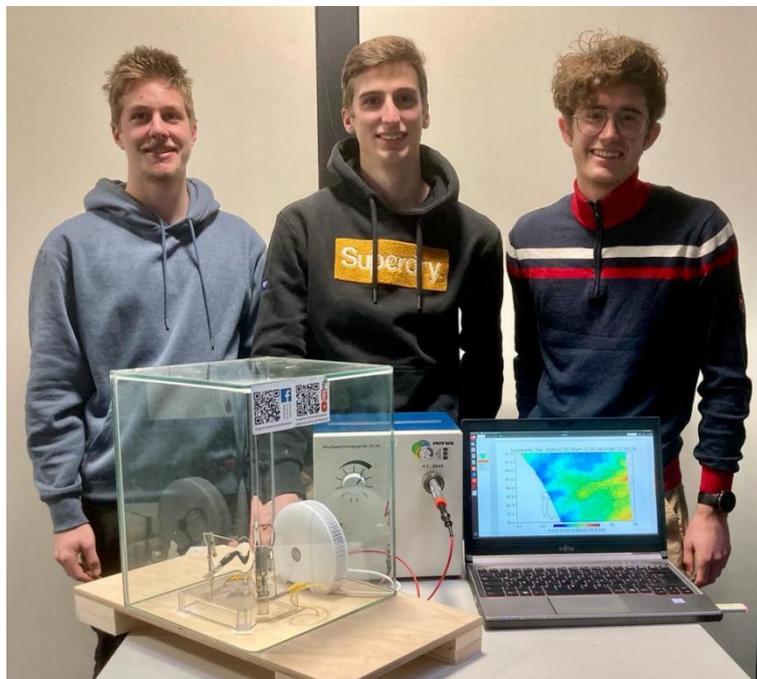


# Bodennahe Ozon durch Gewitter? Wettereinfluss auf die Ozonbelastung



Aaron Janz

Janis Rohrer

Nils Kolb

Chemie  
Jugend forscht 2022

# 1. Kurzfassung

Ozon ist aufgrund seiner oxidierenden Wirkung für den Menschen und die Umwelt schädlich und deshalb gerade in Bodennähe unerwünscht. Bei dieser Problematik setzt unser Projekt an, indem es den Zusammenhang zwischen Wetter und bodennahem Ozon untersucht. Das Ziel ist es, zum einen die Entstehung, zum anderen die Verbreitung und Verteilung des Gases bei Gewittern besser zu verstehen. Dazu werden verschiedene Gase der Luft während und nach der künstlichen Erzeugung eines Blitzes analysiert, wobei eindeutig eine Ozonentstehung beobachtet wird. Gewonnene Erkenntnisse werden anschließend auf globaler Ebene durch die Auswertung von Satellitendaten untersucht. Die Daten zeigen, dass sich die räumliche Verteilung von Blitzten und erhöhten Ozonwerten zumeist überschneiden. Durch unsere Untersuchungen können wir nachweisen, dass die Ozonentstehung bei Gewittern einen großen und bedeutenden, oft unterschätzten Einfluss auf die bodennahe Ozonbelastung hat.

# 2. Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung .....	2
2. Inhaltsverzeichnis .....	2
3. Einleitung .....	3
4. Experimente mit dem air-Q .....	5
4.1 Idee und Ziele der Experimente	
4.2 Der air-Q Messsensor	
4.3 Versuchsaufbau und -durchführung	
4.4 Datenauswertung aller Bestandteile der Luft	
4.5 Datenauswertung der Experimente bei verschiedenen Temperaturen	
4.6 Vergleich mit einem Arduino-Messsensor	
5. Auswertung von Satellitendaten .....	11
5.1 Sentinel-5P	
5.2 Jupyter Notebook	
5.3 Download und Umwandlung	
5.4 Suchalgorithmen	
5.5 Auswertung der Ozonbilder	
5.6 Blitzdaten	
5.7 Vergleich der Ozon- und Blitzdaten	
6. Zusammenfassung und Ausblick .....	17
7. Danksagungen .....	18
8. Quellen .....	18

### 3. Einleitung

Nicht lange ist es her, dass im Radio regelmäßig Ozonwarnungen ausgesprochen wurden. Heute nicht mehr. Das liegt aber nicht daran, dass die Ozonwerte geringer sind, sondern eher an der Anhebung der Grenzwerte. Daher kam bei uns die Frage auf, welchen Einfluss das bodennahe Ozon auf unser Leben hat und wie es überhaupt in Bodennähe entsteht. Zu den Schadensauswirkungen gibt es bereits einige Studien: Während Menschen die hohe Ozonkonzentration durch 'Reizerscheinungen der Augen (Tränenreiz), Atemwegsbeschwerden (Husten) und Kopfschmerzen' wahrnehmen, werden Pflanzen und Bäume u.a. im Ertrag geschwächt. Auch deutet es darauf hin, dass sich bodennahes Ozon auf die Artenvielfalt und das Ökosystem auswirkt. Den Studien zufolge sollten also hohe Konzentrationen von Ozon vermieden werden. Doch was ist Ozon überhaupt? Ozon ist ein Molekül, das aus drei Sauerstoffatomen aufgebaut ist. Es ist sehr instabil, da es nur auf Grund der im Molekül durch die Delokalisierung von Elektronen vorliegenden Mesomerie existieren kann. Logisch ist es deshalb aber auch, dass bereits ein einfacher Zusammenstoß mit anderen, größeren Molekülen ausreicht, um das Ozonmolekül auseinanderzubrechen.

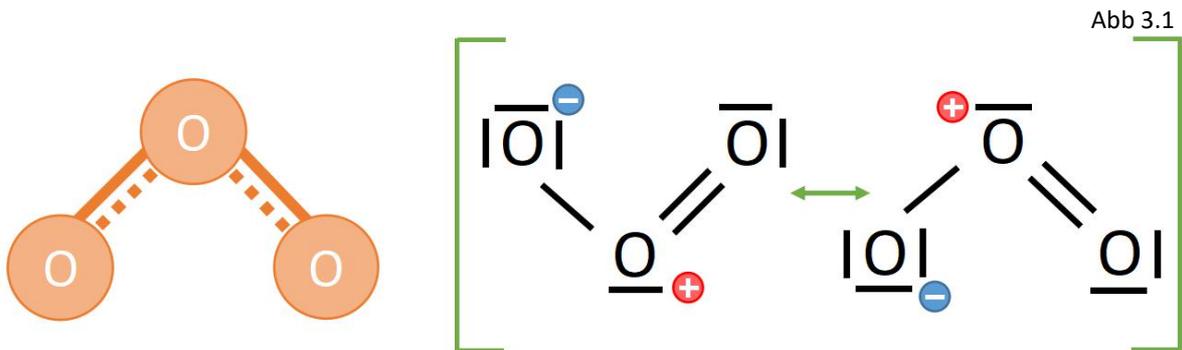


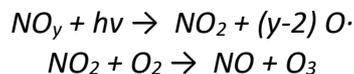
Abb 3.1

Ozon hat eine stark oxidierende Wirkung, das heißt, es möchte gerne Elektronen aufnehmen und beschleunigt so Oxidationsprozesse anderer Stoffe. Daher wird Ozon auch beispielsweise zur Wiederaufbereitung von Trinkwasser verwendet, um Verunreinigungen wie Eisen, Mangan oder Arsen zu oxidieren, um diese im Anschluss herausfiltern zu können.

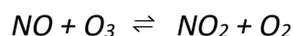
Wie entsteht nun das Ozon in Bodennähe? Zunächst: Gebildet wird Ozon durch die Reaktion eines Sauerstoffmoleküls mit einem Sauerstoffradikal.



Dieses Sauerstoffradikal entsteht durch Spaltung von Molekülen. Dies kann z.B. Sauerstoff selbst sein. Durch große Energiemengen werden Sauerstoffmoleküle gespalten. Die entstandenen Radikale reagieren dann mit einem weiteren Sauerstoffmolekül zu Ozon. Dieser Vorgang findet beispielsweise in der oberen Troposphäre bzw. der Stratosphäre durch die energiereiche UV-Strahlung statt. Die UV-Strahlung kann den Sauerstoff auch in Bodennähe spalten, tut dies aber nur in geringen Mengen, da die Strahlung in der unteren Troposphäre meist nicht mehr genügend Energie besitzt. Hier sind für die Spaltung von Sauerstoffmolekülen vor allem andere energiereiche Vorgänge wie beispielsweise die Verbrennung von Kraftstoff im Straßenverkehr oder die Entladung durch einen Blitz verantwortlich. Des Weiteren kann bodennahes Ozon durch die Reaktion mit Stickoxiden ( $NO_y$ ) gebildet werden. Durch Spaltung der Stickoxide über photochemische Prozesse entsteht  $NO_2$ , welches mit  $O_2$  reagiert:

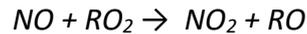


Die hierbei entstandenen Sauerstoffradikale binden sich an ein Sauerstoffmolekül zu Ozon. Das entstandene Stickstoffmonoxid (NO) reagiert in einer weiteren Reaktion mit Ozon und baut dieses ab.



Es bildet sich folglich ein Gleichgewicht zwischen Ozon-bildenden und Ozon-abbauenden Reaktionen aus. Durch flüchtige organische Gase (VOC) wird dieses Gleichgewicht gestört. Der Begriff VOC ist nicht eindeutig

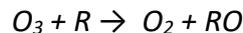
definiert, bezeichnet aber laut WHO Gase, welche einen geringen Siedepunkt haben, sich also schnell verflüchtigen. Neuere Definitionen definieren VOC über ihre photochemische Reaktivität. Genau diese ist Grund für die Störung des Gleichgewichts von Ozonbildung und -abbau. Die VOCs reagieren je nach Stoff oxidierend oder reduzierend. VOCs mit oxidierender Wirkung reagieren mit NO zu NO<sub>2</sub> und stören somit das Gleichgewicht.



Nach Änderung des NO/NO<sub>2</sub> Verhältnisses ändern sich die Stoffmengenkonzentrationen, da K<sub>c</sub> gleich bleibt.

$$K_c = \frac{c(NO_2) \times c(O_2)}{c(NO) \times c(O_3)}$$

Durch die oxidierenden VOCs entsteht folglich mehr bodennahes Ozon. VOCs mit reduzierender Wirkung sorgen dagegen für einen Ozonabbau. Sie reagieren direkt mit Ozon, welches anschließend als Sauerstoff vorliegt.



Stickoxide und VOCs sind folglich aktiver Bestandteil von Ozonentstehung und -abbau. Der Hauptgrund für die Entstehung von sehr hohen Konzentrationen an bodennahem Ozon ist aber die bereits oben erwähnte Reaktion von Sauerstoff mit einem Sauerstoffradikal. Die häufig eher unterschätzte Entstehungsquelle über die Blitzentladung, soll in diesem Projekt genauer untersucht werden. Ziel ist das Erfassen der Veränderungen der Gaszusammensetzung durch einen Blitz. So soll ein besseres Verständnis der Gaszusammenhänge entstehen. Dabei liegt der Hauptfokus auf Ozon.

Doch zunächst, was ist überhaupt ein Blitz? Blitze sind kurzzeitige Lichtbögen zwischen Wolken oder zwischen einer Wolke und der Erde. Sie entstehen auf Grund von hoher elektrischer Potentialdifferenz (=Spannung) zwischen zwei Punkten. Auf der einen Seite befinden sich viele Elektronen, was zu einer negativen Ladung führt. Auf der anderen Seite führt der Mangel an Elektronen zu einer positiven Ladung. Ist die Spannung ausreichend groß und der Abstand klein genug, so kommt es zum Spannungsdurchschlag. Durch physikalische Kräfte wird versucht, das Ladungsungleichgewicht auszugleichen. Hierbei bildet sich ein Kanal, in dem durch Hitze und die hohe Spannung das Gas zwischen den Polen ionisiert wird und ein elektrisch leitendes Plasma (Entfernung Elektronen aus neutralen Atomen) entsteht. In diesem Plasma-Kanal kann nun der Strom fließen. Dabei wird viel Energie frei, weshalb Temperaturen zwischen 20 000 und 30 000°C gemessen werden. Dies führt unter anderem zur Spaltung verschiedener Gase wie die von Sauerstoff. Blitze zwischen Wolke und Erde sind meistens zwischen fünf und sechzehn Kilometer lang. Manche Blitze werden sogar über hundert Kilometer lang. Ein im April 2020 gemessener Blitz in den USA stellt mit seinen 768km Länge den bisherigen Rekord auf. Blitze sind meist wenige Zentimeter dick und halten nur wenige Sekunden an. Die Hauptentladungen dauern lediglich etwa 30µs und erfolgen in kurzen Zeitintervallen hintereinander. Durchschnittlich braucht der gesamte Blitzablauf weniger als eine halbe Sekunde. Auch hier gibt es Extrema. Der am längsten andauernde Blitz bisher wurde 16,73s lang gemessen.

Abgesehen von den gemessenen Rekorden bezüglich der physikalischen Größen Länge und Dauer, zeigen neuste Forschungen auch, dass durch eine Blitzentladung ebenfalls Hydroxyl-Radikale (·OH) und Hydroperoxyl-Radikale (HO<sub>2</sub>) entstehen. Diese reagieren im Anschluss mit Methan, einem Gas, welches häufig zu den VOCs gezählt wird. Bei dieser Reaktion entsteht Wasser und über einige Zwischenschritte Kohlenstoffdioxid. Der Methanabbau durch das 'Waschmittel der Atmosphäre' ·OH ist für den Menschen sehr vorteilhaft, da Methan einen großen Anteil am Klimawandel hat. Wie diese Auswirkungen genau aussehen, und welche weiteren Auswirkungen ein Gewitter haben kann, wird in den nächsten Kapiteln dargestellt.

Wie bereits erwähnt, soll der Fokus hierbei besonders auf dem Gas Ozon liegen. Tatsächlich wurde durch die beschriebenen Prozesse und Zusammenhänge aber deutlich, dass sowohl die Stickoxide (NO<sub>y</sub>), als auch die VOCs in enger, für eine genauere Analyse der Entstehungs- und Verbreitungsprozesse nicht unerheblicher Verbindung mit der Entstehung des Ozons stehen. Deshalb sollen auch diese beiden Gaskomponenten genauer im Blick behalten werden.

## 4. Experimente mit dem air-Q

### 4.1 Idee und Ziele der Experimente

Ziel unserer Experimente war es, das Wetterphänomen Blitz zu simulieren und die Entwicklung von Gasen mit Fokus auf Ozon zu untersuchen. Wir konzentrierten uns somit auf die Chemie der Luft während und nach einem Gewitter. Schnell merkten wir, dass die Messung mit einem reinen Ozonsensor wenig Aussagekraft hat, denn die meisten Gase stehen in starker Wechselwirkung miteinander. Laut unserer Recherche sind dies im Falle von Ozon vor allem Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und flüchtige Organische Gase (VOCs). Somit war unser Ziel, die Wechselwirkungen der Gase während eines Gewitters zu untersuchen und Gasentwicklungen unter verschiedenen Umweltbedingungen (Temperatur, UV-Strahlung) zu betrachten.

### 4.2 Der air-Q Messsensor

Der air-Q ist ein Raumluftmessgerät, welches Messwerte für 14 verschiedene Bestandteile der Atemluft liefert. Mit diesem Messgerät ist es möglich, die Gasentwicklungen in der Luft differenziert zu überwachen und Umwelteinflüsse zu analysieren. Die Datenauswertung findet über den Zugriff auf die API (Application Programming Interface) des Gerätes statt. Damit ist es möglich, den Echtzeitdatenstrom (JSON) des Gerätes auszulesen, um die Daten anschließend mit einer Fremdsoftware zu analysieren. Wir schrieben einen Programmcode mit Python, mit dem es möglich ist, nach einem wiederholenden Zeitintervall auf die neuesten Daten des Sensors zuzugreifen und diese in Listen und anschließend in einer CSV-Datei abzuspeichern. Hinzu kommen wichtige Codes zur Entschlüsselung der Dateien (angegeben in der air-Q API) und selbstgeschriebene Codes zur Auswahl der für uns interessanten Daten. Außerdem wurden in dem Programm die Messwerte sortiert und in einer für die Auswertung sinnvollen Formatierung gespeichert.

### 4.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Simulation der Blitze erfolgte mit einem selbstgebauten 'Blitzkasten'. Der Kasten stellt dabei ein möglichst abgeschlossenes System dar, in dem unter Hochspannung ein Stromfluss durch die Luft erzeugt werden kann. Eine Glashaube, wie in Abb 4.3.1 zu sehen, schirmt die Luft innerhalb des Kastens von der Raumluft ab. Um den Gasaustausch zu minimieren, wird die Glashaube auf ein Brett gestellt und die benötigten Kabel durch Löcher im Holz in den Blitzkasten eingeführt. Es ist jedoch anzumerken, dass ein Luftaustausch mit der Außenluft nicht komplett unterbunden werden kann, da zum Beispiel das Stromkabel für den Sensor aufgrund seiner Größe nicht durch ein Loch im Brett passt und somit ein kleiner Spalt vorzufinden ist. Darüber hinaus verfügt der Kasten über verschiedene Schläuche, mit denen die Umwelteinflüsse verändert werden können, zum Beispiel durch das Einströmen von zuvor erhitzter Luft. In dem Blitzkasten befinden sich somit während der Experimente die Drähte für den Blitz, etwa 10cm über dem Boden befestigt, und der air-Q Messsensor.

Ein typischer Versuchsdurchlauf sieht folgendermaßen aus: Das Computerprogramm wird gestartet und in einem kontinuierlichen Zeitintervall (meist ca. 3s) werden die Daten des Sensors abgerufen. Nach 10 Sekunden Vorlaufzeit wird der Stromfluss für etwa 30 Sekunden eingeschaltet. Anschließend sammelt das Programm bis zum Programmende nach einer Stunde Daten von 14 verschiedenen Bestandteilen der Luft. Dieses Vorgehen wurde über einen Zeitraum von acht Wochen ungefähr 50 mal wiederholt. Leider sind aufgrund von Fehlern mit der Internetverbindung und den Sensoren viele Datensätze nur zum Teil auswertbar. Zu diesen Langzeitexperimenten kommen viele weitere, kurze Messungen hinzu, die Fehler bei den Messsensoren untersuchen und ausschließen sollen. Auf diese Fehler wird später genauer eingegangen.

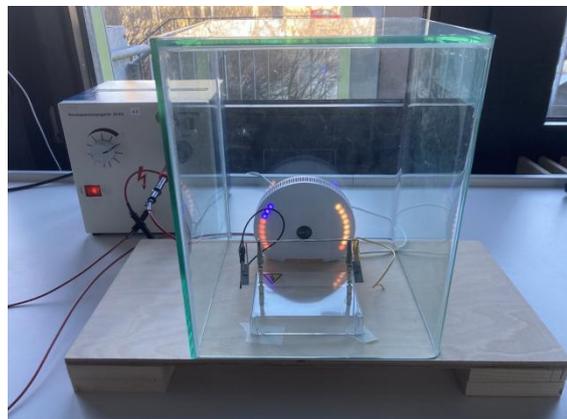
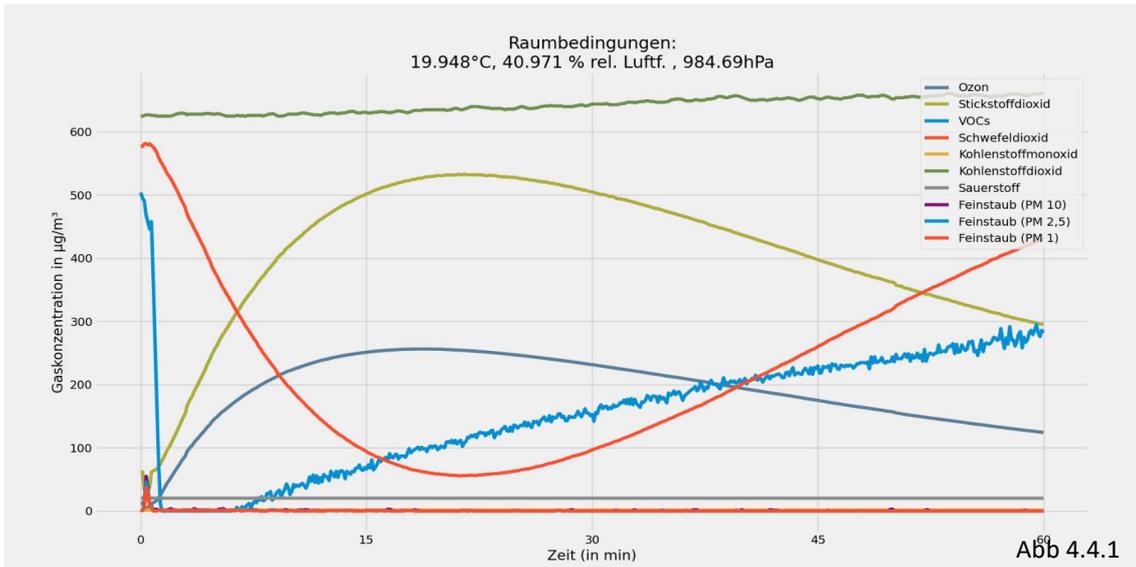


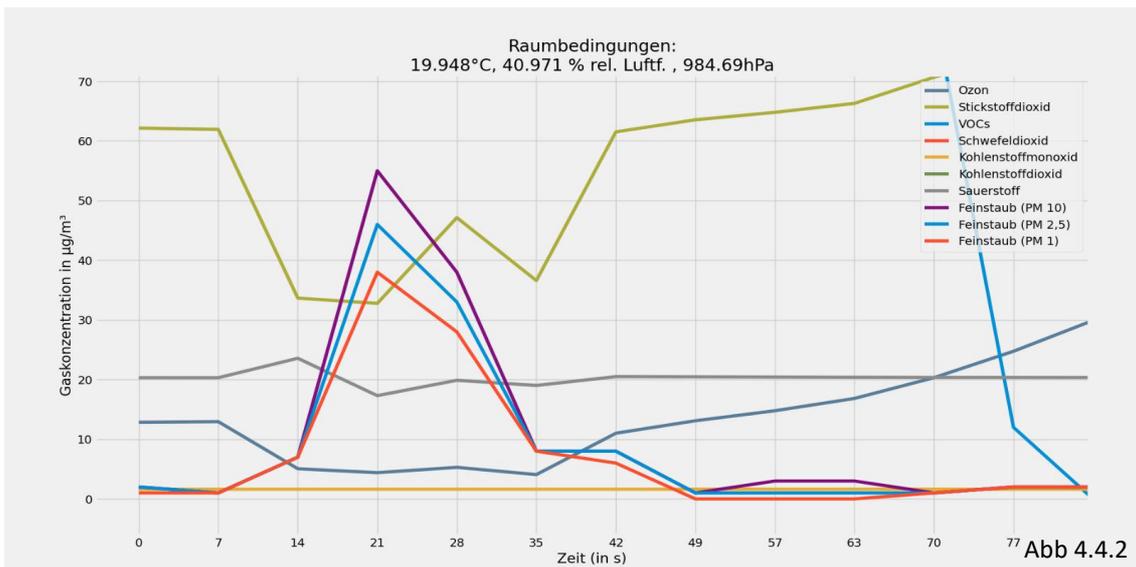
Abb 4.3.1

## 4.4 Datenauswertung aller Bestandteile der Luft

Die gespeicherten CSV-Dateien können mit einem selbstgeschriebenen Programmcode und mit der Programmibliothek Matplotlib für die Auswertung graphisch dargestellt werden. Der Programmcode impliziert dabei die Umwandlung der CSV-Datei in Listen, die jeweils Messwerte für einen Bestandteil der Luft beinhalten. Anschließend kann die Liste mit den Messwerten der Zeit der x-Achse zugewiesen werden. Die anderen Listen, also die Datensätze der Gase, werden entsprechend dem Zeitpunkt der Messung als y-Werte dargestellt. Die nachfolgende Graphik zeigt eine typische Entwicklung der Gaskonzentration von zehn verschiedenen Bestandteilen der Luft während und nach der Simulation eines Blitzes:



Im folgenden Text werden alle vorliegenden Bestandteile der Luft analysiert und die jeweiligen Kurven interpretiert. Anschließend werden die Ozon- und die Stickstoffdioxid-Entwicklungen differenzierter untersucht. Um die Verläufe in der Phase des Blitzes genauer zu betrachten, zeigt die untenstehende Abbildung einen Zoom auf die untere linke Ecke der Abbildung 4.4.1. Der Stromfluss ist zwischen Sekunde 10 und 40 aktiv.



Bei der Analyse werden Schritt für Schritt die einzelnen Bestandteile genauer untersucht:

→ Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) gemessen in ppm: Konzentration steigt, wie in Abbildung 4.4.1 zu sehen ist, im Laufe der Zeit leicht an. Diese Beobachtung kann nicht mit allen Datensätzen bestätigt werden. Das bedeutet, dass eine zusätzliche, tiefgründige Auseinandersetzung nötig ist, um eine beweisbare Aussage über die CO<sub>2</sub>-Entwicklung zu treffen. Die vorhandenen Daten lassen jedoch vermuten, dass es zu keinen erheblichen Veränderungen der Kohlenstoffdioxidkonzentration unter Einfluss von Blitzen kommt.

→ Kohlenstoffmonoxid (CO) gemessen in  $\text{mg}/\text{m}^3$ : In Abbildung 4.4.1 ist der Verlauf von Kohlenmonoxid nur schwer zu beurteilen, denn seine Werte belaufen sich während des Versuches zwischen 1 und  $3 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Weitere gezielte Modellierungen von CO zeigen meist eine leichte Steigung des CO-Gehalts während der Versuchsdauer. Bei Versuchsanfang beläuft sich die Kohlenmonoxidkonzentration normalerweise bei rund  $1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Bei einer maximalen Steigerung von  $0,4 \text{ mg}$  bleibt der Kohlenmonoxidwert jedoch weit unter der vom Umweltbundesamt gesetzten 8-Stunden-Mittelwertobergrenze von  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

→ Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) gemessen in %: Leichte Schwankungen während des Stromflusses, ansonsten konstant. Keine wiederkehrenden bemerkenswerte Verläufe zu erkennen.

→ Feinstaub-Partikel (PM10; PM2,5; PM1) gemessen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ : Feinstaub ist per Definition ein Gemisch aus festen und flüssigen Schwebstoffen mit sehr kleinem Durchmesser. Der Messwert PM10 gibt die Menge an Partikeln an, die kleiner als  $10 \mu\text{m}$  sind. PM2,5 und PM1 beinhalten dementsprechend nur kleinere Partikel. Gemessen wird mithilfe einer Infrarot-LED und einem Detektor. Trifft Licht auf ein Partikel, kommt es zu einem Aufblitzen und der Detektor berechnet mit der Helligkeit des Blitzes die Partikelgröße. In Abbildung 4.4.2 ist zu erkennen, dass alle drei Werte während des Blitzes einen starken Ausschlag nach oben zeigen. Nach Abschalten des Stroms pendelt sich der Wert für alle drei Partikelgrößen wieder bei einem niedrigen Wert ein. Dabei stellten wir uns die Frage, ob diesem Wert zu trauen ist, oder ob der Blitz direkt Einfluss auf den Feinstaubsensor hat. Eine plausible Erklärung wäre, dass der simulierte Blitz dem Aufblitzen der Feinstaubpartikel ähnelt und somit eine Veränderung des Feinstaubwertes auslöst. Möglich ist auch, dass durch die Reibung, ausgelöst von dem Stromfluss in dem Metalldraht, kleinste Partikel herausgelöst werden und der Feinstaubsensor auf diese anschlägt.

→ Flüchtige Organische Gase (VOCs) gemessen in ppb: VOC (Volatile Organic Compounds) ist eine Gruppe kohlenstoffhaltiger Verbindungen, die schon bei niedrigen Temperaturen verdampfen. Beispiele sind Vertreter der Stoffgruppen Aldehyde, Alkane und Alkohole. Aus Abbildung 4.4.1 ist herauszulesen, dass die Konzentration während des Blitzes leicht abnimmt. Ab Sekunde 40 beginnt die Kurve jedoch stark zu sinken und befindet sich nach weiteren 20 Sekunden bei Null. Dieser Verlauf könnte durch die in der Einleitung beschriebenen Reaktion von VOCs mit NO erklärt werden. Außerdem reagieren die flüchtigen Gase mit dem starken Oxidationsmittel Ozon. Nach ungefähr fünf Minuten beginnt die Konzentration linear zu steigen und erreicht nach einer Stunde die Hälfte des ursprünglichen Wertes. Möglicherweise ist dann die Anzahl der abbauenden Stoffe wieder am Sinken und der VOC-Wert kann sich erholen. Dieser Verlauf konnte mit mehreren Versuchsreihen bestätigt werden. Eine weitere Erklärung für den Verlauf ist die ebenfalls in der Einleitung erwähnte Entstehung von OH und  $\text{HO}_2$  in der Atmosphäre. Diese Moleküle reagieren mit Methan und zersetzen es. Methan wird unter anderem vom air-Q als VOC gemessen. Der Spaltungsprozess von Methan trägt höchstwahrscheinlich zum Rückgang der VOC-Werte bei. Die Elimination von Methan wäre ein überaus positiver Effekt der Blitze, denn Methan zählt zu den gefährlichen Treibhausgasen.

→ Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) gemessen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ : Der Schwefeldioxid Sensor zeichnet sich durch starke Querempfindlichkeit zu anderen Gasen aus. Besonders interessant ist hierbei die starke Querempfindlichkeit des Sensors zu Stickstoffmonoxid. Somit können mit dieser Kurve auch Rückschlüsse auf die NO-Entwicklung gemacht werden. Normalerweise steigt der Verlauf in den ersten 5-10 Minuten (in Abbildung 4.4.1 nicht zu erkennen, aber in anderen Versuchsreihen sehr deutlich) an und sinkt dann drastisch ab, bis ungefähr der Höhepunkt der  $\text{NO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Kurve erreicht ist. Während der restlichen Zeit steigt der Wert wieder. Der Anstieg zu Beginn kann mit der Entstehung von Stickstoffmonoxid bei Stromflüssen durch die Luft erklärt werden. Der nur kurze Anstieg und der folgende Rückgang ist möglicherweise durch die Reaktion von Stickstoffmonoxid mit den ebenfalls entstandenen Sauerstoffradikalen bzw. den VOCs zu Stickstoffdioxid zu erklären. Wenn das entstandene Stickstoffmonoxid wieder abgebaut wird, stellt sich aber die Frage, warum der Wert so stark unter den Ausgangswert sinkt. Eine mögliche Antwort lässt sich wieder mit den Querempfindlichkeiten beschreiben. Denn nach Herstellerangaben hat der  $\text{SO}_2$ -Sensor eine negative Querempfindlichkeit zu Ozon. In anderen Worten: Liegt viel Ozon vor, sinkt der vorgegebene Schwefeldioxid-Wert. Die sinkende Kurve deutet auf einen hohen Ozongehalt hin. Eine weitere Erklärung ist, dass das stabile  $\text{SO}_2$  mit Sauerstoffradikalen zu  $\text{SO}_3$  reagiert und sich dadurch der Wert reduziert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich mit der  $\text{SO}_2$ -Kurve viele interessante Vermutungen aufstellen lassen, die in Zukunft noch genauer untersucht werden können.

→ Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) gemessen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ : Stickstoffdioxid und vor allem die Spaltung von Stickstoffdioxid unter Einfluss von UV-Strahlung ist eminent entscheidend für die Entstehung von Ozon. In Abbildung 4.4.2 ist zu erkennen, dass  $\text{NO}_2$  einen überraschenden Ausschlag nach unten während eines Blitzes macht. Mit einer Reihe von Versuchen fanden wir heraus, dass der Stromfluss und seine wohl umgebenden elektrischen und magnetischen Felder den Sensor beeinflussen. Diese Annahme scheint plausibel, da Stickstoff mittels eines elektrochemischen Sensors gemessen wird. Moleküle, die auf der Oberfläche des Sensors andocken, verursachen einen Strom im Sensor. In diesem Fall beeinflusst der Blitz möglicherweise den gemessenen Strom. Bei einem Versuch wurde der air-Q außerhalb der Glashaube platziert, ein Gasaustausch mit der Luft innerhalb des ‚Blitzkastens‘ wurde unterbunden und dennoch kam es zu einem leichten Einbruch.

Ein weiterer Nachteil dieses Sensors ist seine leichte Querempfindlichkeit zu Ozon (laut air-Q-Herstellern ungefähr 10%). Es kann also einen leichten Ausschlag anzeigen, obwohl kein  $\text{NO}_2$  vorhanden ist. Der Verlauf nach dem Einbruch ist jedoch interessant. In Abbildung 4.3.1 ist zu sehen, dass der  $\text{NO}_2$ -Gehalt bis ca. Minute 20 steigt, und dann langsam wieder zu sinken beginnt. Es liegt nahe, dass die durch den Blitz entstandenen Sauerstoff- und Stickstoffradikale sich zu Stickstoffdioxid verbinden. Hinzu kommt die Nebenreaktion von NO mit den VOCs. Außerdem reagieren zwei NO-Moleküle mit einem Sauerstoffmolekül zu  $\text{NO}_2$ . Dies erklärt den Anstieg. Das folgende Sinken deutet darauf hin, dass  $\text{NO}_2$  nach einer gewissen Zeit wieder abgebaut wird. Der  $\text{NO}_2$ -Wert erholt sich bei normalen Raumbedingungen innerhalb einer Stunde nicht zum Ausgangswert zurück.  $\text{NO}_2$  ist für den Menschen ein gesundheitsschädliches Gas und in Bodennähe unerwünscht. Die Alarmschwelle für den 3h-Mittelwert liegt bei  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , was in den Versuchen deutlich überschritten wird. Blitze bei Gewittern mit viel größeren Spannungen und Stromstärken haben somit das Potential, gefährliche Mengen an Stickstoffdioxid zu produzieren. Außerdem tragen Stickstoffdioxide zur Entstehung des sauren Regens bei.  $\text{NO}_2$  reagiert dabei mit  $\text{H}_2\text{O}$  zu salpetriger Säure ( $\text{HNO}_2$ ) und Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ). Saurer Regen mit pH-Werten von 4,2 - 4,8 haben einen negativen Einfluss auf Pflanzen, Gewässer und Gebäude.

→ Ozon ( $\text{O}_3$ ) gemessen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ : Ozon wird ebenfalls mittels eines elektrochemischen Sensors gemessen und somit ist, gleich wie bei  $\text{NO}_2$ , ein Einbruch der Kurve während des Blitzes zu beobachten. Eine Schwierigkeit, die Ozon Kurve zu analysieren, liegt in der starken Querempfindlichkeit zu anderen Gasen - vor allem zu  $\text{NO}_2$ . Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Querempfindlichkeiten.

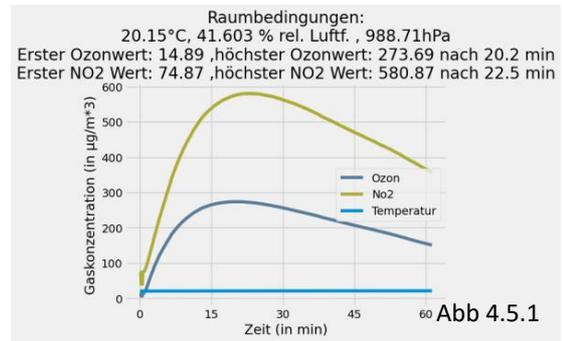
Abb 4.4.3

Sensor\Reaktion	CO	NO2	O3	H2S	Methan	Heptan	Chlor
O3	0,01 %	100,00 %	100,00 %	-50,00 %	0,01 %	-0,14 %	100,00 %

Diese Abhängigkeit, die uns früh aufgefallen ist, aber erst spät bestätigt werden konnte, macht es unmöglich, eine eindeutige Aussage über absolute Werte von Ozon zu machen. Mit Beachtung der  $\text{NO}_2$ -Kurve sind dennoch Aussagen über Tendenzen in der Entwicklung möglich. Die Ozon-Kurve steigt nach Beendigung des Blitzes stark an und erreicht etwa zur gleichen Zeit wie die  $\text{NO}_2$ -Kurve ihr Maximum. Interessanterweise befindet sich das Maximum der  $\text{O}_3$ -Kurve im Durchschnitt ungefähr 2,5 Minuten vor dem Maximum der  $\text{NO}_2$ -Kurve. Das bedeutet, dass, obwohl der  $\text{NO}_2$ -Wert noch steigt, der Ozonwert bereits wieder sinkt. Die Frage, warum der Ozonwert überhaupt so schnell wieder sinkt, ist durch die Instabilität des Ozonmoleküls zu begründen. Allein der Zusammenstoß mit den Wänden der Glashaube lässt das Ozonmolekül zerfallen. Folglich sinkt der Ozonwert relativ schnell wieder. Trotz der Querempfindlichkeit deutet die  $\text{O}_3$ - und die  $\text{SO}_2$ -Kurve mit ihrer negativen Empfindlichkeit auf Ozon darauf hin, dass im Experiment Ozon entsteht. Darüber hinaus haben wir die Ozonwerte des air-Q mit einem Arduino-Ozonsensor verglichen. Dieser bestätigt die Ozonentstehung und wird auf Seite 10 kurz beschrieben. Eine tiefgehende Auseinandersetzung mit der Ozonentstehung wird in der nun folgenden Analyse der Experimente bei unterschiedlichen Temperaturen vorgenommen.

## 4.5 Datenauswertung der Experimente bei verschiedenen Temperaturen

In diesem letzten Teil soll differenzierter die Entstehung von  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  bei verschiedenen Temperaturen analysiert werden. Dazu werden die jeweiligen Kurven wiederum graphisch aufgearbeitet und die Maximalwerte der Gase mit ihrem Anfangswert verglichen. Auch die Zeitdauer bis zum Erreichen des Maximalwertes wird berücksichtigt. Um eine Abhängigkeit der Werte zu den Umweltbedingungen (vor allem Temperatur) zu untersuchen, wird eine Darstellung, wie sie hier nebenstehend zu sehen ist, erstellt.

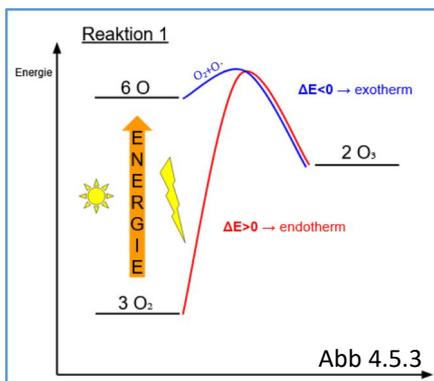


Zur Auswertung werden die Messwerte tabellarisch aufgearbeitet. Die folgende Abbildung zeigt die durchschnittlichen Messwerte in unterschiedlichen Temperaturbereichen ( $\sigma$  = Standardabweichung).

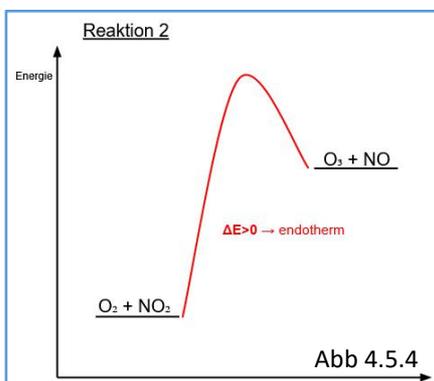
Temperaturbereich in °C	$\text{O}_3$ Maximalwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{O}_3$ Zeit bis zum max. Wert in min	$\text{NO}_2$ Maximalwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\text{NO}_2$ Zeit bis zum max. Wert in min
20,5 - 35,0	$\bar{\varnothing}$ 183,5 ; $\sigma$ 36,9	$\bar{\varnothing}$ 11,8 ; $\sigma$ 2,8	$\bar{\varnothing}$ 423,3 ; $\sigma$ 88,3	$\bar{\varnothing}$ 14,0 ; $\sigma$ 4,5
17,0 - 20,5	$\bar{\varnothing}$ 211,1 ; $\sigma$ 41,7	$\bar{\varnothing}$ 16,2 ; $\sigma$ 2,6	$\bar{\varnothing}$ 553,0 ; $\sigma$ 83,0	$\bar{\varnothing}$ 19,2 ; $\sigma$ 2,9
< 10	$\bar{\varnothing}$ 107,6 ; $\sigma$ 66,7	$\bar{\varnothing}$ 6,4 ; $\sigma$ 0,6	$\bar{\varnothing}$ 379,2 ; $\sigma$ 12,8	$\bar{\varnothing}$ 6,0 ; $\sigma$ 3,5

Abb 4.5.2

Die vorliegenden Daten wurden bei 25 Versuchen mit jeweils unterschiedlichen Temperaturen erhoben. Aus Platzgründen werden nur die Durchschnittswerte angegeben. Der höchste Temperaturbereich setzt sich aus elf Messungen, der mittlere aus zehn Messungen und der untere aus vier Messungen zusammen. Im Bereich zwischen 10°C und 17°C fehlen uns noch Messwerte, die in nächster Zeit zu sammeln sind. Dennoch sind einige Aussagen möglich. Schaut man sich die Zeiten bis zum Erreichen der Maximalwerte an, ist zu erkennen, dass bei hohen Temperaturen diese Zeit vergleichsweise geringer ist. Eine mögliche Erklärung ist die durch hohe Temperaturen hervorgerufene starke Molekularbewegung, welche die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Bemerkenswert ist bei diesen Messwerten vor allem, dass die Ozonkonzentration entgegen unseren Erwartungen bei erhöhten Temperaturen sinkt. Die höchsten Ozon- sowie Stickstoffdioxidwerte wurden zwischen einer Temperatur von 17°C und 20°C erreicht. Auch bei sehr niedrigen Temperaturen fällt die Ozonkonzentration geringer aus.



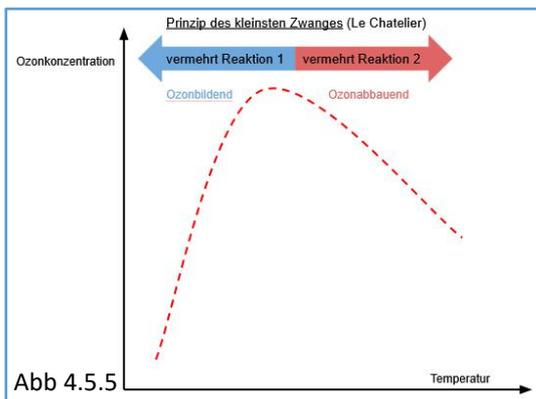
Diese Beobachtung lässt uns die Hypothese aufstellen, dass es eine optimale Temperatur für die Ozonentstehung, sowie für hohe Ozonwerte gibt.



Dieses für uns sehr überraschende Ergebnis haben wir versucht, auch chemisch zu erklären, und deshalb dafür eine Hypothese aufgestellt. Diese berücksichtigt nicht alle komplexen Zusammenhänge in der Luft wie mögliche Nebenreaktionen etc, schafft es aber dennoch, diese Korrelation in sich plausibel zu erklären:

Um diesen Zusammenhang besser zu verstehen, muss zunächst die Energiebilanz der für Ozonentstehung und den Ozonabbau relevanten Gleichgewichte angeschaut werden. Zur Ozonbildung trägt vor allem die Reaktion von Sauerstoff mit den Sauerstoffradikalen und zum Ozonabbau vor allem das Gleichgewicht von Sauerstoff mit den Stickoxiden bei.

Die Reaktion von Sauerstoff mit einem Sauerstoffradikal (Reaktion 1) ist exotherm, denn gegenüber dem sehr reaktiven Radikal ist die Mesomerie-stabilisierte Struktur des Ozonmoleküls energetisch deutlich günstiger. Das Gleichgewicht von Ozonbildung/-abbau durch die Stickoxide (Reaktion 2) ist zur ozonbildenden Seite endotherm.



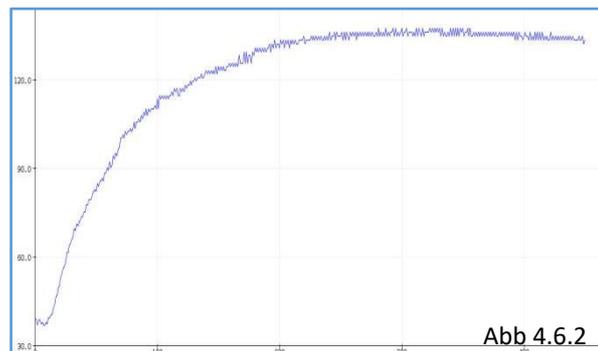
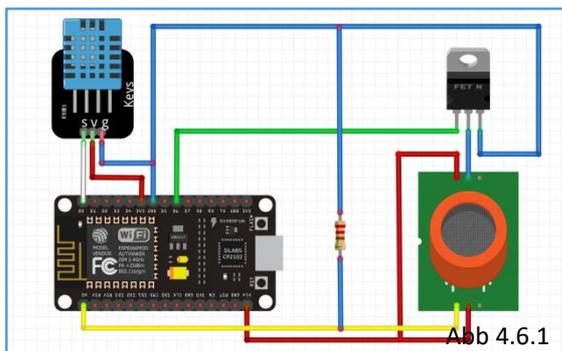
Das bedeutet, dass durch eine Erhöhung der Temperatur nach dem Prinzip des kleinsten Zwanges von Le Chatelier Reaktion 1 vermehrt in Richtung der Eduktseite reagieren wird, während das Gleichgewicht in Reaktion 2 sich auf die Produktseite verschiebt. Eine Erhöhung der Temperatur sorgt also für eine weniger starke Ozonbildung durch Reaktion 1 und für einen weniger starken Abbau durch Reaktion 2. Wird die Temperatur verringert, werden sich die Gleichgewichte entgegengesetzt verhalten: Reaktion 1 verläuft vermehrt in Produktrichtung, Reaktion 2 vermehrt in Eduktrichtung.

Bei einer Veränderung der Umgebungstemperatur entwickeln sich die beiden Gleichgewichte folglich immer gegenläufig. Je mehr das eine Gleichgewicht auf die ozonbildende Seite verschoben wird, desto stärker wirkt das andere Gleichgewicht dem Entstehungsprozess entgegen. Dies lässt darauf schließen, dass es ein Temperaturoptimum geben muss, in dem am meisten Ozon entsteht: Ist die Temperatur zu hoch, so bildet Reaktion 1 zu wenig Ozon, und ist die Temperatur zu niedrig, überwiegt der Ozonabbau durch Reaktion 2.

Diese Hypothese gilt allerdings nur dann, wenn Sauerstoffradikale vorliegen, also beispielsweise nach einem Gewitter oder durch starke UV-Einstrahlung, da die großen Energiemengen die Sauerstoffmoleküle spalten. Liegen diese Radikale nicht vor, steigt nach unserem Erklärungsansatz die Ozonkurve mit steigender Temperatur, da die Reaktion von elementarem Sauerstoff zu Ozon stark endotherm ist.

## 4.6 Abgleich mit einem Arduino-Messsensor

Die Aussagefähigkeit des air-Q über die Ozon- und Stickstoffdioxidkonzentration in der Umgebungsluft leidet jedoch unter den bereits beschriebenen sensorischen Querempfindlichkeiten der beiden Gase. Hinzu kommt, dass die im air-Q ablaufenden Prozesse und Messoperationen für uns nur wenig transparent und einsichtig sind. Um für die aufgenommenen Kurven eine höhere Validität zu erhalten, haben wir eine Sensorstation bestehend aus einem mit Arduino kompatiblen Ozonsensor, einem NodeMCU und einem Temperatursensor entwickelt. Bei dem erwähnten externen Ozonsensor handelt es sich um den MQ131, der die Ozonkonzentration in der Luft ebenfalls im  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich misst, deutlich geringere Querempfindlichkeiten zwischen Ozon und Stickstoffdioxid aufweist und gleichzeitig in Sachen Programmierung und Hardware für uns komplett einsichtig ist. Außerdem umfasst die Sensorstation einen DHT11, ein Sensor, der die Temperatur und Luftfeuchtigkeit misst. Beide auf einer Lochplatine angebrachten Sensoren werden mit einem Mikrocontroller, genauer einem NodeMCU-Board, ausgelesen. Das NodeMCU wurde dem Arduino vorgezogen, was vor allem über den Versuchsaufbau zu begründen ist. So befindet sich die Sensorstation gemeinsam mit dem air-Q im Blitzkasten und kommuniziert über ein kabelloses, auf MQTT basierendes Datenübertragungssystem, was mit dem Arduino nicht möglich wäre. Der hierfür notwendige externe MQTT-Broker wird dabei auf einem Laptop installiert, auf dem dann auch die entsprechende Ozonkurve live geplottet wird. Der Vergleich der in Bild 4.6.2 dargestellten Kurve mit den oben gezeigten Kurven des air-Q zeigt eindeutig, dass der Arduino-Messsensor die relative Entwicklung der Messkurve des air-Q bestätigt.



## 5. Auswertung von Satellitendaten

Mit Hilfe der praktisch durchgeführten Experimente und den vorhergehenden theoretischen Betrachtungen konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Ozonkonzentration in der Umgebungsluft sowohl von den Parametern Temperatur und UV-Strahlung, als auch von der vorliegenden Anzahl an Stickoxiden abhängig ist. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass eine elektrische Blitzentladung zu einer Veränderung der beschriebenen Parameter und somit zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration führt. Die aus den bisherigen Arbeitsschritten gezogenen Schlüsse und vermuteten Zusammenhänge sollen in diesem Teil der Arbeit durch die Analyse von realen globalen Daten über die bodennahe Ozonkonzentration bestätigt, ergänzt oder erweitert werden. Die Zielsetzung dieses Arbeitsschritts lag besonders darin, die im idealisierten Modellexperiment nachgewiesenen Abhängigkeiten auch im realen Ökosystem der Erde zwischen allen weiteren Ozonstehungsquellen wie dem Straßenverkehr oder Industrieanlagen wiederzufinden. Um diesen Forschungsschritt realisieren zu können, wurden Messdaten über die bodennahe Ozonbelastung benötigt, die eine möglichst große Fläche möglichst lückenlos abdecken. So sollten zunächst weniger lokale spezielle Zusammenhänge, sondern eher globale allgemeine Entwicklungen untersucht werden. Doch woher bekommt man einen derartigen Datensatz?



Abb 5.0.1

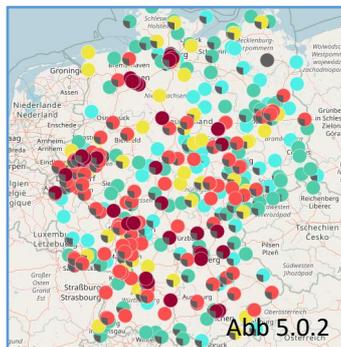


Abb 5.0.2

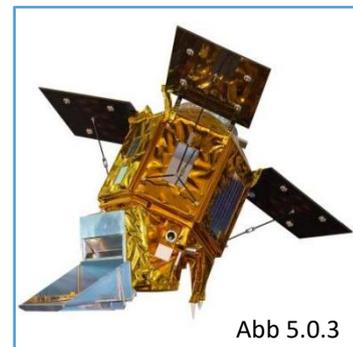


Abb 5.0.3

Nach einiger Recherche konnten drei Möglichkeiten zur Beantwortung dieser Frage gefunden werden. Die erste Idee bestand darin, weitere der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Ozonmessstationen (Abb 5.0.1) zu bauen und diese räumlich verteilt aufzustellen. Die zweite Idee war es, die Daten der etwa 350 über ganz Deutschland verteilten Messstationen des Bundesumweltamts (Abb 5.0.2) als Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte zu verwenden. Letztendlich haben wir uns jedoch für die dritte Lösung entschieden, die vorsah, den geforderten Datensatz von einem speziellen Satelliten (Abb 5.0.3), der die troposphärische Ozonbelastung messen kann, zu beziehen. Das hatte vor allem den Hintergrund, dass der Satellit einen deutlich größeren Bereich der Erdoberfläche abdeckt und kontinuierliche Messungen mit einer ausreichenden Auflösung vornimmt. Globale Zusammenhänge zwischen Wetterphänomenen und der Ozonkonzentration können auf der Grundlage dieser Datenquelle also deutlich besser erkannt werden.

### 5.1 Sentinel-5P

Als Datenquelle für globale Daten über die bodennahe Ozonkonzentration wurde also der sogenannte Sentinel-5P benutzt. Dieser Satellit wurde durch die Zusammenarbeit der ESA mit dem Netherlands Space Office entwickelt, am 13 Oktober 2017 ins All geschossen und kreist seitdem auf einem sonnensynchronen Orbit 824 Kilometer über der Erdoberfläche. Seit April 2018 vermisst der Satellit die Zusammensetzung der Troposphäre mithilfe seines sogenannten „Tropomi“ (tropospheric monitoring instrument). Dabei handelt es sich um ein spezielles Messinstrument, das die Erde sowohl im ultraviolett-sichtbaren, als auch im nah- und kurz-infraroten Spektralbereich beobachtet und die Messinstrumente anderer Satelliten in Sachen Sensitivität, Genauigkeit und Auflösung klar übertrifft. Durch dieses Instrument ist der Satellit in der Lage, die Konzentration von Schadstoffgasen wie Ozon, Stickoxiden oder Schwefeldioxid mit einer Auflösung von 7.5 auf 2 Kilometern zu messen. Doch sind die Daten des Satelliten wirklich zuverlässig? Können die Satellitendaten als Anhaltspunkt für die tatsächliche bodennahe Ozonkonzentration dienen? Von den forschenden Wissenschaftlern durchgeführte Referenz- und Vergleichsmessungen konnten zeigen, dass die vom Sentinel-5P gemessenen Ozondaten sehr gut mit den Daten von terrestrischen Messsystemen übereinstimmen. Trotzdem gilt es zu berücksichtigen, dass die Genauigkeit durch eine erhöhte Wolkendichte, Schneefall oder starke Sättigungen negativ beeinflusst werden kann. Aufgrund der allgemein hohen Genauigkeit, der feinen Auflösung und der Tatsache, dass auch die Wetterentstehung ausschließlich in der Troposphäre stattfindet, sind die Daten von Sentinel-5P für den geplanten Einsatz ideal.

## 5.2 Jupyter Notebook

Für den Download, die Verarbeitung, die Auswertung und den allgemeinen Umgang mit den Satellitendaten waren zahlreiche verschiedene Programmierfähigkeiten erforderlich. Jeder für diesen Teil des Projekts erstellte Programmcode wurde dabei im Rahmen eines sogenannten Jupyter Notebooks geschrieben, implementiert und ausgeführt. Bei einem Jupyter Notebook handelt es sich allgemein um eine web-basierte Programmierumgebung, die eine interaktive wissenschaftliche Datenauswertung durch die Verbindung von Dokumentation und Programmierung erlaubt. Das Jupyter Notebook wird lokal auf einem Laptop gestartet und kann anschließend von allen anderen im Netzwerk befindlichen Geräten aufgerufen werden. Innerhalb eines Jupyter Notebooks können Textelemente, Codestücke und grafische Plots gezielt zu einer zusammenhängenden Dokumentation verknüpft werden. Die Textelemente werden dabei in Form von Markdown realisiert, die Programmierblöcke können unterschiedliche Sprachen wie Python oder Java umfassen. Die Idee der Jupyter Notebooks wurde verwendet, da gemeinsam an verschiedenen Codeelementen gearbeitet werden kann und ein einzelner Mausklick ausreicht, um eine bestehende Dokumentation entsprechend der neusten Ozonmessdaten zu aktualisieren.

## 5.3 Download und Umwandlung

Der Sentinel-5P misst die Gaskonzentrationen in der Troposphäre einmal pro Tag immer zwischen 10:00 und 14:00 Uhr. Die Daten werden nach einer fünf- bis zehnmütigen Verarbeitungszeit zurück zur Erde geschickt und dann in einem öffentlich zugängliche Open Access Hub der ESA sortiert nach Datum, dem Messbereich und dem beobachteten Gas gespeichert. Diese Parameter und die verfügbare API machen es möglich, mit einem Python-Code zuerst den gesuchten Datensatz zu lokalisieren und diesen anschließend herunterzuladen. Da ein einzelner Datensatz mit 330 MB sehr groß ist, werden nach dem Download die Ozondaten gemeinsam mit den Koordinaten der betrachteten Messpunkte extrahiert und so die Größe des NetCDF-Files auf etwa 10 MB reduziert. Trotz dieser nachfolgenden Komprimierung stellt sich der Prozess

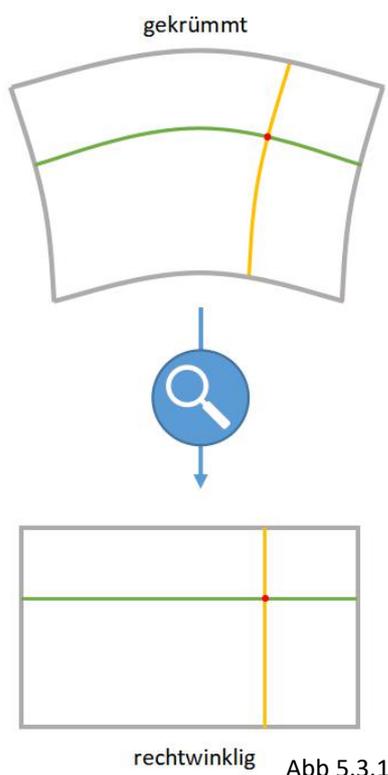


Abb 5.3.1

des Herunterladens der Satellitendaten aufgrund der stark variierenden, vom Open Access Hub abhängigen Downloadgeschwindigkeit als sehr zeitintensiv dar. Allein für das Herunterladen der relevanten Ozondaten aus den Jahren 2020 und 2021 wurden etwa 60 Stunden benötigt. Abseits des großen Zeitaufwands beim Downloaden geht auch mit den Satellitendaten selbst ein für die spätere Auswertung relevantes Problem einher: Da die Erde eine Kugel und die Erdoberfläche somit gekrümmt ist, der Satellit jedoch ein zweidimensionales Bild in Form eines 2D-Arrays erzeugt, ist dieses nicht rechteckig, sondern ebenfalls gekrümmt (Abb 5.3.1). Konkret heißt das, dass sich die Koordinaten der Messpunkte im Datenarray nicht linear zueinander verhalten. Geht man im Datenarray einen Schritt nach rechts, dann verändert sich sowohl der Breitengrad als auch der Längengrad des Messpunkts. In einem rechteckigen Datenarray würde sich bei einem Schritt nach rechts dagegen nur der Längengrad, nicht aber der Breitengrad ändern. Für den späteren Umgang mit dem Datenarray ist die rechteckige Form deutlich geeigneter, da hier eine eindimensionale Bewegung innerhalb des Datenarrays auch einer eindimensionalen geografischen Bewegung auf der Landkarte entspricht. Durch diese Eigenschaft ist das Suchen einer speziellen Koordinate in einem rechteckigen Array deutlich einfacher, sodass die nachfolgenden Programmierschritte des Darstellens und Auswertens der Ozondaten erheblich erleichtert werden. Somit erschien es als sehr sinnvoll, nach dem Herunterladen der Daten zunächst eine Umwandlung der gekrümmten Form in die rechteckige Form vorzunehmen. Bei dieser Umwandlung wird folgendermaßen vorgegangen: Zuerst werden die in der rechteckigen Darstellung gewünschten Messpunkte definiert, wobei die Auflösung in x- und y-Richtung gezielt gewählt werden kann. Dann wird für jeden Messpunkt im neuen rechteckigen Array der entsprechende Messpunkt im gekrümmten Array gesucht und der gemessene Ozonwert übertragen. Wenn der gesuchte Messpunkt im ursprünglichen gekrümmten Datenarray nicht vorhanden ist, wird der bezüglich des geografischen Abstands am nächsten liegende Punkt verwendet.

## 5.4 Suchalgorithmen

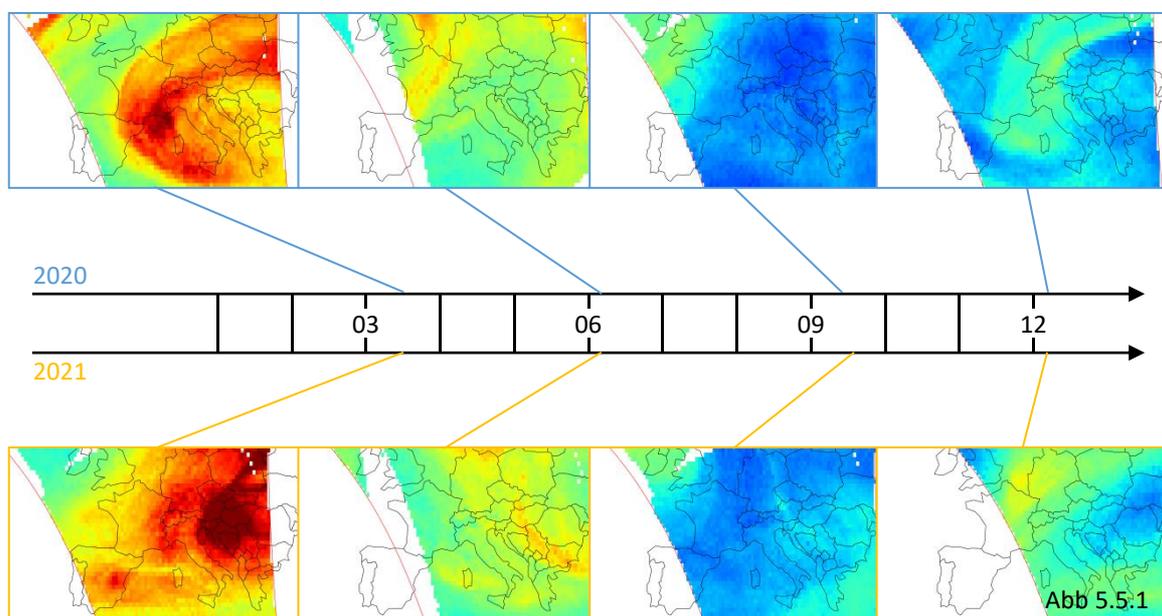
Für die Umwandlung vom gekrümmten in das rechtwinklige Array wurde folglich ein Algorithmus benötigt, der in der Lage ist, die deutlich aufwendigere Suche nach einem speziellen Messpunkt im gekrümmten Array zu bewerkstelligen. Konkret wurden zwei verschiedene Suchalgorithmen implementiert, die jeweils unterschiedlichen Ansätzen folgen und diese anschließend bezüglich ihrer Performance in Sachen Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit verglichen. Der erste Suchalgorithmus wurde als ‚Suche durch Wegbildung‘ bezeichnet, da er sich von einem Startpunkt (blau) beginnend einen Weg durch das Datenarray zum gesuchten Punkt (rot) bahnt. Der Suchalgorithmus läuft vom Startpunkt ausgehend so lange nach rechts durch die gekrümmte Reihe des Datenarrays, bis der Längengrad des gesuchten Punktes (grün) überschritten wird. Anschließend bewegt sich der Algorithmus so lange nach oben, bis der Breitengrad des vorliegenden Messpunkts größer als der des gesuchten Punktes ist. Nach dem gleichen Schema finden daraufhin auch die Bewegungen nach links und nach unten statt. Innerhalb eines solchen Zyklus ändert sich die Wegrichtung also vier Mal, sodass durch fortlaufende Annäherung und Wiederholung der gesuchte Punkt oder der diesem am nächsten liegende erreicht wird. Auch wenn dieser Algorithmus gut

Abb 5.4.1	Suche durch Wegbildung	Suche durch Vierteilung
Funktionsweise		
<b>Durchschnittswerte bei 100 Durchläufen mit verschiedenen Koordinaten</b>		
Anzahl Zyklen	8	12
Trefferquote	97%	98%
Laufzeit	0.988 s	0.013 s

funktioniert, zeigt er doch nochmals deutlich auf, wie umständlich der Umgang mit dem gekrümmten Datenarray ist. Der zweite implementierte Suchalgorithmus wird als ‚Suche durch Vierteilung‘ bezeichnet und folgt einer gänzlich anderen Idee, die die fortlaufende Vierteilung des Datensatzes als Ziel hat und so an die aus der Informatik bekannte binäre Suche erinnert. Hierbei wird das vorliegende Datenarray entsprechend seiner Dimensionen in vier gleich große Teile aufgeteilt. Anschließend wird für jeden dieser vier Teilbereiche der Mittelpunkt bestimmt. Durch eine Rechenoperation wird der geografische Abstand (blau) von den Mittelpunkten zu dem gesuchten Punkt bestimmt und der Mittelpunkt gewählt, bei dem dieser Abstand am kleinsten ist. Dieser Zyklus wird für den verbleibenden Teilbereich wiederholt, sodass bei jedem Schritt die Zahl der in Frage kommenden Punkte um 75% reduziert wird. Irgendwann entspricht der Mittelpunkt des verbleibenden Teilbereichs dem gesuchten Punkt (rot) oder dem ihm am nächsten liegenden. Zunächst ist festzuhalten, dass es mit beiden Suchalgorithmen erfolgreich gelingt, den gesuchten Punkt im gekrümmten Datenarray zu finden und dabei eine hohe Trefferquote von 97% und 98% erreicht wird. Aus der Tabelle folgt weiterhin, dass der zweite Suchalgorithmus 50% mehr Zyklen als der erste benötigt, seine Laufzeit jedoch um ein Vielfaches geringer ist. Diese Feststellung ist darauf zurückzuführen, dass ein einzelner Zyklus bei der ‚Suche durch Wegbildung‘ deutlich rechenaufwendiger ist. Nach dem Vergleich der Performance beider Algorithmen war schnell klar, dass für die geplante Umwandlung die ‚Suche durch Vierteilung‘ verwendet wird, da bei ihr die Laufzeit gering und die Trefferquote hoch ist. Nach der Umwandlung erhält man das gewünschte rechtwinklige Datenarray, in dem die Koordinaten eines gesuchten Punktes einfach berechnet werden können.

## 5.5 Auswertung der Ozonbilder

Nach dem Herunterladen, Extrahieren und Umwandeln der Daten konnten die entsprechenden Ozonbilder erzeugt werden. Die Bilder beschränken sich dabei auf den europäischen Raum, der von 20° West nach 30° Ost und von 35° Nord nach 55° Nord reicht. Messpunkte, für die der Satellit eine hohe Ozonkonzentration gemessen hat, werden rot, Messpunkte niedriger Ozonkonzentration blau dargestellt. Die absoluten Messdaten werden nicht weiter definiert, da sie für die Auswertung weniger entscheidend sind, denn es geht primär darum, allgemeine relative Zusammenhänge und Beziehungen zu erkennen. In Abb 5.5.1 werden je vier Ozonbilder aus verschiedenen Jahreszeiten der Jahre 2020 und 2021 dargestellt. Anhand dieser Ozonbilder kann man eindeutig erkennen, dass die globale troposphärische Ozonbelastung allgemeinen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Diese Schwankungen lassen sich mit Hilfe der im Modellversuch erkannten Zusammenhänge und aufgestellten Temperatur-Hypothese erklären. So scheinen die moderaten 15 bis 20°C, die im März durchaus erreicht werden, die Bildung von bodennahem Ozon im Vergleich zu den hohen Temperaturen im Sommer und geringen Temperaturen im Winter zu begünstigen. Dies erscheint umso plausibler, wenn man die in 4.5 erwähnte Hypothese berücksichtigt, dass es eine optimale Temperatur für die Ozonanreicherung gibt, die im Bereich um die 17°C liegt.

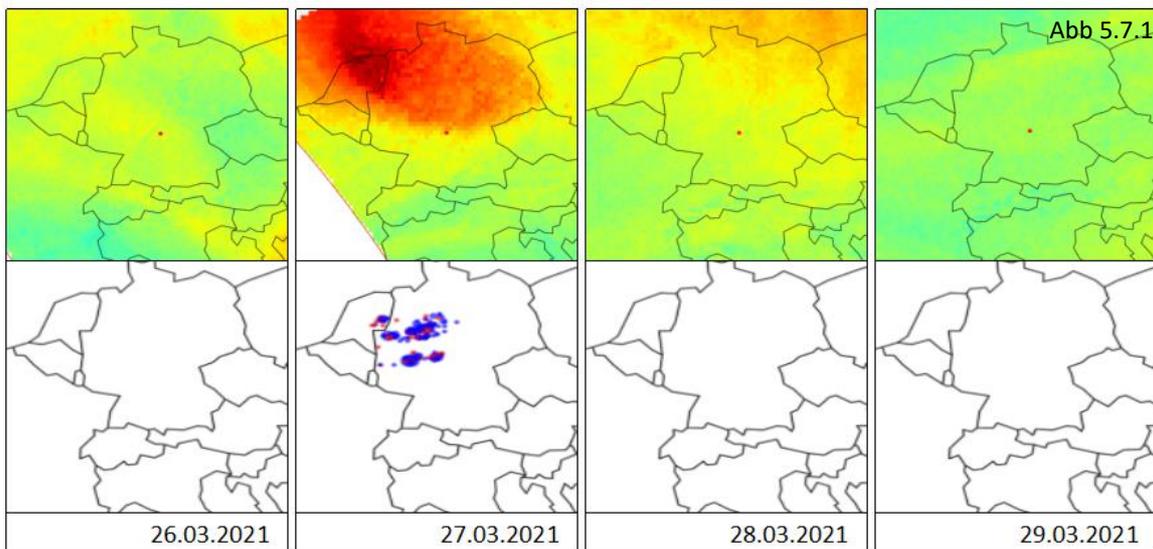


## 5.6 Blitzdaten

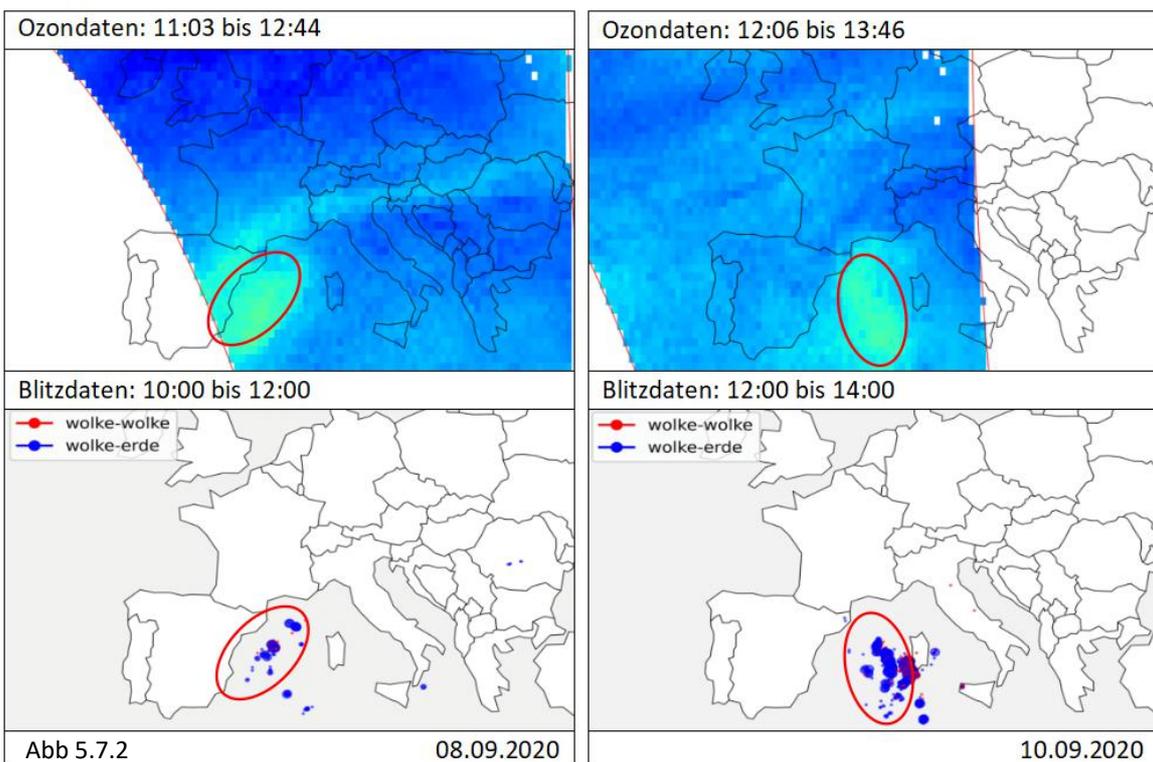
Im zweiten Teil der Auswertung der Ozondaten sollte nochmals genauer untersucht werden, inwieweit Blitze und Gewitter zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration beitragen, und ob sich der im Modellexperiment erkannte Zusammenhang auch im realen Ökosystem der Erde wiederfinden lässt. Damit ein derartiger Forschungsaspekt realisiert werden konnte, wurden Messdaten über Blitze und Gewitter benötigt, um diese mit den gemessenen Ozonwerten abzugleichen und so allgemeine Zusammenhänge zu erkennen. Problematisch war hierbei abermals die Beschaffung eines derartigen Datensatzes. So gibt es zwar zahlreiche Messsysteme, die Blitz- und Gewitterdaten aufzeichnen und abspeichern, jedoch sind die resultierenden Datensätze oft nur für einen sehr hohen Preis erhältlich. Auf Anfrage wurde uns von der Siemens AG freundlicherweise Zugang zu ihrem BLIDS (Blitz Informationsdienst von Siemens) Datensatz gewährt. BLIDS nutzt mehr als 155, über ganz Europa verteilte Messstationen. Diese können nach dem Time-of-Arrival Prinzip den Blitzeinschlag auf bis zu 50 Meter genau lokalisieren und durch das von ihm erzeugte elektromagnetische Feld auf die Stromstärke und Polarität des Blitzes zurückschließen. Da das BLIDS auch in enger Verbindung mit dem EUCLID Programm, einem internationalen europaweiten Blitzerfassungssystem, steht, war ein ziemlich großer bürokratischer und verwaltungstechnischer Aufwand notwendig, bevor uns der Zugang zu den Blitzdaten gewährt wurde. Die europaweiten Blitzdaten aus den Jahren 2019, 2020 und 2021 liegen uns somit erst seit einigen Wochen vor, sodass die Auswertung der Daten zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen werden konnte. Trotzdem ist es bereits gelungen, die Blitzdaten grafisch darzustellen und durch den Abgleich mit den Ozondaten erste interessante Zusammenhänge zwischen globalen Wetterlagen mit Blitzeinschlägen und der europaweiten Ozonbelastung zu erkennen.

## 5.7 Vergleich der Ozon- und Blitzdaten

Die Bilder der Blitz- und Ozondaten eines Tages wurden immer in einer PDF zusammengefasst, sodass der resultierende Datensatz für die Jahre 2020 und 2021 aus etwa 700 Dateien bestand. Die Auswertung dieser Daten, der Vergleich der Bilder und insbesondere die Suche nach Auffälligkeiten wurde manuell durchgeführt. Bei diesem Vorgang konnten zahlreiche Beispiele gefunden werden, bei denen eine räumlich konzentrierte hohe Blitzdichte auch eine erhöhte Ozonkonzentration in dem entsprechenden geografischen Bereich zur Folge hatte. Teilweise konnten sogar über mehrere Tage andauernde Entwicklungen beobachtet werden, bei denen Gebiete erhöhter Ozonkonzentration der Wanderung von Gewittern und Blitzgruppen folgten.

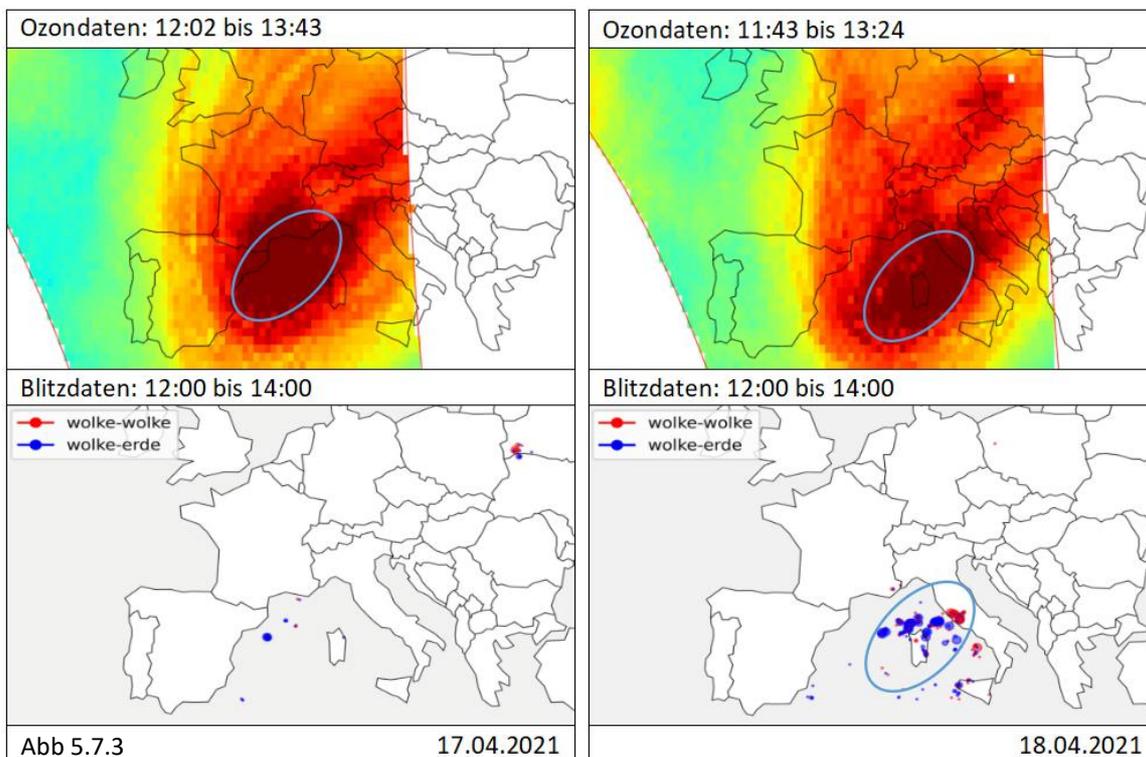


Ein erstes Anzeichen hierfür erkennt man in der in Abb 5.7.1 dargestellten Bilderreihe. So ist für den Bereich rund um Deutschland eindeutig zu beobachten, dass die Ozonkonzentration am 27.03.2021 im Vergleich zu den Tagen davor und danach gerade an den Orten erhöht ist, an denen man in der Blitzkarte vom 27.03.2021 eine Ballung lokalisieren kann. Ein weiteres konkretes Beispiel für diesen globalen Zusammenhang zwischen Blitzballungen und Orten erhöhter Ozonkonzentration wird im folgenden Bild dargestellt. So zeigt dieses die Entwicklung der Ozonkonzentration in Europa vom 08.09.2020 zum 10.09.2020 als auch die zugehörigen Blitzdaten. Bei der Betrachtung der Blitzdaten kann man eindeutig



eine Ansammlung von Blitzen identifizieren, die am 08.09.2020 noch vor der Ostküste Spaniens liegt und bis zum 10.09.2020 über das Mittelmeer zur Westküste Sardinien gewandert ist. Gleichmaßen erkennt man am 08.09.2020 ein Gebiet erhöhter Ozonwerte vor der Ostküste Spaniens, das sich bis zum 10.09.2020 ebenfalls Richtung Sardinien bewegt hat. Tatsächlich decken sich die Blitzdaten sogar sehr gut mit den Ozondaten (rote Ellipsen). Die Häufung von Blitzen scheint also die Ursache für die erhöhte Ozonkonzentration zu sein.

Doch sind es wirklich die Blitze, die für die erhöhte Ozonkonzentration auf globaler Ebene sorgen? Nach den soeben betrachteten Beispielen müsste man diese Frage sicherlich mit „Ja“ beantworten. Doch es lassen sich gleichermaßen auch Datenpaare finden, die eine derartig eindeutige Beantwortung unmöglich machen. Ein solches Beispiel wird im nächsten Bild (Abb 5.7.2) dargestellt und beschäftigt sich abermals mit dem Mittelmeerraum rund um die Insel Sardinien. Vom 17.04 zum 18.04 des Jahres 2021 erkennt man in den Ozondaten eine Entwicklung, die ganz an das Beispiel vom 08.09.2020 erinnert, denn wieder wandert ein Gebiet erhöhter Ozonkonzentration von der Ostküste Spaniens in Richtung Sardinien. Doch anders als beim Beispiel von 2020 zeichnet sich bei den Blitzdaten keine Ostwanderung ab. Stattdessen wurden am 17.04 kaum Blitze aufgezeichnet, die Ozonkonzentration ist aber trotzdem erhöht. Die Ursache dafür scheint dieses Mal eher in einer speziellen Wetterlage oder einem Hochdruckgebiet zu liegen. Die Beobachtung, dass sich am 18.04 die Blitzdaten wieder mit den Ozondaten decken, legt wiederum die Schlussfolgerung nahe, dass die nach Osten wandernde Wetterlage nicht nur die Ursache für die erhöhte Ozonkonzentration, sondern auch für die Entstehung der Blitze ist. Ist der Blitz jetzt also die Ursache (Beispiel von 2020), oder die Konsequenz (Beispiel von 2021)? Tatsächlich lässt sich keine finale Antwort auf diese Frage finden, denn die Beispiele zeigen einmal mehr, dass die Ozonkonzentration von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. Das globale Ökosystem der Erde ist schlicht zu komplex, als das man aus Blitz- und Ozondaten allgemein und universell geltende Gesetzmäßigkeiten ableiten könnte. Sinnvoller ist es dagegen festzuhalten, dass erhöhte Ozonkonzentrationen nicht zwangsläufig Blitze als Ursache haben, aber oft dort auftreten, wo Gewitter und Blitze waren oder sind.



Durch die Analyse der Satellitendaten konnte die aus dem Modellexperiment abgeleitete Vermutung, dass Blitze für eine erhöhte Ozonkonzentration sorgen, zumindest gerechtfertigt werden. Für die vollständige Bestätigung dieser Annahme sind jedoch noch weiterführende, bislang noch nicht realisierte Forschungsansätze erforderlich. Zunächst wird es darum gehen, den beschriebenen Datensatz nochmals genauer auszuwerten und die Art und Weise der Auswertung zu verbessern. Weiterhin wird es auch sinnvoll sein, neben der globalen Ebene auch lokale Zusammenhänge zu analysieren. In einem ersten Schritt könnte deshalb der Beobachtungsbereich auf lokale Gebiete wie den Mittelmeerraum um Sardinien eingeschränkt und dafür die Auflösung der Ozondaten erhöht werden. Für die Untersuchung des lokalen Zusammenhangs wäre sicherlich auch ein Abgleich der Blitzdaten mit den lokalen Messstationen des Bundesumweltamts sehr aufschlussreich.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Experimente haben gezeigt, dass Blitze einen großen Einfluss auf die Zusammensetzung der Luft haben. Abgesehen von Sauerstoff haben sich alle Konzentrationen der gemessenen Luftbestandteile nach oder während der Simulation des Blitzes verändert. Vor allem der Anstieg der Ozon- und Stickstoffdioxidwerte ist für unser Projekt eine zentrale Erkenntnis. Der Abgleich mit einem zweiten Messsensor hat diese Beobachtung bestätigt. Auch konnten die im Experiment beobachteten Phänomene überzeugend in der Realität wiedererkannt werden. Um die Aussagekraft, Genauigkeit und Allgemeingültigkeit unserer Forschung weiter zu untermauern, sollen in den kommenden Wochen die folgenden weiterführenden Schritte realisiert werden:

- Die Temperaturabhängigkeit, die in den Experimenten erkannt wurde, soll in Zukunft weiter untersucht werden. Dazu sind weitere Experimente geplant.
- Außerdem soll die Ozonentwicklung in Abhängigkeit von flüchtigen organischen Gasen genauer analysiert werden. Vor allem der Zusammenhang mit Methan ist für uns interessant.
- Ein weiteres Ziel in den nächsten Wochen ist, die Analogie zwischen unserem Modellblitz und einem Blitz in der Natur zu betrachten. Dazu sollen physikalische Größen wie Energie, Volumen und Temperatur berechnet und verglichen werden.
- Mit den durch die Experimente gewonnen Erkenntnissen werden wir anschließend die Prozesse auf globaler Ebene mit den Satellitendaten genauer anschauen. Dazu ist geplant, Ozonkarten von Europa zu erstellen, die ein möglichst großes Gebiet abdecken. Hierfür müssen verschiedene Ozonkarten des Satelliten zusammengesetzt werden. Mit den zusammengesetzten, großen Karten ist es möglich, eine Vielzahl von Gewittern mit den Ozonkonzentrationen vergleichen zu können.
- Außerdem soll die Abhängigkeit zu anderen Gasen global untersucht werden. Hierfür sollen Satellitendaten über die Stickstoffdioxidkonzentration erschlossen werden, um sie anschließend mit Ozonkarten abzugleichen.
- Darüber hinaus ist geplant, die Temperaturhypothese auch global zu erforschen. Hierzu sollen europaweite Temperaturdaten und möglicherweise auch Niederschlagsdaten in die Auswertung mit einbezogen werden. Durch den Blick auf die verschiedenen Umweltparameter erhoffen wir uns, Zusammenhänge besser zu verstehen und Erklärungen zu finden, warum die erhöhten Ozonwerte bei einzelnen Gewittern sehr stark und bei anderen nicht zu beobachten sind.

Laut Klimaforschern wie Christian Plöß-Dülmer wird die Anzahl der Gewitter mit zunehmender Erderwärmung größer. Das bedeutet, dass wir in Zukunft voraussichtlich mehr Gewitter erleben werden und mit deren Auswirkungen umgehen müssen. Ein besseres Verständnis der Blitze kann uns dabei helfen, genauere Vorhersagen zu schädlichen Gaskonzentrationen zu machen und uns vor den Folgen der Blitze schützen.

## 7. Danksagungen

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen bedanken, die uns bei unserer Jugend-forscht Arbeit unterstützt haben. Zuerst möchten wir Herr Wolff danken, der uns in unserer Projektwahl beraten hat. Auch gilt Herr Poppe ein Dank, da er uns entsprechende Sicherheitseinweisungen und Gerätebedienungen erklärt hat. Ebenfalls möchten wir uns bei der Siemens AG, die uns die Blitzdaten zur Verfügung gestellt hat, und bei Frau Huntrieser, Forscherin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrtinstitut für Physik, für die Bereitstellung bisheriger wissenschaftlichen Arbeiten zu Stickoxiden und Ozon in Bodennähe und Troposphäre, bedanken.

Ein besonderer Dank gilt dem Jugend-forscht Sponsorpool, der uns durch die finanzielle Unterstützung das Arbeiten mit dem air-Q überhaupt erst möglich gemacht hat.

## 8. Quellen

Alle hier aufgelisteten Quellen wurden am 15.01.2022 erneut aufgerufen und bezüglich ihres Inhalts kontrolliert.

### Bundesumweltamt:

- <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-ozon#gesundheitsrisiken-von-ozon-und-hoher-lufttemperatur>
- <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechen-boden-land-oekosysteme/land-oekosysteme/ozon-einhaltung-von-zielwerten-schutz-der-pflanzen>
- <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftdaten/stationen/eJzrXpScv9B4UXHyQpNFKYmrjAyMjHQNDHUNjReVZC4CknmpCxYVlyxYkLoVgSXNTAD8kPykVUnJ05YIFvFtig3uWlxTmLJaQfPVfNeNcodX5yTI37aQeWci8Mni9kACocrug==>

### Lichtbogen und Blitz:

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtbogen>
- <https://blog.perfectwelding.fronius.com/wie-funktioniert-lichtbogenschweissen/>
- <https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/usa-blitz-laenge-rekord-101.html>
- [https://www.dehn.de/dehn\\_custom/blitz/faq/faq\\_top8.html](https://www.dehn.de/dehn_custom/blitz/faq/faq_top8.html)
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Blitz#L%C3%A4nge\\_eines\\_Blitzes](https://de.wikipedia.org/wiki/Blitz#L%C3%A4nge_eines_Blitzes)
- [https://www.unwetter.de/pages/gewitter\\_blitze2.php](https://www.unwetter.de/pages/gewitter_blitze2.php)

### Atmosphärische Gase:

- [https://mpimet.mpg.de/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/sc\\_20130226.pdf](https://mpimet.mpg.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/sc_20130226.pdf)
- <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02710-5>

### Ozon:

- [https://www.dlr.de/content/de/downloads/news-archiv/2012/20120531\\_wie-stark-sind-gewitter-fuer-ozonbildung-verantwortlich-3700.pdf?blob=publicationFile&v=15](https://www.dlr.de/content/de/downloads/news-archiv/2012/20120531_wie-stark-sind-gewitter-fuer-ozonbildung-verantwortlich-3700.pdf?blob=publicationFile&v=15)
- <https://www.tessloff.com/was-ist-was/wissenschaft/wetter/warum-riecht-die-luft-bei-gewitter-so-komisch.html>
- [https://www.wetter.com/news/das-ozon-in-bodennaehel\\_aid\\_57c93d7ccebfc0e42a8b4582.html](https://www.wetter.com/news/das-ozon-in-bodennaehel_aid_57c93d7ccebfc0e42a8b4582.html)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Mesomerie>
- <https://www.chemie.de/lexikon/Oxidation.html>
- <https://www.hydrogroup.de/einsatzbereiche/wasseraufbereitung/ozonung.html>

### Meteorologie:

- <https://www.sueddeutsche.de/wissen/meteorologie-hochspannung-1.3577556>

### Stickoxide:

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Stickoxide>

### Air-Q Website, Übersicht Messwerte

- <https://www.air-q.com/messwerte>
- <https://www.air-q.com/messwerte/voc>

- <https://www.air-q.com/messwerte/feinstaub>
- <https://www.air-q.com/messwerte/stickstoffdioxid>
- <https://www.air-q.com/messwerte/ozon>
- <https://www.air-q.com/messwerte/schwefeldioxid>

Saurer Regen:

- [https://de.wikipedia.org/wiki/Saurer\\_Regen](https://de.wikipedia.org/wiki/Saurer_Regen)

Bundesamt für Strahlenschutz:

- [https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/einfuehrung/einfuehrung_node.html)

Gewitter und Klimawandel:

- <https://weather.com/de-DE/wetter/deutschland/news/2021-06-30-wetterforscher-sind-sich-sicher-gewitter-werden-heftiger-und>

Sentinel-5P:

- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Readme-OFFL-Total-Ozone.pdf>
- [https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-5p\\_factsheet\\_171211.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-5p_factsheet_171211.pdf)
- [https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset\\_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-ozone](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/data-products/-/asset_publisher/fp37fc19FN8F/content/sentinel-5-precursor-level-2-ozone)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahlung>
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Sentinel-5P>

Jupyter-Notebook:

- [https://de.wikipedia.org/wiki/Project\\_Jupyter](https://de.wikipedia.org/wiki/Project_Jupyter)
- <https://jupyter.org/>