



Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie

Masterarbeit

Methodenentwicklung zur Stabilisation des
Elektrischen Lichtbogens im Wasserstoff-
Argon Schmelzreduktionsplasma

Eva-Maria Leitner, BSc

März 2023



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

www.unileoben.ac.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 06.03.2023

Leitner Eva-Maria

Unterschrift Verfasser/in
Eva-Maria Leitner

Kurzfassung

Die Eisen- und Stahlindustrie beschäftigt sich schon seit 1990 damit, neben dem Hochofen ein kohlendioxidarmes Verfahren zur Roheisenerzeugung zu entwickeln. Neben den verschiedenen Wirbelschichtverfahren ist dabei die „Hydrogen Plasma Smelting Reduction“ (HPSR) erwähnenswert. Dies ist eine stark veränderte Entwicklung des klassischen Elektrolichtbogenofens. Während dieser heutzutage hauptsächlich als Schmelzaggregat Verwendung findet, ist das Ziel der HPSR die Erzreduktion. Die veränderten Anforderungen an Umweltschutz und Qualität haben auch die Anwendung moderner Technologien, wie zum Beispiel den Gebrauch einer gasdurchspülten Hohlkathode, in der HPSR zur Folge. Ein Problem des Verfahrens ist die Instabilität des Lichtbogens während des Prozesses, was einerseits den Energiebedarf immens in die Höhe treibt, andererseits auch negativen Einfluss auf die umliegende Feuerfestausmauerung und die Prozessstabilität als Ganzes hat. Deshalb ist es ein Ziel dieser Arbeit, mittels passender Literatursuche die Einflüsse auf die Stabilität des Lichtbogens festzustellen. Eine weitere Absicht der Arbeit liegt darin, durch verschiedene Versuche den Einfluss der Gaszusammensetzung, einer kontinuierlichen Erzchargierung und deren kombinierten Einfluss auf die Lichtbogenstabilität unter Berücksichtigung eines variablen Leistungseintrags zu untersuchen. Um dies zu erreichen, wurden je eine Bewertungsmethode in Form von Diagrammen in 2D und 3D mithilfe der Daten aus den vorhergehenden Lichtbogenstabilitätsfeldversuchen von Zarl et al. [1] erstellt.

Abstract

The iron and steel industry in the whole world has been engaged since 1990 to find different, more environmentally friendly methods to produce crude steel. Beside the diverse fluidised bed reactors, there is also the “Hydrogen Plasma Smelting Reduction” (HPSR) available. This process is a modification to the classical electric arc furnace, which is used for the smelting of steels. In case of the different purpose of the processes, the HPSR deals with hollow carbon cathodes with a gas flow through it. Unfortunately, this technique deals with an unstable electric arc which enlarges the energy demand and has a negative impact on the refractory lining as well as overall process stability. Due to this circumstance, this work aims to investigate the influences on the electric arc stability via literature research. Another goal is to get knowledge of the effect from the gas composition, continuous ore introduction and their combined impact on electric arc stability. Due to this, all data get detected during the process. In the end, there was built up a method of evaluation in the form of two and three dimensional diagrams with the data from the previous test of electric arc stability fields by Zarl et al. [1].

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Allgemeine Formelzeichen	VII
Akronyme.....	XI
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Teil.....	3
2.1 Lichtbogenentstehung und Plasmaentstehung in der HPSR.....	3
2.1.1 Stabiler und Instabiler Lichtbogen	6
2.1.2 Beschreibung des Lichtbogens mittels verschiedener Modelle und Gleichungen der Thermodynamik.....	7
2.1.2.1 Cassie-Mayr-Modell.....	8
2.1.2.2 Das Modell der Magnetohydrodynamik.....	9
2.1.3 Einflusskriterien auf die Lichtbogenstabilität	11
2.1.3.1 Spannung und Strom.....	12
2.1.3.2 Magnetfeld	13
2.1.3.3 Aggregateinstellungen	14
2.1.4 Lichtbogenstabilitätsindex	15
2.2 Messung der Lichtbogenstabilität.....	17
2.3 Methoden zur Verbesserung der Lichtbogenstabilität	21
3 Praktischer Teil.....	26
3.1 Versuchsdurchführung.....	26

3.1.1	Notwendige Systeme und Elemente für die Versuchsdurchführung	26
3.1.1.1	Stahlriegel mit Stahlpin und feuerfester Ring	27
3.1.1.2	Hohlkathode.....	27
3.1.1.3	Erzchargiersystem	28
3.1.1.4	Massenspektrometer und Abgasreinigungssystem.....	29
3.1.1.5	Kamera zu Überwachung des Lichtbogens.....	29
3.1.1.6	Gasmischsystem	30
3.1.1.7	Messeinrichtung für Strom und Spannung	30
3.1.1.8	Gesamtes System	30
3.1.2	Einsatzstoffe	32
3.1.3	Ablauf der Versuche auf der Plasmette.....	32
3.2	Auswertung.....	35
3.2.1	Diagrammerklärung	46
4	Ergebnisse	48
4.1	Excel Auswertung.....	48
4.1.1	Gasgemische.....	48
4.1.2	Kontinuierliche Erzchargierung.....	56
4.1.3	Gasgemische mit kontinuierlicher Erzchargierung	57
4.2	Origin Auswertung	60
4.2.1	Oberflächendiagramme und Stabilitätsfelder	60
4.2.2	Stabilitätsfelder	64
5	Schlussfolgerungen	69
6	Ausblick.....	71
7	Literaturverzeichnis.....	72
8	Anhang	1

Allgemeine Formelzeichen

{ }	Gasphase
[]	Schmelze
()	Schlackenphase
< >	Feuerfestmaterial, nichtmetallische Einschlüsse
A_i	Ionisierungsenergie [kJ/mol]
B	magnetisches Feld [T]
c_g	Gaskonstante 8,314 [(kgm ²)/(s ² molK)]
c_p	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kgK)]
c_v	spezifische Wärmekapazität [kJ/(kgK)]
D	Elektrische Flussdichte [As/m ²]
d	Abstand [mm]
E	elektrisches Feld [V/m]
F_L	Lorentz Kraft [N]
F_m^*	magnetische Kraft [N]
F_v^*	Reibungskraft [N]
e_c	$\rho c_v T$ [kJ/m ³]
e	Elementarladung [As]

g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
h	Planck'sches Wirkungsquantum [Js]
H	Magnetische Feldstärke [A/m]
i	Lichtbogenstrom [A]
I _{arc}	Strom des Lichtbogens [A]
I _{Min}	Minimaler Strom [A]
I _{SR}	Strom [A]
j	Leistungsstromdichte [A/m ²]
J _F	Stromdichte [A/m ²]
k	Boltzmann Konstante [J/K]
K _{Vl}	Variationskoeffizient Strom [-]
K _{VU}	Variationskoeffizient Spannung [-]
m _e	Elektronenmasse [kg]
MW _U	Mittelwert Spannung [V]
n	Stellt eine Beziehung zwischen der absoluten Siedetemperatur der Anode und der Atmosphäre in der Nottinghambeziehung her [-]
n _a	Anzahl der Werte [-]
n _e , n _a	Teilchenzahldichten [1/m ³]
n _c	Carrere Faktor [-]
p	Druck [Pa]
P	Polarisation [As/m ²]
P _V	Verlustleistung des Lichtbogens [W]
P ₀	Ausgangsleistung [W]
q	Ladungsenergie [C]
q _L	Ladungsenergie [C]
q _w	Wärmestromdichte [W/m ²]
r	Leistungsdichte [W/kg]

r	Radius des Lichtbogens [mm]
R_{arc}	Lichtbogenwiderstand [Ω]
Sens	magnetische Sensivität [-]
T	Temperatur [K]
t_n	Zeitdauer des Intervalls
u	Geschwindigkeitsvektor [m/s]
ΔU	Differenz der Spannungswerte [V]
U_{arc}	Spannung des Lichtbogens [V]
U_i	Spannungswerte[V]
U_n	Spannungswert zum aktuellen Zeitpunkt [V]
U_{n+1}	Spannungswert eine Sekunde später [V]
U_{qu}	Quadratischer Mittelwert der Spannung [V]
U_{SR}	Spannung [V]
V_L	Lichtbogen spannung der Nottinghamgleichung [V]
V_{out}	Ausgebrachte Spannung [V]
V_{outQ}	Spannung ohne Magnetfeld [V]
$X(\tau, \omega)$	Spektrogramm [-]
X	Verhältn iswert zwischen Mittelwert Spannung zum Zeitpunkt der vorherrschenden Spannung [-]
x_{int}	Intervallparameter [-]
X_{max}	Maximaler Verhältn iswert im Zeitintervall [-]
X_{neu}	neuer Verhältn iswert zwischen Mittelwert Spannung zum Zeitpunkt der vorherrschenden Spannung [-]
ΔX_{neu}	Differenz zwischen Maximalem/Minimalem Verhältn iswert [-]
$X_{\text{neu, max}}$	Maximaler Verhältn iswert inklusive gelöschter Werte [-]
$X_{\text{neu, min}}$	Minimaler Verhältn iswert inklusive gelöschter Werte [-]
X_{min}	Minimaler Verhältn iswert im Zeitintervall [-]
z	Längenabhängigkeit der Reibungskraft beim Lichtbogen [mm]

α	Variable zur Variation zwischen den verschiedenen Modellen [-]
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante [As/Vm]
Θ	Temperatur [°C]
λ	Viskosität [Pa s]
$\lambda = \frac{\kappa}{\rho c_v}$	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
κ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
μ_0	Permeabilität [Vs/Am]
ρ	Dichte[kg/m ³]
ρ_c	Elektrische Ladungsdichte [C/m ²]
Σ	Signale von Spannung und Strom [V oder A]
σ	elektrische Leitfähigkeit [S/m]
σ_s	Stefan Boltzmann Konstante [W/(m ² K ⁴)]
τ	Lichtbogenzeitkonstante [s]
Φ	Abhängigkeit der Wellenlänge von magnetischer Kraft
ω	Frequenz [1/s]

Akronyme

LfM	Lehrstuhl für Metallurgie
HPSR	Hydrogen Plasma Smelting Reduction
FCVA	filtered cathodic vacuum arc
ASI	Arc stability index
MHD	Magnetohydrodynamik
EU	Europäische Union

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Abhängigkeit der Enthalpie vom Gas und der Temperatur [9,10]	4
Abbildung 2-2: Lichtbogenentstehung in der HPSR [9]	5
Abbildung 2-3: Kennlinie eines stabilen Lichtbogens [12].....	6
Abbildung 2-4: Lichtbogenkennlinie mit Arbeitspunkten [12]	7
Abbildung 2-5: Simulation von Lichtbögen – links = stabil; rechts = instabil [17].....	12
Abbildung 2-6: Abhängigkeit des selbstinduzierten Magnetfeldes über y [23]	13
Abbildung 2-7: Elektroden nach Verwendung (a) mit Gas durch die Hohlkathode, (b) ohne Gas durch die Hohlkathode [26]	15
Abbildung 2-8: Rogowski Spulen [31]	18
Abbildung 2-9: Messung der Lichtbogenstabilität mittels 3D-Hall-Sensor – Aufbaudarstellung [5]	19
Abbildung 2-10: Messung mittels Hall-Sensor [5].....	20
Abbildung 2-11: Geräuschpegel (braun), ASI (blau) [5].....	20
Abbildung 2-12: Blockdiagrammaufstellung des Konverters mit den Spulen [35]	22
Abbildung 2-13: FCVA (filtered cathodic vacuum arc) System [39]	24
Abbildung 2-14: Magnetfeld der FCVA [39]	25
Abbildung 3-1: Stahltiegel mit Stahlpin.....	27
Abbildung 3-2: Hohlkathode.....	28
Abbildung 3-3: Erzchargiersystem [1]	28
Abbildung 3-4: Kamera Axis-Q1775 [1].....	29
Abbildung 3-5: Aufbau Plasmette.....	31
Abbildung 3-6: schematischer HPSR Aufbau: hohle Graphitelektrode (1), Feuerfestring (2), Zündstift (3), Tiegel (4), Bodenelektrode (5), Feuerfestmaterial (6), Elektrodenhalterung mit Kühlsystem (7), vier Öffnungen für Abgasstutzen, Manometer, Plasma Beobachtung, seitliche Wasserstofflanze (8), Deckel mit Feuerfestauskleidung und Kühlsystem (9),	

Stahlrohr für die Gaszufuhr und kontinuierliche Chargierung von Erz (10), Sichtfenster für Kamerasystem (11)	32
Abbildung 3-7: Feuerfestring und Tiegel mit 25 g Erz	33
Abbildung 3-8: Flussdiagramm für den Versuchsablauf [40]	35
Abbildung 3-9: Rohdaten erstellt durch den Datenlogger; 50 %Ar/50 %N ₂	38
Abbildung 3-10: Ende des Versuches; 50 %Ar/50 %N ₂	38
Abbildung 3-11: Strom und Spannungsverlauf der Plasmette bei Durchführung des Versuches	39
Abbildung 3-12: Flussdiagramm des Entscheidungskriteriums in Formel (3-3)	41
Abbildung 3-13: Auswertungsgrafiken basierend auf dem Mittelwert der Spannung	42
Abbildung 3-14: Auswertungsgrafik der Differenz Min/Max und Differenz der Spannung	43
Abbildung 3-15: Auswertungsdatei 60%N ₂ /40%H ₂ LS1 3,5 cm	44
Abbildung 3-16: 3 Dimensionale Delta Min Max Diagramme – (a) Gaszusammensetzung; (b) Kontinuierliche Versuche	45
Abbildung 3-17: 3 Dimensionale Delta Spannung Diagramme – (a) Gaszusammensetzung; (b) Kontinuierliche Versuche	45
Abbildung 3-18: Stabilitätsfelder Delta Spannung – (a) Verschiedene Gase, (b) Gasmischungen	46
Abbildung 3-19: Stabilitätsfelder Delta Min-Max (a) – Verschiedene Gase, (b) Gasmischungen	46
Abbildung 3-20: Versuch ZC006c1.2H3Ar um das Diagramm zu erklären	47
Abbildung 4-1: Stabil Brennender Lichtbogen [1]	52
Abbildung 4-2: Instabil Brennender Lichtbogen [1].....	52
Abbildung 4-3: Delta Spannung – Verschiedene Gase	65
Abbildung 4-4: Delta Min-Max – Verschiedene Gase	66
Abbildung 4-5: Delta Spannung – Gasmischungen.....	67
Abbildung 4-6: Delta Min-Max Gasmischungen	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsauflistung	36
Tabelle 2: Erklärung Versuchsbezeichnung kontinuierlicher Versuche.....	36
Tabelle 3: Zeitabschnitte der kontinuierlichen Versuche	40
Tabelle 4: Stabile Versuche	49
Tabelle 5: Instabile Versuche	53
Tabelle 6: Kontinuierliche Versuchsauswertung.....	56
Tabelle 7: Auswahl von Ergebnissen von Gasgemischen mit kontinuierlicher Erzchargierung.....	58
Tabelle 8: Vergleichstabelle ohne Erzchargierung	59
Tabelle 9: Ergebnisse Oberflächendiagramme	61
Tabelle 10: Farbgebung in den folgenden Diagrammen.....	64
Tabelle 11: Excel Auswertung der Versuche.....	1
Tabelle 12: Oberflächendiagramme Delta Min-Max und Delta Spannung	36
Tabelle 13: Delta Spannung – Verschiedene Gase.....	39
Tabelle 14: Delta Min-Max – Verschiedene Gase	39
Tabelle 15: Delta Spannung – Gasmischungen	40
Tabelle 16: Delta Min-Max Gasmischungen.....	41

1 Einleitung

Um die globale Erwärmung von 2010 bis 2050 auf 1,5 °C zu limitieren, hat es sich die EU zum Ziel gesetzt, die CO₂ Emissionen in dieser Zeitspanne um bis zu 90 % zu verringern. Da die Erzeugung von Roheisen für die Stahlerzeugung im EU-Raum derzeit noch hauptsächlich auf Hochtemperaturprozesse mit fossilen Brennstoffen wie Kohle und Koks beschränkt ist, kommt der Eisen- und Stahlindustrie als einer der Hauptemittenten dabei eine entscheidende Rolle zu. [2] Im Jahr 2018 kamen 8 % aller CO₂-Emissionen weltweit von der Eisen- und Stahlindustrie [1]. Um diese in der Roheisenproduktion zu verringern, gibt es schon länger Bestrebungen, Erze mittels Wasserstoff zu reduzieren, da dabei als Nebenprodukt klimaneutrales Wasser entsteht. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Reduktion mit Wasserstoff die Schritte Pelletieren, Sintern und Kokserzeugung fehlen, gibt es laut Sabat et. al. [3] bei dieser Form der Roheisenerzeugung einen wesentlich geringeren Energiebedarf als bei der herkömmlichen Route. Für die Integration von Wasserstoff in die Roheisenerzeugung gibt es mehrere Versuchsaggregate, um die Erzreduktion mittels Wasserstoff-Plasma zu untersuchen. [3] Da der Energiebedarf der HPSR ohnehin sehr hoch ist, ist es nötig mit einem optimalen Versuchsablauf durch Wahl geeigneter Parameter zu gewährleisten. Um den Energiebedarf der HPSR so gering wie möglich zu halten, ist es nötig, dass der Lichtbogen ausreichend stabil ist. Durch einen stabilen Lichtbogen kann auch das Abreißen des Lichtbogens verhindert werden. Auf die Lichtbogenstabilität kann dabei mit unterschiedlichen Methoden, wie zum Beispiel, dem Einbau von wassergekühlten Rohren um den Lichtbogen [4], der Stabilisierung des Lichtbogens mittels eines äußeren Magnetfeldes [5] und vielen weiteren, im Laufe dieser Arbeit aufgezeigten Mitteln Einfluss genommen werden. Zurzeit ist das Verhalten des Lichtbogens, unabhängig von jeglichen Versuchsparametern, in der HPSR weitgehend unbekannt. Im Laufe dieser Arbeit wird

durch eine Literaturrecherche ein besseres Verständnis für die möglichen stabilisierenden Mechanismen des Lichtbogens erreicht. Durch die Durchführung diverser Versuche erfolgte die Erstellung eines Datensatzes an Werten unter verschiedenen Bedingungen. Mit diesen erfolgte die Erzeugung Matrix zur Vergleichbarkeit der Versuche welche ähnliche Versuchsparameter aufweisen. Diese Matrix sollte sowohl rechnerisch durchführbar sein, sowie auch visuell darstellbar.

2 Theoretischer Teil

Das Grundprinzip der Hydrogen Plasma Smelting Reduction (HPSR) ist das Schmelzen und Reduzieren von Eisenerzen mittels Gleichstromlichtbogen in einem Wasserstoff-Argon Plasma. Der Lichtbogen bildet sich zwischen der Kathode und der Anode aus und sollte zur Energie- und Kostenminimierung möglichst stabil sein, um den Prozess möglichst effektiv durchführen zu können. [6–8] Die Stabilität ist jedoch von vielen Einflüssen abhängig, und die Messung dabei ist nicht immer einfach. In diesem Teil der Arbeit erfolgt die Erläuterung der Entstehung, der Stabilisierung und der Messmethoden eines solchen Lichtbogens.

2.1 Lichtbogenentstehung und Plasmaentstehung in der HPSR

Das in der HPSR generierte Plasma ist ein thermisches Hochtemperaturplasma mit einer Elektronentemperatur von 2×10^4 K. Dabei wird das eingeblasene Gas (Mischung aus Argon und Wasserstoff) durch den Lichtbogen ionisiert. Zu beachten ist, dass dieses Gas nur partiell ionisiert ist, somit sind sowohl Ionen, Elektronen als auch neutrale Atome vorhanden. Alle diese Spezies besitzen eine unterschiedliche Enthalpie, welche sich sowohl mit der Temperatur als auch mit der Anzahl der Atome des Gasmoleküls ändert. Der Unterschied ist hier besonders gut im Vergleich von einatomigen oder mehratomigen Gasen zu erkennen. Prinzipiell besitzen einatomige Gasmoleküle bei gleicher Temperatur einen geringeren Wärmehalt als mehratomige. Dieser Umstand ist in **Abbildung 2-1** dargestellt. Aus der Abbildung ist ablesbar, dass einatomige Gasmoleküle, bei gleicher Temperatur, eine deutlich

niedrigere Enthalpie besitzen als mehratomige Gasmoleküle. Der Grund dafür liegt in der negativen Reaktionsenthalpie für die Dissoziation der zweiatomigen Gasmoleküle. [9,10]

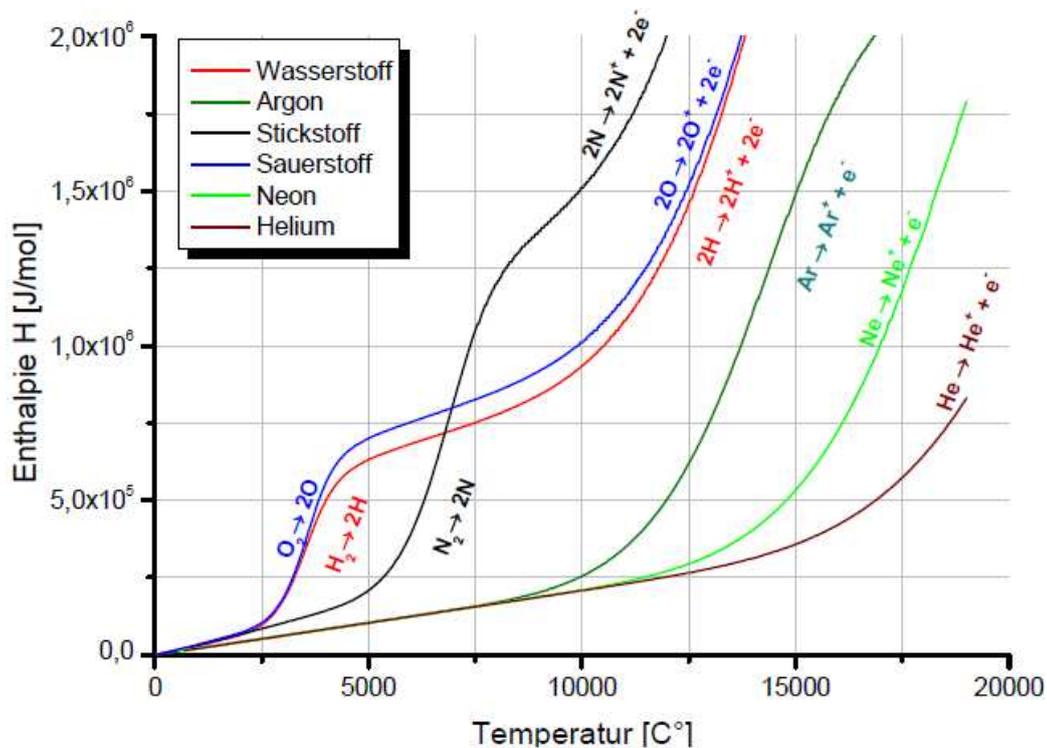


Abbildung 2-1: Abhängigkeit der Enthalpie vom Gas und der Temperatur [9,10]

Während die Aufspaltung von Sauerstoff und Wasserstoff bereits bei Temperaturen um 2500 °C beginnt und bei ungefähr 5000 °C endet, zerfällt Stickstoff hingegen erst ab 5000 °C und die Ionisation beginnt bei 9000 °C. Die Ionisation der einatomigen Gase Argon, Neon und Helium ab 10000 °C ist begründend für den starken Anstieg ihres Wärmeinhalts ab jener Temperatur. Einatomige Gase wie Argon müssen vor der Ionisation nicht erst dissoziiert werden, zweiatomige Gase hingegen schon. Atomarer Wasserstoff sowie atomarer Stickstoff führen ab 3000 K zu einem deutlich höheren Energieinhalt des Gases, da sie zu dissoziieren beginnen. Grundsätzlich hat diese Eigenschaften somit maßgebenden Einfluss auf die Hydrogen Plasma Smelting Reduction (HPSR). Durch das Zufügen von Wasserstoff in den Prozess kann die Enthalpie des Plasmas entscheidend erhöht werden. Der größere Wärmeinhalt des Plasmas führt zu einem gesteigerten Energietransfer vom Plasma auf das Schmelzgut und ermöglicht somit eine Verbesserung der Schmelzleistung. Im Vergleich dazu besitzt Argon eine eher geringe Enthalpie, wodurch der Vorteil einer geringen Ionisationstemperatur erhalten wird und somit weniger Energie zur Zündung des Lichtbogens bereitgestellt werden muss. Der Umstand der geringeren Ionisationstemperatur des Argons

ermöglicht es in Kombination mit dem Anstieg der Enthalpie durch Wasserstoff, den Lichtbogen leichter zu zünden und stabil zu halten. [9,10]

Im Grunde ist das sich ausbildende Plasma ein ionisiertes Gas und wird oft als vierter Aggregatzustand bezeichnet [11]. **Abbildung 2-2** stellt schematisch einen übertragenen Plasmalichtbogen dar. Dieser startet bei der Kathode (-) und geht zur Anode (+). Die Geometrie des Lichtbogens hängt von der Gasgeschwindigkeit, der Art des Gases, der elektrischen Energie, der Spannung (Abstand zwischen Kathode und Anode) und dem Elektrodenmaterial ab. [9,10]

Das Plasma selbst wird gezündet, indem man die Kathode (Grafithohlkathode) und die Anode (zu Beginn Stahlstift, dann Schlacke in flüssiger Form) in Kontakt miteinander bringt. Es resultiert zunächst ein Kurzschluss, welcher den Widerstand sehr gering werden lässt. Dadurch fällt keine Spannung ab und der fließende Strom wird beinahe unendlich groß, was zu einer enormen Erwärmung führt. Dieser Temperaturanstieg führt zur thermischen Emission von Elektronen aus der Kathode und einer Verdampfung und Ionisation des Elektrodenmaterials. Der hierdurch entstehende Lichtbogen kann dadurch bei ausreichender Stromgröße durch verändern des Abstandes der Elektrode zum Metallbad vergrößert und verkleinert werden. [4]

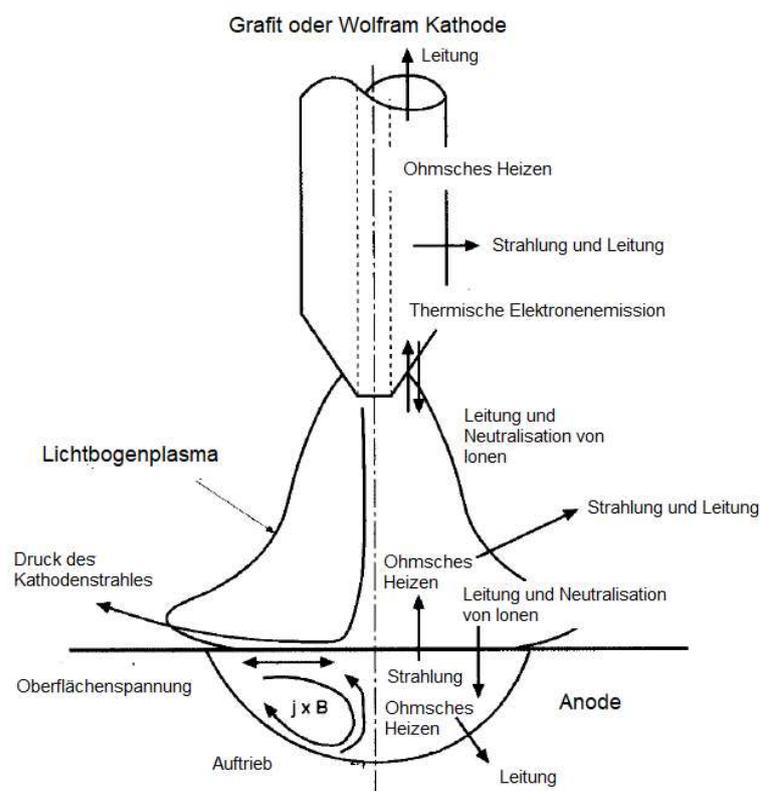


Abbildung 2-2: Lichtbogenentstehung in der HPSR [9]

2.1.1 Stabiler und Instabiler Lichtbogen

Ein stabiler Lichtbogen tritt auf, wenn er zentriert brennt und die Position nicht weitreichend verändert. Strom und Spannung werden dabei durchgehend eher konstant gehalten. [1] Ein instabiler Lichtbogen springt hingegen umher. Weder Strom noch Spannung können dabei konstant gehalten werden. Wenn sich die beiden im Verhältnis so weitreichend verändern, erlischt der Lichtbogen vollends. Beispielhaft sind dabei in **Abbildung 2-3** die Kennlinien eines stabil freibrennenden Lichtbogens dargestellt. Wenn sowohl Strom als auch Spannung zu klein sind, kann ohnehin kein Lichtbogen existieren. Bei Annäherung an die Minimalspannung und den Minimalstrom kann dieser nur sehr kurz und instabil brennen. Dabei ist aber kein Plasma vorhanden, weshalb der Lichtbogen selbst nur instabil brennt. Erst bei ausreichend Strom und Spannung kann der Lichtbogen sich stabil ausbilden. Somit ist der stabile Bogen von der Quellspannung und der Last abhängig. [12]

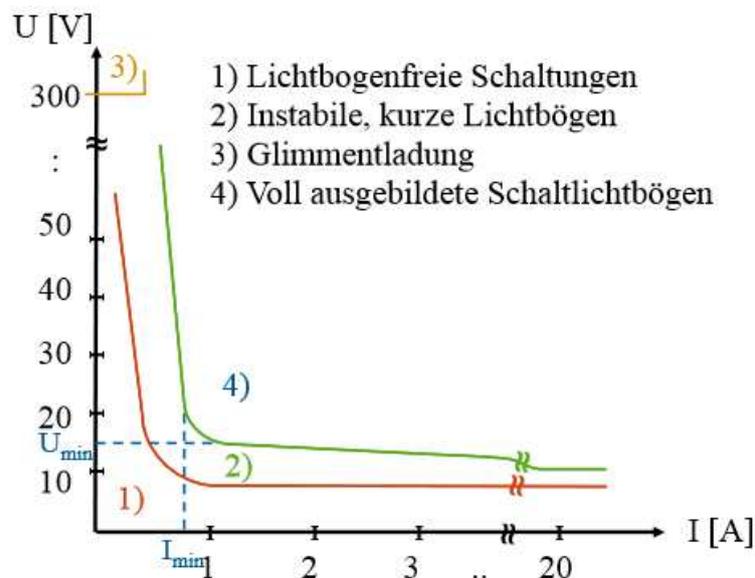


Abbildung 2-3: Kennlinie eines stabilen Lichtbogens [12]

Abbildung 2-4 gibt die graphische Darstellung der Arbeitspunkte eines Lichtbogens. Dabei sind zwei Punkte möglich. AP1 ist der stabile Arbeitspunkt. Durch Erhöhung des Stromes ist im Bogen eine höhere Spannung nötig wodurch auch der Widerstand ansteigt. Durch diesen Anstieg ist der äußere Eintrag von Leistung und Spannung zu gering wodurch der Strom wieder auf AP1 absinkt. AP2 hingegen ist der instabile Arbeitspunkt. Durch Erhöhung des Stromes kommt es zu einem Spannungsüberschuss, wodurch die Stromstärke auf AP1 ansteigt. Durch Reduzierung des Stromes erhöht sich der Spannungsbedarf so weit, dass der Strom so weit absinkt, bis der Lichtbogen erlischt. Durch

eine Verlängerung des Lichtbogens wird der Spannungsbedarf erhöht, was in der nachfolgenden Abbildung zur Verschiebung der Kennlinien führt. Bei der Erzeugung eines Berührungspunktes der Lichtbogen und Widerstandsgerade ist die Abreißlänge des Lichtbogens erreicht. Bei weiterer Verlängerung wird dieser wieder instabil und erlischt vollends. [12]

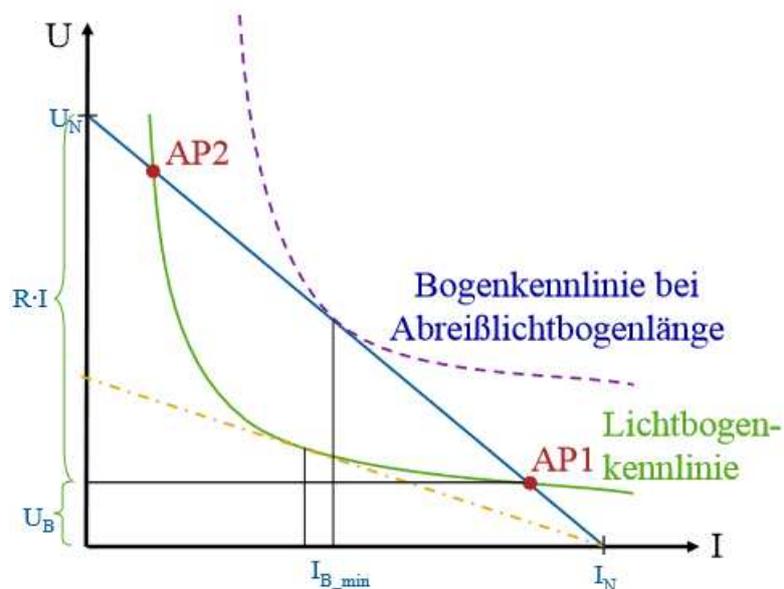


Abbildung 2-4: Lichtbogenkennlinie mit Arbeitspunkten [12]

2.1.2 Beschreibung des Lichtbogens mittels verschiedener Modelle und Gleichungen der Thermodynamik

In vielen theoretischen Betrachtungen wird der elektrische Lichtbogen als schwarzer Körper angenommen. Aufgrund dessen gelten dabei die Grundgesetze der Thermodynamik und der Wärmetechnik. [13]

Dabei sind die führenden Gleichungen jene von Faraday, Ampere, die reduzierten Maxwell-Gleichungen und die Energiegleichgewichte. Während für den Stromfluss das Ohm'sche Gesetz herangezogen wird, kommt beim Wärmefluss das Fourier'sche Gesetz (2-5) zum Zug. Die Berechnung des Strahlungsverlustes an sich erfolgt unter der Zuhilfenahme des Stefan-Boltzmann-Gesetz (2-6). Gleichung (2-2) ist das Amper'sche Gesetz oder auch der Durchflutungssatz. Mit (2-1) wird das Farady'sche Induktionsgesetz beschrieben. [14] Formel (2-3) stellt den Energieerhaltungssatz dar, (2-4) das Ohm'sche Gesetz. In (2-5) ist das Fourier'sche Gesetz angeführt.

$$\partial_t \mathbf{B} - \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} \quad (2-2)$$

$$\partial_t \mathbf{e} + \nabla \cdot \mathbf{q}_W = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - r \quad (2-3)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(T) \mathbf{E} \quad (2-4)$$

$$\mathbf{q}_W = -\kappa(T) \nabla(T) \quad (2-5)$$

$$r = \sigma_s T^4 \quad (2-6)$$

Wie bereits bei der Lichtbogenentstehung erwähnt, hängen dessen Eigenschaften von vielen Faktoren ab. Diese sind zum Beispiel Gasdruck, Gasart, Elektrodenmaterial, Geometrie, Position der Elektroden und der Elektrodenabstand. Nach Nottingham ist der Lichtbogen mit konstanter Länge beschreibbar durch die nachfolgende **Formel (2-7)**. Dabei ist die Variable n durch keinen Wert genau bestimmt, da im Lichtbogen ständig verschiedene Phänomene auftreten. [15]

$$v_L = A + \frac{B}{i^n} \quad (2-7)$$

Im Folgenden sollen beispielhaft zwei Modelle zur Beschreibung des Lichtbogens genauer betrachtet werden.

2.1.2.1 Cassie-Mayr-Modell

Das zusammengesetzte Cassie-Mayr Modell kann als Netzwerkelement benutzt werden, um die wichtigsten Lichtbogeneigenschaften zu beschreiben. Dabei unterliegt der Lichtbogenwiderstand R_{arc} der Betrachtung als dynamische Variable nach folgender **Gleichung (2-8)**. [13]

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} \left(1 - \frac{U_{arc} I_{arc}}{P_V} \right) \quad (2-8)$$

Dieses Modell ist nicht-linear, dynamisch und stellt eine Beziehung zwischen Lichtbogenspannung und Strom her [15], wobei die anderen zwei Parameter zeitabhängig sind und für Berechnungen in jedem Spannungszyklus zwei Mal angepasst werden sollten [16]. Die beiden Variablen τ und P_V sind außerdem abhängig vom Lichtbogenstrom und der Lichtbogenspannung. [17].

Die physikalische Grundidee der **Formel (2-8)** liegt darin, dass der Lichtbogen durch den Strom soweit aufgeheizt wird, bis er den stabilen Zustand nach der Leistung in **(2-9)** erreicht. [13]

$$P=U_{\text{arc}} \cdot I_{\text{arc}} \quad (2-9)$$

Der Energieverlust des Lichtbogens wird beschrieben durch folgende Gleichung: [13]

$$P=P_0 R_{\text{arc}}^{\alpha} \quad (2-10)$$

Grundsätzlich besteht das Cassie-Mayr Modell aus zwei eigenständigen Annahmen. Während das Mayr Model all jene Lichtbögen behandelt, bei welchen der Temperaturverlust nur von der Lichtbogengrenze ausgeht, die Leitfähigkeit sich mit dem Energieinhalt verändert [15], welche niedrig mit Strom ($I_{\text{arc}} \leq 5 \text{ kA}$) belastet sind und mit einem Wert von $\alpha = 0$ korrespondieren, befasst sich das Cassie Modell mit hochamperigen ($I_{\text{arc}} \geq 5 \text{ kA}$) Lichtbögen mit $\alpha = 1$. [13,18,19] Das dargestellte Lichtbogenmodell von Cassie behandelt den Lichtbogen mit einer konstanten Stromdichte, so dass dessen Querschnitt proportional zum Strom variiert. [15]

2.1.2.2 Das Modell der Magnetohydrodynamik

Diese Methode zur Beschreibung des Lichtbogens beinhaltet dreidimensionale Simulationen, mit denen es möglich ist, realistische, den Lichtbogen beschreibende Parameter zu erhalten. Die daraus erhaltenen Werte können wieder in das oben beschriebene Cassie-Mayr-Modell eingesetzt werden, um dadurch sowohl ein qualitatives als auch ein quantitatives Ergebnis zu erhalten. **Abbildung 2-5** zeigt das Ergebnis der Lichtbogensimulation, welches aus der MHD (Magnetohydrodynamik) erhalten wird. [17,18]

Als Grundlage für Simulationen in der Magnetohydrodynamik dienen die nachfolgenden vier großen Gleichungsgruppen. Diese sind: [20]

- Gleichungen zur Flüssigkeitsbewegung,
- Gleichungen, welche sich auf das elektrische Feld beziehen
- Zustandsgleichungen und
- Stoffgesetze

Gleichungen zur Beschreibung der Flüssigkeitsbewegung sind: Die Navier-Stokes Gleichung setzt sich zusammen aus den Termen der Änderung des Geschwindigkeitsfeldes ($\rho \cdot \frac{du}{dt}$), die Änderung des Druckes ∇p , der Änderung des Geschwindigkeitsfeldes entlang der Feldlinien $\nabla [\lambda(\nabla u)]$, der Deformationsrate des Fluidelements $\nabla \cdot (2\mu D)$ und aus externen Kräften wie der Schwerkraft und der Lorentzkraft $\rho g + \rho \frac{e}{m_e} (E + u \times B)$. Die Energieerhaltung aus (2-13) beinhaltet in gegebener Reihenfolge Terme für die Temperaturänderungsrate, dem Wärmefluss aus dem Element, der Wärmeeintrag durch Deformation und den Quellterm.

$$\text{Kontinuitätsgleichung} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2-11)$$

$$\text{Navier-Stokes Gleichung} \quad \rho \cdot \frac{du}{dt} = -\nabla p + \nabla [\lambda(\nabla u)] + \nabla \cdot (2\mu D) - \rho g + \rho \frac{e}{m_e} (E + u \times B) \quad (2-12)$$

$$\text{Energieerhaltung} \quad \rho c_p \frac{d\theta}{dt} = \kappa \Delta \theta + \nabla \theta \cdot \nabla \kappa + T \quad (2-13)$$

Die Beschreibung des elektrischen Feldes erfolgt durch das Gauss'sche Gesetz, das Faraday Gesetz und das Gesetz von Ampere.

$$\text{Gauss'sches Gesetz} \quad \nabla \cdot D = \rho_c \quad (2-14)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-15)$$

$$\text{Faraday'sches Gesetz} \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-16)$$

$$\text{Amper'sches Gesetz} \quad \nabla \times B = \mu_0 [J_f + \rho_c u + \frac{\partial D}{\partial t} + \nabla \times (P \times u)] \quad (2-17)$$

Für die Zustandsgleichungen sind das Gasgesetz und das Gesetz von Saha in Verwendung.

$$\text{Gasgesetz} \quad p = c_g \rho \theta \quad (2-18)$$

$$\text{Gleichung von Saha} \quad \frac{\rho_c}{\rho} n_e \left(1 + \frac{n_e}{n_a}\right) = \left[\frac{2g}{g_a}\right] \cdot \frac{(2\pi m_e k\theta)^3}{h^3} \cdot e^{-\frac{A_i}{k\theta}} \quad (2-19)$$

Als Stoffgesetze kommen folgende Gleichungen zur Anwendung: Dabei ist **(2-20)** die erste Lamé-Konstante, **(2-23)** erneut die Lorentz-Kraft und **(2-22)** beschreibt die Einflüsse durch das Magnetfeld.

$$3\lambda + 2\mu \geq 0 \quad \text{mit } \mu \geq 0 \quad (2-20)$$

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2-21)$$

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad (2-22)$$

$$F_L = q (E + u \times B) \quad (2-23)$$

Die Formeln **(2-11)** bis **(2-23)** ergeben im Zusammenhang mit entsprechenden Randbedingungen an der Kathode und der Anode sowie den Anfangsbedingungen die Grundlage für die Simulation eines Lichtbogens mit der Magnetohydrodynamik. [20]

2.1.3 Einflusskriterien auf die Lichtbogenstabilität

Für die Metallerzeugung mittels Lichtbogen ist es wichtig, einen möglichst stabilen Lichtbogen zu erzeugen. Dadurch wird der Leistungseintrag, bei gegebenem Energieeintrag, maximal. Um einen möglichst stabilen Zustand zu erzielen, gilt es, jene Faktoren zu berücksichtigen, welche einen großen Einfluss auf die Stabilität nehmen. Zur Illustration dient **Abbildung 2-5**, welche die Simulationsergebnisse eines stabilen Lichtbogens links und die eines instabilen rechts zeigt.

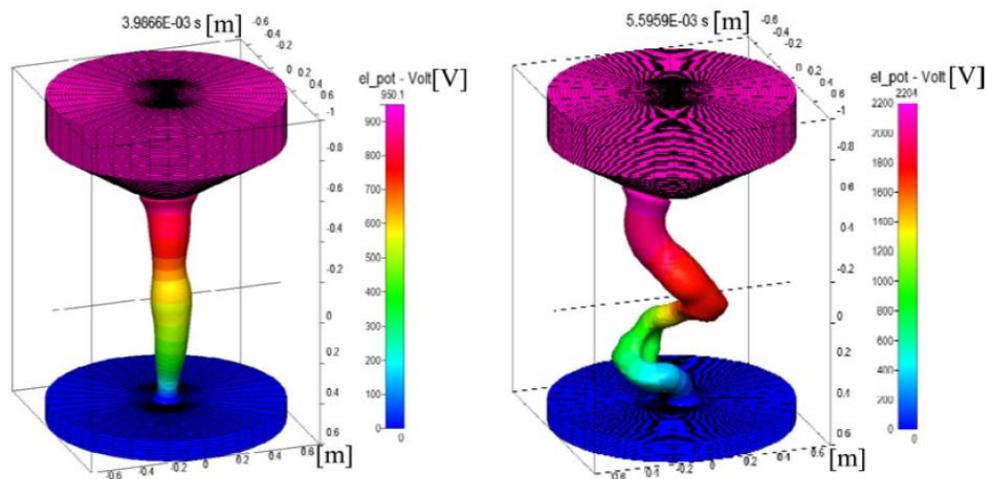


Abbildung 2-5: Simulation von Lichtbögen – links = stabil; rechts = instabil [17]

Die Faktoren, welche einen Lichtbogen und dessen stabile Ausbildung beeinflussen, sind sehr vielseitig und beinhalten:

- Externe Kreislaufresistenz am Arbeitspunkt
- Gleichstrom/Wechselstrom
- Art des selbstinduzierten Magnetfeldes
- Art des Aggregates
- Magnetische Felder in der Umgebung
- Geometrie der Lichtbogenkammer
- Form und Zustand der Elektrode
- Eingebrachter Strom
- Eingebachte Spannung
- Gaszusammensetzung der Aggregatkammer

2.1.3.1 Spannung und Strom

Zu Beginn sei anzumerken, dass zum Erreichen eines stabilen Lichtbogens die externe Kreislaufresistenz sowie die Änderung der Spannung über den zeitlich veränderbaren Strom des Lichtbogens und die Volt-Ampere-Charakteristik am Arbeitspunkt positiv sein müssen. Der minimale Strom für einen stabilen Lichtbogen ist durch den Punkt definiert, an dem die Änderung der Spannung über den zeitlich änderbaren Strom unendlich wird. Der Stromwert für eine Kohlenstoffkathode wurde dabei zu 0,01 A ermittelt. [21] Die Kontrolle der Lichtbogenenspannung selbst erfolgt durch den Abstand zwischen der Kathode und der Anode, während der Strom durch Thyristoren konstant gehalten wird. Nichtsdestotrotz ist es nicht möglich, die Spannungsschwankungen durch die Einstellung der Kathodenhöhe zu kompensieren und einzustellen. [22] Der stationär abgelenkte Lichtbogen wird hauptsächlich von einer die Destabilisierung begünstigenden Komponente in Form des selbstinduzierten Magnetfeldes, einer Stabilitätskraft, hervorgerufen zum Beispiel durch stabilisierende Wände

und asymmetrisches Heizen und Kühlen und der Reibungskraft **(2-25)** des Gasflusses beeinflusst. [23]

2.1.3.2 Magnetfeld

Das selbstinduzierte Magnetfeld bei freibrennenden Lichtbögen wird hervorgerufen durch die magnetische Kraft **(2-24)** bezogen auf den Durchmesser. Das Maximum der wellenlängenabhängigen, selbstinduzierten magnetischen Kraft $\Phi(y)$ liegt bei einem Wert für $y = 0,6$, welcher von dem Radius des Lichtbogens sowie der Wellenlänge λ der helixförmigen Instabilität abhängig ist. Dieser Sachverhalt ist in **Abbildung 2-6** dargestellt. [23]

$$F_m^* = \mu_0 j^2 R^2 a \pi \Phi(y) \quad (2-24)$$

$$F_v^* = -\eta (v^*) z \quad (2-25)$$

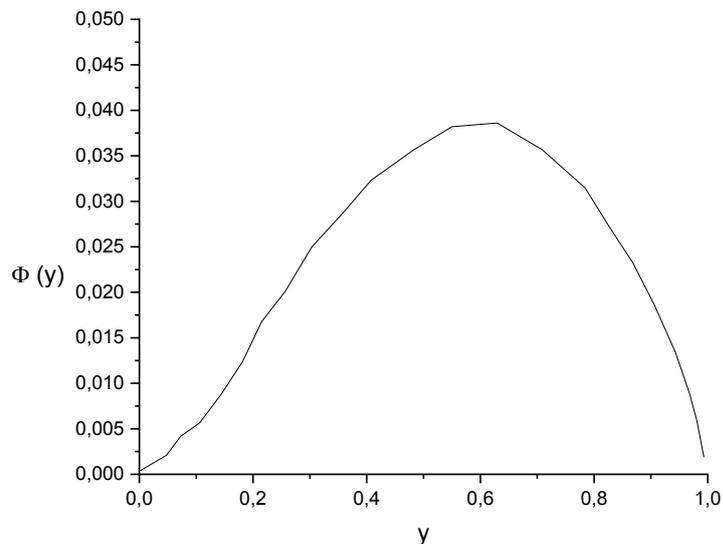


Abbildung 2-6: Abhängigkeit des selbstinduzierten Magnetfeldes über y [23]

Grundsätzlich wird der elektrische Lichtbogen nach folgenden **Formeln (2-26)** und **(2-27)** beschrieben. Diese beiden besitzen Unstetigkeitsstellen. Dabei ist festzustellen, dass die Stabilität des Lichtbogens durch äußere Einflüsse und die Art der Wärmezufuhr beeinflussbar ist. Die Temperaturleitfähigkeit wird dabei als konstant angenommen. B^φ wird nie 0 und hängt wie auch alle weiteren Werte vom Radius ab. [14]

$$\partial_t B^\varphi = \partial_r \left(\frac{1}{r \sigma(T)} \partial_r (r B^\varphi) \right) \quad (2-26)$$

$$\partial_t T = \frac{1}{r} \partial_r (r, \lambda, \partial_r, T) + \frac{1}{\rho c_v \sigma(T) r^2} (\partial_r (r B^\varphi))^2 \quad (2-27)$$

Weiters führen starke magnetische Felder in der Nähe eines Lichtbogens zu einer großen Variation im Bereich der Lichtbogeninstabilitäten. Dadurch ist es möglich, mittels integrierter magnetischer Messeinheiten die Lichtbogenstabilität ermitteln zu können. Eine weitere Erläuterung erfolgt in *Unterpunkt 2.2.* [5]

2.1.3.3 Aggregateinstellungen

Auch die Geometrie, bezugnehmend auf die Elektroden und die Lichtbogenkammer selbst, hat einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität des ausgebildeten Lichtbogens. Durch ein gleichmäßiges Brennen des Lichtbogens wird in weiterer Folge auch der Verschleiß der Elektrode und somit direkt deren Oberflächenqualität beeinflusst. [21] Geringerer Elektrodenverbrauch führt daher zu einer gleichmäßigeren Oberfläche und begünstigt somit eine stabilere Lichtbogenführung. [24] Der Verbrauch der Elektrode tritt dabei immer durch seitliche Oxidation auf und kann durch die Implementierung von Kühlsystemen, wie Kühlringen oder der automatischen Kühlung mittels Luft und Wasser, minimiert werden [25]. Auch die Art der Elektrode beeinflusst den Lichtbogen während der Schmelzperiode. So konnten Maddever und Segsworth [26] in einem konventionellen Lichtbogenofen durch die Verwendung gasgespülter Hohlkathoden eine stabile Plasmaflamme erzeugen. Durch die Verwendung solcher Hohlkathoden erhöht sich der Verschleiß der Kathode im Schmelzprozess um 10 %. Dies ist ein Resultat des Kamineffektes bei Durchmessern von ca. 5 – 10 cm. Das Eindüsen inerte Gase durch die Hohlkathode in das Aggregat kann den Kamineffekt verhindern, wodurch der Elektrodenverbrauch wieder sinkt. Ebenso führt eine gesteigerte Gasdurchflussrate von Argon zu einer Verbesserung der Lichtbogenleitfähigkeit und somit zu einem elektrisch und akustisch ruhigeren Ofengang im Vergleich zu Vollkathoden. Der Elektrodenverbrauch kann sowohl durch das Wiegen der Elektrode vor und nach dem Prozess als auch durch visuelle Begutachtung charakterisiert werden. (**Abbildung 2-7**). [26]



Abbildung 2-7: Elektroden nach Verwendung (a) mit Gas durch die Hohlkathode, (b) ohne Gas durch die Hohlkathode [26]

Auch die Charakteristik der vom Stromnetzwerk eingespeisten Spannung nimmt Einfluss auf die Lichtbogenstabilität, da der Lichtbogen selbst als Widerstandselement fungiert. [27] Der Lichtbogenwiderstand ist dabei nach dem Ohm'schen Gesetz das Verhältnis aus Lichtbogenspannung zu Lichtbogenstrom. [17] Wenn die Spannung zunimmt, nehmen dazu proportional auch die Lichtbogenlänge und weitere Geometriefaktoren, wie etwa der Durchmesser, zu. Durch die Vergrößerung des Durchmessers verändert sich die Energiedichte an einer bestimmten Stelle zu kleineren Werten. [27] Ein stabiler Lichtbogen tritt ganz allgemein dann auf, wenn durch die optimale Länge und den passenden Durchmesser des Lichtbogens eine hohe die Spannung einstellt. [28] Durch den Strom, welcher in ein System eingebracht wird, erfolgt die Beeinflussung des Lichtbogens und demzufolge die Menge an Metaldampf, welche in die Aggregatkammer abgegeben wird. Je mehr Metaldampf produziert wird, desto stabiler ist der Lichtbogen und auch die Qualität nimmt damit zu. Auch die Art des Stromes (AC oder DC) nimmt dabei Einfluss auf das Stabilitätsverhalten. Dabei nimmt die Stabilität bei Gleichstrom deutlich zu. [24]

Zu guter Letzt hat auch die Art der vorherrschenden Atmosphäre einen Einfluss auf die Ausbildung des Lichtbogens. Es tritt im Allgemeinen ein stabilerer Lichtbogen auf, wenn eine-Atmosphäre mit einem leicht ionisierbaren Gas vorherrscht. [8]

2.1.4 Lichtbogenstabilitätsindex

Wie bereits erwähnt ist es das Ziel, einen möglichst stabilen Lichtbogen zu erzeugen, um dadurch den Elektrodenverlust und den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten. Um diese Stabilität zu kontrollieren und zu verbessern, ergibt sich die Idee der Bewertung mit Hilfe eines Stabilitätsindexes. Grundsätzlich ist dieser aber auf die Art der Analysemethode abzustimmen, welche in 2.2 genauer erklärt werden.

Formel (2-28) zeigt eine mögliche Beschreibung des Stabilitätsindex nach Vincete [5] aus 2020. Dieser Index stellt die Summe der Energien des Signales über die an die harmonische Zentralfrequenz von 100 Hz direkt angrenzenden Frequenzbänder dar.

$$\text{ASI}(\tau) = \sqrt{\sum_{\omega=\omega_0}^{\omega=\omega_1} X(\tau, \omega)^2 + \sum_{\omega=\omega_2}^{\omega=\omega_3} X(\tau, \omega)^2} \quad (2-28)$$

Die Grundannahme dieses Stabilitätsindex ist, dass in Regionen eines stabilen Lichtbogens eine harmonische Frequenz auftritt, während in instabilen Bereichen eine Dispersion der Frequenz zu beobachten ist. [5]

Ein weiterer möglicher Stabilitätsindex stammt von SeungHun et al. [7] aus 2013. Die Berechnung dieses Index geht im Vergleich zu jenem in **Formel (2-28)** nicht auf die Frequenz und somit das Spektrogramm zurück, sondern auf die Phasenspannung und den Strom. Dieser Rückschluss basiert auf der Prämisse, dass bei einem instabilen Lichtbogen auch die Phasenspannung und der Strom instabil sind. Als Bewertungsindex dient die Leistungsschwankung, welche auf Grund ihrer hohen Sensitivität durch eine Funktion auf Werte zwischen 0 und 1 umgelegt wird. Dadurch ergibt sich eine Abflachung allzu starker Leistungsausschläge. Während sich die eingebrachte Leistung für Gleichstrom einfach als Produkt von Strom und Spannung errechnet, ist für Wechselstrom jeweils der quadratische Mittelwert der Phasenspannungen (**Formel (2-29)**) und der Phasenströme zu verwenden. [7]

$$U_{qu} = \sqrt{\frac{1}{n_a} \cdot \sum_{k=1}^N U_i^2(k)} \quad (2-29)$$

Eine weitere Möglichkeit der Erstellung eines Stabilitätsindex ist über eine Methode bei welcher eine Fourier-Transformation angewandt wird. Dabei wird die Spannung des Transformators über die Totale Harmonische Verzerrung (THD – total harmonic distortion) transformiert. [29] Dabei gibt es jedoch zwei Möglichkeiten mit unterschiedlicher Betrachtungsform. [30]

1. Vergleicht den harmonischen Wellenanteil von Spannung und Strom mit dem Ursprungswert (THD_F, **Formel (2-32)**)
2. Vergleicht den harmonischen Wellenanteil von Spannung und Strom mit ihrem jeweiligen quadratischen Mittelwert (THD_R, **Formel (2-31)**)

Beide Methoden weisen bei sehr geringen Amplituden den nahezu gleichen Wert auf. Je größer die Amplituden werden, desto eklatanter ist auch der Unterschied der Ergebnisse. [30]

$$\text{THD}_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2-30)$$

$$\text{THD}_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (2-31)$$

Die hauptsächlich empfohlene Form der Total Harmonic Distortion stellt die THD_F dar, obwohl die einfacher messbare Form die THD_R ist. Dies liegt dabei den genaueren Messwerten mit geringeren Fehlerquellen zu Grunde. [30] Diese Methode stellt einen praktischen Indikator für das Lichtbogenverhalten hinsichtlich der Stabilität bzw. Instabilität dar und ist dadurch eine geeignete Variable für die mögliche Einstellung von Prozessbedingungen und für die Prozesskontrolle im Allgemeinen. [29]

2.2 Messung der Lichtbogenstabilität

Die Messung der Stabilität eines erzeugten Lichtbogens kann über sehr vielfältige Varianten erfolgen. Dabei kann die Messung sowohl innerhalb oder außerhalb des Reaktors erfolgen.

Die am öftesten verwendete Methode zur Detektion der Lichtbogenstabilität erfolgt über die Messung von Strom und Spannung. Zur berührungslosen Strommessung dient dabei eine Rogowskispule [5]. Dies ist eine Luftkernspule, welche eindeutige Kriterien der Genauigkeit erfüllen muss:

- Die Spannung, welche an den Klemmen induziert wird, muss unabhängig von dem umschlossenen Erregerstromleiter und der gegenseitigen Lage sein.

- Es darf keine Spannung an den Klemmen der Spule infolge des Erregerstromleiters gemessen werden.

Die beiden Kriterien sind umso leichter zu erfüllen je weiter die Spule sich vom leitenden Erreger entfernt befindet. Als einfachste Form der Rogowskispule ist eine Spule mit kreisrundem Querschnitt (**Abbildung 2-8 (a)**) anzubringen. Um die Wirksamkeit jedoch zu vergrößern, gibt es auch Anordnungen von Spulen mit geraden Teilschichten (**Abbildung 2-8 (b)**). [31]

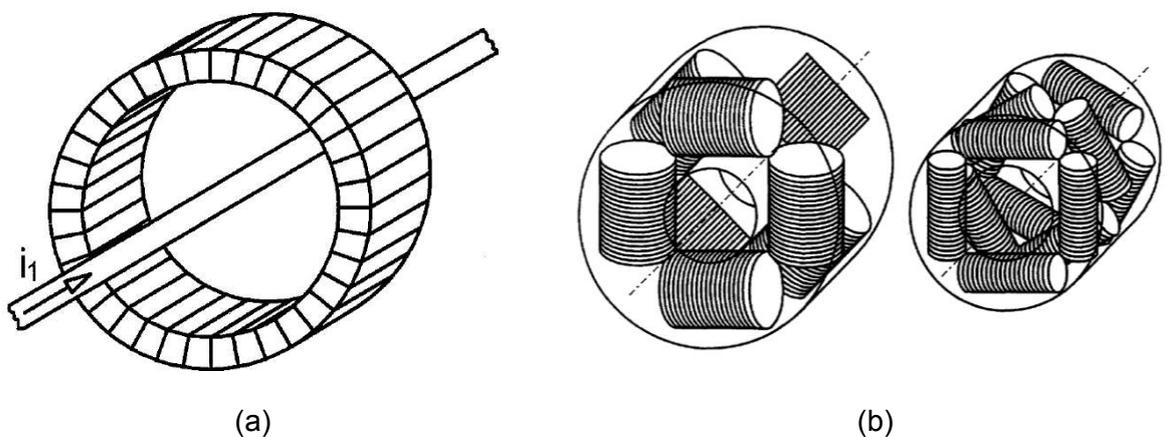


Abbildung 2-8: Rogowski Spulen [31]

Ein wichtiger Aspekt dieser Spulen ist ihre Linearität. Es treten keine Effekte von Sättigung auf und die Gegeninduktion ist unabhängig von dem Strom, der gemessen wird. [32]

Da die Veränderungen im Messstrom durch die Bewegungen des Lichtbogens entstehen, gibt diese Methode der Strommessung bereits sehr guten Aufschluss über die Prozessstabilität. [5]

Weil auch die auftretenden magnetischen Felder in der Nähe eines EAF's Einfluss auf den Lichtbogen haben, besteht eine weitere Möglichkeit der Stabilitätsmessung in deren Detektion mithilfe des Hall-Effektes. Diese Form der Lichtbogenstabilitätsaufnahme ist in **Abbildung 2-9** schematisch dargestellt und eine indirekte Form der Messung, da sie die Energiefehler, welche während des Prozesses auftreten, detektiert. [5]

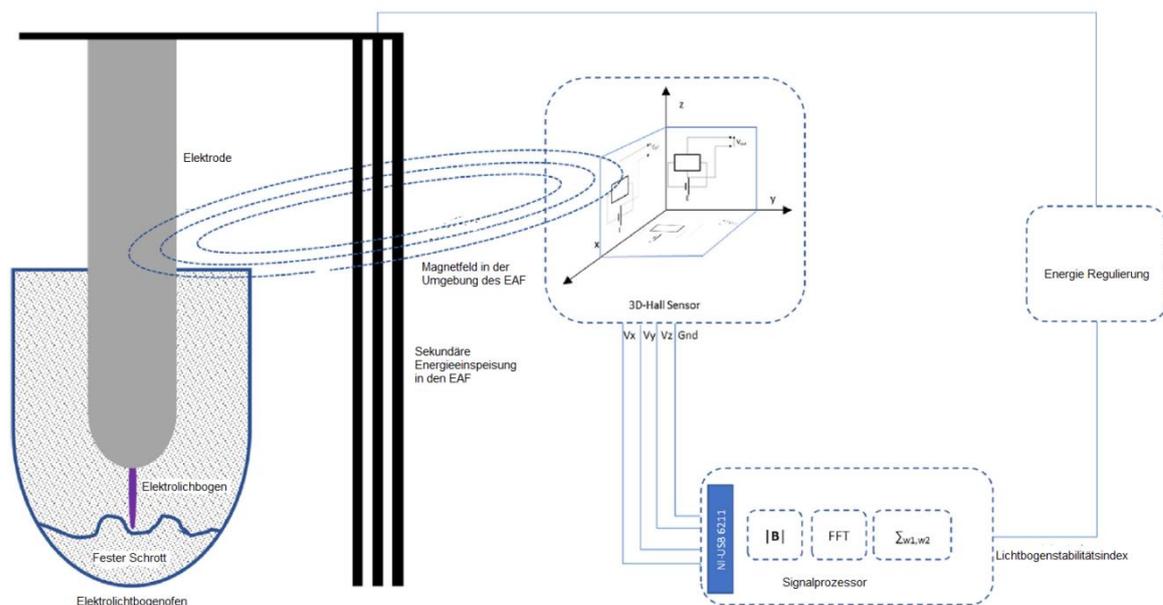


Abbildung 2-9: Messung der Lichtbogenstabilität mittels 3D-Hall-Sensor – Aufbaudarstellung [5]

Die Messungsform, welche in **Abbildung 2-9** dargestellt ist, basiert auf dem magnetischen Feld, welches durch die beiden nachfolgenden Formeln beschrieben wird. **Formel (2-33)** beschreibt dabei die Lorentz-Kraft, welche Grundlage des zur Messung herangezogenen Hall-Effektes ist.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I_{\text{arc}}}{2 \cdot \pi \cdot D} \quad (2-32)$$

$$\vec{F}_L = -q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2-33)$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{outQ}} + \text{Sens} \frac{B_z}{1000} \quad (2-34)$$

Abbildung 2-10 zeigt die schematische Darstellung der Messung. Dabei ist die gemessene Spannung nach **Formel (2-34)** zu berechnen. Für diese Form der Detektion werden je ein 1D-Sensor auf die X0Y, die X0Z und die Y0Z-Ebene aufgebaut. In Summe sind dies dann drei verschiedene Sensoren, wobei jeder die Möglichkeit besitzt, das Magnetfeld in die Richtungen B_x , B_y und B_z zu detektieren. Der Aufbau dieser Sensoren befindet sich direkt an den Leitungen, um das magnetische Feld – d.h. seine Größe und 3D Orientierung – aufzunehmen. [5]

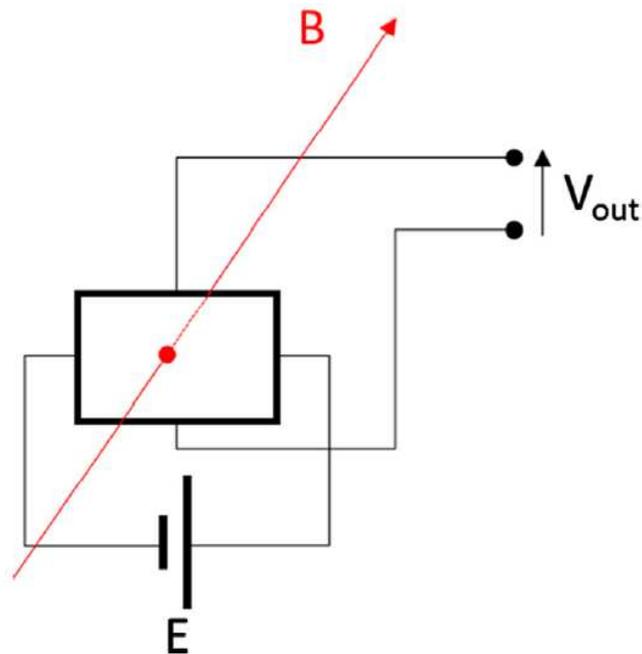


Abbildung 2-10: Messung mittels Hall-Sensor [5]

Eine weitere Methode der Stabilitätsbestimmung ist der Geräuschpegel. Die Lichtbogenstabilität steht im direkten Zusammenhang mit dem Geräuschpegel im EAF. [21] Durch die Lautstärke lässt sich sowohl die Stabilität des Lichtbogens wie auch der derzeitige Prozessschritt bestimmen. In **Abbildung 2-11** sind sowohl das im Prozess entstehende Geräusch (braun) als auch der Lichtbogenstabilitätsindex, berechnet nach **Formel (2-28)**, (blau) übereinander dargestellt. Daraus ist sehr gut ersichtlich, dass das Geräuschaufkommen und der Index gut miteinander korrelieren. [5] Während bei höherer Stabilität ein geringerer Geräuschpegel durch den Lichtbogen emittiert wird, tritt bei geringer Stabilität ein wesentlich höherer Lärmpegel auf. [21] Grundsätzlich kann das Geräuschaufkommen auf zwei Arten gemessen werden. Zum einen über den Bereich des Geräuschfeldes und zum anderen über die Lautstärke selbst. Die Analyse von hörbaren Signalen kann dabei über die Veränderung der Dichte, der Teilchengeschwindigkeit und Teilchenauslenkungen gemessen werden. Die leichteste Art der Messung über den Lärmpegel ist aber die Veränderung des Druckes. [33]

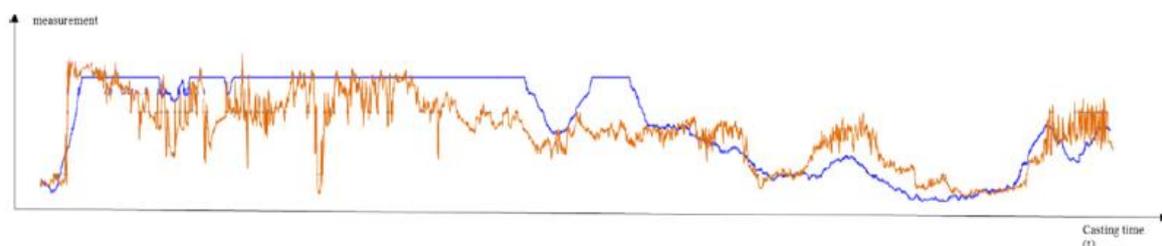


Abbildung 2-11: Geräuschpegel (braun), ASI (blau) [5]

Neben der akustische Messung der Lichtbogenstabilität ist auch die Messung der Stabilität mittels optischen Emissionen [25], welche durch den elektrischen Lichtbogen entstehen, möglich. Für beide Methoden sind aber zusätzliche Installationen im Aggregat nötig, wodurch sie vergleichsweise teuer und aufwendig umzusetzen sind. [5]

Wie bereits zuvor angemerkt, erfolgt die Prozessstabilitätsevaluierung durch Messung von Strom und Spannung. Dies geschieht auch in ähnlicher Form im Schweißprozess. Dabei wird der Koeffizient der Variation der Spannung **(2-35)** und des Stromes **(2-36)** sowie der Carrer-Faktor **(2-37)** berechnet. Je höher der jeweilige Koeffizient K_V dabei ist, desto geringer ist die Schweißstabilität. Wenn der Carrer-Faktor über 0,7 liegt, ist daraus zu entnehmen, dass der Prozess stabil ist und sehr gute Schweißigenschaften vorliegen. Dieser Umstand nimmt mit steigendem Carrer-Faktor zu. [34]

$$K_{VU} = \frac{\Sigma}{U_{SR}} * 100\% \quad (2-35)$$

$$K_{VI} = \frac{\Sigma}{I_{SR}} * 100\% \quad (2-36)$$

$$n = \frac{I_{min}}{I_{SR}} * 100 \% \quad (2-37)$$

2.3 Methoden zur Verbesserung der Lichtbogenstabilität

Um das Hauptziel einer möglichst hohen Lichtbogenstabilität zu erreichen, ist es nötig, die im **Kapitel 2.2** beschriebenen Messungen korrekt zu evaluieren und in geeigneter Art und Weise auf die Prozessparameter Einfluss zu nehmen. Die dazu zur Verfügung stehenden Methoden werden in diesem Kapitel näher dargelegt.

Die frühesten Versuche, die Stabilität des Lichtbogens in einem Lichtbogenofen zu verbessern, gehen auf Änderungen an der Elektrode zurück. Insbesondere die Einführung einer aus Kohlenstoff bestehenden Hohlkathode soll hier Erwähnung finden. Im Gebrauch dieser tritt aber der Kamineffekt auf, welcher den Abtrag der Elektrode enorm vergrößert. Um dahingehend Abhilfe zu schaffen, hat sich eine Durchgasung der Hohlkathode bewährt. In Versuchen mit Argon, Stickstoff, CO_2 und Kohlenwasserstoffen hat sich gezeigt, dass der Kathodenverbrauch bei Beaufschlagung mit diesen Gasen wieder sinkt, da sie den

vorherrschenden Kamineffekt eliminieren. Je höher die Durchgasungsrate der Kathode dabei ist, desto höher ist auch die Leitfähigkeit des Lichtbogens, wodurch in weiterer Form dessen Energie und somit Schmelzleistung zunimmt. [26]

Wie bereits zuvor schon angemerkt, haben auch magnetische Felder Einfluss auf den Lichtbogen. Wenn das Plasma des Lichtbogens sehr nahe am Dichtelimit ist, entstehen große magnetische Felder durch die Plasmaunterbrechungen. [35] Das Dichtelimit ist dabei gekennzeichnet durch jene Dichte, bei welcher ein bestimmter Plasmastrom nicht überschritten werden darf, da ansonsten selbst kleine Störungen instabil anwachsen können [36]. Um diese Unterbrechungen zu stabilisieren, werden insgesamt acht Sattelspulen, je eine am Boden und eine am Deckel in jedem Viertel des Aggregats, eingebaut, wobei darauf zu achten ist, dass sich die Spulen genau gegenüber liegen. Weiters müssen für den Stabilisierungseffekt sowohl die Größe als auch der Strom in den Spulen identisch sein. Ein Element mit je zwei Spulen ist in **Abbildung 2-12** dargestellt. [35]

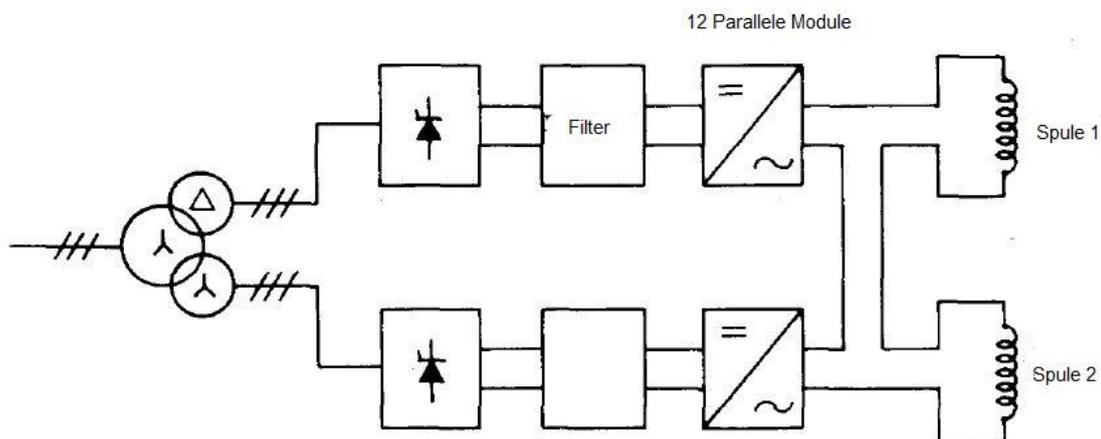


Abbildung 2-12: Blockdiagrammaufstellung des Konverters mit den Spulen [35]

Eine weitere Möglichkeit der Stabilisierung eines Lichtbogens aus der GMA Schweißtechnik ist die Verwendung einer Gasmischung aus Argon und CO_2 . Das Verhältnis, um die optimale Stabilisierung zu erreichen, liegt bei 80% Argon und 20% Kohlendioxid. [37]

Auch aus der Schweißtechnik ist bekannt, dass die Lichtbogenstabilität durch die Beeinflussung mittels Laserstrahlung profitieren kann. Dieser Effekt basiert darauf, dass sich der Lichtbogen am Laserstrahler verwurzelt und somit effektiver stabil gehalten werden kann. Am besten wirken sich dabei aber die Niedrigenergie-Laserstrahlen aus. Der Kathodenbrennfleck selbst kann insbesondere durch einen Nd-YAG-Laserstrahl gefestigt werden. Bei dieser Methode der Stabilisierung erfolgt eine Verbesserung der

Lichtbogenplasmasäule durch den Laserstahl, da dieser ein niedrigeres Ionisationspotentials und gleichzeitig auch eine Region einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit erzeugt. [38]

Eine andere Art der Stabilitätsverbesserung ist schematisch in **Abbildung 2-13** dargestellt und entspricht der Stabilisierung durch einen magnetischen 3D Plasmafilter. Diese Methode ist die Stabilisierung aufgrund des gefilterten kathodischen Vakuumlichtbogens. Sie funktioniert mit mehreren Filtern, die das benötigte Magnetfeld punktuell, an verschiedenen Stellen des Systems, überprüfen. Dadurch wird der Plasmastrahl soweit manipuliert und kontrolliert, als dass durch die genaue Kenntnis des Stromes der Ausgangspunkt des Lichtbogens besser einstellbar ist, da eine schnellere Reaktion bei Veränderungen erfolgen kann. Die Stabilisierung des entstehenden Plasmas erfolgt dann durch das eingebaute System, wodurch in weiterer Folge der Lichtbogen stabiler brennt. Die Temperatur der Kathode und des Probenhalters wird dabei durch Wasserkühlung konstant gehalten. Für die Einstellung eines konstanten Druckes ist eine Kryopumpe angebracht. Die sehr hohe Anzahl an Windungen der Spulen führt zu einem Starken Magnetfeld, welches den Ionentransfer und die Bogenentladung verbessert. [39]

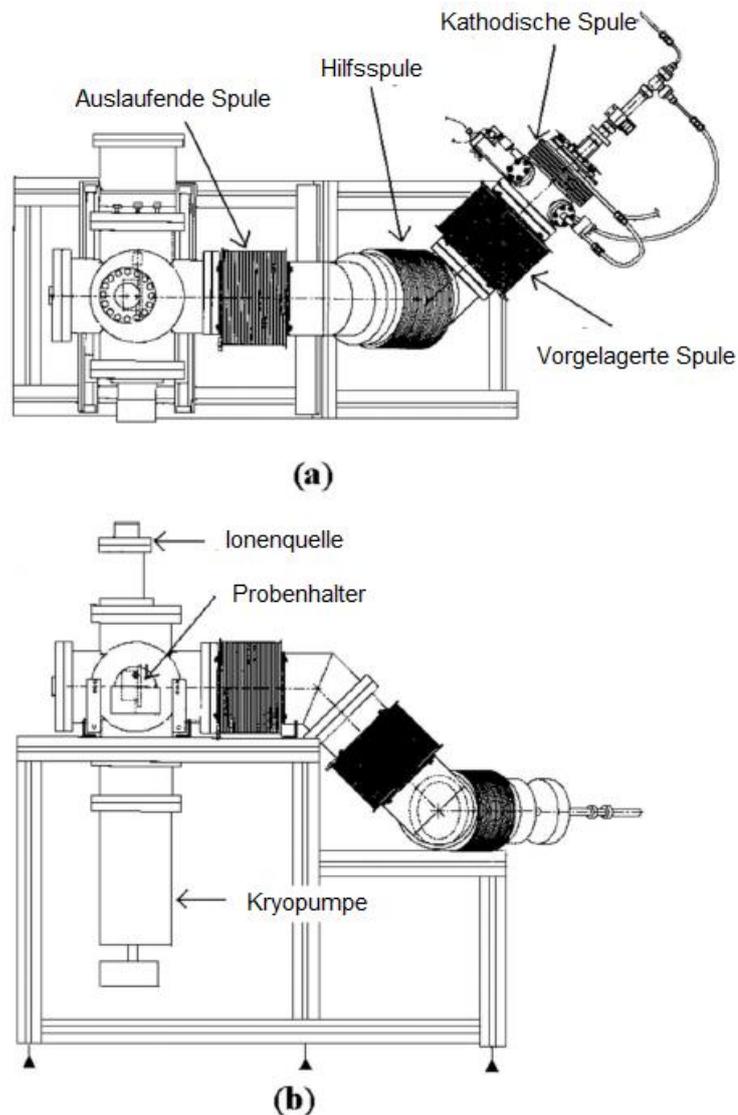


Abbildung 2-13: FCVA (filtered cathodic vacuum arc) System [39]

Die Apparatur, welche in **Abbildung 2-13** dargestellt ist, bildet den Plasmastrahl zwischen der kathodischen Spule und den drei weiteren Spulen aus. Um die unterste Spule sind orthogonal vier weitere Spulen angeordnet, welche den Plasmastrahl durch das Magnetfeld beeinflussen. Dieses ist in **Abbildung 2-14** dargestellt und ist dafür verantwortlich, dass der Plasmastrahl durch entsprechende Regelung stabilisiert werden kann. [39]

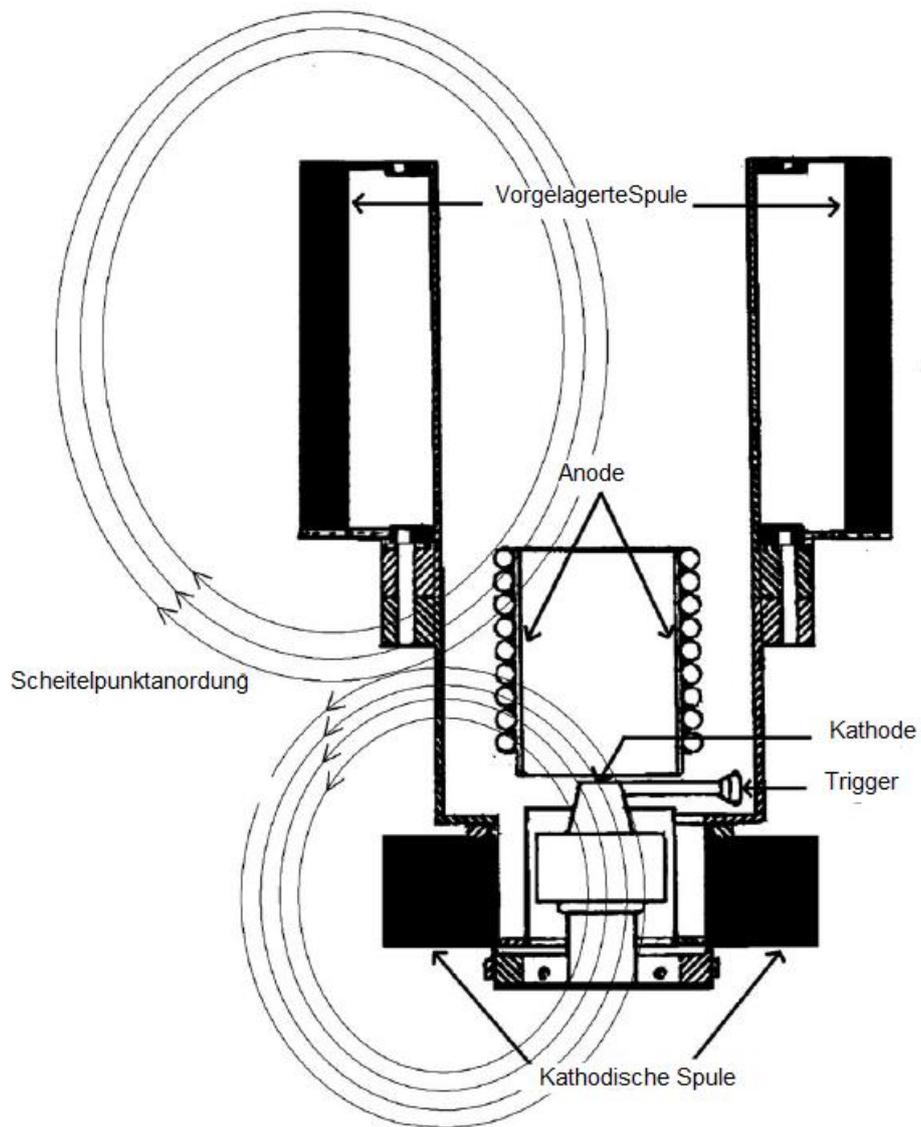


Abbildung 2-14: Magnetfeld der FCVA [39]

3 Praktischer Teil

Die Durchführung des praktischen Teils dieser Arbeit gliedert sich in zwei Schritte. Der erste ist dabei die Ausführung der Versuche auf der Plasmette inklusive der Speicherung der Daten auf dem Datenlogger „HOBO UX120006M 4-Kanal Analog Logger“. Somit beschäftigt sich das erste Unterkapitel der Arbeit mit den notwendigen Systemen und der Versuchsdurchführung selbst. Der zweite Unterpunkt beschäftigt sich mit der Durchführung der Auswertung. Diese gliedert sich in mehrere Schritte, um schlussendlich zu einer Methode zu gelangen, mit der die Stabilität des Lichtbogens evaluierbar ist.

3.1 Versuchsdurchführung

Alle Versuche auf der Plasmette gliedern sich in drei große Arbeitsschritte. Der erste ist das Zusammenbauen des gesamten Systems inklusive dem Einsetzen des Materials, welches reduziert werden soll. Der zweite Schritt ist der Versuchsablauf selbst. Der dritte und letzte Teil ist das Versuchsende, welches das Zerlegen und Reinigen der Anlage beinhaltet.

3.1.1 Notwendige Systeme und Elemente für die Versuchsdurchführung

Die Plasmette benötigt für die Messung und Aufzeichnung der Daten mehrere Systeme mit unterschiedlichen Aufgabengebieten, welche beim Zusammenbau in den Aufbau implementiert werden müssen.

3.1.1.1 Stahltiegel mit Stahlpin und feuerfester Ring

Das chargierte und eingebrachte Erz wird in dem Stahltiegel im Körper der Plasmette aufgeschmolzen. Dieser Stahltiegel hat einen Durchmesser von 100 mm und eine Höhe von 25 mm. In der Mitte des Tiegels ist durch MIG-Schweißen ein Stahlpin angebracht. Dieser Stift hat einen Durchmesser von 10 mm und eine Höhe von 20 mm und dient bis zum Aufschmelzen des Erzpulvers in der Anlage als Anode. Der Tiegel mit Pin ist in **Abbildung 3-1 (a)** gezeigt und umfasst ein Füllvermögen von 100 g Feinerz. Zum Schutz des Reaktors während des Versuches ist der Stahltiegel zusätzlich noch mit einem Ring aus Feuerfestmaterial (**Abbildung 3-1 (b)**) zu verkleiden. Dieser Ring schützt den Reaktorraum vor den hohen Temperaturen, Abgasen und spritzern welche während dem Versuch auftreten können. [1]

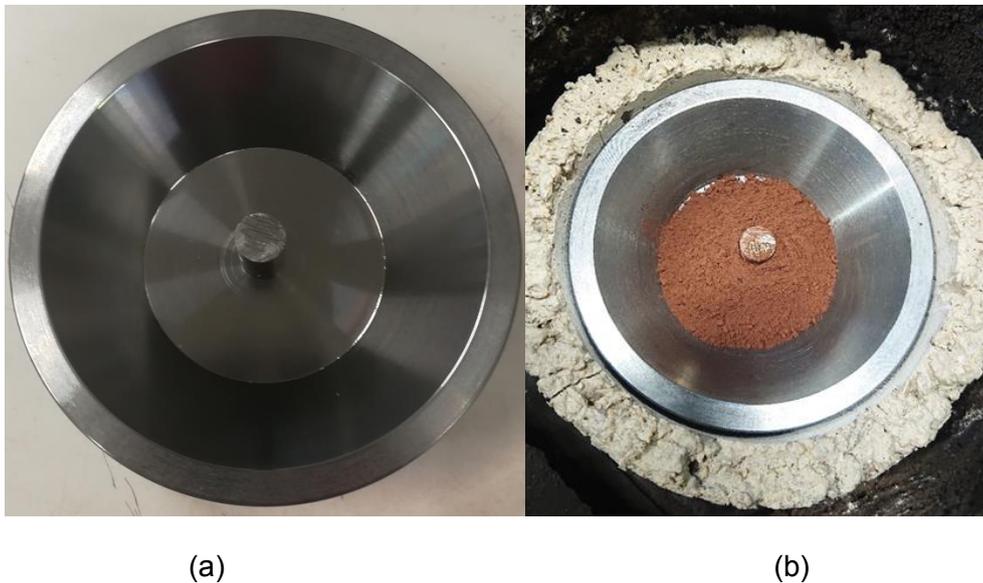


Abbildung 3-1: Stahltiegel mit Stahlpin

3.1.1.2 Hohlkathode

Um den elektrischen Gleichstromlichtbogen auszubilden, werden eine Kathode und eine Anode benötigt. Die anfängliche Anode ist als Pin bereits im Stahltiegel integriert. Als Kathode fungiert in diesem Versuchsaufbau eine Hohlkathode aus Grafit. Diese besitzt einen Innendurchmesser von 5 mm und einen Außendurchmesser von 26-30 mm. Letzterer ist hingegen aufgrund des Abbrandes während des Versuches nicht konstant. [1] **Abbildung 3-2** zeigt die Grafitkathode in ihrer Einbaulage im System.



Abbildung 3-2: Hohlkathode

3.1.1.3 Erzchargiersystem

Für die Versuche mit kontinuierlicher Erzchargierung ist ein Pulverdosiersystem der Firma „LAMBDA Laboratory Instruments“, welches konstant mit 3 g/min Dosierung arbeitet, am Versuchsaufbau vorgesehen. Das System besteht aus einer Dosiereinheit, einer Pulverdosierschnecke und einem Motor, welcher für die oben genannte konstante Dosierung verantwortlich ist. Dieses ist in **Abbildung 3-3** schematisch dargestellt. Die kontinuierliche Einbringung des Erzes erfolgt während des Versuches dann durch die Graphithohlkathode. [1]



Abbildung 3-3: Erzchargiersystem [1]

3.1.1.4 Massenspektrometer und Abgasreinigungssystem

Bevor das Abgas nach der Reaktion im Reaktionsaggregat das Massenspektrometer erreicht, durchläuft es einen dreistufigen Prozess der Abgasreinigung. In diesem wird es entstaubt, entkohlt und getrocknet.

Der erste Schritt der Entstaubung erfolgt dabei durch eine Mineralwolle, welche bereits im Deckel der Plasmette eingebaut ist. Im nächsten Prozessschritt durchläuft das Abgas zwei Liter-Gefäße befüllt mit Wasser und einer chemischen Substanz (Gummiarabikum), welche den Benetzungswinkel verkleinert, um dadurch eine bessere Ablösung der Kohlenstoffpartikel im Gas zu erreichen. Im letzten Punkt der Entstaubung strömt das Gas erneut durch zwei Kolonnen gefüllt mit Mineralwolle, um die letzten Staubpartikel zu absorbieren, bevor das Gas durch zwei molekular Siebe entfeuchtet wird.

Nach der Abgasreinigung und Trocknung erfolgt schlussendlich die Messung der Gaszusammensetzung durch ein Massenspektrometer der Firma „Pfeiffer Vacuum Technologies“ – Typ GAM 200. [1]

3.1.1.5 Kamera zu Überwachung des Lichtbogens

Um die Lichtbogenstabilität in Korrelation zur Versuchsauswertung setzen zu können, ist das Kamerasystem Axis-Q1775 der Firma Pieper GmbH zur Aufzeichnung des Lichtbogenverhaltens im Versuchsaggregat installiert (**Abbildung 3-4**). Zwei Filter sorgen dabei für ein möglichst scharfes Bild. Einer der beiden ist ein IR-Filter – Typ FRO7012 – mit einer Stärke von 2 mm, welcher speziell für die Überwachung von Ofenreaktoren konzipiert ist. Der zweite Filter besteht aus einer vergoldeten Scheibe, welche eine 30 %-ige Durchlässigkeit und eine Dicke von 2,5 mm besitzt.



Abbildung 3-4: Kamera Axis-Q1775 [1]

3.1.1.6 Gasmischsystem

Um die verschiedenen benötigten Gaszusammensetzungen für das Aggregat zu mischen, wird das Kontrollsystem „Type EL-FLOW PRESTIGE FG“ des Unternehmens Bronkhorst High-tech B.V verwendet. [1]

3.1.1.7 Messeinrichtung für Strom und Spannung

Um die Stromstärke und die Spannung während dem Versuch zu messen sind in der Plasmette zusätzliche Vorrichtungen nötig. Die Stromstärke des Prozesses wird mittels des LEM HTA Hall-Effekt Stromsensor gemessen. Dieser Sensor basiert auf dem Hall-Effekt, welcher aufgrund der Wechselwirkung von Strom, Spannung und magnetischer Flussdichte innerhalb eines stationären Magnetfeldes auftritt. Um eine kontinuierliche Messung der Maximalen und Minimalen Werte zu ermöglichen, musste dieser Sensor zusätzlich noch an eine äußere Versorgungseinheit angeschlossen sein.

Die Messung von den Werten für Strom und Spannung wird im Anschluss an den Datenlogger HOBO UX120-006M 4 Kanal Logger weitergegeben. Die Limitierung dieser Messeinheit liegt bei 4-20 mA, und 0-24 V DC. Dadurch waren diverse Adaptionen im Bereich der Plasmette notwendig. Zum einen erfolgte der Umbau der Spannungsmessung auf einen Bereich von 4-20 mA um damit direkt in die Auswertung gehen zu können. Zum anderen war es nötig für die Messung der Stromstärke das Signal der Spannung zu reduzieren. Um dies zu erreichen, erfolgte der Einbau von Feinwiderständen in das System um den Messbereich von 0-4 V DC einzustellen. Dadurch ist es möglich den Bereich von 0-200 A zu messen.

Nach all diesen Einbauten in das Versuchsaggregat musste auch im Datenlogger selbst die Software für die Umrechnung der Messsignale eingestellt werden. Als Obergrenze wurden dabei 20 A Stromgrenze und 100 V Spannung definiert.

3.1.1.8 Gesamtes System

Für einen erfolgreichen Versuchsablauf ist es nötig, das Aggregat mit höchster Sorgfalt zusammenzubauen. Nach dem erfolgreichen Verbauen und Verbinden aller Systeme und Elemente kann der Versuch gestartet werden. Der vollständige Aufbau ist in **Abbildung 3-5** ersichtlich. **Abbildung 3-6** stellt die Anlage schematisch im Querschnitt dar. Für den Versuchsablauf wird der Reaktor mit einer Gleichstromquelle betreiben. Die Gleichstromquelle besitzt eine maximale Leistung von 16 kW. Es sind Spannungen von bis zu 100 V und Ströme von bis zu 160 A abrufbar. Damit das System im Ablauf nicht

geschädigt wird, wird der Flansch, der Deckel, die Anode und die Elektrodenhalterung wassergekühlt. Um zu gewährleisten, dass der Lichtbogen während der Durchführung des Tests möglichst stabil ist, muss das Aggregat dicht sein. Um dies zu ermöglichen, wird das nötige Dichtsystem in den Deckel eingebracht. Durch die angeschlossene Steuersoftware lässt sich die Durchflussmenge der Prozess- und Reaktivgase regeln.



Abbildung 3-5: Aufbau Plasmette

Am Deckel der Plasmette selbst sind fünf Flansche angebracht. Der zentrale und mittlere ist dabei für die Einbringung der Elektrode in das System. Die restlichen vier Öffnungen sind dazu da, um die Verbindung mit der Abgasleitung herzustellen, den Druck mittels Manometer zu überwachen sowie mittels der Kamera den Lichtbogen zu filmen.

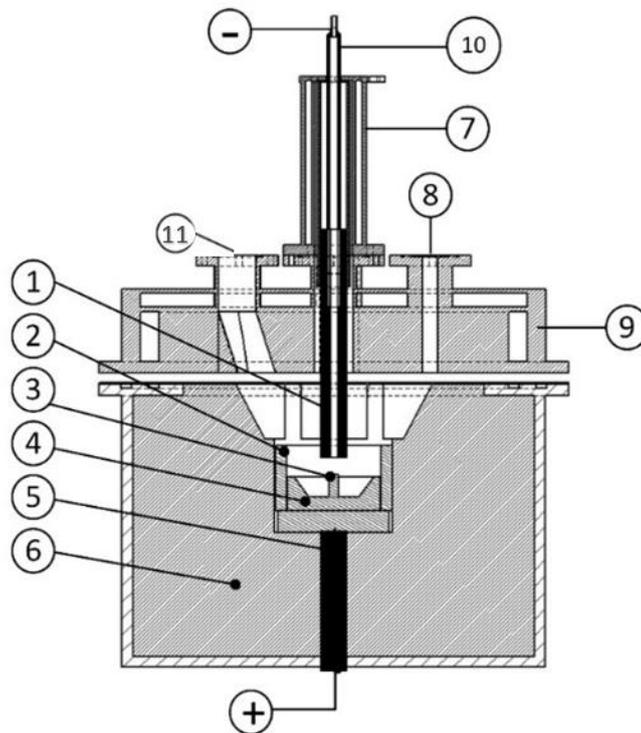


Abbildung 3-6: schematischer HPSR Aufbau: hohle Graphitelektrode (1), Feuerfestring (2), Zündstift (3), Tiegel (4), Bodenelektrode (5), Feuerfestmaterial (6), Elektrodenhalterung mit Kühlsystem (7), vier Öffnungen für Abgasstutzen, Manometer, Plasma Beobachtung, seitliche Wasserstoffflanze (8), Deckel mit Feuerfestauskleidung und Kühlsystem (9), Stahlrohr für die Gaszufuhr und kontinuierliche Chargierung von Erz (10), Sichtfenster für Kamerasystem (11)

3.1.2 Einsatzstoffe

Für die erfolgreiche Durchführung der Tests sind neben einem funktionierenden Versuchsaggregat auch Einsatzstoffe wie Gase und Erze nötig. Die Prozess- und Reaktionsgase werden durch das Gasmischsystem (beschrieben in **3.1.1.6**) angeliefert. Das zu reduzierende Erz liegt bei den Batchversuchen bereits im Aggregat vor, bei den kontinuierlichen Versuchen wird ein Teil vorgelegt, der Rest mittel dem Chargiersystem (erklärt in **3.1.1.3**) eingebracht. Dass dabei verwendete Carajas-Feinerz wurde im Vorfeld drei Stunden bei 240 °C getrocknet.

3.1.3 Ablauf der Versuche auf der Plasmette

Die Versuche auf der Plasmette welche für die Beurteilung der Stabilität des Lichtbogens herangezogen wurden, waren sowohl Batchversuche als auch jene mit einer kontinuierlichen Erzchargierung. Während bei den Batchversuchen das gesamte Feinerz im Reaktor

eingesetzt wird, erfolgt bei den kontinuierlichen Versuchen die Vorlage von 25 % der Probenmasse im Reaktor.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Versuchen je Versuchsart zu realisieren, ist es nötig, dass der Versuchsablauf für die Batchversuche und die kontinuierlichen Versuche, möglichst einheitlich ist.

Bevor der Zusammenbau des Versuchsaggregates beginnt, erfolgt die Reinigung des Reaktorinnenraumes. Anschließend daran werden sowohl der Feuerfeste Ring, der Tiegel und das vorzulegende Erz eingesetzt. Bei der Chargierung des Erzes ist es wichtig darauf zu achten, dass am Stahlpin kein Erz aufliegt, um dadurch den elektrischen Durchgang zu gewährleisten. **Abbildung 3-7** zeigt den Eingesetzten Feuerfesttring und den Tiegel mit dem zu reduzierenden Erz. Diese Bild entstand bei dem kontinuierlichen Versuch ZC012.



Abbildung 3-7: Feuerfesttring und Tiegel mit 25 g Erz

Nach diesen Schritten ist die Befüllung des Reaktorraumes beendet und der Deckel der HPSR-Anlage kann nach Einlegen aller Dichtungen aufgesetzt werden. Anschließend daran erfolgt das Einbringen der Elektrode in den Reaktorraum bis diese und der Stahlpin in Berührung stehen. Durch diesen Kontakt ist es möglich den erforderlichen Kurzschlusskreis für die Zündung des Lichtbogens zu gewährleisten. Die Dichtheit der Anlage wird durch Einbringen von Argon und Wasserstoffgas in das System überprüft.

Für die kontinuierlichen Versuche ist es noch nötig das Erzchargiersystem aufzubauen. Um den Lichtbogen, während dem Versuch kontinuierlich mit der Kamera filmen zu können, ist es nötig die Kamera noch zu installieren bevor der Test gestartet wird.

Der Test kann starten, wenn die Kühlwasserzufuhr aufgedreht wird. Die Zündung des Lichtbogens findet dann statt, wenn der elektrische Durchgang zwischen Stahlpin und

Elektrode ausreichend groß ist. Die Länge des Lichtbogens ist im Anschluss daran einstellbar durch Anheben und Absenken der Elektrode. Zu Beginn und zum Einschmelzen des Stahlpins erfolgt die Verwendung von reinem Argongas. Erst in der Phase der Reduktion wird auch Wasserstoff als Reduktionsgas zugeschaltet. Dies an sich ist erst der Fall, wenn sowohl der Stahlpin als auch das bereits chargierte Erz vollständig aufgeschmolzen ist. Die Einleitung der Gase findet durch die Hohlkathode statt.

Die Abgasreinigung erfolgt wie in **Kapitel 3.1.1.4** beschrieben. Auch die kontinuierliche Einbringung des Erzes ist bereits in **Kapitel 3.1.1.3** erklärt und findet durch die Hohlkathode statt.

Um möglichst repräsentative Werte des Lichtbogens zu erhalten ist es bei den Batchversuchen notwendig jede Einstellungsvariation mindestens 10 Sekunden zu halten. Während dem Versuch ist es möglich den Lichtbogen über das Kamerasystem kontinuierlich zu überwachen. Der Versuch beginnt beim Einstellen von stabilen Verhältnissen für die erste Parametereinstellung und endet sobald der Lichtbogen abreißt. Die Daten von Strom und Spannung werden dabei sekundlich mittels des Datenlogger aufgezeichnet.

Die Versuche mit kontinuierlicher Erzchargierung dürfen nie bis zum Abrisspunkt des Lichtbogens gelangen. Die vorhergehenden Versuche bestätigten die Theorie, dass bei Tests mit kontinuierlicher Erzeinbringung die Spannung ansteigt, sobald Erz im Lichtbogen vorhanden ist. Dadurch ist es wichtig darauf zu achten, dass sich durch die vorhandene Hitze keine isolierende Eisenoxidschicht aufbaut. Wenn dies der Fall ist, können keine weiteren Versuche mehr mit dem Tiegel durchgeführt werden. Die Versuche mit kontinuierlicher Erzzugabe finden immer mit einem Gasgemisch von 5 l/min statt. Da Tests mit der Gaszusammensetzung im Vorfeld bereits im Batchbetrieb durchgeführt wurden, konnte das vorherrschende Stabilitätsfeld angenommen werden und die Parametereinstellungen obliegen nur einer leichten Anpassung. Der Elektrodenabstand sollte, um den Energieeintrag möglichst gering zu halten, kleiner sein. Die Länge des Lichtbogens wird bei brennenden Bogen selbst erst verstellt. Nach Abschluss der vollständigen Erzeinbringung, ist es notwendig den Kugelhahn des Chargiersystems zu verschließen, um dadurch ein nachträgliches Eintragen von Erz, welches im System zurück blieb, zu verhindern.

Abbildung 3-8 zeigt ein vollständiges Flussdiagramm für den Versuchsablauf mit und ohne Erzchargierung.

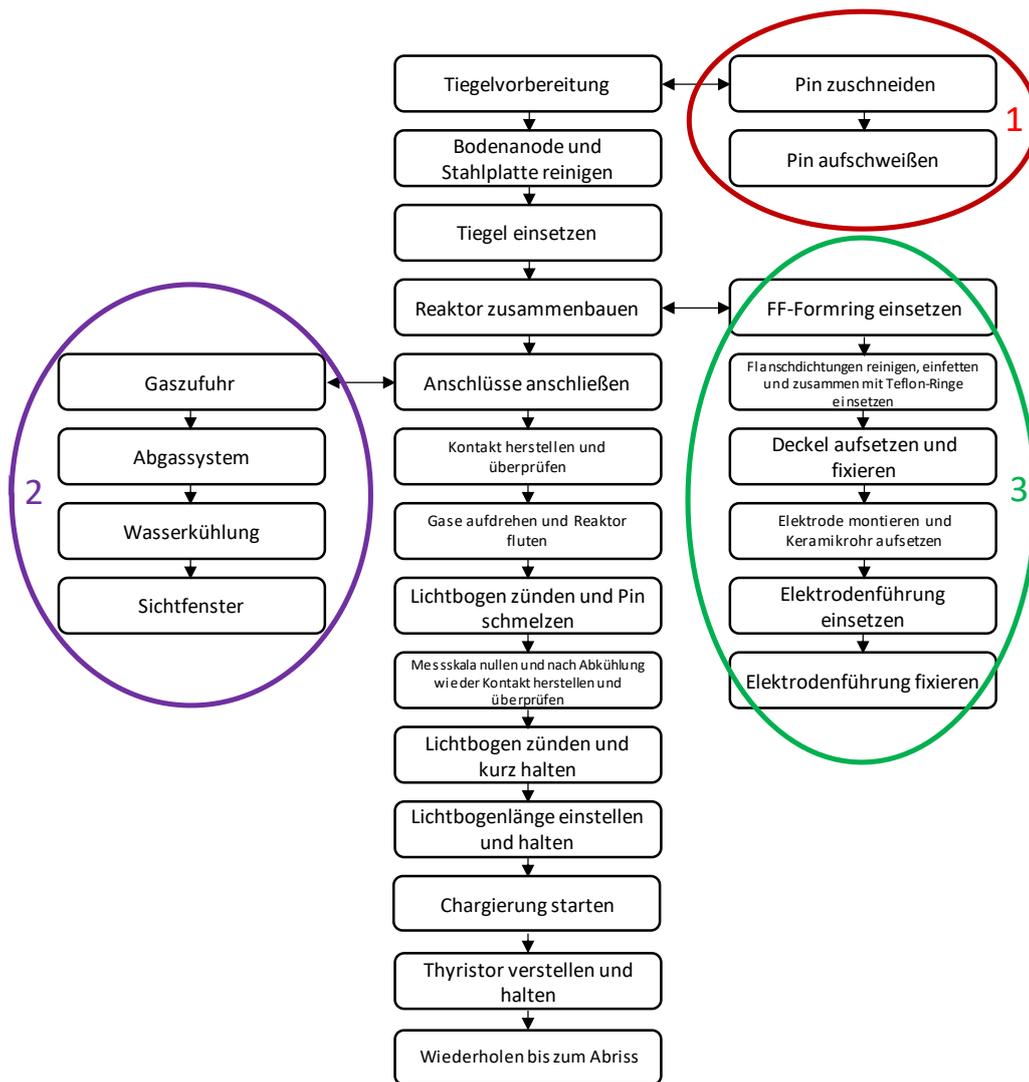


Abbildung 3-8: Flussdiagramm für den Versuchsablauf [40]

3.2 Auswertung

Bei der praktischen Versuchsdurchführung mit der Plasmette werden proportional zur Versuchszeit die Daten von Spannung und Strom aufgezeichnet. Mit diesen Werten ist es möglich, diverse Berechnungen durchzuführen, womit schlussendlich die Evaluierung der Lichtbogenstabilität erfolgt. Dafür wird in erster Linie die Spannung herangezogen.

Bei den auszuwertenden Daten ist zwischen zwei verschiedenen Versuchsdurchführungsarten zu unterscheiden. Diese sind die kontinuierliche Fahrweise mit gleicher Gaszusammensetzung – in der Auswertung benannt mit ZC006c1.2H3Ar bis ZC014c1.2H3Ar – und jene, welche sich in der Gaszusammensetzung unterscheiden. Dabei wird Wasserstoff, Argon und Stickstoff variiert. Bei der nicht kontinuierlichen Versuchsreihe

erfolgt die Aufzeichnung der Daten für die Elektrodenabstände zwischen 2,0 cm und 4,5 cm, wenn möglich auch für 5,0 und 5,5 cm. **Tabelle 2** gibt eine nähere Erläuterung zur Bedeutung der Versuchsbezeichnungen für die kontinuierlichen und die Batch- Versuche. Alle Versuche, welche für die Auswertung herangezogen werden, sind in **Tabelle 1** aufgelistet.

Tabelle 1: Versuchsauflistung

50% Ar/50% N ₂ , 60% Ar/40% N ₂ , 60% Ar/40% H ₂ , 70% Ar/30% H ₂ , 80% Ar/20% H ₂ , 90% Ar/10% H ₂ , 100% Ar, 100% N ₂	Variation der Gaszusammensetzung, Elektrodenabstände und je zwei Leistungsstufen
60% Ar/40% H ₂ mit Erz	Variation der Gaszusammensetzung, Elektrodenabstände und je zwei Leistungsstufen inkl. Kontinuierlicher Erzchargierung
ZC006c1.2H3Ar, ZC007c1.2H3Ar, ZC008c1.2H3Ar, ZC009c1.2H3Ar, ZC010c1.2H3Ar, ZC011c1.2H3Ar, ZC012c1.2H3Ar, ZC013c1.2H3Ar, ZC014c1.2H3Ar	Versuch mit kontinuierlicher Erzchargierung

Tabelle 2: Erklärung Versuchsbezeichnung kontinuierlicher Versuche

Symbol	Bedeutung	Beschreibung
<i>Kontinuierliche Versuche</i>		
Z	ZarI	Verantwortlicher/Ausführender
C	Continuous	Kontinuierliche Fahrweise des Versuches
006	Versuchszahl	
c	Carajas	Verwendetes Erz
1	Testanzahl	Nummer der Erzanalyse
2H	Wasserstoff	2 NI Wasserstoff Gas
3 Ar	Verwendetes Gas	3 NI Argon Gas
Rc	Beschreibung des Tiegels	Feuerfester Tiegel

<i>Variation der Gase</i>	
50% ... / 50% ...	Gaszusammensetzung
LS1/LS2	Verwendete Leistungsstufe
_2	Versuch wurde ein zweites Mal mit exakt gleichen Parametern durchgeführt
2,0 – 5,0 cm	Abstand der Elektroden

Die Auswertung und Erstellung der Diagramme selbst erfolgten mit Hilfe der Software Microsoft Excel. Als Basis dient eine Datei, welche alle Diagramme, Parameter und Daten enthält. **Abbildung 3-9** gibt einen Einblick in die Rohdaten erstellt durch den Datenlogger. – Der Test selbst beginnt dabei nach Einstellung einer konstanten Spannung. Dies ist bei Sekunde 123 (roter Kreis) der Fall. Der Versuch selbst ist beendet, wenn der Lichtbogen abreist. Dies ist in der Datei ersichtlich durch einen abrupten Abfall des Stromes. **Abbildung 3-10** zeigt das Ende des Versuches bei Abriss des Lichtbogens. Der Lichtbogen riss bei Sekunde 182 (blauer Kreis). Bereits ab diesem Moment beginnt die Stromstärke schnell abzufallen und zwei Sekunden später ist sie bei ca. 0 A. **Abbildung 3-11** zeigt den Strom- und Spannungsverlauf des Versuches. Wie in den Rohdaten sind auch dabei der Beginn des Versuches mit dem roten Kreis markiert und das Ende des Versuches mit blau.

100	12.18.19 02:48:52 PM	0.000	0.066
101	12.18.19 02:48:53 PM	0.000	0.066
102	12.18.19 02:48:54 PM	0.000	0.066
103	12.18.19 02:48:55 PM	0.000	0.066
104	12.18.19 02:48:56 PM	0.000	0.066
105	12.18.19 02:48:57 PM	0.000	0.066
106	12.18.19 02:48:58 PM	0.000	0.066
107	12.18.19 02:48:59 PM	0.000	0.066
108	12.18.19 02:49:00 PM	0.000	0.066
109	12.18.19 02:49:01 PM	0.000	0.066
110	12.18.19 02:49:02 PM	0.000	0.066
111	12.18.19 02:49:03 PM	0.000	0.064
112	12.18.19 02:49:04 PM	101 466	14 673
113	12.18.19 02:49:05 PM	100 935	28 188
114	12.18.19 02:49:06 PM	99 770	28 589
115	12.18.19 02:49:07 PM	99 684	31 436
116	12.18.19 02:49:08 PM	98 830	24 925
117	12.18.19 02:49:09 PM	99 110	33 090
118	12.18.19 02:49:10 PM	97 652	37 596
119	12.18.19 02:49:11 PM	97 377	41 999
120	12.18.19 02:49:12 PM	97 530	41 752
121	12.18.19 02:49:13 PM	97 279	39 492
122	12.18.19 02:49:14 PM	96 535	44 904
123	12.18.19 02:49:15 PM	96 181	44 141
124	12.18.19 02:49:16 PM	97 249	42 505
125	12.18.19 02:49:17 PM	96 657	44 557
126	12.18.19 02:49:18 PM	96 956	42 001
127	12.18.19 02:49:19 PM	97 700	42 758
128	12.18.19 02:49:20 PM	95 814	47 141
129	12.18.19 02:49:21 PM	97 218	44 514
130	12.18.19 02:49:22 PM	95 460	48 281
131	12.18.19 02:49:23 PM	95 522	48 911
132	12.18.19 02:49:24 PM	95 552	48 521
133	12.18.19 02:49:25 PM	95 814	48 028
134	12.18.19 02:49:26 PM	97 029	44 268
135	12.18.19 02:49:27 PM	98 262	41 453

Abbildung 3-9: Rohdaten erstellt durch den Datenlogger; 50 %Ar/50 %N₂

173	12.18.19 02:50:05 PM	52 491	41 498
174	12.18.19 02:50:06 PM	50 166	40 532
175	12.18.19 02:50:07 PM	51 874	39 745
176	12.18.19 02:50:08 PM	53 205	35 976
177	12.18.19 02:50:09 PM	54 011	35 976
178	12.18.19 02:50:10 PM	55 445	35 226
179	12.18.19 02:50:11 PM	53 260	34 600
180	12.18.19 02:50:12 PM	52 717	37 232
181	12.18.19 02:50:13 PM	51 197	37 482
182	12.18.19 02:50:14 PM	52 058	38 988
183	12.18.19 02:50:15 PM	48 591	39 991
184	12.18.19 02:50:16 PM	23 126	45 190
185	12.18.19 02:50:17 PM	24 451	50 668
186	12.18.19 02:50:18 PM	0.006	94 695
187	12.18.19 02:50:19 PM	0.006	99 116
188	12.18.19 02:50:20 PM	0.006	82 052
189	12.18.19 02:50:21 PM	0.006	47 164
190	12.18.19 02:50:22 PM	0.006	27 621
191	12.18.19 02:50:23 PM	0.006	19 409
192	12.18.19 02:50:24 PM	0.000	11 503
193	12.18.19 02:50:25 PM	0.000	6 982

Abbildung 3-10: Ende des Versuches; 50 %Ar/50 %N₂

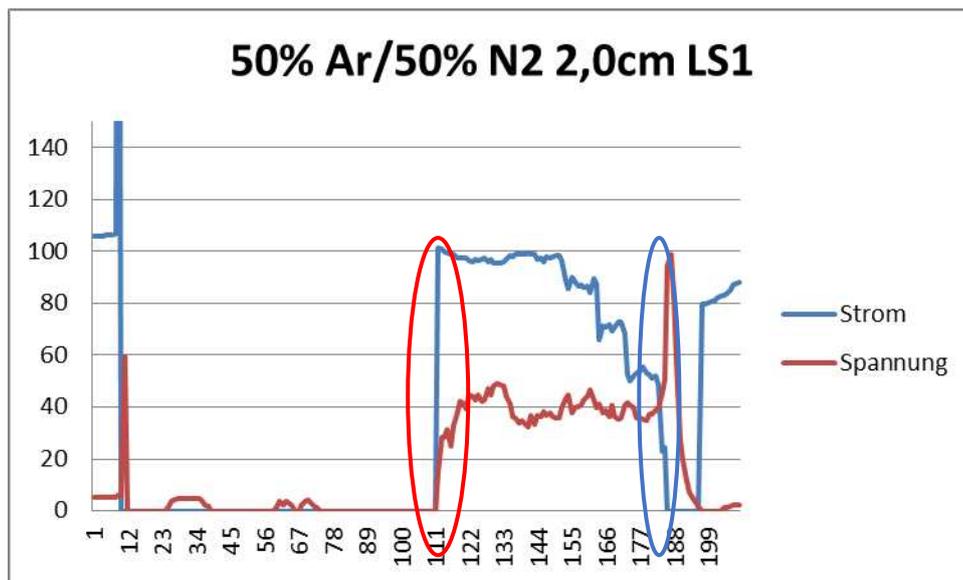


Abbildung 3-11: Strom und Spannungsverlauf der Plasmette bei Durchführung des Versuches

Zu Beginn der Auswertung erfolgt die Berechnung des Mittelwertes der Spannung [41] bezogen auf Zeitintervalle (**Formel (3-1)**). Bei den kontinuierlichen Versuchen teilen sich diese Zeitintervalle auf in: Vorschmelzen, Reduktion, Chargieren von Erz und die Nachreduktion. Diese Zeitabschnitte sind in **Tabelle 3** aufgelistet. In der Auflistung sind zwei Zeiten ersichtlich. Zum einen die geplante Zeit, welche ein bestimmtes Intervall gehalten werden soll, zum anderen die Zeit, welche jeder Schritt im durchgeführten Versuch tatsächlich in Anspruch genommen hat. Voraussetzung für die Versuche war es, dass geplanter und tatsächlicher Zeitabschnitt möglichst identisch sind. Das Ziel war es, den Lichtbogen in diesen Abschnitten stabil brennen zu lassen. Wichtig zu beachten ist, dass die Werte für Strom und Spannung während des Versuches sekundlich gespeichert werden (**Abbildung 3-9** und **Abbildung 3-10**) und diese Tabelle in Minuten zählt.

Tabelle 3: Zeitabschnitte der kontinuierlichen Versuche

	Geplante Vorschmelzzeit / min	Tatsächliche Vorschmelzzeit / min	Geplante Reduktionszeit / min	Tatsächliche Reduktionszeit / min	Geplante Chargierzeit/ min	Tat-sächliche Chargierzeit/ min	Geplante Reduktionszeit/ min	Tatsächliche Reduktionszeit / min
ZC006C1.2H3Ar	5	5	5	5		10		11
ZC007C1.2H3Ar	5	5	5	5	19	7	5	13
ZC008C1.2H3Ar	6	6	5	5	19	19	5	5
ZC009C1.2H3Ar	5	6	5	5	20	13	10	14
ZC010C1.2H3Ar	5	5	5	5	15	11	15	14
ZC011C1.2H3Ar	5	5	5	4	16	12	14	16
ZC012C1.2H3Ar_Rc	5	5	4	5	13	13	17	17
ZC013C1.2H3Ar_Rc	1	1			10	6	5	5
ZC014C1.2H3Ar_Rc	1	1;5			10	5;2:30	5	10

Für die anderen Versuche entspricht ein Zeitintervall genau einer Thyristoreinstellung und umfasst im Normalfall zehn Sekunden. Lediglich bei den Versuchen mit kontinuierlicher Erzchargierung umfassen die Zeitintervalle mehr als 10 Sekunden und sind **Tabelle 3** zu entnehmen.

$$MW_U = \frac{1}{n} \sum_{U=1}^n U_i \quad (3-1)$$

Nachfolgend an die Mittelwertberechnung wurde das Verhältnis des Mittelwertes der Spannung zur Spannung erstellt, um daraus für jeden Zeitabschnitt das Minimum X_{\min} und das Maximum X_{\max} zu bestimmen. Diese Berechnung ist in **(3-2)** ersichtlich.

$$X = \frac{MW_U}{U} \quad (3-2)$$

Nach eingehender Betrachtung der dadurch ermittelten Werte und der Annahme, dass der Lichtbogen im Bereich zwischen $X = 0,8 - 1,2$ stabil ist, konnte eine Funktion erstellt werden, welche Werte, die über 1,2 und unter 0,8 liegen, löscht. Ein weiteres Kriterium, das Werte

zum Ausschluss führt, ist ein individuell anzunehmendes Intervall (x_{int}), welches angibt, in welchem Streubereich die Werte für X_{max} und X_{min} liegen müssen. Von diesem X_{neu} wurde wieder ein $X_{neu,max}$ und $X_{neu,min}$ ermittelt. Diese Kriterien sind im Nachfolgenden Flussdiagramm (**Abbildung 3-12**) anhand der **Funktion (3-3)** ersichtlich.

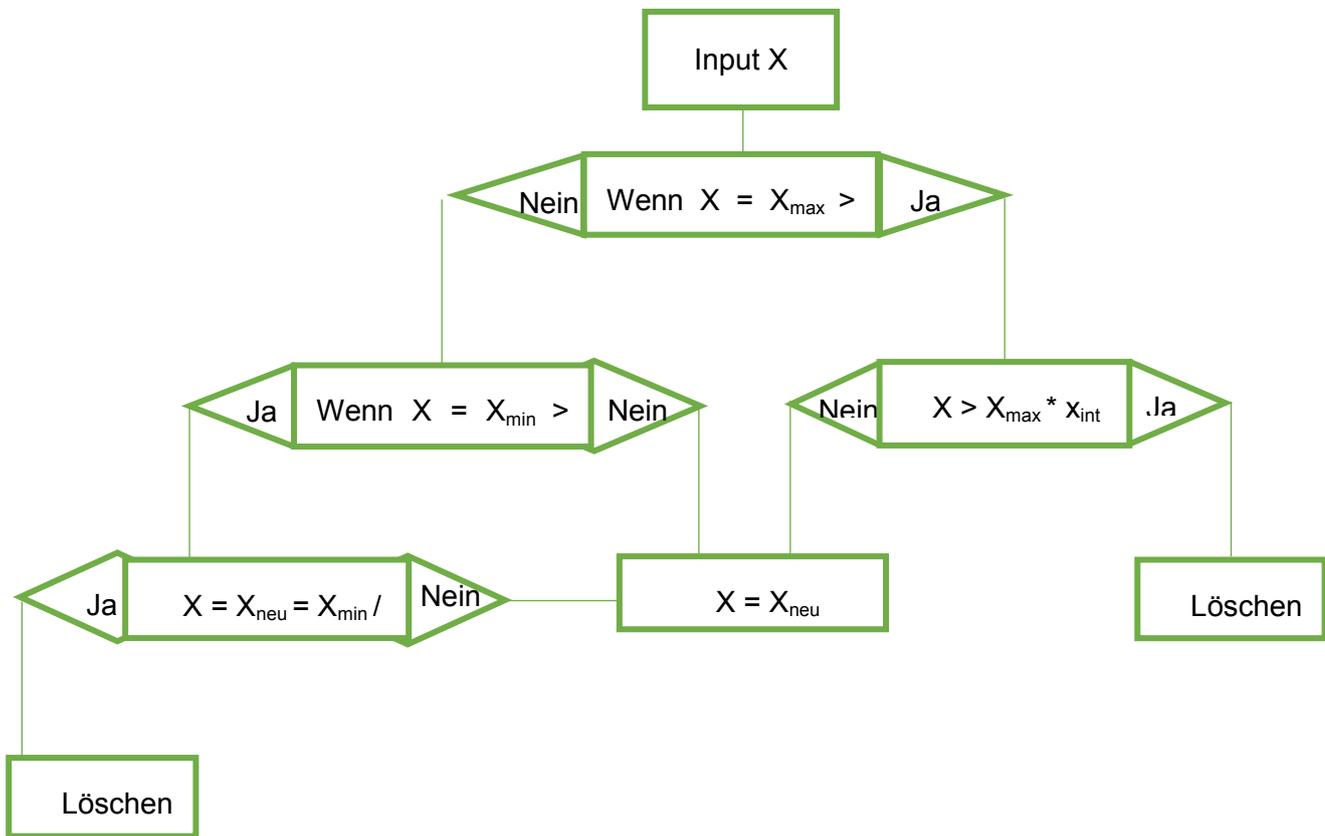


Abbildung 3-12: Flussdiagramm des Entscheidungskriteriums in **Formel (3-3)**

$$\begin{aligned}
 X_{neu} = & \text{Wenn}(X_{max} > 1,2; \text{Wenn}(X > x_{int} * X_{max}; ; X); \\
 & \text{Wenn}(X_{min} < 0,8; \text{Wenn}(X < \frac{1}{x_{int}} * X_{min}; ; X); X))
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

All jene Werte wurden abschließend in einem Diagramm mit zwei y-Achsen zusammengefügt. Die primäre Achse erstreckt sich dabei über den Bereich von 0 bis 1,5 und umfasst X , X_{max} , X_{min} , $X_{neu,max}$, $X_{neu,min}$. Auf dem sekundären Achsenabschnitt ist der Mittelwert der Spannung aufgetragen. Diese umfasst den Bereich von 0 – 120 V. Die Normierung der x-Achse auf 90 Sekunden bei den Versuchen mit unterschiedlichen

Gaszusammensetzungen und auf 2500 Sekunden bei den kontinuierlichen Versuchen erfolgt, um eine Gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In **Abbildung 3-13** ist als Beispiel je ein Diagramm von beiden Versuchsformen dargestellt. Das linke Teilbild (a) ist dabei jenes, welches für verschiedene Gaszusammensetzungen erstellt wurde, während das rechte Teilbild (b), hingegen die kontinuierlichen Versuche zeigt.

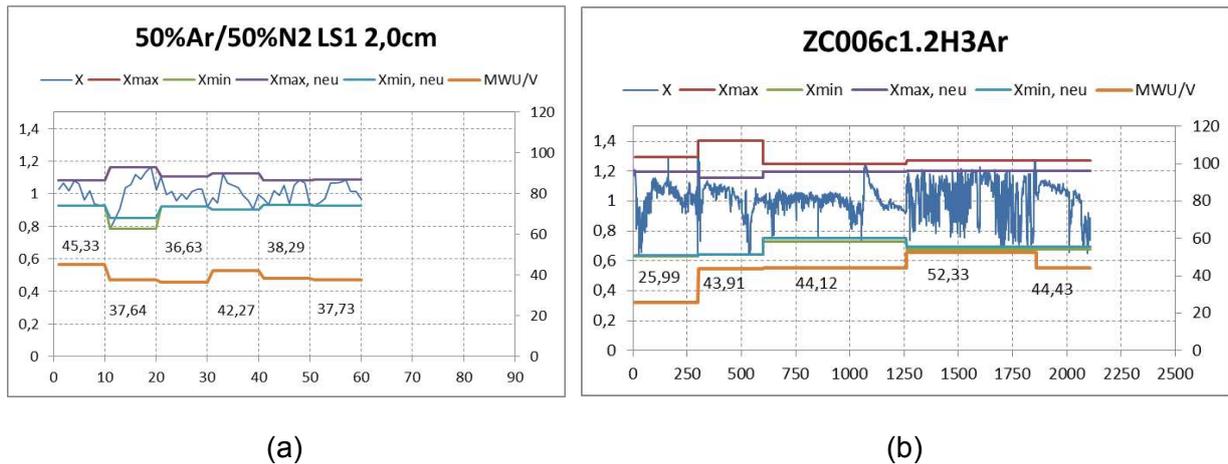


Abbildung 3-13: Auswertungsgrafiken basierend auf dem Mittelwert der Spannung

Abbildung 3-14 stellt die anderen beiden Diagrammtypen zur Evaluierung der Lichtbogenstabilität dar. Ein grundlegender, in diesen Diagrammen dargestellter Wert besteht in der Differenz von $X_{neu,max}$ und $X_{neu,min}$. Dieser Unterschied ist nach **Formel (3-4)** berechnet. Der erhaltene Wert ΔX_{neu} ist als rote Linie in den Diagrammen dargestellt und sein Wertebereich von 0 – 4 ist auf der sekundären y – Achse abzulesen.

$$\Delta X_{neu} = X_{neu,max} - X_{neu,min} \quad (3-4)$$

Die zweite notwendige Berechnung gliedert sich in zwei Schritte – **Formel (3-5)** und **(3-6)**. Dabei wird eine Spannungsabhängigkeit in Verbindung mit den Zeitabschnitten hergestellt.

$$\Delta U = |U_{n+1} - U_n| \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial \Delta U}{\partial t} = \frac{\sum_{x=1}^n \Delta U}{t_n} \quad (3-6)$$

Das Ergebnis der Berechnung aus (3-6) wird abschließend als Primärachse im Bereich von 0 – 2,5 in den Diagrammen (a) und (b) in **Abbildung 3-14** dargestellt (blaue strichlierte Linie).

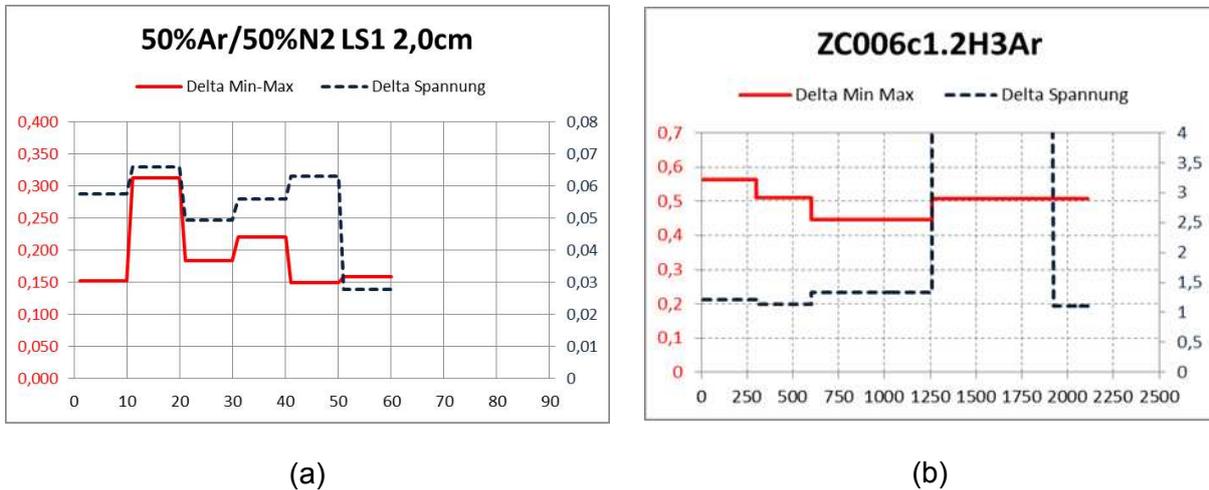


Abbildung 3-14: Auswertungsgrafik der Differenz Min/Max und Differenz der Spannung

All diese gesamten Berechnungen wurden für alle Gasgemische, Elektrodenabstände und Versuchsarten gesondert in Excel durchgeführt. **Abbildung 3-15** zeigt die Grundstruktur, welche sich durch all diese erstreckt. Als Beispiel wurde der Versuch 60% N₂/40%H₂ LS1 3,5 cm herangezogen. Dabei aufgelistet ist die Zeitspanne, die Spannung zu jedem bestimmten Zeitwert, der Mittelwert der Spannung für jedes Zeitintervall, X berechnet nach **Formel (3-2)**, X_{max}, X_{min} die Werte nach dem Entscheidungsbaum dargestellt in **Abbildung 3-12**, die neuen maximalen und minimalen Werte nach dem Entscheidungskriterium X_{max, neu} und X_{min, neu}, Delta V – welches den Spannungsunterschied zum vorherrschenden Zeitpunkt zum vorhergehenden angibt, sowie Delta Spannung berechnet nach (3-6), Delta Min-Max und den Mittelwert der Stromstärke. Delta Min-Max ist dabei die Differenz zwischen X_{max, neu} und X_{min, neu}.

3,5 cm												
t / sec	Spannungen	MWLV	X	Xmax	Xmin	Wennfunktion	Xmax, neu	Xmin, neu	Delta V	Delta Spannung	Delta Min-Max	MW/A
1,000	79,498	78,71	0,990095348	1,088	0,967	0,990095348	1,088	0,967	0,007760026	0,024656569	0,121	86,483
2,000	80,126	78,71	0,982335322	1,088	0,967	0,982335322	1,088	0,967	0,009256807	0,024656569	0,121	
3,000	79,378	78,71	0,991692129	1,088	0,967	0,991692129	1,088	0,967	0,011031279	0,024656569	0,121	
4,000	80,271	78,71	0,98056085	1,088	0,967	0,98056085	1,088	0,967	0,004377992	0,024656569	0,121	
5,000	80,631	78,71	0,976182858	1,088	0,967	0,976182858	1,088	0,967	0,009067716	0,024656569	0,121	
6,000	81,387	78,71	0,967115141	1,088	0,967	0,967115141	1,088	0,967	0,029183733	0,024656569	0,121	
7,000	79,003	78,71	0,996298875	1,088	0,967	0,996298875	1,088	0,967	0,019910158	0,024656569	0,121	
8,000	80,614	78,71	0,976388717	1,088	0,967	0,976388717	1,088	0,967	0,089399617	0,024656569	0,121	
9,000	73,852	78,71	1,065788333	1,088	0,967	1,065788333	1,088	0,967	0,022186123	0,024656569	0,121	
10,000	72,346	78,71	1,087974456	1,088	0,967	1,087974456	1,088	0,967	0,044392242	0,024656569	0,121	
11,000	74,239	77,47	1,043582214	1,109	0,823	1,043582214	1,109	0,823	0,221047975	0,095783131	0,287	
12,000	94,190	77,47	0,822534239	1,109	0,823	0,822534239	1,109	0,823	0,178816413	0,095783131	0,287	
13,000	77,370	77,47	1,001350653	1,109	0,823	1,001350653	1,109	0,823	0,030129843	0,095783131	0,287	
14,000	75,110	77,47	1,031480495	1,109	0,823	1,031480495	1,109	0,823	0,048815394	0,095783131	0,287	
15,000	71,716	77,47	1,080295889	1,109	0,823	1,080295889	1,109	0,823	0,088508035	0,095783131	0,287	
16,000	78,116	77,47	0,991787854	1,109	0,823	0,991787854	1,109	0,823	0,111865767	0,095783131	0,287	
17,000	88,047	77,47	0,879922087	1,109	0,823	0,879922087	1,109	0,823	0,152548128	0,095783131	0,287	
18,000	75,038	77,47	1,032470215	1,109	0,823	1,032470215	1,109	0,823	0,057430466	0,095783131	0,287	
19,000	71,084	77,47	1,089900681	1,109	0,823	1,089900681	1,109	0,823	0,01949289	0,095783131	0,287	
20,000	69,835	77,47	1,109393571	1,109	0,823	1,109393571	1,109	0,823	0,049176399	0,095783131	0,287	
21,000	71,096	75,38	1,060217171	1,116	0,894	1,060217171	1,116	0,894	0,121007642	0,086924484	0,221	
22,000	80,256	75,38	0,93920953	1,116	0,894	0,93920953	1,116	0,894	0,044800682	0,086924484	0,221	
23,000	84,276	75,38	0,894408847	1,116	0,894	0,894408847	1,116	0,894	0,078200185	0,086924484	0,221	
24,000	77,500	75,38	0,972609032	1,116	0,894	0,972609032	1,116	0,894	0,114630074	0,086924484	0,221	
25,000	69,329	75,38	1,087239106	1,116	0,894	1,087239106	1,116	0,894	0,028385847	0,086924484	0,221	
26,000	67,565	75,38	1,115624954	1,116	0,894	1,115624954	1,116	0,894	0,201441116	0,086924484	0,221	
27,000	82,453	75,38	0,914183838	1,116	0,894	0,914183838	1,116	0,894	0,129547036	0,086924484	0,221	
28,000	72,219	75,38	1,043730874	1,116	0,894	1,043730874	1,116	0,894	0,071008881	0,086924484	0,221	
29,000	77,491	75,38	0,972721994	1,116	0,894	0,972721994	1,116	0,894	0,080223374	0,086924484	0,221	
30,000	71,587	75,38	1,052945367	1,116	0,894	1,052945367	1,116	0,894	0,086924484	0,086924484	0,221	

Abbildung 3-15: Auswertungsdatei 60%N₂/40%H₂ LS1 3,5 cm

Um jene durch die soeben beschriebene Auswertung erlangten Erkenntnisse zu verifizieren, besteht der nächste Schritt aus einer zusätzlichen Bewertung der Ergebnisse mittels dreidimensionaler Oberflächendiagramme, welche unter Zuhilfenahme der Software Origin erstellt wurden. Dabei ist jede Gaszusammensetzung durch ein separates Diagramm repräsentiert – es gibt keine außerordentliche Rücksichtnahme auf die Elektrodenabstände und die Thyristoreinstellung. Von den zwei Diagrammen beinhaltet eines dabei die Differenz zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert X (**Abbildung 3-16**), während sich das andere auf die Delta Spannungswerte (**Abbildung 3-17**) bezieht.

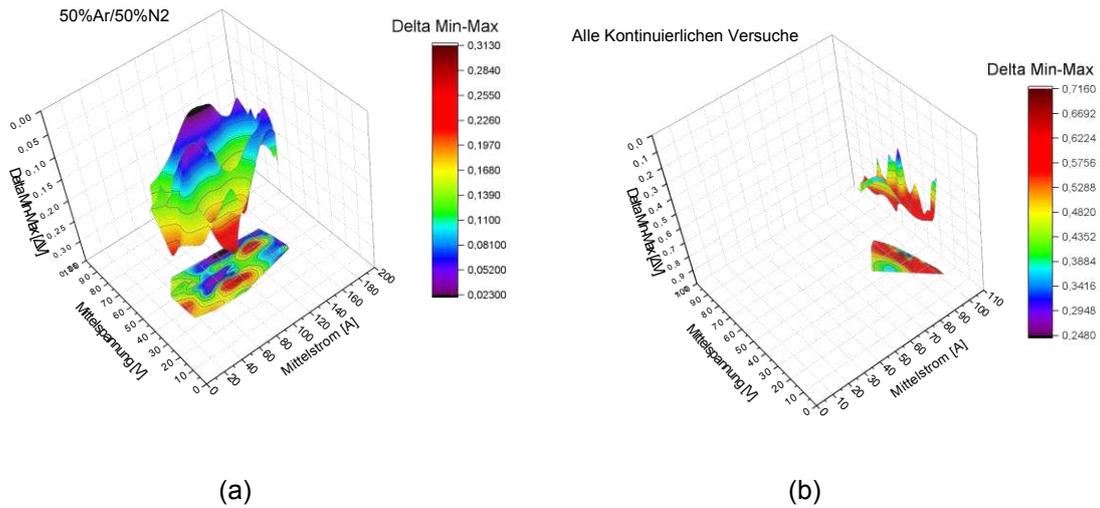


Abbildung 3-16: 3 Dimensionale Delta Min Max Diagramme – (a) Gaszusammensetzung; (b) Kontinuierliche Versuche

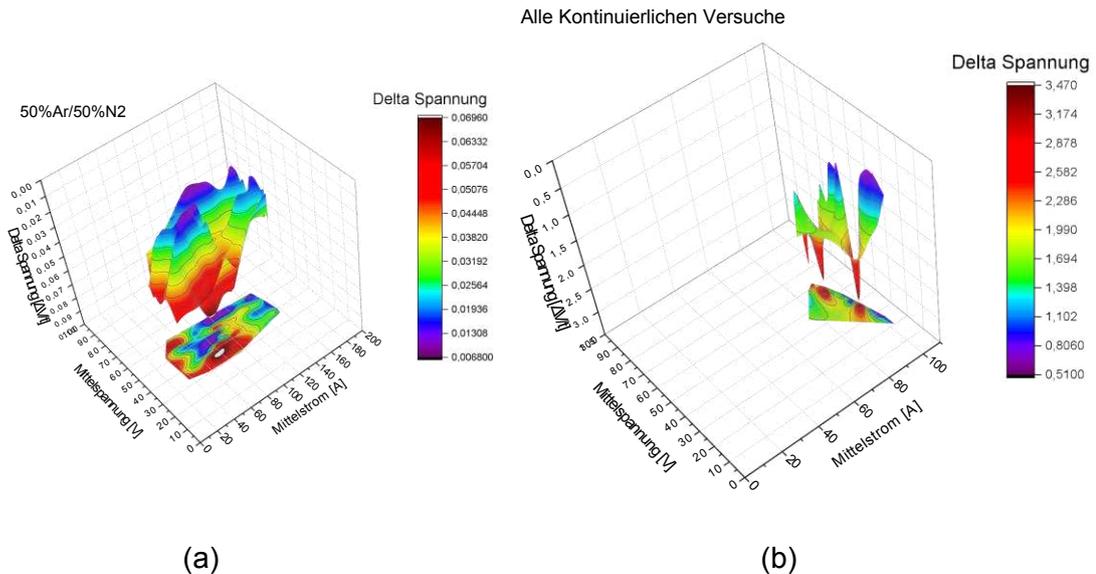


Abbildung 3-17: 3 Dimensionale Delta Spannung Diagramme – (a) Gaszusammensetzung; (b) Kontinuierliche Versuche

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Werten der verschiedenen Gaszusammensetzungen zu erreichen, werden die Stabilitätsfelder der verschiedenen Versuche herangezogen. Diese Felder wurden für die Gaszusammensetzungen bereits in vorhergehenden Tests ermittelt. Zur besseren Darstellung erhalten die z-Werte eine Farbcodierung. Grundlegend wird unterschieden zwischen den Diagrammen mit den Delta Min-Max-Werten (**Abbildung 3-19**) und den Delta Spannungswerten (**Abbildung 3-18**). Als nachfolgendes Unterscheidungsmerkmal dient die

Gaszusammensetzung. Für die Auswertung selbst werden je nur zwei Stabilitätsfelder abgebildet, wie in **Abbildung 3-18** und **Abbildung 3-19**, sowie im Ergebnisteil ersichtlich.

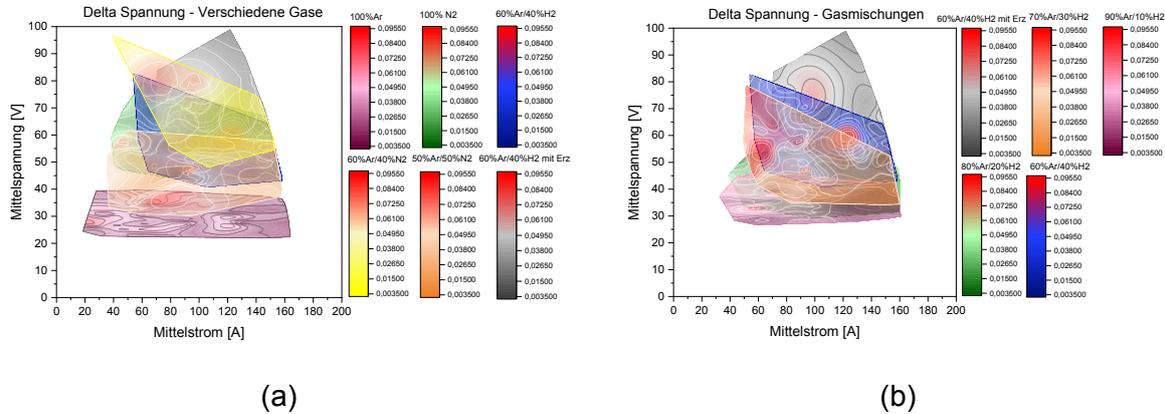


Abbildung 3-18: Stabilitätsfelder Delta Spannung – (a) Verschiedene Gase, (b) Gasmischungen

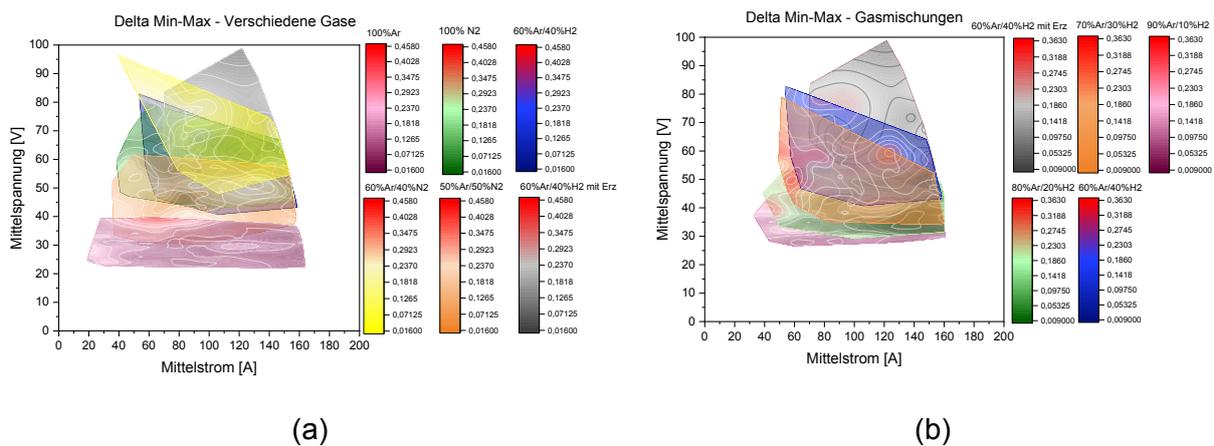


Abbildung 3-19: Stabilitätsfelder Delta Min-Max (a) – Verschiedene Gase, (b) Gasmischungen

3.2.1 Diagrammerklärung

In diesem Unterkapitel erfolgt die kurze Beschreibung der Diagramme, welche in Excel erstellt wurden.

Der Graph in **Abbildung 3-13** beinhaltet dabei sechs Linien, wobei nicht immer alle ersichtlich sind. Die Hauptlinie des Diagrammes ist die Hellblaue Linie genannt X. Sie berechnet sich nach **Formel (3-2)** und ergibt ist das Verhältnis zwischen dem Mittelwert der

Spannung dem Ist-Wert der Spannung. Anhand dieser Linie werden dann sowohl die rote als auch die grüne Begrenzungslinie berechnet. Die rote Kontur, welche nur indem Fall eines Ausreißers ersichtlich ist, ergibt die Maximale Begrenzung nach oben. Somit sind diese Werte die Maximalwerte X_{max} . Dasselbe Phänomen ergibt sich auch für X_{min} . Dabei ist der grüne Zug auch nur dann ersichtlich, wenn der Wert für X für kurze Zeit sehr klein wird. Die Türkise Kontur und der violette Zug zeigen wieder die Werte für X_{min} und X_{max} . Dabei sind nur die extremen Ausreißer durch das Kriterium im Flussdiagramm aus **Abbildung 3-12** bereits gelöscht und es ergeben sich die Werte $X_{min, neu}$ und $X_{max, neu}$. Die Letzte Darstellung in dem Graph ist dabei die orange Linie. Sie stellt den Mittelwert pro Zeitabschnitt dar.

Das Diagramm in **Abbildung 3-14** enthält nur zwei Linien. Diese ist zum einen die blaue, strichlierte Linie, und zum anderen eine rote Linie. In der blauen nicht durchgängigen Kontur sind die Werte für Delta Spannung berechnet nach **Formel (3-6)** abgebildet. Die rote Linie ergibt die Differenz zwischen $X_{max, neu}$ und $X_{min, neu}$.

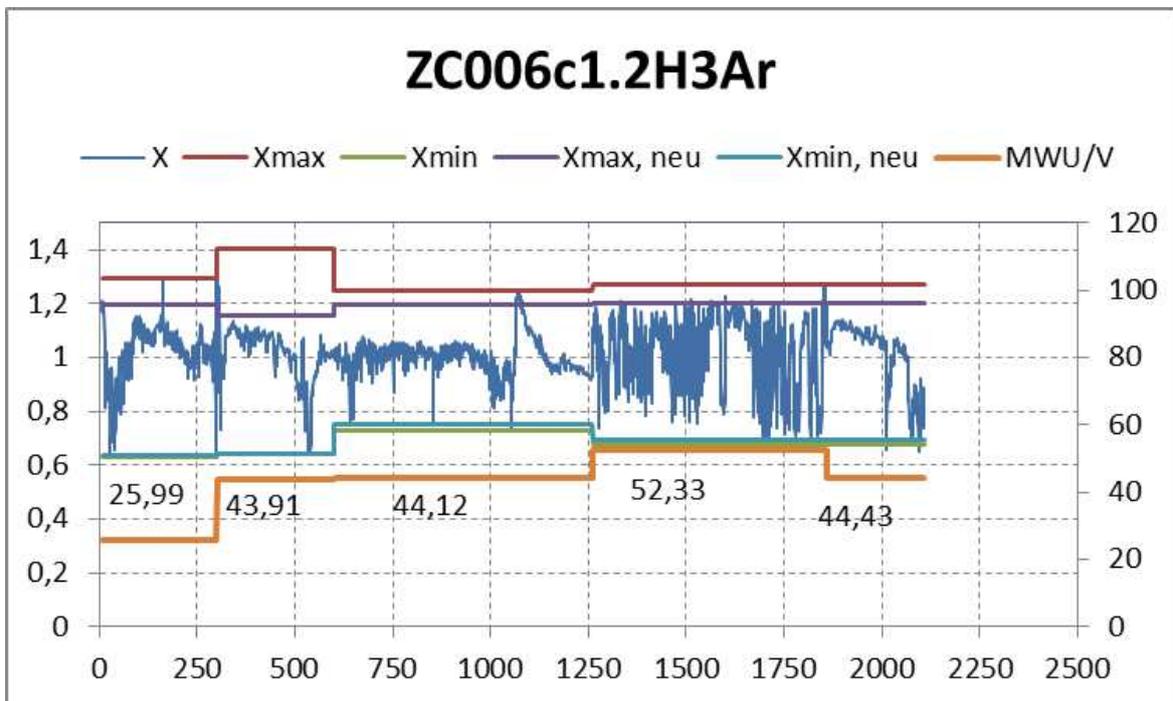


Abbildung 3-20: Versuch ZC006c1.2H3Ar um das Diagramm zu erklären

4 Ergebnisse

Dieser Teil widmet sich den Ergebnissen, welche sich aus den Versuchen inklusive der rechnerischen und graphischen Auswertung aus Excel und Origin ergeben. Um genaueren Einblick zu erlangen, erfolgt im ersten Teil die Unterscheidung der kontinuierlichen Versuche von jenen mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen. Die Versuche mit unterschiedlichen Gaszusammensetzungen sind auf eine Zeitspanne von 90 Sekunden beschränkt, die Versuchszeit für die kontinuierlichen Test betrug bis zu 2500 Sekunden. Dies entspricht den Diagrammen, welche mittels der Software Microsoft Excel berechnet und erstellt wurden (Eine Auswahl dieser Diagramme sind in **Tabelle 4**, **Tabelle 5**, **Tabelle 6**, **Tabelle 7** und **Tabelle 8** aufgelistet.) Eine gemeinsame Betrachtung ist durch die Darstellung der Stabilitätsfelder, ersichtlich in den Origin-Diagrammen, möglich. (**Tabelle 9**)

4.1 Excel Auswertung

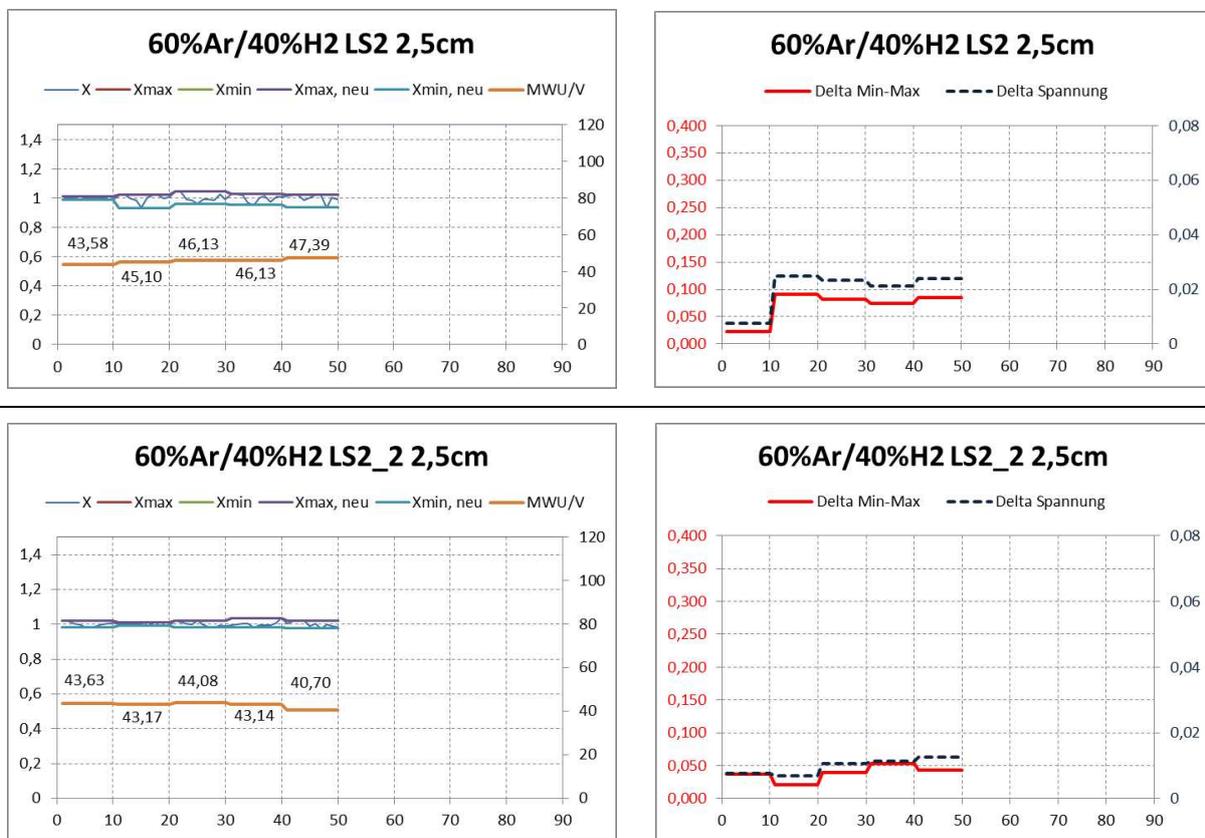
Die Betrachtung der Ergebnisse aus Excel erfolgt aufgeteilt in die Gasgemische, die Versuche mit kontinuierlicher Erzchargierung und jene Versuche, welche mit verschiedenen Gasgemischen unter kontinuierlicher Erzzufuhr durchgeführt wurden.

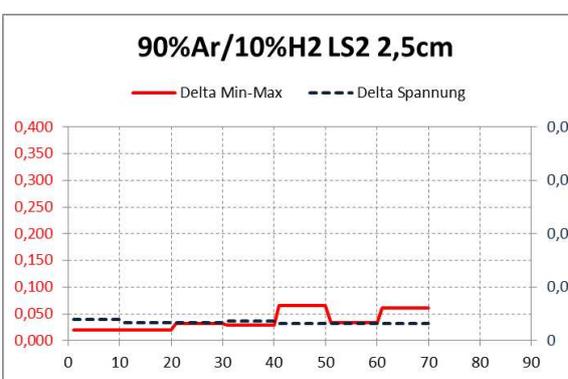
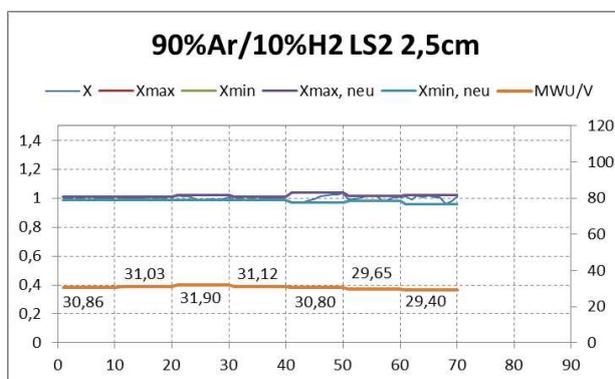
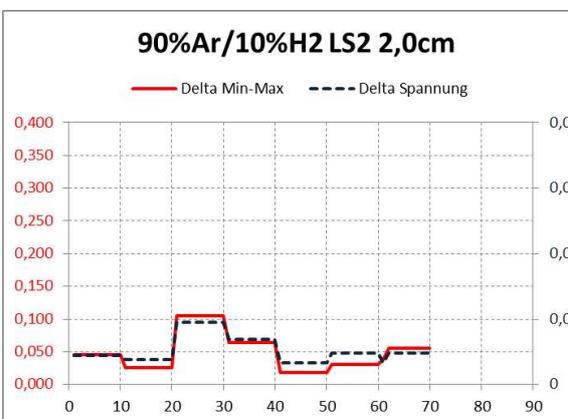
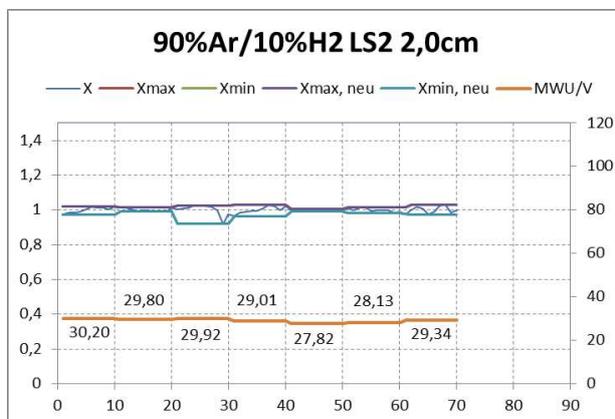
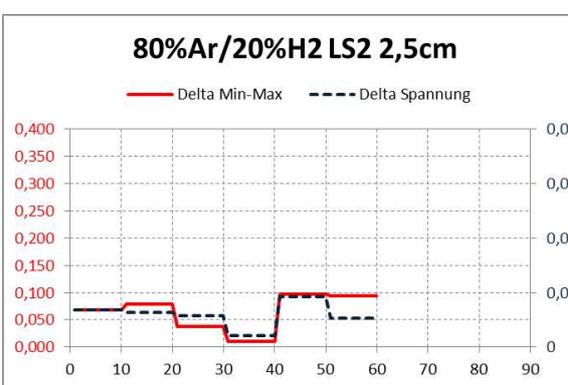
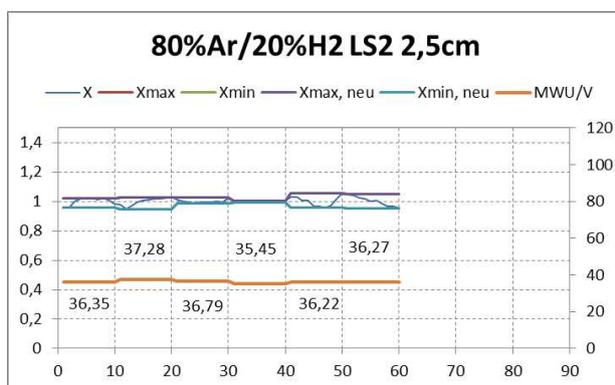
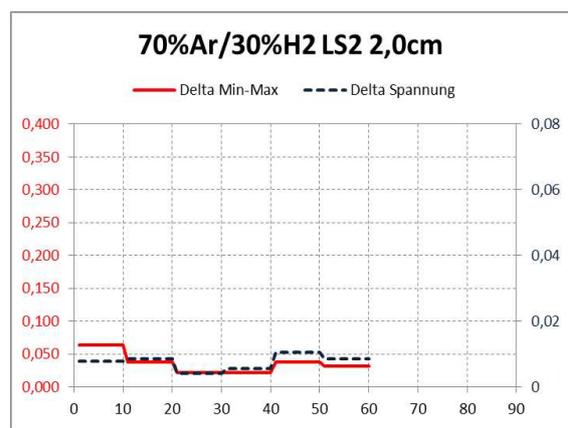
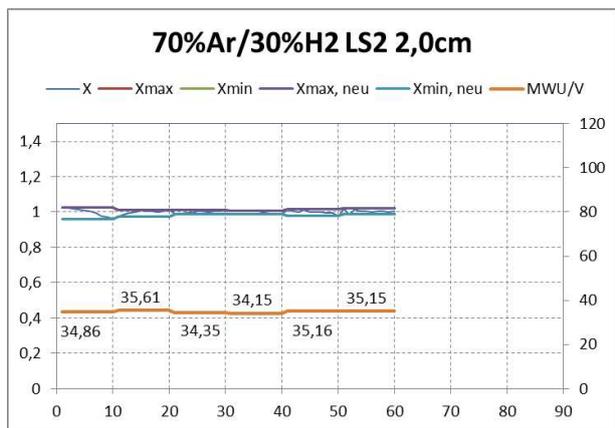
4.1.1 Gasgemische

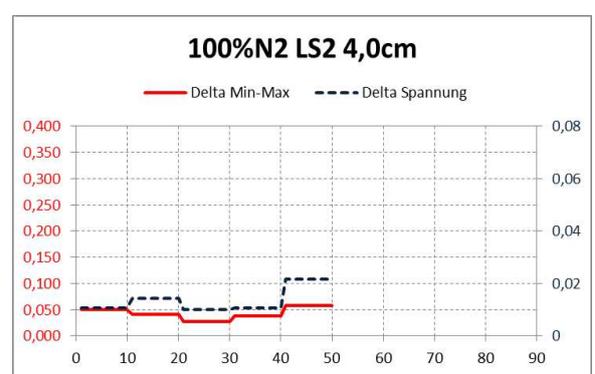
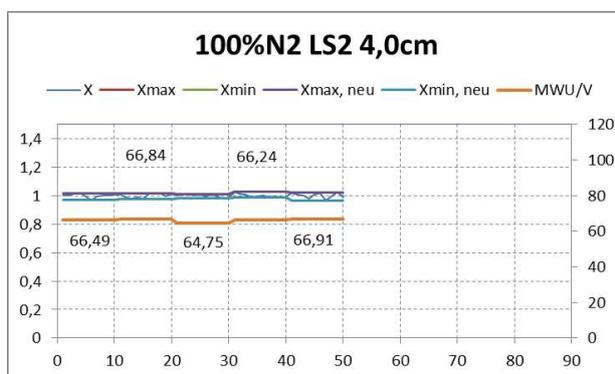
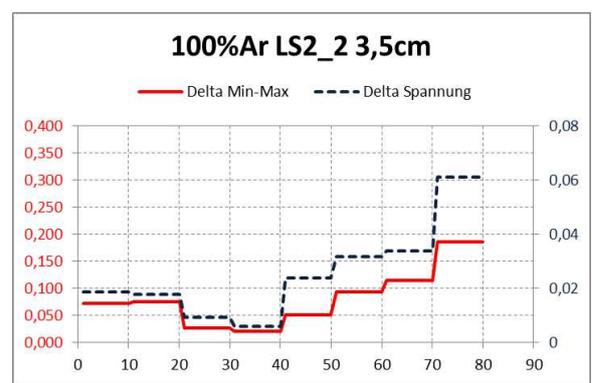
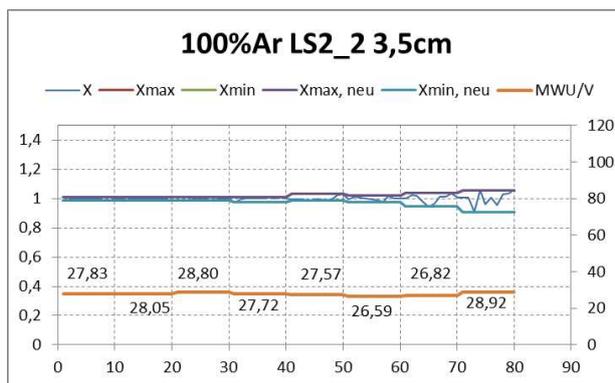
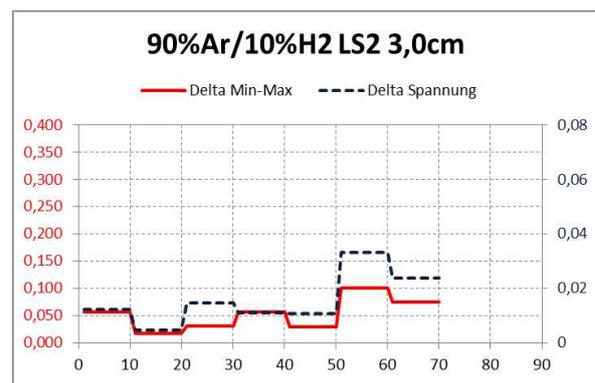
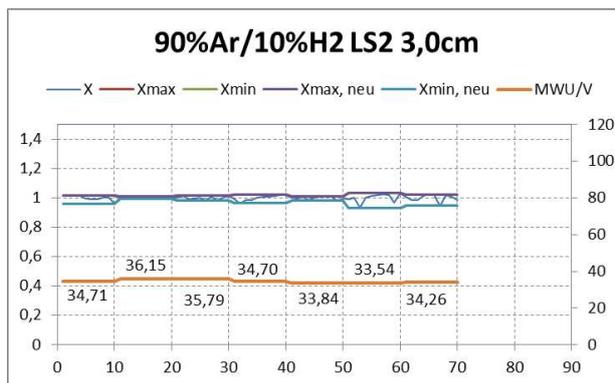
Nach der Auswertung und graphischen Darstellung der Daten können die erhaltenen Diagramme in zwei Kategorien eingeteilt werden. **Tabelle 4** zeigt dabei die stabiler ausgebildeten Versuche, wohingegen **Tabelle 5** die Tests mit instabilerem Lichtbogen darstellt.

Nach genauerem Betrachten der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass im Allgemeinen ein stabilerer Lichtbogen zu erzielen ist, wenn der Versuch mit Leistungsstufe 2 durchgeführt wird. Dieser Umstand ist durch eine Unterversorgung des Lichtbogens mit Strom bei Leistungsstufe 1 erklärbar. Bei der höheren Leistungsstufe 2 wird der Lichtbogen mit mehr Leistung durch Strom und Spannung versorgt, welche nach der Formel $P = U \cdot I$ [42] berechenbar ist. Sowohl der Eintrag des Stroms (I) als auch der Spannung (U) ist bei der Durchführung von Versuchen in der HPSR abhängig von der äußeren Einspeisung.

Tabelle 4: Stabile Versuche







Ein weiteres, aus **Tabelle 4** ersichtliches Ergebnis ist, dass jene Versuche eine höhere Lichtbogenstabilität zeigen, bei welchen auch der Mittelwert der Spannung über ein bestimmtes Zeitintervall immer ähnlich bleibt. Sobald dabei größere Schwankungen auftreten, verliert der Lichtbogen an Stabilität und wandert mehr in seinem Brennpunkt herum (vergleiche **Abbildung 4-1** (brennt den gesamten Zeitablauf sehr stabil an einer Stelle) und **Abbildung 4-2** (wandert speziell im Zeitpunkt der Aufnahme im Gesamten Reaktorraum herum)). In der Auswertung ersichtlich ist dieser Vergleich durch die orangen Linien in den linken Teilbildern aus **Tabelle 4** und **Tabelle 5**.

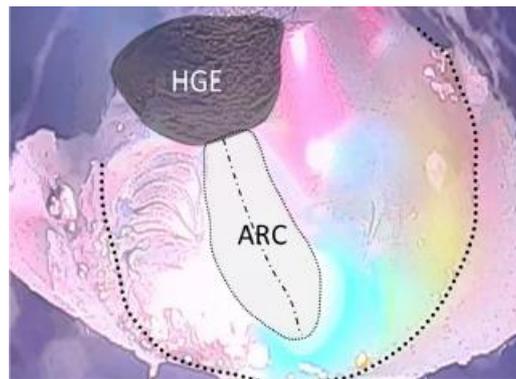


Abbildung 4-1: Stabil Brennender Lichtbogen [1]

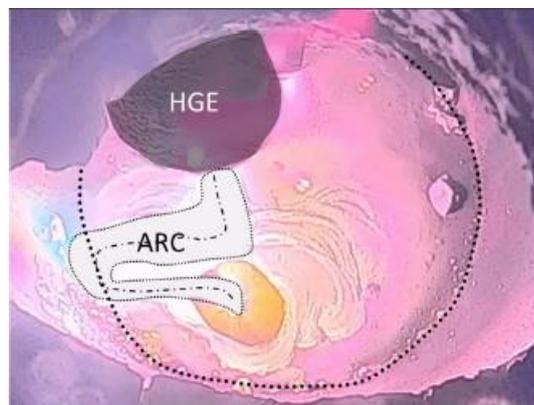


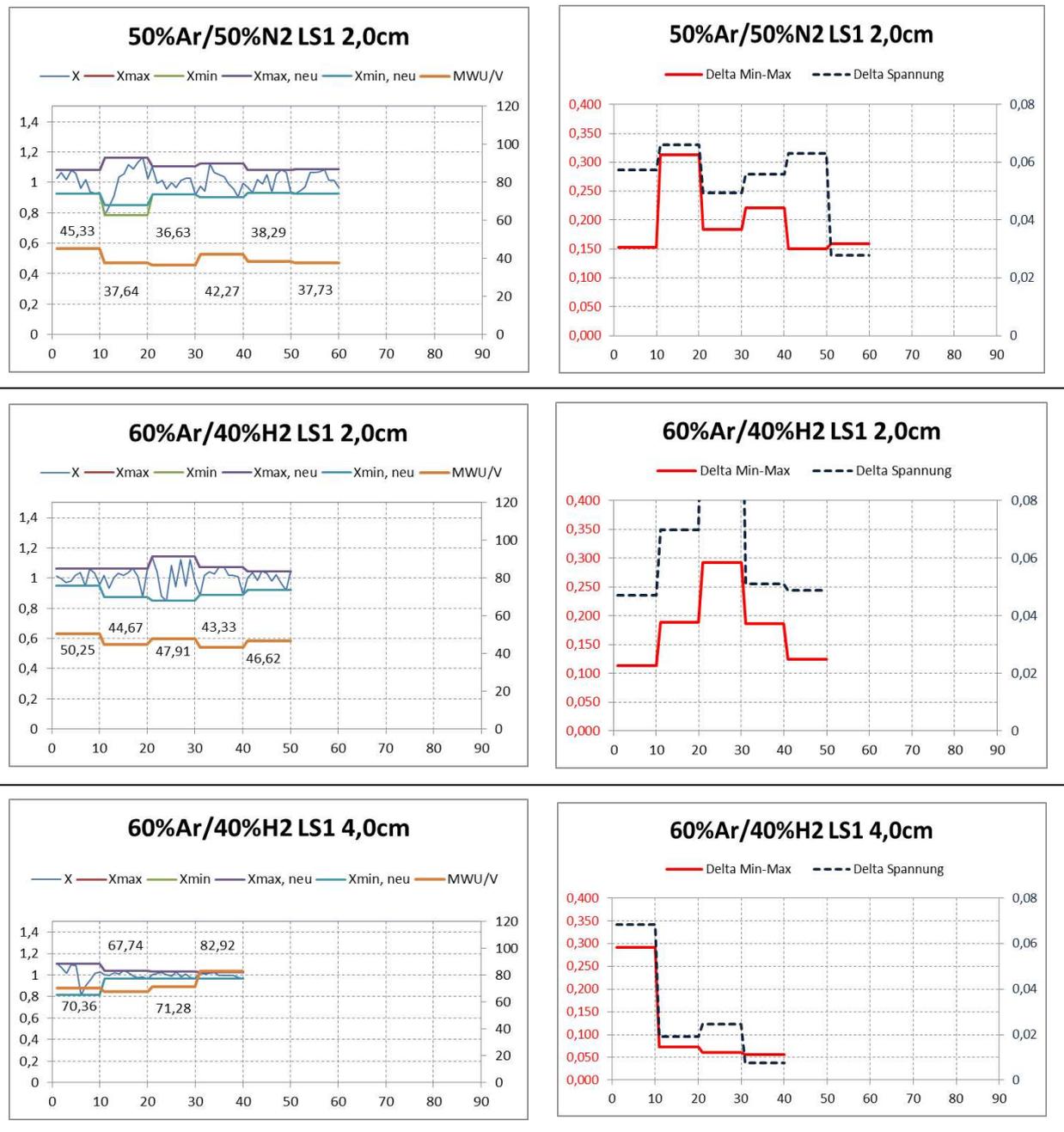
Abbildung 4-2: Instabil Brennender Lichtbogen [1]

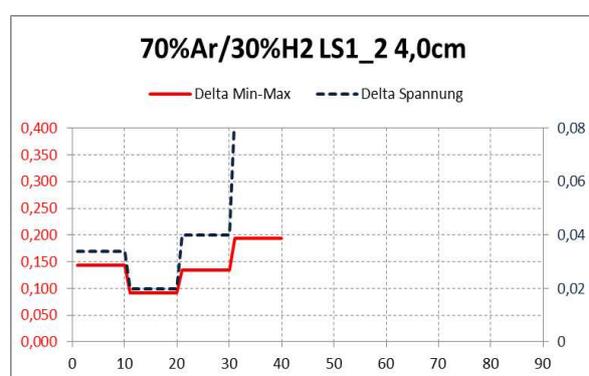
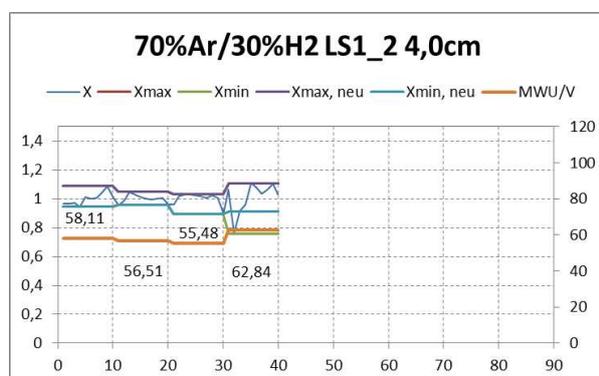
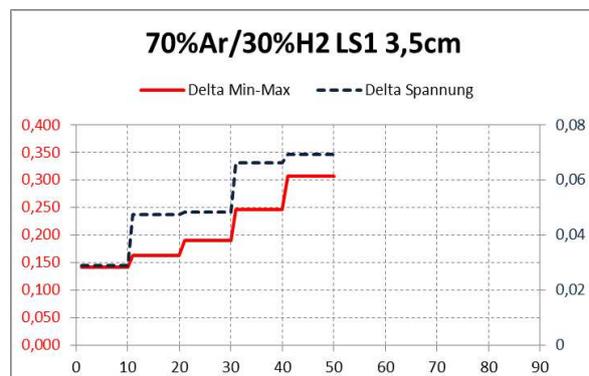
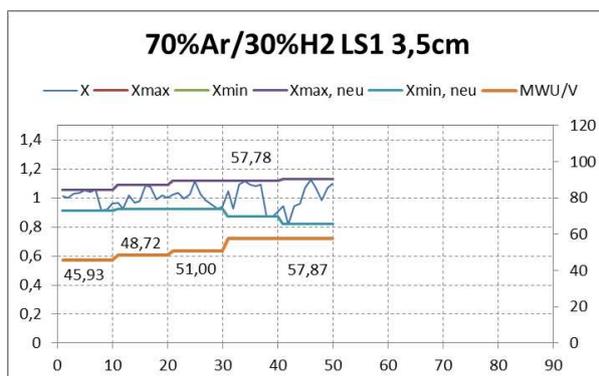
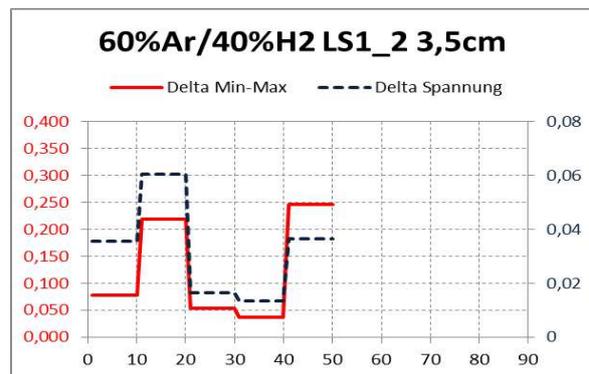
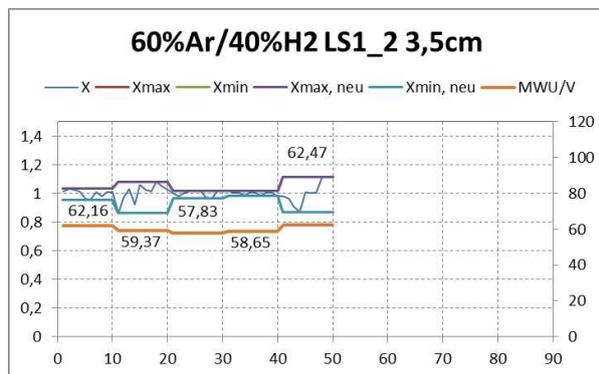
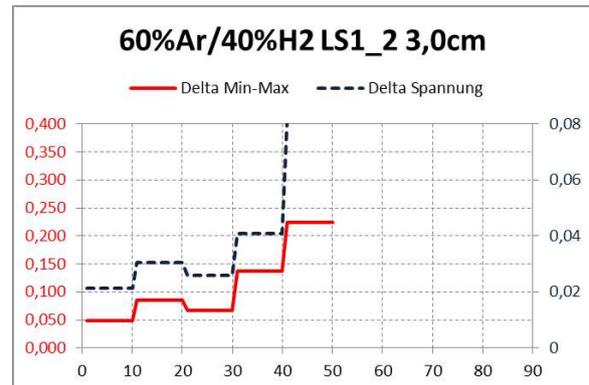
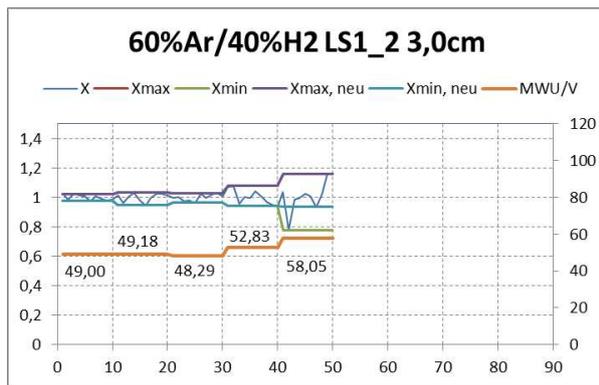
Im Vergleich der beiden **Tabellen 4 und 5** ist ersichtlich, dass der Wasserstoffgehalt selbst einen Einfluss darauf hat, ob sich der Lichtbogen stabil ausbildet oder instabil brennt. Wenn kein Wasserstoff mehr im Reduktionsgas mehr vorhanden ist, kann der Abstand zwischen der Anode und der Kathode wesentlich weiter sein und der Lichtbogen brennt weiterhin im stabilen Zustand.

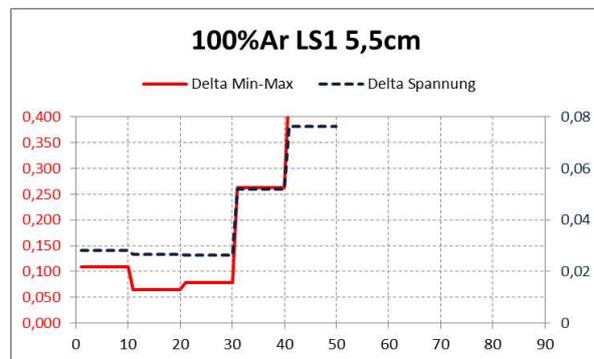
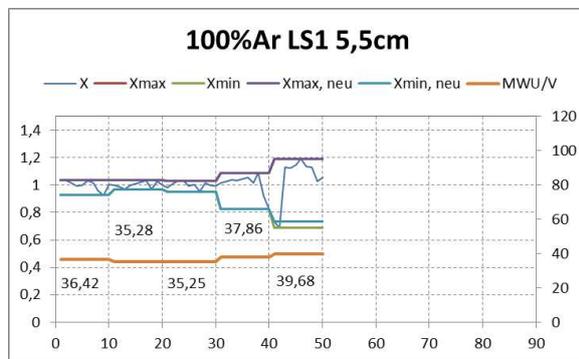
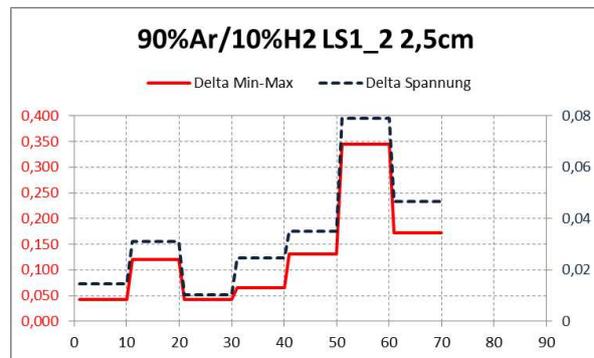
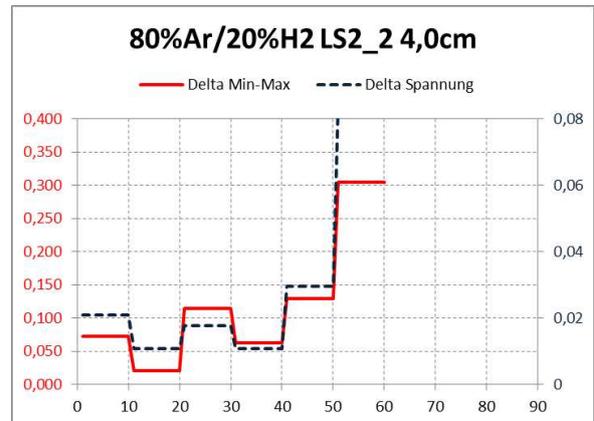
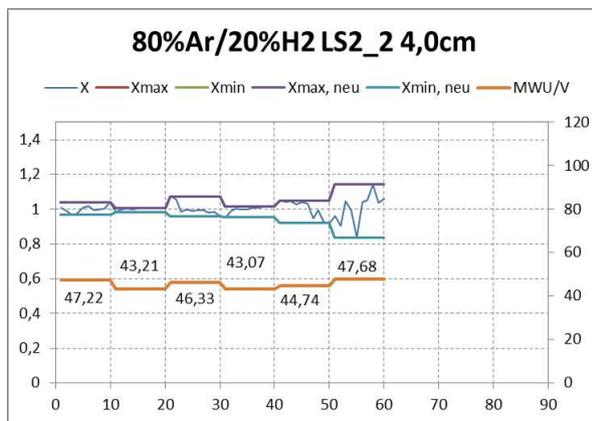
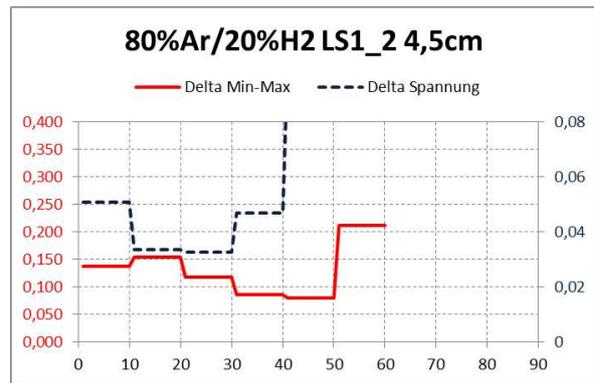
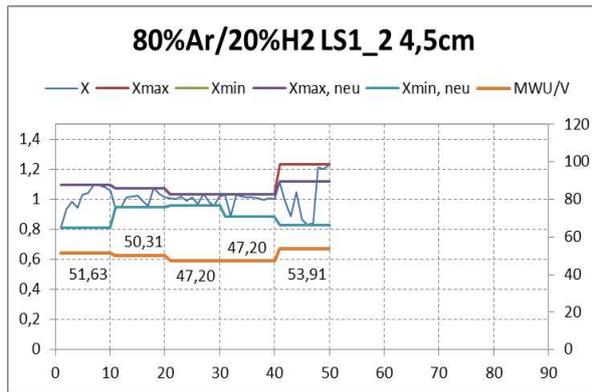
Im Vergleich der Delta Min-Max- und Delta Spannungs-Diagramme in **Tabelle 4** und **Tabelle 5** ist gezeigt, dass die beiden Linien aufgrund der bewussten Wahl der Skala sehr nahe beieinander liegen. Es ist wichtig die beiden Linien von Delta Min-Max nach **Formel (3-4)** und von Delta Spannung nach **(3-6)** gemeinsam zu betrachten, da es möglich ist, dass trotz sehr großen auftretenden Spannungsschwankungen nur ein geringer Unterschied zwischen Delta Min-Max vorliegt. Durch die Berechnung der Delta Spannungswerte insbesondere werden auch die großen Spannungsunterschiede, welche auftreten berücksichtigt. Nichtsdestotrotz sind die Werte beider Berechnungen bei einem stabileren Lichtbogen zu kleineren Bereichen hin verschoben. Dieser Umstand ist dadurch erklärbar,

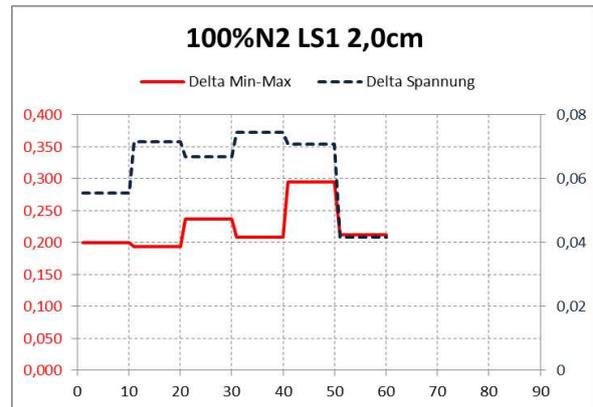
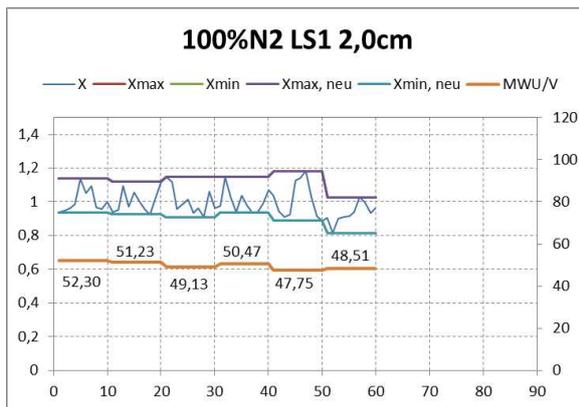
dass bei stabilerem Verhalten nicht so große Schwankungen im Spannungseintrag vorliegen, wodurch die Differenzen der beiden Berechnungen kleiner werden.

Tabelle 5: Instabile Versuche





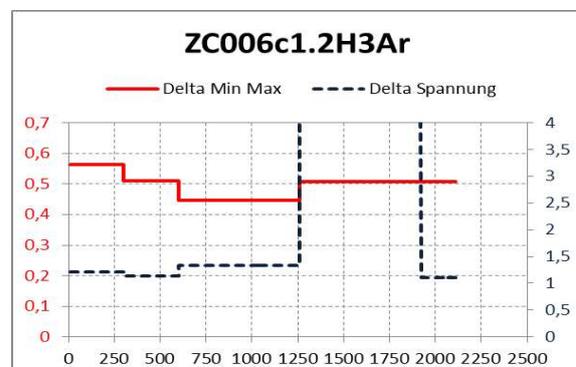
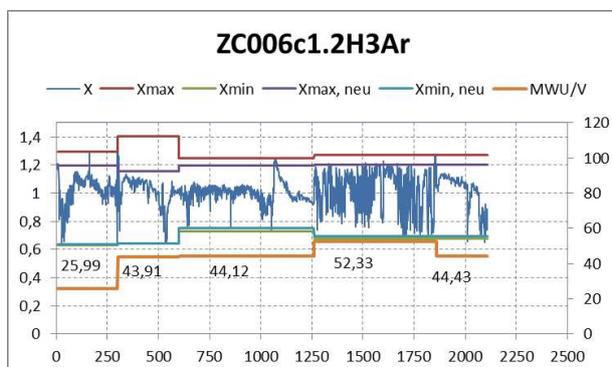


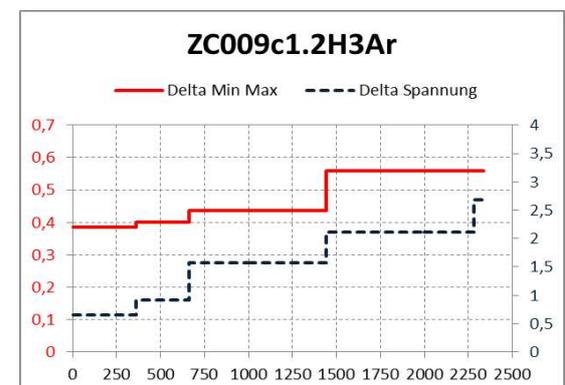
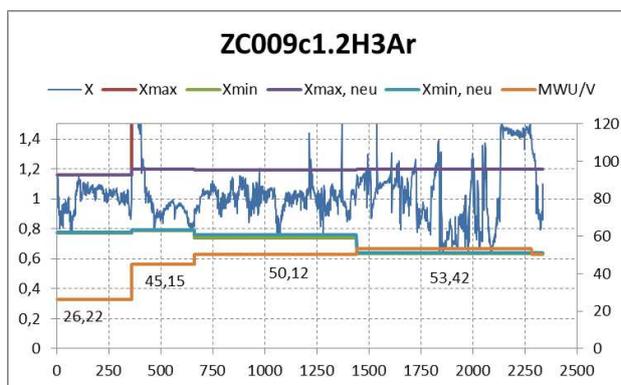
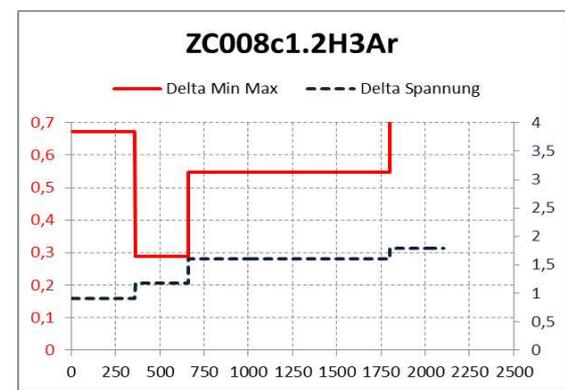
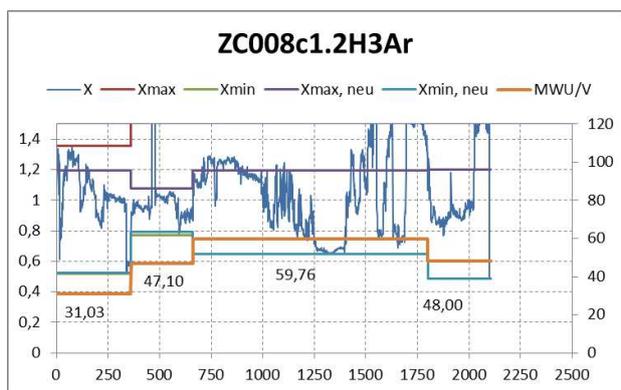
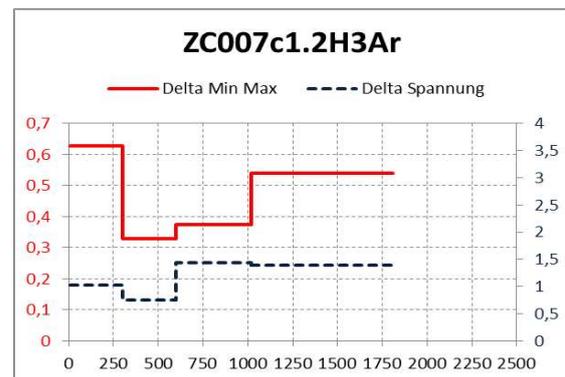
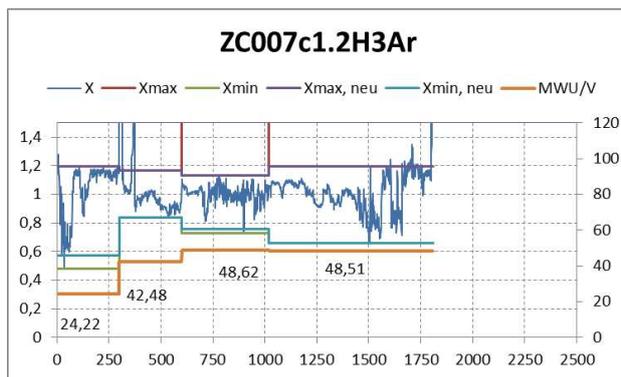


4.1.2 Kontinuierliche Erzchargierung

Tabelle 6 stellt eine Auswahl der unter kontinuierlicher Erzchargierung durchgeführten Versuche dar. Der Rest dieser Diagramme ist im Anhang ersichtlich. Wie in den Versuchen mit verschiedenen Gasgemischen ist ersichtlich, dass die Kurven von Delta Min-Max und Delta Spannung näher beieinanderliegen, wenn die Eingangsspannung des Prozesses stabiler ist. Aus den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die meisten Ausreißer der Spannung zwar höheren Werten hin tendieren, ein Abfall der Spannung zu niedrigeren Spannungen kommt hingegen sehr selten vor. Wenn jedoch ein Abfall der Spannung auftritt ist der Sprung des Verlaufes größer als bei einem Anstieg.

Tabelle 6: Kontinuierliche Versuchsauswertung

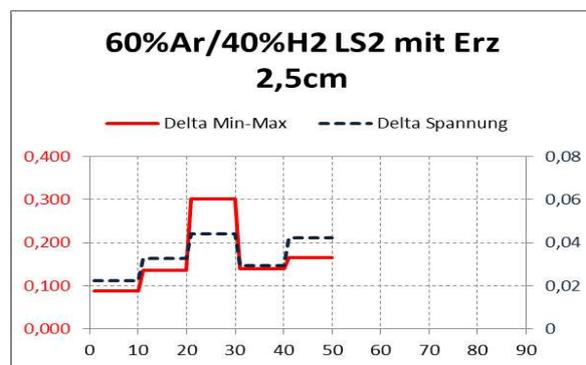
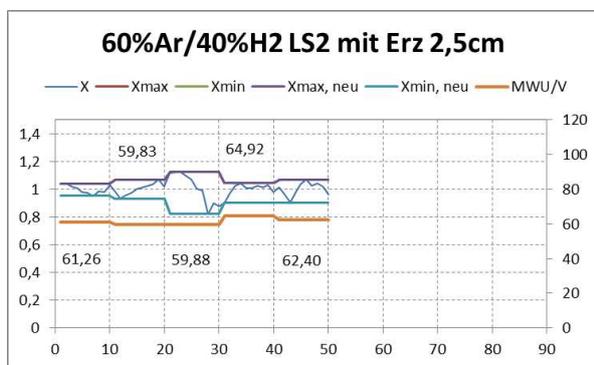
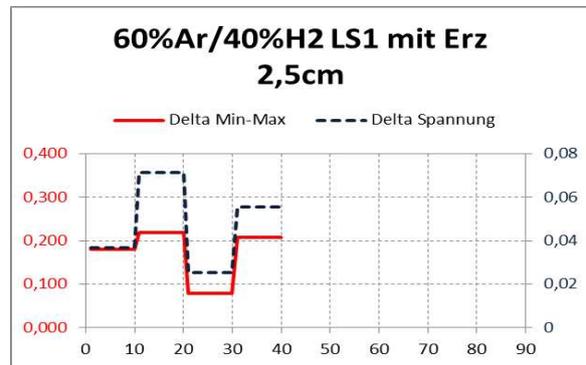
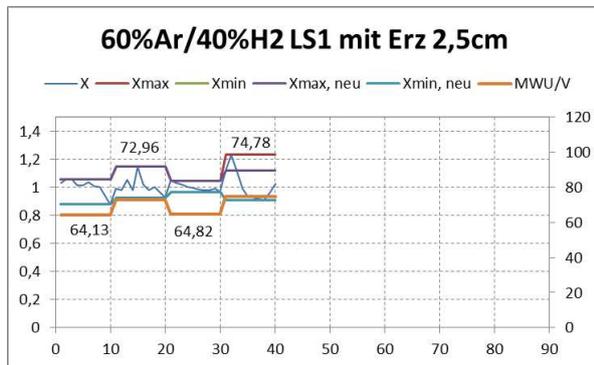




4.1.3 Gasmische mit kontinuierlicher Erzchargierung

In den untenstehenden Tabellen, **Tabelle 7** und **Tabelle 8**, erfolgt der Vergleich der Versuche mit dem Gasmisch 60 % Argon, 40 % Wasserstoff mit und ohne Erzchargierung. Dadurch soll der Einfluss der kontinuierlichen Erzchargierung auf die Stabilität des Lichtbogens aufgezeigt werden. Zum Vergleich werden jene Diagramme mit einem Elektrodenabstand von 2,5 cm herangezogen.

Tabelle 7: Auswahl von Ergebnissen von Gasgemischen mit kontinuierlicher Erzchargierung



Wie bereits im **Unterpunkt 4.1.1** angemerkt, ist der Lichtbogen stabiler bei Leistungsstufe 2. Die höhere Leistung wird durch erhöhten Strom- und Spannungswert bereitgestellt als bei Leistungsstufe 1. Nichtsdestotrotz ist in der graphischen Darstellung aller Versuche ersichtlich, dass die Stabilität mit kontinuierlicher Chargierung stark abnimmt. Die Mittelwerte der Spannung bei diesen Versuchen liegen deutlich höher (ca. 20V). Die Stabilität des Lichtbogenbrennverhaltens nimmt dabei aber bei beiden Leistungsstufen im gleichen Maße ab. Dies bedeutet, dass der Lichtbogen im Aggregat zu wandern beginnt. Es besteht auch die Möglichkeit, dass er in die Feuerfestausmauerung zu brennen beginnt, beziehungsweise dass der Lichtbogen sich an der Feuerfestausmauerung abstößt und dann zur Anode brennt.

Tabelle 8: Vergleichstabelle ohne Erzchargierung

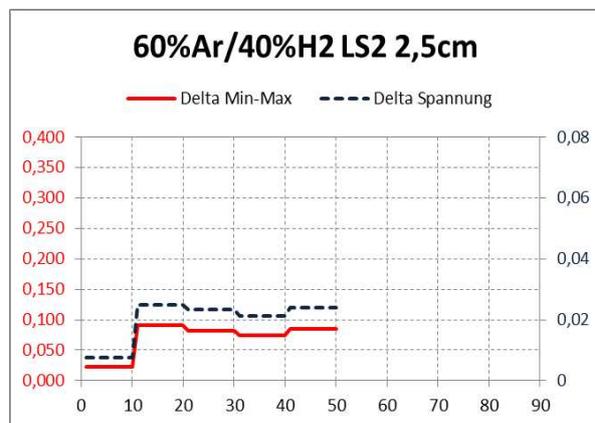
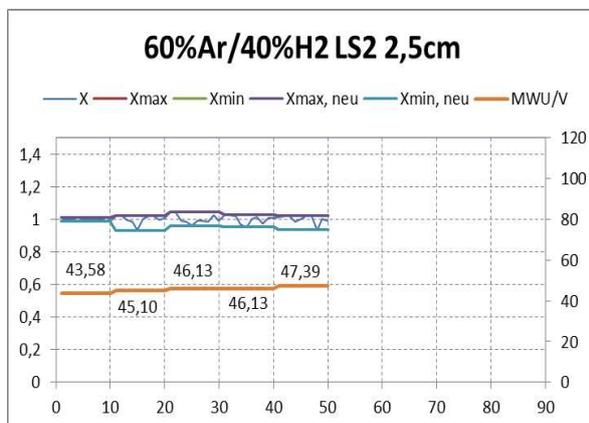
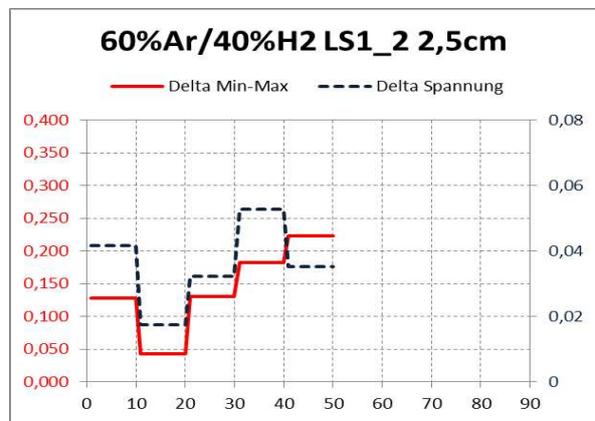
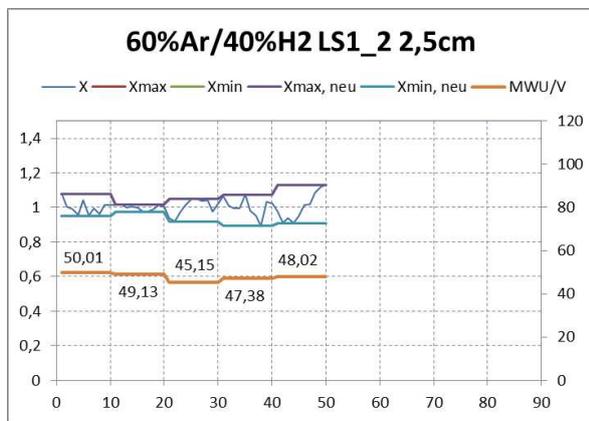
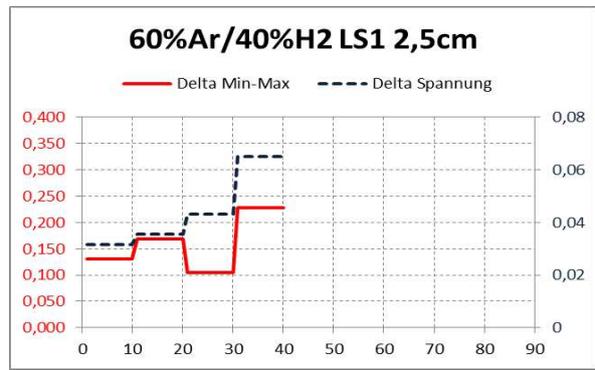
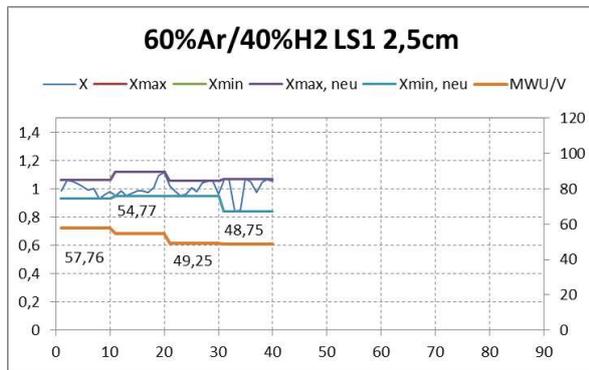
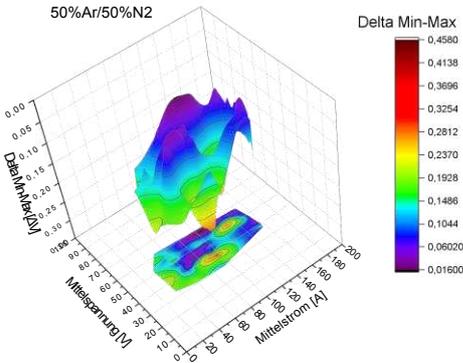
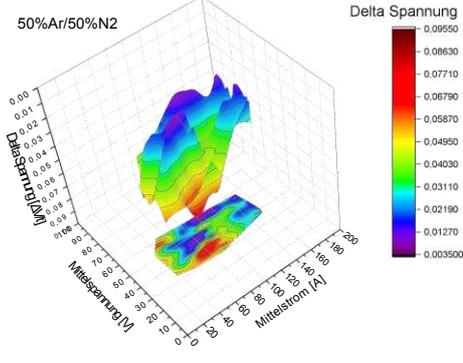
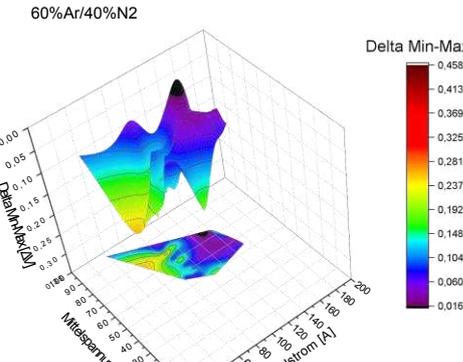
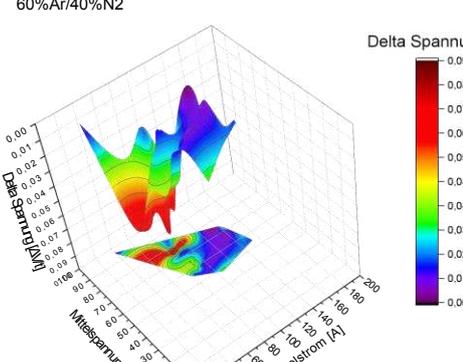
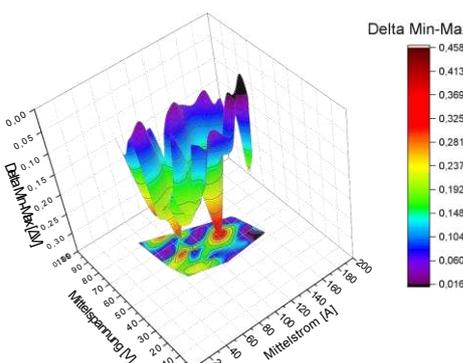
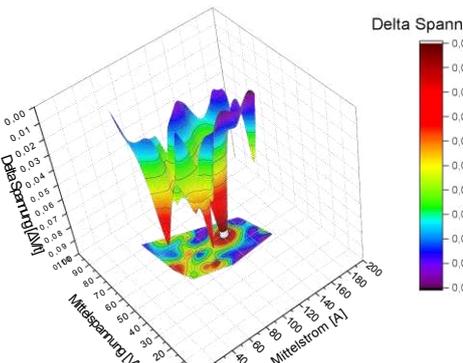
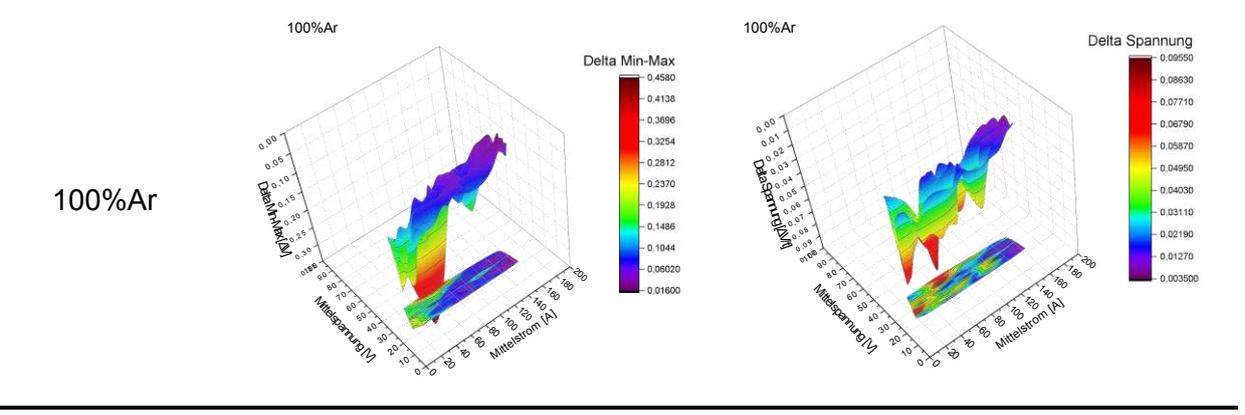
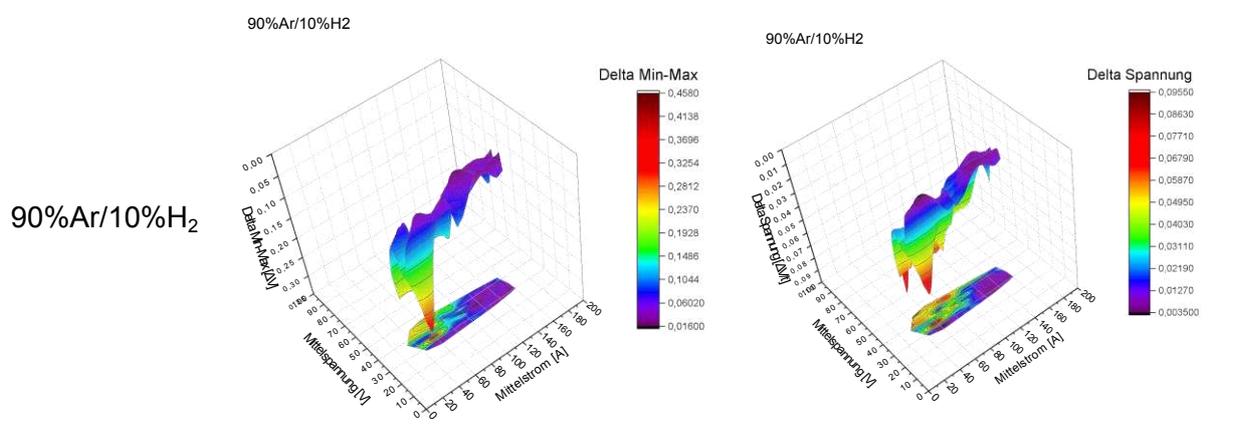
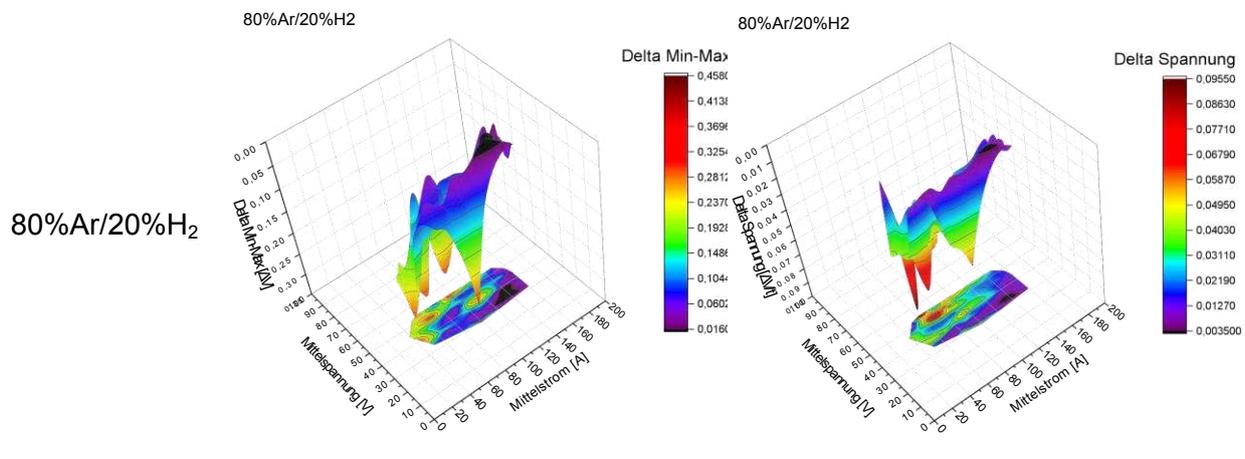
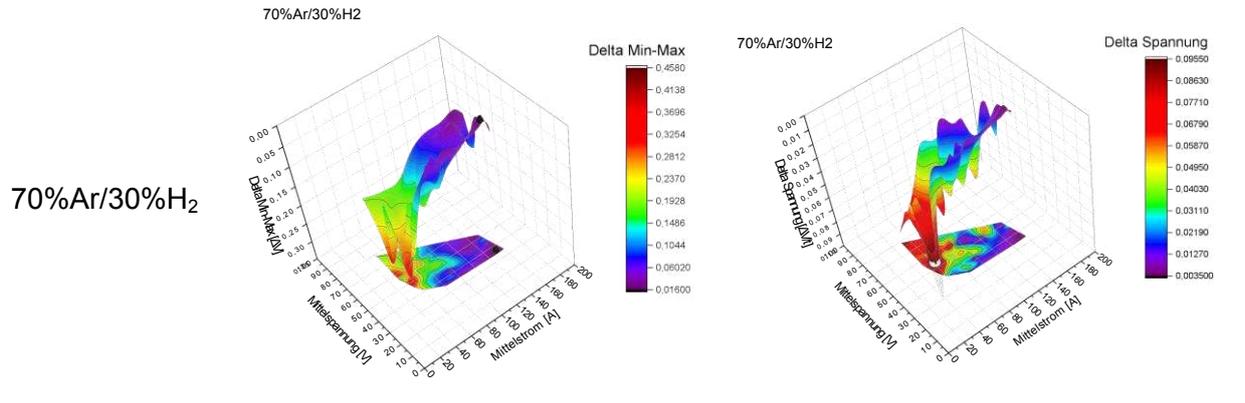
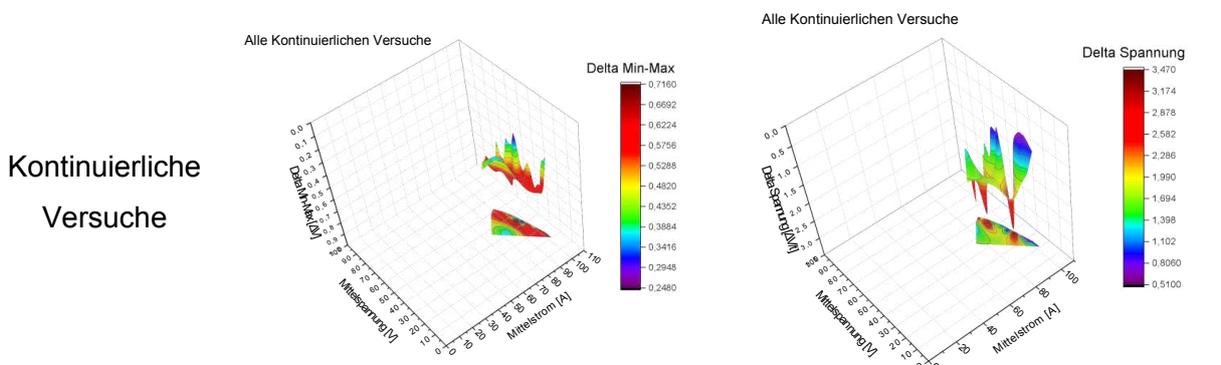
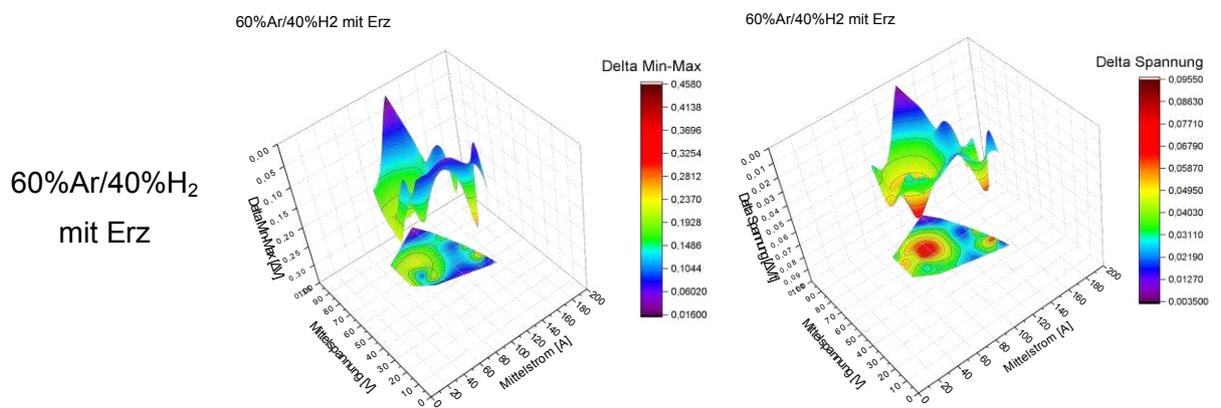
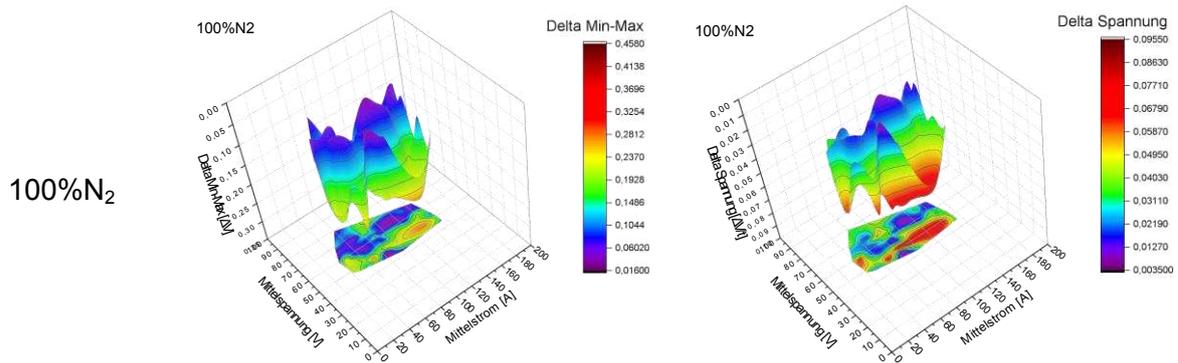


Tabelle 9: Ergebnisse Oberflächendiagramme

Versuchs- bezeichnung	Delta Min-Max	Delta Spannung
50%Ar/50%N ₂		
60%Ar/40%N ₂		
60%Ar/40%H ₂		





Nach eingehender Analyse dieser Diagramme kann festgestellt werden, dass sich der Lichtbogen speziell bei Spannungen um 40 V stabiler ausbildet als bei höheren oder niedrigeren. Dies ist grundsätzlich ein eher niedriges Spannungsniveau. Die Stromstärke hingegen muss für einen stabilen Bogen bei deutlich höheren Werten um 80 bis 160 A liegen.

Eine weitere Erkenntnis, welche aus diesen Diagrammen und den via Excel erstellten gezogen werden kann, ist, dass sich die Stabilität des Lichtbogens durch eine kontinuierliche Erzchargierung während des Versuchsablaufes deutlich verringert.

4.2.2 Stabilitätsfelder

Um die Gasmischungen und verschiedenen Gase und deren Einfluss auf die Stabilität untereinander vergleichbar zu machen, sind in den nachfolgenden Diagrammen lediglich die Stabilitätsfelder dargestellt. Diese Diagramme existieren wiederum sowohl für die Delta Spannungswerte als auch für die Delta Min-Max Werte gesondert. Zur besseren Vergleichbarkeit sind auch hier wieder alle Diagramme auf einen gemeinsamen Maßstab normiert. Die instabilen Bereiche sind dabei in Rot dargestellt, die stabilen Bereiche hingegen in unterschiedlich, willkürlich festgelegten Farben. Der Farbencode ist in **Tabelle 10** aufgelistet.

Tabelle 10: Farbgebung in den folgenden Diagrammen

<i>Gasmischung</i>	<i>Farbe</i>
50% Ar/50% N ₂	Orange
60% Ar/40% N ₂	Gelb
60% Ar/40% H ₂	Blau
70% Ar/30% H ₂	Orange
80% Ar/20% H ₂	Grün
90% Ar/10% H ₂	Lila
100% Ar	Lila
100% N ₂	Grün
60% Ar/40% H ₂ mit Erz	Grau

Abbildung 4-3 stellt die Differenz der Spannung für die verschiedenen Gase auf. Bei diesen Stabilitätsfeldern ist ersichtlich, dass bei jedem der verschiedenen Gase der Lichtbogen in Bereiche der Instabilität rutscht. Dies ist durch die roten Bereiche im stabilen Feld ersichtlich. Am deutlichsten instabil wird der Lichtbogen dabei bei einem Gasverhältnis von 60 % Ar/40 % H₂. Den geringsten Verlust an Lichtbogenstabilität weist dabei die Mischung 50 % Ar/50 % N₂ auf. Der genauere Einfluss der Menge an H₂ im Gasgemisch ist in den Stabilitätsfeldern aus **Abbildung 4-5** ersichtlich.

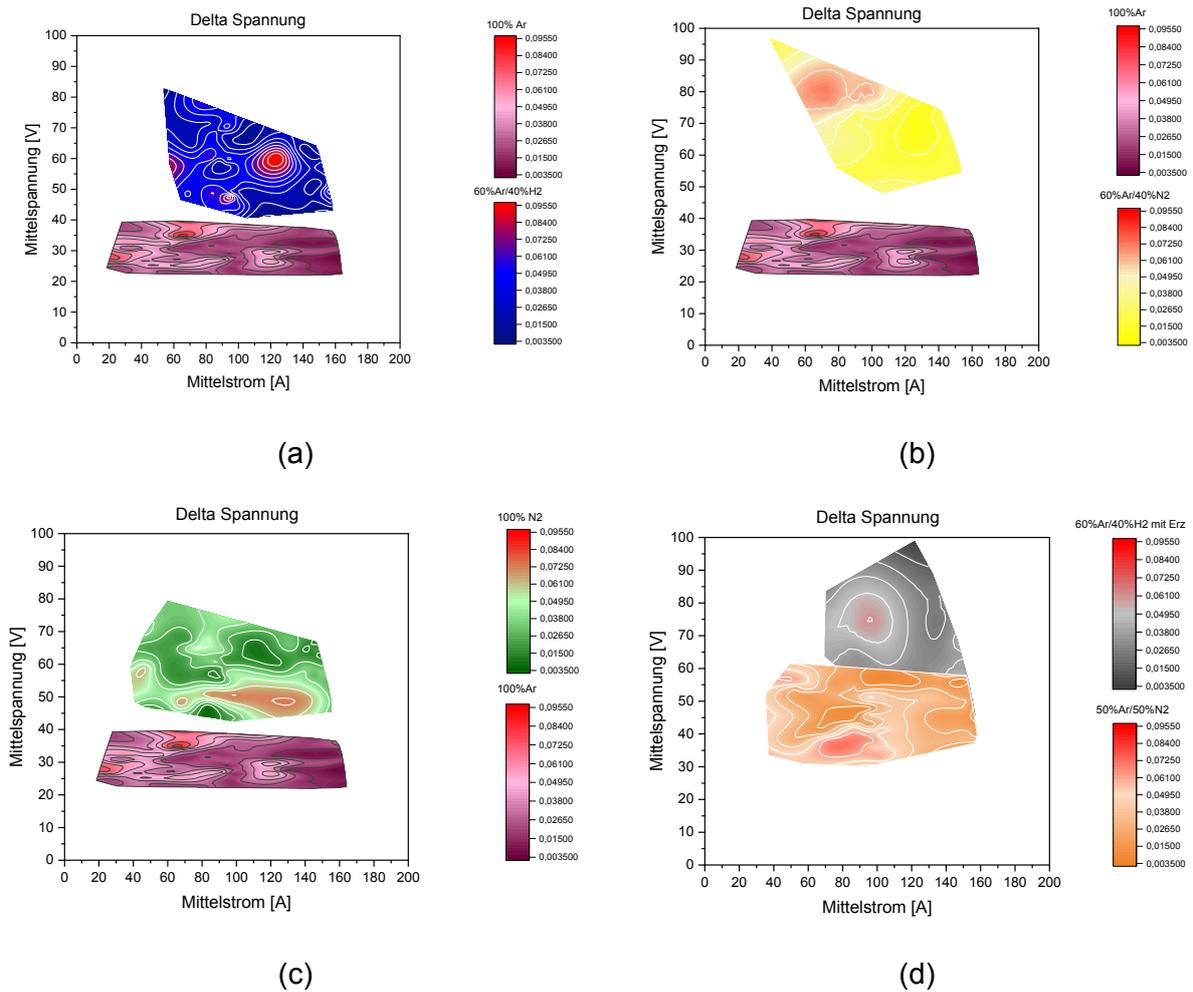


Abbildung 4-3: Delta Spannung – Verschiedene Gase

Abbildung 4-4 geht auf die Delta Min-Max Werte der verschiedenen Gase ein. Diese Diagramme bestätigen die Annahme, dass die Delta Min-Max Werte auch bei größeren Schwankungen trotzdem geringer sein können. Dadurch ist ersichtlich, dass es nötig ist die Delta Spannungswerte für die bestimmten Zeitintervalle zu berechnen und gesondert zu betrachten. Ein genaues Ergebnis über stabiles oder instabiles Verhalten des Lichtbogens kann nur durch in Betracht ziehen aller Methode erreicht werden.

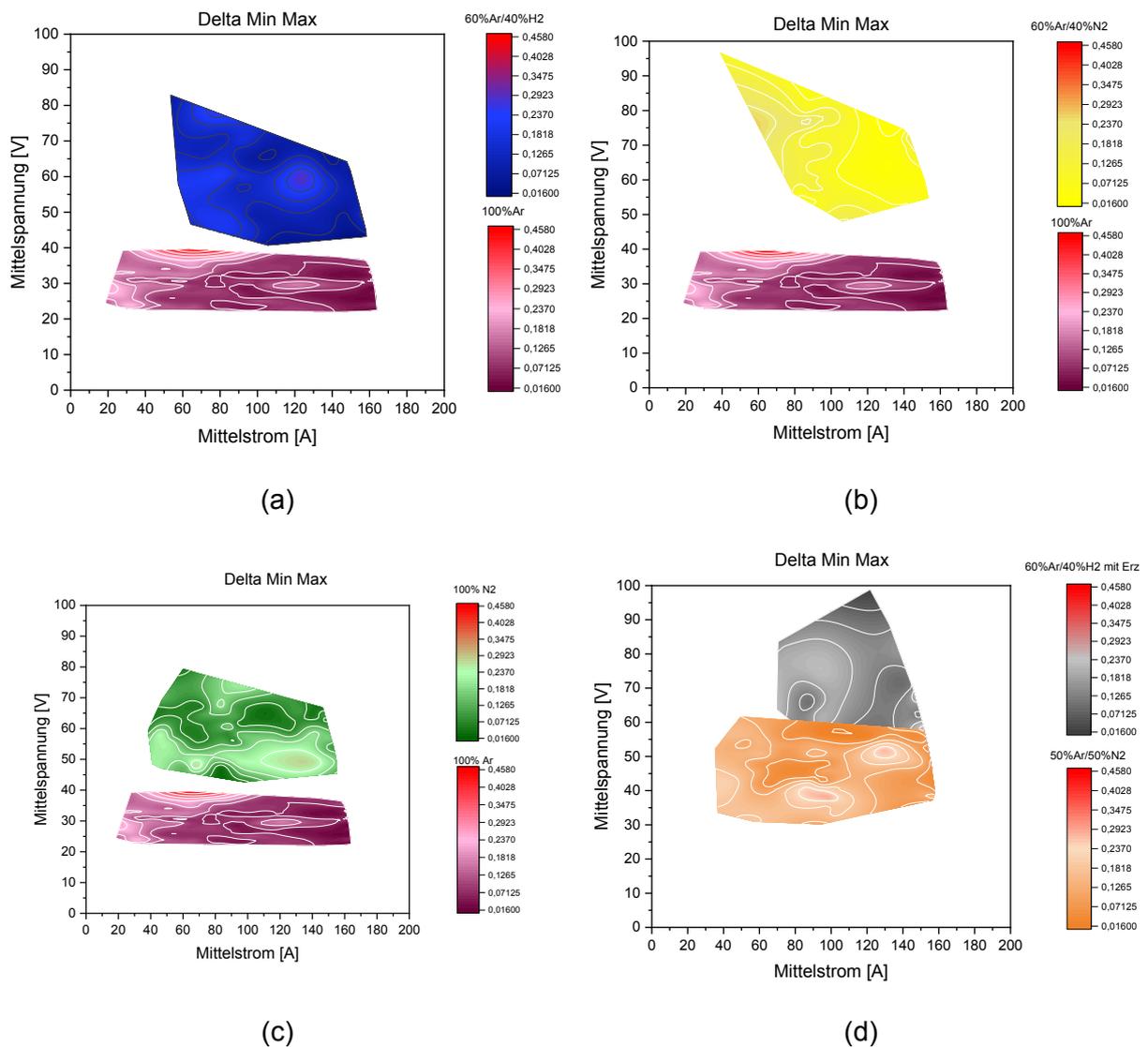


Abbildung 4-4: Delta Min-Max – Verschiedene Gase

Abbildung 4-5 zeigt die Differenzen zwischen Spannungen aus zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten (siehe Formel (3-5)) für die unterschiedlichen Gasmischungen. Da wiederum eine Rotfärbung in den Diagrammen die instabilen Bereiche des Lichtbogens kennzeichnet, kann aus Abbildung 4-5 geschlossen werden, dass der Lichtbogen umso stabiler wird, je weniger Wasserstoff in der Gasmischung vorhanden ist. Dies ist deckungsgleich mit den Diagrammen aus Excel in 4.1.1.

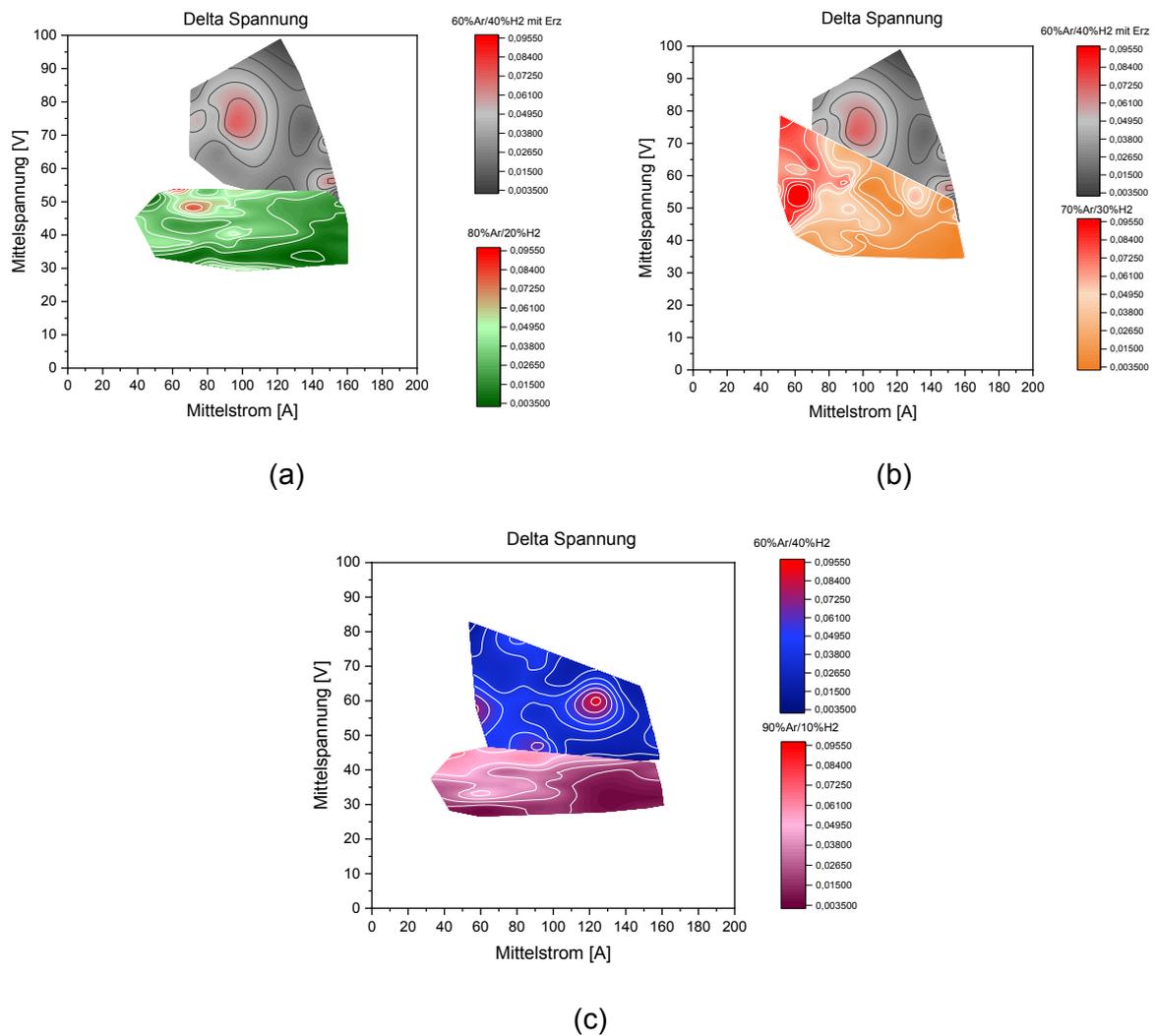
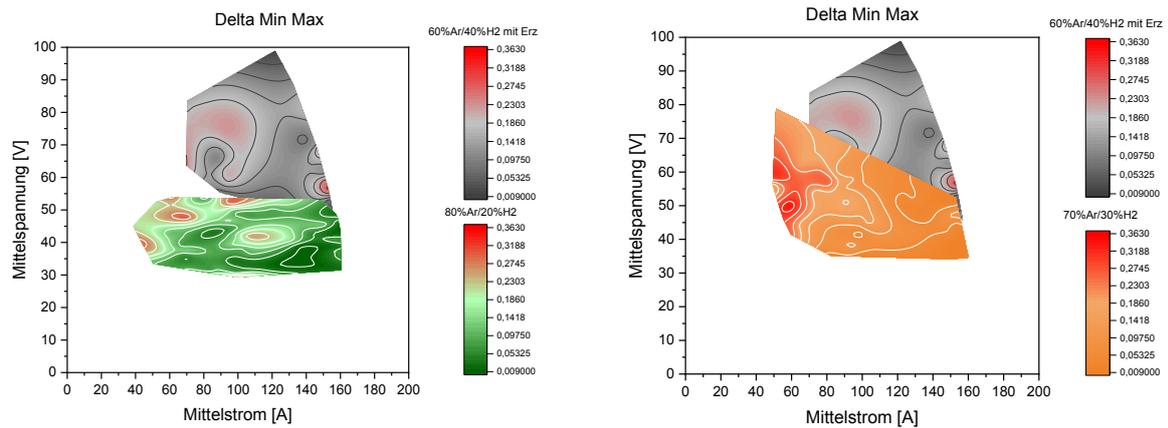


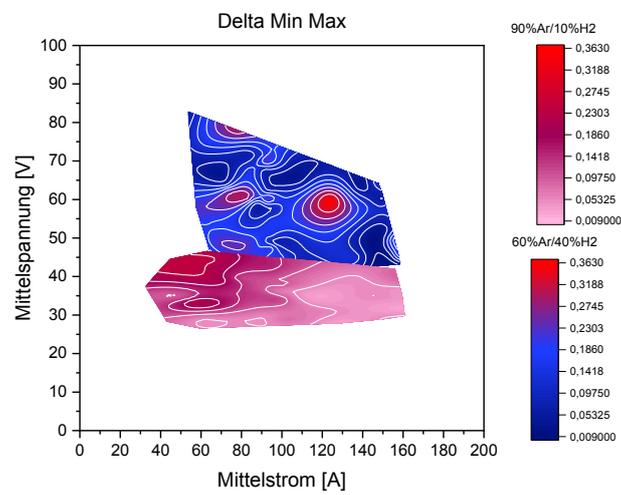
Abbildung 4-5: Delta Spannung – Gasmischungen

Den Delta Min-Max Diagrammen der Gasmischungen, dargestellt in **Abbildung 4-6**, ist zu entnehmen, dass bei allen Gasmischungen sowohl stabile als auch instabile Bereiche auftreten. Die stabileren Bereich treten dabei eher dann auf, wenn die Spannung sich um 40 V befindet und eine Stromstärke ab 80 A vorherrscht.



(a)

(b)



(d)

Abbildung 4-6: Delta Min-Max Gasmischungen

5 Schlussfolgerungen

Die zunächst durchgeführte Literaturstudie zeigt einige Methoden zur Stabilisierung des Lichtbogens auf. Diese schlagen sowohl Änderungen in der eingebrachten Gasmischung, als auch den Einbau von Zusatzelementen, wie zum Beispiel magnetisierende Elemente, in das Versuchsaggregat vor. Auch durch äußere Einflüsse wie Magnetfeld, Strom und Spannung kann der Lichtbogen sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden. Für die Beschreibung des Lichtbogens existieren mehrere verschiedene Modelle. Diese sind zum Beispiel das Cassie-Mayr-Lichtbogen-Modell, die Gleichungen der Thermodynamik oder der Magnetohydrodynamik.

Nach der Durchführung der Versuche mit der Plasmette erfolgen die Auswertung und die graphische Darstellung durch Diagramme. Die Ergebnisse daraus wurden herangezogen, um die Stabilität des Lichtbogens zu bewerten. Zusätzlich wurde im Versuchsaggregat selbst eine Kamera angebracht, um die Ergebnisse visuell zu unterstützen.

Nach erfolgter Analyse der Ergebnisse konnte daraus geschlossen werden, dass mit ausreichendem Leistungseintrag und sinkendem Wasserstoffgehalt im Gasgemisch der Lichtbogen leichter stabil zu halten ist. Durch kontinuierliche Erzeinbringung in den Versuch sinkt die Stabilität des Bogens, unabhängig von der eingebrachten Leistung, wesentlich. Dies ist darin ersichtlich, dass der Verlauf des Verhältnisses der aktuellen Spannung zum Mittelwert der Spannung, sich im Laufe der Zeit über einen größeren Schwankungsbereich erstreckt. Bei Versuchen ohne Erzchargierung liegen fast alle Werte zwischen 0,8 und 1,2 und es gibt nur sehr wenige Ausreißer. Bei jenen mit Erzchargierung ist der Bereich gleich, es gibt hingegen deutlich mehr Werte die über 1,2 und unter 0,8 liegen.

Die für die Bewertung der Stabilität des Lichtbogens erzeugte Funktion zum Löschen der Ausreißer aus den berechneten Werten für Delta Min-Max und Delta Spannung stellt in

Verbindung mit den erzeugten Diagrammen aus Excel und Origin eine gute Methode dar, um die Lichtbogenstabilität im Nachhinein zu bewerten.

6 Ausblick

Um auch in weiterer Zukunft genauere Informationen über das Stabilitätsverhalten des Lichtbogens im Betrieb der „Hydrogen Plasma Smelting Reduction“ zu erhalten, wären noch mehrere Versuche mit verschiedenen Gaszusammensetzungen erforderlich. Dadurch kann eventuell ein Zusammenhang zu dem Einfluss des Gasgemisches, hinsichtlich der Gaszusammensetzung, auf das Stabilitätsverhalten des Lichtbogens, hergestellt werden

Das implementierte Videosystem kann dahingehend verbessert werden, dass ein Reinigungssystem für das Glas am Flansch des Ofendeckels installiert wird, um das Beschlagen mit dem Gemisch aus Staub und Wasserstoff zu vermeiden. Dadurch ergibt sich in weiterer Folge die Möglichkeit den Lichtbogen, über die ganze Versuchszeit zu überwachen, da das im Laufe der Zeit beschlagene Glas wieder zu reinigen ist.

Einen genaueren Rückschluss auf den Einfluss der kontinuierlichen Erzchargierung auf das Stabilitätsverhalten des Lichtbogens lässt sich durch weitere Versuche ermöglichen. Durch die größere Menge an Daten, kann in weiterer Folge auch die erstellte Bewertungsmethode verifiziert und verbessert werden.

Wenn die Auswertung für diverse weitere Versuche ein brauchbares Ergebnis liefert, kann zum Beispiel durch Programmieren eines Makros in Excel, für alle nachfolgenden Versuche, ein Auswertungssystem erstellt werden.

Für den Fall, dass bei diesen gesamten Auswertungen ein positives Ergebnis für die Anlage im Labormaßstab erreicht wird, sollten Tests mit Industrieanlagen durchgeführt werden. Wenn auch für diesen Test dasselbe Ergebnis erreichbar ist, als beim Labortest lässt sich daraus genaue Erkenntnis ziehen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Zarl M., *Materials und Methods* (2020).
- [2] Skoczkowski, T., Verdolini, E., Bielecki, S., Kocharński, M., Korczak, K. and Węglarz, A., *Technology innovation system analysis of decarbonisation options in the EU steel industry*, *Energy* (Oxford, England) 212 (2020), pp. 118688.
- [3] Sabat, K.C. and Murphy, A.B., *Hydrogen Plasma Processing of Iron Ore*, *Metall and Materi Trans B* 48 (2017), 3, pp. 1561–1594.
- [4] Bäck, E., *Schmelzreduktion von Eisenoxiden mit Argon-Wasserstoff-Plasma*, Leoben, 1998.
- [5] Vicente, A., Picon, A., Arteché, J.A., Linares, M., Velasco, A. and Sainz, J.A., *Magnetic field-based arc stability sensor for electric arc furnaces*, *Measurement* 151 (2020), pp. 107134.
- [6] Lemperle, M. and Weigel, A., *On the smelting reduction of iron ores with hydrogen-argon plasma*, *Steel Research* 56 (1985), 9, pp. 465–469.
- [7] S. Kim, J. J. Jeong, K. Kim, J. H. Choi and S. W. Kim, *Arc stability index using phase electrical power in AC electric arc furnace*, 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013) (2013), pp. 1725–1728.
- [8] Knight, R., Murawa, M.J., Girgis, N.M. and Reide, K.J., *Arc characteristics in small-scale DC plasma arc furnaces using graphite cathodes*, *Plasma Chem Plasma Process* 10 (1990), 2, pp. 359–373.
- [9] Plaul, J.F., Krieger, W. and Bäck, E., *Reduction of Fine Ores in Argon-Hydrogen Plasma*, *steel research international* 76 (2005), 8, pp. 548–554.

- [10] Plaul, J.F., Schmelzreduktion von hämatitischen Feinerzen im Wasserstoff-Argon-Plasma, Leoben, 2005.
- [11] Goldston, R.J. and P.H. Rutherford, Introduction to plasma physics, Reprinted., Inst. of Physics Publ, Bristol, 2003.
- [12] Mützel T, Physikalische Grundlagen und Lösungsansätze zum Schalten von Gleichströmen.
- [13] Lee, Y., Nordborg, H., Suh, Y. and Steimer, P., Arc stability criteria in AC arc furnace and optimal converter topologies, APEC 2007: Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference ; Feb. 25, 2007 - March 1, 2007, Anaheim, CA, Anaheim, CA, USA (2007), pp. 1280–1286.
- [14] Torrilhon, M., Stability of reduced electric arc models, Proc. Appl. Math. Mech. 7 (2007), 1, pp. 1141301–1141302.
- [15] Tseng, K.-J., Wang, Y. and Vilathgamuwa, D.M., An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations, IEEE Transactions on Power Electronics 12 (1997), 3, pp. 429–436.
- [16] Golestani, S. and Samet, H., Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models, IET Generation, Transmission & Distribution 10 (2016), 13, pp. 3364–3373.
- [17] Jung, K., Suh, Y., Kim, T., Park, T. and Lee, Y., Arc Stability Control of a High-Power Thyristor Rectifier System in a DC Arc Furnace, IEEE Transactions on Power Electronics 29 (2014), 12, pp. 6342–6351.
- [18] Y. Suh, H. Park, Y. Lee and P. K. Steimer, A Power Conversion System for AC Furnace With Enhanced Arc Stability, IEEE Transactions on Industry Applications 46 (2010), 6, pp. 2526–2535.
- [19] Yuan, L., Sun, L. and Wu, H., Simulation of Fault Arc Using Conventional Arc Models, EPE 05 (2013), 04, pp. 833–837.
- [20] King, P.E., Magnetohydrodynamics in Electric Arc Furnace Steelmaking, https://books.google.at/books?hl=de&lr=&id=jmci8GM1w_UC&oi=fnd&pg=PA12&dq=magnetohydrodynamics+electric+arc&ots=WWUh4EBA1L&sig=in03XuW4s9gsRr0fu7q1JXUKNIg&redir_esc=y#v=onepage&q=magnetohydrodynamics%20electric%20arc&f=false, Abgerufen am: 04.01.2021.038Z.
- [21] Cobine, J.D. and Farrall, G.A., Experimental Study of Arc Stability. I, Journal of Applied Physics 31 (1960), 12, pp. 2296–2304.

- [22] Ladoux, P., Postiglione, G., Foch, H. and Nuns, J., A Comparative Study of AC/DC Converters for High-Power DC Arc Furnace, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 52 (2005), 3, pp. 747–757.
- [23] Ragaller, K., Investigations on Instabilities of Electric Arcs, *Zeitschrift für Naturforschung A* 29 (1974), 4, pp. 556–567.
- [24] Farrall, G.A., Lafferty, J.M. and Cobine, J.D., Electrode materials and their stability characteristics in the vacuum arc, *IEEE Trans. Comm. Electron.* 82 (1963), 2, pp. 253–258.
- [25] Piazza, M., F. Bianco, D. PATrizio and M. Ometto, EAF process optimization through a modular automation system and adaptive control strategy.
- [26] Maddever, W.J. and Segsworth, R.S., The influence of gas injection arc stabilization and electrode consumption in electric furnaces, *Canadian Metallurgical Quarterly* 15 (1976), 1, pp. 49–52.
- [27] investigations on gas metal arc welding fillets which... - Google Scholar, https://scholar.google.com/scholar?hl=de&as_sdt=0%2C5&q=investigations+on+gas+metal+arc+welding+fillets+which+is+welded+by+flux+cored+and+solid+wire+electrodes&btnG=, Abgerufen am: 17.02.2020.
- [28] Moradi, M., Ghoreishi, M., Frostevarg, J. and Kaplan, A.F.H., An investigation on stability of laser hybrid arc welding, *Optics and Lasers in Engineering* 51 (2013), 4, pp. 481–487.
- [29] Martell, F., Deschamps, A., Mendoza, R., Meléndez, M., Llamas, A. and Micheloud, O., Virtual Neutral to Ground Voltage as Stability Index for Electric Arc Furnaces, *ISIJ Int.* 51 (2011), 11, pp. 1846–1851.
- [30] On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation, *IEEE Trans. Power Delivery* 20 (2005), 1, pp. 526–528.
- [31] Koller, L. and Szalma, P., Neuartige Rogowski-Spule aus geraden Teilspulen, *Electrical Engineering* 80 (1997), 2, pp. 115–124.
- [32] D. Ward, Using Rogowski coils for transient current measurements by D A, UR - <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-Rogowski-coils-for-transient-current-by-D.-A-Ward/09d8493753cb6638a81913e241acc98a7a53a5af> (1999).
- [33] Ljungqvist, P., Evaluation of sound-, current- and vibration measurements in the electric arc furnace.
- [34] Słazak, B., Słania, J., Węgrzyn, T. and Silva, A.P., Process Stability Evaluation of Manual Metal Arc Welding Using Digital Signals, *MSF* 730-732 (2012), pp. 847–852.

- [35] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli and S. Tenconi, A nonconventional power converter for plasma stabilization, IEEE Transactions on Power Electronics 5 (1990), 2, pp. 212–219.
- [36] D. Schneider, Numerische Simulation von Plasma-Zusammenbrüchen für die Berechnung der Strukturbelastung in Tokamak-Fusionsreaktoren, Wissenschaftliche Berichte (1997).
- [37] Ueyama, T., Ohnawa, T., Uezono, T., Tanaka, M., Ushio, M. and Nakata, K., Solution to problems of arc interruption and stable arc length control in tandem pulsed GMA welding. Study of arc stability in tandem pulsed GMA welding (Report 2), Welding International 20 (2006), 8, pp. 602–611.
- [38] Mahrle, A., Rose, S., Schnick, M., Beyer, E. and Füssel, U., Stabilisation of plasma welding arcs by low power laser beams, Science and Technology of Welding and Joining 18 (2013), 4, pp. 323–328.
- [39] Zhang, H.-S. and Komvopoulos, K., Direct-current cathodic vacuum arc system with magnetic-field mechanism for plasma stabilization, The Review of scientific instruments 79 (2008), 7, pp. 73905.
- [40] Farakas M., Vergleich und Evaluierung der Lichtbogenstabilitätsfelder im Bereich der Reduktion von Feinerzen mit Wasserstoff - Argon Plasma, Bachelorarbeit, Leoben, 2020.
- [41] Durchschnitt / Mittelwert berechnen (Arithmetisches Mittel), <https://www.gut-erklart.de/mathematik/mittelwert-berechnen-formel.html>, Abgerufen am: 28.09.2020.721Z.
- [42] Elektrische Leistung • Formeln, Berechnung und Messung · [mit Video], <https://studyflix.de/elektrotechnik/elektrische-leistung-1878>, Abgerufen am: 02.03.2021.188Z.

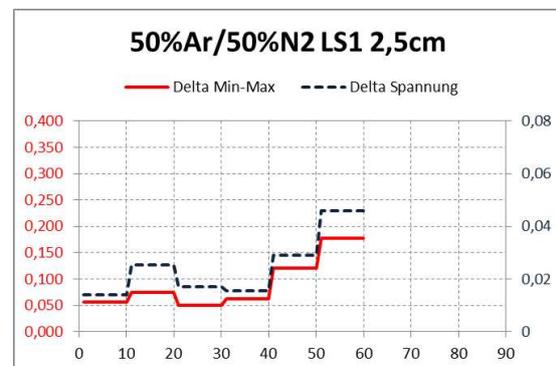
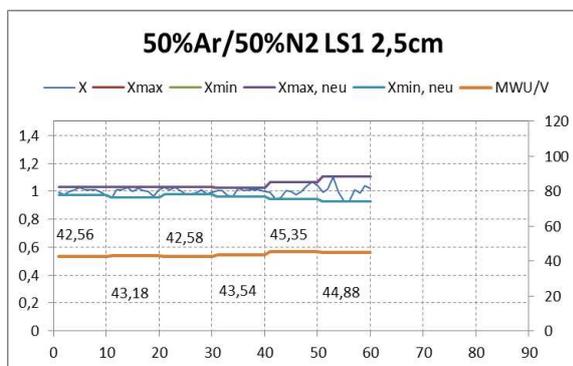
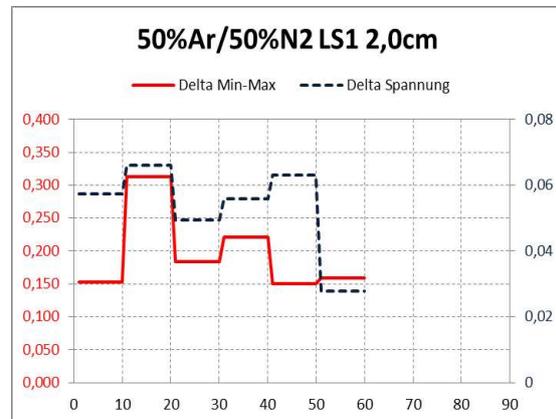
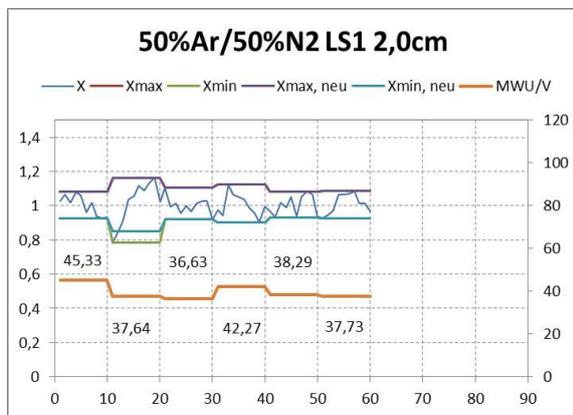
8 Anhang

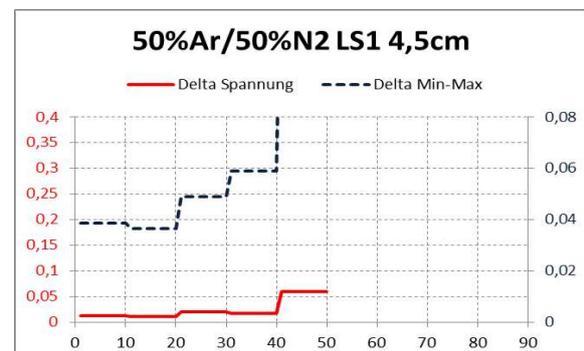
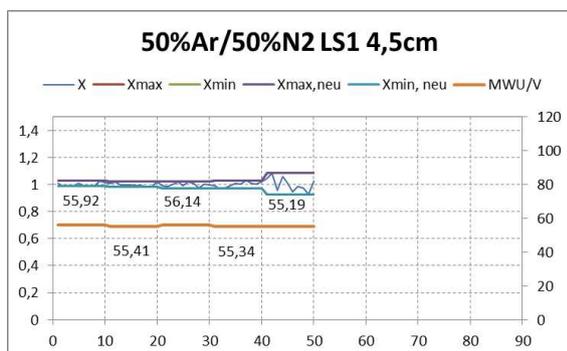
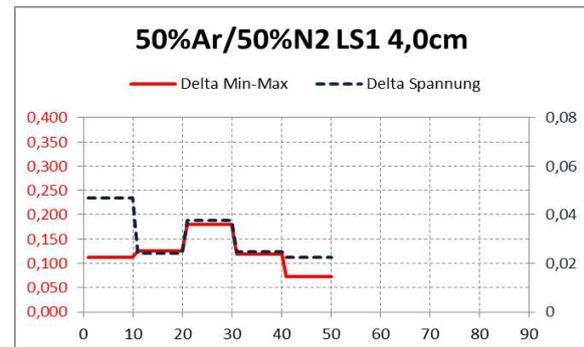
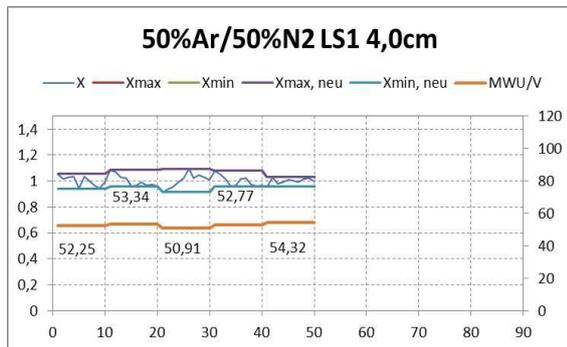
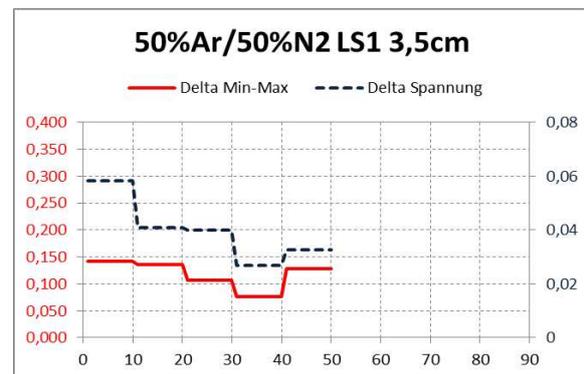
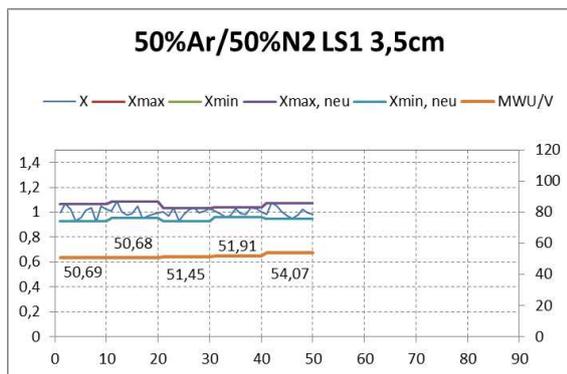
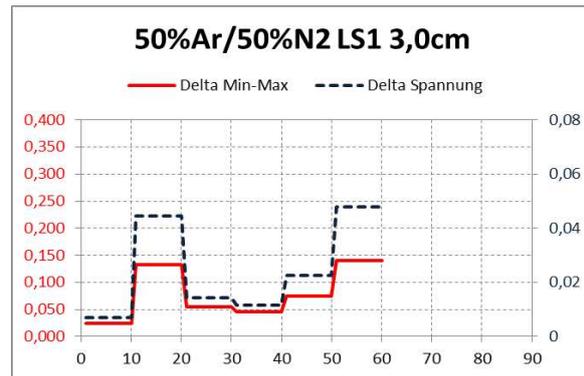
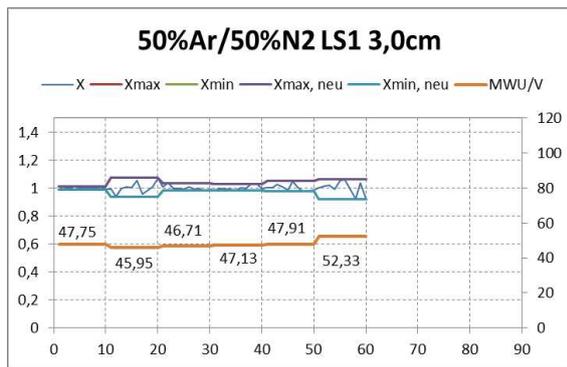
Tabelle 11: Excel Auswertung der Versuche

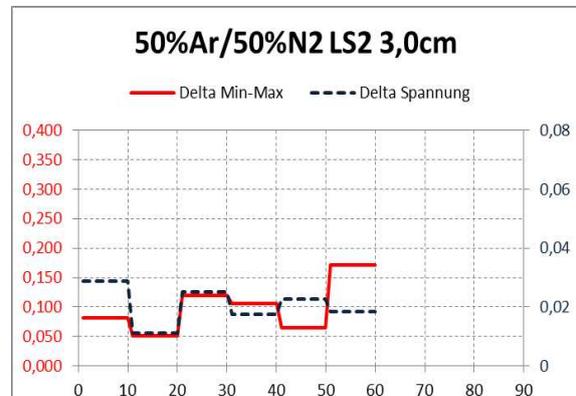
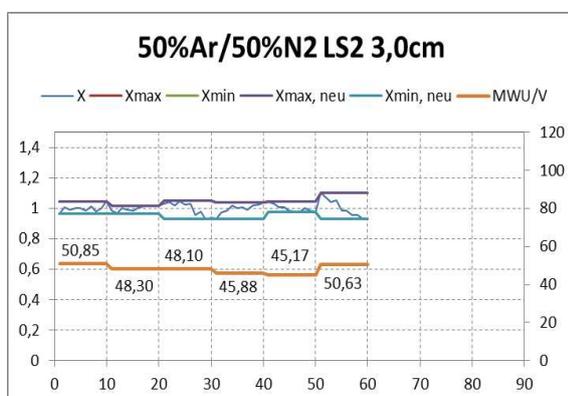
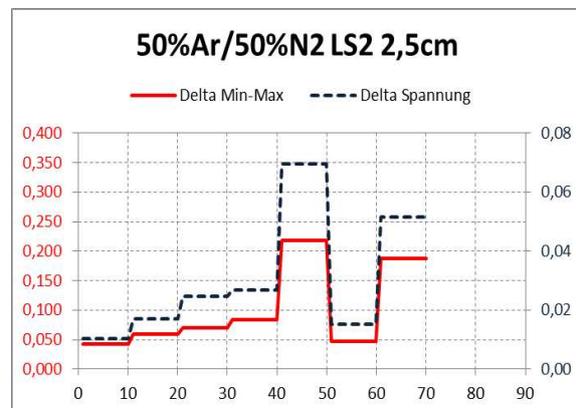
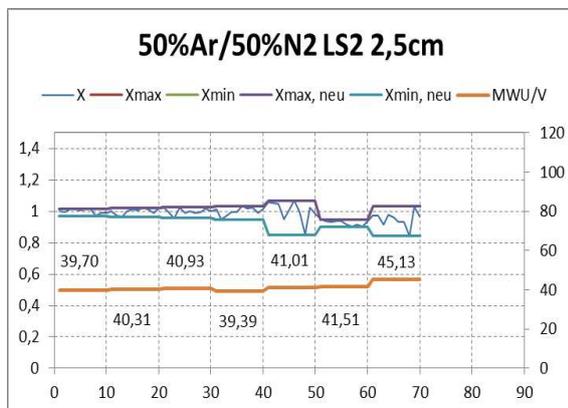
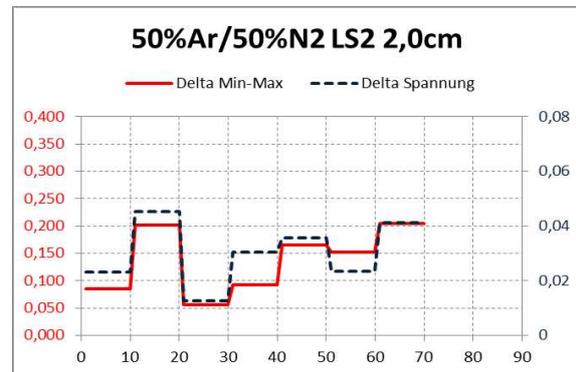
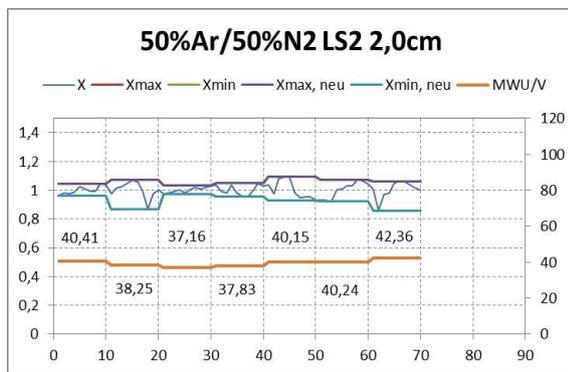
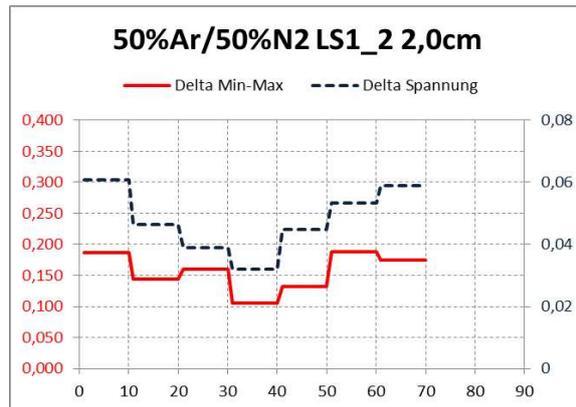
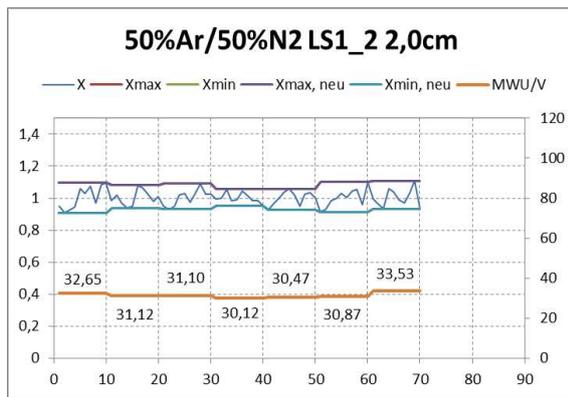
Batchversuche

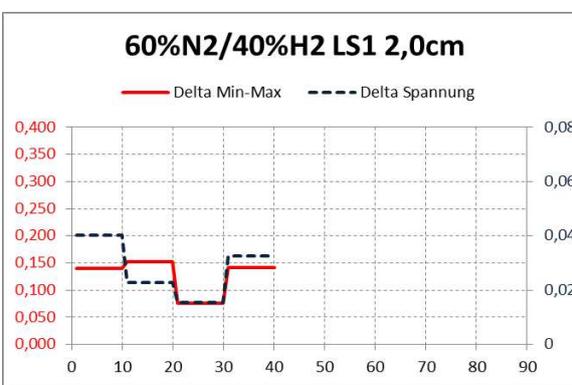
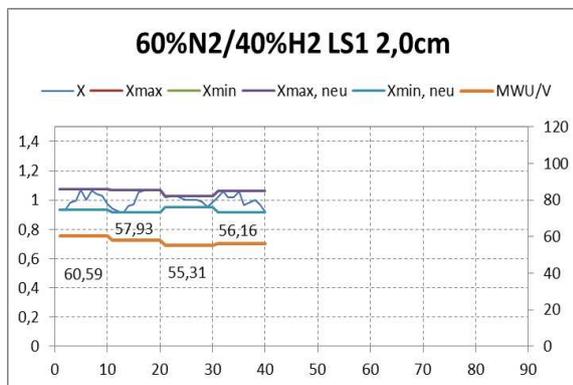
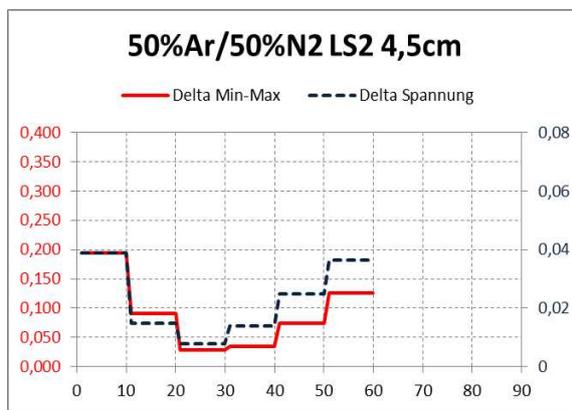
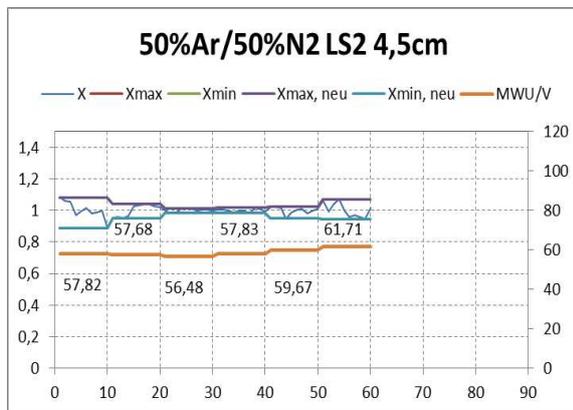
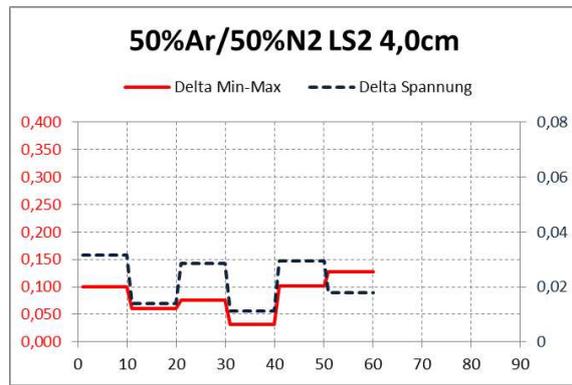
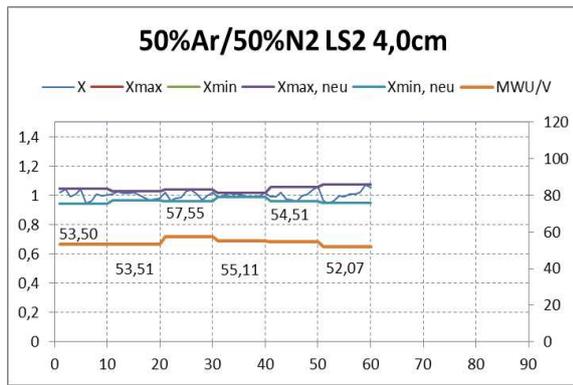
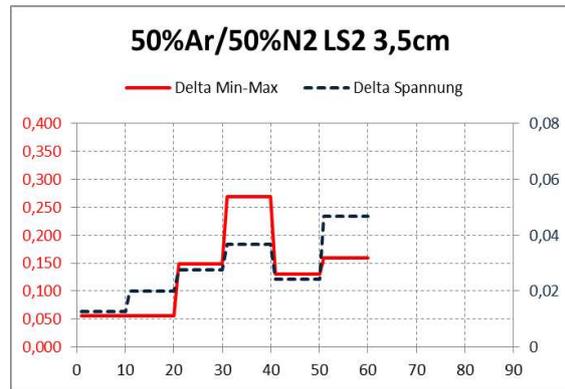
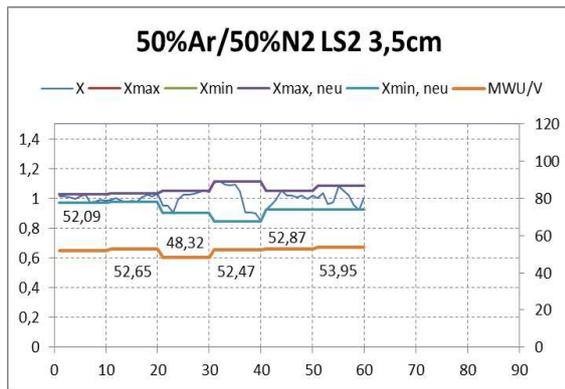
Zeitverläufe

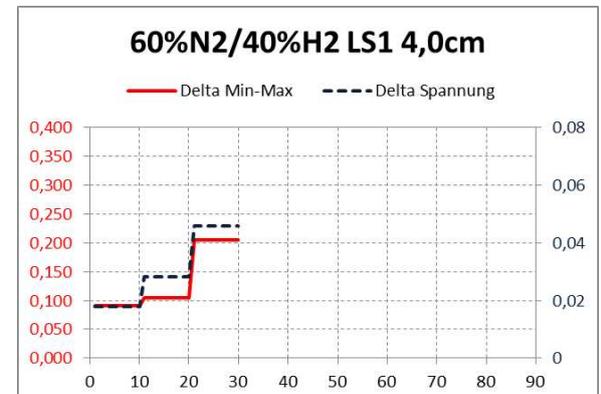
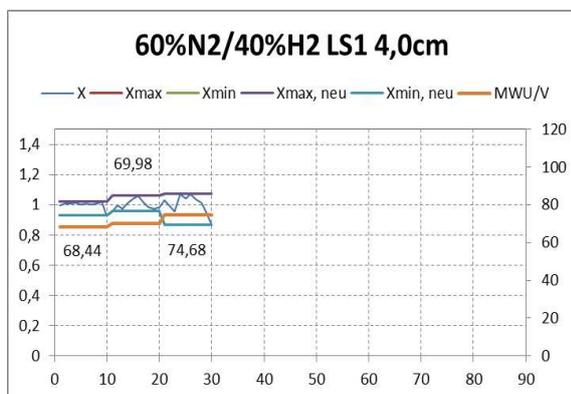
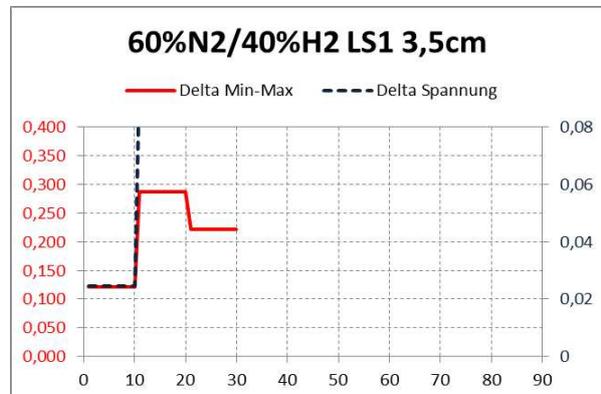
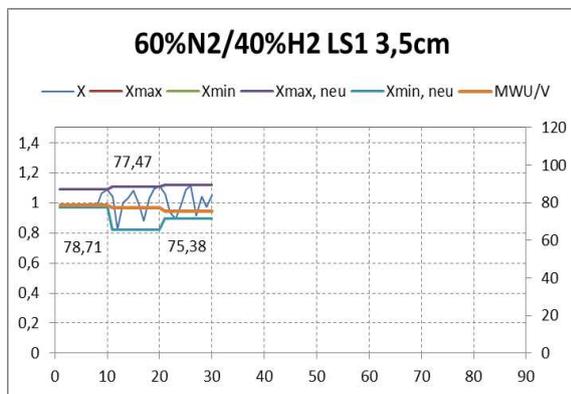
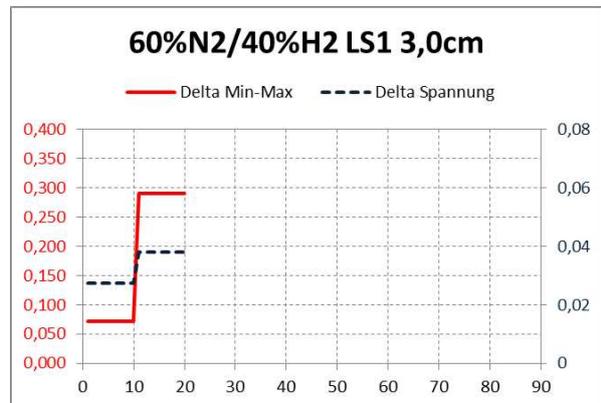
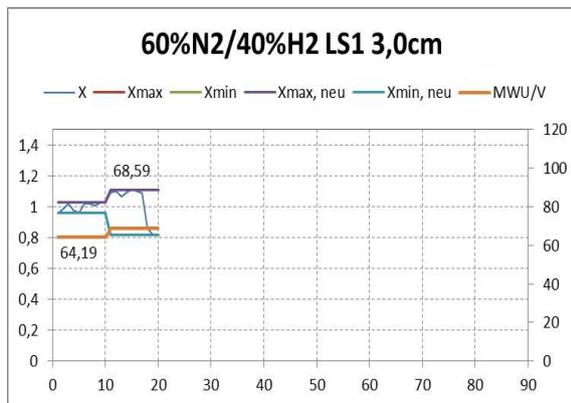
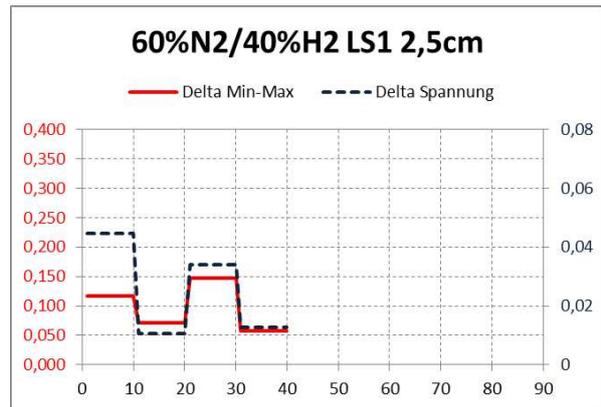
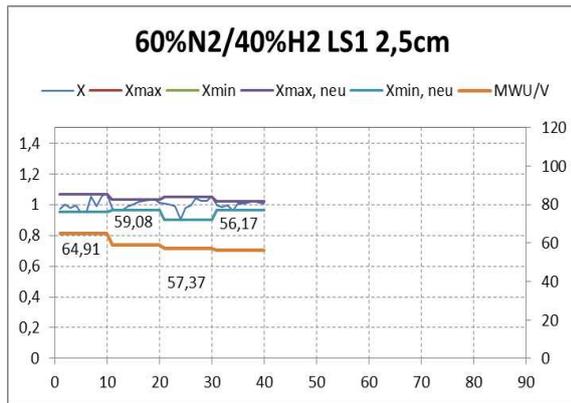
Delta Spannung/Delta Min-Max Diagramme

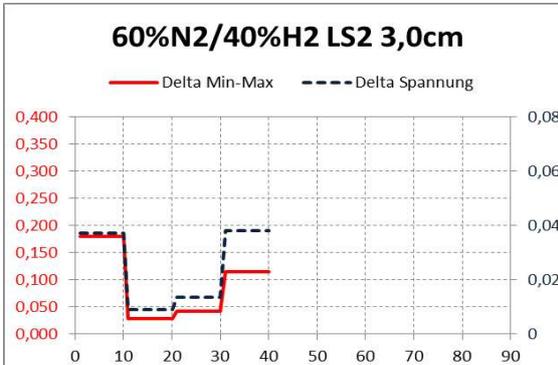
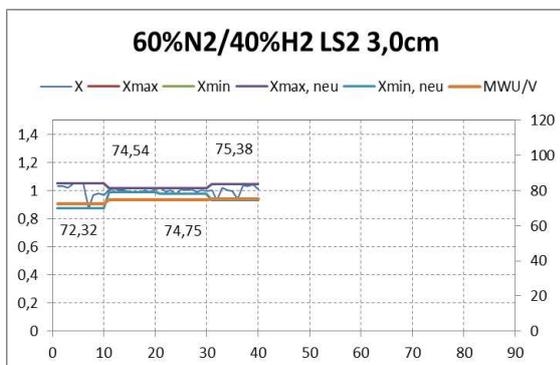
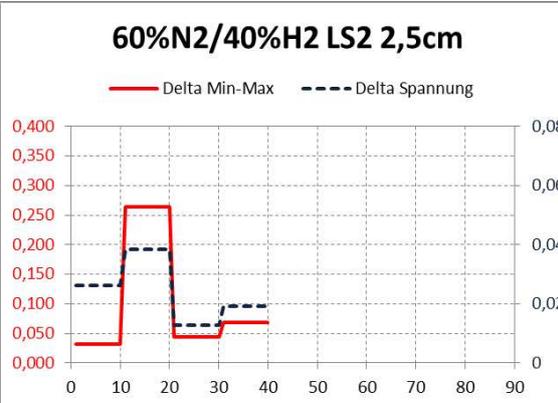
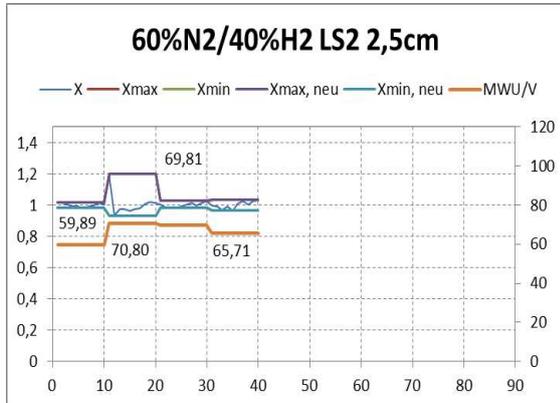
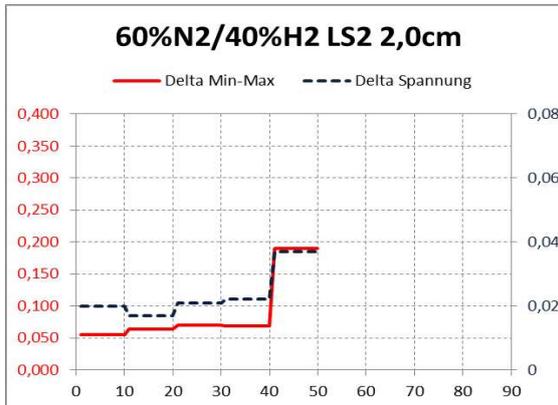
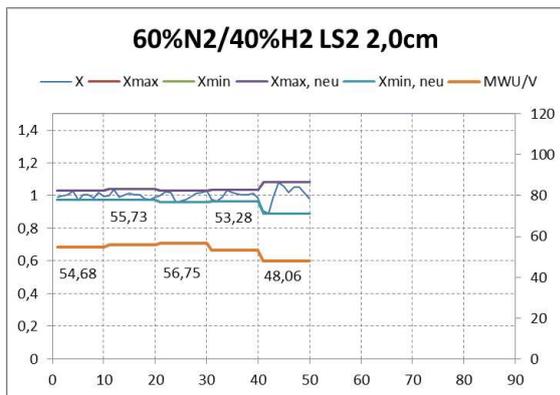
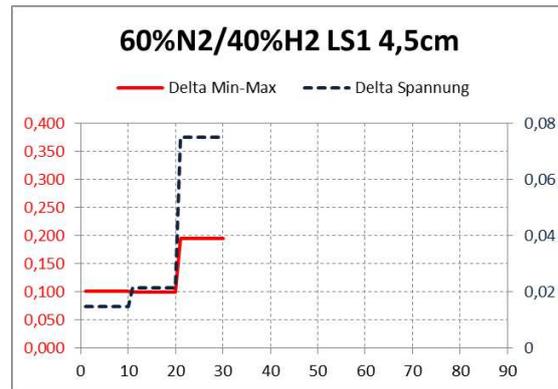
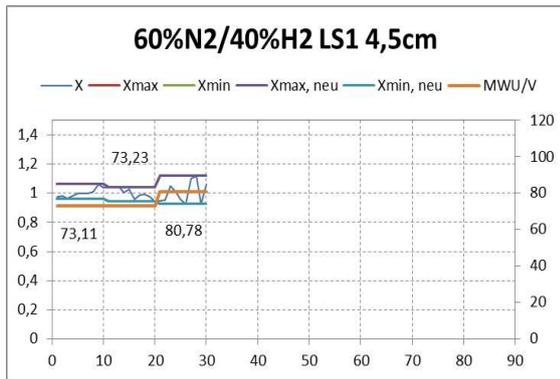


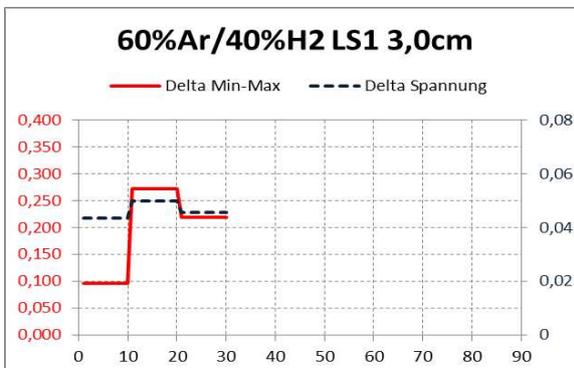
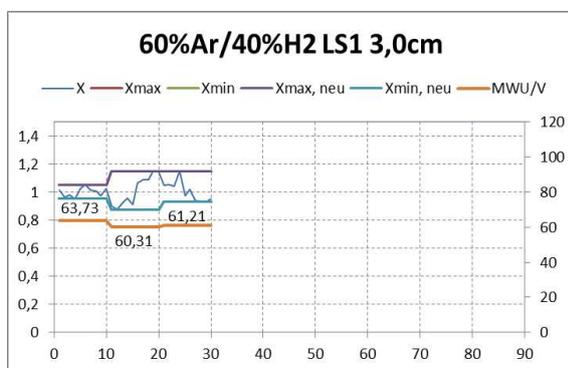
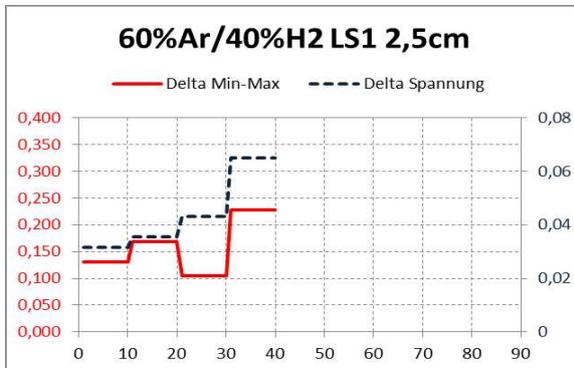
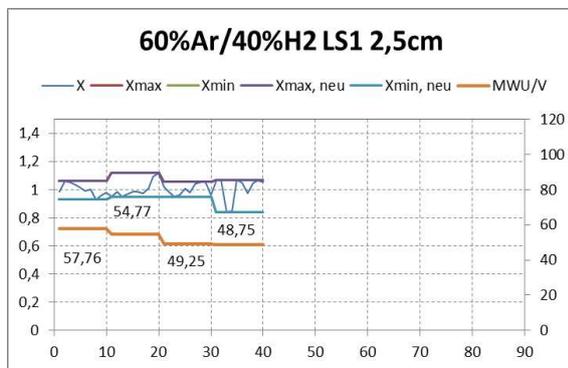
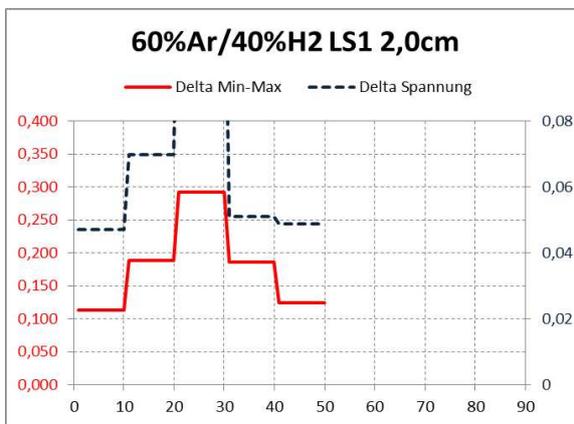
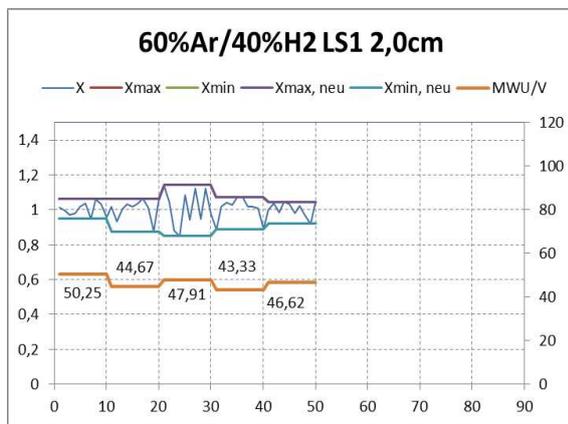
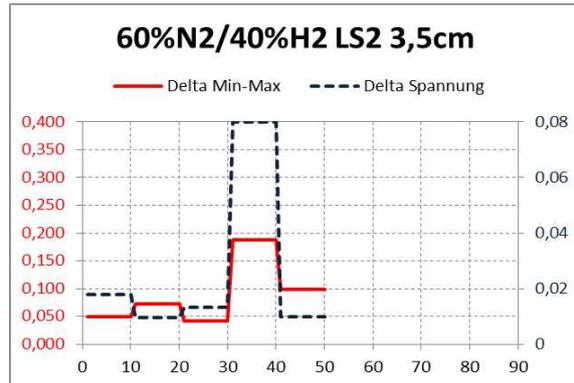
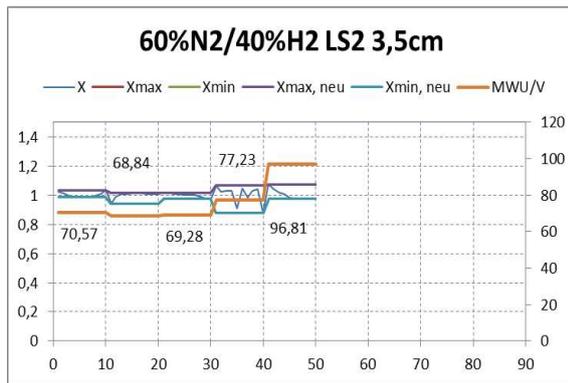


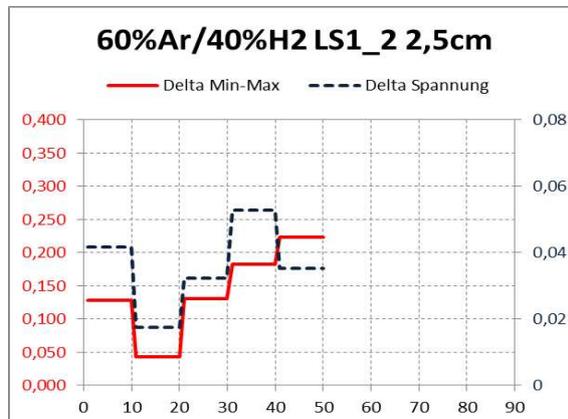
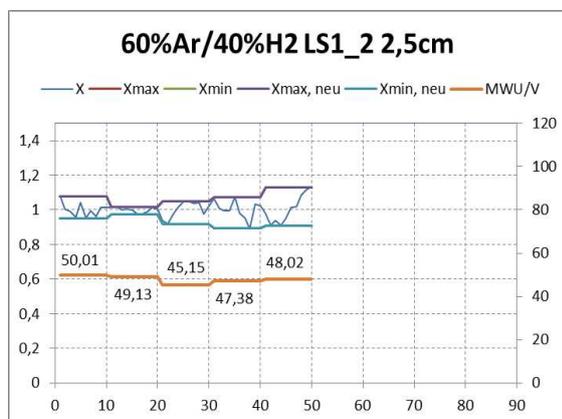
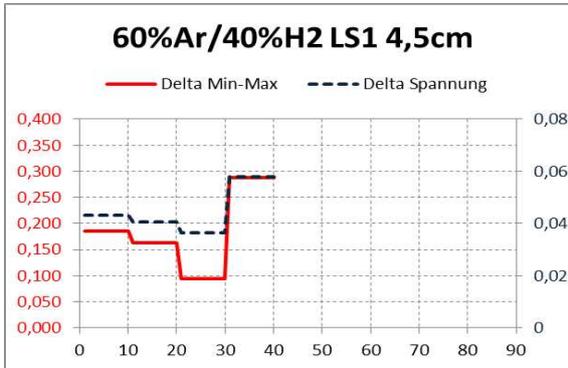
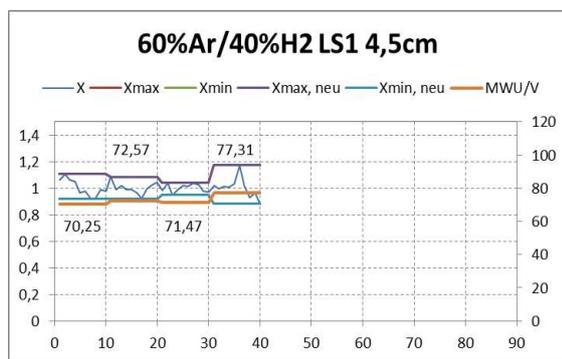
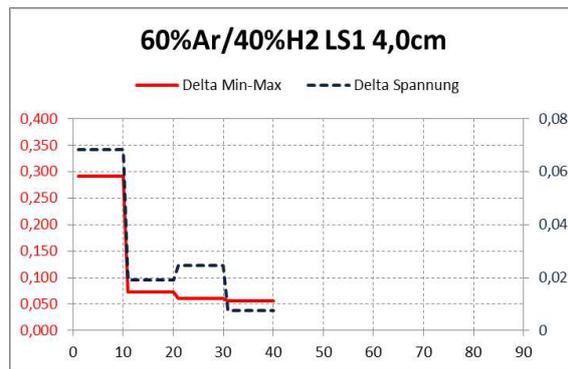
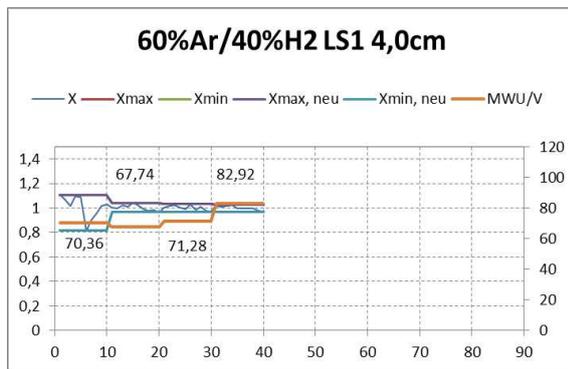
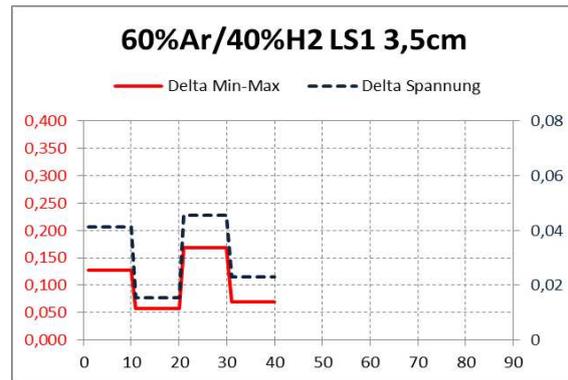
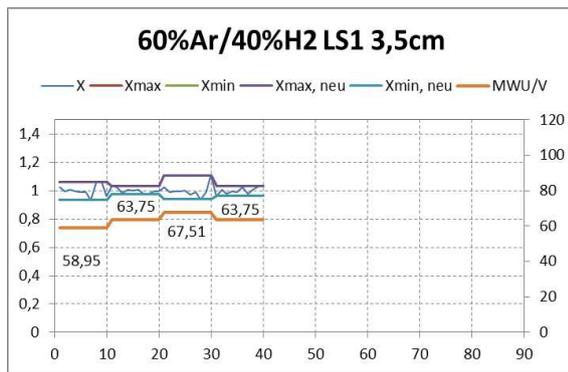


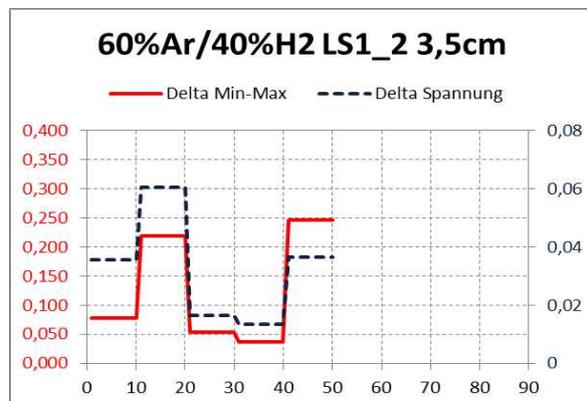
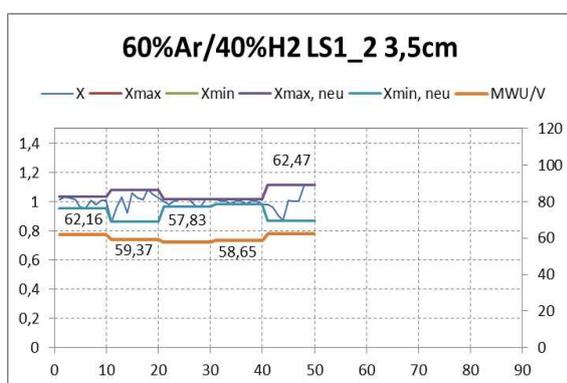
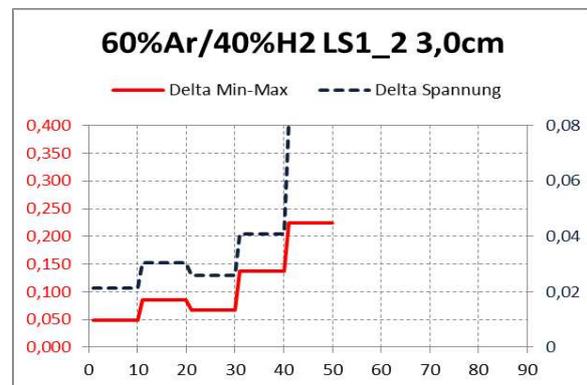
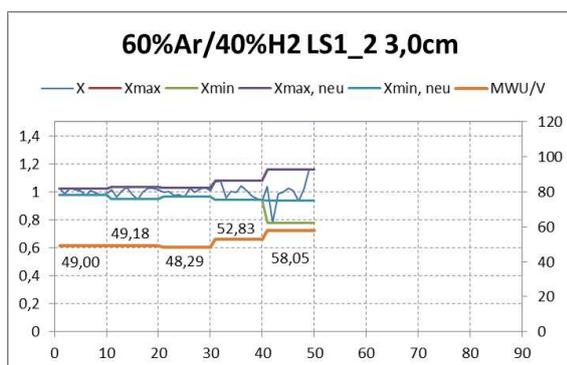
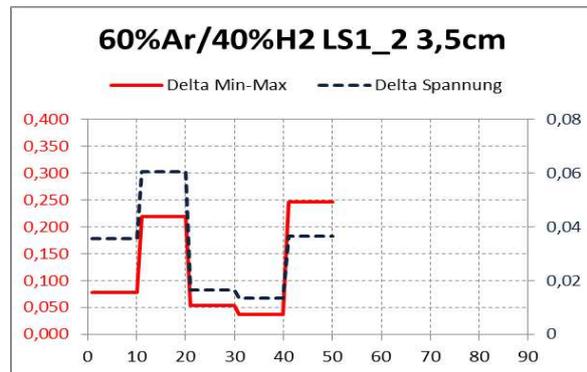
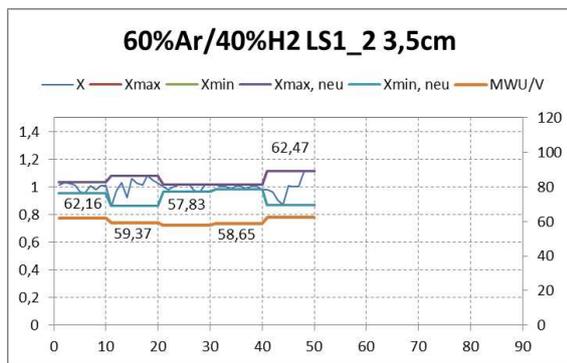
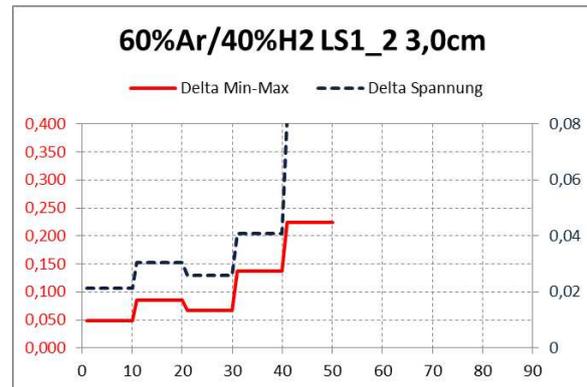
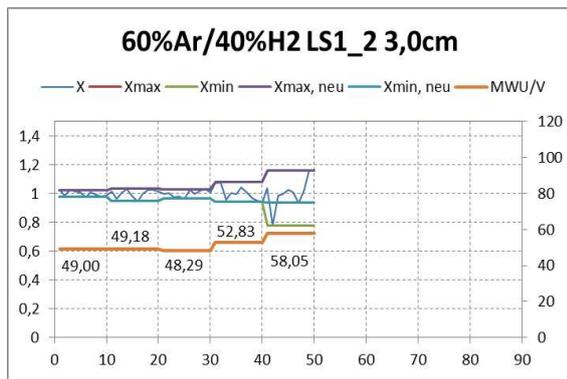


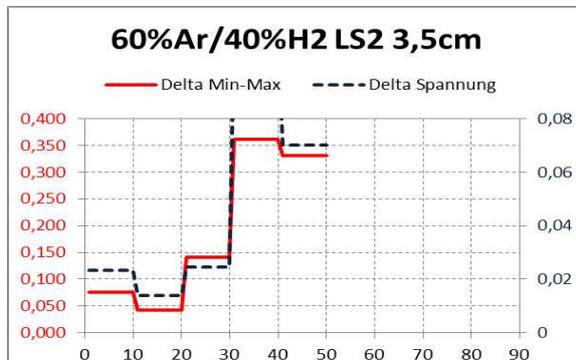
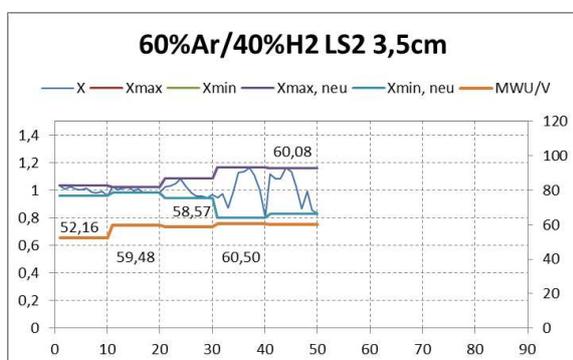
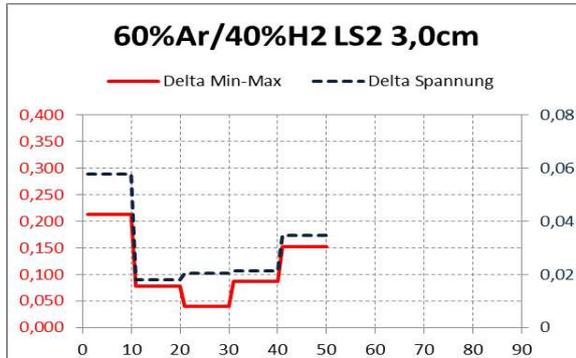
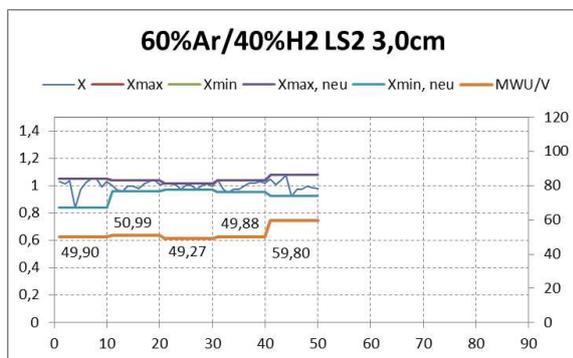
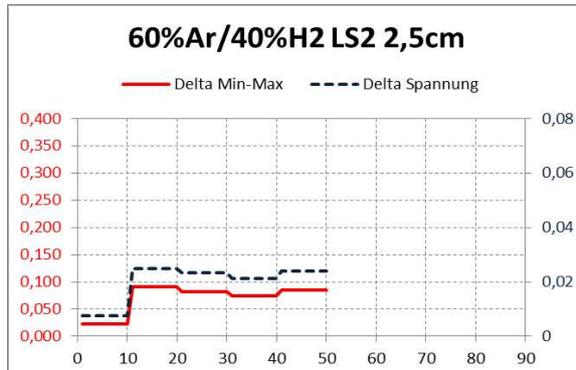
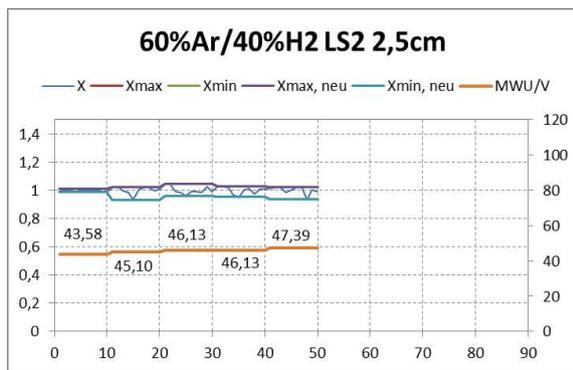
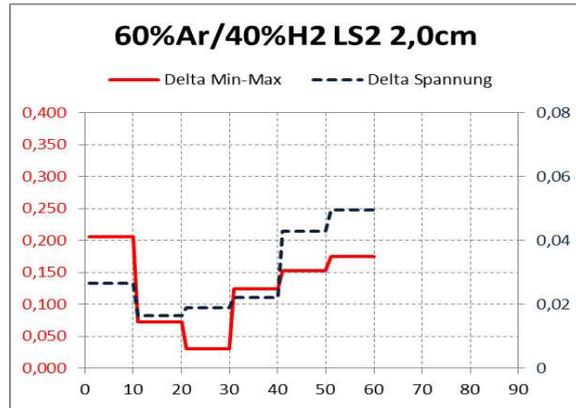
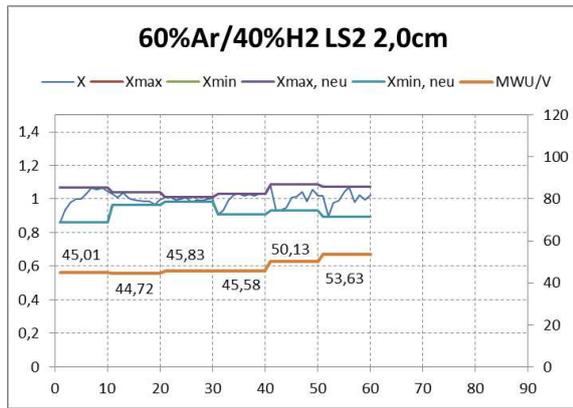


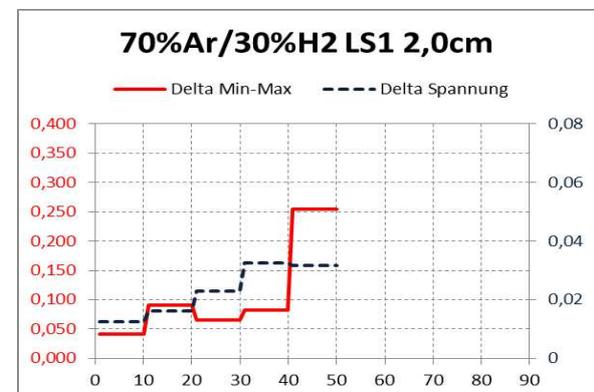
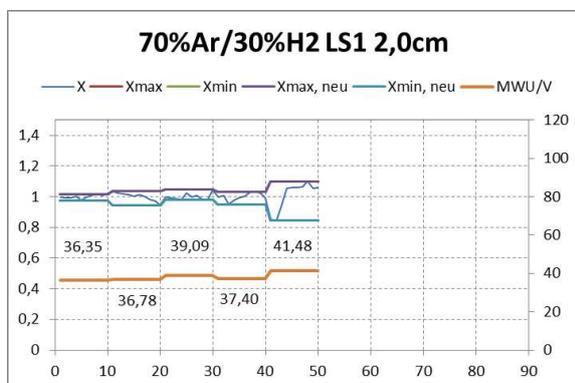
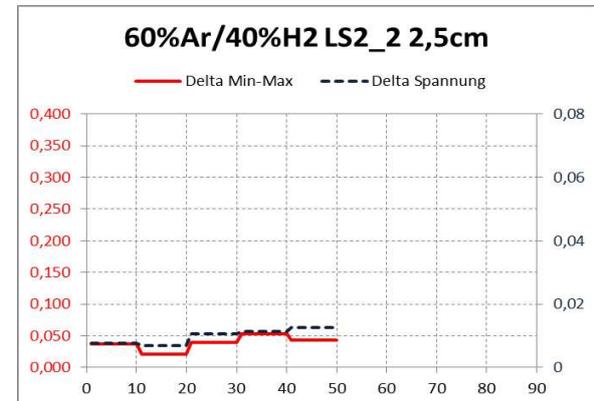
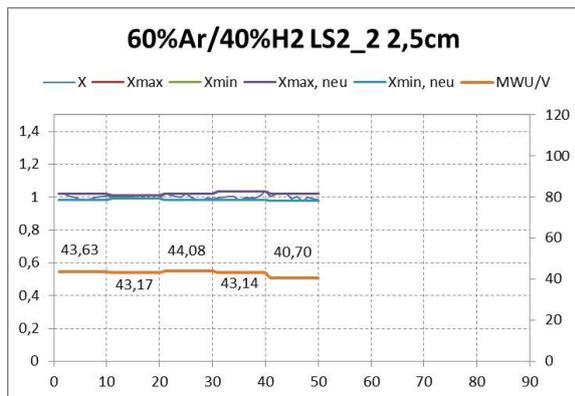
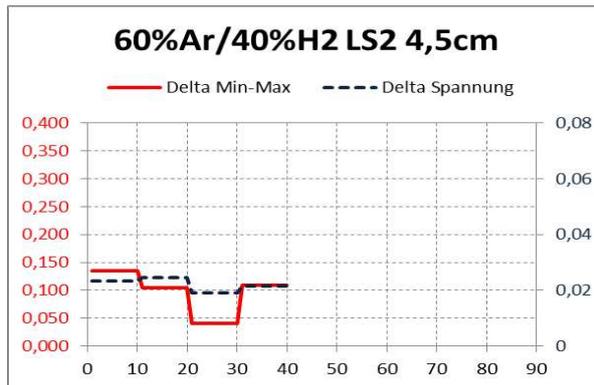
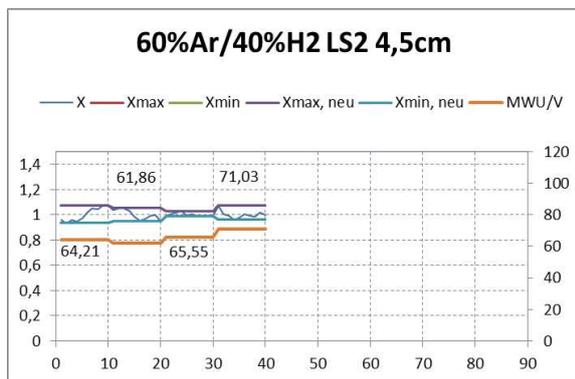
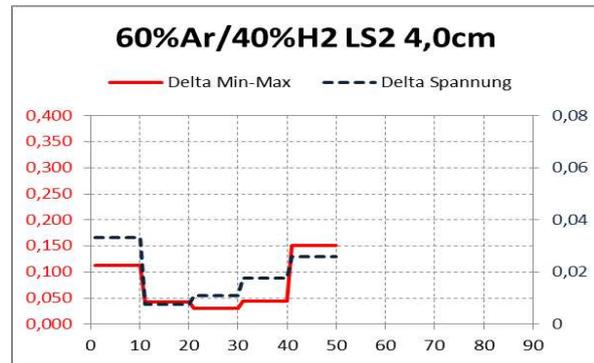
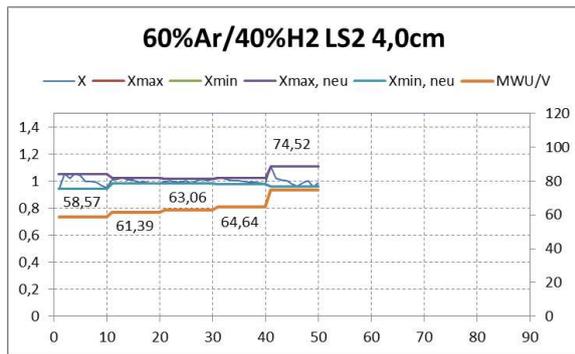


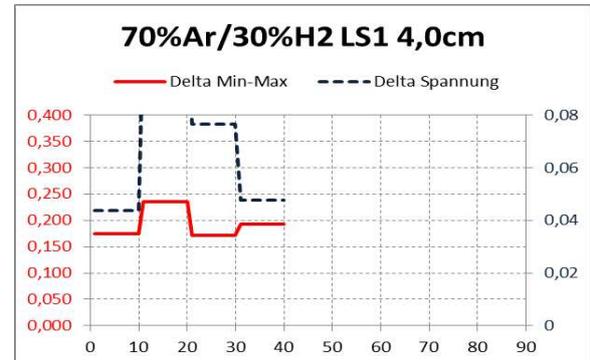
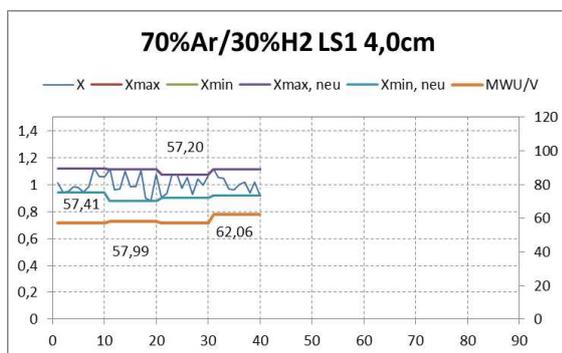
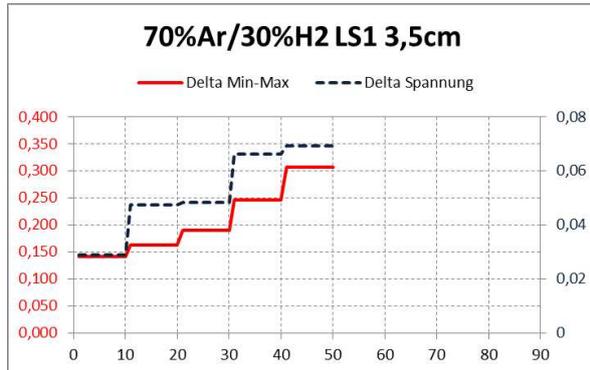
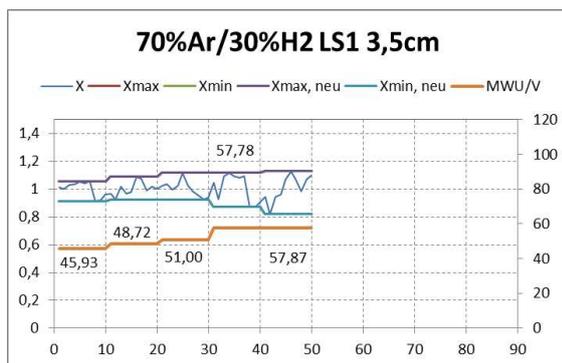
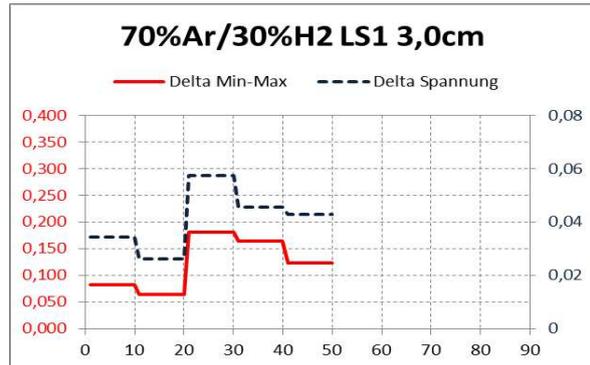
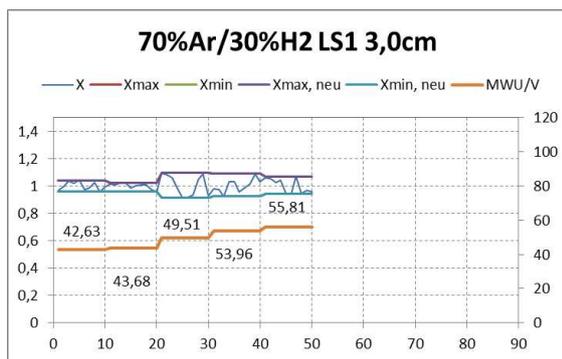
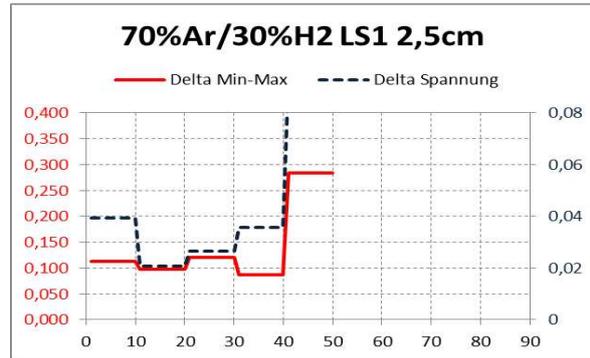
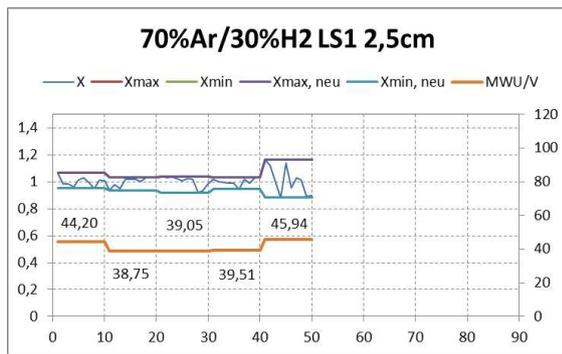


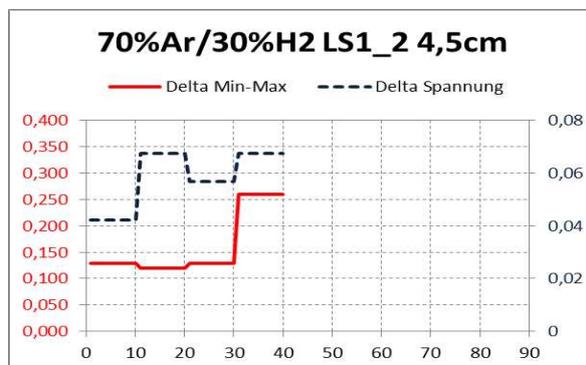
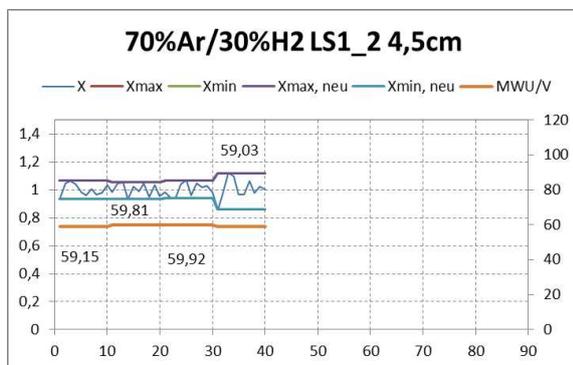
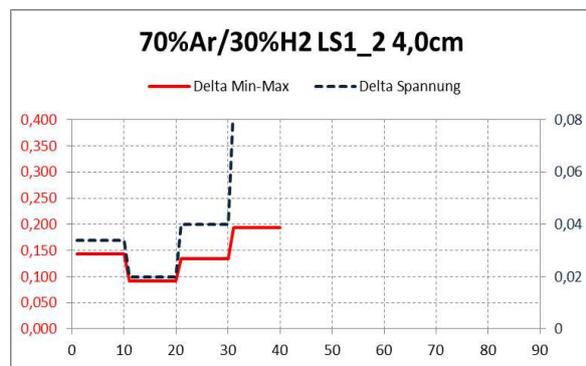
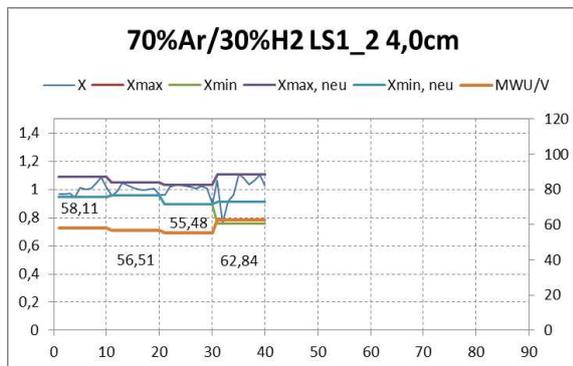
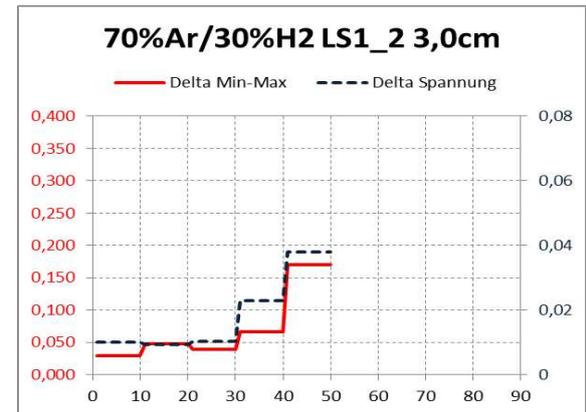
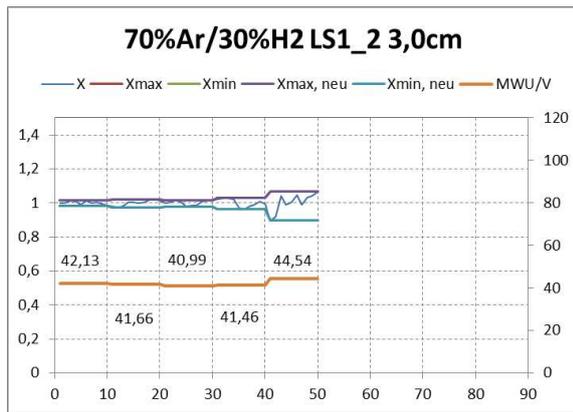
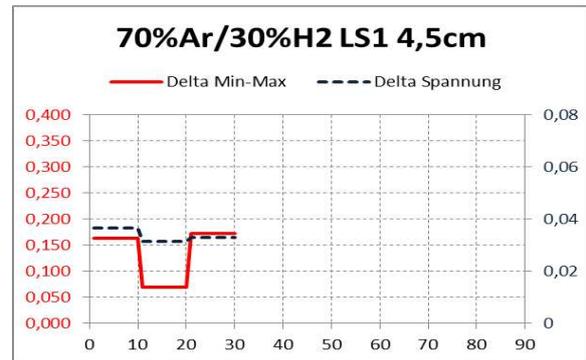
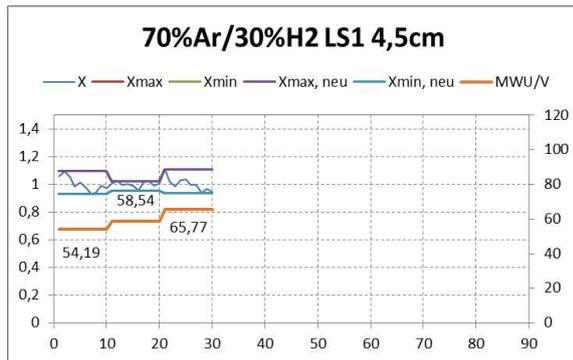


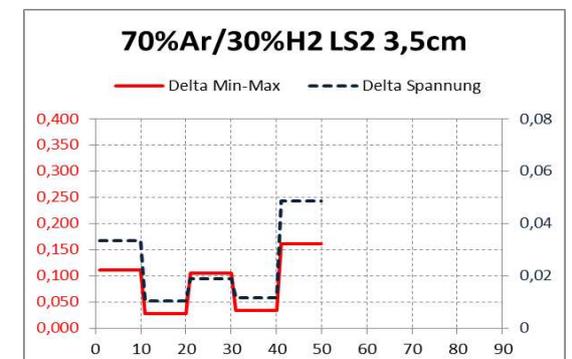
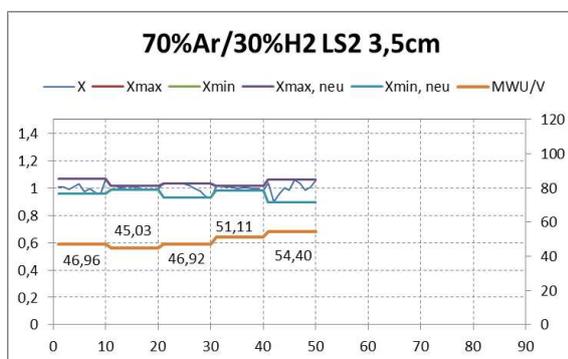
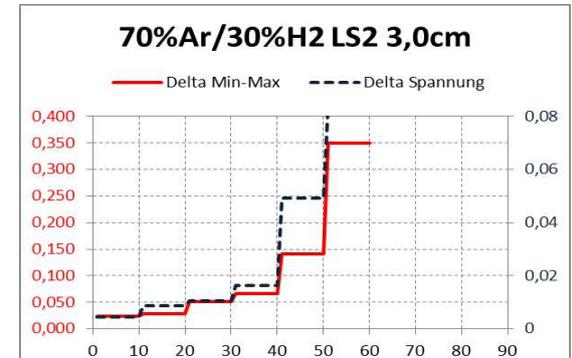
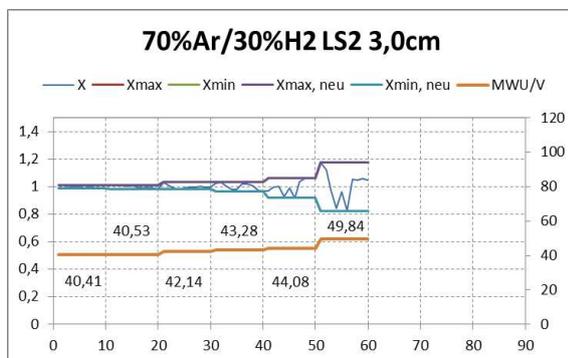
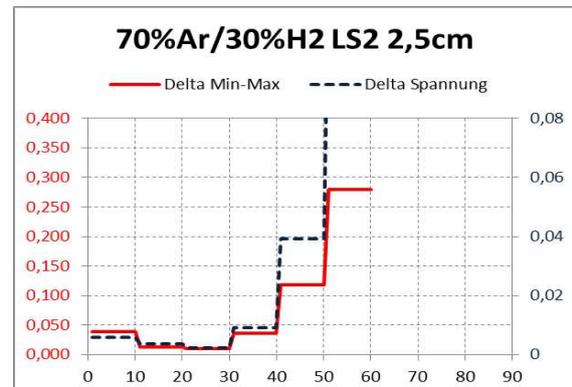
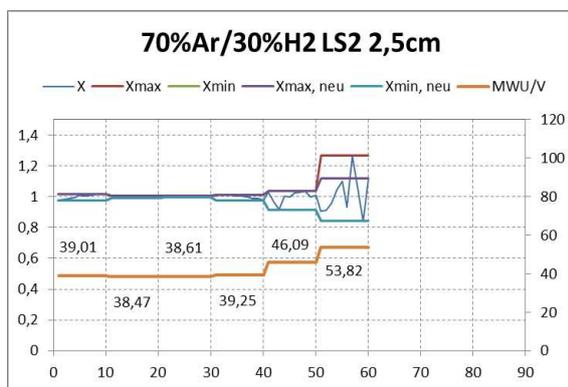
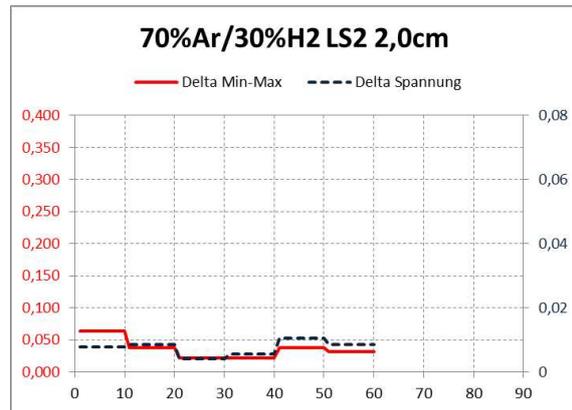
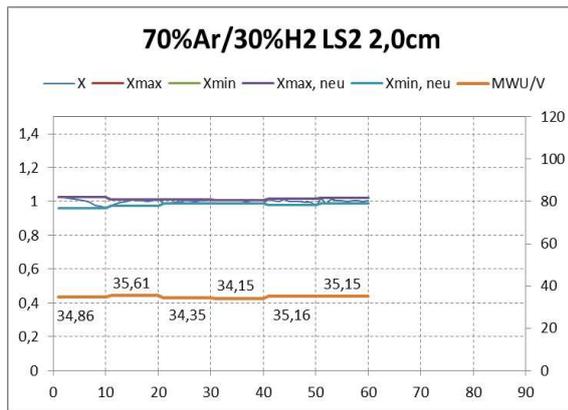


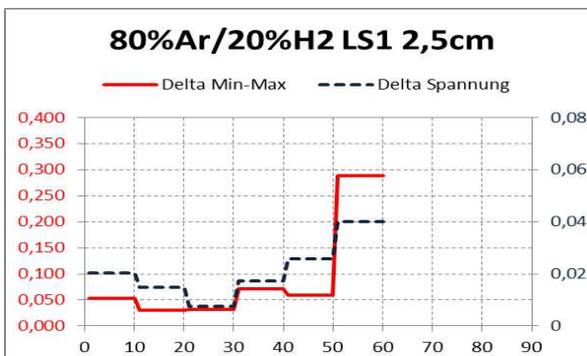
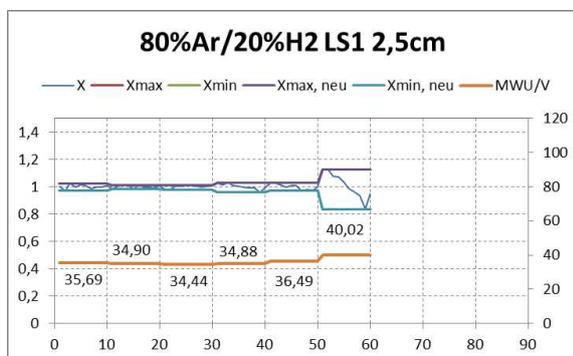
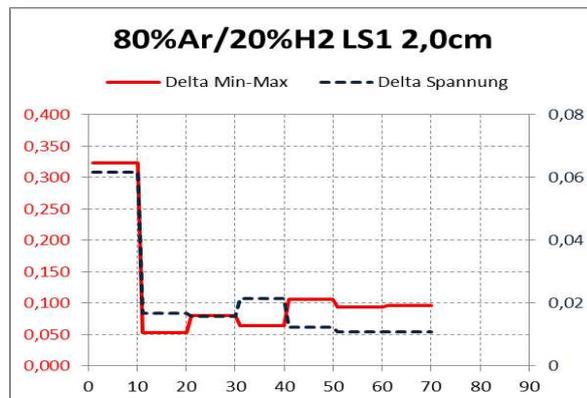
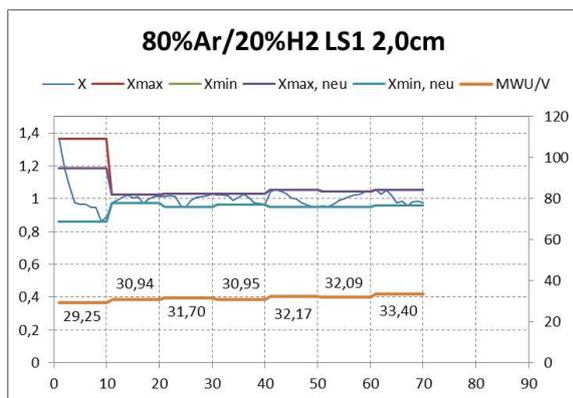
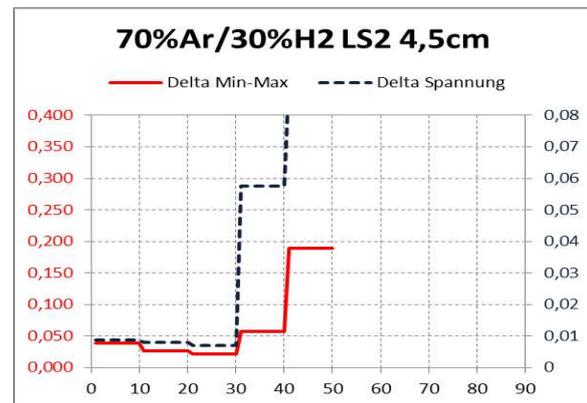
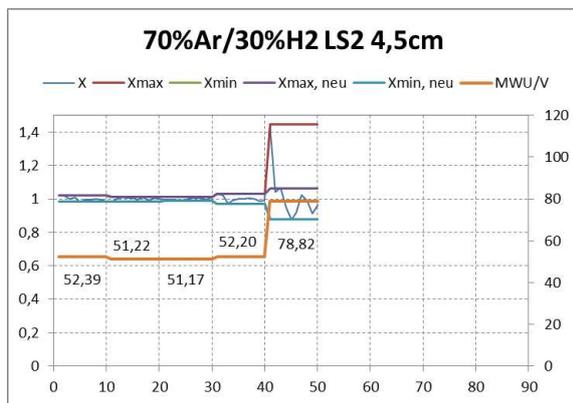
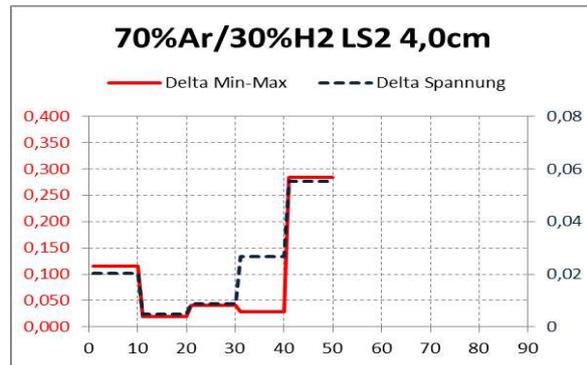
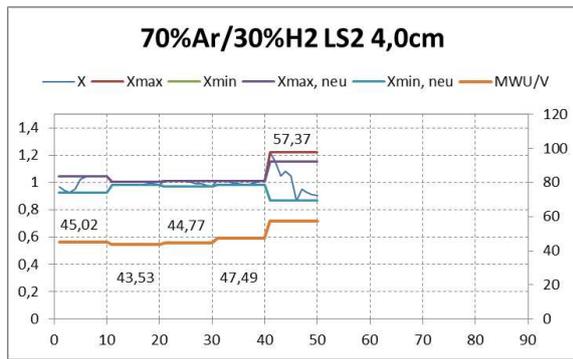


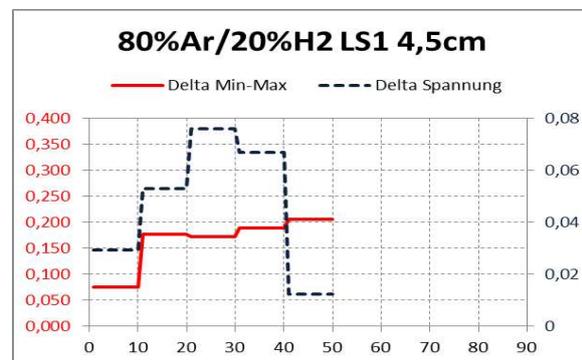
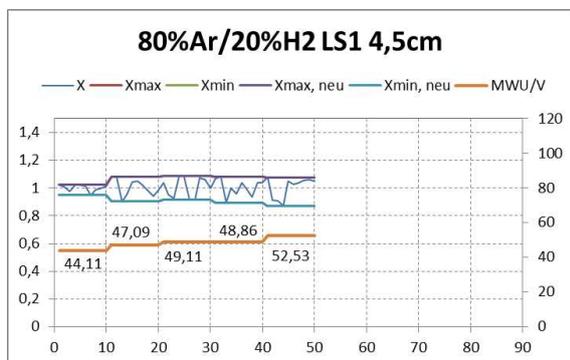
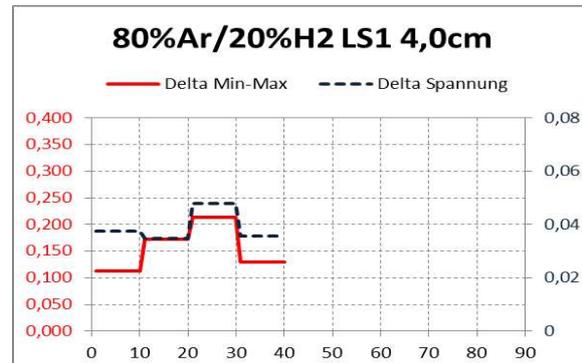
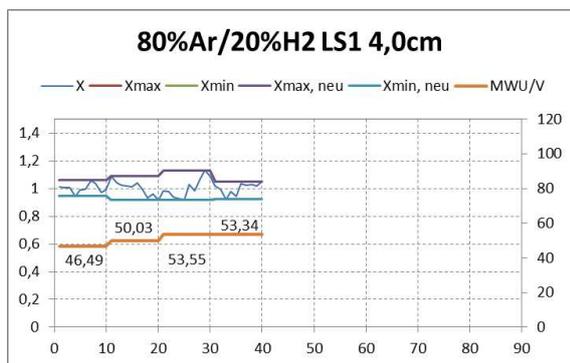
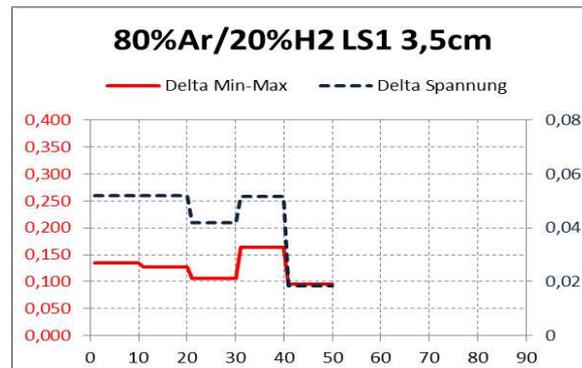
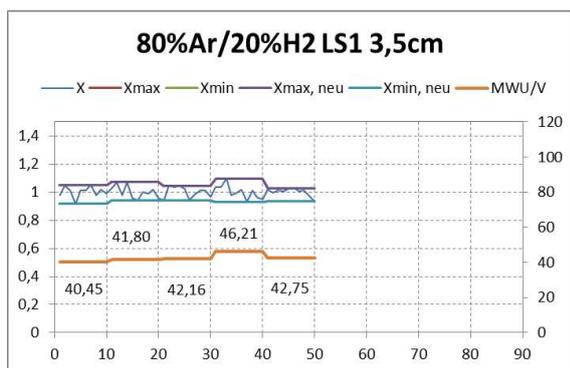
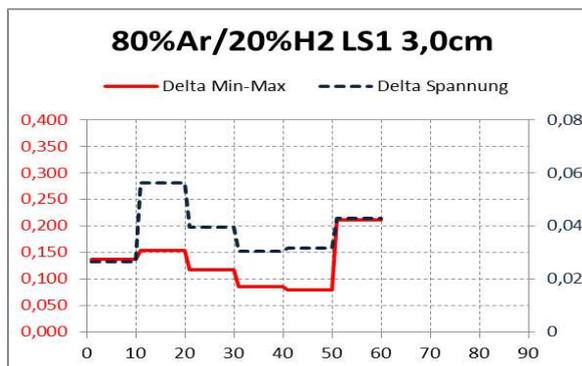
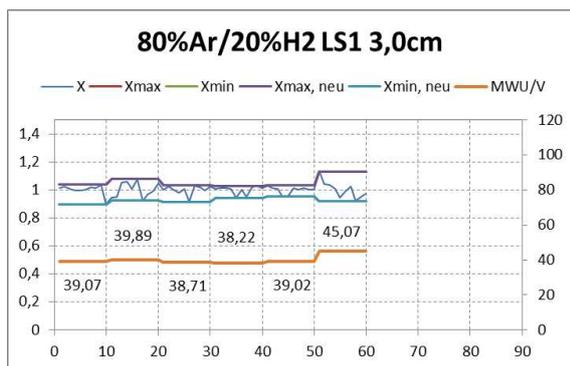


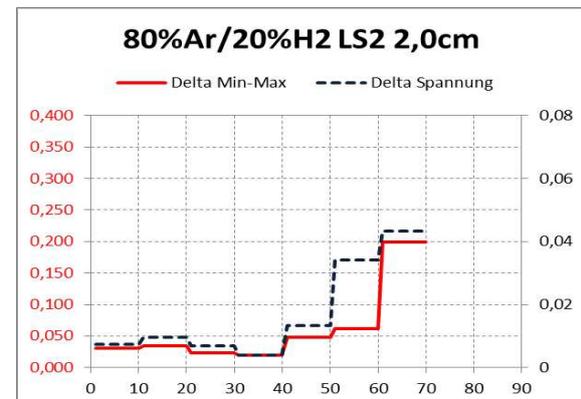
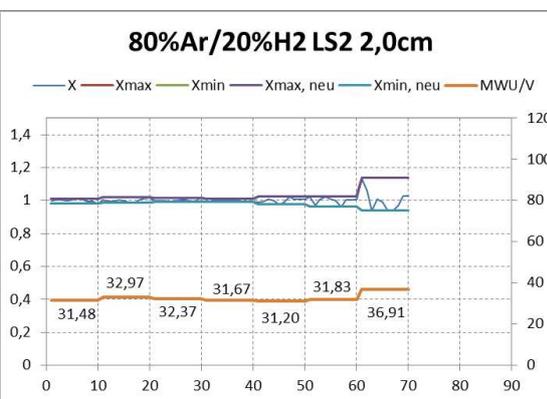
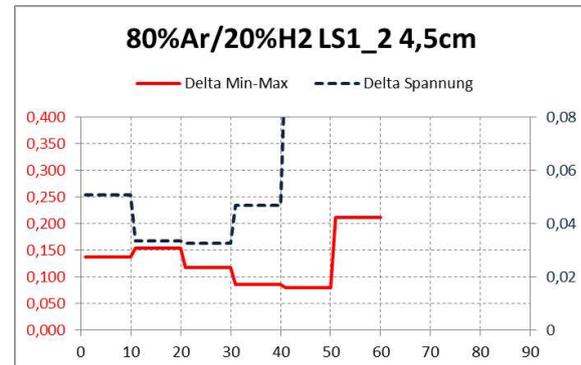
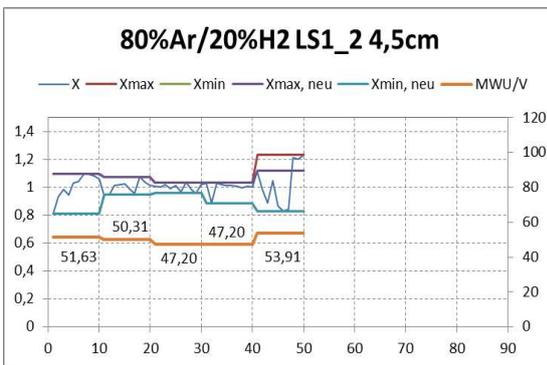
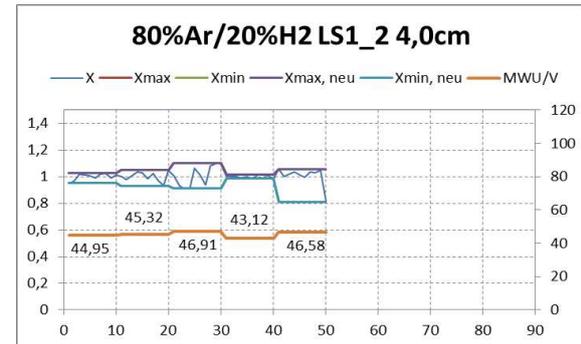
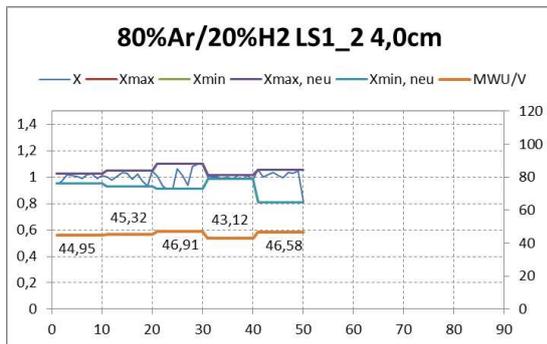
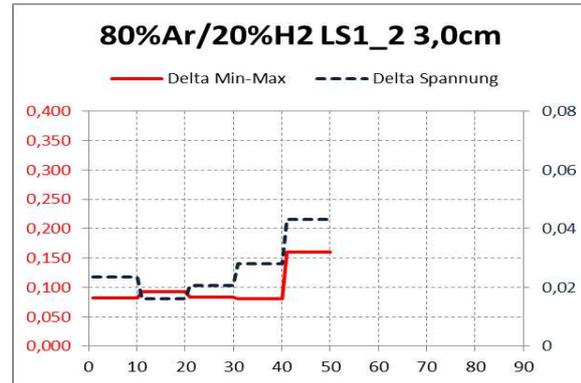
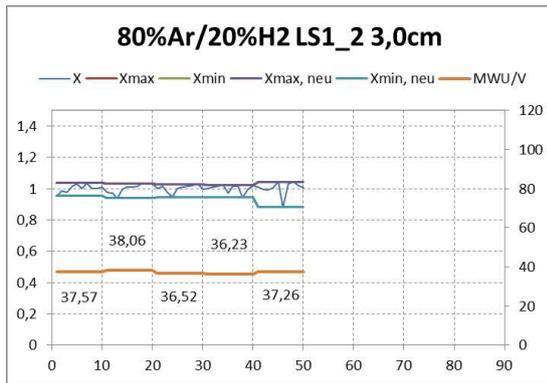


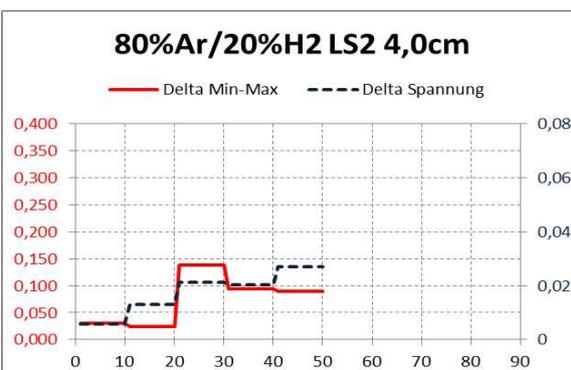
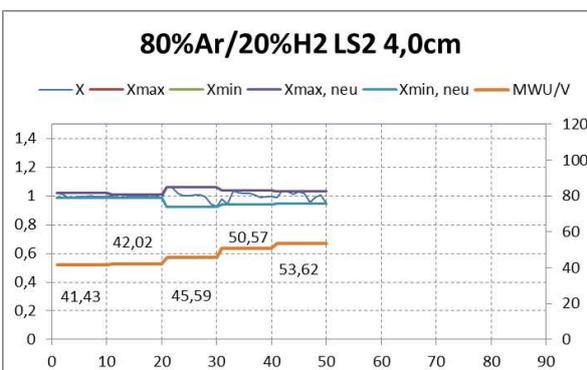
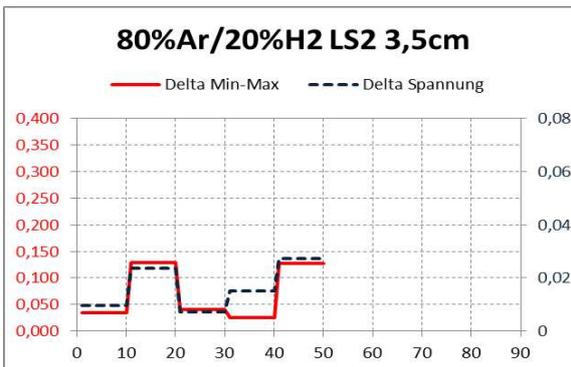
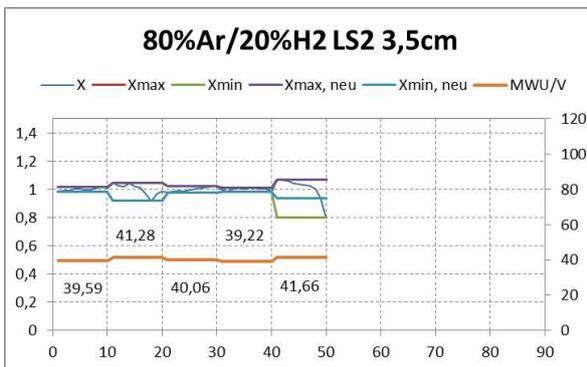
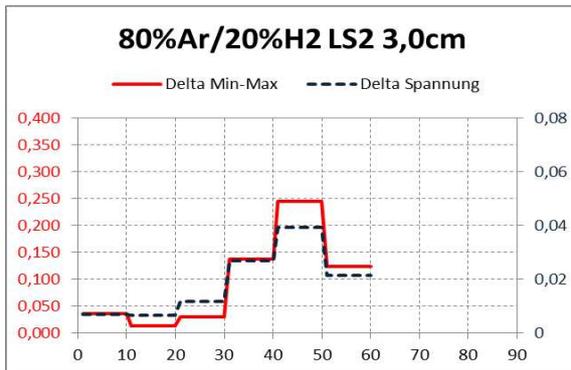
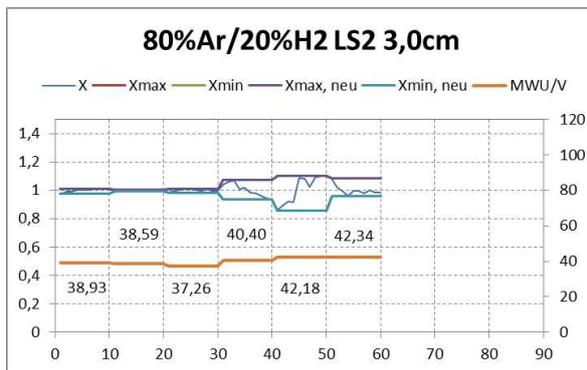
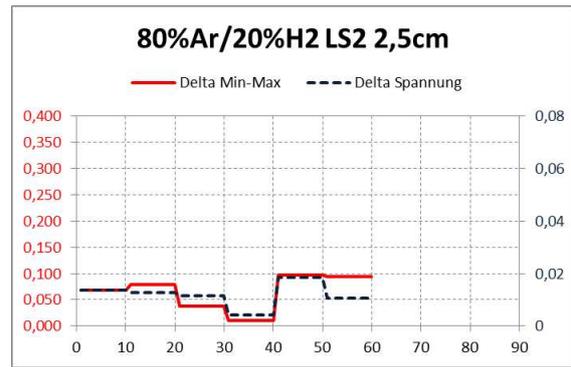
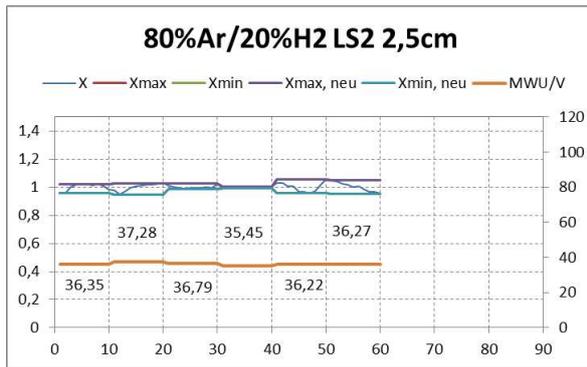


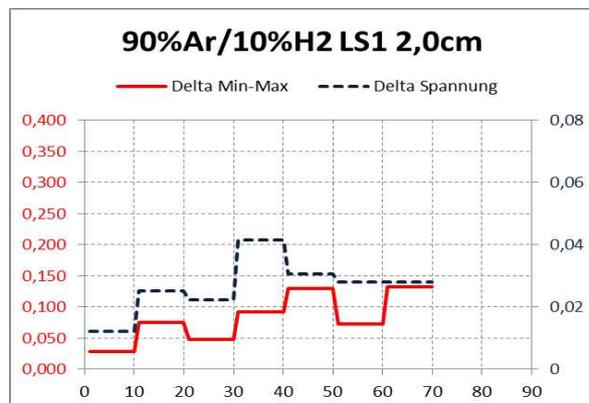
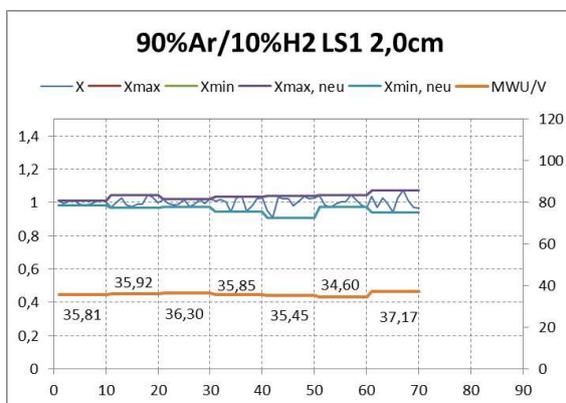
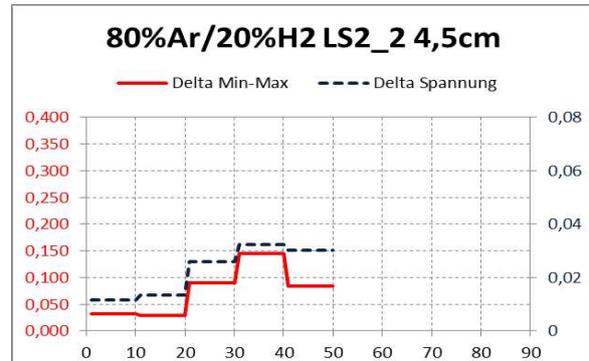
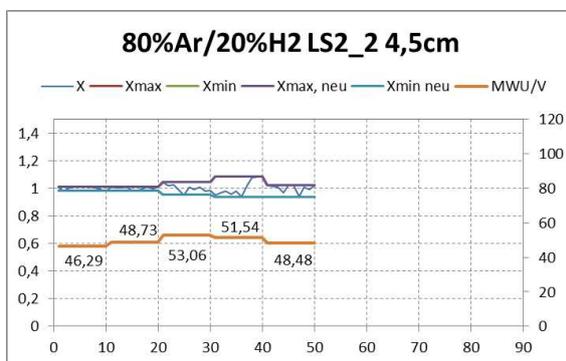
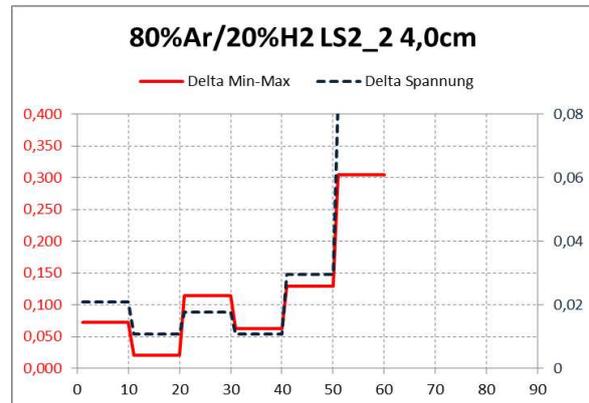
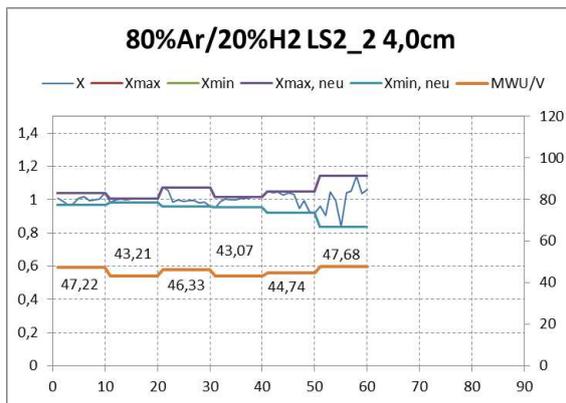
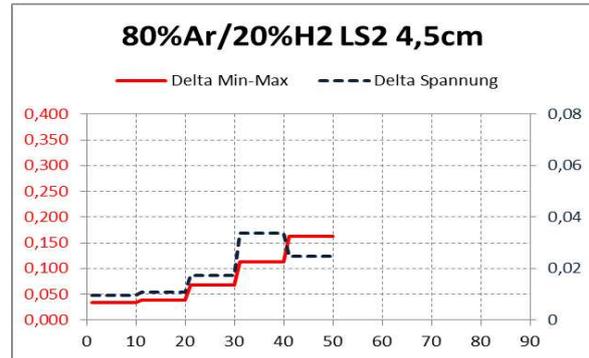
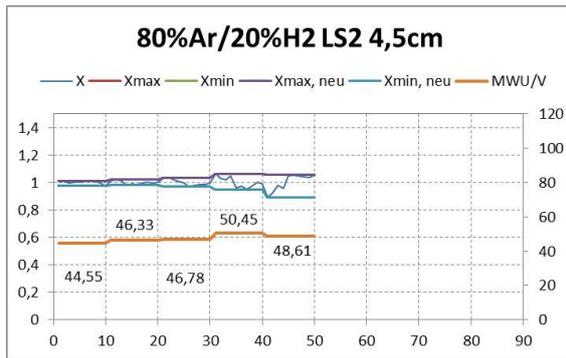


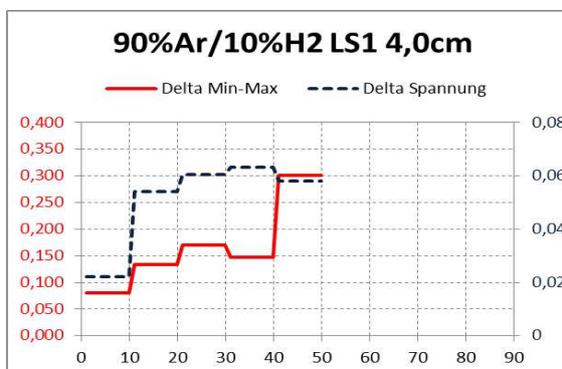
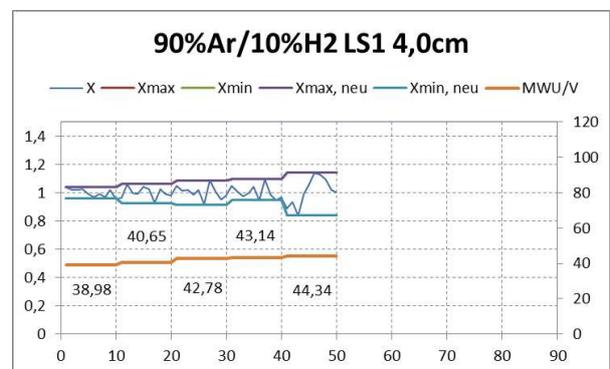
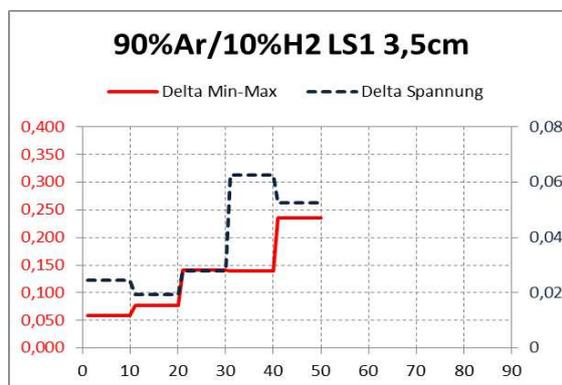
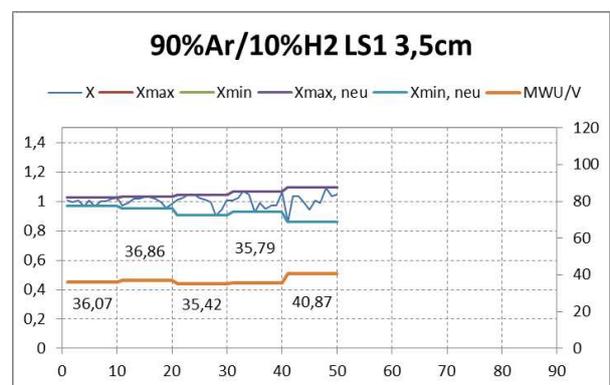
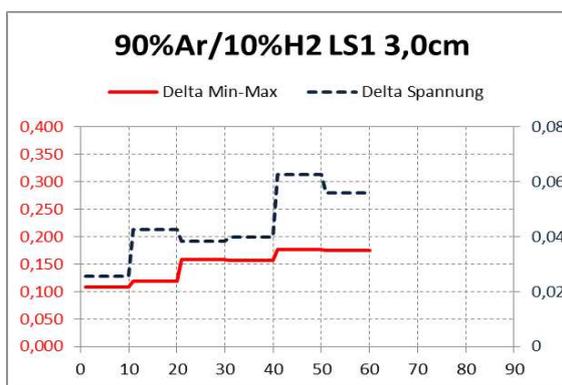
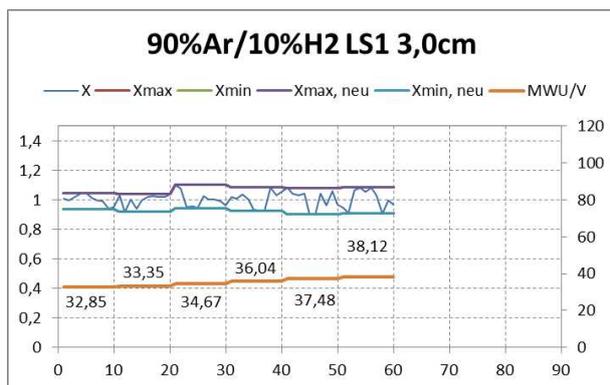
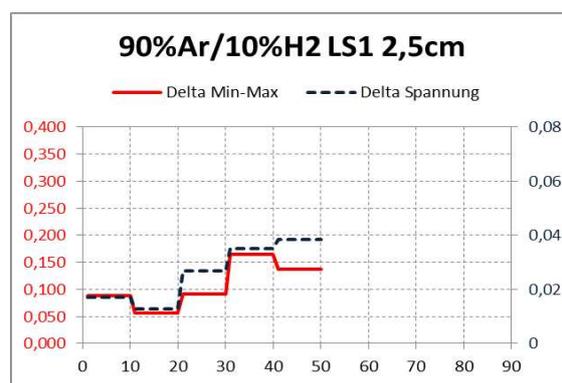
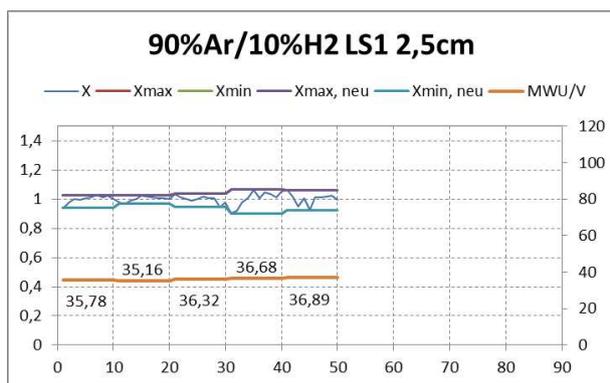


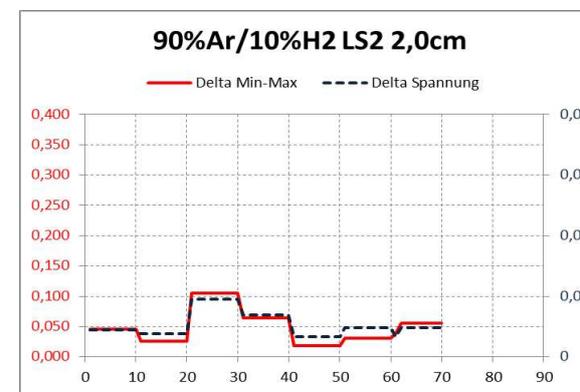
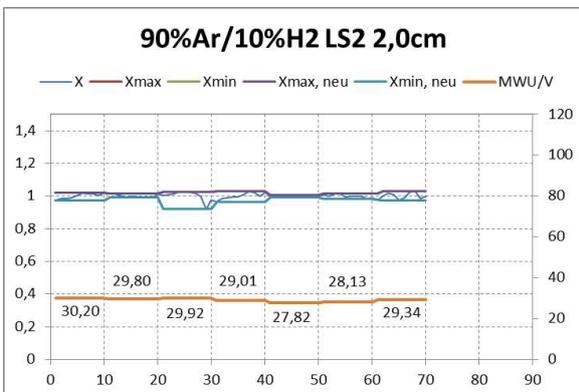
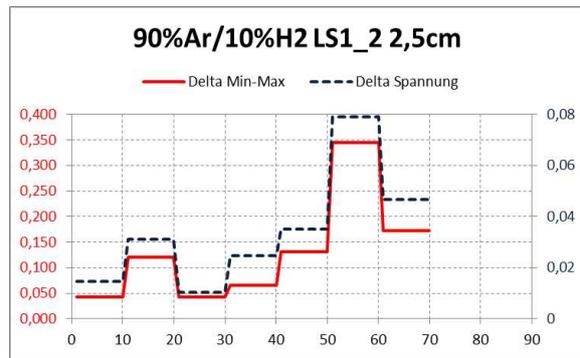
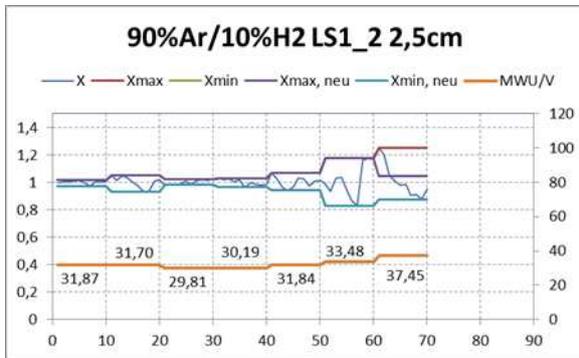
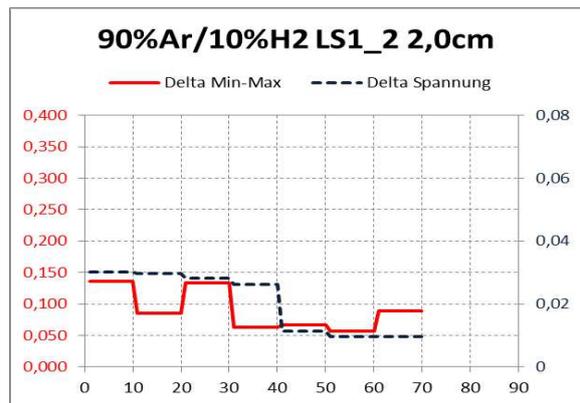
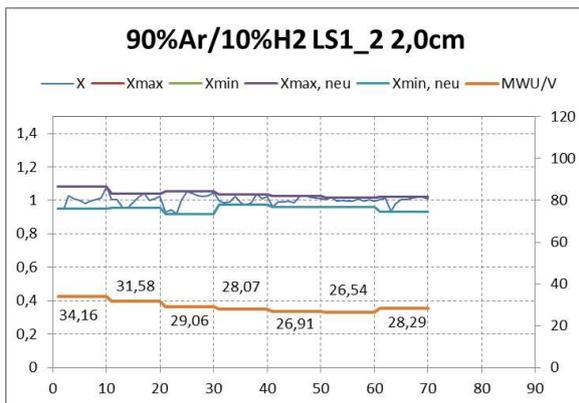
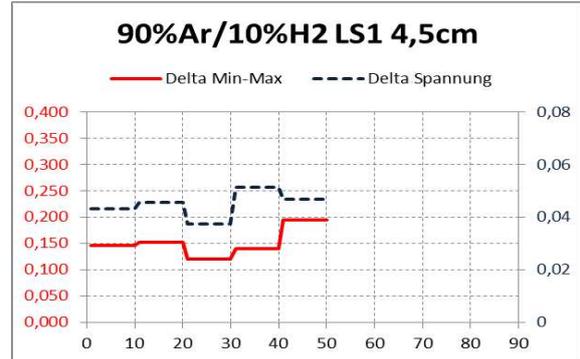
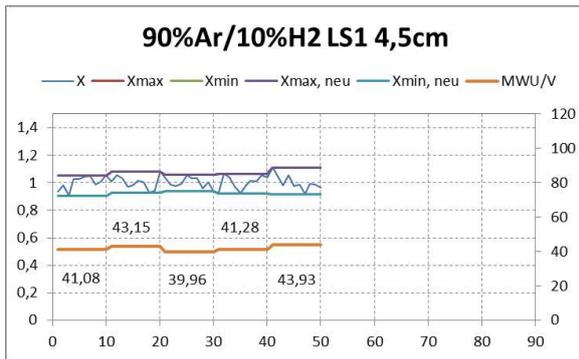


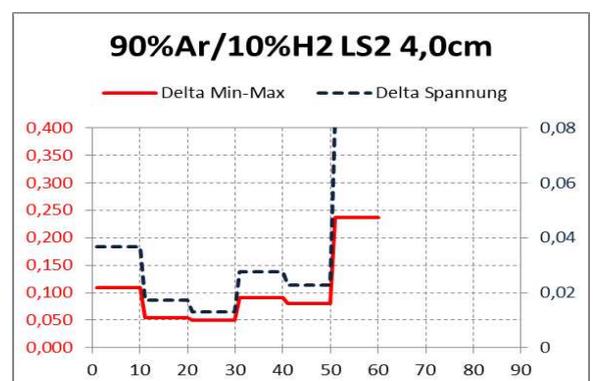
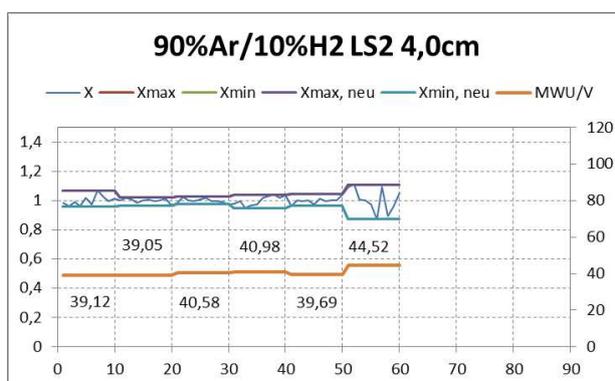
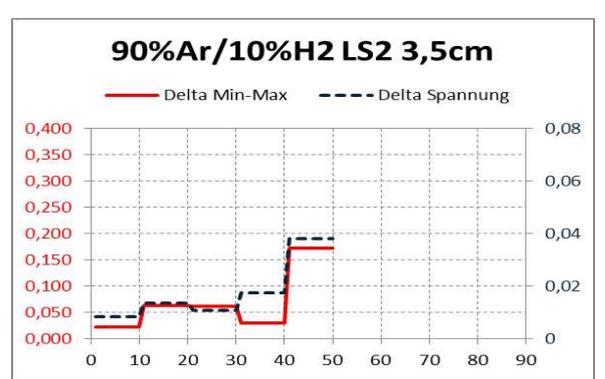
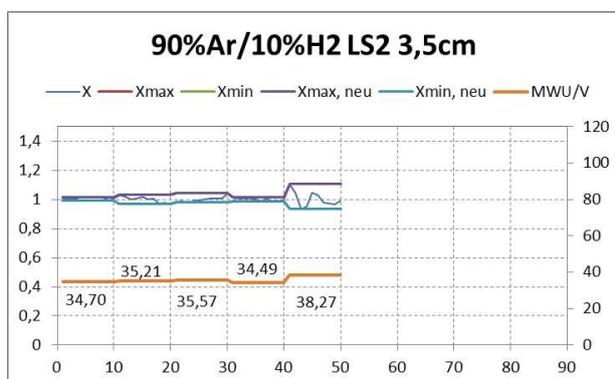
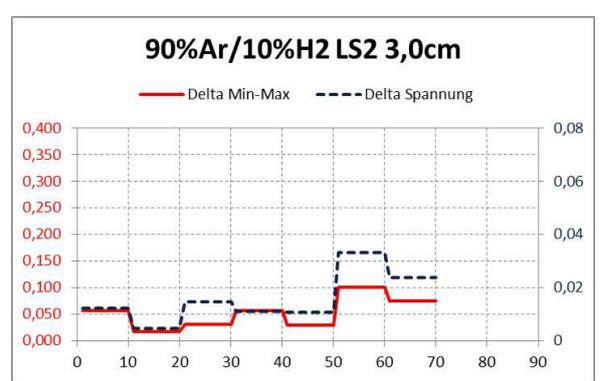
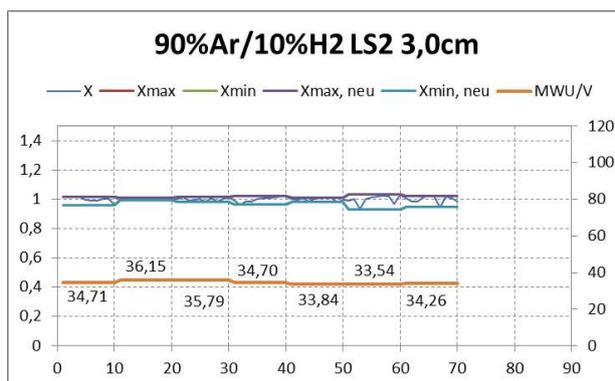
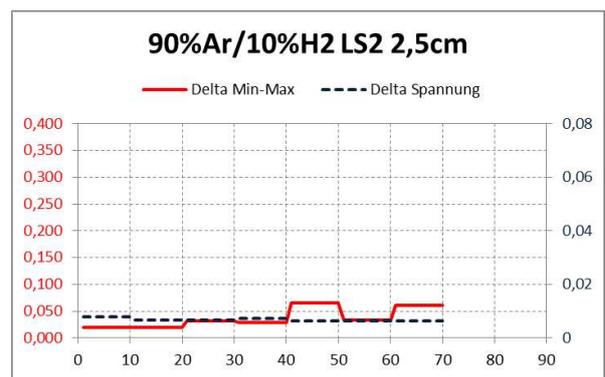
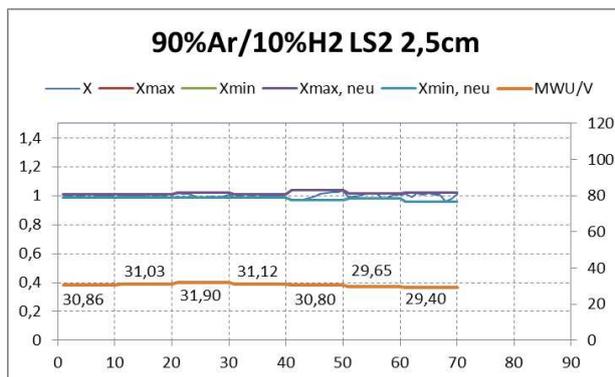


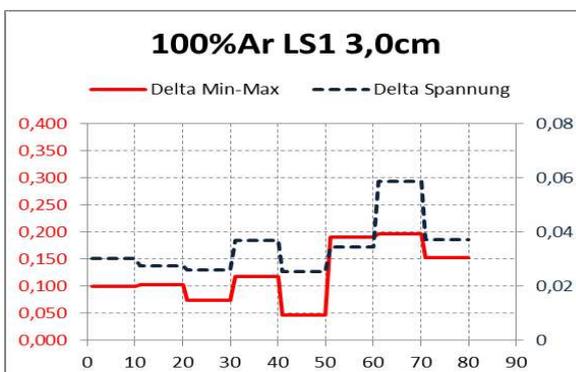
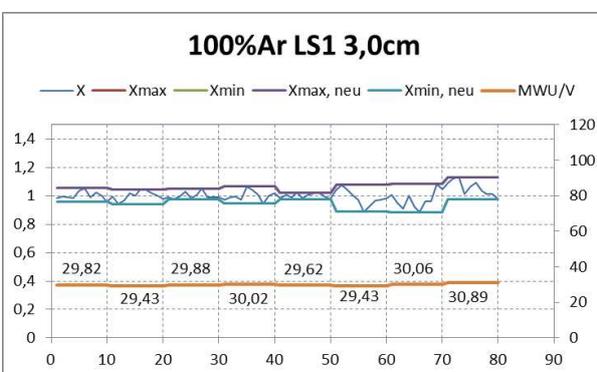
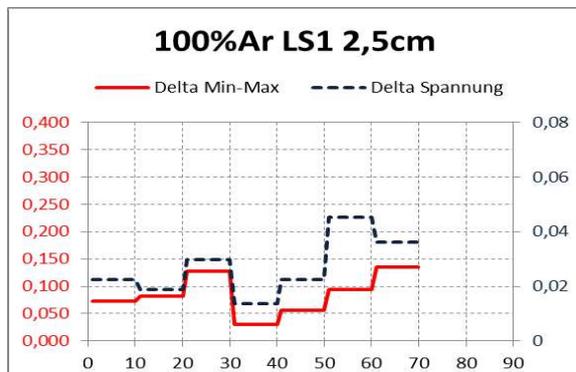
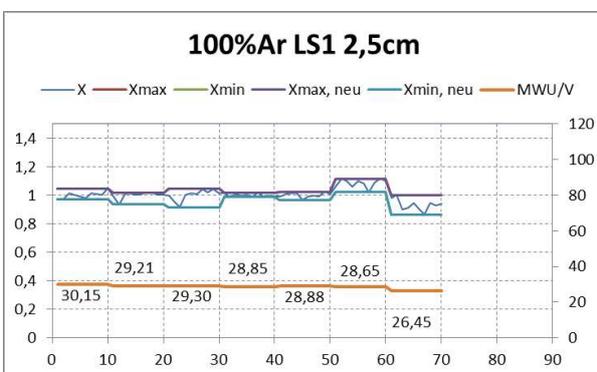
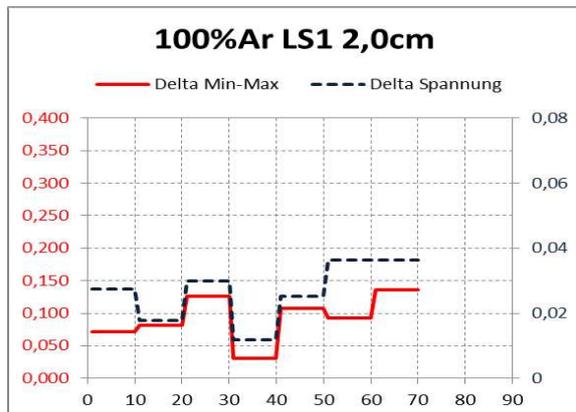
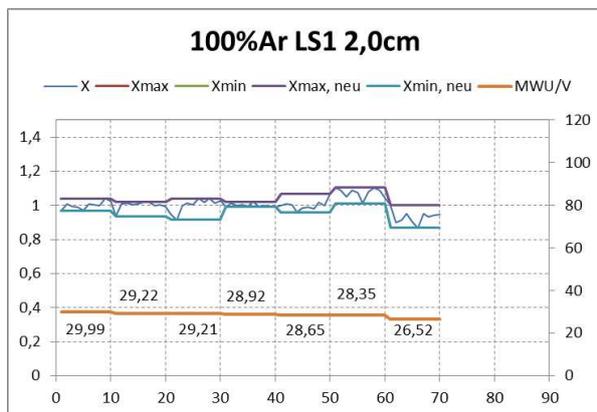
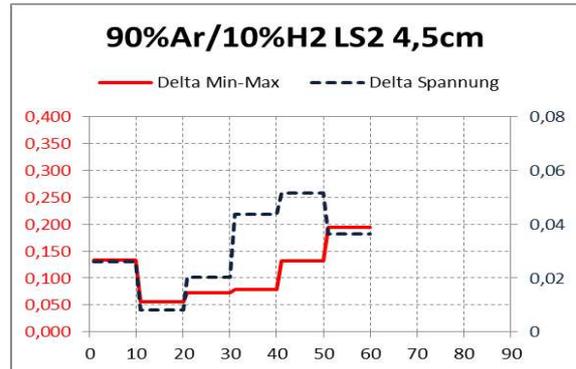
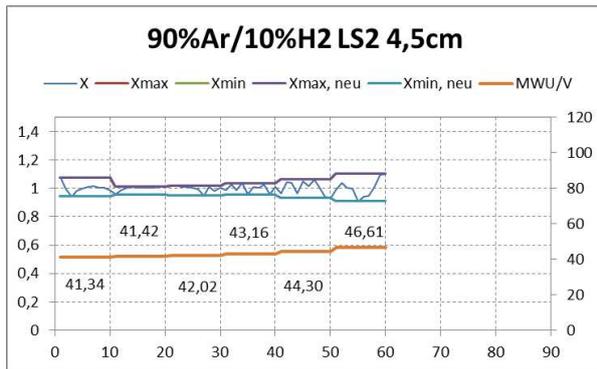


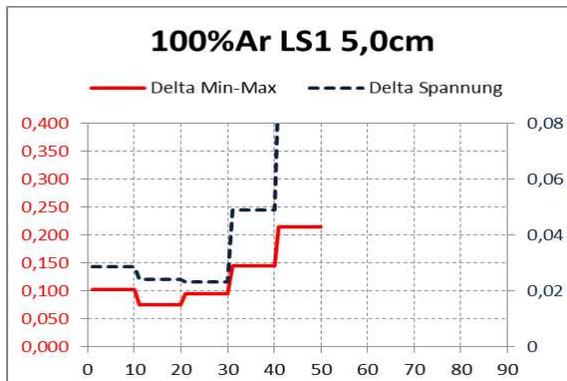
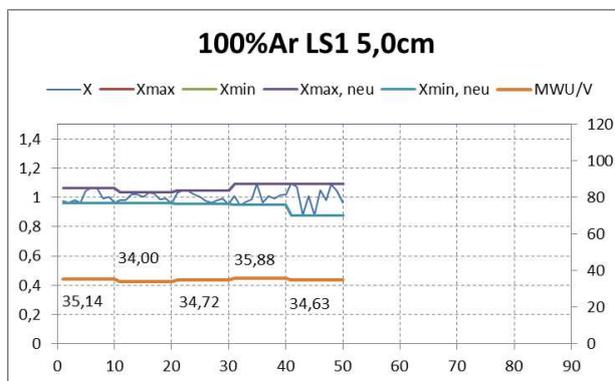
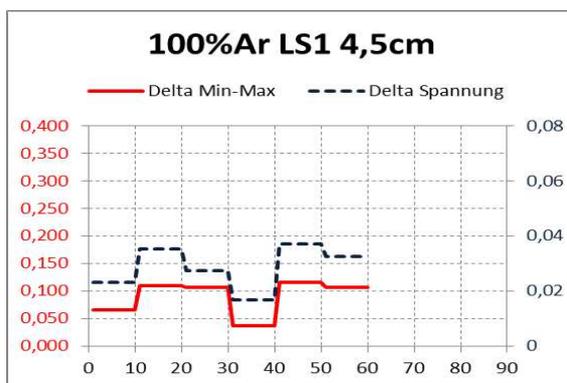
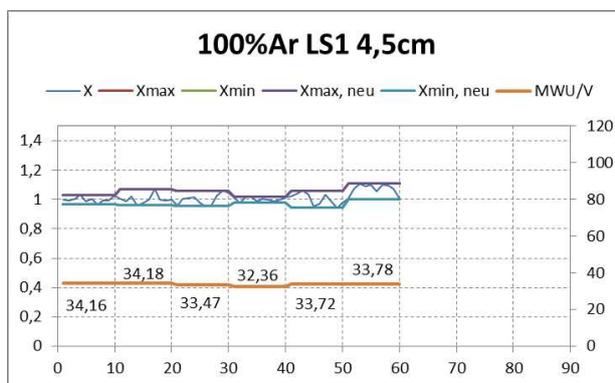
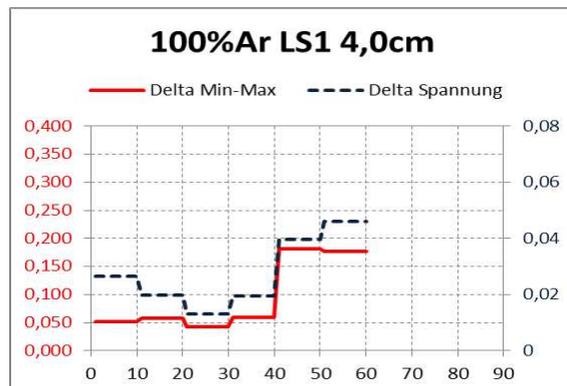
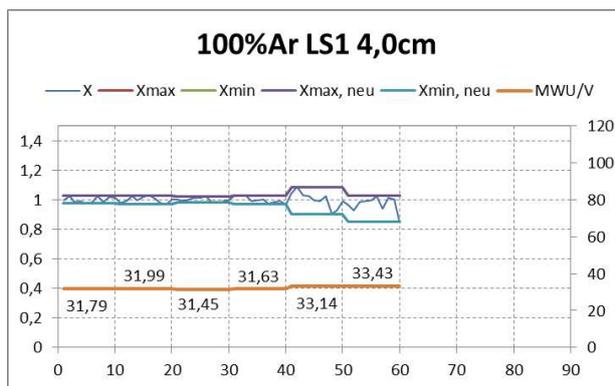
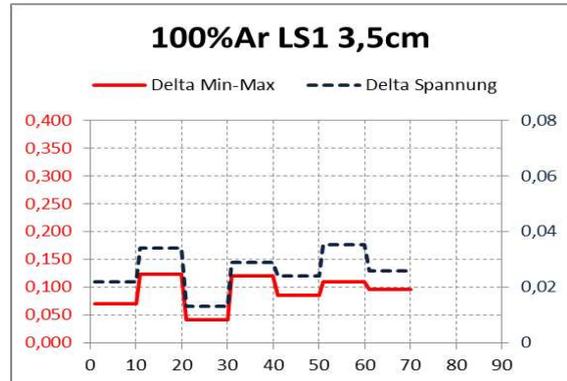
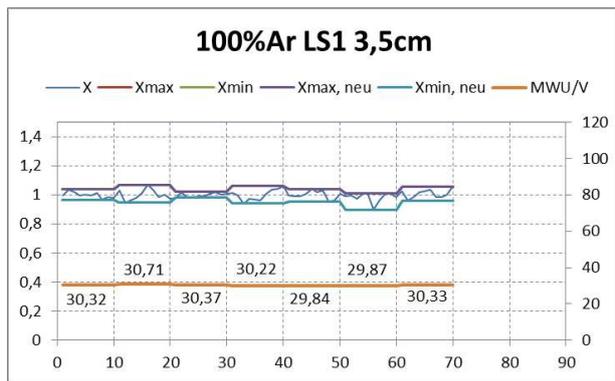


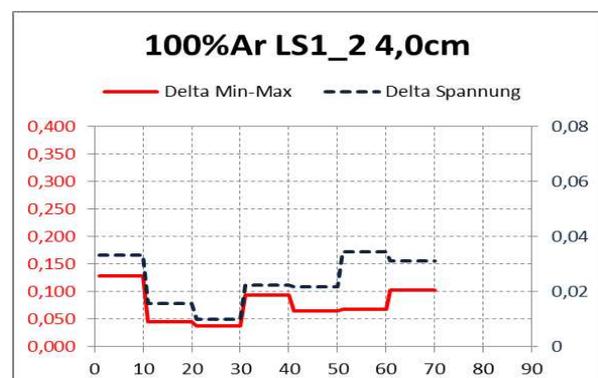
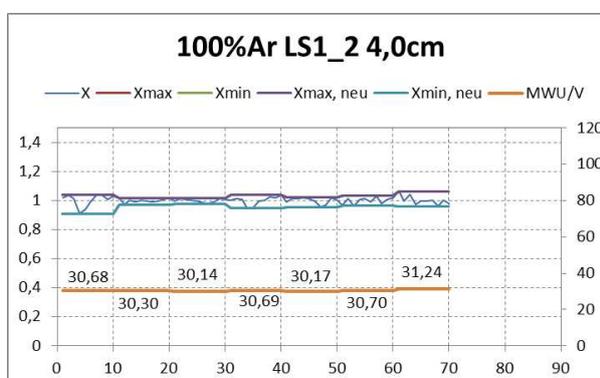
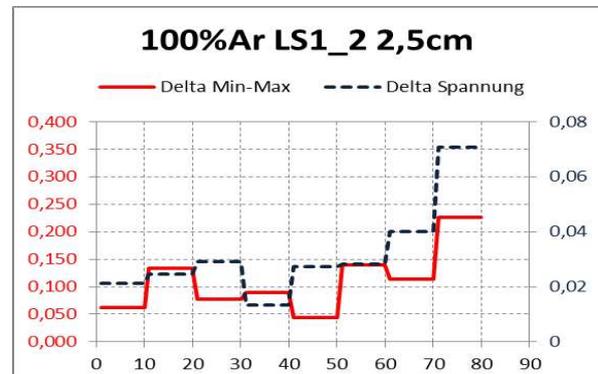
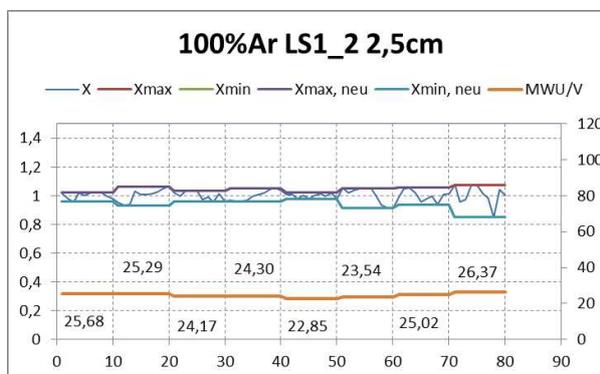
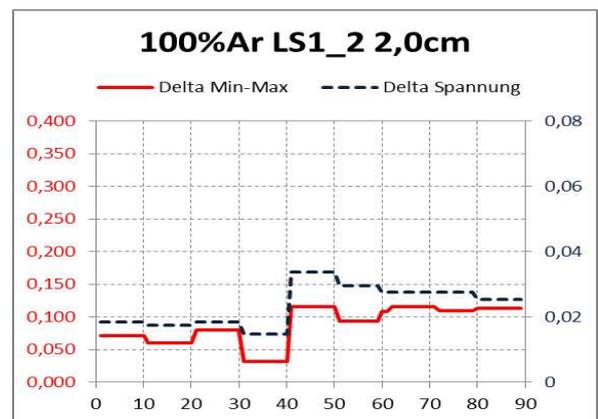
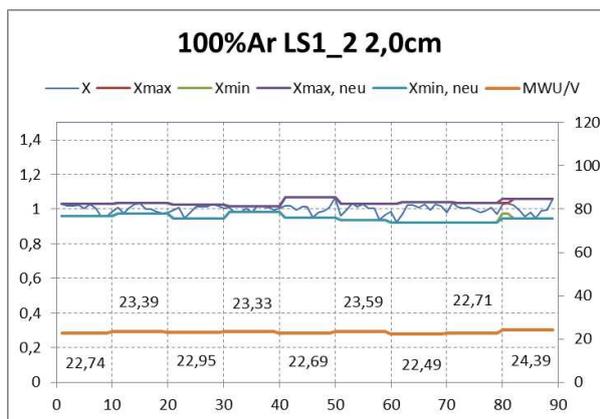
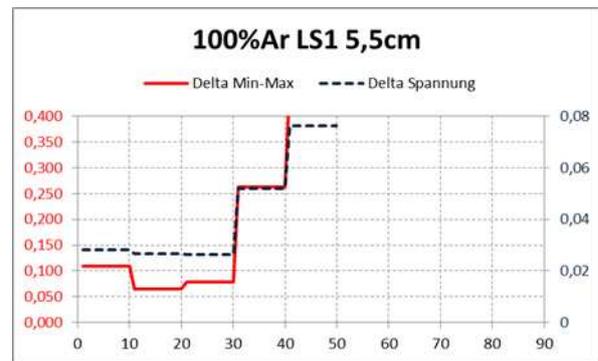
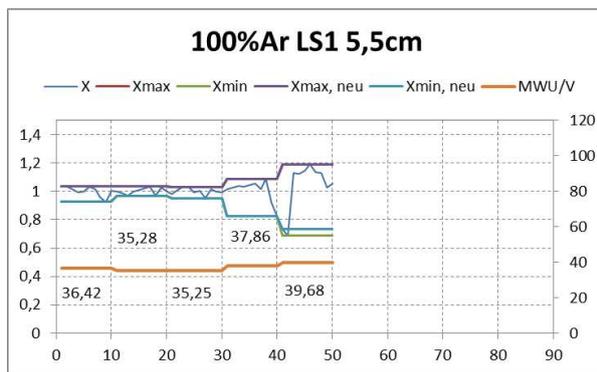


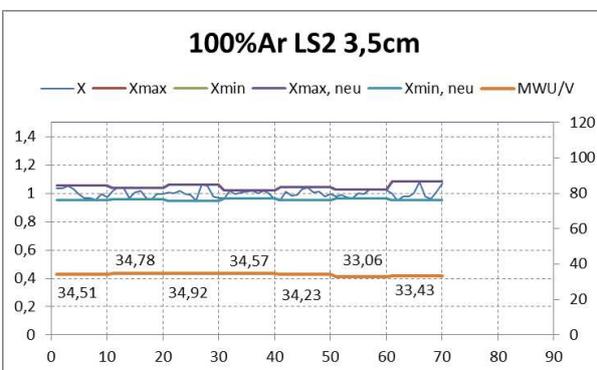
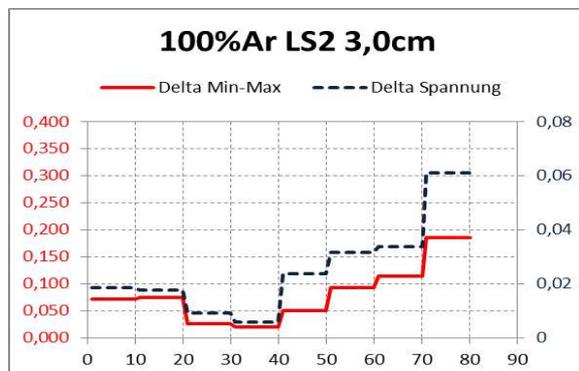
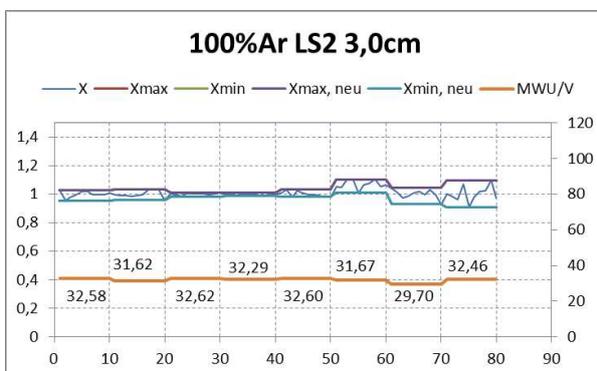
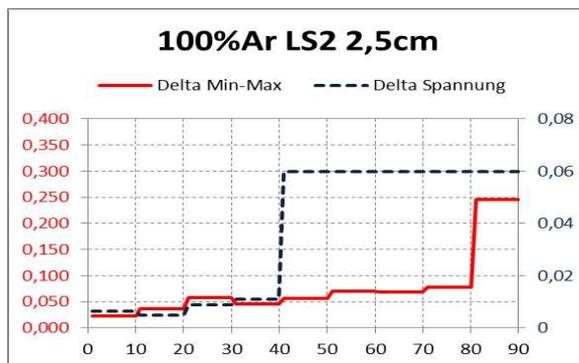
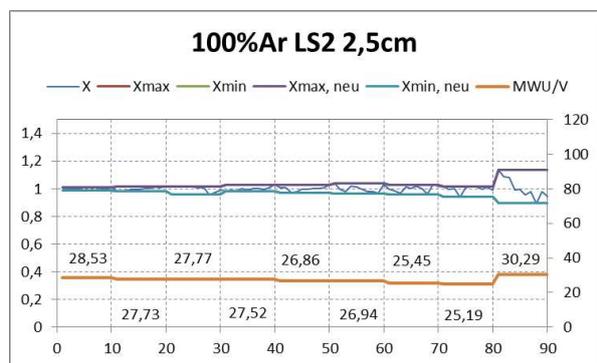
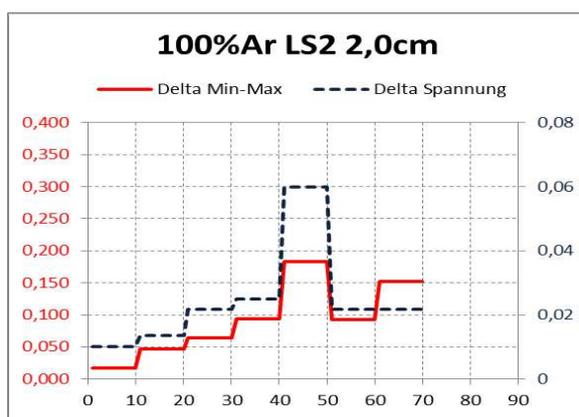
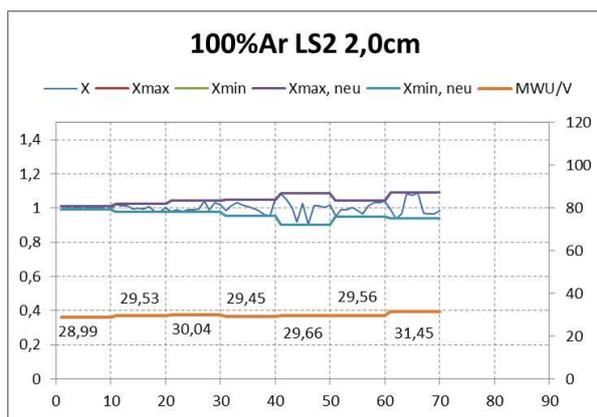


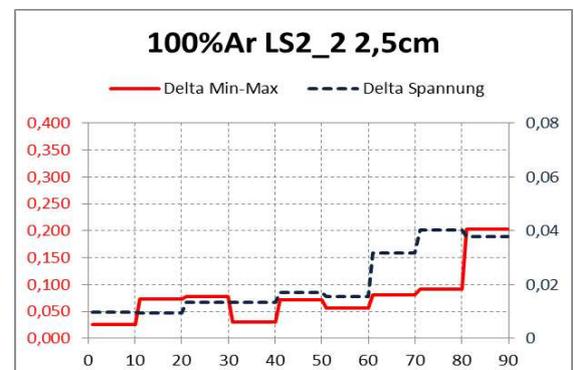
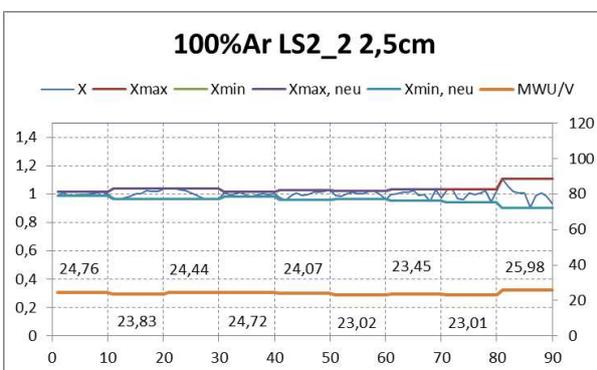
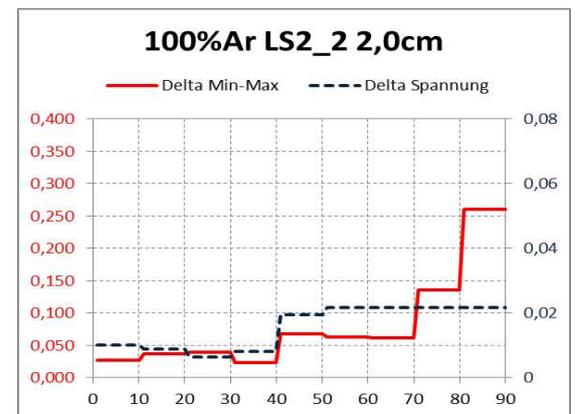
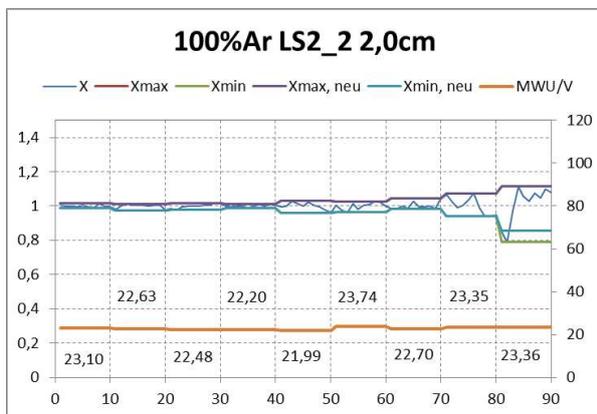
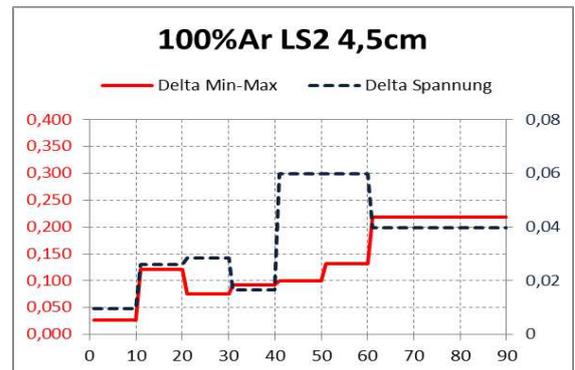
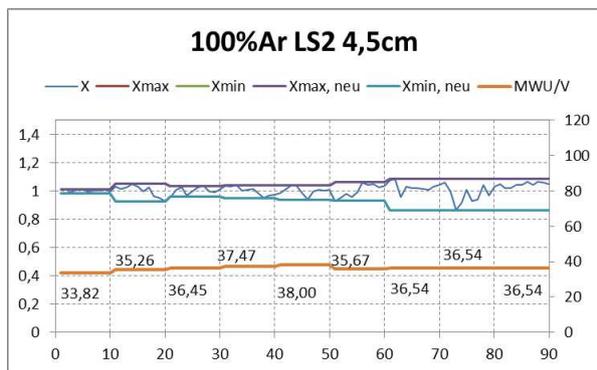
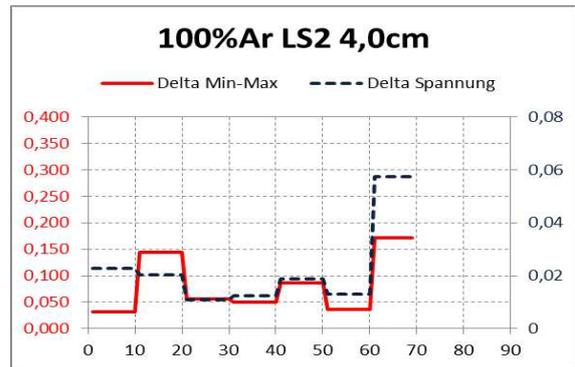
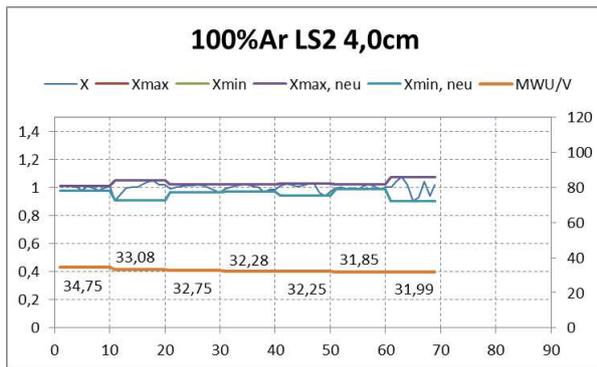


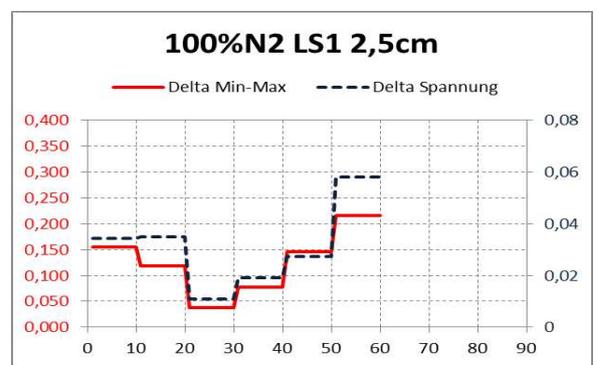
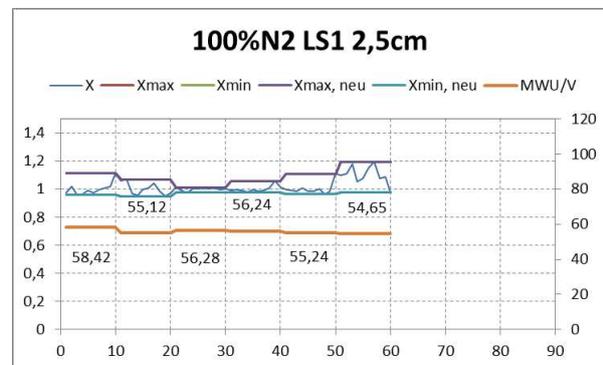
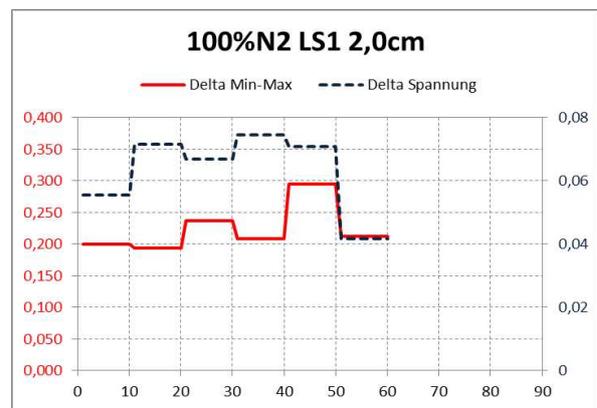
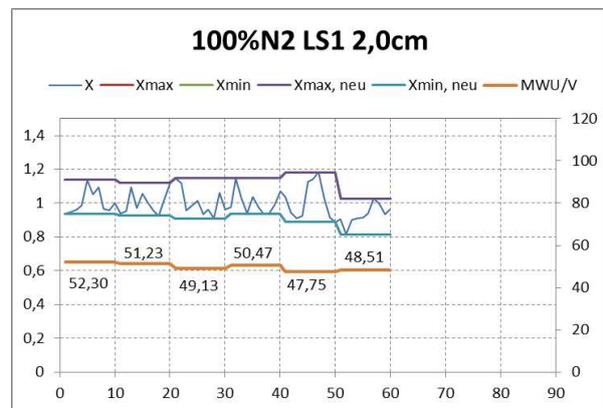
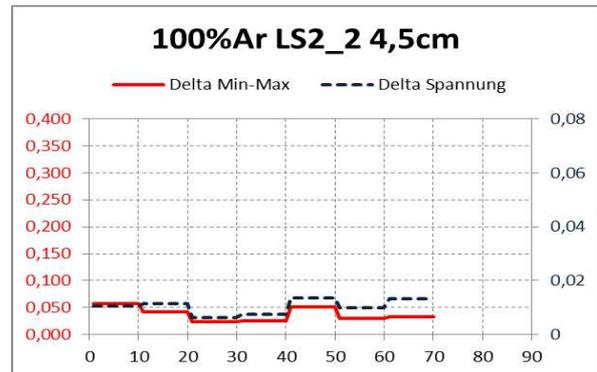
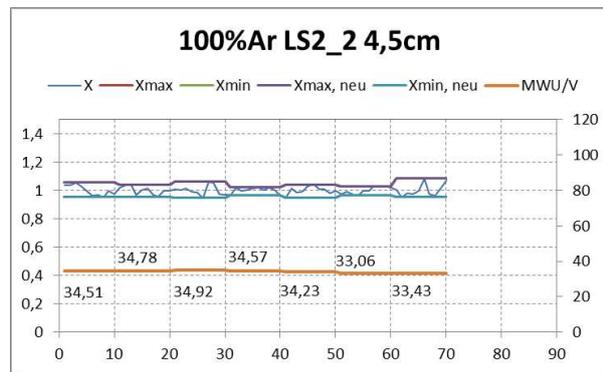
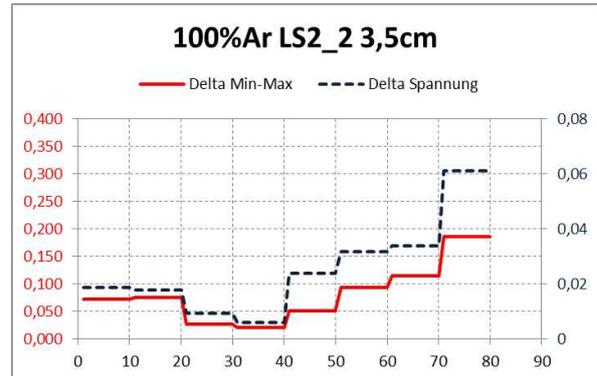
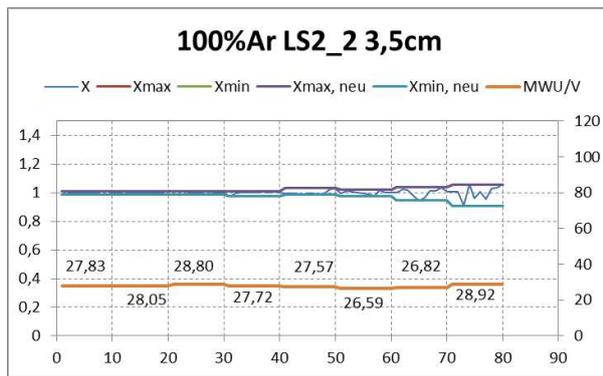


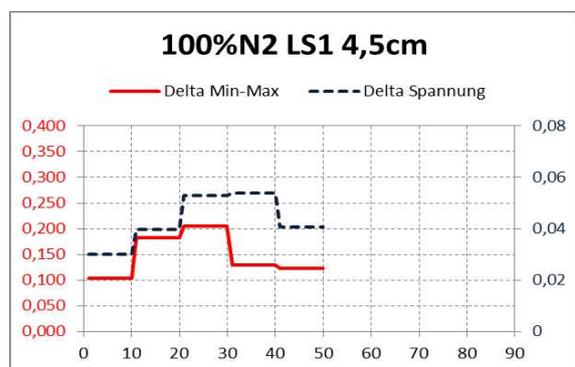
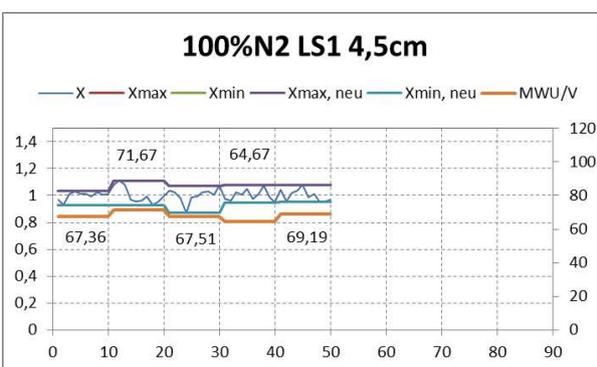
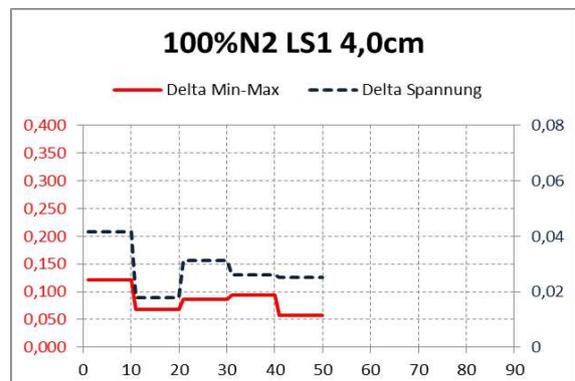
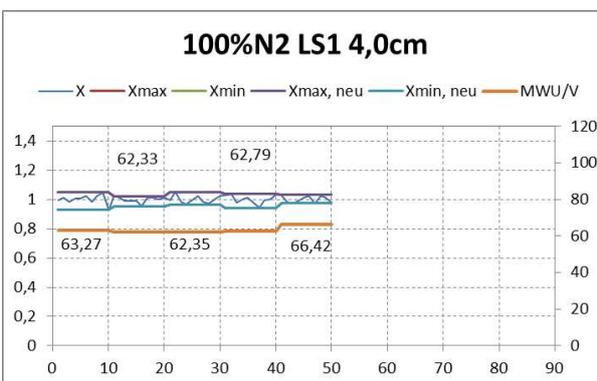
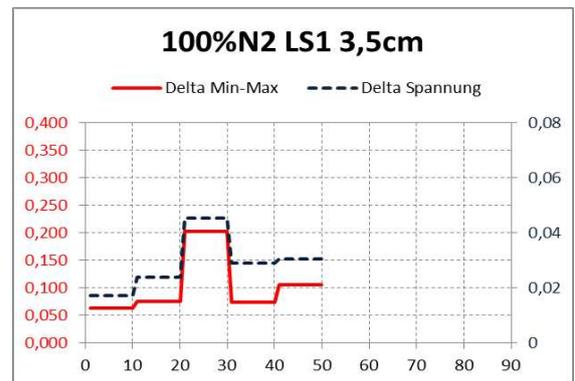
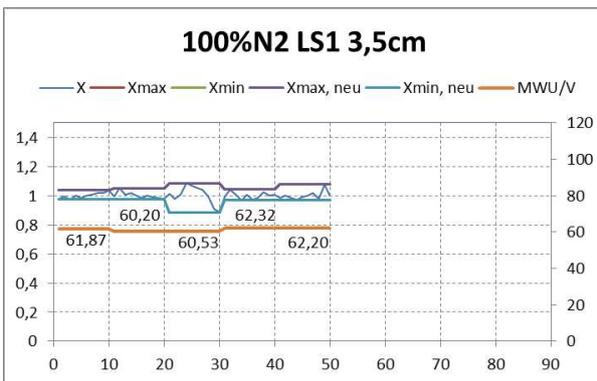
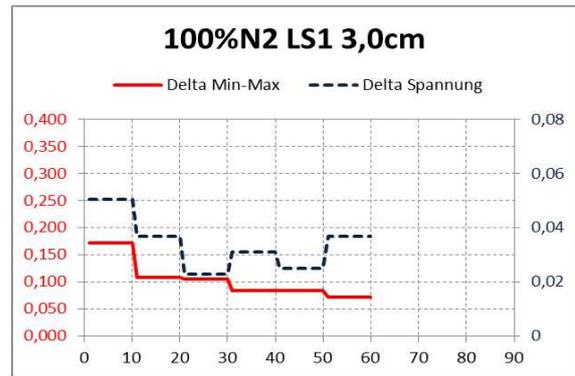
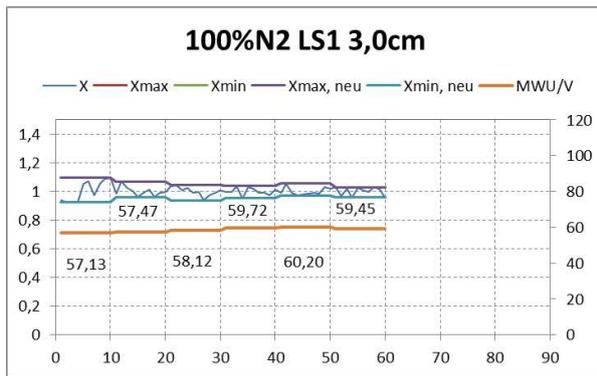


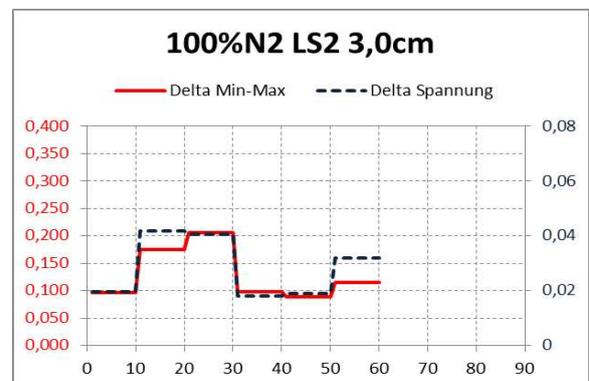
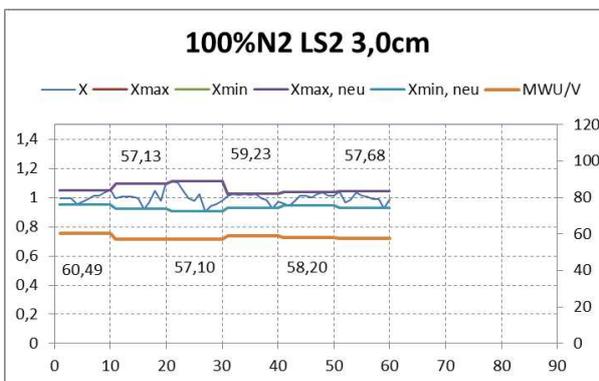
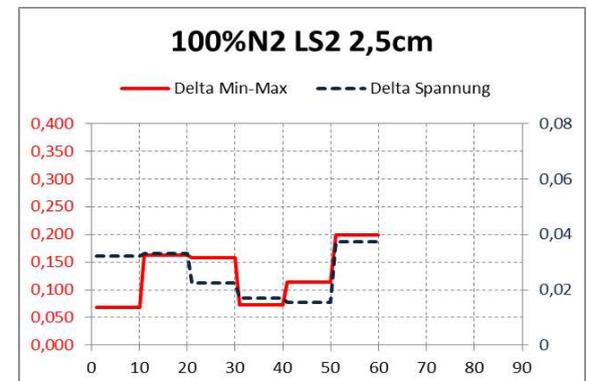
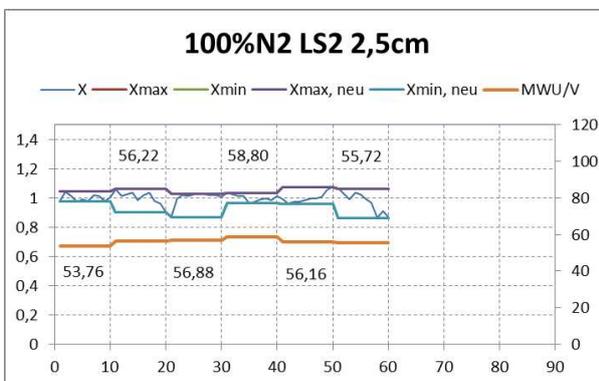
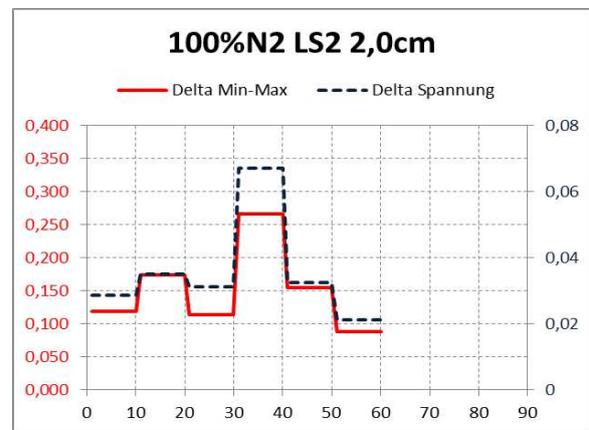
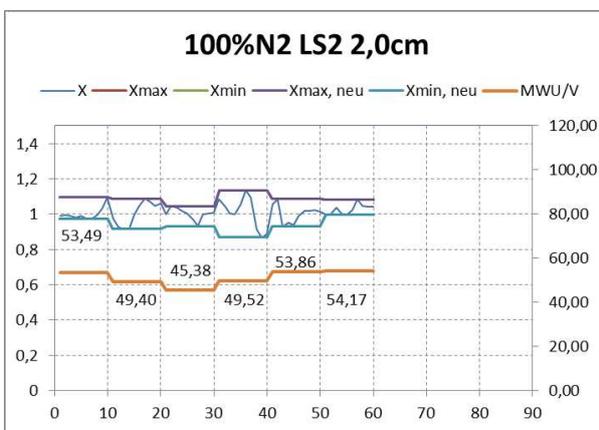
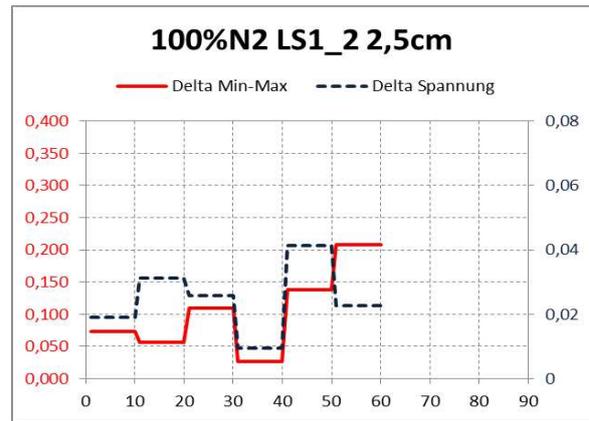
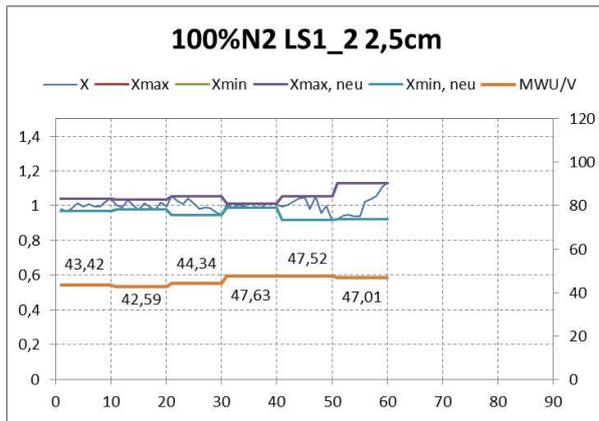


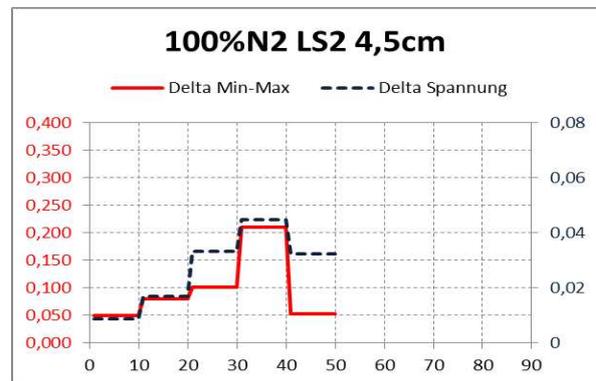
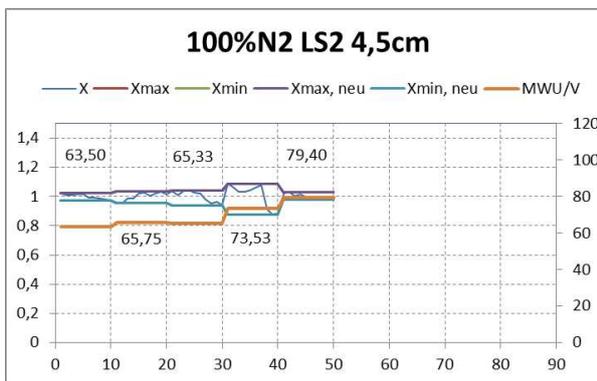
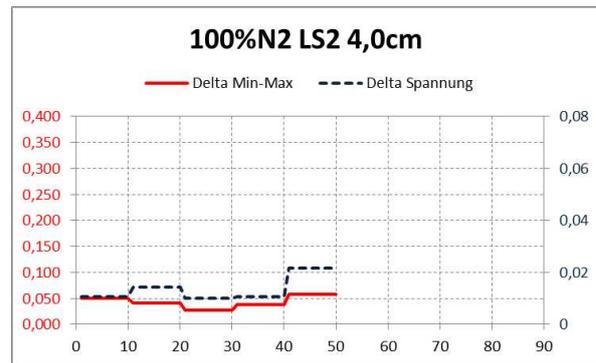
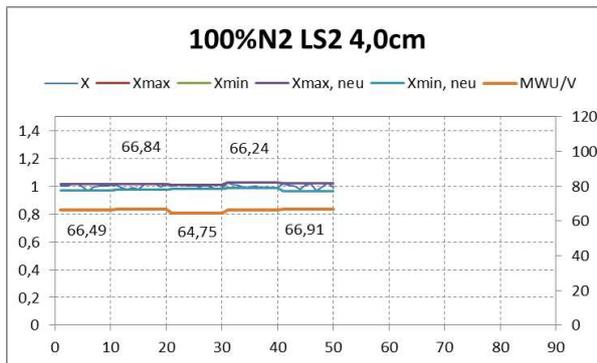
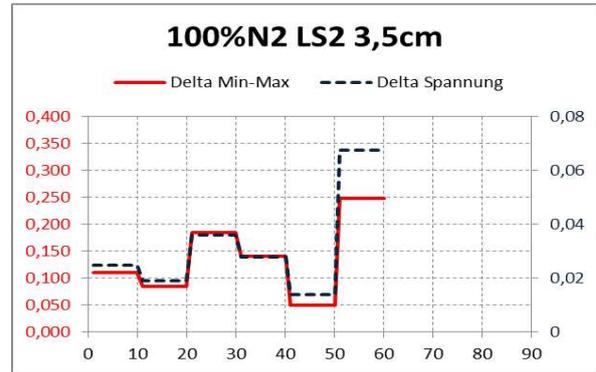
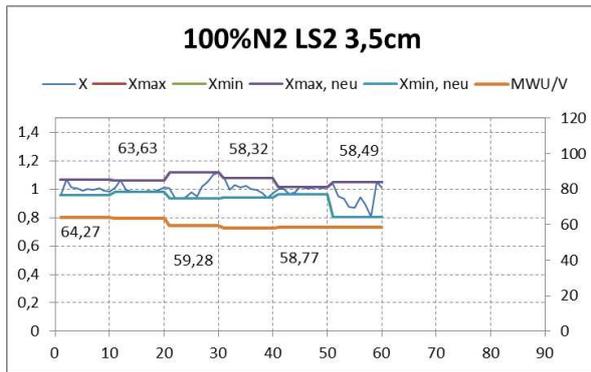








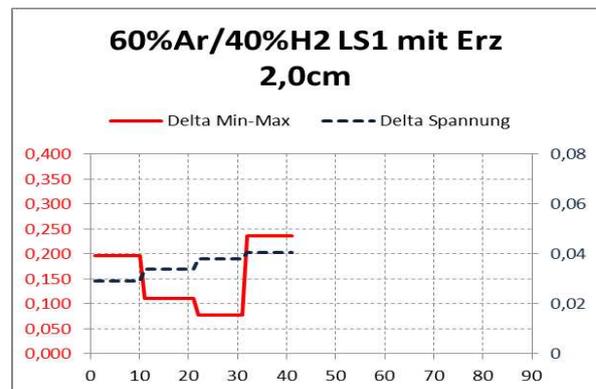
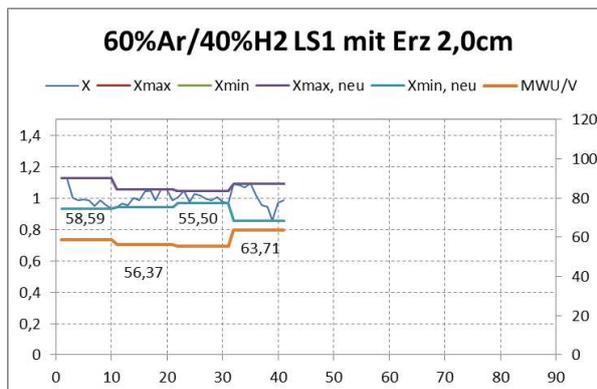


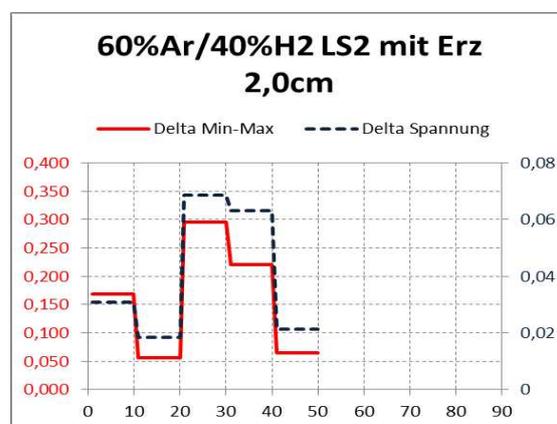
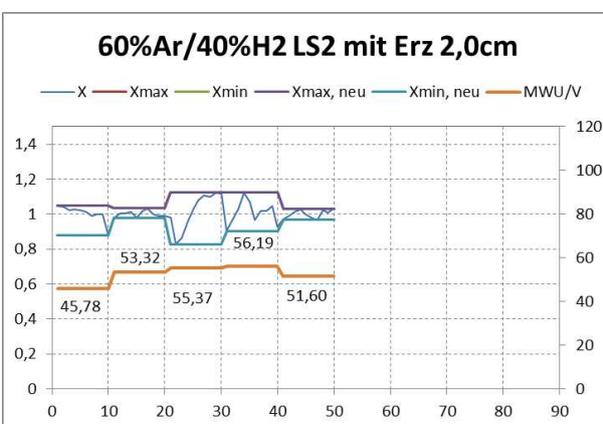
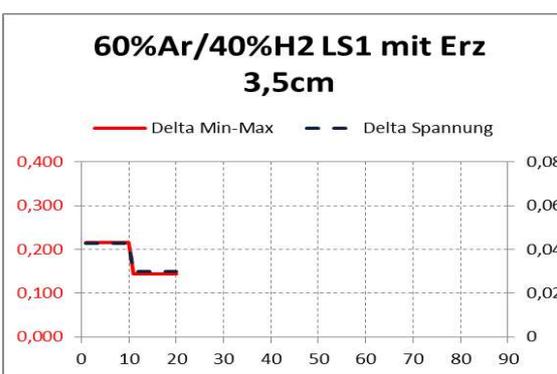
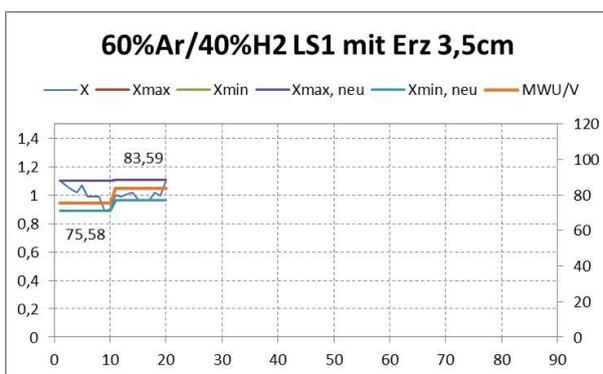
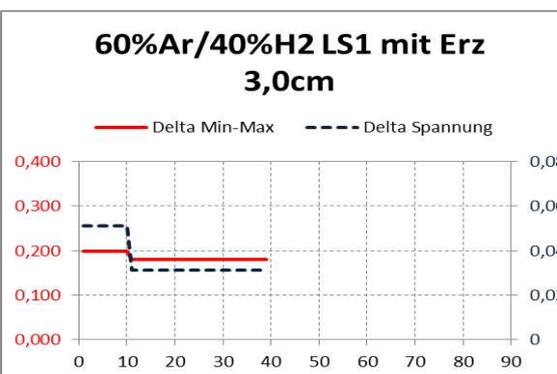
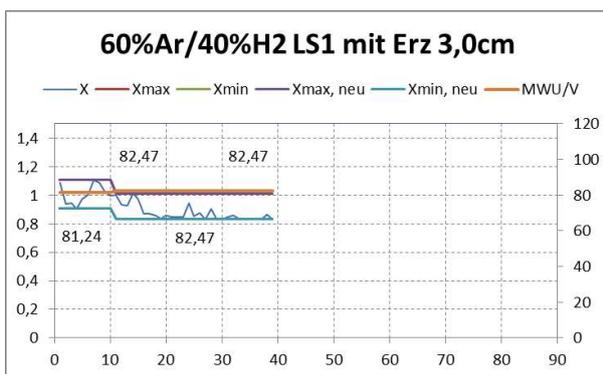
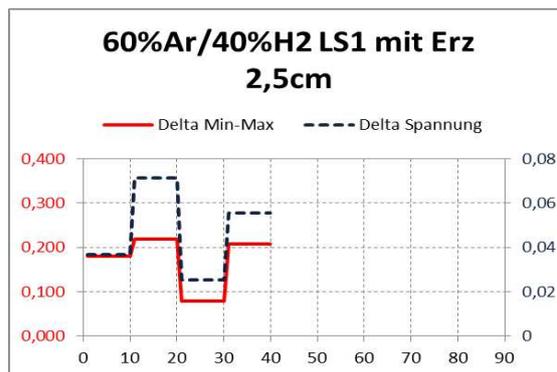
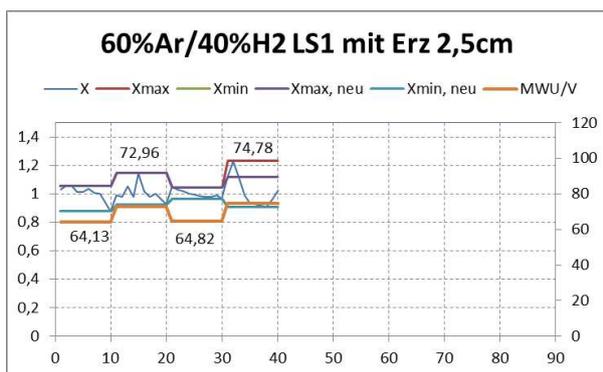


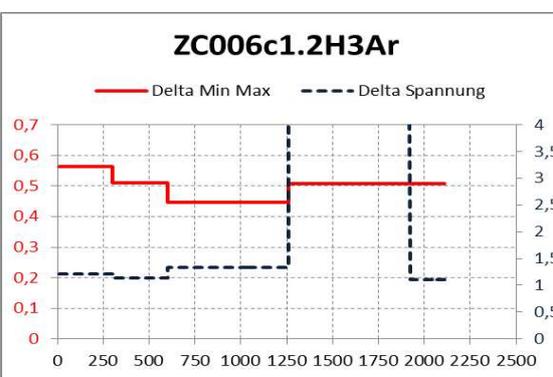
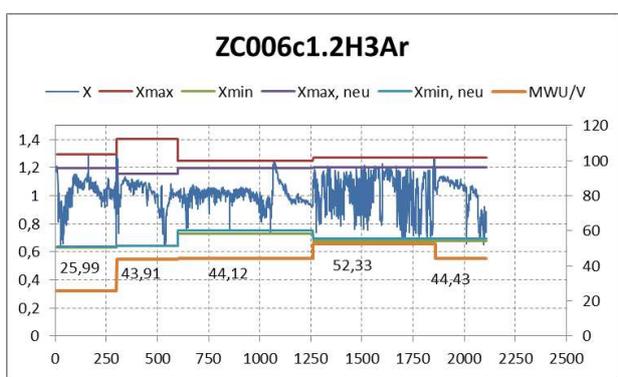
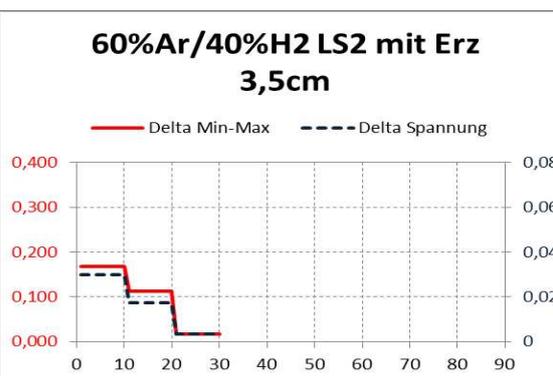
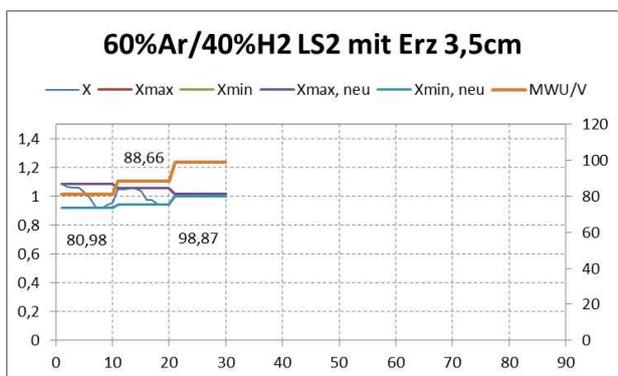
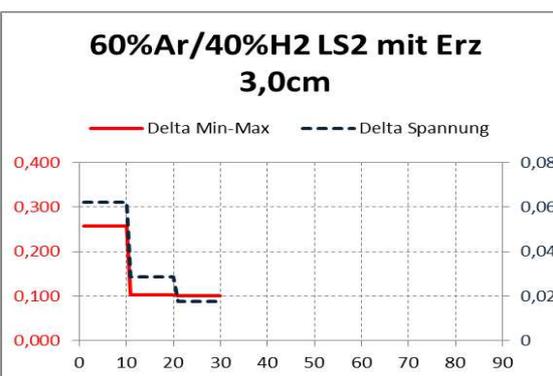
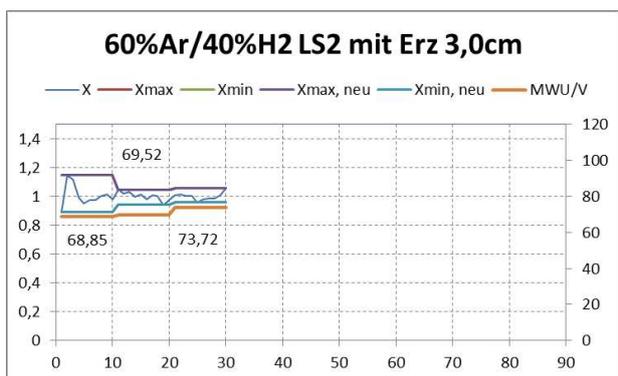
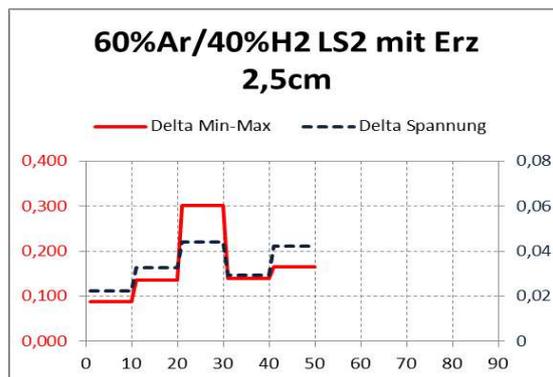
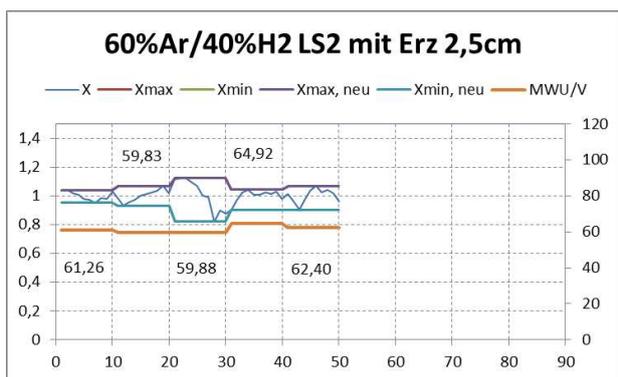
Kontinuierliche Versuche

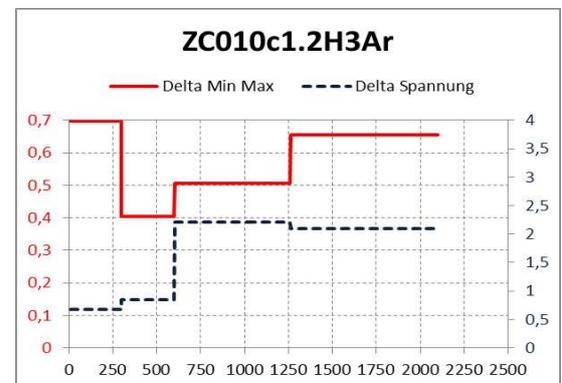
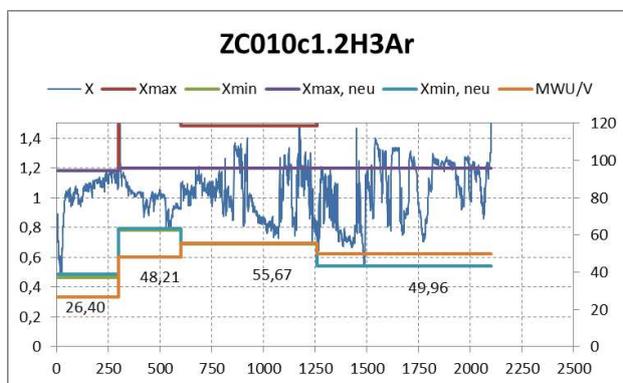
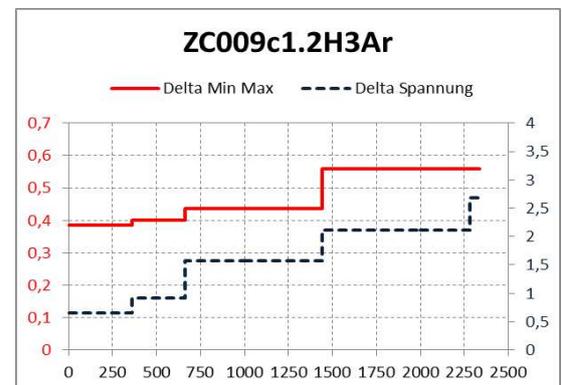
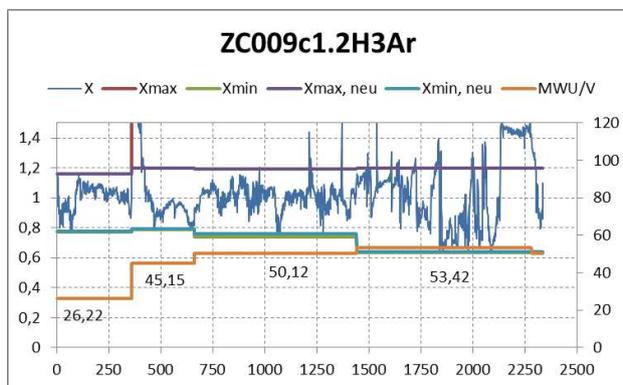
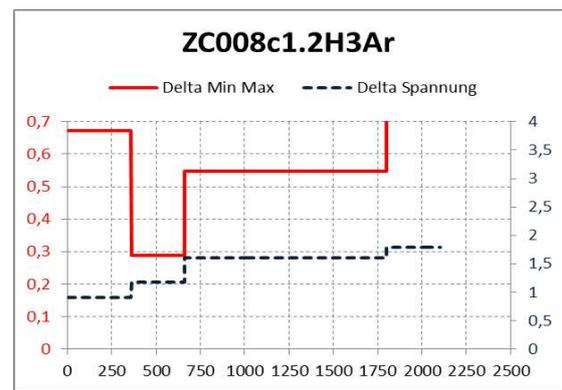
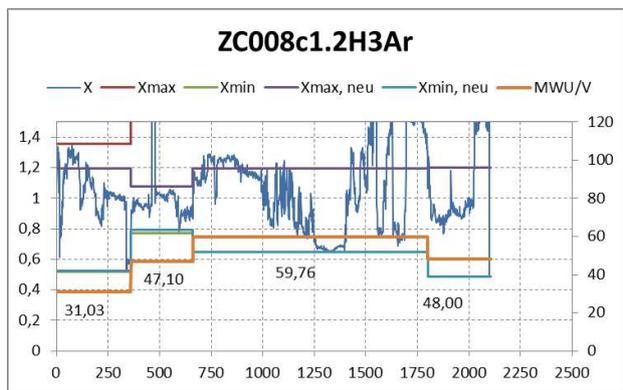
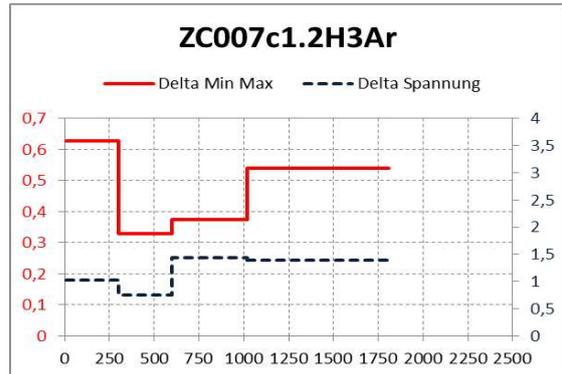
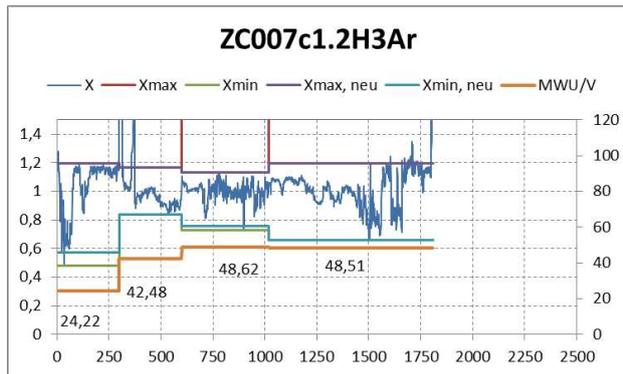
Zeitverläufe

Delta Min-Max/Delta Spannungsdiagramme









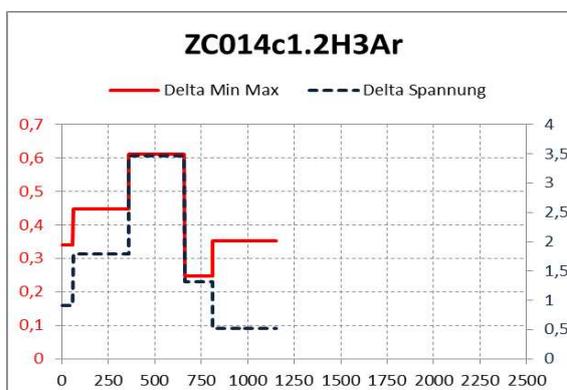
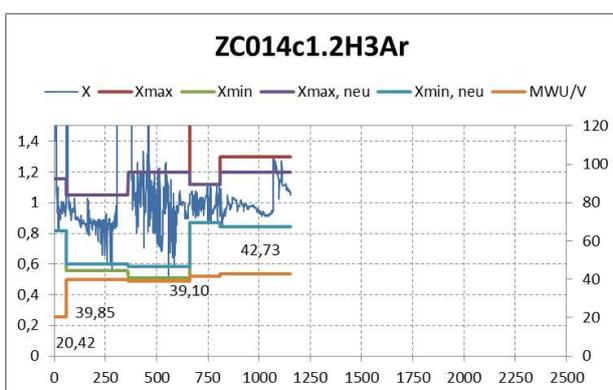
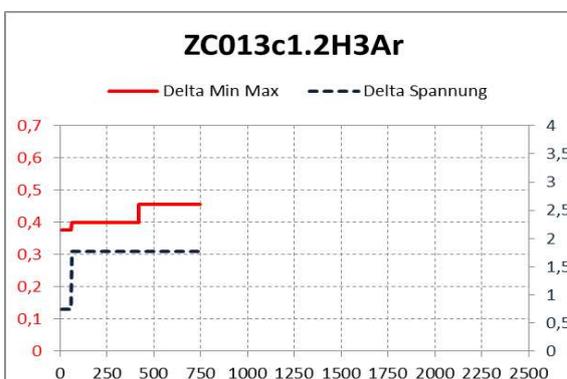
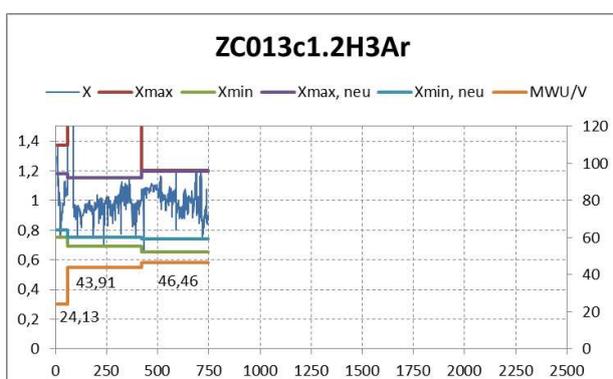
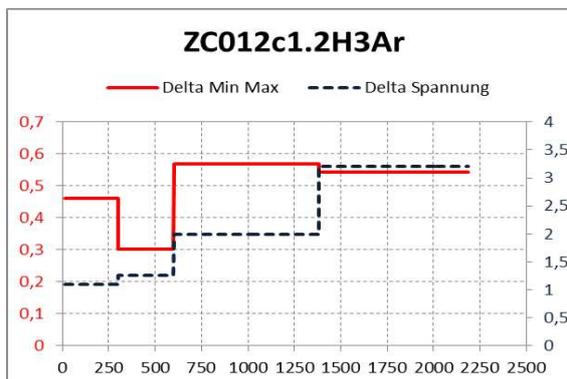
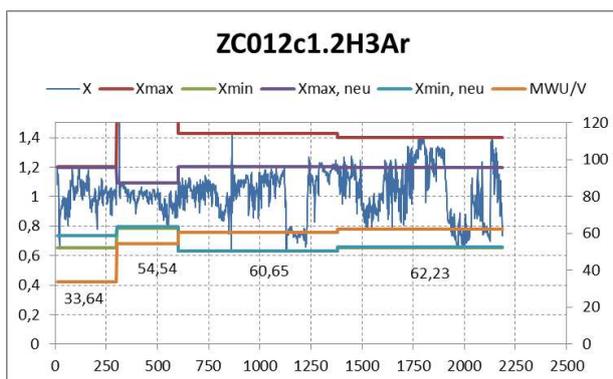
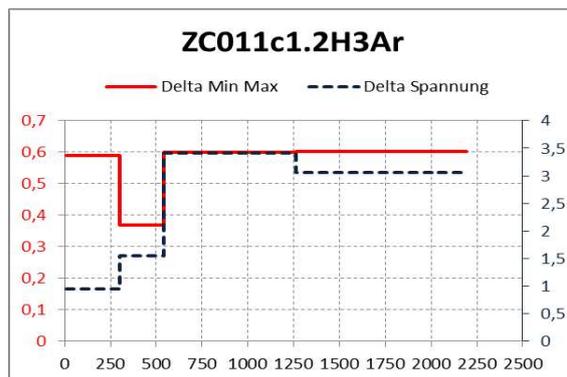
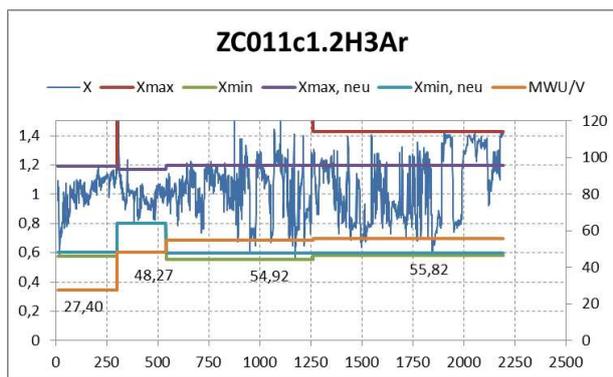
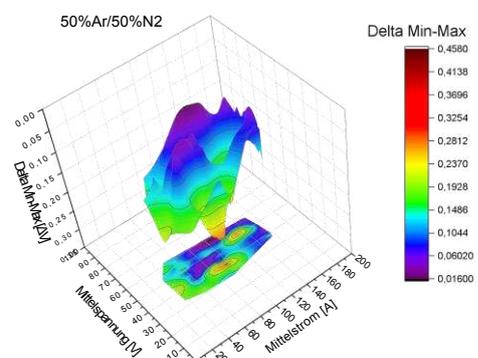
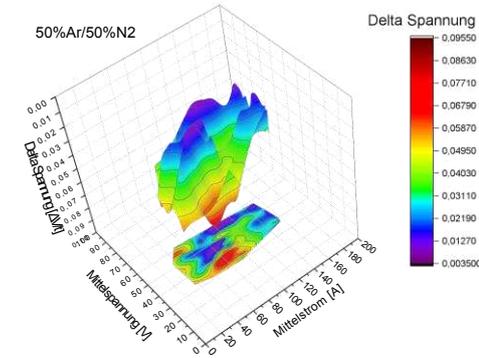
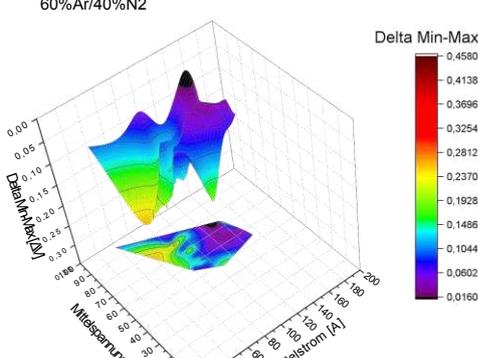
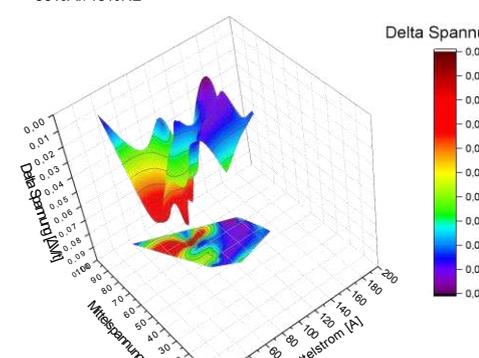
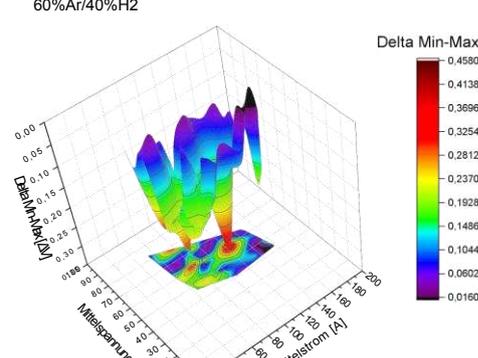
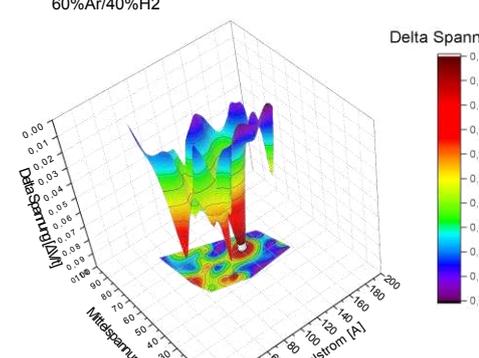
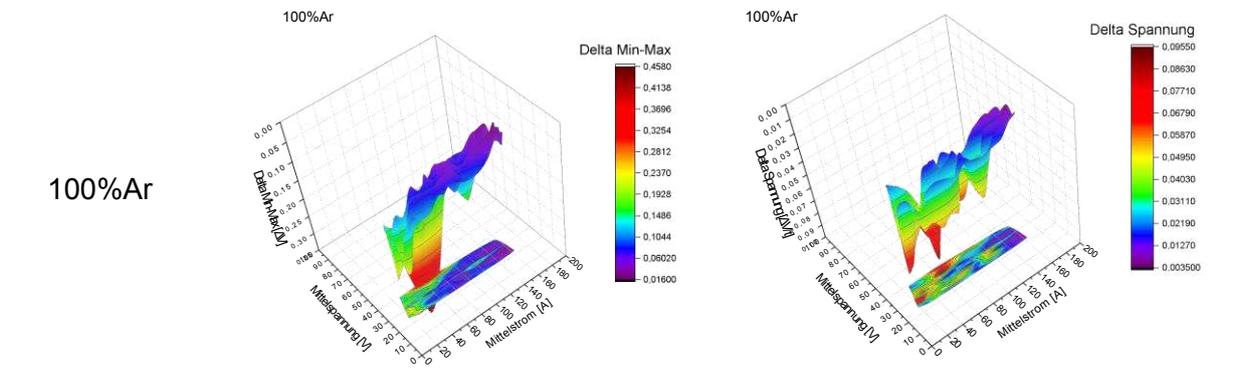
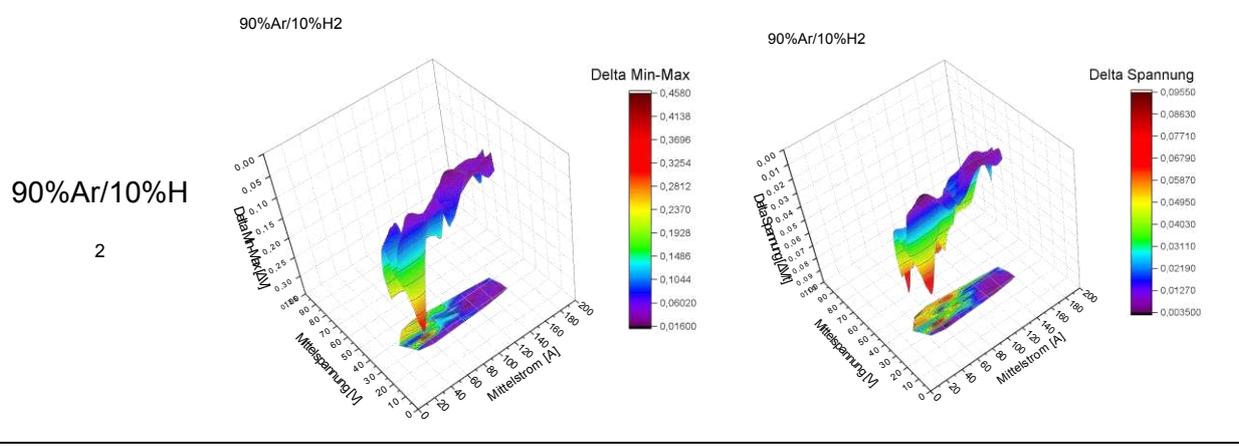
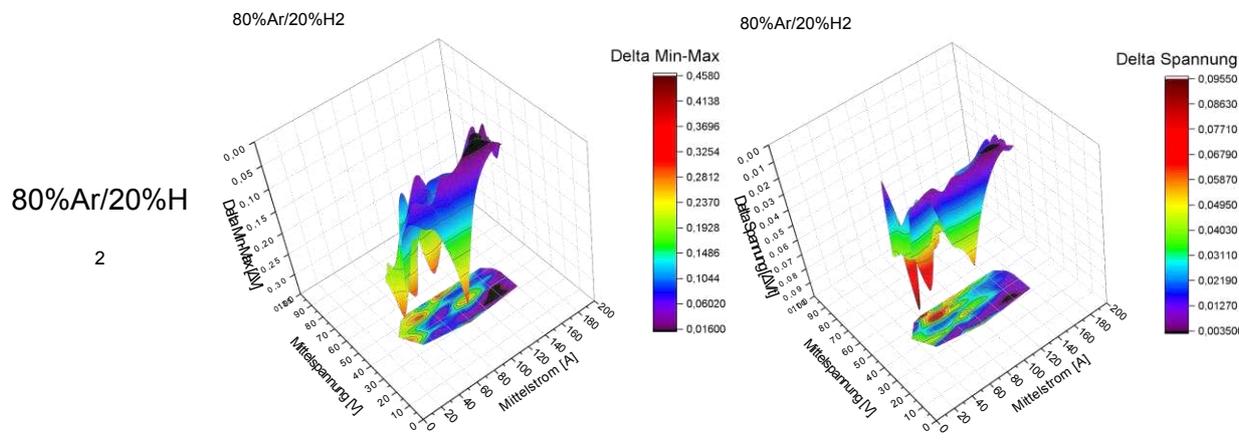
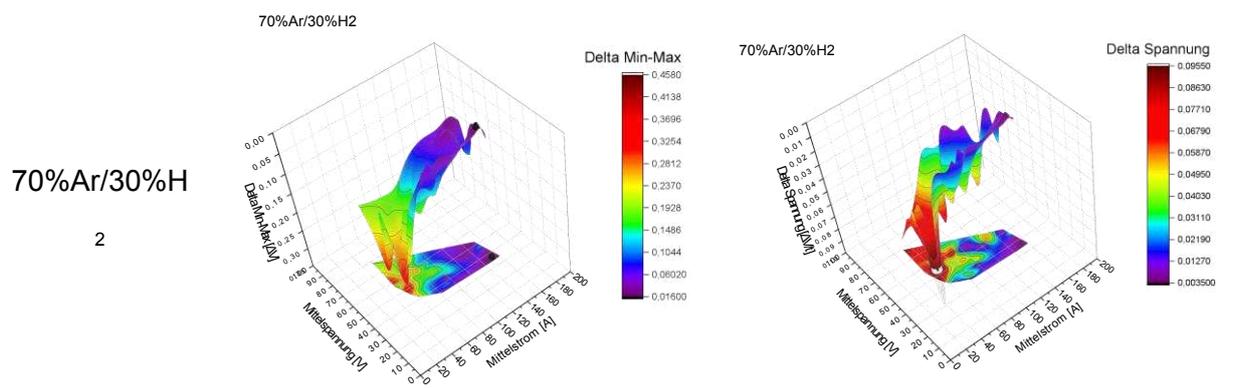
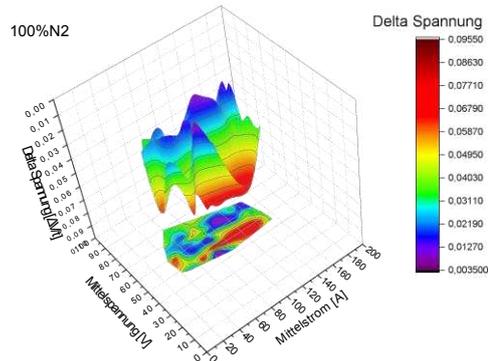
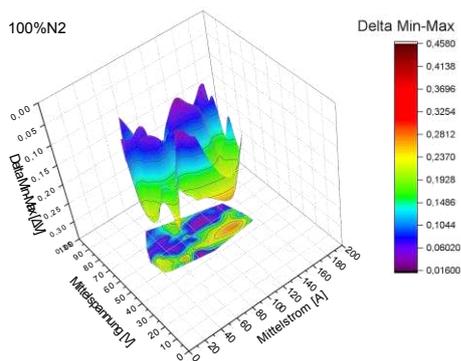


Tabelle 12: Oberflächendiagramme Delta Min-Max und Delta Spannung

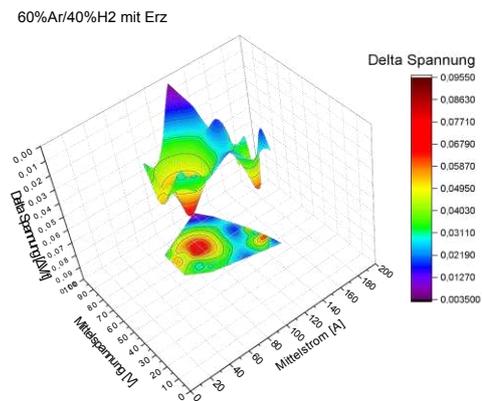
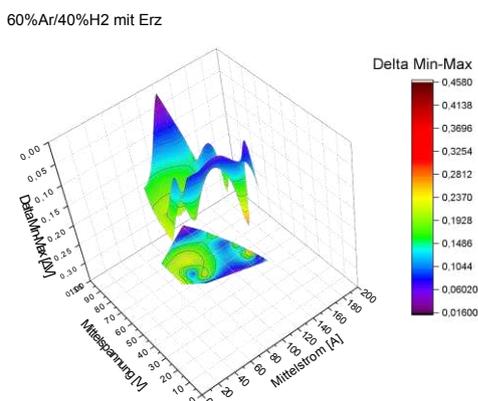
Versuchsbezeichnung	Delta Min-Max	Delta Spannung
50%Ar/50%N 2	<p>50%Ar/50%N2</p> 	<p>50%Ar/50%N2</p> 
60%Ar/40%N 2	<p>60%Ar/40%N2</p> 	<p>60%Ar/40%N2</p> 
60%Ar/40%H 2	<p>60%Ar/40%H2</p> 	<p>60%Ar/40%H2</p> 



100%N₂



60%Ar/40%H₂ mit Erz



Kontinuierliche Versuche

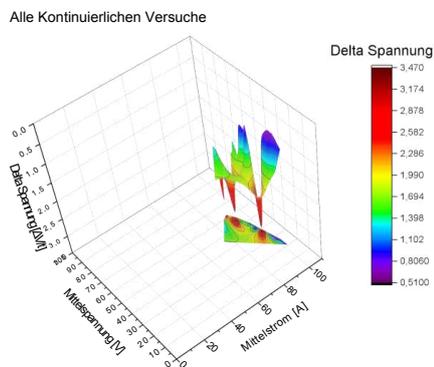
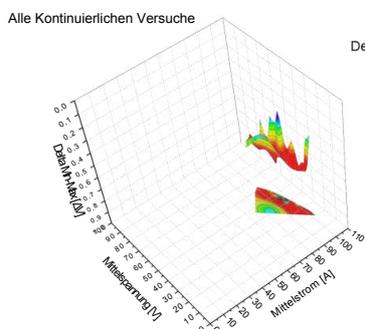


Tabelle 13: Delta Spannung – Verschiedene Gase

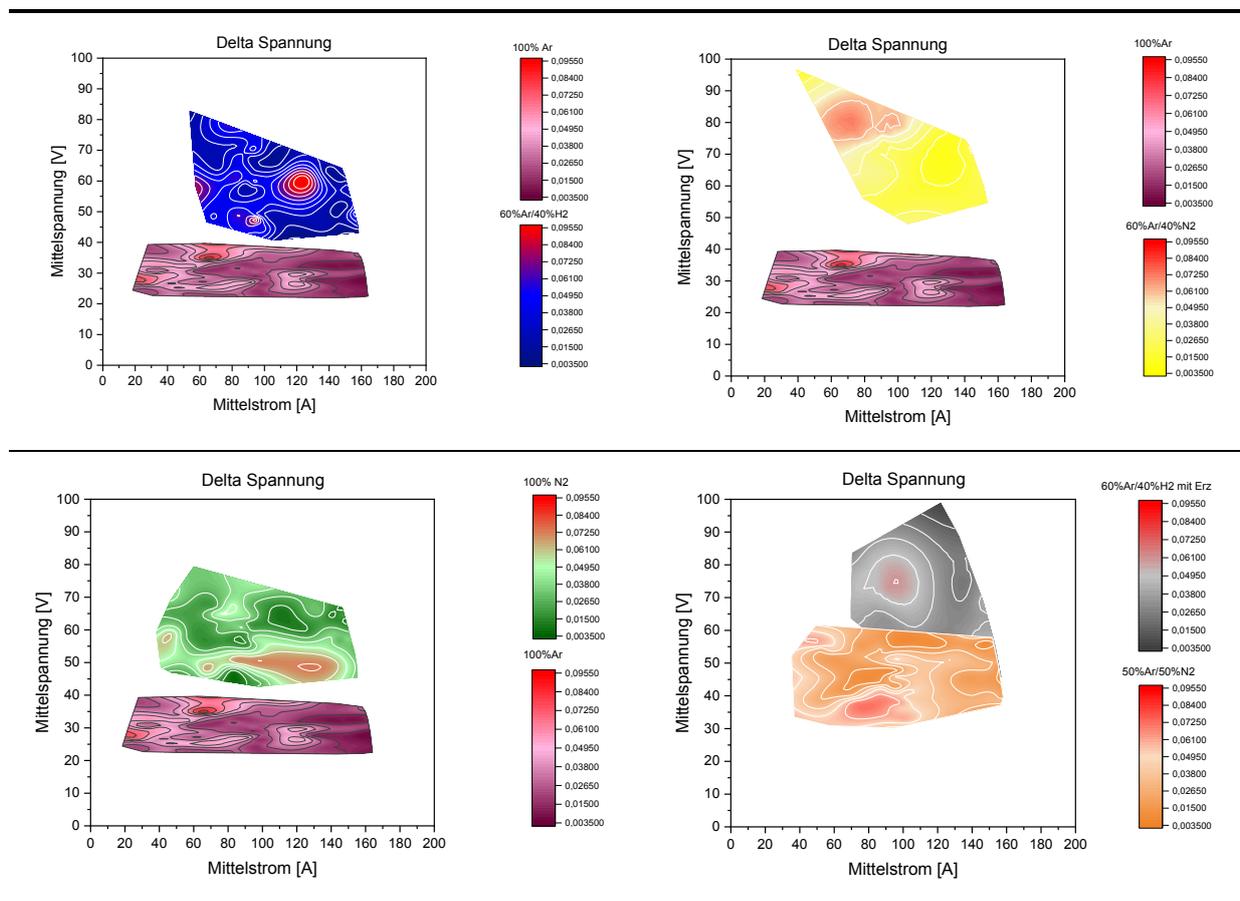
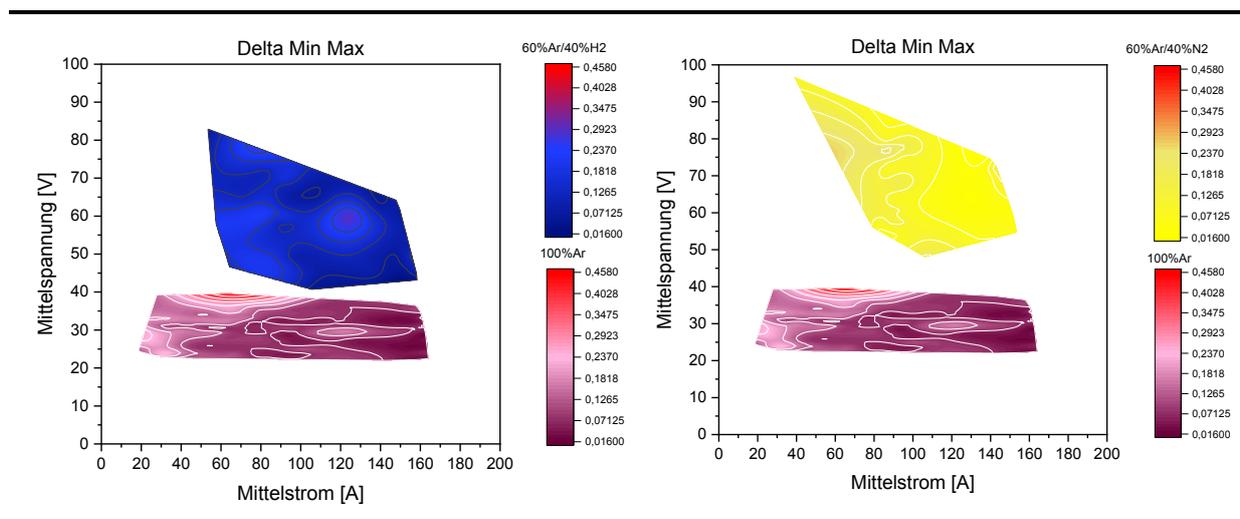


Tabelle 14: Delta Min-Max – Verschiedene Gase



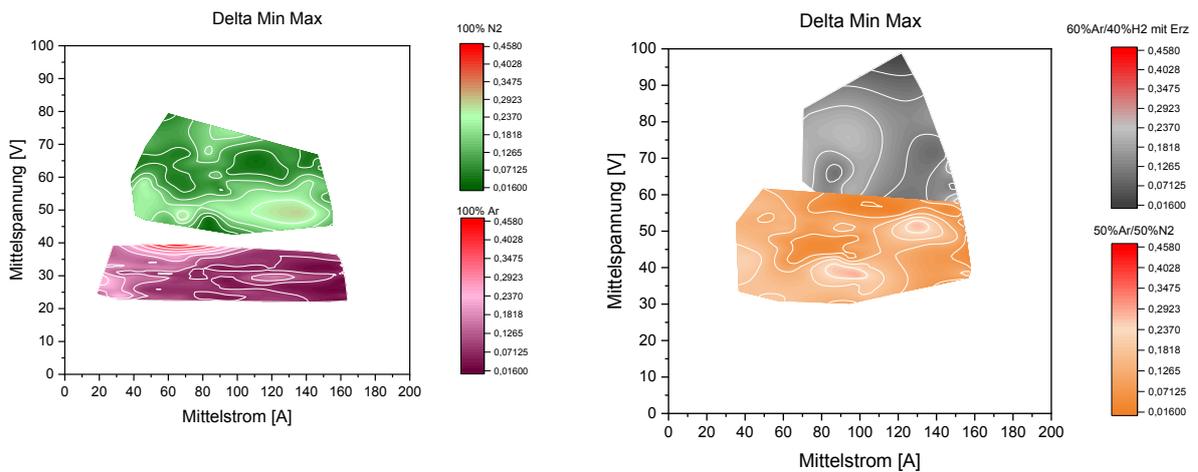


Tabelle 15: Delta Spannung – Gasmischungen

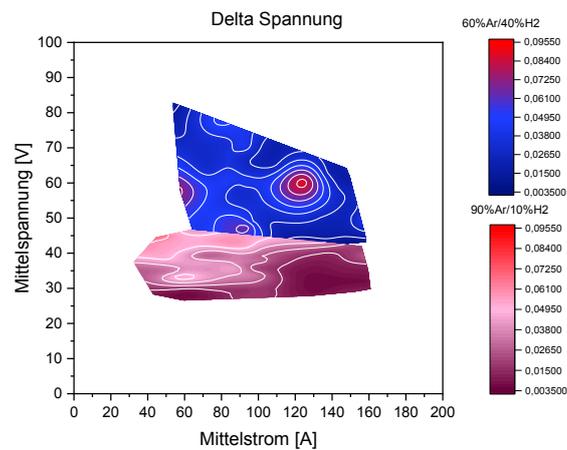
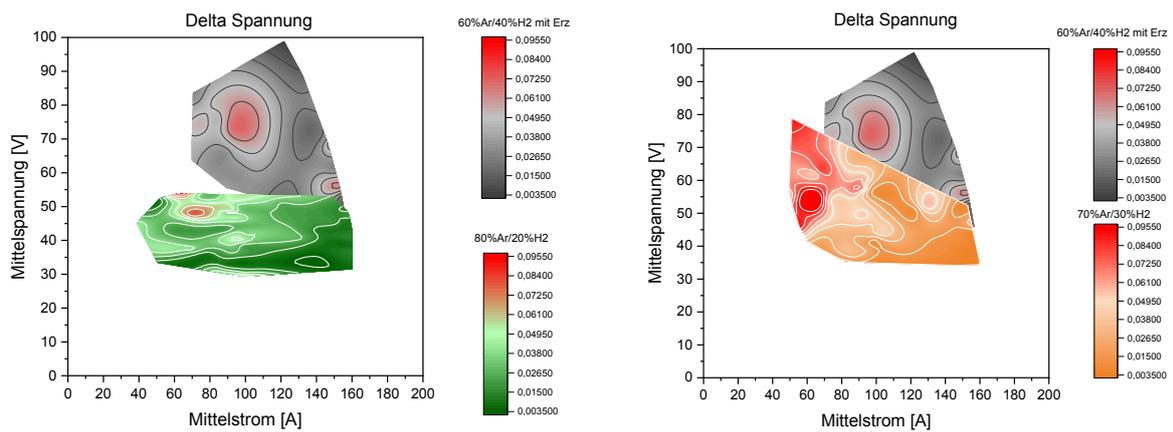


Tabelle 16: Delta Min-Max Gasmischungen

