Kobolden ist (Füllekrug et al., 2006).

Die geographische Verteilung von Kobolden ist etwas besser erforscht, als das bei BJs der Fall ist. Man kann die Koboide nämlich mittels Satelliten orten, da diese eine Störung des Magnetfeldes auslösen. Man macht dies, indem man Wellen mit sehr tiefen Frequenzen (ELF vom Englischen „Extremely Low Frequency“) benutzt, die eine globale Schätzung von Kobold-Ereignissen ermöglichen. Mit dieser Methode kommt man auf ~720 Koboide/Tag. Es ist jedoch bekannt, dass nur etwa 20% aller

⁵ Vgl. Glossar.

⁶ Das elektrische Dipolmoment in Gewitterwolken entsteht dadurch, dass die Gewitterwolke in der Höhe positiv und an der Basis negativ geladen ist. Durch diese Ladungstrennung entsteht ein Dipolmoment, das aufwärts zeigt (Rakov & Uman, 2006).

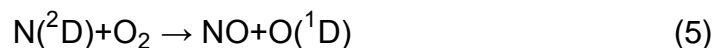
Kobolde diese ELF-Signatur in sich tragen und entdeckt werden. Deshalb und wegen anderer Fehler, die beim Zählen von Kobolden gemacht werden können, geht man heute davon aus, dass die globale Verteilung etwa 5 Kobolde/min oder anders gesagt 7200 Kobolde/Tag beträgt (Füllekrug et al., 2006). Diese Werte sind jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da die Fehlerabweichung etwa 1-2 Kobolde/min beträgt. In anderen, zum Teil auch neueren Publikationen, war von 2.8 Kobolden/min die Rede, obwohl auch dort die Abweichung 2-3 Kobolde/min betrug (Peterson et al., 2009).

3.4 Einfluss auf die Chemie

Zu den Kobolden gibt es mehrere wissenschaftliche Artikel, die deren chemischen Einfluss auf die Chemie behandeln. Einige befassen sich nur mit dem Einfluss von einzelnen Regionen der Kobolde auf die Chemie, denn die diffuse Region des Kobolds hat einen anderen Einfluss als zum Beispiel die Streamer Region. Des Weiteren unterscheidet sich der Einfluss auf die Chemie von Kobolden, die am Tag entstehen, von demjenigen der Kobolde, die in der Nacht erscheinen. Zudem gibt es noch die unterschiedlichen Methoden (Satellit, Labor und Modelle), mit denen der chemische Einfluss berechnet/gemessen wurde (Winkler & Notholt, 2014). Im Folgenden werden die Resultate vom Labor für einen ganzen Kobold, zwei Resultate eines Modells, die nur Streamer oder die anderen Regionen eines Kobolds berücksichtigt haben und die Resultate eines Modells, welches den Einfluss von Tag-Kobolden untersucht, kurz vorgestellt.

3.4.1 Resultate aus dem Modell für Kobolde in der Nacht

Sentmann et al. (2008) haben in ihrem Modell für eine chemische Analyse einen einzelnen Kobold ausgewählt, der in der Nacht erschien und eine besonders helle und gut erkennbare Streamer Region enthielt. Sie haben die Anfangsbedingungen also diesem Einzelereignis entsprechend angepasst und dann den Einfluss der Streamer Region dieses Kobolds auf die umliegende Mesosphäre untersucht. Folgende Resultate erhielten sie für den Einfluss auf die NO_x -Gruppe: NO wird hauptsächlich durch energetisch höhere Stickstoffatome gebildet (siehe Gleichung 5 und 6) und durch die Reaktion mit Stickstoffatomen im Grundzustand abgebaut (Gleichung 7). Weil die Abbaureaktion viel langsamer ist, wird im Gesamten mehr NO gebildet. Konkret sind es 75% mehr, als im Umfeld auf 70 km Höhe vorhanden sind, also rund 10^7 Moleküle/ cm^3 . Wenn man das auf die ganze Streamer Region hochrechnet, bei einer Länge von 10 km und einem Durchmesser von 25 m, ergibt das eine Nettoproduktion von $\sim 5 \cdot 10^{19}$ Moleküle NO/cm^3 für einen ganzen Streamer. Zudem wurde auch die HO_x -Gruppe untersucht, und zwar mit dem Ergebnis, dass auch das OH -Radikal konstant um etwa 100 Moleküle/ cm^3 zunimmt. OH hat bekanntlich auch einen Einfluss auf die Ozonzerstörung, was in dieser Höhe aber vernachlässigt werden kann (Sentman et al., 2008).



Auch Gordillo-Vazquez (2008) hat mit einem Modell den Einfluss auf die Chemie durch einen Kobold berechnen wollen. Im Unterschied zu Sentmann et al. (2008) benutzte er dafür ein kinetisches Chemiemodell und kein Plasma Chemiemodell. Die Resultate sind aber sehr ähnlich und es wird auch damit gerechnet, dass die Nettoproduktion von NO und NO₂ in einer Höhe von 68 km im Bereich von 100% liegt und konkret einen Wert von $1.3 \cdot 10^6$ Moleküle NO_x/cm³ annimmt. Was zusätzlich herausgefunden wurde, ist, dass die Zunahme von NO₃ im Bereich von 3 Potenzen liegt. Da mit einer Ausgangssituation von 4 ppm⁷ H₂O (Wasser) gerechnet wurde, war der Einfluss der OH-Moleküle in ihrem Modell sehr gering. Konkret ergaben die Resultate eine Zunahme von ca. 80%, die aber ziemlich schnell wieder sank, da die OH-Moleküle sehr schnell wieder abgebaut wurden (Gordillo-Vazquez, 2008).

3.4.2 Resultate aus dem Labor

Wie schon bei den BJs erwähnt, basiert die Studie von Peterson et al. (2009) auf Laborversuchen, mit denen man den Einfluss auf die Chemie bestimmen wollte. Das Vorgehen wurde bereits in Kapitel 2.4.1 Methode Laborexperiment ausführlich diskutiert. Pro einzelne Entladung kamen die Autoren im Gegensatz zum Modell von Gordillo-Vazquez (2008) auf 10^8 Moleküle NO_x/cm³. Als „richtige Resultate“ für die Berechnung der Resultate des ganzen Kobolds werden jene der Energie-Methode genommen, da die geometrische Form von Kobolden nur sehr schwer bestimmbar ist. Für die Energie, die bei den Entladungsvorgängen in einem Kobold entsteht, werden 250 MJ bis 1 GJ angenommen. Das resultiert in einer Netto NO_x-Produktion von $6.8 \cdot 10^{23}$ bis $5.6 \cdot 10^{25}$ Moleküle NO_x pro Kobold. Die Autoren haben zusätzlich die globale Produktion von NO_x Molekülen durch die Koblode berechnet, indem sie die Rate von 2.8 Kobolden/min \pm 2 Kobolden/min für eine globale Verteilung benutzten. Die Resultate liegen dementsprechend in einem Bereich von $4.2 \cdot 10^{24}$ bis $8.8 \cdot 10^{26}$ Moleküle NO_x pro Sekunde, die durch Koblode auf globaler Skala entstehen (Peterson et al., 2009). Aber ob der Einfluss nun doch so gross ist, das wird später in Kapitel 5 nochmals thematisiert und erklärt.

3.4.3 Resultate aus dem Modell für Koblode am Tag

Winkler und Notholt (2014) haben sich in ihrer Arbeit nicht mit Kobolden, welche in der Nacht auftreten, sondern solche, die am Tag auftreten beschäftigt. Anders als bei den Kobolden in der Nacht spielen hier auch die photochemischen Prozesse, ausge-

⁷ Vgl. Glossar.

löst durch die Sonne, eine Rolle. Das Modell wurde auf einen Kobold angewendet, dessen Streamer Region in einer Höhe zwischen 30 und 54 km war. Die Modellierungen wurden auf drei Stufen in diesem Bereich unterteilt (31 km, 42 km und 54 km). Um zu überprüfen, ob ihr kinetisches Chemiemodell auch die richtigen Resultate liefert, übernahmen sie aus dem Modell von Sentmann et al. (2008) die Anfangsbedingungen für einen Kobold in der Nacht und liessen das Modell laufen. Es stellte sich heraus, dass ihr Modell einwandfrei funktionierte und es dieselben Resultate lieferte.



Für die HO_x-Gruppe kamen in etwa die gleichen Resultate wie in Kap. 3.4.1 heraus, mit dem Ergebnis, dass Kobolde keinen allzu grossen Einfluss auf diese Gruppe haben, da alles schnell wieder abgebaut wird. Im Unterschied dazu hat die Sonne einen grösseren Einfluss auf die NO_x-Gruppe. In ihrem Modell werden die höher geladenen Stickstoffatome durch Elektronen gebildet und es kommt zur Produktion von NO gemäss Gleichung 5 und 6. NO würde nun in der Nacht durch die Reaktion mit Ozon (Gleichung 2 in Kap. 2.4.2) wieder abgebaut und in stabiles NO₂ umgewandelt. Am Tag zerfällt dieses NO₂ jedoch gemäss Gleichung 8 und 9 und wird zurück in NO umgewandelt. Das führt zu einem Zyklus, der Ozon zerstört. Dieser Effekt ist so stark, dass das Ozon im Modell auf 54 km Höhe nach 15 min um 15% (250 ppb⁸) abnahm. In tieferen Höhen nimmt Ozon weniger stark ab, da die Ozonproduktion via atomaren Sauerstoff (siehe Gleichung 1 in Kap. 2.4.2) der Ozonzerstörung entgegenwirkt. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt nämlich mit der Höhe ab (Winkler & Notholt, 2014).

Leider gibt es zu diesem wissenschaftlichen Artikel keine konkreten Zahlen und es ist deshalb schlecht möglich, einen Vergleich zwischen dem Einfluss von Kobolden in der Nacht und den Kobolden am Tag zu machen. Zudem muss berücksichtigt werden, dass sich für dieses Modell der Streamer lediglich auf einer Höhe von 54 km befand. Im Allgemeinen kann man erkennen, dass der Einfluss auf die Chemie noch nicht ganz erfasst ist, da keine der Studien (ausser diejenigen im Labor) den Einfluss eines Koboldes mitsamt allen Teilregionen erforscht hat.

⁸ Vgl. Glossar.

4. Rote Elfen

Die Elfen sind die letzte Untergruppe der drei TLEs, die in dieser Arbeit behandelt werden. Im Unterschied zu den anderen steht der englische Begriff ELVES für eine Abkürzung und bezeichnet nur per Zufall ein erfundenes Fabelwesen. ELVES steht für „Emission of Light and Very Low frequency perturbations from Electromagnetic pulse Sources“ (Winkler & Notholt, 2014), was übersetzt in etwa „Lichtemissionen und sehr tiefe Frequenzstörungen von elektromagnetischen Impulsquellen“ bedeutet. Elfen entstehen in der unteren Ionosphäre und sind die am kürzesten auftretenden TLEs. Zugleich sind sie diejenigen, die am meisten vorkommen und welche die grösste Fläche umfassen, da sie sich horizontal ausdehnen.

4.1 Eigenschaften und Formen

Elfen sind Entladungen in 80 bis 95 km Höhe, die sich dort horizontal um 200 bis 500 km ausdehnen. Sie haben die Form eines Donuts, weil sie in der Mitte schwarz und rundherum rot erscheinen. Die Ausdehnung erfolgt in konzentrischen Kreisen von der Mitte aus. In Abbildung 7 erkennt man einen Elfen, der oberhalb eines CGs entsteht und sich horizontal ausbreitet. Elfen haben im Schnitt eine Lebenszeit von weniger als 1 ms (Kuo et al., 2007). Dies kommt davon, dass Elfen sich mit Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8$ m/s) ausbreiten und auch durch Mechanismen entstehen, die sich im Bereich dieser Geschwindigkeit bewegen. Nur schon deshalb sind Elfen nicht von blossem Auge zu erkennen. Die roten Emissionen werden durch ionisierte Stickstoff- oder Sauerstoffmoleküle ausgelöst, die durch Elektronen in diesen Zustand gebracht werden (Siingh et al., 2012). Im Schnitt wird bei einem Elfen 19 MJ Energie von der Troposphäre in die Ionosphäre transportiert (Hsu et al., 2009). Sie sind zwischen 1 und 10 MR hell und die Helligkeit nimmt mit der Ausdehnung ab. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Glühen durch ein Heizen der unteren Ionosphäre geschieht (Fukunishi et al., 1996).



Abb. 7 Ein Elf vom Satelliten ISUAL aus beobachtet, aus Inan et al., 2010.

4.2 Entstehung

Elfen entstehen aufgrund eines elektromagnetischen Impulses, nachfolgend EMP genannt, der durch Blitzentladungen ausgelöst wird. Die hierfür benötigten Blitze

müssen CGs sein, aber es spielt keine Rolle, wie sie geladen sind. Einzige Bedingung für die Entstehung ist, dass die Bodenblitze eine Stromstärke von mindestens 60 kA^9 aufweisen¹⁰. Der EMP, der durch den CG ausgelöst wird, ist so stark, dass sich der Impuls bis in die untere Ionosphäre ausdehnt, diese stark erhitzen und ionisieren kann. Mit Hilfe von technischen Geräten, welche die Wellen mit den tiefsten Frequenzen (VLF vom Englischen „Very Low Frequency“ abgeleitet), messen, ist eine Zeitverzögerung von $350 \mu\text{s}$ festgestellt worden. Wenn man die Distanz zum Auftreten der Elfen (100 km) mit der Lichtgeschwindigkeit vergleicht, macht diese Zeitverzögerung zwischen dem CG-Ereignis und dem Auftreten des Elfen aber Sinn (Fukunishi et al., 1996). Die Donut Form entsteht dadurch, dass das Strahlungsmuster, oder anders gesagt, das elektrische Feld um einen CG herum wie eine Antenne wirkt, die durch das umliegende Gebiet geformt wird. Das elektrische Feld oberhalb des Blitzkanals ist zwar null, aber ausserhalb des Kanals dehnt es sich konzentrisch aus (Siingh et al., 2012).

4.3 Verteilung

Da Elfen von der Stromstärke eines CGs abhängig sind, kommen sie bei allen Gewittern vor, die CGs mit einer Stromstärke in der Grössenordnung von $>60 \text{ kA}$ produzieren. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass Elfen in allen Kategorien von Gewittersystemen vorkommen können, die zu Beginn erwähnt wurden. Am häufigsten sind sie jedoch sicherlich über MSCs, da diese gewaltigen Systeme auch CGs mit höherer Stromstärke produzieren. Also gilt auch hier: Je grösser das System ist, umso häufiger ist das Auftreten von Elfen (Füllekrug et al., 2006).

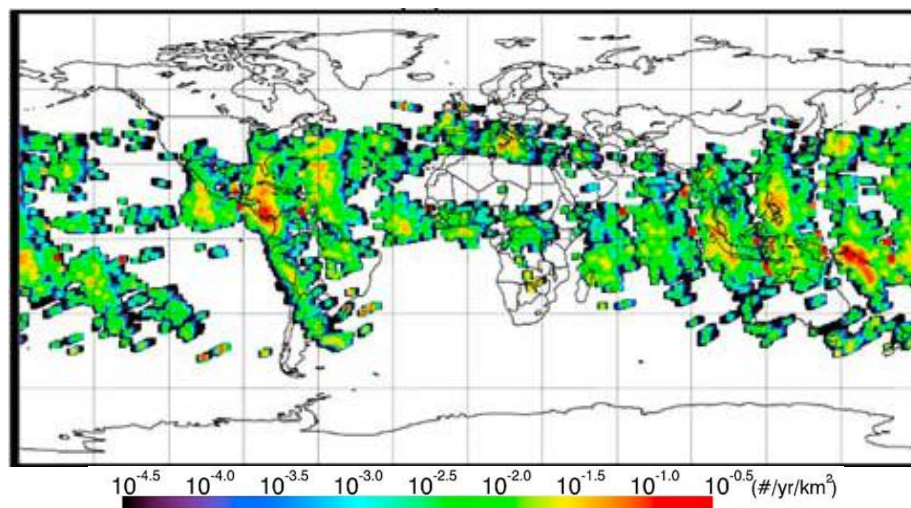


Abb. 8 Verteilung der Elfen während der Periode Juli 2004 bis Juni 2007, aus Chen et al., 2008.

⁹ Vgl. Glossar.

¹⁰ Zum Vergleich: Bei Gewittern mit normalen Blitzentladungen geht man von einer Stromstärke zwischen 5 und 20 kA aus (HyperPhysics, 2014).

Die geographische Verteilung bei den Elfen ist sehr interessant: Elfen sind die mit Abstand am häufigsten auftretenden TLEs. Sie machen gemäss der Studie von Hsu et al. (2009) 82.5% der gesamten TLEs aus. Konkret in Zahlen ausgedrückt sind das 7964 von 9651 TLEs während der Jahre 2004 bis 2008. Elfen kommen sowohl über Meer wie auch über Land vor, wobei der prozentuale Anteil von Küsten- und Meeresgebieten 91.4% ausmacht. Man kann in Abbildung 8 gut erkennen, dass die Meeres- und Küstengebiete, in denen die Elfen vermehrt auftreten, mehr Fläche beinhalten als Landgebiete. Hier muss jedoch beachtet werden, dass die Resultate einer anderen Zeitperiode entsprechen, da die neuere Studie eine Weiterführung der Resultate von 2008 ist. Die Rate, mit der man im Moment für die globale Verteilung rechnet, beträgt 72 Elfen/min. Aufgrund dieser Rate sieht man, dass der Energietransfer von der Troposphäre in die Ionosphäre durch Elfen global doch ziemlich hoch ist. Die Erscheinungsrates, multipliziert mit der Energie, die transferiert wird, ergibt immerhin eine Energie von 1370 MJ, die pro Minute global in die Ionosphäre gelangt.

Interessant und deshalb erwähnenswert ist der Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Elfen in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur. Analysen haben ergeben, dass 96% aller entdeckten Elfen in dieser Periode ab einer Oberflächentemperatur von über 25°C auftraten. Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Erscheinungswahrscheinlichkeit von Elfen. Dieser Zusammenhang zeigt, dass Gewitter, die durch Wärme getriebene vertikale Konvektion entstehen, sehr effizient für die Entstehung von Elfen sind (Hsu et al., 2009).

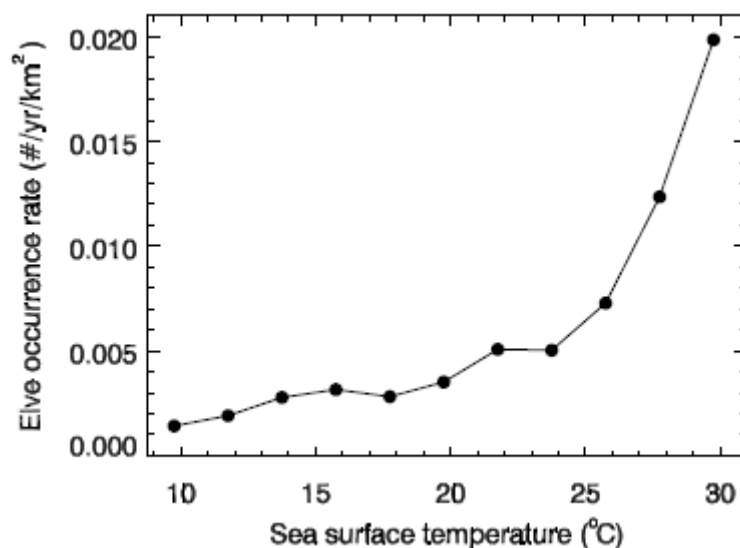


Abb. 9 Erscheinungsrates von Elfen in Abhängigkeit der Meeresoberflächentemperatur, aus Chen et al., 2008.

4.4 Einfluss auf die Chemie

Im Gegensatz zu den anderen TLEs gibt es bei den Elfen noch keine vollumfängliche Analyse ihres Einflusses auf die Chemie. Allerdings gibt es doch zwei weitere Faktoren, die einige Autoren erwähnen und die wichtig zu sein scheinen. Zum einen haben Elfen einen erhöhten Einfluss auf die Menge der Elektronen, die in der Ionosphäre sind, da sie durch Elfen von der Troposphäre dorthin transportiert werden. Zum anderen haben sie gemäss Huang et al. (2010) einen Einfluss auf die OH-Produktion in der unteren Ionosphäre. Dort gibt es auch das Nachthimmelsleuchten, das durch eine OH-Schicht induziert wird.

4.4.1 Einfluss auf die Elektronendichte

Mende et al. (2005) haben in ihrem wissenschaftlichen Artikel mit Hilfe von Daten des Satelliten ISUAL festgestellt, dass bei einem Elf-Ereignis $210 \text{ Elektronen/cm}^3$ produziert werden. Das ist gleichzustellen mit einer Anzahl von $4.5 \cdot 10^{22}$ Elektronen, die zusätzlich in die untere Ionosphäre gelangen. Diese Elektronendichte setzt sich aus deren durchschnittlichen Werten, die über den einzelnen Elfen gemessen wurde, zusammen. Zusätzlich wurde ein Durchschnittsvolumen berechnet, bei dem man von einem Durchmesser von 165 km und einer vertikalen Ausdehnung von 10 km ausging. Das erhaltene Volumen ist im Vergleich zu den anderen TLEs sehr gross¹¹. Mit dieser Erkenntnis sieht man auch, warum es zu einer Ionisation von solch grossen Flächen durch Elfen kommen kann (Mende et al., 2005). Chen et al. (2008) benutzen auch diese $210 \text{ e}^-/\text{cm}^3$ und berechneten damit den Einfluss der Region, welche die meisten Elfen produziert, auf die lokale Elektronendichte der Ionosphäre. Sie kamen zum Schluss, dass in dieser Zone die Elektronendichte lokal um ungefähr 5% zunimmt. Das kann natürlich riesige Auswirkungen auf die Chemie der Ionosphäre haben und es werden zu diesem Thema in Kürze noch mehr Studien veröffentlicht werden (Chen et al., 2008).

4.4.2 Einfluss auf die OH – Schicht

Huang et al. (2010) haben in ihrem wissenschaftlichen Bericht das Emissionsspektrum von Elfen untersucht und dabei herausgefunden, dass beim 630 nm Spektrum nur 53 – 65 % von angeregten Stickstoffmolekülen stammen. Der Rest kommt gemäss ihrer Theorie von der Emission von OH-Radikalen in dieser Höhe. Ihre Begründung liegt darin, dass diese Emissionen auf der Höhe des OH-induzierten Nachtleuchten geschehen. Wenn das stimmt, würden nebst den Stickstoffmolekülen auch die OH-Radikale direkt durch CGs in der Troposphäre beeinflusst werden. Das müsste in Zukunft sicher berücksichtigt werden und deshalb wollen auch die Autoren die-

¹¹ Durchmesser des Elfen: $d = 165 \text{ km}$; Vertikale Ausdehnung = Höhe: $h = 10 \text{ km}$, in der Annahme eines Kreiszyinders $\rightarrow V = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot h \approx 210'000 \text{ km}^3$.

ses Berichts in naher Zukunft ein kinetisches Chemiemodell erstellen, mit dessen Hilfe die chemischen Prozesse besser verstanden werden sollen (Huang et al., 2010).

5. Beurteilung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel geht es darum, die gewonnenen Resultate zu beurteilen und herauszufinden, wie man sie nun weiter benutzen kann und ob im CCM allenfalls eine Anpassung nötig wäre. Da alle drei behandelten TLEs vorher separat veranschaulicht wurden, macht es Sinn, deren Ergebnisse zu sammeln und zu vergleichen. Da gewisse Punkte aber bei den verschiedenen Untergruppen sehr unterschiedlich sind, wird noch einzeln auf gewisse Details eingegangen. Am Schluss folgt bei jeder Untergruppe noch ein Ausblick, was in Zukunft erforscht werden müsste, um ein volles Verständnis für die TLEs zu erreichen.

5.1 Vergleich der drei Untergruppen

	Blue Jet	Kobold	Elfen
Form und Farbe	Kegelförmig, blau	Immer verschiedenen, rot	Donutförmig, rot
Höhe (Ausbreitungsrichtung)	18 - 40 km (aufwärts)	75 - 40 km (abwärts)	85 - 100 km (horizontal)
Dauer	200-300 ms	1-2 ms	<1 ms
Helligkeit	7 kR bis 0.5 MR	0.5-1 MR, vereinzelt 100 GR	1-10 MR
Energie pro Ereignis	1 GJ	22 MJ	19 MJ
Entstehung (von welchen Blitzen abhängig)	Weder CG noch CC	+CG mit $\Delta Mq > 600 \text{ C km}$	+CG und -CG mit Stromstärke > 60 kA
Verteilung (Gewitterformen)	Superzellen, Squall lines, MCS	Selten Superzellen, Squall lines, sehr häufig bei MCS	Alle Kategorien, aber besonders MCS
Verteilung (Anzahl)	Unsicher	2.8 ± 2 pro min	72 pro min

Tabelle 1 Übersicht der Eigenschaften von den drei behandelten TLEs.

Man sieht in dieser Tabelle die drei behandelten TLEs in einer Übersicht zusammengefasst. Es wird sofort klar, dass bis auf die Helligkeit ziemlich alle Eigenschaften verschieden sind. In dieser Übersicht fehlt der Einfluss auf die Chemie, da dieser weiter unten bei der Diskussion der Untergruppen aufgegriffen wird. Es wäre zu kompliziert, dort einen allgemeinen Vergleich zu erstellen. Zudem fehlt die Verteilung

der BJs, da auch diese einzeln behandelt wird. Allgemein sieht man in dieser Übersicht die wesentlichen Punkte noch einmal aufgegriffen, die als Resultate in der Arbeit herauskamen.

5.2 Diskussion von Blue Jets

BJs sind diejenigen TLEs, über deren Verteilung man bisher noch viel zu wenig weiss. Obwohl der Mechanismus einigermaßen verstanden ist, liegt die grösste Schwierigkeit immer noch darin, sie zu orten. Im Gegensatz zu den anderen behandelten TLEs sind BJs die einzigen, die nicht ohne Hilfe von Kameras geortet und somit beobachtet und gezählt werden können. Das liegt zum einen daran, dass sie, wie bereits berichtet, nicht im Zusammenhang mit CGs oder CCs auftreten und somit nicht durch diese gezählt werden können. Zum anderen senden BJs keine Wellen aus oder sind auf anderen Wellen als Störung zu erkennen und deshalb nicht mit solchen Geräten messbar.

Ohne genaue Zahl für die geographische Verteilung wird es auch besonders schwierig, den Einfluss auf die Chemie genau abzuschätzen. Es lohnt sich hier dennoch, eine Überlegung zu machen und eine Schätzung zu versuchen. Gemäss einer noch nicht veröffentlichten Studie sind innerhalb von 3 Jahren mittels Satellitenbeobachtungen 1'671 BJs gezählt worden (Huang et al., 2015). Das ergibt pro Jahr also ca. 560 BJ/yr. Gemäss der Arbeit von Wescott et al. (1995) wurde die bereits erwähnte Häufigkeit von 2.8 BJ/min festgestellt. Wenn man davon ausgeht, dass es sich bei dem beobachteten Unwetter um ein MCS gehandelt hat und man weiss, dass es pro Tag etwa ein MCS global gibt, dann kommt man auf eine Häufigkeit von 1.5 Millionen BJs pro Jahr.

	Vol. min	Vol. max.	# min.	# max.	$n(\text{NO}_x)/\text{BJ}$	$N(\text{NO}_x)$ min.	$N(\text{NO}_x)$ max.
BJ Leader	$5.0\text{E-}5$ km^3	$1.6\text{E-}3$ km^3	560/yr	$1.5\text{E}6/$ yr	$1.0\text{E}20$ molec/ m^3	$2.8\text{E}27$	$2.4\text{E}32$
BJ Rest	36 km^3	70 km^3	560/yr	$1.5\text{E}6/$ yr	$1.0\text{E}16$ molec/ m^3	$2.0\text{E}29$	$1.0\text{E}33$
Natürliche Produktion aus Lach- gas	–	–	–	–	–	$2.4\text{E}34$	$2.4\text{E}34$

Tabelle 2 Übersicht des chemischen Einfluss von Blue Jets. Vol. = Volumen; min. = Minimum; max. = Maximum; # = Anzahl; $n(\text{NO}_x)/\text{BJ}$ = Moleküle pro Kubikmeter pro BJ; $N(\text{NO}_x)$ = Anzahl Moleküle, die pro Jahr produziert werden.

Diese Tabelle soll veranschaulichen, wie eine mögliche Rechnung aussehen könnte, die zum Ziel hat, den Einfluss der BJs auf die Stratosphärenchemie abzuschätzen. Die Zahlen für die Molekülanzahldichte kommen aus der Studie von Winkler & Notholt (2015). Die Volumina wurden mit Hilfe der Studie von Peterson et al. (2008) sowie durch die Studie von Winkler & Notholt (2015) berechnet/ergänzt. Die Zahl für die Moleküle an NO_x , welche durch die natürliche Produktion aus Lachgas entsteht, stammt aus dem Buch von Brasseur & Solomon (2005) über die physikalischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre. Wie man gut erkennen kann, sind die Unsicherheiten enorm. Der Einfluss reicht von „gar nicht bemerkbar“ bis zu immerhin 50% des natürlich produzierten NO_x in dieser Höhe. Die 50% kommen vom Zusammenzählen des Leaders und dem Rest, was in Relation zur natürlichen Produktion gesetzt wird. Man kann also feststellen, dass die hier berechneten Zahlen sehr unsicher sind und für eine sinnvolle Aussage noch einige Arbeit in die Forschung investiert werden muss. Das gilt vor allem für das Abschätzen der globalen Verteilung und des Volumens. Gerade deshalb macht eine Parametrisierung im CCM für den Moment noch keinen Sinn, weil die Ergebnisse im aktuellen Wissensstand noch zu unsicher sind.

5.3 Diskussion von roten Kobolden

Bei den Kobolden ist die Verteilung etwas klarer definiert, aber zwischen der Minimal- bzw. Maximalanzahl pro Jahr liegen doch immerhin 20% Abweichung. Hingegen liegt bei der NO_x -Entstehung pro Kobold eine sehr grosse Unsicherheit vor. In Kapitel 3.4 Einfluss auf die Chemie, wurde über die verschiedenen Methoden berichtet, mit denen man die Produktion von NO_x bei Kobolden bestimmt hat. Dabei stehen sich die Modellvariante und die Variante mit dem Laborversuch gegenüber.

Beim Modell von Sentmann et al. (2008) geben die Autoren in ihrer Publikation sogar an, dass ihre Zahlen in der Realität auch anders sein könnten. Sie erklären, dass einerseits in ihrem Modell von einem einzelnen Kobold ausgegangen wird, es jedoch sehr gut sein kann, dass pro Gewitter mehrere auftreten können, was die Anfangsbedingungen in ihrem Modell stark verändern würde. Weiter betonen sie, dass die Volumina und die Morphologie der Koblode sehr divers sind und daher die Nettoproduktion auch unterschätzt werden kann. Die Vibrationskinetik von den Stickstoffmolekülen wird nicht berücksichtigt, was wahrscheinlich einen weiteren Einfluss auf die Chemie hätte. Zuletzt könnte auch das elektrische Feld je nach Stärke einen anderen Einfluss auf die Reaktionen haben und müsste in den Anfangsbedingungen angepasst werden (Sentman et al., 2008).

Bei der Methode mit den Laborversuchen legen Peterson et al. (2009) selbst dar, dass die Energiemethode (siehe Kapitel 2.4.1 Methode Laborexperiment) genauer als die Geometriemethode ist, da die Koblode keine genaue Struktur besitzen. Jedoch ist auch diese Methode nicht sehr genau, da die Autoren für die Energieüber-

tragung 250 MJ bis 1 GJ annahmen (Peterson et al., 2009). Es kann sein, dass diese Werte zu hoch sind, was die Zahlen, welche die Autoren erhalten haben, wiederum relativieren würde. In der nachfolgenden Tabelle wurden genau diejenigen Zahlen übernommen, die in beiden soeben besprochenen Publikationen erschienen sind. So kommt die minimale Stoffteilchenzahl von Sentmann et al. (2008) und die maximale Stoffteilchenzahl von Peterson et al. (2009). Die total erhaltene Anzahl der Moleküle, die global durch Koboide produziert werden, werden zum Schluss noch mit der Anzahl der Moleküle verglichen, welche durch die kannibalistische Reaktion (siehe Gleichung 7 in Kapitel 3.4.1 Resultate aus dem Modell für Koboide in der Nacht) auf natürliche Weise zerstört werden. Diese berechnete Zahl wurde durch Angaben berechnet, die ebenfalls aus Brasseur und Solomon (2005) stammen.

	# min	# max	n(Nox) min	n(Nox) max	N(NO _x) min	N(NO _x) max
Rote Koboide	5.3E5/yr	2.6E6/yr	5.0E19 molec	9.6E25 molec	2.6E25	2.5E32
Natürliche Destruktion durch kannibalistische Reaktion	–	–	–	–	-1.3E28	-1.3E28

Tabelle 3 Übersicht des chemischen Einfluss von roten Kobolden.

Man sieht in dieser Tabelle, dass die angesprochene Diskrepanz zwischen der Minimalanzahl und der Maximalanzahl der Moleküle, die durch einen Kobold entstehen, sehr gross ist. Im Vergleich zur Anzahl der Moleküle, die durch eine kannibalistische Reaktion zerstört werden, würde die Minimalanzahl keinen Einfluss auf die Chemie nehmen. Hingegen wäre der Einfluss, wenn die Maximalanzahl stimmen würde, enorm, denn das wären 4 Potenzen mehr. Man kann sicher davon ausgehen, dass die wirkliche Anzahl der Moleküle, die durch einen Kobold entstehen, zwischen dem Minimum und dem Maximum liegen wird. Die Zahl für die kannibalistische Reaktion kann auch etwas zu tief sein, da nur die Zahlen der Mesosphäre beachtet wurden, und die Koboide sich bis an die Grenze der Stratosphäre erstrecken können. Daher wird es wohl so sein, dass die Koboide eher einen regionalen als einen globalen Einfluss auf die Chemie haben werden. Es müssen aber hierzu noch weitere Studien gemacht werden, damit sich zumindest die Spannweite der Molekülanzahlen, die durch die Koboide entstehen, verkleinern wird. Aufgrund der genannten Diskrepanz wäre eine Parametrisierung im CCM gerade deshalb sinnvoll, um mit der Hilfe des Modells rückzuschliessen, ab welcher Molekülanzahl die Koboide einen Einfluss hätten.

5.4 Diskussion von roten Elfen

Die Diskussion über den Einfluss von den Elfen ist schnell geführt. Es gibt bis heute keine wissenschaftliche Arbeit, die den chemischen Einfluss von Elfen auf die untere Ionosphäre beschreibt. Die Auswirkungen des im Hauptteil erwähnten Zuflusses von Elektronen, welche durch die EMPs in diese Höhe gelangen, beinhalten eine zusätzliche Ionisierung dieses Gebiets. Ob die Elektronen aber einen direkten Einfluss auf die Chemie haben, wurde bislang ebenfalls noch nicht untersucht. Aufgrund dieser mangelnden Informationen wird klar, dass eine zusätzliche Parametrisierung im CCM aufgrund der Elfen nicht notwendig wird. Sowieso liegen die Elfen aufgrund ihrer Höhe an der oberen Grenze der meisten Modelle und lassen sich je nach Höhe gar nicht mehr in die Modelle einbinden. Es sei noch zu erwähnen, dass Huang et al. (2010) in ihrer Arbeit verlauten liessen, dass von ihnen in naher Zukunft ein Chemiemodell erscheinen wird.

6. Fazit

In dieser Arbeit wurden drei verschiedene TLEs vorgestellt, die jeden Tag auf der ganzen Erde oberhalb von heftigen Gewittern entstehen. Ihr Interesse lag vor allem darin, diese meist noch unbekannt Phänomene vorzustellen und zu zeigen, dass sie vielleicht einen bis jetzt noch nicht abschätzbaren Einfluss auf die Chemie der mittleren Atmosphäre haben. Es gibt noch immer Rätsel in der Wissenschaft, wie diese hier, die nur darauf warten, gelöst zu werden. Ziel der Arbeit war es, einen groben Überblick über die verschiedenen Untergruppen zu erstellen und deren Einfluss auf die Chemie in einem bis dahin ersten Schritt abzuschätzen. Nun folgt nochmals eine kurze Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse.

Zuerst wurden die Blue Jets behandelt, die in einer Höhe von 18 bis 40 km auftreten, die bläulich erscheinen und sich kegelförmig in Richtung Stratosphäre ausdehnen. Über die Entstehung von Blue Jets sind sich die Experten noch uneinig und es gibt zwei Theorien, die parallel existieren. Die eine umfasst die Idee eines „runaway electron breakdown“, also eine Lawine aus Elektronen, die aufgrund der Richtungsänderung des elektrischen Feldes in einer Gewitterwolke ausgelöst werden kann. Die andere geht von einem sog. Bi-Leader aus, wovon sich der eine Leader in Richtung Erde bewegt und der andere aufwärts in Richtung Stratosphäre. Der Leader ionisiert die Luft und es kommt zur Entstehung von mehreren Streamern, die sich in Form eines Blue Jets äussern. Die Globale Verteilung von Blue Jets ist der unbekannteste Punkt, da Blue Jets aufgrund ihrer Erscheinungsform schwierig zu orten sind. Beim Einfluss auf die Chemie wurde festgestellt, dass nur die NO_x-Familie einen Einfluss auf die Chemie hätte, da die anderen Stoffe zu schnell wieder abgebaut werden. Dieser Einfluss kann jedoch aufgrund der riesigen Spannweite der globalen Verteilung sowie wegen Unsicherheiten bei der Volumenberechnung extrem variieren.

Des Weiteren wurden die roten Kobolde behandelt, die in einer Höhe von 70 km auftreten und sich nach unten bis auf eine Höhe von 40 km ausdehnen können. Kobolde haben immer andere Formen, sind sehr kurzlebig und darum nicht von blossen Auge vom Erdboden aus zu erkennen. Auch bei der Entstehung von Kobolden stehen sich im Moment zwei verschiedene Theorien gegenüber. Beide haben aber denselben Ursprung, da man davon ausgeht, dass Kobolde von positiven CGs ausgelöst werden, welche die oberste Schicht der Wolke entladen und damit ein quasi elektrostatisches Feld oberhalb der Gewitterwolke auslösen. Nun geht die Theorie des „runaway electron breakdown“ davon aus, dass Elektronen vom Weltall durch dieses Feld ihr Ladungsmoment ändern werden und im Falle eines genügend starken elektrischen Feldes energetisch höher geladen werden können. Das führt wiederum zu einer Elektronenlawine, welche die Luft ionisieren und zu einer Entladung führen kann. Die andere Theorie besagt, dass in einer Höhe von ~75 km aufgrund der relativ langen Weglänge von Elektronen, diese durch Kollision mit anderen Molekülen die Luft ionisieren können. Das führt zur Entstehung von Streamern, die sich dann nach unten und oben fortbewegen können. Die Verteilung von Kobolden hängt vom Auftreten

von +CGs ab, die ein elektrisches Dipolmoment von mindestens 600 C km aufweisen müssen. Man geht von einer Verteilung von 2.8 ± 2 Kobolden/min auf globaler Skala aus. Beim Einfluss auf die Chemie wurden verschiedene Vorgehensweisen angeschaut, mit deren Hilfe man den Einfluss auf die NO_x-Produktion durch Kobolde abschätzen kann. Da die Diskrepanz zwischen den Resultaten jedoch sehr gross ist, lässt sich nicht genau abschätzen, ob die Kobolde nun einen wesentlichen Einfluss haben oder nicht. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Einfluss regional hoch, global gesehen jedoch nicht sehr bedeutend ist.

Die roten Elfen sind die letzte Gruppe und treten in einer Höhe von 85 bis 100 km auf. Sie dehnen sich horizontal aus und haben meist eine Donut Form. Elfen sind noch kurzlebiger als Kobolde und nur mittels technischer Geräte erkennbar, da sie als Störungen im Bereich der tiefsten Frequenzen zu erkennen sind. Sie entstehen aufgrund eines EMP, der durch einen starken CG mit einer Stromstärke von mindestens 60 kA ausgelöst wird. Der EMP dehnt sich bis in die untere Ionosphäre aus und das dort entstandene elektrische Feld dehnt sich in konzentrischen Kreisen aus. Elfen kommen von allen drei behandelten TLEs am häufigsten vor, da sie nur von der Stromstärke von CGs - egal welcher Ladung - abhängig sind. Man schätzt die globale Verteilung im Moment auf 72 Elfen/min, wovon etwa 91.4% der Elfen über Meeres- oder Küstengebieten vorkommen. Im Unterschied zu den beiden anderen Untergruppen sind keine chemischen Einflüsse von Elfen bekannt, da es dazu bislang noch keine Studien gibt. Der einzige bemerkbare Einfluss besteht darin, dass Elfen pro Entladung 210 Elektronen/cm³ zusätzlich in die Ionosphäre transportieren.

Um in Zukunft mehr über die TLEs und vor allem über deren Einfluss auf die Chemie zu wissen, müssen weitere Forschungen durchgeführt werden. Im Bereich der Blue Jets muss über die globale Verteilung viel mehr erfahren werden. Der Einfluss von Streamern bzw. Leadern muss besser unterteilt werden. Im Bereich der Kobolde muss mehr über die Struktur von Kobolden erfahren werden, um auch dort den chemischen Einfluss besser abzuschätzen. Das beinhaltet vor allem die Form und damit das Volumen, sowie das Wissen um Zeitpunkt und Höhe der Kobolde. Im Bereich der Elfen muss vor allem im Bereich der Chemie noch einiges geleistet werden, da bislang keine wissenschaftliche Arbeit publiziert wurde, welche die Reaktionskinetik in einem Elfen untersucht hat. Auch wenn diese Punkte noch offen sind, so weiss man in Anbetracht der wenigen Jahre, die seit der Entdeckung dieser Phänomene vergangen sind, schon ziemlich viel über sie. An dieser Stelle muss den Wissenschaftlern von heute ein Lob ausgesprochen werden, die unermüdlich jeden Tag Rätsel der Natur mit Erfolg zu lösen vermögen. Es wird nicht mehr lange dauern, bis auch das Rätsel der TLEs ganz gelöst sein wird.

7. Glossar

μs , ms	Mikrosekunde = $10\text{E}-6$ Sekunden; Millisekunde = $10\text{E}-3$ Sekunden.
Blue Jet, BJ	Eine Untergruppe der TLEs.
C	Coulomb, eine Einheit für die elektrische Ladung.
C km	Coulomb Kilometer, eine Einheit für das elektrische Dipolmoment.
CCM	Vom Englischen „Chemistry Climate Model“, ein globales Chemie-modell, das zu Forschungszwecken verwendet wird.
CC	Vom Englischen „Cloud to Cloud“, ein Wolkenblitz.
CG	Vom Englischen „Cloud to Ground“, ein Erdblitz = Blitzschlag.
Elfen, rote E.	Eine Untergruppe der TLEs.
EMP	Elektromagnetischer Impuls, der von einem CG ausgelöst wird und zur Entstehung von Elfen führt.
HO_x	Wasserstoffoxide, eine Familie von Molekülen, die alle Wasserstoff beinhalten.
kA	Kilo Ampere, eine Einheit für den elektrischen Strom.
kJ, MJ, GJ	Kilo-, Mega-, Gigajoule, eine Einheit für die Energie.
Kobold, roter K.	Eine Untergruppe der TLEs.
kR, MR, GR	Kilo-, Mega-, Gigarayleigh, eine Einheit für das Emittieren von Photonen; eine Stärke für das Nachthimmelsleuchten.
Leader	Der Leitkanal, aus dem sich ein Blitz entwickeln kann. Starkes Elektrisches Feld um den Leader führt zu Ionisation der Luft.
Mb	Millibar, eine Druckeinheit = 100 Pascal.
MCC	Vom Englischen „Mesoscale Convective Complex“, grösste Erscheinungsform innerhalb der Kategorie der MCS, für weitere Details: siehe Einleitung.
MCS	Vom Englischen „Mesoscale Convective System“, die höchste bekannte Kategorie von Gewittersystemen. Das MCS besteht aus mehreren Superzellen und für weitere Details: siehe Einleitung.
NO_x	Stickstoffoxide, eine Familie von Molekülen, die alle Stickstoff beinhalten.
Ppb	Vom Englischen „parts per billion“, eine Einheit für die Menge an einem Stoff pro 1 Milliarde Luftteilchen.
Ppm	Vom Englischen „parts per million“, eine Einheit für die Menge an einem Stoff pro 1 Million Luftteilchen.
Runaway electron breakdown	Idee einer Elektronen-Kettenreaktion, ausgelöst durch energetisch höher geladenen Elektronen.
Squall lines	Das zweithöchste bekannte Kategorie von Gewittersystemen, für Details: siehe Einleitung.
Streamer	Diffuse kurzlebige Plasmen, die aus teil-ionisierten Gasen beste-

hen, und den Strom sehr gut leiten.

TLE

Vom Englischen „Transient Luminous Event“, der Oberbegriff dieser Blitzerscheinungen in der mittleren Atmosphäre.

V/m

Volt/Kilometer, eine Einheit für das elektrische Feld.

8. Literaturverzeichnis

- Bor, J. (2013). Optically perceptible characteristics of sprites observed in Central Europe in 2007-2009. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92, 151-177. doi: 10.1016/j.jastp.2012.10.008
- Brasseur, G. P., & Solomon, S. (2005). *Aeronomy of the middle atmosphere : chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere* (3rd rev. and enlarged ed. ed. Vol. vol. 32): Dordrecht : Springer.
- Chemie.de. *Mittlere freie Weglänge*. Verfügbar unter: [http://www.chemie.de/lexikon/Mittlere freie Wegl%C3%A4nge.html](http://www.chemie.de/lexikon/Mittlere_freie_Wegl%C3%A4nge.html). Zuletzt aufgerufen am: 12.06.2015.
- Chen, A. B., Kuo, C.-L., Lee, Y.-J., Su, H.-T., Hsu, R.-R., Chern, J.-L., . . . Lee, L.-C. (2008). Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A8), n/a-n/a. doi: 10.1029/2008JA013101
- da Silva, C. L., & Pasko, V. P. (2013). Vertical structuring of gigantic jets. *Geophysical Research Letters*, 40(12), 3315-3319. doi: 10.1002/grl.50596
- Fukunishi, H., Takahashi, Y., Kubota, M., Sakanoi, K., Inan, U. S., & Lyons, W. A. (1996). Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 23(16), 2157-2160. doi: 10.1029/96gl01979
- Füllekrug, M., Mareev, E. A., & Rycroft, M. J. (2006). *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. Dordrecht, The Netherlands: Dordrecht : Springer.
- Gordillo-Vazquez, F. J. (2008). Air plasma kinetics under the influence of sprites. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 41(23). doi: 10.1088/0022-3727/41/23/234016
- Heavner, M. J., Sentman, D. D., Moudry, D. R., Wescott, E. M., Siefring, C. L., Morrill, J. S., & Bucsela, E. J. (2000). Sprites, blue jets, and elves: Optical evidence of energy transport across the stratopause. *Atmospheric Science across the Stratopause*, 123, 69-82.
- Hsu, R. R., Chen, A. B., Kuo, C. L., Su, H. T., Frey, H., Mende, S., . . . Lee, L. C. (2009). On the Global Occurrence and Impacts of Transient Luminous Events (TLEs). *AIP Conference Proceedings*, 1118(1), 99-107. doi: doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.3137720>
- Huang, S. M., Lee, L. J., Chou, J. K., Chang, S. C., Chen, A. B., Su, H. T., . . . Lee, L. C. (2015). *Coordinated TLE Campaign using ISUAL and NCKU ULF, ELF/VLF Stations*. noch nicht veröffentlicht
- Huang, T.-Y., Kuo, C. L., Chiang, C. Y., Chen, A. B., Su, H. T., & Hsu, R. R. (2010). Further investigations of lightning-induced transient emissions in the OH

- airglow layer. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 115. doi: 10.1029/2010ja015558
- HyperPhysics. (2014). *Lightning Current*. Verfügbar unter: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/lightning2.html#c4>. Zuletzt aufgerufen am: 16.06.2015.
- Inan, U. S., Cummer, S. A., & Marshall, R. A. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 115. doi: 10.1029/2009ja014775
- Kuo, C.-L., Chen, A. B., Lee, Y. J., Tsai, L. Y., Chou, R. K., Hsu, R. R., . . . Fukunishi, H. (2007). Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A11), n/a-n/a. doi: 10.1029/2007JA012407
- Lyons, W. A., Stanley, Nelson, Cummer, Huffines, & Wiens. (2008). Supercells and sprites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(8), 1165-+. doi: 10.1175/2008bams2439.1
- Mende, S. B., Frey, H. U., Hsu, R. R., Su, H. T., Chen, A. B., Lee, L. C., . . . Fukunishi, H. (2005). D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A11), n/a-n/a. doi: 10.1029/2005JA011064
- Milikh, G. M., Raizer, Y. P., & Shneider, M. N. (2007). Leader-streamers nature of blue jets. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(8), 925-938. doi: 10.1016/j.jastp.2007.02.007
- Neubert, T. (2003). On sprites and their exotic kin. *Science*, 300(5620), 747-+. doi: 10.1126/science.1083006
- Pasko, V. P., & George, J. J. (2002). Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 107(A12). doi: 10.1029/2002ja009473
- Pasko, V. P., Inan, U. S., & Bell, T. F. (1996). Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields. *Geophysical Research Letters*, 23(3), 301-304. doi: 10.1029/96gl00149
- Pasko, V. P., Inan, U. S., Bell, T. F., & Taranenko, Y. N. (1997). Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A3), 4529-4561. doi: 10.1029/96JA03528
- Pasko, V. P., & Stenbaek-Nielsen, H. C. (2002). Diffuse and streamer regions of sprites. *Geophysical Research Letters*, 29(10). doi: 10.1029/2001gl014241
- Peterson, H., Bailey, M., Hallett, J., & Beasley, W. (2009). NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 114. doi: 10.1029/2009ja014489

- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2006). Lightning effects in the middle and upper atmosphere *Lightning Physics and Effects* (pp. 480-506). New York: Cambridge University Press.
- Roussel-Dupré, R., & Gurevich, A. V. (1996). On runaway breakdown and upward propagating discharges. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A2), 2297-2311. doi: 10.1029/95JA03278
- Sentman, D. D., Stenbaek-Nielsen, H. C., McHarg, M. G., & Morrill, J. S. (2008). Plasma chemistry of sprite streamers. *Journal of Geophysical Research*, 113(D11). doi: 10.1029/2007jd008941
- Siingh, D., Singh, R. P., Singh, A., Kumar, S., Kulkarni, M. N., & Singh, A. (2012). Discharges in the Stratosphere and Mesosphere. *Space Science Reviews*, 169(1-4), 73-121. doi: 10.1007/s11214-012-9906-0
- Sukhorukov, A. I., Mishin, E. V., Stubbe, P., & Rycroft, M. J. (1996). On blue jet dynamics. *Geophysical Research Letters*, 23(13), 1625-1628. doi: 10.1029/96gl01367
- Sukhorukov, A. I., & Stubbe, P. (1998). Problems of blue jet theories. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(7-9), 725-732. doi: 10.1016/s1364-6826(98)00021-2
- Surkov, V., & Hayakawa, M. (2014). Atmospheric Electricity *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields* (pp. 57-106). Japan: Springer Geophysics.
- Surkov, V. V., & Hayakawa, M. (2012). Underlying mechanisms of transient luminous events: a review. *Annales Geophysicae*, 30(8), 1185-1212. doi: 10.5194/angeo-30-1185-2012
- Wescott, E. M., Sentman, D., Osborne, D., Hampton, D., & Heavner, M. (1995). PRELIMINARY-RESULTS FROM THE SPRITES94 AIRCRAFT CAMPAIGN .2. BLUE JETS. *Geophysical Research Letters*, 22(10), 1209-1212. doi: 10.1029/95gl00582
- Winkler, H., & Notholt, J. (2014). The chemistry of daytime sprite streamers - a model study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(7), 3545-3556. doi: 10.5194/acp-14-3545-2014
- Winkler, H., & Notholt, J. (2015). A model study of the plasma chemistry of stratospheric Blue Jets. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 122, 75-85. doi: 10.1016/j.jastp.2014.10.015

Anhang

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums Umweltnaturwissenschaften verfassten schriftlichen Arbeit (auch der elektronischen Version). Im Falle von Bachelor- und Masterarbeiten ist eine Kopie dieses Formulars dem Diplomantrag beizulegen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten - ausgenommen Korrekturvorschläge - verfasst zu haben.

Titel der Arbeit:

TLEs - Die Gewitter Der Mittleren Atmosphäre

Verfasst von:

Name	Vorname
Hoerni	Jamin

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt www.ethz.ch/students/exams/plagiarism_s_de.pdf beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe in der Danksagung alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.
- Ich verstehe die oben genannten Regeln.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit eventuell mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft wird.

Zürich, 23.07.2015

Ort, Datum

Unterschrift*



* Bei Gruppenarbeiten sind die Unterschriften aller Verfasser und Verfasserinnen erforderlich. Durch die Unterschrift bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.