

Emissionsspektroskopie mit Funken- und Lichtbogenanregung

Versuche mit dem DADOS Spektrografen
und einfachen Behelfsmitteln

Richard Walker

Version 2.0 August 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Anregung von Emissionsspektren.....	4
3	Versuche mit Funkenanregung	5
4	Versuche mit Lichtbogenanregung.....	24
5	Der Link zwischen stellaren- und Laborspektren	28
6	Anhang.....	31
7	Literatur und Internet	33

1 Einleitung

Dass auch Amateurastronomen mit sehr einfachen Mitteln „Laborspektren“ erzeugen können, dürfte in unseren Kreisen noch wenig bekannt sein. Diese Schrift soll einfache Möglichkeiten aufzeigen, wie sich mit dem vorhandenen Spektrografen, sowie simplen elektronischen und mechanischen Bauteilen aus Elektronikversand und Baumarkt, chemische Elemente in bestimmten Materialien, Flüssigkeiten und Gasen nachweisen lassen.

Die hier vorgestellten, stark vereinfachten Verfahren, lassen selbstverständlich keine eigentliche „Analytische Chemie“ zu. Qualitativ lassen sich aber für viele Substanzen die Hauptanteile an Elementen/Molekülen darstellen. Dazu wird das Grundprinzip der Optischen Emissionsspektroskopie (OES) angewendet, welches heute in professioneller Form in handelsüblichen, chemischen Analysegeräten eingesetzt wird. Dabei wird eine Probe so angeregt, dass sie ein spektroskopisch auswertbares Plasma absondert. Der Wellenlängenbereich reicht bei professionellen Anwendungen meist von ca. 2'000 – 10'000 Å. Mit einfachen Amateurmitteln lassen sich, analog zur Astrospektroskopie, ca. 3800 – 8000 Å abdecken.

Meine persönliche Motivation war der Nachvollzug des Links zwischen den stellaren- und den Laborspektren – quasi auf den „Spuren“ von Fraunhofer, Bunsen- und Kirchhoff. Sollten Amateure motiviert werden, eigene Versuche durchzuführen, wäre der Zweck dieser Schrift bereits erfüllt!

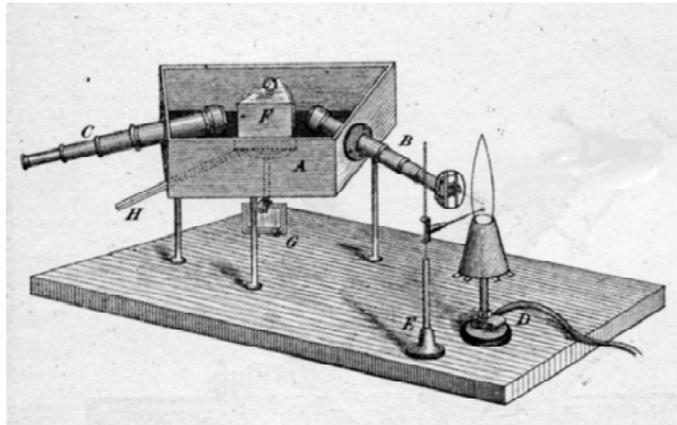
Besten Dank an Urs Flükiger, der mich mit metallurgischem Know-how unterstützt und die Lichtbogenversuchen in Kapitel 4 mit Schweiss Equipment und Mitarbeitern seines Betriebes [62] ermöglicht hat.

2 Anregung von Emissionsspektren

Emissionslinien können nicht nur in Sternatmosphären und Gasentladungslampen, sondern auch unter der Einwirkung von Flammen, elektrischen Funken und Lichtbögen erzeugt werden. Im Folgenden werden diese drei Prinzipien vorgestellt, welche behelfsmässig sehr einfach umzusetzen sind. Im professionellen Bereich existieren zahlreiche weitere Verfahren. Jede dieser Methoden eignet sich spezifisch für bestimmte Probenotypen.

2.1 Flammenanregung

Dies ist sicher die älteste und einfachste Form. Allgemein bekannt ist der in Labors allgegenwärtige Bunsenbrenner. Weiter auch die Tatsache, dass Kochsalz, in die Flamme gestreut, die typisch gelbe Emission der Natrium Doppellinie D_1 , D_2 erzeugt. Weiter können so auch viele Gase analysiert werden. Der intensive Abbrand von Kohlenwasserstoffgasen, z.B. Butan, erzeugt direkt die Emission der berühmten molekularen *Swan Bänder* (C_2), wie in [13] gezeigt wird. Die Nachteile dieses Verfahrens bestehen in der relativ geringen Anregungsenergie, der latenten Brandgefahr, sowie der Beschädigung oder gar Zerstörung des Probenmaterials. Abb. rechts stammt aus [20].



2.2 Funkenanregung

Dieses ebenfalls sehr alte Verfahren wurde auch bereits von Bunsen und Kirchhoff angewandt [20]. Ein elektrischer Funke erzeugt ein Plasma aus einem winzigen Anteil „verdampften“ Elektrodenmaterials, sowie des durchschlagenen Gasgemisches zwischen den Elektroden. Dabei werden Temperaturen von ca. 4000 – bis 5000 K erreicht, entsprechend etwa den stellaren Atmosphären der Spektralklasse K. Diese Anregungsenergie genügt auch zur zerstörungsfreien Analyse von Metallen/Legierungen. Behelfsmässig durchgeführt, mit piezoelektrischen Funkengebern oder Funkeninduktoren, ist dies ein relativ ungefährliches Verfahren.

In aktuellen, handelsüblichen Analysegeräten erfolgt die „Befunkung“ des Probenmaterials meistens unter einer inerten Argon Atmosphäre. Bild: portables Analysegerät mit Pistolengriff (Bild: *Angstrom Inc*). Die Elektroden bestehen zum Teil aus sog. „spektralreiner“ Kohle, um möglichst wenig unerwünschte Eigenlinien ins Spektrum abzugeben.



2.3 Lichtbogen Anregung

Etwas empfindlicher, aber auch aufwendiger, ist die Anregung von Spektren mit Lichtbögen. Zudem ist hier eine Beeinträchtigung oder der „Verbrauch“ des Probenmaterials ein Thema. Hier werden zum Teil Kohlen- oder Wolframelektroden verwendet und Temperaturen zwischen 3000 – 4000 K erreicht, wie sie in den stellaren Atmosphären der späten K- und der gesamten M-Klasse vorkommen.

3 Versuche mit Funkenanregung

3.1 Geräte

Das einfachste und billigste Mittel für erste Versuche ist sicher ein Piezo Zündelement, welches im Elektronikhandel erhältlich ist. Bei meinem Versuchsaufbau ist das „SUPI V01“, bezogen bei *Conrad Electronics*, im Einsatz (Ersatzteil für Gasgrill Anzünder). Es erzeugt pro Knopfdruck einen Spannungsschoss von ca. 15 kV, was eine Funkenlänge von >1 cm ermöglicht.

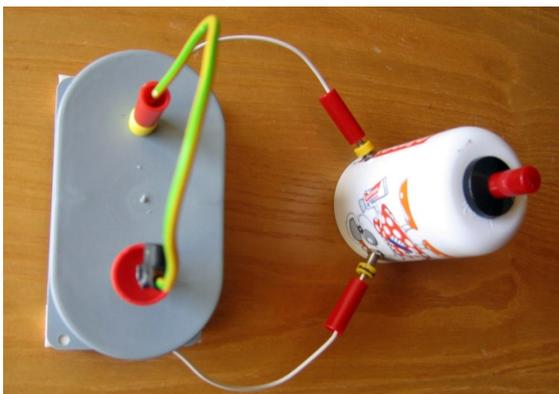


Hier eingebaut in einen Kunststoff Zahnbecher ist es wichtig, die beiden Drähte in genügendem Abstand zu verlegen, um einen unerwünschten Funkenüberschlag zu vermeiden. Um den Geräuschpegel bei der Funkenauslösung zu dämpfen, kann der obere Teil des Bechers z.B. mit Schaumstoff ausgestopft werden.



Die Funkenstrecke ist hier auf dem Boden einer umgedrehten Kunststoff „Zweierdose“ für Elektroinstallationen aufgebaut. Das Ganze wird über Steckverbindungen zusammengesetzt um möglichst universell einsetzbar zu bleiben. Die obere Elektrode besteht aus einem kurzen Stück Graphit Bleistiftmine, welches mit einer Lüsterklemme an einem dicken, steifen, aber doch noch formbaren Kupferdraht befestigt wird. Graphit ist natürlich nur ein unvollkommener Elektrodenersatz für sog. „spektralreine“ Kohle. Relativ „sanfte“, molekulare C_2 Swanbänder sind aber jedenfalls schmalbandigen, atomaren Fe / Emissionslinien vorzuziehen, die beispielsweise ein Eisennagel erzeugen würde!

Die untere Elektrode besteht aus der Probenhalterung. Für die Aufnahme der unterschiedlichen Arten und Formen der Proben habe ich einen ganzen Satz unterschiedlicher Versionen nach Manier der „Kosmos Experimentierkästen“ erstellt (Zitat Urs Flükiger). Im Bild rechts ist ein behelfsmässiger Behälter für Schüttgut oder Flüssigkeiten zu sehen (z.B. Salz).





Wer umfangreichere Versuche plant, wird wohl besser einen Funkeninduktor einsetzen. Dieser kann z.B. mit Hilfe einer Fahrzeugzündspule und einer einfachen Zusatzelektronik erstellt werden, welche heute den knatternden „Wagnerschen Hammer“ ersetzt. Entsprechende Anleitungen sind unter diesen Stichworten zahlreich im Internet zu finden.

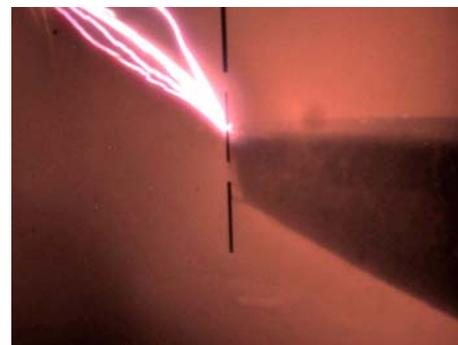
3.2 Aufbau und Durchführung des Versuches

Der DADOS Spektrograf mit CCD Kamera ist auf einem Stativ befestigt. Zwingend erforderlich ist eine Vorsatzoptik, welche ein scharfes Bild der Probe auf dem Spaltblech erzeugt. Bei mir ist dazu ein altes VIVITAR Teleobjektiv mit Makrozoom und Gewindeanschluss im Einsatz. Diese Anforderung könnte aber auch mit einer einfachen Vorsatzlinse geeigneter Brennweite erfüllt werden. Die Spektren werden hier mit einer monochromen Meade DSI III Pro Kamera aufgezeichnet. Die Linienidentifikation erfolgte mit Hilfe der aufgeführten Literatur, dem *elements* oder *lineident* Tool der *Vspec* Software [52], oder der *NIST Atomic Spectra Database* [31].



Logischerweise wird während der Funkenentladung derjenige Teil des entstehenden Plasmas aufgenommen, der sich gerade auf dem Spaltblech befindet. Daher sollte der Auftreffpunkt des Funkens auf der Probe möglichst exakt auf dem Spalt zentriert werden. Bevorzugte Einschlagspunkte sind Spitzen, Ecken oder Kanten.

Dass dieses Vorgehen obligatorisch ist, zeigt ein einfacher Versuch. Wird direkt die obere Graphit Elektrode angepeilt, erhält man ein Spektrum mit molekularen C_2 Swan Emissionsbanden, wie sie für Kohlenstoffverbindungen typisch sind (Tafel 1). Zentriert auf die Mitte des Funkenüberschlags zwischen den beiden Elektroden, ergibt das charakteristische Spektrum eines Blitzschlages, mit Linien der ionisierten Luftbestandteile, d.h. vor allem $O II$ und $N II$ (Tafel 2). Fokussiert auf die Probe erscheint deren Emissionsspektrum, ev. überlagert mit dem Luftspektrum des Funkens, weil der Versuch hier ohne Argon oder anderen Schutzgasen durchgeführt wird. In diesem Fall muss vorgängig das Funken-



spektrum der Luft aufgenommen und dieses dann zusammen mit dem Probenspektrum dargestellt werden. So wird sofort ersichtlich, welche Emissionen von der Probe und welche von den Luftmolekülen stammen. Sollte dabei nur das Funkenspektrum sichtbar sein, ist in den meisten Fällen der Einschlagsort des Funkens zuwenig exakt auf dem Spektrographenspalt abgebildet worden. Daher lohnt es sich, mehrere Aufnahmen mit leicht verschobenem Blickwinkel aufzunehmen. Der Funke sollte schräg von der Seite auf die Probe schlagen und nicht in Spaltrichtung verlaufen – etwa so, wie es auf obiger Aufnahme abgebildet ist.

Für das 200L Gitter haben sich in abgedunkelter Umgebung Belichtungszeiten im Rahmen von ca. 15 Sekunden bewährt. In dieser Zeit wurde der Funke etwa 10x ausgelöst. Beim 900L Gitter waren ca. 30 Sekunden, kombiniert mit etwa 20 – 30 Funkenauslösungen erforderlich. Hier sind eigene Versuche unumgänglich. Wer der Knallerei mit der manuellen Funkenauslösung überdrüssig wird, sollte bald auf einen Funkeninduktor umsteigen. Computerbildschirme müssen während den Aufnahmen ausgeschaltet oder weggedreht werden, da sie selbst relativ intensive Emissionslinien erzeugen.

Die folgenden Versuche wurden mit elektrisch leitenden Proben durchgeführt, welche direkt als Elektroden dienen. Nichtleitende Materialien müssen zuerst entsprechend aufbereitet werden. In der Literatur wird u.a. das Bestreichen der Oberfläche mit Graphitpulver u.ä. empfohlen. Für Flüssigkeiten schlägt z.B. [21] die Tränkung von Kohletabletten aus der Apotheke vor.

3.3 Ergebnisse

Tafel 1:

Tafel 1 zeigt das Spektrum der Graphit Elektrode, d.h. die typischen *Swan Bänder*, wie sie z.B. auch Kometen und Kohlenstoffsterne erzeugen [13]. Überlagert ist das Funkenspektrum der Luft zu sehen, welches hier aus Emissionen ionisierten Sauerstoffs (*O II*), - Stickstoffs (*N II*) und der Wasserstofflinie *H α* besteht. Die kräftige Natrium Emission (Fraunhofer *D1* und *D2*) ist, infolge der geringen notwendigen Anregungsenergie, bei den meisten Materialspektren als dominantes Nebenprodukt oder „Verunreinigung“ zu sehen. Dies ist bereits Bunsen und Kirchhoff aufgefallen – hier Auszüge aus [20]:

...Von allen Spectralreactionen ist die des Natriums am empfindlichsten. Die gelbe Linie Na, die einzige, welche das Natriumspectrum aufzuweisen hat, fällt mit der Fraunhofer'schen Linie D zusammen und zeichnet sich durch ihre besonders scharfe Begrenzung und ihre ausserordentliche Helligkeit aus. Ist die Flammentemperatur sehr hoch und die Menge der angewandten Substanz sehr gross, so zeigen sich in den nächsten Umgebungen der Linie Spuren eines continuirlichen Spectrums. Schon an sich sehr schwache, in ihre Nähe fallende Linien anderer Stoffe erscheinen dann noch mehr geschwächt und werden daher nicht selten erst sichtbar, wenn die Natriumreaction zu erlöschen beginnt...

...Schon Swan hat auf die Kleinheit der Kochsalzmengen aufmerksam gemacht, welche die Natriumlinie noch deutlich hervorbringen können. Folgender Versuch zeigt, dass die Chemie keine einzige Reaction aufzuweisen hat, welche sich auch nur im Entferntesten mit dieser spectralanalytischen Bestimmung des Natriums an Empfindlichkeit vergleichen liesse. Wir verpufften in einer vom Standorte unseres Apparates möglichst entlegenen Ecke des Beobachtungszimmers, welches ungefähr 60 Kubikmeter Luft fasst, 3 Milligramm chlorsaures Natron mit Milchzucker, während die nicht leuchtende Lampe vor dem Spalt beobachtet wurde. Schon nach wenigen Minuten gab die allmählig sich fahlgelblich färbende Flamme eine starke Natriumlinie, welche erst nach 10 Minuten wieder völlig verschwunden war...

In etwas geringerem Ausmass als beim Natrium treten auch Kalziumlinien (*Ca I und Ca II*) häufig als Nebenlinien in Materialspektren in Erscheinung.

Spektrum Graphit Elektrode + Luft DADOS 200L/mm

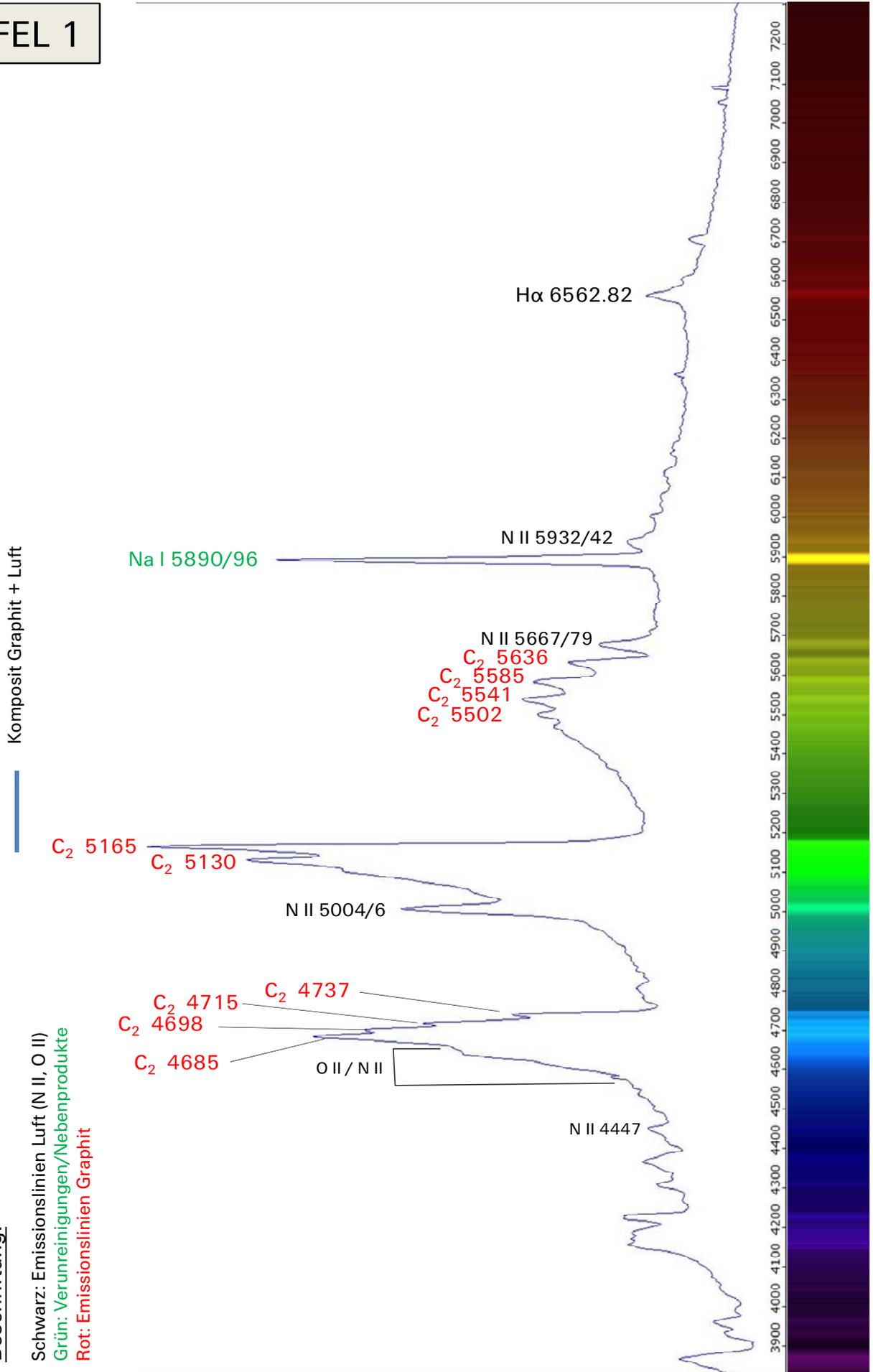
TAFEL 1

Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien Graphit



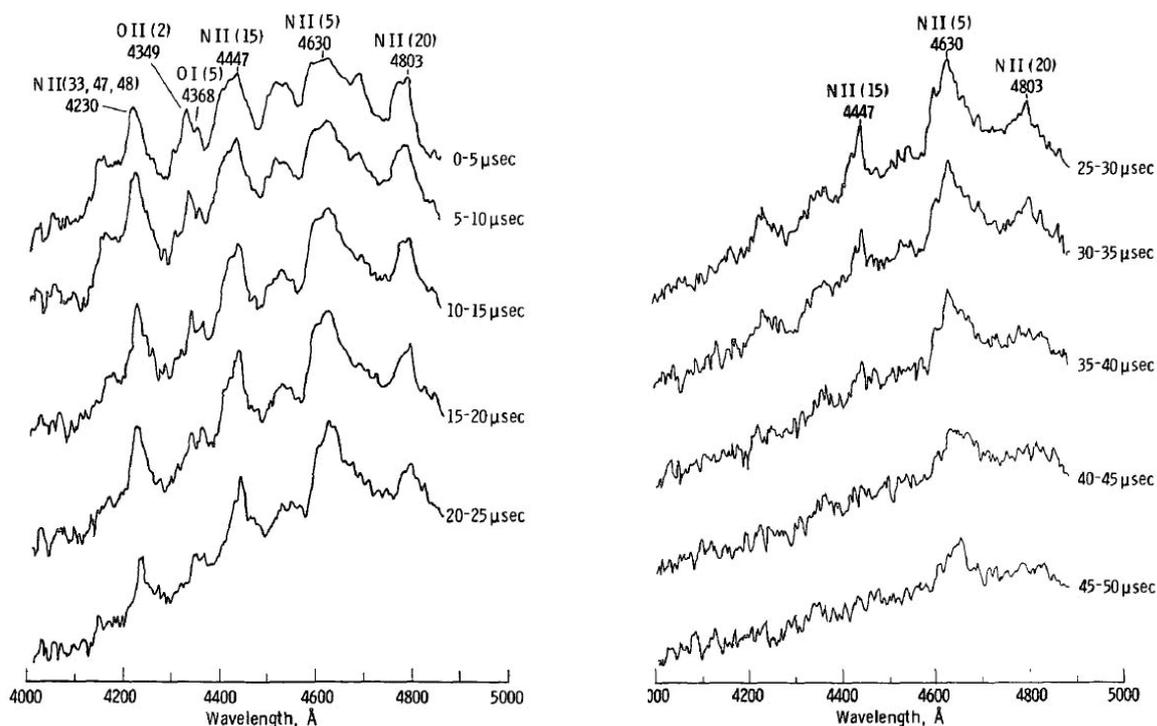
Tafel 2:

Tafel 2 zeigt das Funkenspektrum der Luft, aufgenommen ca. in der Mitte zwischen zwei Graphit Elektroden. Hier sind nur noch Emissionslinien der Luft und keine Reste von C_2 Swan Bändern oder anderen Kohlenstoffmolekülen mehr nachweisbar.

Dieses Profil zeigt markante Ähnlichkeiten mit einem Blitzspektrum (siehe Tafel 2a), welches von den Emissionen einfach ionisierten Stickstoffs ($N II$) und Sauerstoffs ($O II$) dominiert wird. Die intensivsten Linien sind ursächlich für die bläulich weisse Farbe des Blitzes/Funkens. Lediglich die in Blitzspektren zu beobachtenden, intensiven Wasserstoffemissionen treten bei diesem Versuchsaufbau nur schwach in Erscheinung. Interessanterweise sind sie aber bei den meisten Materialspektren mehr oder weniger intensiv erkennbar, auch wenn in den Proben selbst kaum Wasserstoff vorhanden ist.

Tafel 2a:

Tafel 2a zeigt ein Blitzspektrum, welches via Wolkenreflexion aufgezeichnet wurde. Das C8 Teleskop wurde nachts mit DADOS und Atik314L+ im Wohnzimmer aufgebaut und zielte durch das geschlossene Fenster auf das aufziehende Gewitter. Ausgewertet wurden drei Aufnahmen à 180 Sekunden im 2x2 Binning Modus. Pro Aufnahme konnte so das Licht von ca. 5-10 Blitzschlägen "aufintegriert" werden. Da die Wolkenbasis tief lag, musste auf sämtlichen Aufnahmen die Lichtverschmutzung subtrahiert werden. Auffällig die intensive CN Emission bei ca. 3900Å. Bereits seit dem Beginn der Spektroskopie im 19. Jahrhundert wurde versucht, Spektren von Blitzentladungen zu gewinnen. Dazu gehörten zum Beginn des 20. Jahrhunderts auch bekannte Astronomen wie Pickering und Slipher. Die Blitzforschung interessiert heute vor allem der zeitliche Intensitätsverlauf der einzelnen Emissionslinien während eines Blitzschlages. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die physikalischen Prozesse, welche während den einzelnen Phasen dieses Phänomens aktiv sind. Die folgenden Diagramme aus [15], aufgenommen mit Highspeed-Kameras, zeigen den zeitlichen Intensitätsverlauf eines Blitzspektrums von 0 – 50 μ sec, im Bereich von 4000 – 5000 Å.

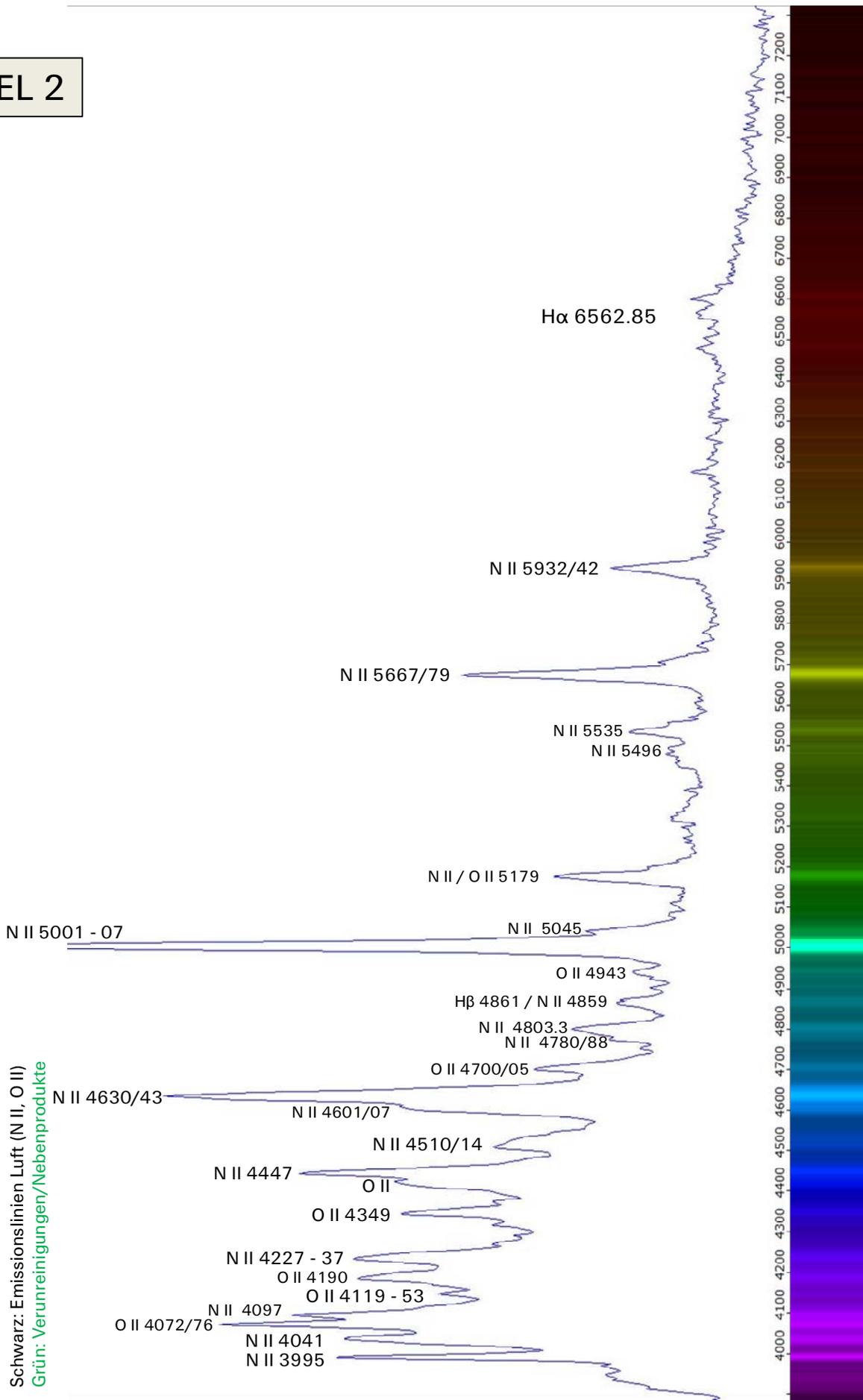


TAFEL 2

Funkenspektrum Luft DADOS 200L/mm

Beschriftung:

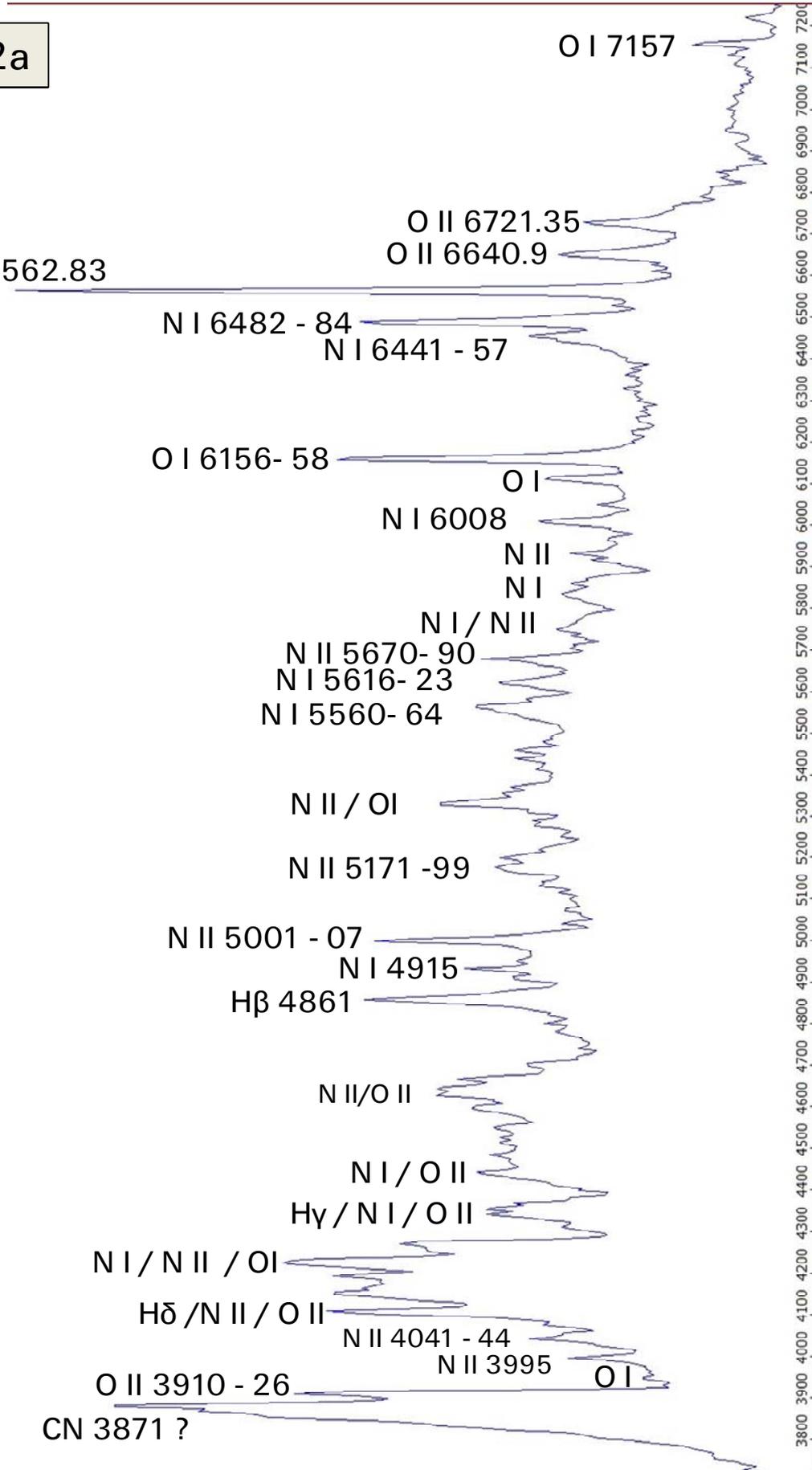
Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
 Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte



Blitzschlag Wolkenreflexion

TAFEL 2a

C8, DADOS: Gitter 200L mm⁻¹, 25μ Spalt 4.8.2012
 Atik 314L+ -2°C, 3x180s, 2x2 Binning (ca. 30 Blitzschläge)



Tafel 3 bis 7:

Die *Tafeln 3 bis 7* zeigen das Spektrum von *C15E* Stahl/Werkstoffnummer 1.1141 (nachfolgend *C15 E* genannt). Chemische Beimengungen in [%] gemäss [62]:

C	Kohlenstoff:	0.12 – 0.18
Si	Silizium:	max. 0.40
Mn	Mangan:	0.30 – 0.60
P	Phosphor:	max. 0.035
S	Schwefel:	max. 0.035

Neben dem Hauptbestandteil *Fe* ist in den höher aufgelösten Spektren nur noch *Mn* (0.4%) nachweisbar. Die zahlreichen *Fe*-Linien könnten theoretisch auch zur Eichung eines Spektrums benutzt werden. Da gibt es allerdings elegantere Möglichkeiten, als jedesmal den Funkeninduktor anzuwerfen. Die Profile sind unnormierte/unkorrigierte Pseudokontinua.

Tafel 3: Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum *C15E* Stahl + Funkenspektrum der Luft.

Tafel 4: 900L Komposit Spektrum im Bereich 3900 – 4800 Å von *C15E* Stahl + Funkenspektrum der Luft (blaues Profil). Siehe auch *Tafel 20*, wo dieses Spektrum mit demjenigen der Sonne verglichen wird. Das hier überlagert dargestellte, rote Profil zeigt zusätzlich das „isoliert“ aufgenommene Luftspektrum ohne Eisenlinien.

Tafel 4a: *C15E* Stahl Spektrum von *Tafel 4* nach der Subtraktion des Luftspektrums. Trotzdem sind hier noch abgeschwächt Luftlinien zu sehen. Die Eisenlinien treten hier aber deutlicher hervor (Subtraktion mit der Vspec Funktion „*Subtract Profile by a Profile*“).

Tafel 5: dito *Tafel 4*, hier im Bereich 4650 – 5550 Å

Tafel 6: dito *Tafel 4*, hier im Bereich 5550 – 6450 Å und ohne „isoliert“ aufgenommenes Luftspektrum, da hier fast keine *Fe* / Linien zu sehen sind.

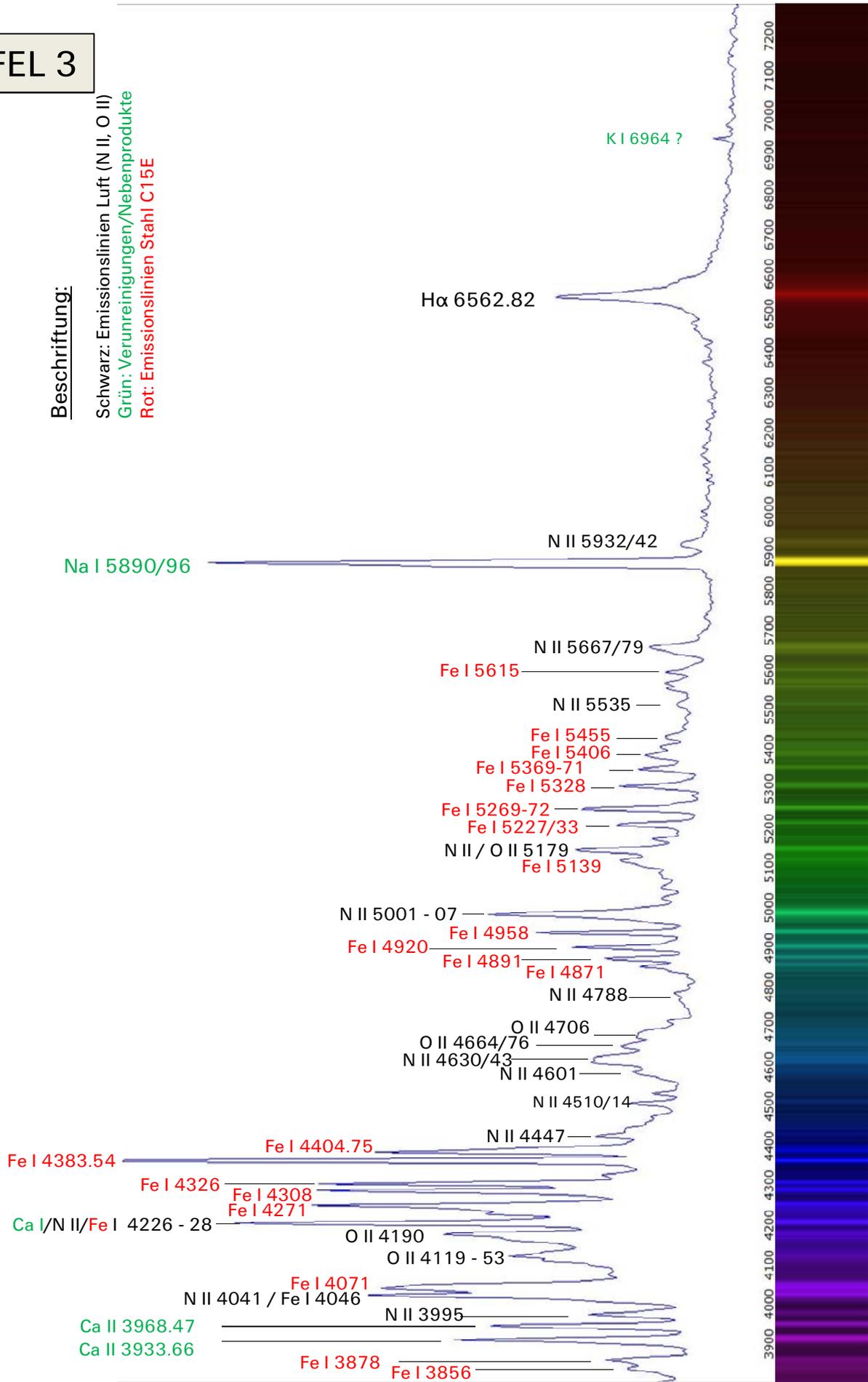
Tafel 7: dito *Tafel 6*, hier im Bereich 6450 – 7400 Å

TAFEL 3

Komposit Funkenpektrum C15E Stahl + Luft DADOS 200L/mm

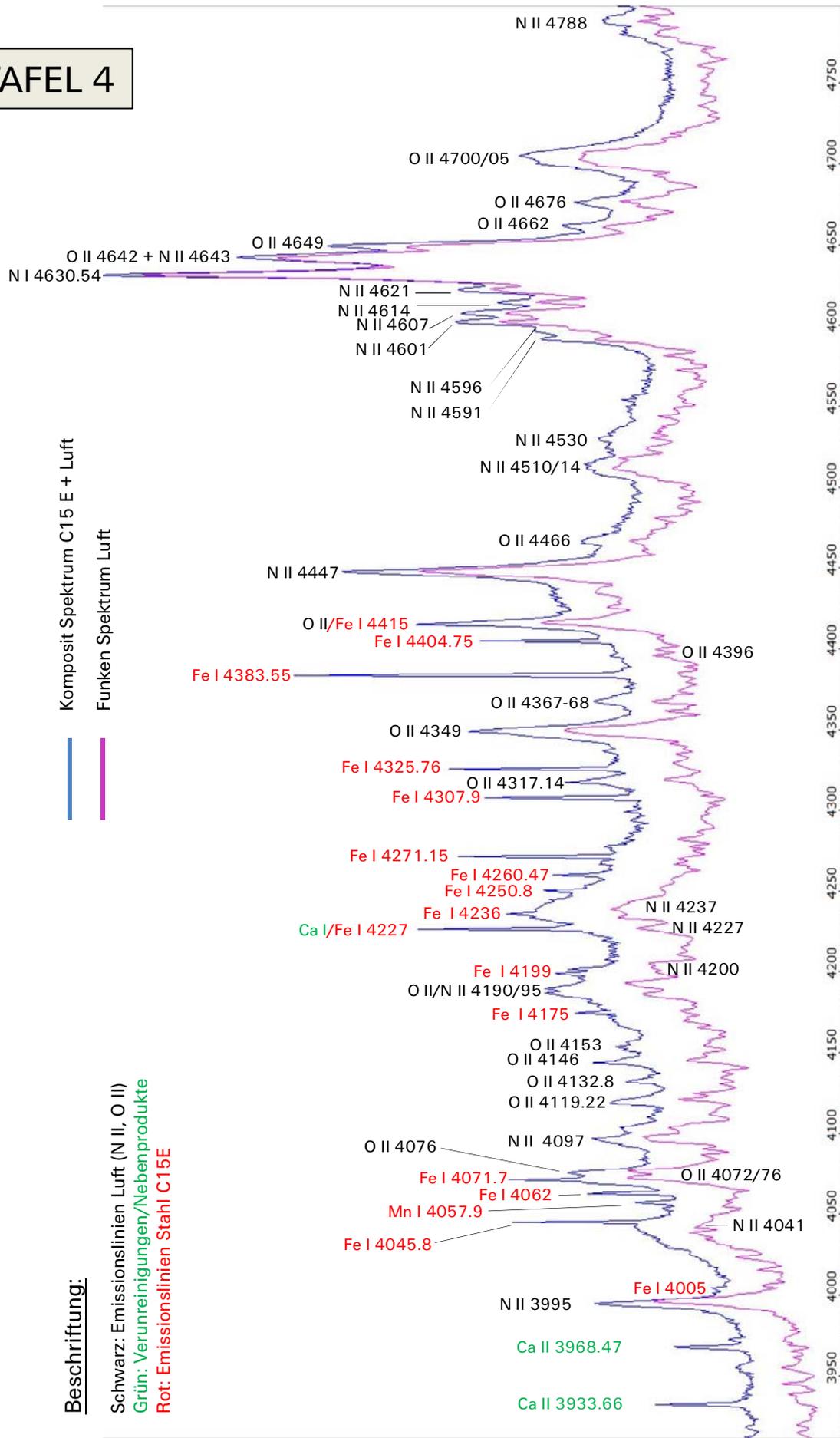
Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
 Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte
 Rot: Emissionslinien Stahl C15E



TAFEL 4

Komposit Funkenspektrum C15E-Stahl + Luft DADOS 900L/mm



Beschriftung:

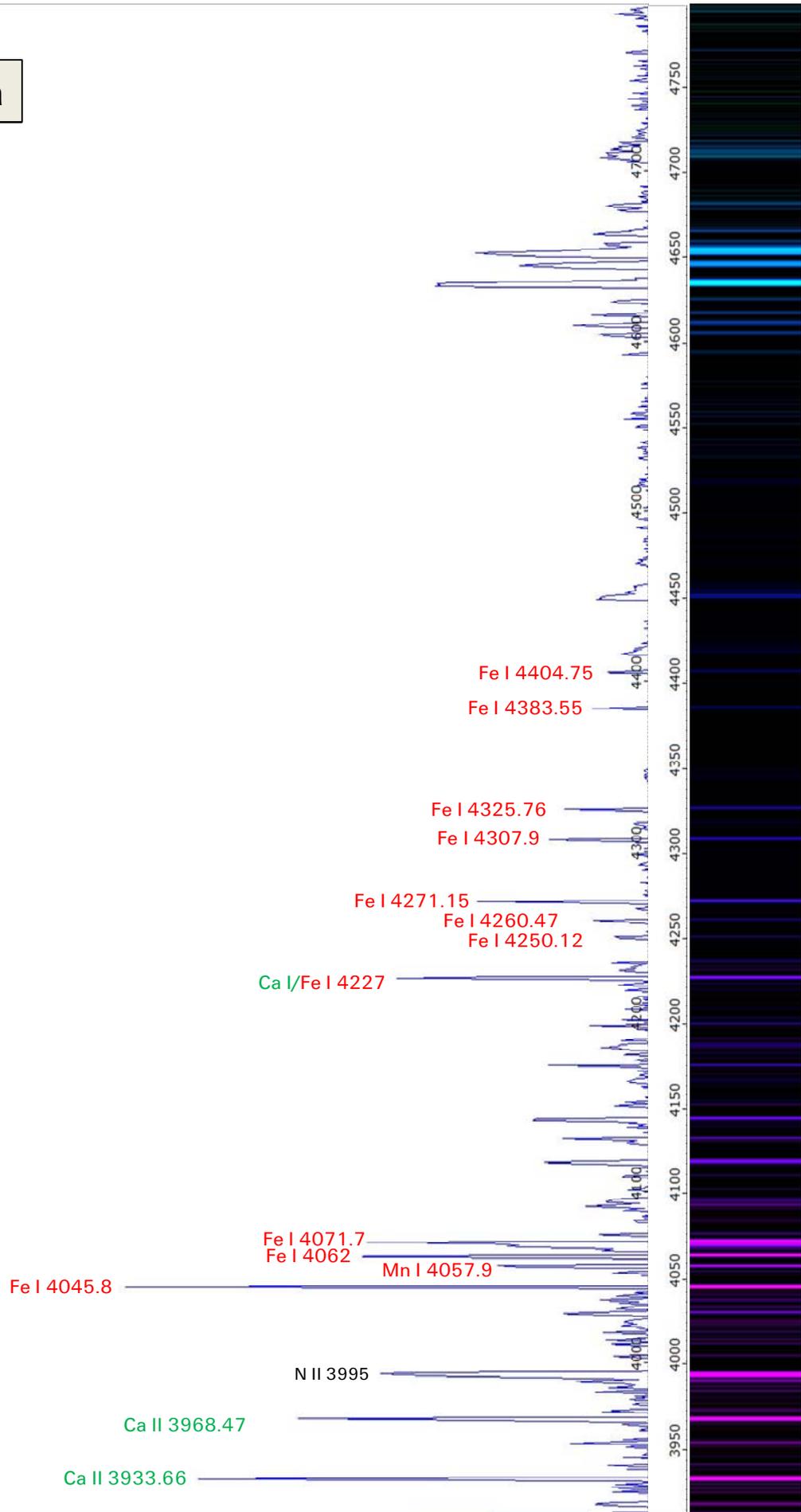
Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien Stahl C15E

TAFEL 4a

Subtrahiertes Funkenspektrum C15E-Stahl DADOS 900L/mm



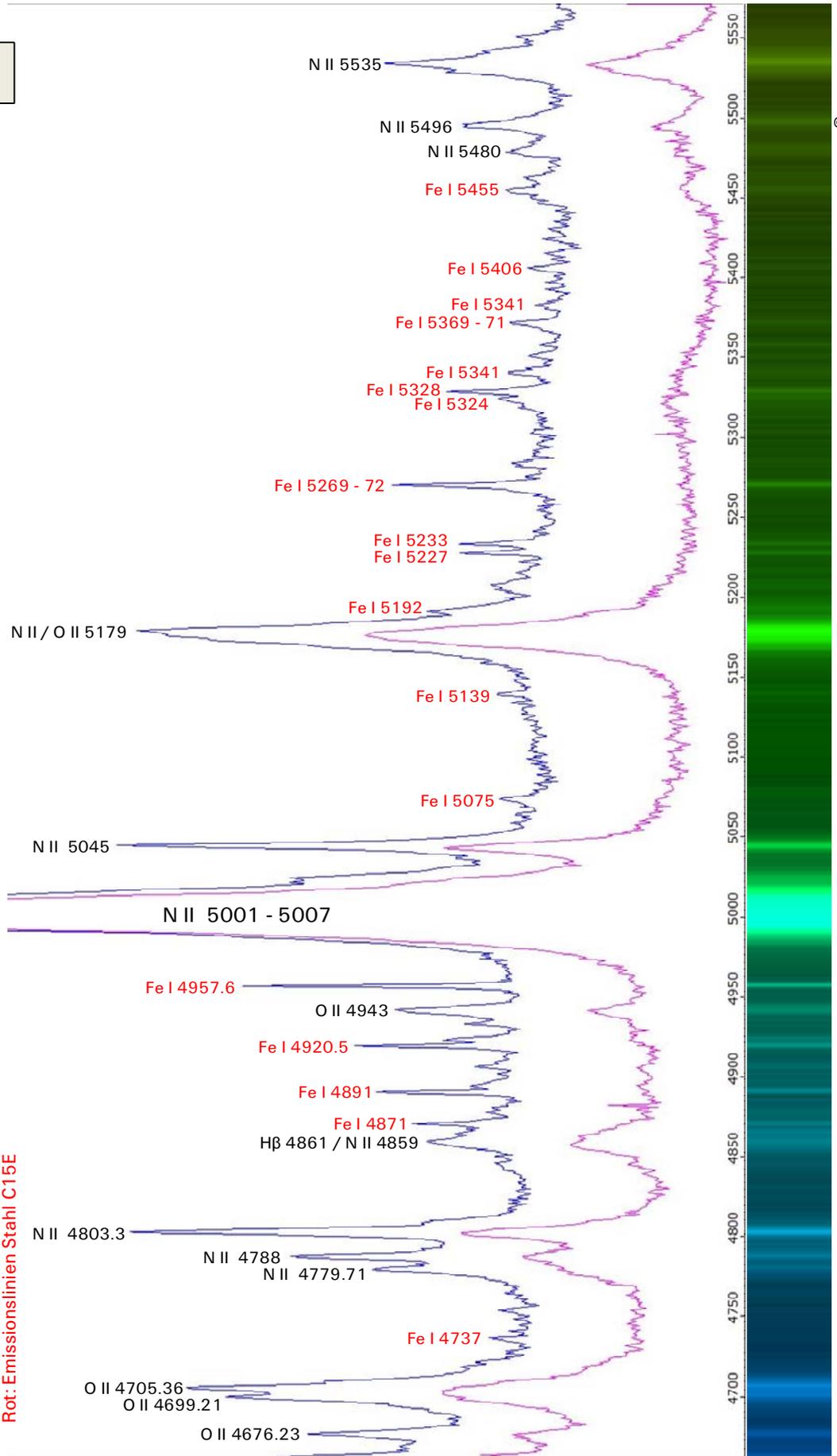
TAFEL 5

Komposit Funkenspektrum C15E-Stahl + Luft DADOS 900L/mm

Beschriftung:

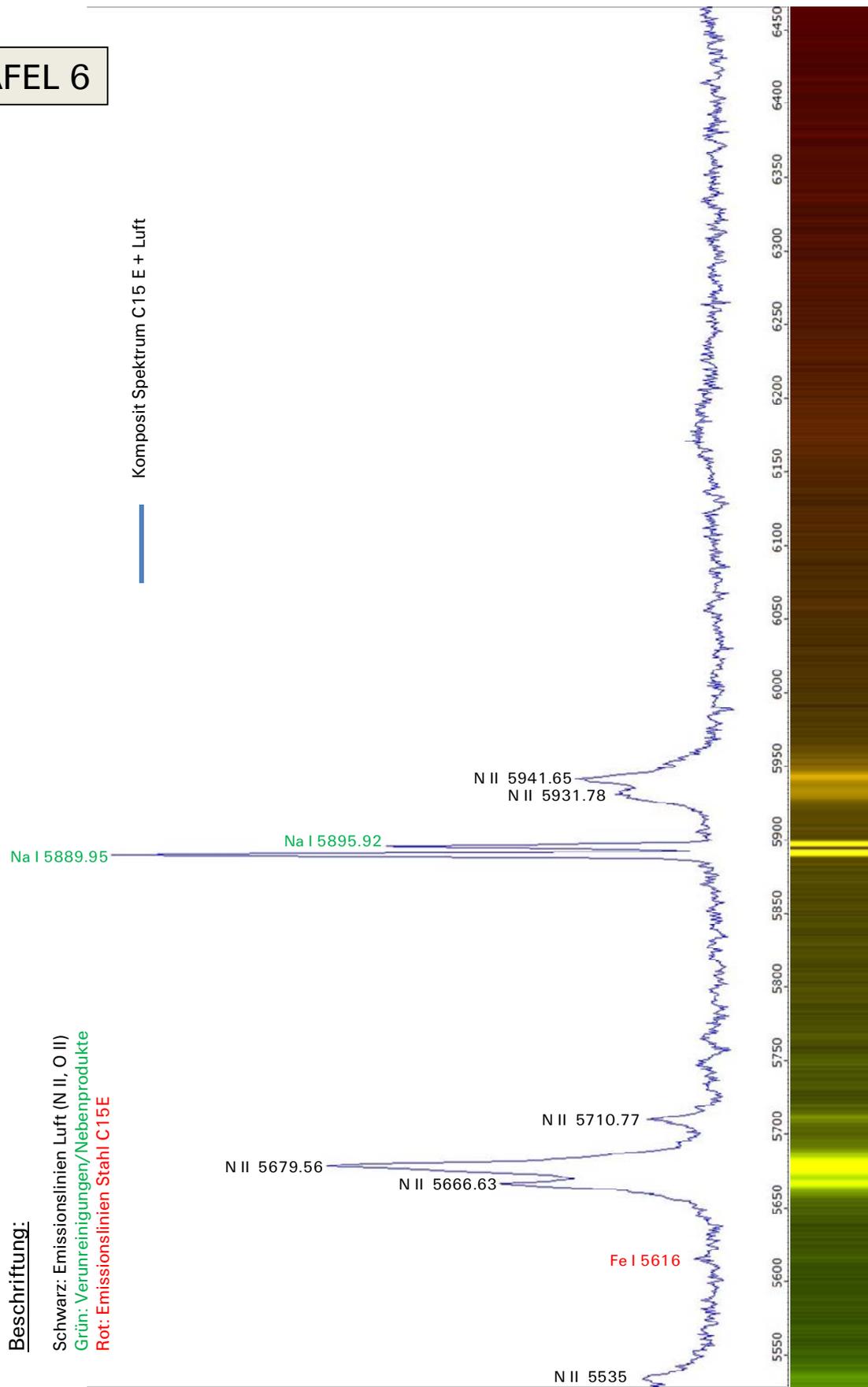
Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
 Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte
 Rot: Emissionslinien Stahl C15E

Komposit Spektrum C15 E + Luft
 Funken Spektrum Luft



Komposit Funkenpektrum C15E-Stahl + Luft DADOS 900L/mm

TAFEL 6



Komposit Funkenspektrum C15E-Stahl + Luft DADOS 900L/mm

TAFEL 7

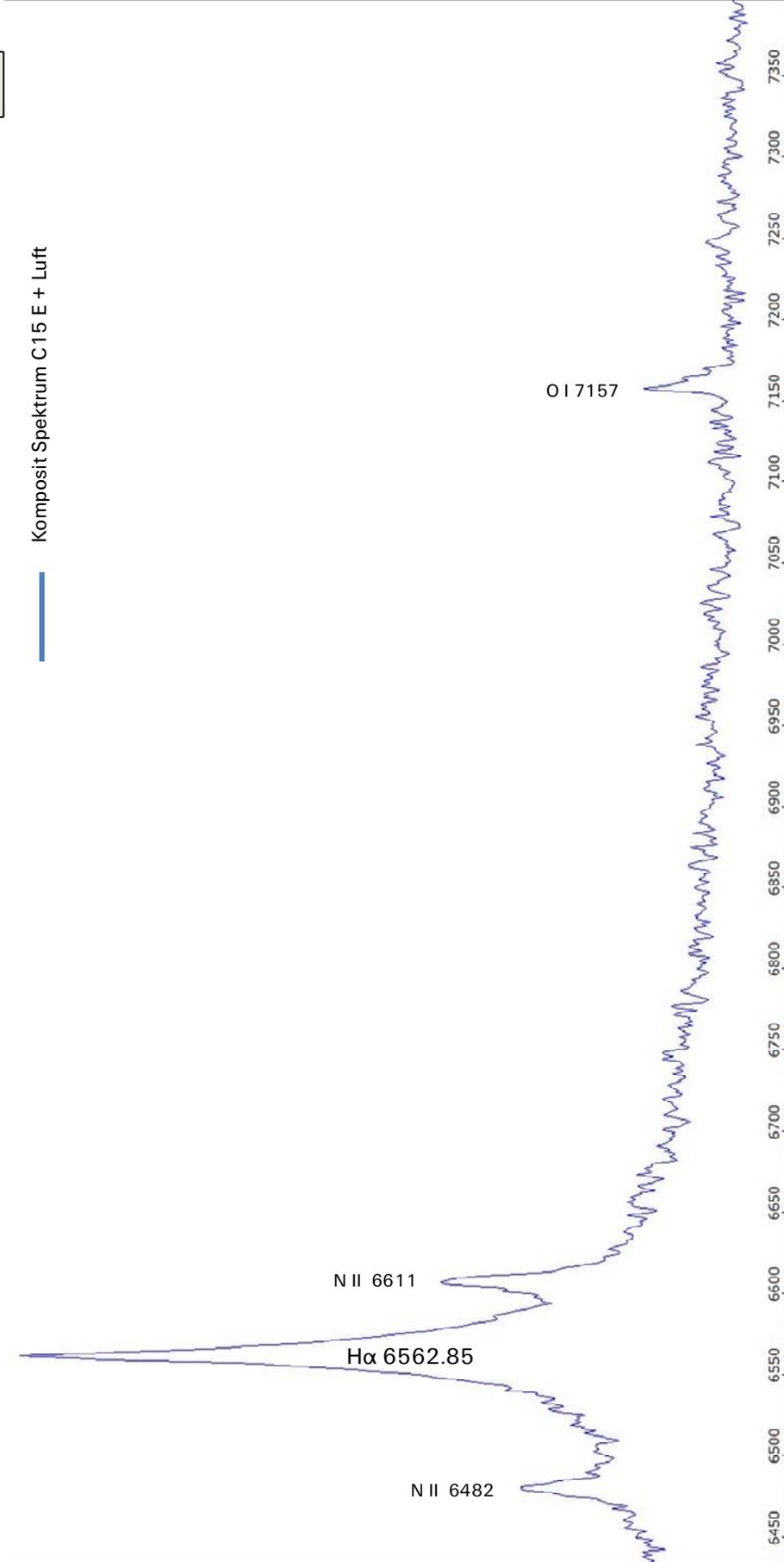
Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien Stahl C15E

Komposit Spektrum C15 E + Luft



Tafel 8: Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum: Verzinkter Stahl + Funkenspektrum der Luft.

Dominierend sind hier erwartungsgemäss die Emissionslinien von Zink. Spitzenreiter ist klar die Linie bei 4810.53. Bei diesem Profil fällt auf, dass die Emissionslinien der Luft vergleichsweise bescheiden in Erscheinung treten, insbesondere die sonst intensive Linie, $N // 5001 - 5007 \text{ \AA}$, fehlt hier sogar vollständig. Es ist auch kein ausgeprägtes Kontinuum erkennbar. Der Grund für diese Effekte bleibt mir vorläufig unklar. Möglicherweise war hier der Spektrografenspalt besonders genau auf die Einschlagsstelle des Funkens ausgerichtet.

Tafel 9: Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum: Aluminium + Funkenspektrum der Luft.

Hier sind drei Aluminium Emissionen im blauen Bereich des Spektrums dominierend. Auch bei diesem Profil fällt auf, dass die Emissionslinien der Luft vergleichsweise bescheiden in Erscheinung treten. Auch hier fehlt ein ausgeprägtes Kontinuum. Zwei Cluster mit Emissionslinien im Bereich von $4600 - 4750 \text{ \AA}$, sowie $5100 - 5200 \text{ \AA}$, lassen sich momentan nicht eindeutig identifizieren.

Tafel 10: Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum: Kupferdraht + Funkenspektrum der Luft.

Beim Kupferdraht wurde vorgängig der Isolierlack entfernt. Auch hier fehlt ein ausgeprägtes Kontinuum. Dominierend sind hier drei isolierte Kupferlinien im Bereich von $5100 - 5300 \text{ \AA}$. Mehrere andere bilden Blends mit $N //$ - und $O //$ Emissionen, welche hier noch relativ intensiv erscheinen. Auffällig sind hier auch Nebenprodukte, d.h. $Na I$ und $Ca //$ Linien.

Tafel 11: Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum, aufgenommen mit Urs Flükiger in Oberburg. Probe: Werkzeugstahl mit Titanoxid ($Ti O_2$) beschichtet.

Gut sichtbar sind hier Emissionsbanden von *diatomischen Titanmonoxid* Molekülen (TiO) und auch atomare Ti - Linien. *Titanoxid* ($Ti O_2$) kann bei diesen hohen Temperaturen von $>3000 \text{ K}$ nicht bestehen, ebensowenig wie in den stellaren Atmosphären, bis hinunter zur späten M-Klasse.

Das Luft Spektrum tritt hier nur schwach in Erscheinung. Siehe auch *Tafel 21*, wo ein Ausschnitt dieses Spektrums mit dem entsprechenden von *Ras Algethi* (αHer) überlagert dargestellt ist. Im Bereich von 5000 \AA bildet allerdings die „Königslinie“ des Luftspektrums, die intensive $N //$ Emission, einen Blend mit den TiO Banden.

Da bei diesem Versuch der Funken die Titanoxidschicht durchschlagen musste, war er auch entsprechend schwächer ausgeprägt. Um die Absorptionsbanden besser sichtbar zu machen, wurde die Belichtungszeit auf 1 Minute gesteigert und der Funken ca. 150x ausgelöst. Wird eine Kante oder Ecke getroffen, besteht die Gefahr, dass dort die Beschichtung zu dünn oder gar nicht mehr vorhanden ist. Als ideal hat sich deshalb erwiesen, wenn der Funken rechtwinklig auf die Mitte der Probe schlägt und die Aufnahme ungefähr in der Oberflächenebene erfolgt. So spielt es auch keine Rolle, wenn sich die Einschlagstelle etwas verschiebt.



Anmerkung: Es misslangen bisher Versuche, auf diese Art die Emissionslinien von Gold darzustellen. Es zeigte sich jeweils nur das Spektrum der Luftmoleküle. Der Grund dafür bleibt mir vorläufig unbekannt.

Komposit Funkenspektrum verzinkter Stahl + Luft DADOS 200L/mm

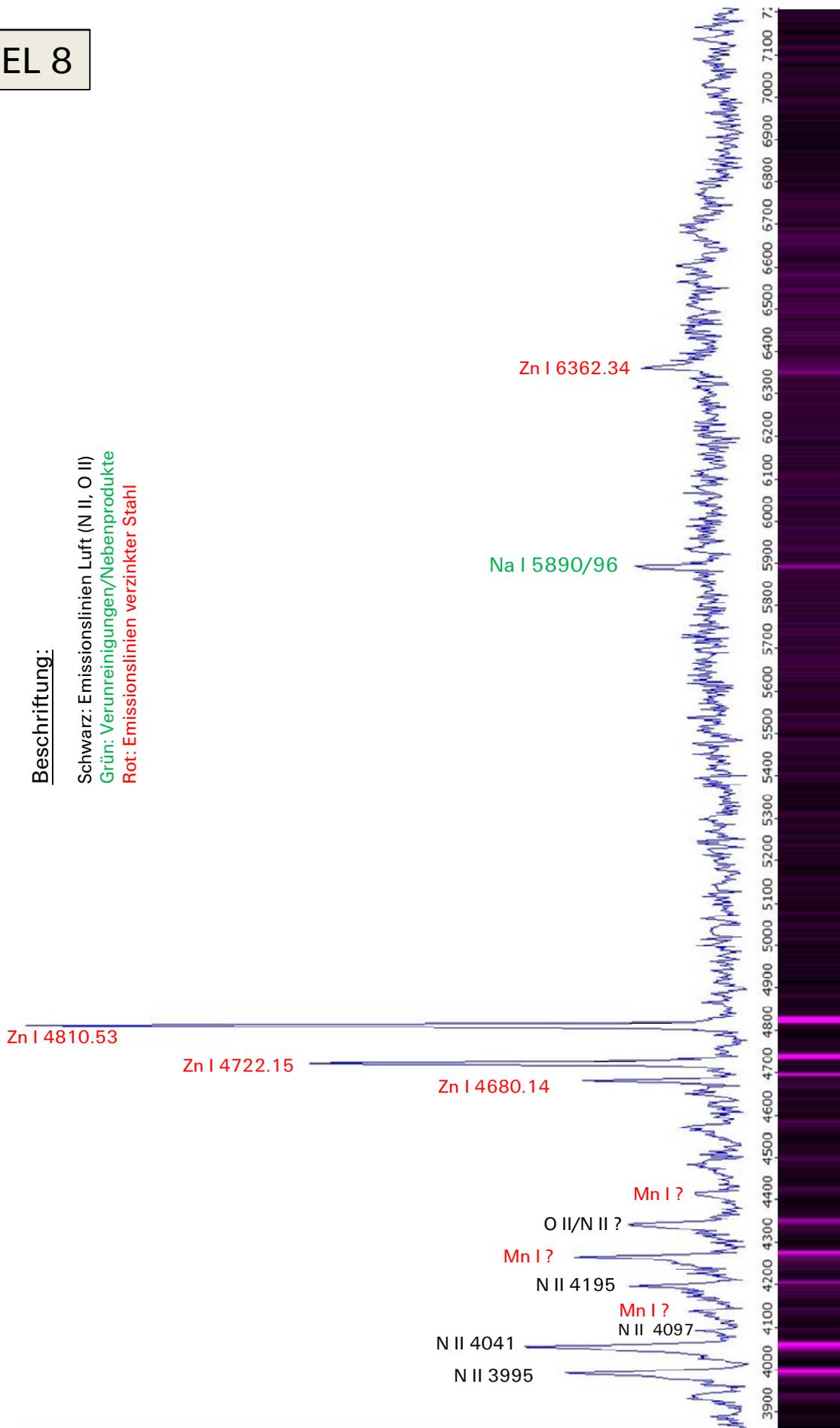
TAFEL 8

Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien verzinkter Stahl

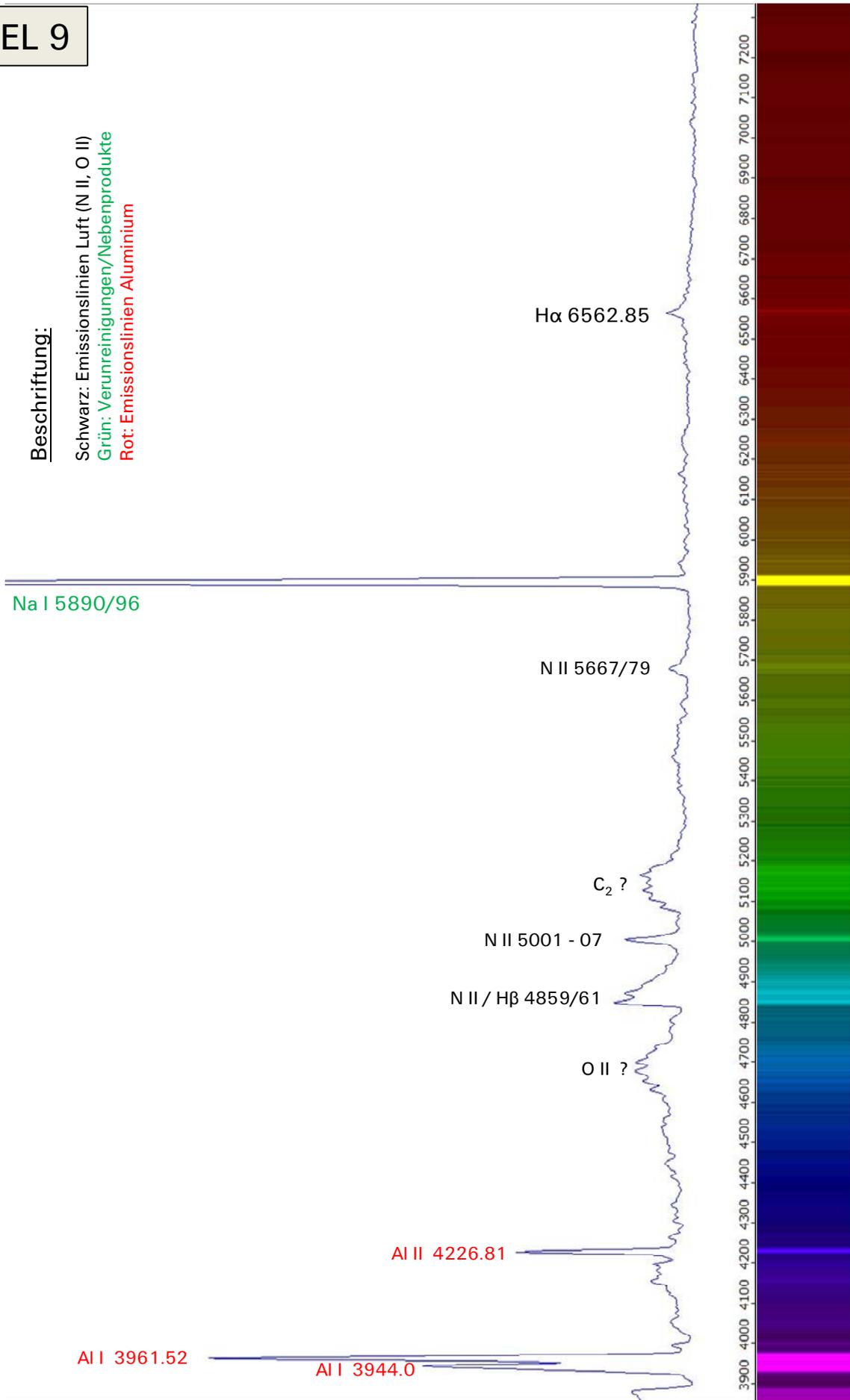


Komposit Spektrum Aluminium + Luft DADOS 200L/mm

TAFEL 9

Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte
Rot: Emissionslinien Aluminium



TAFEL 10

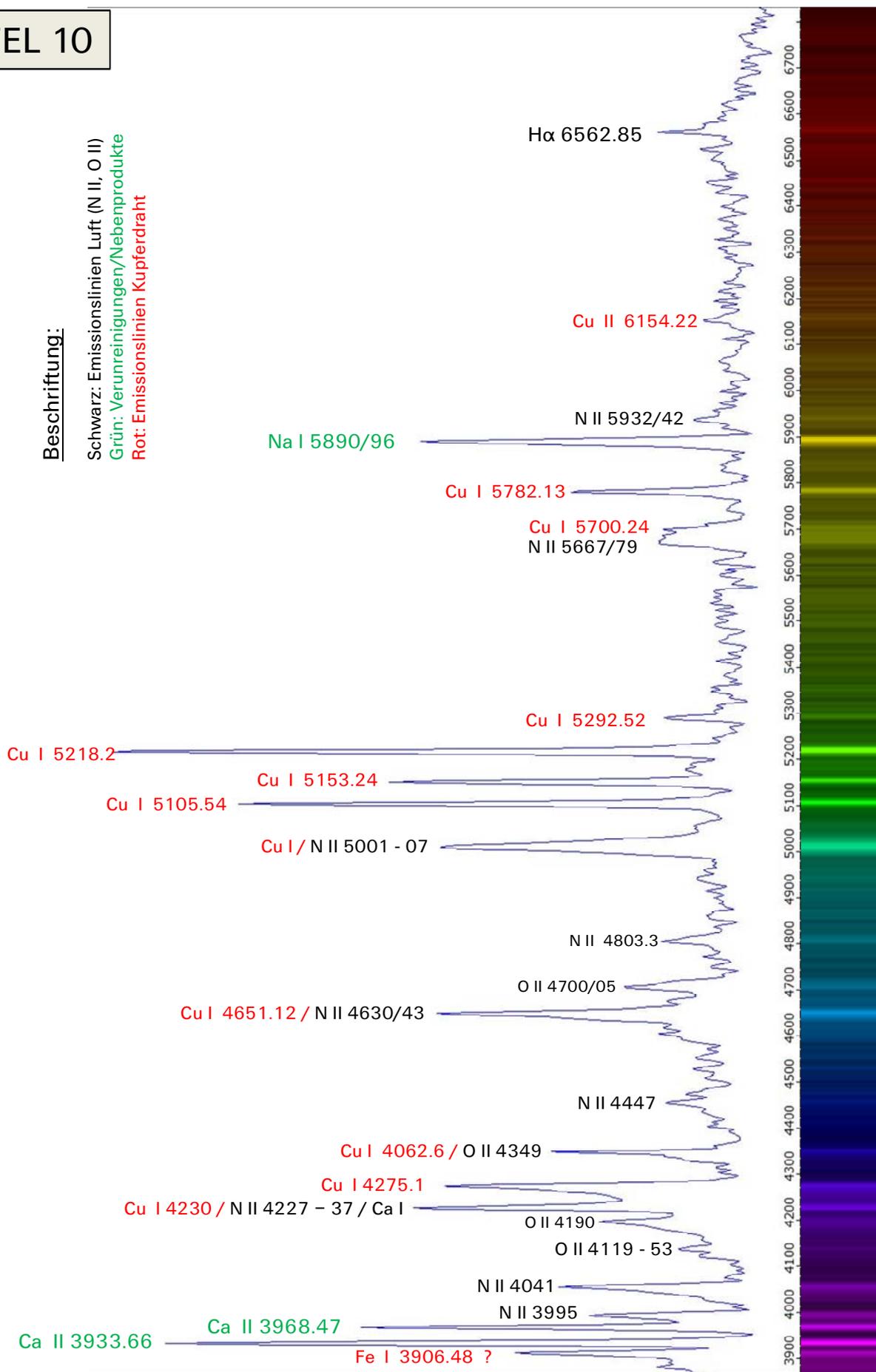
Komposit Spektrum Kupferdraht + Luft DADOS 200L/mm

Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien Kupferdraht



TAFEL 11

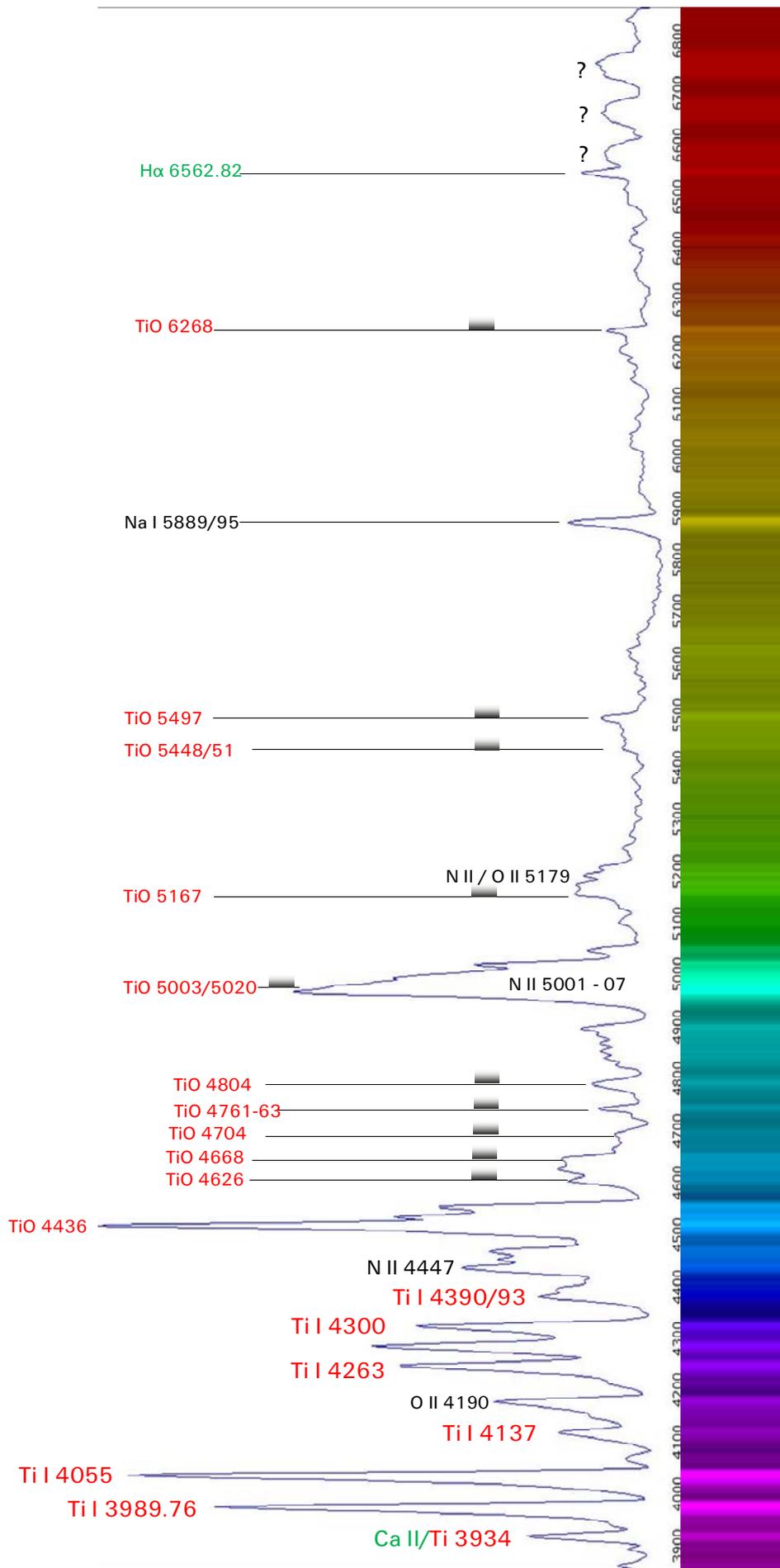
Komposit Funkenpektrum Titanoxid Beschichtung DADOS 200L/mm

Beschriftung:

Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)

Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte

Rot: Emissionslinien TiO Beschichtung



4 Versuche mit Lichtbogenanregung

4.1 Geräte und Versuchsaufbau

Professionell werden Lichtbogenspektren mit Elektroden aus Wolfram oder spektralreiner Kohle in einer inerten Schutzgasatmosphäre gewonnen. Zusammen mit Urs Flükiger haben wir in seinem Betrieb in Oberburg [61] versucht, dies behelfsmässig und rudimentär mit einem gewöhnlichen Elektroschweissgerät zu simulieren: Elektrode Rutil (TiO_2)/sauer. Zusätzlicher Test mit einer TIG Elektrode, in Kombination mit Argongas. TIG steht englisch für Tungsten-Inert-Gas (welding) – deutsch WIG für Wolfram-Inert-Gas (schweissen).

Bild: Elektroschweissen mit Rutil Stabelektrode. DADOS Spektrograf und Vorsatzobjektiv auf AYO Montierung, Distanz ca. 3m. Urs (links im Hintergrund) bei der Aufzeichnung der Spektren am Laptop.



TIG schweissen mit Argon Schutzgas (Hr. Baumgartner)



4.2 Ergebnisse

Tafel 15: Lichtbogen simuliert mit Elektroschweißgerät. Elektrode Rutil/sauer. Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum: *Stahl 37*, Werkstoffnummer 1.0037 (nachfolgend Stahl 37 genannt) + Funkenspektrum der Luft.

Der Vergleich mit dem Funkenspektrum zeigt, dass das Bogenspektrum etwas höher aufgelöst ist. Zusätzlich zu den Linien von *Fe* / Atomen und Luftmolekülen, treten hier noch sehr zahlreich atomare und molekulare Titanemissionen auf (*Ti/TiO*). Diese stammen offensichtlich vom Rutil Mineral (*TiO₂*) der Schweisselektrode.

Die Unterscheidung von *Fe* / und *Ti* / hat sich als schwierig (unsicher) erwiesen. Diese Linien liegen in der Liste oft nur Bruchteile von 1 Å auseinander.

Auffällig ist auch die breite *Na* / Emission mit einer zentralen Selbstabsorptionsenke, wie sie auch in den Spektren von Natriumhochdruckdampf lampen auftritt (siehe [13]).

Tafel 16: Lichtbogen simuliert mit Elektroschweißgerät, TIG Elektrode in Kombination mit Argongas. Niedrig aufgelöstes (200L) Komposit Spektrum: *Stahl 37* + Luft.

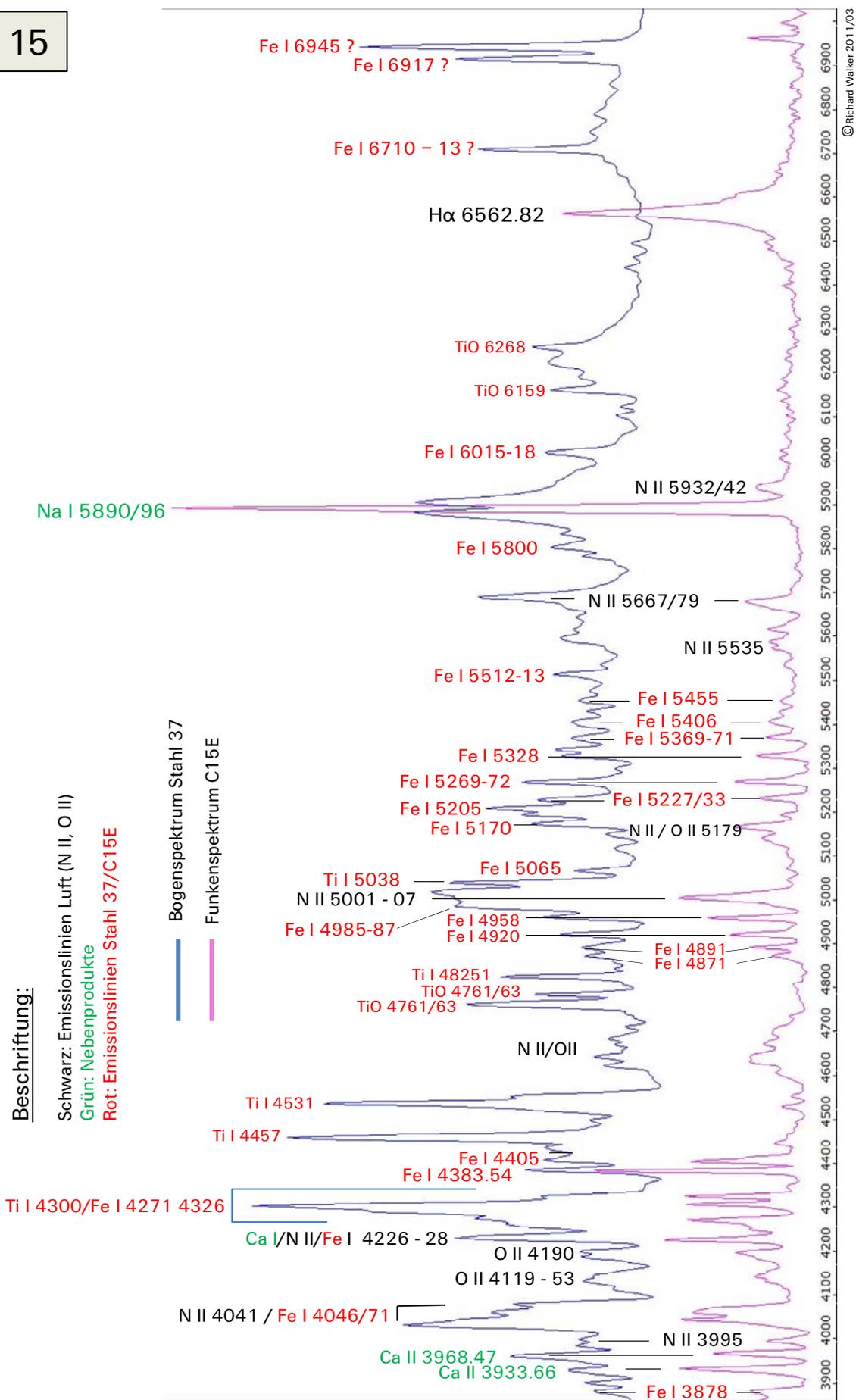
Bei älteren Schweissanlagen verbesserte radioaktives Thorium die Zündeigenschaften gegenüber Gleichstrom. Diese Wolframelektrode enthält hier kein radioaktives Thorium mehr, da Flükiger & Co AG über moderne Schweissgeräte mit Hochspannungszündanlage und entsprechender Steuerung verfügt. Folglich fehlen hier im Spektrum solche Emissionslinien.

Das Profil wird eindrücklich beherrscht von intensiven Emissionen des Schutzgases Argon *Ar* / I. Um die *Fe* / Linien überhaupt sichtbar zu machen, musste stark in der Intensitätsachse gezoomt werden. Im roten Bereich des Spektrums erscheinen daher die meisten *Ar* / Emissionen oben gekappt. In Wirklichkeit sind sie ca. doppelt bis dreifach so hoch!

Gut sichtbar ist hier auch die Schutzwirkung des Argongases. Die Emissionen der Luftmoleküle sind nur schwach ausgeprägt. Die „Königslinie“ *N* // bei 5000 – 5007 Å fehlt sogar vollständig!

TAFEL 15

Vergleich Bogenspektrum Stahl 37 und
 Funkenpektrum C15E DADOS 200L/mm

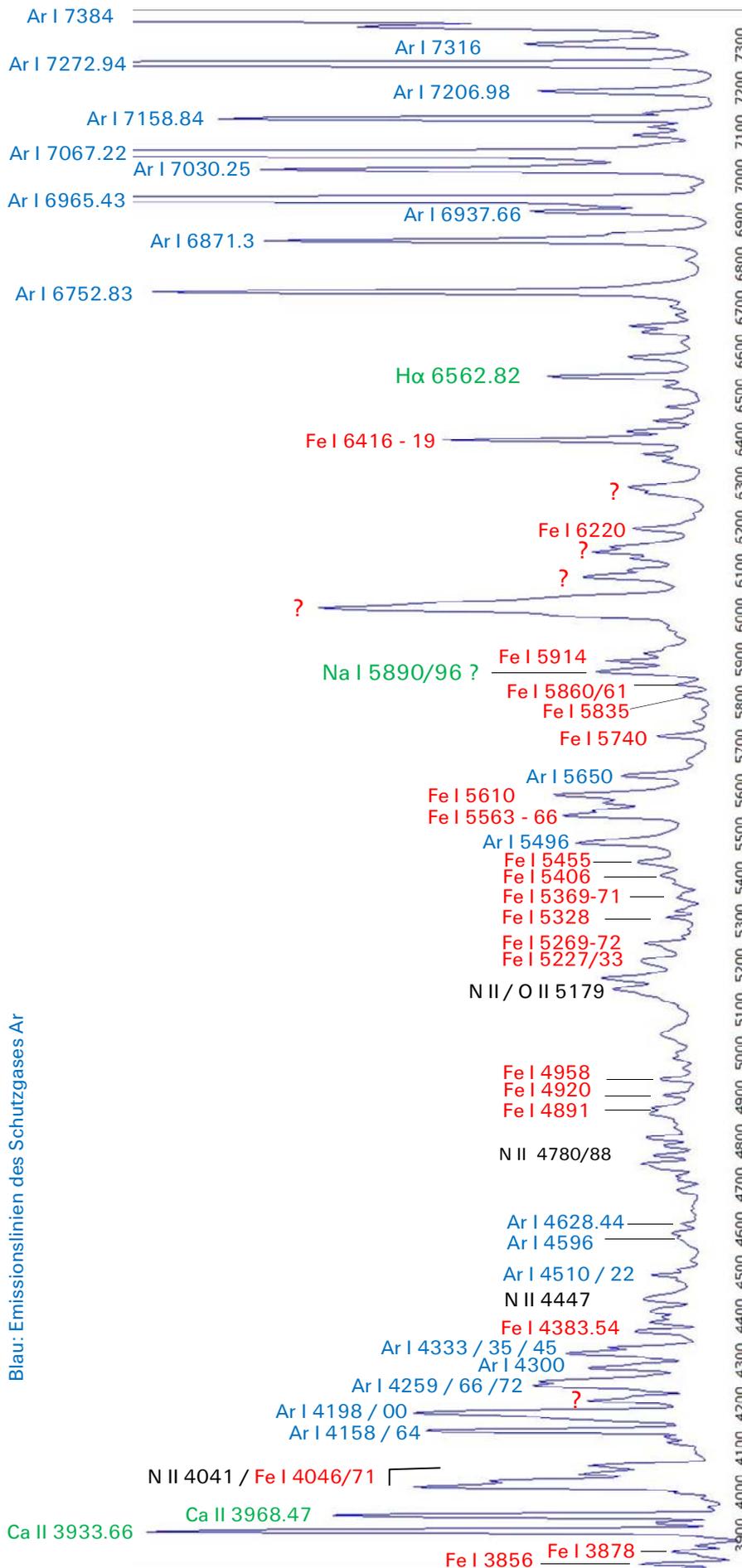


TAFEL 16

Komposit TIG Bogenspektrum Stahl 37 + Luft, DADOS 200L/mm

Beschriftung:

- Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
- Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte
- Rot: Emissionslinien Stahl 37
- Blau: Emissionslinien des Schutzgases Ar



5 Der Link zwischen stellaren- und Laborspektren

Tafel 20: Zeigt im Blaubereich den Vergleich des höher aufgelösten (900L) Komposit Spekt-rums von *C15E* (gemäss *Tafel 4*), zum Sonnenspektrum. Alle *Fe I* Linien des Funkenspekt-rums, sowie *Ca II* (als Nebenprodukt), lassen sich eindeutig im Sonnenspektrum identifizie-ren. Diverse Eisenlinien im Funkenspektrum werden hier von intensiveren Emissionen der Luftmoleküle (*O II*, *N II*) überdeckt und stehen für den Link zum Sonnenspektrum nicht zur Verfügung.

Tafel 21: Profilvergleich, Bereich von 4650 – 5900 Å, *Titanoxid Bänder (TiO)* (200L Gitter):

- Funkenspektrum *TiO Emissionsbanden* einer Oberflächenbeschichtung (gemäss *Tafel 11*) vs.
- Stellare *TiO Absorptionsbanden* von *Ras Algethi (α Her)*.

In diesem Wellenbereich treten im Spektrum der Oberflächenbeschichtung deutlich Emis-sionsbänder von *TiO* in Erscheinung. Diese verlaufen ungefähr spiegelbildlich zu den charak-teristischen Absorptionsbanden des späten M-Klasse Sterns α Her. Die Emissionen der Luftmoleküle sind hier relativ schwach ausgeprägt. Bei 5000 Å bildet allerdings *N II* einen intensiven Blend mit den *TiO* Banden.

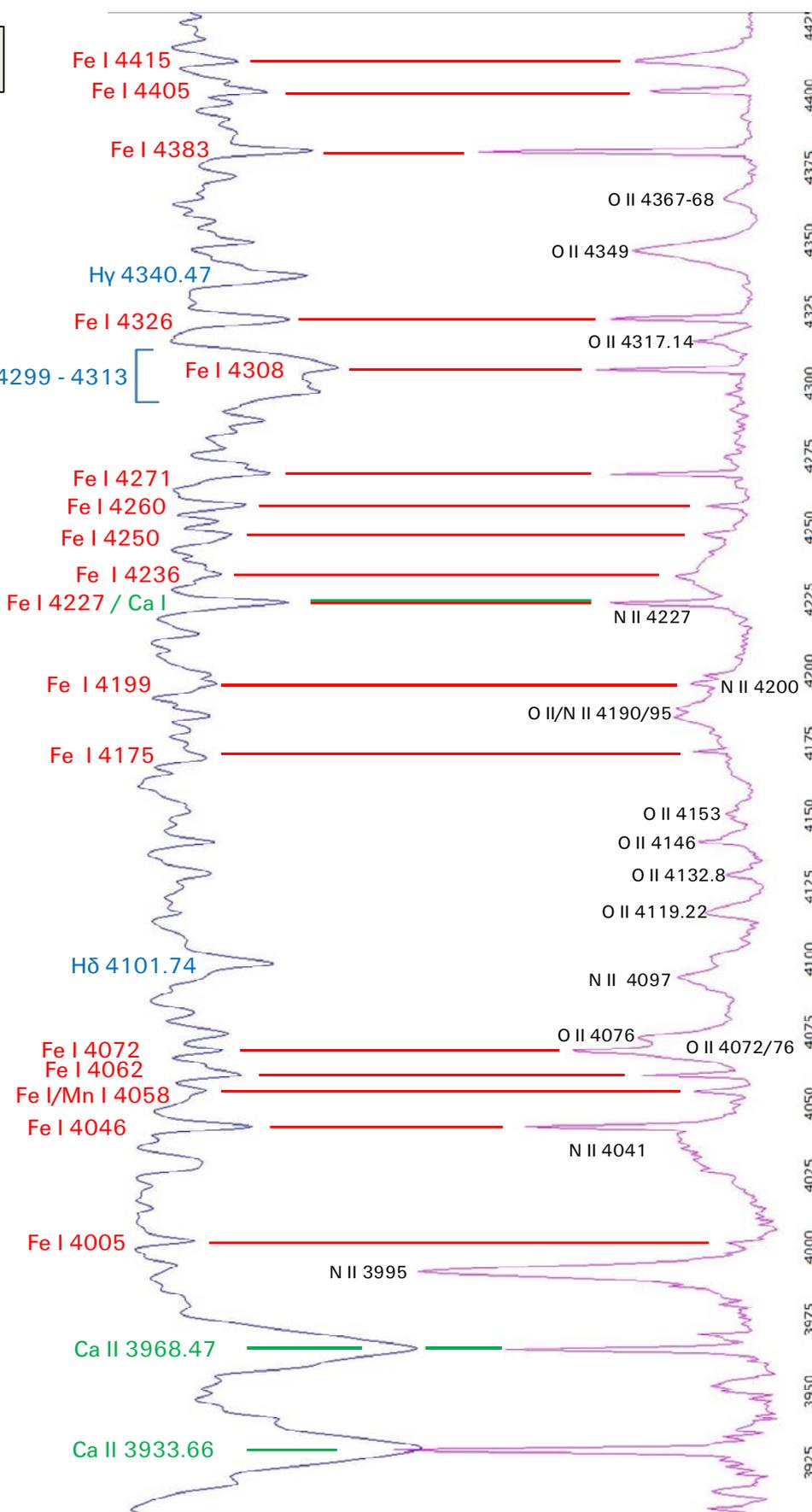
TAFEL 20

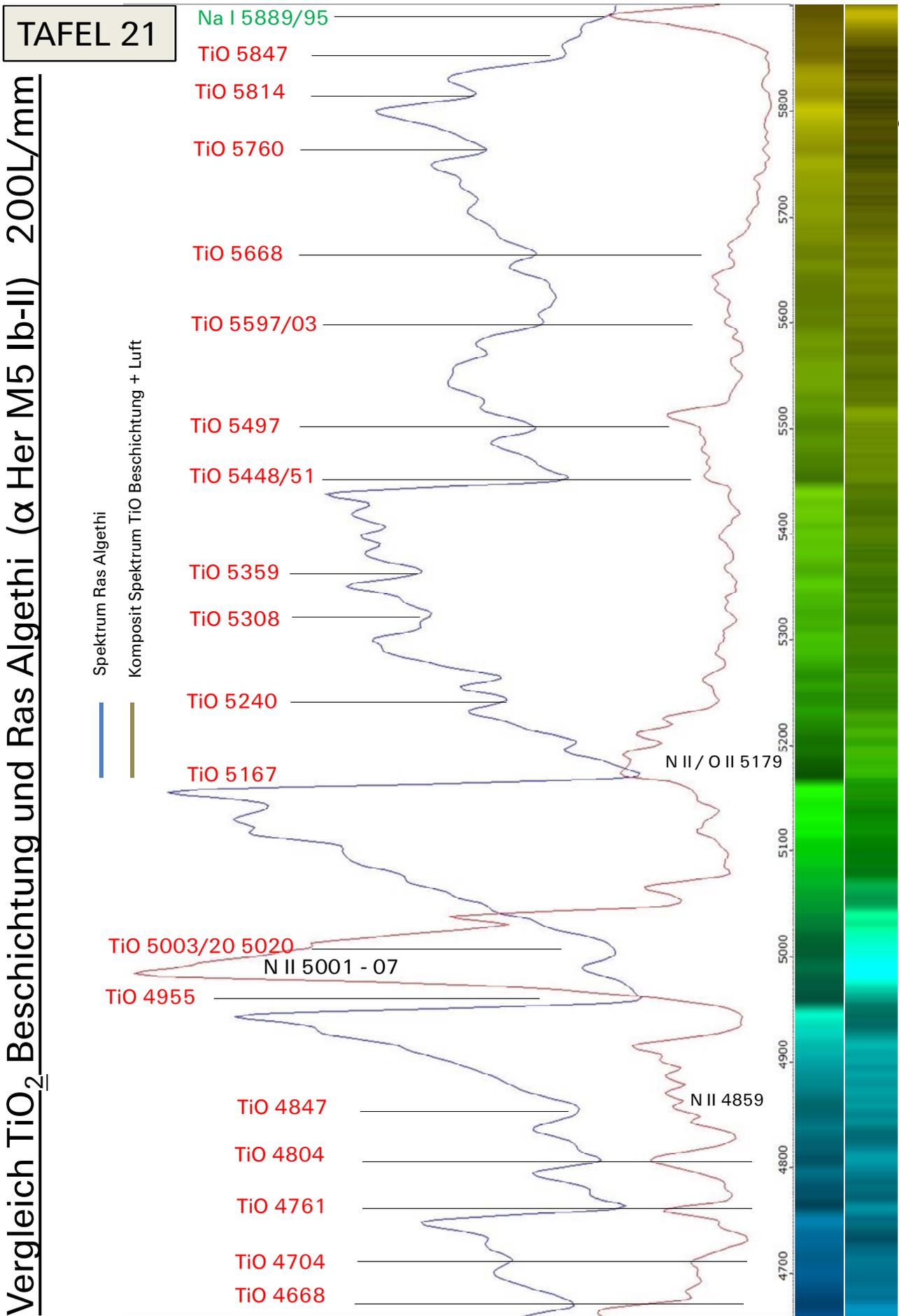
Spektrenvergleich Sonne und C15E (+ Luft) 900L/mm

Beschriftung:

- Schwarz: Emissionslinien Luft (N II, O II)
- Grün: Verunreinigungen/Nebenprodukte
- Rot: Emissionslinien Stahl C15E
- Blau: Absorptionslinien Sonnenspektrum

- Spektrum Sonne
- Komposit Spektrum C15 E + Luft

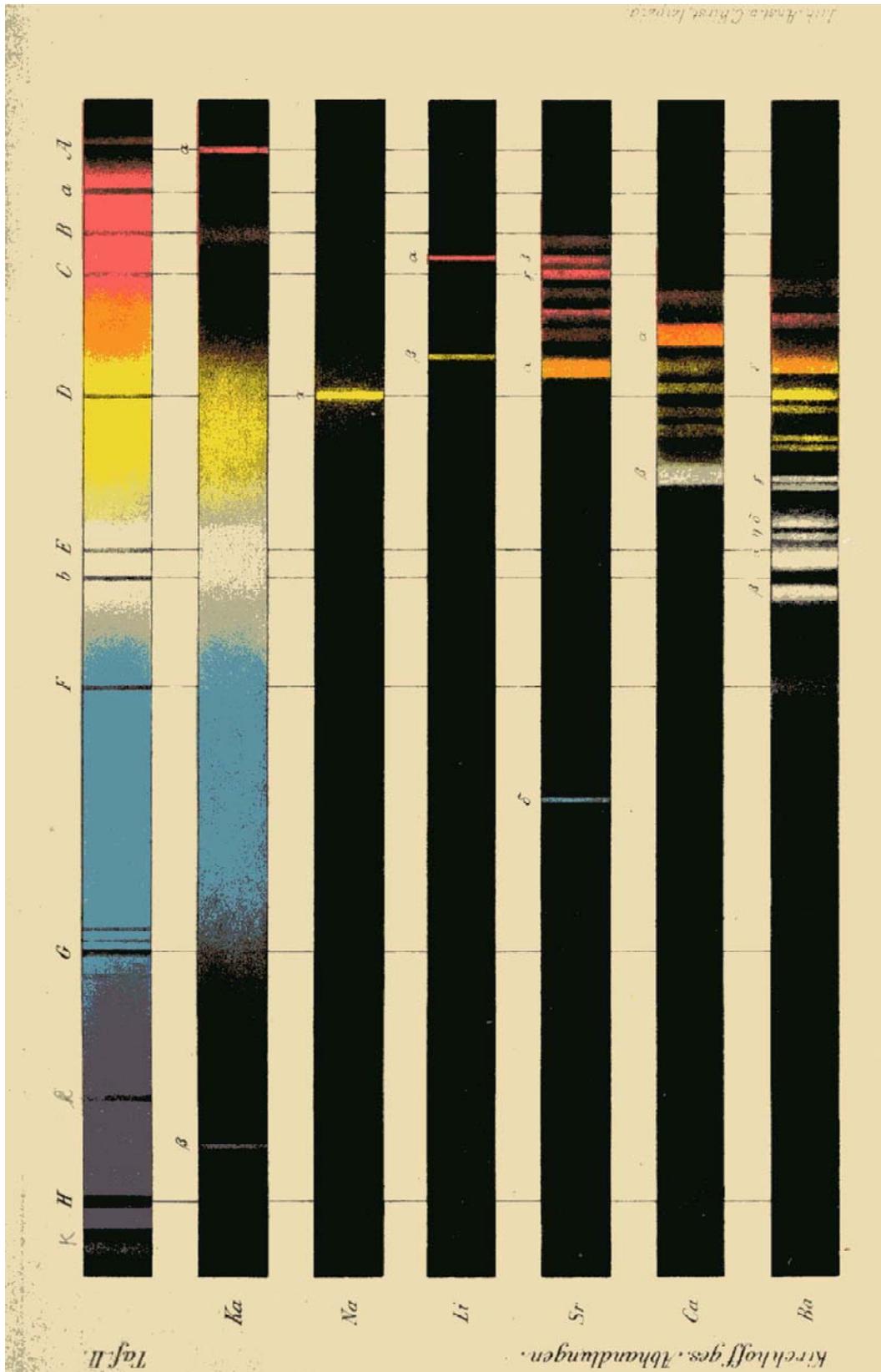




6 Anhang

6.1 Kirchhoffs handschriftliche Aufzeichnung von Spektren [20].

Die Fraunhofer Absorptionslinien des Sonnenspektrums (oben) im Vergleich zu Emissionsspektren der Elemente *Ka* (heute *K*), *Na*, *Li*, *Sr*, *Ca* und *Ba*.



6.2 Spektralatlanten mit Funken und Bogenspektren der Vatikansternwarte

In Fortsetzung der Tradition des legendären *Pater Secchi*, welcher im 19. Jahrhundert den ersten stellaren Spektralatlas verfasste, hat die Vatikan Sternwarte in den 1930er und -40er Jahren mehrere Grundlagenwerke mit Funken- und Lichtbogenspektren publiziert. Treibende Kraft hinter diesem Projekt war Pater *Alois Gatterer*. Die folgenden Darstellungen entstammen dem antiquarisch erworbenen Buch [1] *Ricerche Spettroscopiche* von *J. Junkes und E.W. Salpeter*.



ABB. 3. Spektrographensaal 1934 mit STEINHEIL-Spektrograph GH mit langer Kamera

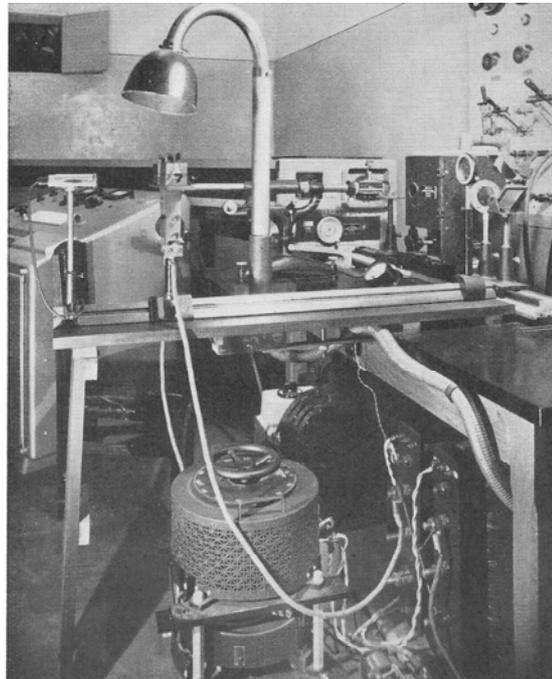


ABB. 20. Anordnung zur Aufnahme von Bandenspektren mit der Kohleflamme vor dem JARRELL-ASH-Spektrographen

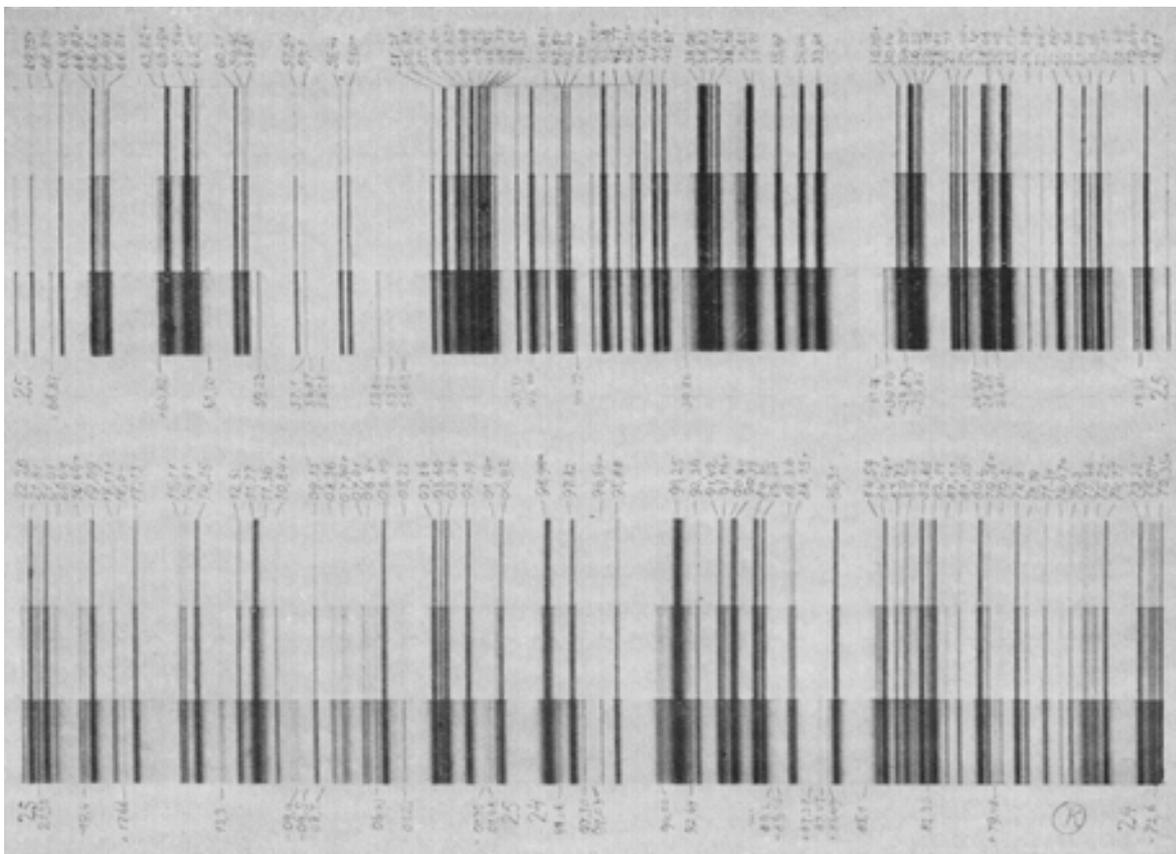


ABB. 6. Tafel aus dem Funkenspektrum des Eisens

7 Literatur und Internet

Literatur:

[1] *Ricerche Spettroscopiche*, J. Junkes, E.W. Salpeter, 1966, Laboratorio Astrofisico Della Specola Vaticana. Dreissig Jahre Spektralatlanten des Astrophysikalischen Laboratoriums der Vatikanischen Sternwarte. Vergriffen, nur noch antiquarisch erhältlich.

Internet Links:

Verfasser:

Folgende Schriften zum Thema Spektroskopie können unter diesem Link heruntergeladen werden:
<http://www.ursusmajor.ch/astroSpektroskopie/richard-walkers-page/index.html>

[10] *Beitrag zur Spektroskopie für Astroamateure*

[11] *Das Aufbereiten und Auswerten von Spektralprofilen mit den wichtigsten IRIS und Vspec Funktionen*

[12] *Kalibrierung von Spektren mit der Xenon Stroboskoplampe*

[12a] *Kalibrierung von Spektren mit dem Glimmstarter ST 111 von OSRAM*

[13] *Spektralatlas für Astroamateure* (Download in Deutsch und Englisch)

[14] *Das optische Spektrum des Quasars 3C273*

Blitz Spektroskopie:

[15] *A High-Speed Time-Resolved Spectroscopic Study of the Lightning Return Stroke: Part I, a Qualitative Analysis*, Richard E. Orville, Institute of Atmospheric Physics, Tucson Arizona.

[http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469\(1968\)025%3C0827%3AAHSTRS%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469(1968)025%3C0827%3AAHSTRS%3E2.0.CO%3B2)

[16] *The optical spectrum of aircraft St. Elmos fire*, E.M. Wescot et al. University of Alaska, 1996.

http://www.uas.alaska.edu/artsscience/naturalsciences/envs/faculty_staff/pubs/wescott96_stelmo.pdf

[17] *Lightning Physics and Effects*, V. Rakov, M. Uman

[18] *The Spectrum of Lightning*, L. Wallace, Kit Peak, National Observatory

<http://adsabs.harvard.edu/full/1964ApJ...139..994W>

[19] *Lightning Spectroscopy*, T. Walker, H. Christian, D. Sentman

Emissionsspektroskopie:

[20] *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen*, G. Kirchhoff R. Bunsen, Annalen der Physik und [20]Chemie 1860, <http://www.ub.uni-heidelberg.de/helios/fachinfo/www/physik/erg/spek.pdf>

[21] <http://www.students.uni-mainz.de/jungc000/uugit/inhaltsv.htm>

Inhaltsverzeichnis mit zahlreichen Ideen und Tips zur Funken- und Flammenspektroskopie u.a. unter der Rubrik „Chemische Analysen“.

[22] *Phasenaufgelöste, optische Emissionsspektroskopie an RF Plasmarandschichten*, Diplomarbeit 2007, S. Nemschokmichal, Universität Greifswald

<http://www1.physik.uni-greifswald.de/download/dissertationen/dip-nemschokmichal.pdf>

Datenbanken

[31] *NIST Atomic Spectra Database:*

http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

[32] Simulierte Emissionsspektren für sämtliche Elemente,

<http://bmauclaire.free.fr/astronomie/spectro/simulation/noblet/index2.htm>

Vspec und IRIS:

[51] Webpage von Christian Buil (Autor von IRIS)

<http://www.astrosurf.com/buil/>

[52] Webpage von Valerie Désnoux (Autorin von Vspec)

<http://astrosurf.com/vdesnoux/>

Metallurgie und Schweisstechnik

[61] Flükiger & Co AG - Industrieschmiede, Emmentalstrasse 75, CH 3414 Oberburg

<http://www.fluekiger.ch/>

[62] Werkstoffdatenblatt Voegelin AG, C15E Stahl/Werkstoffnummer 1.1141

http://www.voegelinag.ch/DE/Dokumente/Werkstoffdatenblatt_C15E.pdf