



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Jan Grießbach

Messaufbau mit Steuer- und Analysesoftware für
die optische Zustandsbeobachtung von
Lithiumbatterien

Jan Griebach

Messaufbau mit Steuer- und Analysesoftware für
die optische Zustandsbeobachtung von
Lithiumbatterien

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter : Prof. Dr.Ing. Jürgen Vollmer

Abgegeben am 25. September 2014

Jan Griebbach

Thema der Bachelorthesis

Messaufbau mit Steuer- und Analysesoftware für die optische Zustandsbeobachtung von Lithiumbatterien

Stichworte

Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator, LiFePO_4 , Messzelle, Kathode, Anode, Effekt, Spektrometer, Kamera

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird das optische Verhalten von Lithium-Eisenphosphat-Elektroden verschiedener Zusammensetzungen mittels Kameras und Spektrometer untersucht. Hierfür wird ein Messplatz samt notwendiger Software zur Steuerung und Messwertfassung entworfen. Ziel ist es, einen geeigneten optischen Effekt zu finden, der für die Ermittlung des Ladezustandes eines Lithium-Eisenphosphat-Akkumulators verwendet werden kann.

Jan Griebbach

Title of the paper

Development of a measurement setup including control and analysis software for monitoring the optical state of lithium batteries

Keywords

Lithium iron phosphate battery, LiFePO_4 , measurement battery cell, cathode, anode, spectrometer, camera

Abstract

Inside this report the optical state of lithium iron phosphate battery electrodes of different compositions is monitored by cameras and spectrometer. Thus a measurement setup including software for controlling and analyzation purposes is going to be developed. The objective is to find an optical effect that is suitable to determine the lithium batteries' state of charge.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	9
1. Einführung	14
1.1. Motivation	14
1.2. Vorarbeiten im Rahmen des Projektes BATSEN	16
1.3. Zielsetzung	17
2. Theorie	20
2.1. Lithiumbatterietechnologie und Zellchemie	20
2.1.1. Materialien der Batteriekomponenten	22
2.1.2. Vergleich der Elektrodenmaterialien	25
2.1.3. Wirkkette	25
2.1.4. Optische Elektrodeneffekte bei Lithium-Eisenphosphat Batterien	27
2.2. Optische Messtechnik	28
2.2.1. Spektrometer	29
2.2.2. Kamera und interne Bildverarbeitung	30
3. Messplatz	35
3.1. Messzelle ECC-Opto-Std	35
3.2. Mechanischer Aufbau	37
3.2.1. Sondenhalter (0 Grad)	39
3.2.2. Sondenhalter (45 Grad)	41
3.3. Elektrischer Aufbau	43
3.3.1. Messschaltung	43
3.3.2. Systematischer Messfehler	45
3.3.3. Relaiskarte	46
4. Software	48
4.1. DMM4020 Reader (v2)	49
4.2. SpectrometerReader	53
4.3. RelaisCardController	57

4.4. FileChecker	60
4.5. CurrentIntegrator	61
4.6. CurrentCorrector	63
4.7. Farbraumanalyse im RGB-Farbmodell	65
4.7.1. Kompensationsverfahren	67
4.7.2. Wahl der Referenzfläche	68
4.8. Tools	69
5. Auswertung und Bewertung der Messreihen	70
5.1. Übersicht über die Zellaufbauten	70
5.2. Messreihe 2	72
5.3. Messreihe 3	73
5.4. Messreihe 4	75
5.5. Messreihe 5	78
5.6. Messreihe 6	80
5.7. Messreihe 7	82
5.8. Messreihe 8	84
5.9. Messreihe 9	88
5.10. Messreihe 10	89
5.11. Messreihe 11	90
6. Spektrometrische Messungen	93
6.1. Testmessungen mit 0 Grad Sondenhalter	94
6.2. Testmessungen 45 Grad Sondenhalter	95
6.3. Exemplarische Spektralmessung	97
7. Fazit	102
7.1. Zusammenfassung	102
7.2. Bewertung des Messplatzkonzeptes	106
7.3. Ausblick und offene Punkte	107
Literaturverzeichnis	110
A. Konstruktionszeichnungen	113
A.1. Abdeckkasten	113
A.2. Kamerahalter	115
A.3. Sondenhalter (0 Grad)	116
B. Quellcodes	117
B.1. DMM4020_reader_v2.c	117
B.2. SpectrometerReader	121
B.2.1. SpectrometerReader.c	121

B.2.2. SpectrometerFunctions.h	124
B.2.3. SpectrometerFunctions.c	125
B.2.4. setupSpectrometerAccess.sh	128
B.2.5. removeSpectrometerAccess.sh	129
B.3. relaisCardController.c	129
B.4. fileChecker.c	132
B.5. CurrentIntegrator.c	134
B.6. CurrentCorrector.c	135
B.7. intensitaetsverlauf_kompensiert.m	136
B.8. Tools	138
B.8.1. showSpectra.m	138
B.8.2. spectrometer2matlab.m	139
B.8.3. restoreDate.sh	139
C. Spektrometer-Messungen	140
C.1. Testmessungen mit 0 Grad Sondenhalter	140
C.2. Testmessungen mit 45 Grad Sondenhalter	145
D. Messreihen	151
D.1. Elektrische Messdaten	153
D.1.1. Messreihe 2	155
D.1.2. Messreihe 3	157
D.1.3. Messreihe 4	159
D.1.4. Messreihe 5	161
D.1.5. Messreihe 6	163
D.1.6. Messreihe 7	165
D.1.7. Messreihe 8	168
D.1.8. Messreihe 9	171
D.1.9. Messreihe 10	174
D.1.10. Messreihe 11	177
D.2. Intensitätsverläufe (ohne Kompensationsrechnung)	180
D.2.1. Messreihe 2	183
D.2.2. Messreihe 3	185
D.2.3. Messreihe 4	187
D.2.4. Messreihe 5	189
D.2.5. Messreihe 6	191
D.2.6. Messreihe 7	193
D.2.7. Messreihe 8	196
D.2.8. Messreihe 9	199
D.2.9. Messreihe 10	202
D.2.10. Messreihe 11	205

D.3. Intensitätsverläufe (mit Kompensationsrechnung)	209
D.3.1. Messreihe 2	209
D.3.2. Messreihe 3	211
D.3.3. Messreihe 4	213
D.3.4. Messreihe 5	215
D.3.5. Messreihe 6	217
D.3.6. Messreihe 7	219
D.3.7. Messreihe 8	222
D.3.8. Messreihe 9	225
D.3.9. Messreihe 10	228
D.3.10. Messreihe 11	231
D.4. Zyklrierpläne	234
D.4.1. Messreihe 5	234
D.4.2. Messreihe 6	234
D.4.3. Messreihe 7	235
D.4.4. Messreihe 8	239
D.4.5. Messreihe 9	241
D.4.6. Messreihe 10	244
D.4.7. Messreihe 11	247
E. Verschiedenes	252
E.1. Schaltungsbeispiel - Sub-Milliampere-Strombegrenzung	252
E.2. Aufgabenbeschreibung	254
E.3. Messplatz-Kurz-Dokumentation	257
E.4. Datenträgerinhalt	260
Glossar	265

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich der Kathodenmaterialien, nach [15]	25
2.2. Vergleich der Anodenmaterialien, nach [15]	26
2.3. Durch JPEG Kompression verursachte Helligkeitsabweichungen	34
3.1. Pinbelegung 9-poliges Nullmodemkabel	43
3.2. Belegung der Serial-Ports	44
3.3. Verwendung der Relaiskartenkanäle	45
3.4. Kommando-/Antwortrahmenaufbau, nach [5]	46
3.5. Kommandos und Antworten der Relaiskarte, nach [5]	47
4.1. DMM4020_reader_v2 - Parameter	50
4.2. DMM4020_reader_v2 - Messmodi	50
4.3. SpectrometerReader - Parameter	53
4.4. RelaisCardController - Parameter	57
4.5. fileChecker - Parameter	60
4.6. CurrentCorrector - Parameter	63
4.7. Variablen des Skripts „intensitaetsverlauf_kompensiert.m“	66
5.1. Elektrodenmaterialien	71
A.1. Bauteile des Abdeckkastens	114
D.1. Elektrodenmaterialien - Zusammensetzung (Absolute Mengen)	151
D.2. Elektrodenmaterialien - Zusammensetzung (Gewichtsprozent)	152
D.3. Lade-/ Entladewiderstände	153
D.4. Ladespannungen	154
D.5. Mess- und Referenzflächen für Zelle 3	180
D.6. Mess- und Referenzflächen für Zelle 1	181
D.7. Mess- und Referenzflächen für Zelle 2	182
E.1. Stückliste Sub-mA Strombegrenzung	252

Abbildungsverzeichnis

1.1. Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2011 [1]	14
1.2. Endenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland 2011 [1]	15
1.3. Arbeitspakete in Form eines Projektstrukturplans	19
2.1. Aufbau einer galvanischen Zelle	21
2.2. Elektromagnetisches Spektrum [26]	28
2.3. Spiegelnde und diffuse Reflexion [12]	29
2.4. Farbanordnung im Bayer-Mosaic-Filter	30
2.5. Spektrum der Kamerabeleuchtung	31
2.6. Modell, welches der Kameraelektronik unterstellt wird	32
2.7. JPEG Testbild	34
3.1. Messzelle ECC-Opto-Std (Fotografie nach [7])	35
3.2. Messzelle ECC-Opto-Std (Schematisches Schnittbild nach [7])	36
3.3. Abdeckkasten	37
3.4. Kamerahalter mit Kamera und Zellenhalter	38
3.5. Schematischer Aufbau der Messsonde für Reflexionsmessungen	39
3.6. Messprinzip - 0 Grad	40
3.7. Sondenhalter - 0 Grad	40
3.8. Messprinzip - 45 Grad	41
3.9. Sondenhalter - 45 Grad	42
3.10. Messschaltung für eine Zelle	44
4.1. DMM4020 Reader (v2) - Programmablauf	52
4.2. SpectrometerReader - Programmablauf	55
4.3. SpectrometerReader - Korrekturalgorithmus für Spektrometerdaten	56
4.4. relaisCardController - Programmablauf	59
4.5. Numerische Integration - Sehnentrapezregel	61
4.6. CurrentIntegrator - Programmablauf	62
4.7. CurrentCorrector - Programmablauf	64
5.1. Messreihe 2, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten	73
5.2. Messreihe 3, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten	74

5.3. Messreihe 4, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten	75
5.4. Messreihe 4 - Verlauf der Zellspannung	76
5.5. Messreihe 4, Zelle 1 - Intensitätsverläufe (rot) und elektrische Ladung	77
5.6. Messreihe 5, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten	78
5.7. Messreihe 5, Zelle 1 - Intensitätsverläufe und elektrische Ladung	79
5.8. Messreihe 6, Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert) und elektrische Ladung	81
5.9. Messreihe 6, Zelle 2 zu verschiedenen Zeitpunkten	82
5.10. Messreihe 7, Zelle 3 - Kathodenoberfläche zu Beginn der Ladephase	83
5.11. Messreihe 8, Zelle 3 - Ausbreitung einer Blase	85
5.12. Messreihe 8, Zelle 3 - Fortschreitende rötliche Verfärbung der Graphitanode .	86
5.13. Messreihe 8, Zelle 3 - Relative Intensitätsverläufe und elektrische Ladung . .	87
5.14. Blasen in den Zellen der Messreihe 10	89
5.15. Messreihe 11, Zelle 3 - Elektrodenoberfläche	90
5.16. Messreihe 11, Zelle 2 - Elektrodenoberfläche	91
5.17. Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert) und elektrische La- dung	92
6.1. Farbproben für spektrometrische Test-Messungen	93
6.2. Testmessung - 0 Grad - hellrot	94
6.3. Testmessung - 0 Grad - hellgrün	95
6.4. Testmessung - 45 Grad - rot	96
6.5. Testmessung - 45 Grad - grün	96
6.6. Langzeitspektralmessung - Lampe (grüne Farbprobe)	98
6.7. Langzeitspektralmessung - Messreihe 11 Zelle 2 - Ladungsumsatz	99
6.8. Langzeitspektralmessung - Messreihe 11 Zelle 2 (45 Grad Sondenhalter) . .	100
6.9. Langzeitspektralmessung - Messreihe 11 Zelle 2 (item-Sondenhalter)	101
7.1. Nachträgliche Messung - Ladung und Intensitätsverläufe (kompensiert)	104
7.2. Nachträgliche Messung - Ladung und relative Intensitätsverläufe (kompensiert)	105
A.1. Abdeckkasten schräg von vorn	113
A.2. Abdeckkasten Längsschnitt	114
A.3. Grundplatte des Kamerahalters	115
A.4. Sondenhalter 0 Grad	116
C.1. Testmessung - 0 Grad - blau	140
C.2. Testmessung - 0 Grad - dunkelgrün	141
C.3. Testmessung - 0 Grad - grau	141
C.4. Testmessung - 0 Grad - grün	142
C.5. Testmessung - 0 Grad - hellblau	142
C.6. Testmessung - 0 Grad - lila	143

C.7. Testmessung - 0 Grad - orange	143
C.8. Testmessung - 0 Grad - pink	144
C.9. Testmessung - 0 Grad - rot	144
C.10. Testmessung - 0 Grad - schwarz	145
C.11. Testmessung - 45 Grad - blau	145
C.12. Testmessung - 45 Grad - dunkelgrün	146
C.13. Testmessung - 45 Grad - grau	146
C.14. Testmessung - 45 Grad - hellblau	147
C.15. Testmessung - 45 Grad - hellgrün	147
C.16. Testmessung - 45 Grad - hellrot	148
C.17. Testmessung - 45 Grad - lila	148
C.18. Testmessung - 45 Grad - orange	149
C.19. Testmessung - 45 Grad - pink	149
C.20. Testmessung - 45 Grad - schwarz	150
D.1. Messreihe 2 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	155
D.2. Messreihe 2 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	156
D.3. Messreihe 3 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	157
D.4. Messreihe 3 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	158
D.5. Messreihe 4 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	159
D.6. Messreihe 4 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	160
D.7. Messreihe 5 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	161
D.8. Messreihe 5 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	162
D.9. Messreihe 6 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	163
D.10. Messreihe 6 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	164
D.11. Messreihe 7 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	165
D.12. Messreihe 7 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	166
D.13. Messreihe 7 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte	167
D.14. Messreihe 8 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	168
D.15. Messreihe 8 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	169
D.16. Messreihe 8 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte	170
D.17. Messreihe 9 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	171
D.18. Messreihe 9 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	172
D.19. Messreihe 9 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte	173
D.20. Messreihe 10 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	174
D.21. Messreihe 10 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	175
D.22. Messreihe 10 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte	176
D.23. Messreihe 11 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte	177
D.24. Messreihe 11 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte	178
D.25. Messreihe 11 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte	179

D.26.Messreihe 2 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	183
D.27.Messreihe 2 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	184
D.28.Messreihe 3 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	185
D.29.Messreihe 3 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	186
D.30.Messreihe 4 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	187
D.31.Messreihe 4 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	188
D.32.Messreihe 5 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	189
D.33.Messreihe 5 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	190
D.34.Messreihe 6 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	191
D.35.Messreihe 6 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	192
D.36.Messreihe 7 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	193
D.37.Messreihe 7 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	194
D.38.Messreihe 7 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe	195
D.39.Messreihe 8 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	196
D.40.Messreihe 8 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	197
D.41.Messreihe 8 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe	198
D.42.Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	199
D.43.Messreihe 9 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	200
D.44.Messreihe 9 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe	201
D.45.Messreihe 10 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	202
D.46.Messreihe 10 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	203
D.47.Messreihe 10 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe	204
D.48.Messreihe 11 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe	205
D.49.Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe	206
D.50.Messreihe 11 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe	207
D.51.Messreihe 2 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	209
D.52.Messreihe 2 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	210
D.53.Messreihe 3 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	211
D.54.Messreihe 3 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	212
D.55.Messreihe 4 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	213
D.56.Messreihe 4 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	214
D.57.Messreihe 5 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	215
D.58.Messreihe 5 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	216
D.59.Messreihe 6 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	217
D.60.Messreihe 6 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	218
D.61.Messreihe 7 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	219
D.62.Messreihe 7 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	220
D.63.Messreihe 7 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	221
D.64.Messreihe 8 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	222
D.65.Messreihe 8 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	223

D.66.Messreihe 8 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	224
D.67.Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	225
D.68.Messreihe 9 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	226
D.69.Messreihe 9 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	227
D.70.Messreihe 10 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	228
D.71.Messreihe 10 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	229
D.72.Messreihe 10 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	230
D.73.Messreihe 11 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	231
D.74.Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	232
D.75.Messreihe 11 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)	233
E.1. Schaltplan einstellbare Sub-mA Strombegrenzung	253

1. Einführung

1.1. Motivation

Viele Industrieländer vollziehen den Wechsel von der konventionellen Stromerzeugung mittels Wärme-Kraft-Maschinen hin zu regenerativen Energiequellen. So wurde bereits 2009 20 Prozent des Strombedarfs des weltweit größten Nutzers und Herstellers von Windkraftanlagen, Dänemark, durch Windenergie abgedeckt [14].

Auch Deutschland ist auf dem Weg der Energiewende und baut die regenerativen Energiequellen, wie Windenergie und Photovoltaik, aus, während Atomkraftwerke zunehmend vom Netz genommen werden. Schaut man sich die Aufteilung des Endenergieverbrauchs an (vgl. Abbildung 1.1), so fällt auf, dass der Verkehrssektor mit 28,9% einen erheblichen Anteil ausmacht.

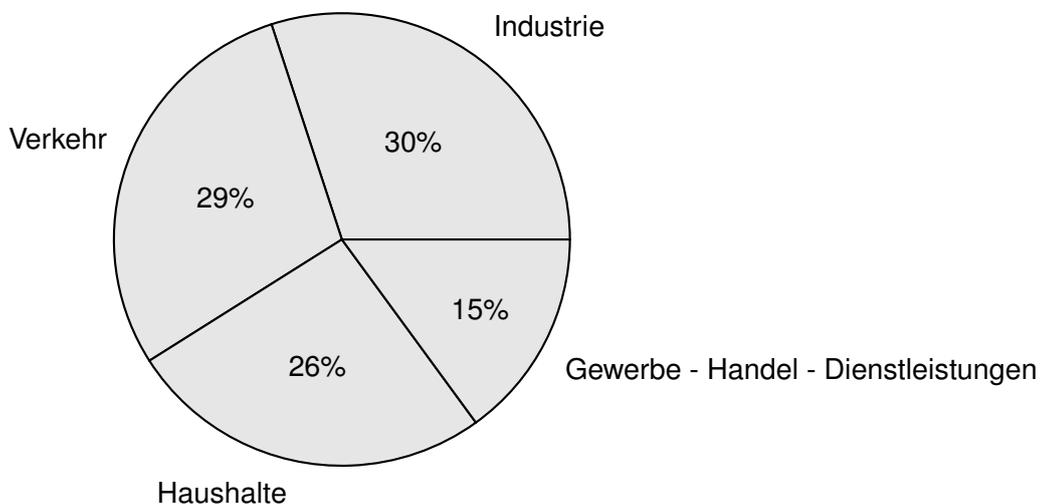


Abbildung 1.1.: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2011 [1]

Abbildung 1.2 zeigt, dass der Großteil dieser Energie von fossilen Energieträgern stammt, die durch die Verwendung regenerativer Energiequellen eingespart werden können. Ein besonderes Augenmerk legt die Bundesregierung deshalb auf die Elektromobilität. Diese soll im Rahmen des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“ gefördert werden [6].

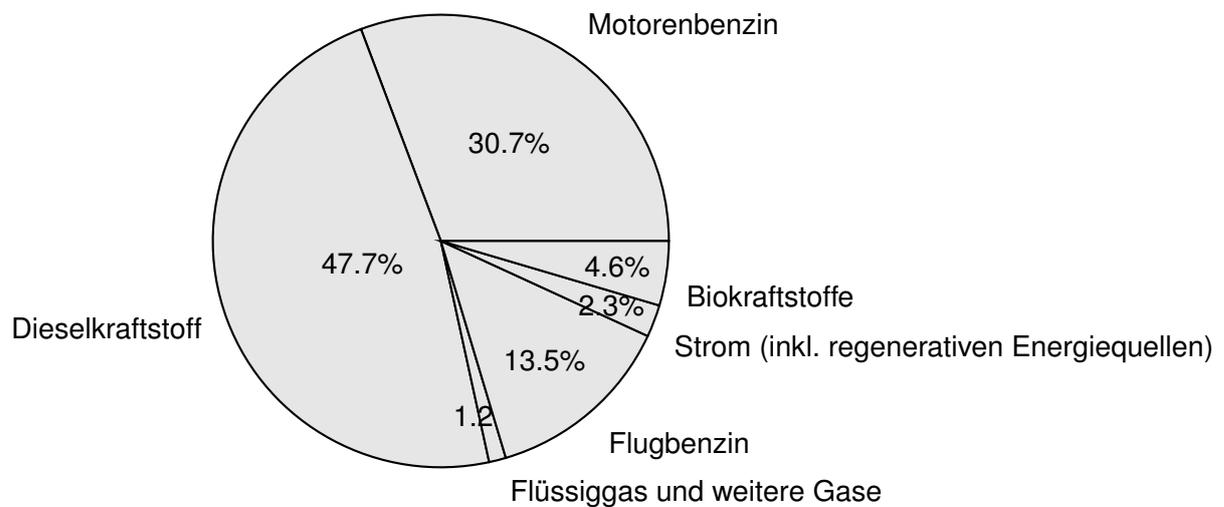


Abbildung 1.2.: Endenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland 2011 [1]

Gerade in diesem Bereich sind leistungsfähige Batterien von hoher Bedeutung und es werden eine ganze Reihe an Anforderungen an sie gestellt. Sie müssen dauerhaft hohe Entladeströme liefern können; die Ladezeit sollte möglichst kurz sein. Die Batterie soll eine möglichst hohe Energiedichte aufweisen, denn ihr Gewicht macht ohnehin einen Großteil des Gesamtgewichts eines Elektrofahrzeugs aus. Letztlich muss die Batterie auch sicher sein, damit die Fahrzeuginsassen nicht zusätzlich gefährdet werden. Eine kostengünstige Herstellung durch die Verwendung leicht verfügbarer Rohstoffe, eine lange Lebensdauer und eine hohe Zyklenfestigkeit sind genauso erwünscht, wie die Einsetzbarkeit in einem großen Temperaturbereich und die Möglichkeit des Recyclings.

Eine solche „Super-Batterie“, die alle zuvor genannten Eigenschaften in sich vereint, gibt es gegenwärtig nicht, jedoch weisen Lithium-Batterien einen Großteil der Eigenschaften auf. Sie bieten hohe Entladeströme bei im Verhältnis zu anderen Batterietechnologien relativ hoher Energiedichte und sind begrenzt schnell-ladefähig. Einzelne Variationen dieser Batterietechnologie sind kostengünstig in der Herstellung und/oder bieten eine höhere Eigensicherheit.

Lithium-Batterien haben aber einen entscheidenden Nachteil: Eine Aussage über ihren Ladezustand (SOC)¹ oder ihren Alterungszustand (SOH)² allein basierend auf ihren elektrischen Parametern, wie z.B. Zellspannung, Lade-/Entladestrom, ist nicht zuverlässig möglich. Kenntnis über den SOC und SOH sind in einem Elektrofahrzeug aber unbedingt notwendig, um Aussagen zur Reichweite zu treffen und eine effiziente Streckenplanung zu ermöglichen.

¹SOC, State of charge, engl. für Ladezustand

²SOH, State of health, engl. für Alterungszustand

Um diesen Nachteil aufwiegen zu können, gibt es die Idee, sich die optische Veränderung der Elektrodenmaterialien in der Batterie zu nutze zu machen. Um eine Abschätzung über die Verwendbarkeit dieser Effekte in Bezug auf SOC und SOH treffen zu können, wird in dieser Arbeit ein Messaufbau entwickelt, der die Beobachtung der Elektroden im Batteriebetrieb ermöglicht.

1.2. Vorarbeiten im Rahmen des Projektes BATSEN

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhabens BATSEN sind bereits verschiedene drahtlose Zellsensoren zur elektrischen Überwachung einzelner Zellen einer Batterie entstanden [19].

Es wurde erfolgreich ein Zusatzmodul für einen der Sensortypen entwickelt, welches mit einem optischen Messverfahren die Dichte des Elektrolyts eines Bleiakкумуляtors vermisst und so einen Rückschluss auf den SOC des Akkumulators zulässt [18].

Auch wurden bereits die Elektroden von LiFePO_4 ³ Batterien optisch betrachtet. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Untersuchung unterschiedlicher Zusammensetzungen des Elektrodenmaterials sowie dem qualitativen Nachweis, dass sich optische Änderungen messtechnisch erfassen lassen. Insbesondere wurden Elektroden mit reduziertem Kohlenstoffanteil hergestellt und untersucht. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass das Reflexionsvermögen der Elektrodenoberfläche durch die Beimengung von Kohlenstoff sinkt und somit eine optische Auswertung der erwarteten Effekte erschwert. Der verminderten Leitfähigkeit, die mit der Verringerung des Kohlenstoffanteils einher geht, wurde durch die Beimengung transparenter Leitmittel wie z.B. Indium-Zinnoxid (ITO)⁴ entgegengewirkt [21]. Diese Untersuchungen sollen in dieser Arbeit fortgeführt werden.

³ LiFePO_4 , Chemische Summenformel für Lithium-Eisenphosphat

⁴ITO, Indium tin oxide, engl. für Indium-Zinnoxid

1.3. Zielsetzung

Im Fokus dieser Arbeit steht die qualitative, wie auch quantitative Analyse optischer Elektrodeneffekte von LiFePO_4 Batterien. Die Beobachtung soll kontinuierlich während des Betriebs der Messzelle erfolgen. Hierbei stellen sich folgende Fragen:

1. Welche Elektrodeneffekte sind bekannt?
2. Lassen sich diese mit dem hier entwickelten Messaufbau beobachten?
3. Gibt es eventuell unbekannte Effekte?
4. Sind die Effekte geeignet, um eine Aussage über SOC oder SOH zu treffen?

Die erste Frage wird unter Zuhilfenahme einer Literaturrecherche in Kapitel 2 beantwortet. Die Antworten auf die übrigen Fragen ergeben sich im Laufe dieser Arbeit und werden zusammenfassend in Kapitel 7.1 dargelegt. Für die Beobachtung stehen Mikroskopkameras „DigiMicro Mobile“ der Firma dnt, sowie ein Spektrometer „LR1-T“ von ASEQ Instruments zur Verfügung. Eine breitbandige Lichtquelle für spektrometrische Untersuchungen steht in Form der „SL1“ des Herstellers StellarNet Inc. bereit. Die Eigenschaften der Kameras werden in Kapitel 2.2.2, die des Spektrometers in Kapitel 2.2.1 betrachtet.

Die Erfassung der elektrischen Werte der Zelle, im Allgemeinen sind dies Zellspannung, sowie Lade-/Entladestrom, soll mit den Multimetern „45“ der Firma Fluke bzw. „DMM4020“ der Firma Tektronix erfolgen. Für Steuerungsaufgaben steht eine Relaiskarte mit 8 Kanälen der Firma Conrad zur Verfügung. Für den Aufbau der Messzellen selbst, wird das Modell „ECC-Opto-Std“ von EI-Cell verwendet.

Gegeben durch die zur Verfügung stehenden Messgeräte kommen die nachfolgend gelisteten konstruktionstechnischen Problemstellungen auf:

1. Wie können Kamera und Messzelle aufeinander ausgerichtet werden, sodass sich eine fein einstellbare aber dennoch stabile Konstruktion ergibt, die es ermöglicht, auch über längere Zeit, beeinflusst von leichten Erschütterungen, wackelfreie Aufnahmen zu machen?
2. Wie lässt sich eine gleichmäßige Beleuchtung der Zellen während der Aufnahme sicherstellen?
3. Wie kann die Reflexionsmessfaser des Spektrometers auf das Sichtfenster der Messzelle ausgerichtet werden, sodass möglichst viel Licht von der Elektrodenoberfläche reflektiert wird?
4. Wie kann der Zyklbetrieb automatisiert werden?

Die Lösung für die Punkte eins und zwei wird in Kapitel 3.2 erklärt; der wesentlich umfangreicheren Lösung zu Punkt drei sind die Unterkapitel 3.2.1 und 3.2.2 gewidmet. Kapitel 3.3.3 beantwortet die vierte Frage.

Letztlich bleiben noch drei Fragestellungen zur softwaregesteuerten Messwerterfassung:

1. Wie lassen sich möglichst äquidistant Messwerte der Multimeter erfassen?
2. Wie lassen sich mit einstellbarem Intervall fortlaufend Spektren aufzeichnen?
3. Wie kann ein in einer Datei abgelegter Zyklrierplan zur automatisierten Steuerung der Relaiskarte verwendet werden?

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Softwarekomponenten zur Lösung oben genannter Fragestellungen werden in Kapitel 4 und seinen Unterkapiteln eingehend behandelt.

Abschließend werden einzelne Arbeitspakete geschnürt, die zur Lösung aller genannten Problem- bzw. Fragestellungen abgearbeitet werden müssen. Sie werden in die nachfolgenden vier Kategorien aufgeteilt:

- Messplatz (Aufgaben und Konstruktionen die den Messplatz betreffen)
- Software (Einzelne Aufgaben, die die Messwerterfassung betreffen)
- Messungen (Aufgaben rund um die Auswertung und Planung der Messreihen)
- Recherche (Literatur- und Internetrecherche zu den theoretischen Grundlagen)

Abbildung 1.3 zeigt die Arbeitspakete in Form eines Projektstrukturplans (PSP)⁵. Die grau hervorgehobenen Arbeitspakete haben sich im Verlauf der Ausarbeitung ergeben und waren nicht von Anfang an geplant.

⁵PSP, Projektstrukturplan

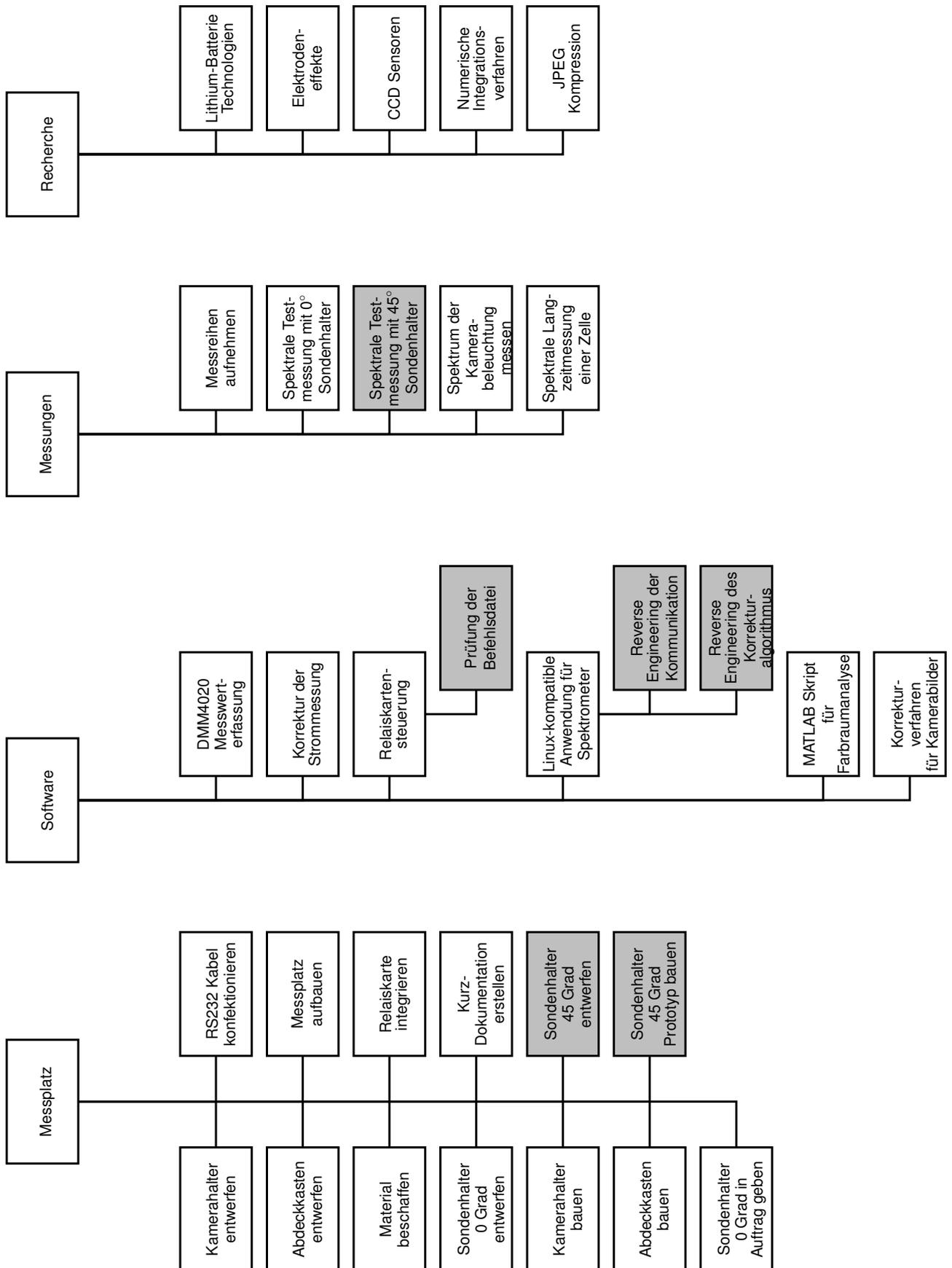


Abbildung 1.3.: Arbeitspakete in Form eines Projektstrukturplans

2. Theorie

In diesem Kapitel wird ein tiefer gehendes Verständnis für grundlegende Inhalte der Arbeit geschaffen. So werden einige Variationen von Lithium-Ionen-Batterien mit ihren jeweiligen Eigenschaften sowie die zu erwartenden Effekte bei LiFePO_4 -Batterien vorgestellt. Weiter wird auf die Eigenheiten und die Funktionsweise des Spektrometers und der verwendeten Mikroskopkameras eingegangen.

2.1. Lithiumbatterietechnologie und Zellchemie

Zunächst soll erst einmal der Begriff „Batterie“ erklärt werden. Er bezeichnet im Allgemeinen eine oder einen Zusammenschluss mehrerer galvanischer Zellen. Dabei wird zwischen Primärbatterien und Sekundärbatterien unterschieden. Primärbatterien bestehen aus galvanischen Zellen, deren chemische Reaktion unter Normalbedingungen nicht reversibel ist. Dies hat zur Folge, dass sie nur entladen werden können. Bei Sekundärbatterien ist die chemische Reaktion unter Normalbedingungen umkehrbar, wenn aufgrund einer von außen angelegten Spannung ein Strom durch sie fließt; sie können wieder aufgeladen werden. Sekundärbatterien werden auch mit dem Begriff „Akkumulator“¹ oder kurz „Akku“ bezeichnet. Wird in dieser Arbeit der Begriff „Batterie“ verwendet, so ist stets eine Sekundärbatterie, bestehend aus einer galvanischen Zelle, gemeint.

Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau einer galvanischen Zelle. Sie besteht aus mit Elektrolyt gefüllten Kammern, die durch einen für Ionen durchlässigen Separator voneinander getrennt sind. In der einen Kammer befindet sich die positive Elektrode, welche den Pluspol der Zelle darstellt. Die andere Kammer enthält die negative Elektrode; sie ist der Minuspol der Zelle. Die Elektroden werden auch mit den Begriffen „Anode“ und „Kathode“ bezeichnet. Die Zuordnung ist dabei von der Richtung der chemischen Reaktion abhängig. Allgemein gilt:

- Die **Anode** gibt Elektronen ab, d.h. sie wird oxidiert.
- Die **Kathode** nimmt Elektronen auf, d.h. sie wird reduziert.

¹Akkumulator, lat. für Anhäufener, von lat. *accumulare*, anhäufen

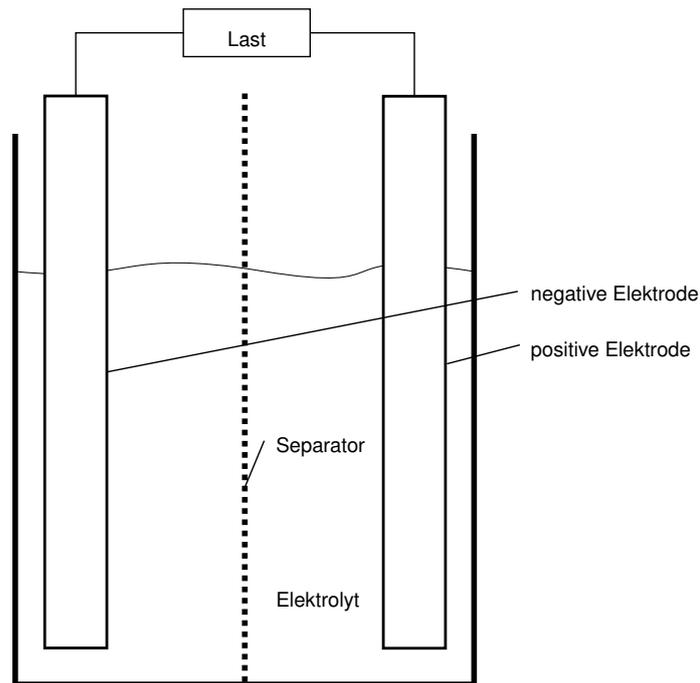


Abbildung 2.1.: Aufbau einer galvanischen Zelle

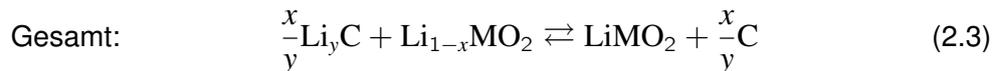
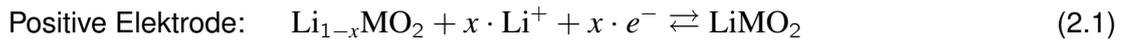
Während der Entladung gibt die negative Elektrode Elektronen ab; sie stellt die Anode dar. Die positive Elektrode nimmt die Elektronen, nachdem sie die angeschlossene Last durchflossen haben, auf und ist somit die Kathode. Bei einer Ladung der Zelle ist die Flussrichtung der Elektronen andersherum. Folglich stellt während der Ladung die positive Elektrode die Anode und die negative Elektrode die Kathode dar. Der Ladungsaustausch im Inneren der Zelle erfolgt durch einen Transport der Ionen durch den ionenleitenden Elektrolyten [17]. In dieser Arbeit werden die Begriffe „Anode“ und „Kathode“, sofern nicht anders angegeben, stets aus Sicht der Entladung verwendet.

Im Falle der Lithium-Ionen-Batterien kommt zum Prinzip der Oxidation und Reduktion noch jenes der Interkalation und Deinterkalation hinzu. Interkalation bezeichnet die Einlagerung von Ionen in ein Wirtsmaterial. Je nachdem, welches Wirtsmaterial verwendet wird und welche Ionen aufgenommen werden, kann die Einlagerung mit einer Volumenänderung einher gehen. Deinterkalation bezeichnet den umgekehrten Vorgang.

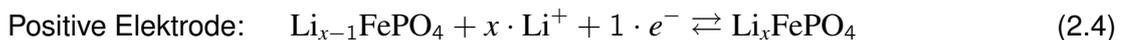
Für Lithium-Ionen-Batterien wird in der Regel eine Anode aus Graphit (neuerdings werden auch Siliziumanoden erprobt) und eine Kathode aus Lithium-Metalloxid oder Lithium-Metallphosphat verwendet. Zur Verbesserung der Leitfähigkeit werden die Elektrodenmaterialien mit einem Leitmittel z.B. Graphit versetzt. Um die Verbindung mit dem elektrischen Anschluss der Batterie herstellen zu können, werden die Elektrodenmaterialien mit einem

Bindemittel auf einen Stromsammler geklebt. Für die Stromsammler wird im Falle der Anode eine Kupferfolie, im Falle der Kathode eine Aluminiumfolie verwendet. Als Bindemittel kommt oft PVDF² zum Einsatz [17].

In der nachfolgenden Betrachtung der der Reaktionsgleichung soll C für die Graphitstruktur der Anode, LiMO_2 für ein beliebiges Lithium-Metalloxid (Kathode) stehen.



In den obigen Reaktionsgleichungen findet die Entladung von links nach rechts, die Ladung von rechts nach links statt. Die Reaktionsgleichungen für LiFePO_4 -Batterien im speziellen lauten:



2.1.1. Materialien der Batteriekomponenten

Für die Umsetzung des zuvor beschriebenen Modells einer Lithium-Ionen-Batterie können unterschiedliche Materialien verwendet werden, die zu verschiedenen Batterietypen mit unterschiedlichen Eigenschaften führen. Die vier großen Stellschrauben, mit denen die Batterieeigenschaften maßgeblich beeinflusst werden können, sind:

- Material der positiven Elektrode
- Material der negativen Elektrode
- Elektrolyt
- Separator

Im Folgenden sollen die Eigenschaften, welche an die Elektrodenmaterialien gestellt werden sowie die gängigen, in der Industrie verwendeten, Elektrodenmaterialien vorgestellt werden.

²PVDF steht für das Polymer Polyvinylidenfluorid

Positive Elektrode:

Das Material für die positive Elektrode soll nach [17] die folgenden Eigenschaften haben:

- hohes Potential gegenüber Lithiummetall (hohes Standardelektrodenpotential³)
- Fähigkeit, große Mengen an Lithium einzulagern
- hohe elektrische Leitfähigkeit
- hohe Leitfähigkeit für Lithium-Ionen
- nicht löslich im Elektrolyt
- kostengünstig in der Herstellung

Das meist verwendete Material ist LiCoO_2 ⁴. Es bietet eine gute spezifische Kapazität von etwa 150 mAh/g und weist eine Spannung von 3,9 V gegen Lithium auf. Nachteilig ist das enthaltene Cobalt, welches recht teuer ist. Bei einer hohen Temperatur oder einer erhöhten Zellspannung (etwa 4,4 V) tritt eine Zersetzung des Materials ein. Diese geht mit der Freisetzung thermischer Energie einher und stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar; der Einsatz einer Überwachungselektronik ist zwingend erforderlich.

Weitere Materialien sind LiMn_2O_4 ⁵ und LiFePO_4 . Ersteres weist eine geringere spezifische Kapazität auf, ist aber sicherer und, da es ohne Cobalt auskommt, auch kostengünstiger. Letzteres hat ein wesentlich geringeres Standardelektrodenpotential und benötigt bei ähnlicher spezifischer Kapazität mehr Volumen. Dafür besteht es aus günstigen und global verfügbaren Rohstoffen; zudem ist es sehr sicher.

Ebenfalls Verwendung finden $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ (sicherer als LiCoO_2) und $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$, welches eine sehr hohe spezifische Kapazität von bis zu 200 mAh/g bietet. Ein besonderes Material stellt $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ dar; es weist ein Potential von 4,6 V gegenüber Lithiummetall auf [17][15].

Negative Elektrode:

Die negative Elektrode hat die selben Anforderungen zu erfüllen, jedoch soll sie ein möglichst geringes Standardelektrodenpotential aufweisen.

Das gängigste Material ist Graphit. Es besteht aus zweidimensionalen Graphenschichten, die in unterschiedlichen Strukturen zum dreidimensionalen Graphit gestapelt werden. Die Art der Schichtung beeinflusst die spezifische Kapazität und die Ionenleitfähigkeit.

Weitere Materialien sind $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ⁶ sowie Zinn- und Siliziumverbindungen. Ersteres hat eine sehr hohe Zyklenfestigkeit und ist sicherer als Graphit. Aufgrund seines relativ hohen

³Das Standardelektrodenpotential ist das Redox-Potential unter Standardbedingungen gemessen gegen eine Standard-Wasserstoffelektrode

⁴ LiCoO_2 , chemische Summenformel für Lithium-Cobaltdioxid

⁵ LiMn_2O_4 , chemische Summenformel für Lithium-Mangan(III,IV)oxid

⁶ $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, chemische Summenformel von Lithiumtitanat

Standardelektrodenpotentials ist die Spannung der resultierenden Zelle wesentlich geringer als bei Verwendung einer Graphitanode (Größenordnung in etwa 2 V). Letztgenannte Materialien werden noch erforscht.

Lithiummetall selbst stellt auch ein mögliches Material für die negative Elektrode dar. Es weist eine vergleichsweise zehnmal höhere spezifische Kapazität als Graphit auf; die Speicherung erfolgt hier jedoch nicht durch Interkalation. Problematisch ist, dass Lithium sich nicht wieder gleichmäßig an einer Elektrode aus Lithiummetall anlagert, sondern sogenannte Dendriten bildet. Dies sind lange, nadelförmige Ablagerungen reinen Lithiummetalls. Sie verändern zum einen die Oberflächenstruktur der Elektrode und können zum anderen mechanisch durch den Separator dringen, was zum Kurzschluss und damit irreversiblen Ausfall der Zelle führt [17][16].

Elektrolyt:

Der Elektrolyt muss eine hohe Ionenleitfähigkeit aufweisen und besteht in der Regel aus einem Lithiumsalz, welches zumeist in organischen Lösungsmitteln gelöst ist. Durch Zusatz von Polymeren (z.B. PVDF) kann dem ansonsten flüssigen Elektrolyt eine gelartige Konsistenz verliehen werden. Das Lösungsmittel bestimmt, wie viel Lithiumsalz darin gelöst werden kann. Ein gängiges Lithiumsalz ist LiPF_6 ⁷. Häufig verwendete Lösungsmittel sind Ethylen-carbonat, Propylencarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat, Ethylmethylcarbonat, sowie Dimethylether. Es wird in der Regel eine Kombination aus verschiedenen Lösungsmitteln verwendet [17].

Separator:

Der Separator muss chemisch und mechanisch stabil sein. Er sollte den Elektrolyt in sich aufnehmen können und eine gleichmäßige Porengröße aufweisen, um einen guten Ionen-transport zu gewährleisten. Der Separator wird meist aus Polypropylen, Polyethylen oder einer Kombination aus beidem hergestellt. Neben seiner Hauptaufgabe, die Elektronenleitung zwischen den beiden Elektroden zu verhindern, kann er auch als thermische Sicherung fungieren und die Betriebssicherheit der Batterie erhöhen. Hierbei wird sich zunutze gemacht, dass Polyethylen bereits bei $135[^\circ\text{C}]$ schmilzt und die Poren beim Schmelzvorgang verschlossen werden. Der Ionenaustausch wird so gestoppt und die chemische Reaktion kann nicht mehr ablaufen. Um die mechanische Festigkeit des Separators aufrecht zu erhalten, wird er in einer mehrlagigen Struktur mit Polypropylen, welches einen etwas höheren Schmelzpunkt hat, hergestellt [17][15].

⁷ LiPF_6 , chemische Summenformel für Lithiumhexafluorophosphat

2.1.2. Vergleich der Elektrodenmaterialien

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die Elektrodenmaterialien für Anode und Kathode gegeben. Dabei werden ihre spezifische Kapazität sowie ihre mittlere Spannung in Bezug zum Lithiummetall gegenübergestellt. Des Weiteren werden Sicherheit, Stabilität und die Attraktivität des Materials in Bezug auf den Preis auf einer siebenstufigen Skala eingeordnet. Sie reicht von schlecht (---) über durchschnittlich (o) bis hin zu gut (+++).

Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaften der Materialien für die positive Elektrode. Die genauen Eigenschaften von $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ variieren mit den Mengenanteilen der einzelnen Bestandteile.

Die Eigenschaften der Materialien für die negative Elektrode sind in Tabelle 2.2 gegenübergestellt. Es ist zu beachten, dass die spezifische Kapazität des Lithiummetalls nicht mit der der anderen Materialien verglichen werden darf, da die Speicherung der Lithiumionen nicht auf Interkalation basiert.

Tabelle 2.1.: Vergleich der Kathodenmaterialien, nach [15]

	LiCoO_2	LiNiO_2^a	LiMn_2O_4	$\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$	LiFePO_4
Mittlere Spannung gegen Li/Li^+ [V]	3,9	3,8	4,0	3,8 - 4,0	3,4
Kapazität [mAh/g]	150	170	120	130 - 160	160
Sicherheit	-	-	+	o	++
Stabilität	-	-	o	o	++
Preis	--	-	+	o	+

^a LiNiO_2 , chemische Summenformel von Lithium-Nickeldioxid

2.1.3. Wirkkette

Alle beobachteten Effekte, seien sie optischer Natur oder nicht, können örtlich grob einem Bestandteil der Batterie zugeordnet werden, an dem sie stattfinden. Diese Orte sind die Anode, die Kathode und der Elektrolyt.

Ein Effekt der sich am Elektrolyt beobachten lässt, rührt wahrscheinlich von der Interaktion des in ihm gelösten Lithiumsalzes mit den transportierten Lithiumionen her.

Für die beobachteten Effekte an den Elektroden (Anode und Kathode) ist diese Zuordnung

Tabelle 2.2.: Vergleich der Anodenmaterialien, nach [15]

	Lithium-Metall	Amorpher Kohlenstoff	Graphit	Lithiumlegierungen	Lithiumoxide	Lithium-Titanat
Mittlere Spannung gegen Li/Li ⁺ [mV]	0	100 - 700	50 - 300	50 - 600	50 - 600	1400 - 1600
Kapazität [mAh/g]	3860	ca. 200	372	3990 (Si) 1000 (Sn)	bis ca. 1500 ^a	150
Sicherheit	-	+	+	o	+	++
Stabilität	-	+	+	-	-	++
Preis	+	o	+	++	-	o

^aSehr hohe irreversible Kapazität

der Ursache schwieriger. Der Effekt kann z.B. in Abhängigkeit von der Menge des in der Elektrode eingelagerten Lithiums auftreten. Seine Beobachtung wäre abhängig von der Schichtdicke des Materials und könnte Parallelen zur umgesetzten elektrischen Ladung aufweisen. Örtlich fände der Effekt im Elektrodenmaterial statt. Dies wäre eine wünschenswerte Beobachtung, da sie Rückschlüsse auf den SOC der Batterie zuließe. Eine weitere mögliche Beobachtung an diesem Ort wäre die Zersetzung des Elektrodenmaterials, welche unter Umständen Rückschlüsse auf den SOH zulässt.

Denkbar wäre aber auch ein Effekt, der an einer Elektrode beobachtet wird und nicht in dieser, sondern an der Grenzschicht zum Elektrolyten stattfindet. Da die Interkalation stets an dieser Grenzschicht beginnt, wären in diesem Falle Parallelen zum Stromfluss zu erwarten. Bei einer optischen Beobachtung der Elektroden kommt erschwerend hinzu, dass diese immer durch den Elektrolyten hindurch stattfindet. Eine mögliche Beeinflussung durch den Elektrolyten ist zu berücksichtigen. Rückschlüsse auf den genauen Auftrittsort des Effekts lassen sich mittels der parallel aufgezeichneten elektrischen Messwerte ziehen.

2.1.4. Optische Elektrodeneffekte bei Lithium-Eisenphosphat Batterien

Lithium-Eisenphosphat hat eine hohe thermische, wie auch elektrochemische Stabilität und ist daher sehr sicher. Zudem ist es preisgünstig.

Bei der Verwendung als Kathodenmaterial liegt im idealisierten Fall FePO_4 ⁸ im geladenen Zustand und LiFePO_4 im entladenen Zustand vor. Die Interkalation des Lithiums geht mit einer Volumenänderung von etwa 6,8 % einher [17].

Die beiden Stoffe unterscheiden sich in ihrer Farbe. Während LiFePO_4 grau bis schwarz ist, ist FePO_4 gelblich bis bräunlich. Dieser Farbunterschied sollte sich bei der Zyklierung beobachten lassen. Im nicht idealen Fall bleibt bei der Ladung genug dunkles LiFePO_4 übrig, sodass das gelbliche FePO_4 nicht als solches zu erkennen ist. In diesem Fall wird eine Helligkeitsänderung des Kathodenmaterials erwartet.

Die Struktur des LiFePO_4 bietet nur eindimensionale Tunnel für die Lithiumdiffusion. Dies bedingt eine schlechte Ionenleitfähigkeit, die in der Praxis durch Dotierung entgegenzuwirken versucht wird. Die schlechte elektrische Leitfähigkeit des Materials wird durch eine Beschichtung mit Kohlenstoff verbessert [17].

Um optische Beobachtungen durchführen zu können, darf kein Kohlenstoff in das Material eingebracht werden, da Licht von diesem stark absorbiert wird. Möglichkeiten zur Verbesserung der Leitfähigkeit, die für die optische Beobachtung der Kathode geeignet sind, sind unter anderem Gegenstand der Bachelorarbeit [21], welche von Herrn Schiepel im Projekt BATSEN durchgeführt wurde.

Eine Literaturrecherche hat hervorgebracht, dass weitere optische Effekte an Lithium-Ionen-Batterien entdeckt wurden.

Stephen J. Harris et al. untersuchten die Einlagerung von Lithium in Graphitelektroden. Dabei entdeckten sie, dass die Einlagerung nacheinander in unterschiedliche Schichten des Graphits erfolgt. Dies führt zu einer dreistufigen Farbveränderung, welche die Menge des eingelagerten Lithiums widerspiegelt. Sie reicht von dunkelblau (wenig Lithium) über rötlich bis hin zu goldfarben, bei vollständiger Besetzung der Graphitstruktur mit Lithium [11].

Sandeep Bhattacharya et al. haben die Schädigung von Graphitanoden untersucht, die während der Interkalation und Deinterkalation von Lithium auftritt. Dabei haben sie entdeckt, dass während der Deinterkalation, aber auch während der Interkalation Teile des Graphits aus der Elektrode heraus gelöst werden und sich die Oberflächenstruktur der Elektrode ändert. Diese Schädigung ist in Form von dunklen Flecken zu beobachten [3].

⁸ FePO_4 , chemische Summenformel von Eisen(III)phosphat

2.2. Optische Messtechnik

Die optische Messtechnik dient der Untersuchung des elektromagnetischen Spektrums im Bereich des sichtbaren Lichts sowie der angrenzenden Bereiche der ultravioletten und der infraroten Strahlung. Abbildung 2.2 zeigt einen Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum.

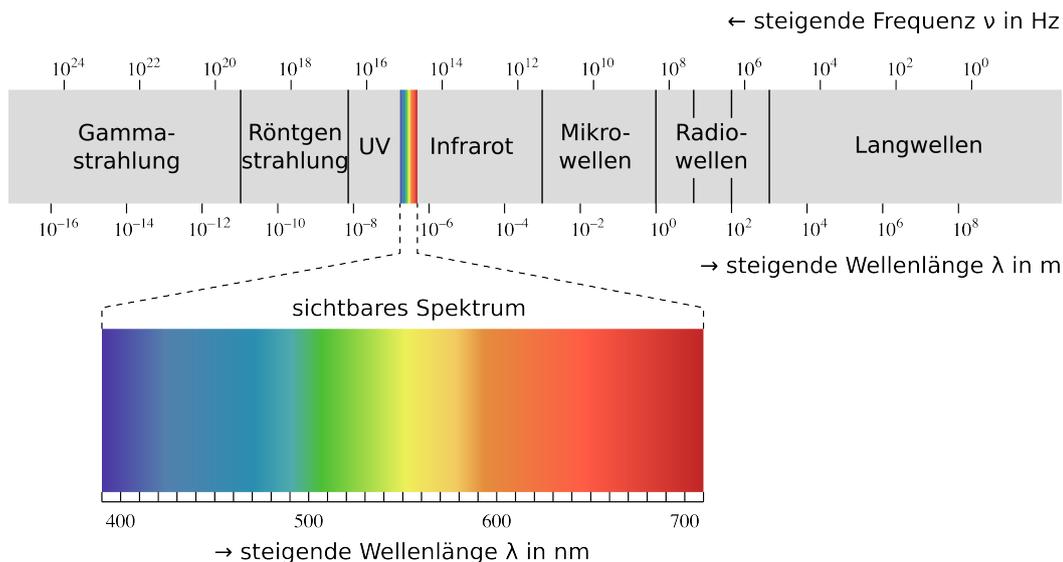


Abbildung 2.2.: Elektromagnetisches Spektrum [26]

Eine Messung kann auf zwei Arten erfolgen:

- Licht wird auf eine Seite des zu untersuchenden Mediums gestrahlt. Auf der anderen Seite wird das durchtretende Licht gemessen. So kann die Transmission bzw. Absorption, die durch das Medium verursacht wird, gemessen werden.
- Licht wird in einem bestimmten Winkel auf das zu untersuchende Objekt gestrahlt. Das vom Objekt reflektierte Licht wird unter einem notwendigerweise nicht gleichen Winkel gemessen.

In dieser Arbeit wird nur die zweite Methode angewendet. Die Messungen erfolgen mittels Mikroskopkameras und Spektrometer. Die Kameras messen für jeden Ort des Messausschnitts drei Helligkeitswerte. Die Helligkeitswerte stehen für die Farbkanäle rot, grün und blau und repräsentieren je einen Bereich des Spektrums.

Das Spektrometer erfasst ebenfalls Helligkeitswerte; sie sind kleinen Intervallen des Spektrums zugeordnet. Eine örtliche Auflösung vermag das Spektrometer nicht zu leisten.

Bei der Messung der Reflexion ist zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion zu unterscheiden. An glatten Oberflächen, welche im Vergleich zur Wellenlänge des eingestrahlt

Licht eine eher feine Struktur haben, tritt eine spiegelnde Reflexion auf. Hier gilt, dass der Einfallswinkel des Lichts gleich dem Ausfallswinkel ist. Hat die Oberfläche eine gegenüber der Wellenlänge eher grobe Struktur, so tritt eine diffuse Reflexion auf. Abbildung 2.3 veranschaulicht dies [12].

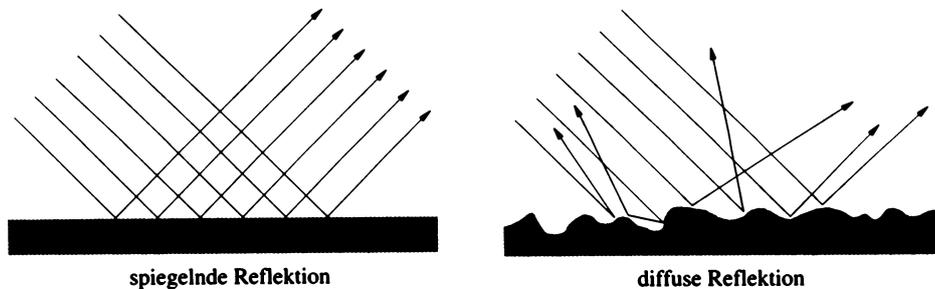


Abbildung 2.3.: Spiegelnde und diffuse Reflexion [12]

2.2.1. Spektrometer

Das Spektrometer erfasst für diskrete Wellenlängenwerte Helligkeitswerte. Die Helligkeit wird nachfolgend auch als Intensität bezeichnet. Die Messung der Intensität erfolgt mit einem CCD⁹-Zeilensensor.

Um die Intensität in Abhängigkeit der Wellenlänge messen zu können, wird das einfallende Licht entweder auf ein Prisma oder einen Spalt gegeben. Am Prisma erfolgt eine Brechung des Lichts; am Spalt wird das Licht gebeugt. Die Brechung wird durch den Brechungsindex n beschrieben und ist abhängig von der Wellenlänge. Diese Wellenlängenabhängigkeit wird als Dispersion bezeichnet. Auch die Beugung am Spalt ist je nach Wellenlänge unterschiedlich stark ausgeprägt. Durch den Effekt der Brechung bzw. Beugung treffen Photonen unterschiedlicher Energie (Wellenlänge) auf unterschiedliche Bereiche des CCD-Zeilensensors [12][4].

Solch ein CCD-Zeilensensor besteht aus einer langen Kette von Photodioden. Trifft Licht auf eine solche Photodiode, so werden durch die eintretenden Photonen Elektronen aus dem Silizium herausgeschlagen und es entsteht eine Ladung, die in einem Kondensator gespeichert wird. Dieses Phänomen wird als photoelektrischer Effekt bezeichnet. Die Anzahl der herausgeschlagenen Elektronen und damit auch die Ladung hängt von der Anzahl und Energie der Photonen ab.

In Form eines analogen Schieberegisters können die Ladungen, welche durch den Lichteintritt an den einzelnen Photodioden entstanden sind, Schritt für Schritt weiter transportiert

⁹CCD, charge coupled device, engl. für ladungsgekoppeltes Bauelement

werden. Am Ende der Kette kann die Spannung, welche sich aufgrund der Ladung in einem Kondensator aufbaut, gemessen und digitalisiert werden [4][13].

Das hier eingesetzte Spektrometer verwendet einen Spalt von 50 Mikrometern Breite. Es ist ein CCD-Sensor vom Typ TCD1304AP verbaut. Dieser verfügt über eine Auflösung von 1x3648 Pixel; die Analog-zu-Digital-Wandlung hat eine Umsetzung von 14-Bit [2][24]. Details zur Ansteuerung des Spektrometers finden sich in Kapitel 4.2.

2.2.2. Kamera und interne Bildverarbeitung

Die Kamera verwendet einen CCD-Flächensensor oder einen CMOS¹⁰-Sensor. Da diese Sensoren nur Intensitätswerte des eintretenden Lichts messen können, muss eine Farbfilterung vorgenommen werden, um farbige Aufnahmen zu ermöglichen. Hierfür gibt es verschiedene Konzepte. Zum einen können drei Sensoren mit je einem großflächigen Farbfilter für die drei Farbkanäle rot, grün und blau verbaut werden, welche durch eine entsprechende Optik alle mit dem gleichen Bildausschnitt belichtet werden. Aufgrund der Tatsache, dass drei Sensoren sowie eine präzise strahlteilende Optik benötigt werden, ist dieses Verfahren nur in hochpreisigen Kameras anzutreffen.

Ein weiteres Verfahren, welches mit nur einem Sensor auskommt, verwendet ein Bayer-Mosaic-Filter. Hierbei erhält jedes Pixel ein eigenes Farbfilter. Die Farben werden dabei so abgewechselt, dass je vier benachbarte Pixel einmal die Farbe rot, einmal die Farbe blau und zweimal die Farbe grün erfassen (siehe Abbildung 2.4).

G	B	G	B	G	B
R	G	R	G	R	G
G	B	G	B	G	B
R	G	R	G	R	G
G	B	G	B	G	B
R	G	R	G	R	G

Abbildung 2.4.: Farbanordnung im Bayer-Mosaic-Filter

Dies ist dem Umstand geschuldet, dass das menschliche Auge besonders empfindlich auf Grüntöne reagiert. Die Berechnung der Helligkeitwerte jener Farbkanäle, für die das jeweilige Pixel keinen Filter hat, erfolgt durch Interpolationsrechnung mit den Intensitätswerten der benachbarten Pixel.

¹⁰CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor, engl. für komplementierender Metalloxid Halbleiter

Andere Formen der Filteranordnung sowie andere Farbfilter werden ebenfalls von einigen Sensorherstellern verwendet. Die Umrechnung in den RGB-Farbraum erfolgt durch die nachgeschaltete Signalverarbeitung der Kamera, welche auch Belichtungskorrektur und Weißabgleich übernimmt [10][25].

Die hier verwendeten Kameras können laut Hersteller hoch aufgelöste Bilder mit einer Auflösung von 12 Megapixel, aber auch niedriger aufgelöste Bilder, bei denen keine Interpolation angewendet wurde, liefern. Zusammen mit dem Umstand, dass sie jeweils aus dem Preissegment um EUR 100 stammen, kann darauf geschlossen werden, dass in ihnen ein Einchip-Sensor mit dem beschriebenen Bayer-Mosaic-Filter verbaut ist. Eine Untersuchung der Exif¹¹-Daten einer Aufnahme bestätigt diese Annahme. Hier ist das Feld „SensingMethod“ mit dem Wert „One-chip color area sensor“ belegt. Näheres über die eingebaute Bildverarbeitung der Kameras ist nicht bekannt.

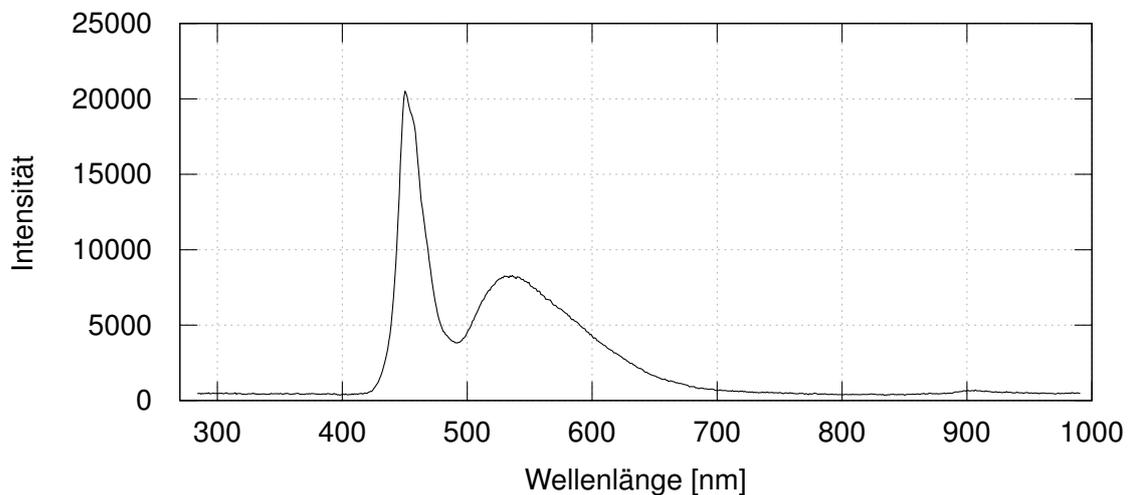


Abbildung 2.5.: Spektrum der Kamerabeleuchtung

Abbildung 2.5 zeigt das Spektrum der in den Kameras eingebauten LED¹²-Beleuchtung. Es weist einen sehr hohen Blauanteil auf, der von der internen Bildverarbeitung der Kamera mittels eines Weißabgleichs ausgeglichen werden muss. Belichtungssteuerung und Weißabgleich sind weder einstellbar noch abschaltbar. Für die weitere Betrachtung des Kameraverhaltens, insbesondere für die Kompensationsrechnung (vgl. Kapitel 4.7.1), wird der Kameraelektronik das in Abbildung 2.6 gezeigte Modell unterstellt.

Nach diesem Modell strahlt die Quelle Licht konstanter Intensität L ab, welches vom Objekt mit einem Reflexionsfaktor r reflektiert wird und durch das Objektiv auf den Sensor der

¹¹Exif, Exchangeable Image File Format, ist ein Metadatenformat für die Speicherung von Kamerainformationen in Bilddateien.

¹²LED, light emitting diode, engl. für Licht emittierende Diode

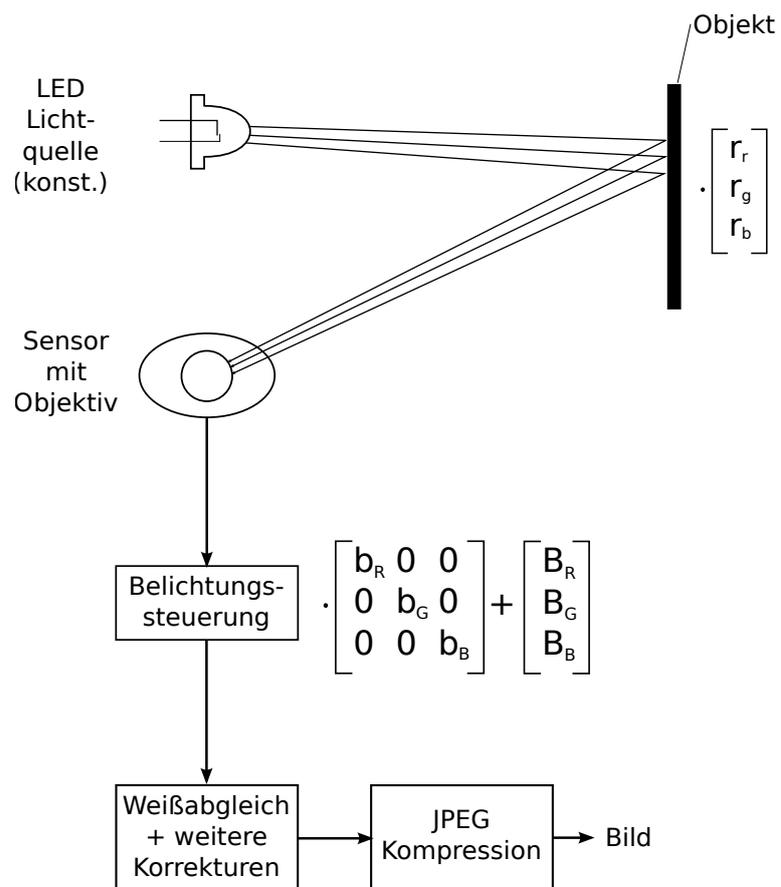


Abbildung 2.6.: Modell, welches der Kameraelektronik unterstellt wird

Kamera trifft. Anschließend folgt die Belichtungssteuerung, welche die Intensitäten verstärkt und mit einem Offset versieht. Verstärkungsfaktor b und Offset B können sich von Aufnahme zu Aufnahme unterscheiden. Danach folgen der Weißabgleich und weitere Korrekturen, von denen angenommen wird, dass sie nichtlinear sind. Zum Schluss wird eine JPEG¹³-Kompression auf das Bild angewendet.

Folgend wird die verlustbehaftete JPEG-Kompression etwas genauer betrachtet. Sie ist für Bilder mit fließenden Farbübergängen (z.B. Photos) konzipiert und soll eine hohe Kompressionsrate erreichen, ohne dass dem Betrachter der Informationsverlust auffällt. Da das menschliche Auge Helligkeitsunterschiede besser wahrnimmt als Farbunterschiede, werden die Farbinformationen durch die Kompressionsmethode reduziert. Die Kompression kann in vier verschiedenen Varianten erfolgen [20]:

1. Sequenziell: Bildkomponenten (Luminanz, Chrominanz) werden nacheinander verarbeitet.
2. Progressiv: Blockweise Verarbeitung der Bildkomponenten. Dies erlaubt eine schnelle Grobdarstellung des gesamten Bildes. Die Details stellt der Decoder in nachfolgenden Durchläufen dar.
3. Lossless: Eine Variante, in der weniger Verluste auftreten. Sie ist nicht verlustfrei und wird wegen der schlechten Kompressionsrate eher selten verwendet.
4. Hierarchisch: Ermöglicht eine teilweise Dekompression der Bilddaten, wenn das Bild in einer geringeren Auflösung benötigt wird.

Es soll nun der Ablauf der Kompression für Farbbilder nach Variante 1 betrachtet werden, da diese auch von den hier benutzten Kameras verwendet wird. Die Kompression läuft in sechs Schritten ab [20].

1. Die Farbdaten werden vom RGB-Farbraum in einen Farbraum mit Luminanz- und Chrominanz-Darstellung transformiert.
2. Jede der Bildkomponenten wird in Einheiten der Größe 8×8 Pixel zerlegt. Fehlen aufgrund der Bildgröße Pixel, um eine Einheit zu bilden, so werden die fehlenden Pixel durch Kopieren der vorigen aufgefüllt.
3. Auf jede Einheit wird die DCT¹⁴ angewendet.
4. Jedes der 64 DCT-Ergebnisse einer jeden Einheit wird durch einen individuellen Korrekturkoeffizienten geteilt.

¹³JPEG, ein von der Joint Photographic Experts Group entwickeltes Kompressionsverfahren für Bilddaten

¹⁴DCT, Diskrete Cosinus-Transformation

5. Auf die nun vorliegenden Ergebnisse wird eine Kombination von Lauflängenkodierung und Huffman-Kodierung angewendet.
6. Die komprimierten Bilddaten werden zusammen mit den verwendeten Parametern gespeichert.

Da für die in dieser Arbeit folgenden Auswertung der Bilddaten neben den Helligkeitsinformationen auch die Farbinformationen von Bedeutung sind, wird nun der Einfluss der Kompression auf ein Testbild untersucht. Abbildung 2.7 zeigt das Testbild der Größe 16x16 Pixel. Seine Farbtiefe beträgt 8 Bit. Da die Auswertung der Bilddaten (siehe Kapitel 4.7) nur die

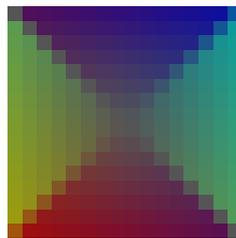


Abbildung 2.7.: JPEG Testbild

summierte Helligkeit für jeden Farbkanal betrachtet, wurde das Testbild so gestaltet, dass die summierte Helligkeit für jeden Farbkanal gleich ist. Ein Vergleich der summierten Helligkeiten vor und nach der Kompression hat die in Tabelle 2.3 aufgelisteten Abweichungen ergeben. Die Auswirkung der Kompression auf das zur Auswertung angewendete Verfahren kann als gering angesehen werden.

Tabelle 2.3.: Durch JPEG Kompression verursachte Helligkeitsabweichungen

	rot	grün	blau
Absolute summierte Helligkeit (unkomprimiert)	21760	21760	21760
Absolute summierte Helligkeit (komprimiert)	21759	21763	21814
Absolute Helligkeitsdifferenz	-1	3	54
Relative Helligkeitsdifferenz [%]	-0.00460	0.01379	0.24816

3. Messplatz

In diesem Kapitel werden die mechanischen Konstruktionen und der elektrische Aufbau des Messplatzes beschrieben. Einführend wird die Messzelle „ECC-Opto-Std“ des Herstellers El-Cell, welche in allen Messreihen eingesetzt wird, vorgestellt. Der Messplatz ist für den simultanen Betrieb für drei Zellen konzipiert und Dank seines modularen Aufbaus leicht um weitere Zellen erweiterbar.

3.1. Messzelle ECC-Opto-Std

Die Messzelle „ECC-Opto-Std“ wurde speziell für Laboraufbauten entwickelt, in denen eine optische Beobachtung des Innenlebens einer Batterie notwendig ist. Sie verfügt über eine Öffnung, durch die die Rückseite der Arbeitselektrode, je nach Aufbau die Anode oder die Kathode, sichtbar ist. Für einen gasdichten Abschluss zur Außenwelt sorgt eine dünne Glas-scheibe [7].



Abbildung 3.1.: Messzelle ECC-Opto-Std (Fotografie nach [7])

Abbildung 3.1 zeigt eine Fotografie der Messzelle in ihrem Halter; Abbildung 3.2 stellt ein schematisches Schnittbild der Zelle dar.

Zusätzlich zu Arbeitselektrode (WE)¹ und Gegenelektrode (CE)² verfügt die Messzelle über eine Referenzelektrode (RE)³. Diese ist wie die CE durch den Separator aus Glaswolle von der WE getrennt und ermöglicht es, ein Referenzpotential herzustellen. Hiervon wird jedoch in keiner der Messreihen Gebrauch gemacht. Alle Elektroden haben Anschlussbuchsen für das 2mm-Labor-Stecksystem [7].

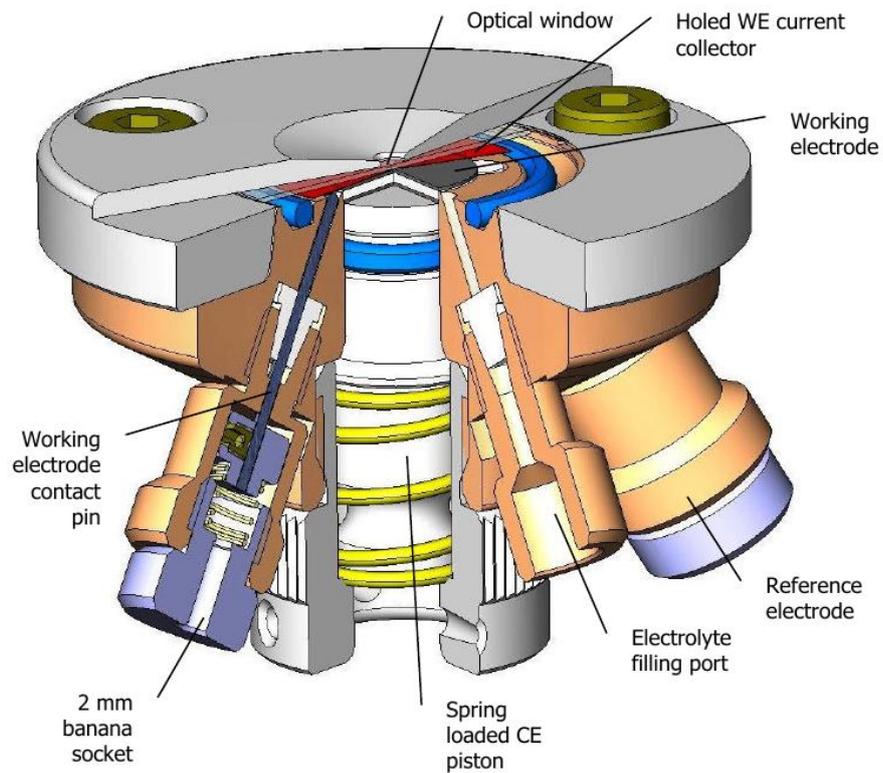


Abbildung 3.2.: Messzelle ECC-Opto-Std (Schematisches Schnittbild nach [7])

¹WE, Working electrode, engl. für Arbeitselektrode

²CE, Counter electrode, engl. für Gegenelektrode

³RE, Reference electrode, engl. für Referenzelektrode

3.2. Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau besteht neben dem vom Hersteller mitgelieferten Halter für die Messzellen aus einem Abdeckkasten, der das Umgebungslicht von Messzelle und Kamera fern hält und einem Kamerahalter, welcher die präzise Ausrichtung der Kamera über der Zelle ermöglicht.

Der Abdeckkasten ist aus 10 mm starken MDF Platten gefertigt und verfügt oben über einen Deckel, durch den die Messzelle beobachtet und die Kamera bedient werden kann. Nach unten hin ist der Kasten offen, sodass er über den Kamerahalter mit der Messzelle gestülpt werden kann. Die Fußkanten des Kastens sind mit einem Schaumstoffstreifen beklebt, der einen lichtdichten Abschluss mit dem Untergrund garantiert. In der Kabeldurchführung an der Unterkante des Kastens sind vier lagen schwarzen Nylonstoffs eingearbeitet. Dieser legt sich um die Zuleitungen und verhindert den Lichteintritt. Die Grundfläche des Abdeckkastens ist so gewählt, dass er auf einem Multimeter (Modell: 45; Hersteller: Fluke) Platz findet. Die benötigten Messgeräte inklusive des mechanischen Aufbaus lassen sich so für jede Messzelle zu einer kompakten Einheit stapeln. Abbildung 3.3 zeigt eine Fotografie des Abdeckkastens; die Konstruktionszeichnung findet sich in Anhang A.1.

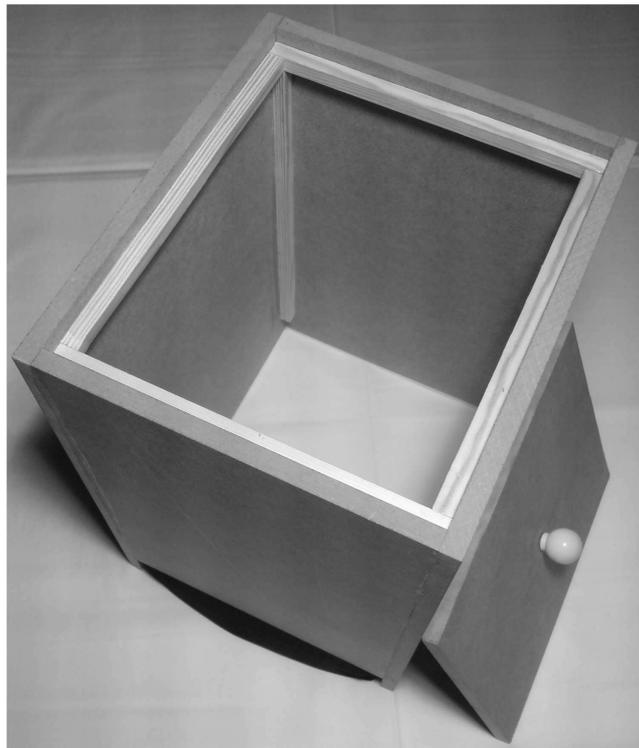


Abbildung 3.3.: Abdeckkasten

Der Kamerahalter besteht aus einer 1 mm starken Eisenblechplatte auf der ein Arm aus zwei L-förmigen Winkeln geschraubt ist. Der Arm ist in Höhe und Querneigungswinkel frei einstellbar und trägt die Kamera, welche mittels ihrer Stativaufnahme an seinem Ende befestigt ist. Durch Konterung lässt sich ein beliebiger Gierwinkel der Kamera einstellen. Vier GummifüÙe an der Unterseite des Kamerahalters sorgen für einen stabilen und rutschfesten Stand. Abbildung 3.4 zeigt eine Fotografie des Kamerahalters inklusive Kamera und Zellenhalter; die Konstruktionszeichnung ist in Anhang A.2 einsehbar.



Abbildung 3.4.: Kamerahalter mit Kamera und Zellenhalter

Der Zellenhalter wird für den Einsatz in diesem Aufbau (reversibel) modifiziert. Die drei GummifüÙe werden entfernt und durch 40 mm lange M4 Senkkopfschrauben ersetzt. Diese ermöglichen eine freie Höhenfeineinstellung der Zelle. Die Lage der Zelloberfläche lässt sich so ebenfalls in gewissen Grenzen korrigieren. Die Befestigung und Positionierung des Zellenhalters auf der Grundplatte des Kamerahalters erfolgt mittels dreier starker Neodym-Eisen-Bor Magneten.

3.2.1. Sondenhalter (0 Grad)

Für die spektrometrische Messung des Reflexionsverhaltens der Elektrodenoberfläche muss die Messsonde des Spektrometers auf das Sichtfenster der Messzelle ausgerichtet werden. Eine solche Messsonde für Reflexionsmessungen besteht aus mehreren Fasern für die Beleuchtung des Messobjekts und einer Faser zur Messung des reflektierten Lichts. In diesem Aufbau wird eine Sonde mit sieben Beleuchtungsfasern, zentral liegender Messfaser und FSMA-Anschlüssen⁴ verwendet. Abbildung 3.5 zeigt den Aufbau dieser Messsonde.

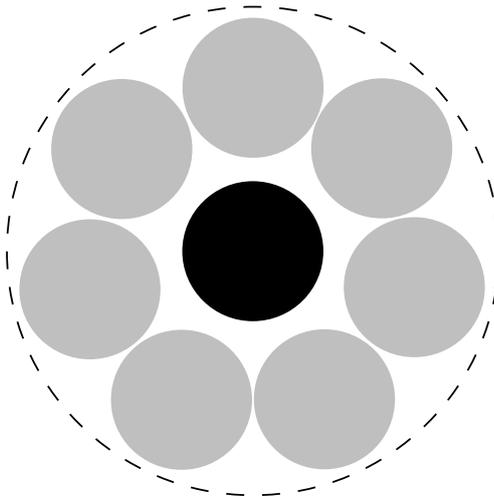


Abbildung 3.5.: Schematischer Aufbau der Messsonde für Reflexionsmessungen - Die Messfaser ist schwarz, die Beleuchtungsfasern sind grau gezeichnet. Die gestrichelte Linie stellt die Ferrule des FSMA Steckers dar.

Das abgestrahlte Licht der Messsonde soll die Elektrodenoberfläche in einem Winkel von 0 Grad treffen, damit das reflektierte Licht von der Messfaser erfasst werden kann. Abbildung 3.6 illustriert das Messkonzept. Ferner muss die Position der Messsonde über dem Sichtfenster der Messzelle einstellbar sein, da sich die Position des Stromsammlers und der sichtbare Bereich der Elektrodenoberfläche von Aufbau zu Aufbau geringfügig unterscheiden.

Um die Messsonde unter Berücksichtigung dieser Anforderungen auf der Messzelle zu befestigen, ist der in Abbildung 3.7 gezeigte Sondenhalter entwickelt worden. Er nimmt mittig eine FSMA Buchse auf, in die die Messsonde hinein geschraubt werden kann. Die Ausrichtung und Befestigung an der Zelle erfolgt über drei, im Winkel von 120 Grad angeordneten Madenschrauben im Rand des Halters. Über weitere drei Madenschrauben, welche um die FSMA Buchse herum angeordnet sind, kann die Auflagehöhe des Halters auf der Oberfläche der Messzelle eingestellt werden.

⁴FSMA, Fiber subminiature assembly

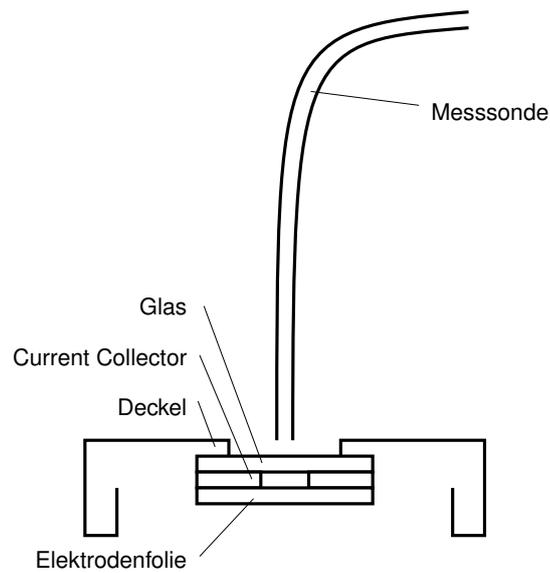


Abbildung 3.6.: Messprinzip - 0 Grad

Die Konstruktionszeichnung des Sondenhalters ist in Anhang A.3 einsehbar; die Fertigung erfolgte durch die zentrale Laborwerkstatt der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.



Abbildung 3.7.: Sondenhalter - 0 Grad

3.2.2. Sondenhalter (45 Grad)

Aufgrund der Testmessungen (siehe Kapitel 6.1), welche mit dem in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Sondenhalter durchgeführt wurden, hat sich herausgestellt, dass die Reflexion an der Glasscheibe der Messzelle sehr stark ist. Die von der Elektrodenoberfläche reflektierte Komponente ist im gemessenen Spektrum nicht ausfindig zu machen, da sie im Vergleich zur gesamt gemessenen Intensität zu gering ist.

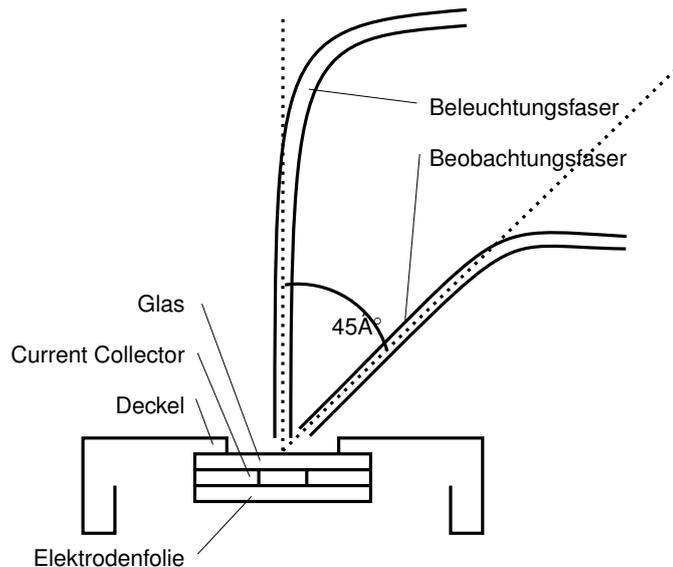


Abbildung 3.8.: Messprinzip - 45 Grad

Um dieses Problem zu umgehen, wird ein neues Messkonzept, illustriert durch Abbildung 3.8, eingeführt. Beleuchtung und Messung des reflektierten Lichts erfolgen hier über zwei getrennt geführte Fasern, die sich im Winkel unterscheiden. Ein Großteil des eingestrahlichten Lichts wird an der Glasscheibe mit einem Ausfallwinkel reflektiert, der dem Einfallswinkel des Lichts entspricht; die Messfaser wird, da sie in einem anderen Winkel steht, nicht von diesem reflektierten Licht getroffen. Da die Elektrodenoberfläche im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts verhältnismäßig rau ist, wird das Licht an ihr diffus reflektiert und teilweise von der Messfaser erfasst. Es ist zu erwarten, dass der Anteil dieser diffusen Reflexion an der gesamt gemessenen Intensität größer als im zuvor verwendeten Messverfahren ist, da die Reflexion an der Glasscheibe nicht mehr erfasst wird.

Dieses Konzept wurde mit dem in Abbildung 3.9 dargestellten, improvisierten Aufbau erprobt. Die Messzelle wird von einem entsprechend präparierten Kunststoffrohr gehalten und kann in diesem mittels vier Schrauben fixiert werden. Die Mess- und Beleuchtungsfasern sind in einem festen Winkel von 45 Grad zueinander in einem Winkelverbinder aus Aluminiumdruckguss befestigt. Der Winkelverbinder ist dazu mit zwei Gewinden versehen worden.

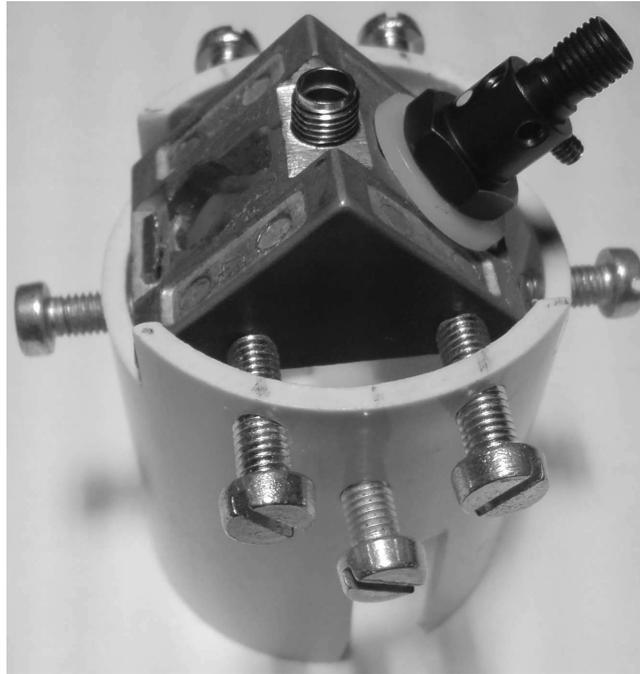


Abbildung 3.9.: Sondenhalter - 45 Grad

Er lässt sich oberhalb der Messzelle in den Halter einspannen. Die Beleuchtung erfolgt diffus in einem Winkel von 0 Grad. Die Reflexion wird in einem Winkel 45 Grad gemessen; der Messpunkt lässt sich über einen Kollimator auf die Elektrodenoberfläche fokussieren.

Messtechnisch wäre eine Umkehr von Beleuchtungs- und Messwinkel sinnvoll, da der fokussierte Messpunkt so nicht verzerrt würde. Konstruktionsbedingt ist dies in diesem Aufbau aber nicht möglich.

Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Testmessungen (siehe Kapitel 6.2), wird im Forschungsvorhaben BATSEN derzeit von Herrn Pereguda eine mechanisch stabile Konstruktion entwickelt, die frei einstellbare Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel mit jeweils einstellbaren Fokuspunkten zulässt. Diese Konstruktion wird nachfolgend „item-Sondenhalter“ genannt.

3.3. Elektrischer Aufbau

Der elektrische Aufbau besteht neben den Messzellen selbst aus sechs (zwei pro Messzelle) Multimetern für die Messung von Zellspannung und Lade-/Entladestrom, einer 8-Kanal Relaiskarte sowie einem Labornetzteil (Modell: NGT 35; Hersteller: Rohde & Schwarz) mit drei galvanisch getrennten Kanälen. Für die Begrenzung von Lade- und Entladeströmen werden Widerstände eingesetzt. Diese sind austauschbar und werden je nach Aufbau der Messzellen individuell dimensioniert.

Für die Steuerung und Messwertaufzeichnung wird ein PC mit einem GNU/Linux Betriebssystem eingesetzt. Relaiskarte und Multimeter werden mit je einem 9-poligen Nullmodemkabel über je eine RS232 Schnittstelle mit dem PC verbunden. Die benötigten sieben RS232 Schnittstellen werden in Form von zwei USB zu Seriell Umsetzern (Modell: AU0032; Hersteller: LogiLink) realisiert. Diese stellen je vier Schnittstellen bereit.

Tabelle 3.1 zeigt die Pinbelegung der Nullmodemkabel. Die Gerätedateien, welche die jeweiligen Schnittstellen repräsentieren, werden zusammen mit den angeschlossenen Geräten und deren Funktion in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Tabelle 3.1.: Pinbelegung 9-poliges Nullmodemkabel

Pin an Seite A	Pin an Seite B
1	4
6	3
2	2
3	1
4	6
5	5
7	8
8	7

3.3.1. Messschaltung

Abbildung 3.10 zeigt die Messschaltung für eine Messzelle. Sie ist für die weiteren beiden Messzellen äquivalent aufgebaut. Für die Messung der Zellspannung werden die Multimeter „45“ von Fluke eingesetzt. Die Messung des geringen Stromes, welcher je nach Zellaufbau im Bereich von einigen Nanoampere bis zu mehreren Mikroampere liegt, erfolgt mit den Multimetern „DMM4020“ von Tektronix. Sie sind in der Lage, Ströme mit einer Auflösung von

Tabelle 3.2.: Belegung der Serial-Ports

Gerätedatei	Gerät	Verwendung
/dev/ttyUSB0	Fluke 45	Zelle 1 - Spannung
/dev/ttyUSB1	Fluke 45	Zelle 2 - Spannung
/dev/ttyUSB2	Tektronix DMM4020	Zelle 2 - Strom
/dev/ttyUSB3	Tektronix DMM4020	Zelle 1 - Strom
/dev/ttyUSB4	Tektronix DMM4020	Zelle 3 - Strom
/dev/ttyUSB5	Relaiskarte	
/dev/ttyUSB6	-	-
/dev/ttyUSB7	Fluke 45	Zelle 3 - Spannung

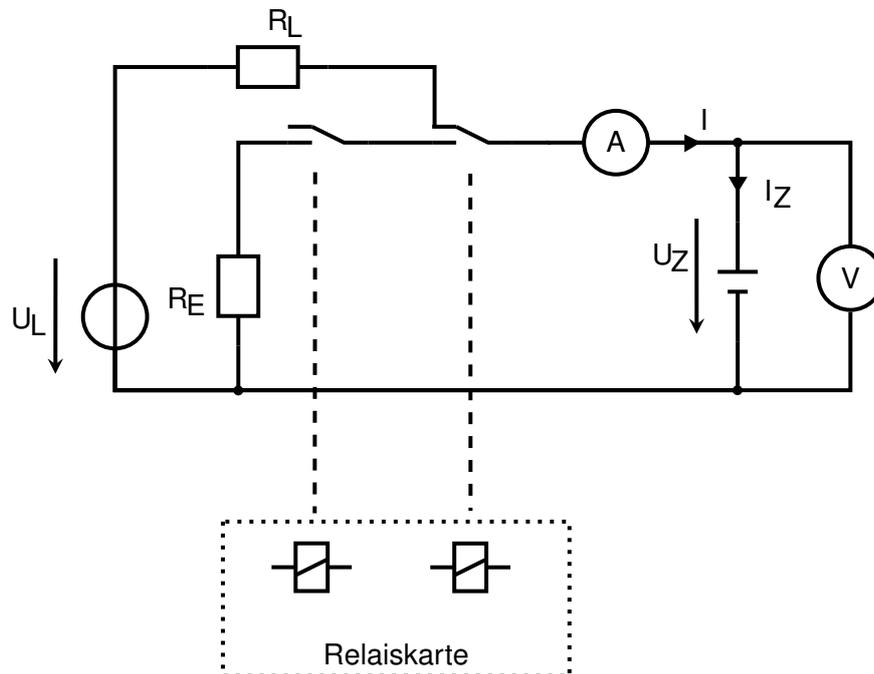


Abbildung 3.10.: Messschaltung für eine Zelle

1 nA zu messen [22]. Der Entladestrom wird durch den Widerstand R_E begrenzt. Mittels des optionalen Widerstandes R_L kann auch der Ladestrom begrenzt werden.

Pro Messzelle werden je zwei Kanäle der Relaiskarte benötigt. Da die Relaiskarte über Wechselrelais verfügt, ist die Schaltung so realisiert, dass eine Ladephase eintritt, falls in einem Fehlerfall beide Relais anziehen. Dies stellt die Verwertbarkeit der Messwerte sicher und verhindert eine Schädigung der Messzelle. Die Ladephase wurde gewählt, da sie bei korrekt eingestellter Ladespannung U_L unkritisch für die Zelle ist. Erreicht die Zelle ihre Ladeschlussspannung, d.h. sie ist voll geladen, beträgt die Potentialdifferenz zwischen ihr und der Ladespannungsquelle 0 Volt und damit der Ladestrom I_Z 0 Ampere.

Ein solcher Fehlerfall ist jedoch während des gesamten Messbetriebs nicht aufgetreten.

Tabelle 3.3 zeigt die Verwendung der Relaiskartenkanäle.

Tabelle 3.3.: Verwendung der Relaiskartenkanäle

Kanal	Wertigkeit	Funktion
1	1	Zelle 1 - entladen
2	2	Zelle 1 - laden
3	4	Zelle 2 - entladen
4	8	Zelle 2 - laden
5	16	Zelle 3 - entladen
6	32	Zelle 3 - laden
7	64	-
8	128	-

3.3.2. Systematischer Messfehler

Die Messung der Zellspannung U_Z erfolgt spannungsrichtig; die Messwerte können direkt verwendet werden. Bei der Strommessung ist die nicht der Fall; sie ist immer fehlerbehaftet, da ein Teil des gemessenen Stromes I durch das Voltmeter fließt. Der Betrag des gemessenen Stromes I ist während der Ladephase größer als der durch die Messzelle fließende Strom I_Z ; während der Entladephase ist dies umgekehrt.

Da der Innenwiderstand des Voltmeters, der Entladestrombegrenzungswiderstand R_E , der Ladestrombegrenzungswiderstand R_L , sowie die Ladespannung U_L bekannt sind und während des gesamten Vorgangs als konstant angesehen werden können, lässt sich der Zellstrom I_Z zu jeder Zeit aus dem gemessenen Strom I errechnen.

Die nachstehende, zweiteilige Funktionsvorschrift zeigt den Zusammenhang zwischen I und I_Z .

$$I_Z = \begin{cases} I \geq 0 : I - \frac{U_L - R_L \cdot I}{R_I} \\ I < 0 : I - \frac{R_E \cdot I}{R_I} \end{cases} \quad (3.1)$$

Diese Korrektur kann mit dem Filterprogramm „CurrentIntegrator“ (siehe Kapitel 4.5) erfolgen.

3.3.3. Relaiskarte

Die Relaiskarte ermöglicht die computergesteuerte Umschaltung zwischen Ruhe-, Lade- und Entladephase und damit einen vollautomatischen Zyklbetrieb. Es gibt sie in verschiedenen Ausführungen, die sich in ihrer maximalen Schaltleistung unterscheiden. Dieser Aufbau verwendet ein Modell mit Wechselrelais, die 16 Ampere bei 24V/DC bzw. 230V/AC schalten können.

Die Relaiskarte kann wahlweise mit einem Nullmodemkabel über die RS232 Schnittstelle (so wie in diesem Aufbau) oder via USB mit dem PC verbunden werden. Für letztere Verbindungsart wird ein separat erhältliches Zusatzmodul benötigt, das im Wesentlichen einen USB zu RS232 Umsetzer enthält. Es ist möglich, bis zu 255 Relaiskarten an einem Anschluss des PCs zu betreiben. Die Relaiskarten stellen dafür einen Anschluss bereit, an dem die jeweilige nachfolgende Karte angeschlossen wird [5].

Die Kommunikation mit dem PC erfolgt mittels eines Protokolls, das Kommando- und Antwortrahmen mit einer Länge von je vier Bytes vorsieht. Tabelle 3.4 zeigt den Aufbau der Kommando-/Antwortrahmen. Die Protokolldetails sind in der Bedienungsanleitung [5] offen gelegt.

Tabelle 3.4.: Kommando-/Antwortrahmenaufbau, nach [5]

Byte	Bedeutung
0	Kommando / Antwort
1	Kartenadresse
2	Daten
3	Prüfsumme (= Byte 0 xor Byte 1 xor Byte 2)

Für jede Interaktion mit der Relaiskarte muss ein Kommandorahmen an diese gesendet werden. Nach Ausführung des Kommandos sendet die Karte ihrerseits einen Antwortrahmen zurück zum PC. Dieser enthält die empfangenen Daten, jedoch mit bitweise invertiertem Byte 0 und einer neuen Prüfsumme. Diese berechnet sich stets als logische Exklusiv-Oder Verknüpfung der Bytes 0, 1 und 2. Bei einem Übertragungsfehler sendet die Relaiskarte eine Fehlermeldung zurück. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass alle Bits im Byte 0 des Antwortrahmens gesetzt sind.

Die Adressvergabe für die Relaiskarten erfolgt mit dem Senden des Initialisierungskommandos. Die erste Karte erhält die im Kommandorahmen mitgesendete Adresse; alle nachfolgenden Karten erhalten eine jeweils um 1 inkrementierte Adresse. Die Adresse 0 ist als Broadcastadresse reserviert.

Tabelle 3.5 zeigt die möglichen Kommandos und Antworten (Byte 0), sowie die jeweilige Bedeutung des Datenbytes (Byte 2). Die Kommandos „Set Single“, „Del Single“ und „Toggle“ stehen in älteren Versionen der Relaiskarte nicht zur Verfügung.

Tabelle 3.5.: Kommandos und Antworten der Relaiskarte, nach [5]

Bezeichnung	Kommando		Antwort		Beschreibung
	Byte 0	Byte 2	Byte 0	Byte 2	
No Operation	0	-	255	-	keine Aktion
Setup	1	-	254	Info	Initialisierung
Get Port	2	-	253	Daten	Schaltzustände abfragen
Set Port	3	Daten	252	-	Schaltzustände setzen
Get Option	4	-	251	Option	Optionen abfragen
Set Option	5	Option	250	-	Optionen setzen
Set Single	6	Daten	249	Daten	einzelnes Relais einschalten
Del Single	7	Daten	248	Daten	einzelnes Relais ausschalten
Toggle	8	Daten	247	Daten	einzelnes Relais umschalten

4. Software

Im folgenden werden die entwickelten Softwareprogramme vorgestellt. Sie gliedern sich in die Kategorien Messwerterfassung (DMM4020_reader_v2, SpectrometerReader), Steuerung (RelaisCardController), sowie Bilddatenauswertung (MATLAB Skripte). An die Software werden folgende Anforderungen gestellt:

- Sie muss auf einem GNU/Linux System ausführbar sein
- Es soll der Grundsatz „Ein Programm erfüllt genau eine Aufgabe“ gelten
- Die einzusetzenden Programmiersprachen sind C und MATLAB
- Programme, die in der Programmiersprache C geschrieben sind, sollen sich möglichst an den POSIX-Standard halten
- Programme, die Messdaten ändern oder konvertieren, sollen nach dem Konzept der UNIX-Filter realisiert werden

Die genannten Anforderungen garantieren gut wartbare Software und vermeiden, dass ein hoch komplexes, nicht erweiterbares Programm entsteht. Gerade das Konzept der UNIX-Filter kann hierzu beitragen.

Ein solches Filter ist ein Programm, das Datensätze z.B. Messwerte zeilenweise von der Standardeingabe liest und Datensätze zeilenweise auf die Standardausgabe schreibt. Die Anzahl der gelesenen Datensätze muss nicht mit der Anzahl der geschriebenen Datensätze übereinstimmen; auch kann das Format von Ein- und Ausgabe unterschiedlich sein. Sollten weitere Parameter benötigt werden, so werden diese als Aufrufargumente übergeben.

Solche Filter lassen sich miteinander kombinieren, indem sie mittels einer Pipe hintereinander geschaltet werden. Die Pipe verknüpft dabei die Standardausgabe des vorhergehenden Programms mit der Standardeingabe des nachfolgenden Programms.

Angewandt auf die konkrete Problemstellung bedeutet dies, dass beispielsweise die Ausgabe der Messwerterfassung (bei Strommessung) von einer spannungsrichtigen in eine

stromrichtige Messung umgerechnet werden kann und die korrigierten Werte zur Berechnung der Ladung aufintegriert werden können. Hierzu sind dann zwei Filterprogramme nötig. Eines, das die Messdaten umrechnet; ein weiteres, das die Integration übernimmt. Diese Filterung kann sowohl auf bereits aufgezeichnete Daten der Messwerterfassung erfolgen, indem diese aus einer Datei gelesen werden, sie ist aber auch in Echtzeit auf die Ausgabe der Messwerterfassung anwendbar.

Das in diesem Beispiel beschriebene Szenario findet auch im regulären Messbetrieb statt. Die Messwerterfassung erfolgt mit dem Programm „DMM4020_reader_v2“ (siehe Kapitel 4.1), die Korrektur des gemessenen Stromes übernimmt das Filterprogramm „CurrentCorrector“ (vgl. Kapitel 4.6. Die korrigierten Messwerte werden vom Filter „CurrentIntegrator“, beschrieben im Kapitel 4.5, zur Ladung aufintegriert.

Diesem Konzept folgend wären viele weitere sinnvolle Filterprogramme ergänzbar, ohne an der bestehenden Software Änderungen durchführen zu müssen. So ist z.B. ein Mittelwertfilter denkbar, das eine Glättung der Messwerte vornimmt.

4.1. DMM4020 Reader (v2)

Dies ist das zentrale Programm für die Messwerterfassung elektrischer Messgrößen des im vorigen Kapitel 3 beschriebenen Messplatzes. Es kann die Multimeter „DMM4020“ der Firma Tektronix, sowie „45“ von Fluke steuern.

Diese Multimeter verfügen über einen Kommandointerpreter, auf den über eine 9-polige RS232 Schnittstelle zugegriffen werden kann. Über den Kommandointerpreter kann nicht nur der aktuelle Messwert abgefragt werden, sondern auch der Messmodus, die Messgeschwindigkeit, sowie das Ausgabeformat festgelegt werden. Beide Geräte verwenden, trotz dem sie von unterschiedlichen Herstellern stammen, dieselben Kommandos. Eine detaillierte Auflistung und Beschreibung aller Kommandos kann in der Bedienungsanleitung [22] des „DMM4020“, bzw. in der Gebrauchsanleitung [9] des „45“ eingesehen werden.

Aufruf:

```
DMM_Reader_v2 -f file -d dev [-s] [-m mode] [-i sec]
```

Tabelle 4.1 beschreibt die Parameter des Programms. Argumente in eckigen Klammern sind optional. Tabelle 4.2 listet alle gültigen Messmodi für den Parameter „-m“ auf.

Funktionsweise:

Das Ziel des Programms ist es, möglichst äquidistant in einem zuvor eingestellten Messintervall Messwerte zu erfassen. Um dies gewährleisten zu können, bedient es sich eines

Tabelle 4.1.: DMM4020_reader_v2 - Parameter

Parameter	Beschreibung
-f	Logdatei. Wird ohne Warnung überschrieben, wenn sie existiert.
-d	Geräte-datei des seriellen Anschlusses.
[-s]	Gibt das Kürzel (siehe Tabelle 4.2) des Messmodus nach jedem Messwert aus, wenn angegeben.
[-i]	Messintervall in Sekunden. Standardwert ist 1 Sekunde. Wird 0 angegeben, beträgt das Messintervall 500 Millisekunden.
[-m]	Messmodus (siehe Tabelle 4.2). Standardwert ist 0 (Gleichspannung).

Tabelle 4.2.: DMM4020_reader_v2 - Messmodi

Messmodus	Kürzel	Beschreibung
0	VDC	Gleichspannung
1	VAC	Wechselspannung
2	ADC	Gleichstrom
3	AAC	Wechselstrom
4	VACDC	Spannung TrueRMS
5	AACDC	Strom TrueRMS
6	OHMS	Widerstand

Software-Timers, der bei Ablauf einen Softwareinterrupt, ein sogenanntes Signal, auslöst. Tritt ein solches Signal auf, wird dem empfangenden Prozess vom Scheduler des Betriebssystems bevorzugt Rechenzeit zur Verfügung gestellt, um auf dieses Ereignis reagieren zu können. Somit ist auch bei einer hohen Systemauslastung eine äquidistante Messwerterfassung möglich.

Mit Erhalt des Signals wird ein Messwert vom Multimeter angefordert, ausgelesen und auf der Konsole, sowie in die Logdatei ausgegeben. Anschließend wird der Prozess mittels des Funktionsaufrufs *pause()* gezielt in den Blocking-Zustand versetzt. In diesem Zustand benötigt der Prozess keine CPU-Zeit und das Betriebssystem kann diese anderen Prozessen zur Verfügung stellen. Mit dem Erhalt des nächsten Signals kehrt der Prozess aus dem Blocking-Zustand zurück und die Ausführung wird nach der Abarbeitung des Signalhandlers an der zuvor unterbrochenen Stelle fortgeführt.

Dieses Vorgehen bringt allerdings ein Problem mit sich. Gibt der Prozess etwas auf der Konsole aus oder schreibt er etwas in eine Datei, so wird er ebenfalls für die Dauer der Ausgabe in den Blocking-Zustand versetzt. Problematisch daran ist, dass die Dauer der Ausgabe nicht bekannt ist und von verschiedenen Faktoren abhängt. Im Falle der Logdatei kann dies die Schreibgeschwindigkeit und Auslastung des Speichermediums, im Falle der Bildschirmausgabe das Ausgabeverhalten des Konsolenprogramms sein; gerade Letzteres variiert im Zeitverhalten mit der Auslastung des Systems.

Erhält der Prozess ein Signal, während er sich aufgrund einer Ausgabe im Blocking-Zustand befindet, so passiert Folgendes:

Die Ausgabe wird an undefinierter Stelle abgebrochen und der Prozess läuft bis zum nächsten Aufruf von *pause()* weiter. Damit fehlt ein Messwert, die Äquidistanz der Messwerte ist nicht mehr gewahrt und der vorige Messwert wurde unter Umständen nicht vollständig gespeichert.

Um dieses Problem zu umgehen, bedient sich das Programm eines zweiten Prozesses, der ausschließlich der Ausgabe dient, während die timergesteuerte Messwerterfassung im ersten Prozess abläuft. Die Kommunikation zwischen den beiden Prozessen erfolgt mittels einer Pipe. Ein schreibender Zugriff auf die Pipe kann zwar prinzipiell auch zu einem Blocking-Zustand führen, jedoch nur, wenn ihre maximale Kapazität erreicht wird. Dieser Fall tritt bei den hier verwendeten, geringen Datenmengen jedoch nicht auf.

Ein weiterer Signalhandler fängt den Druck auf CTRL-C ab und leitet ein geordnetes Beenden des Programms ein. Unvollständige Einträge am Ende der Logdatei werden so wirksam vermieden.

Den grundlegenden Programmablauf zeigt Abbildung 4.1 in Form eines Nassi-Shneiderman-Diagramms. Der Quellcode des Programms kann in Anhang B.1 eingesehen werden.

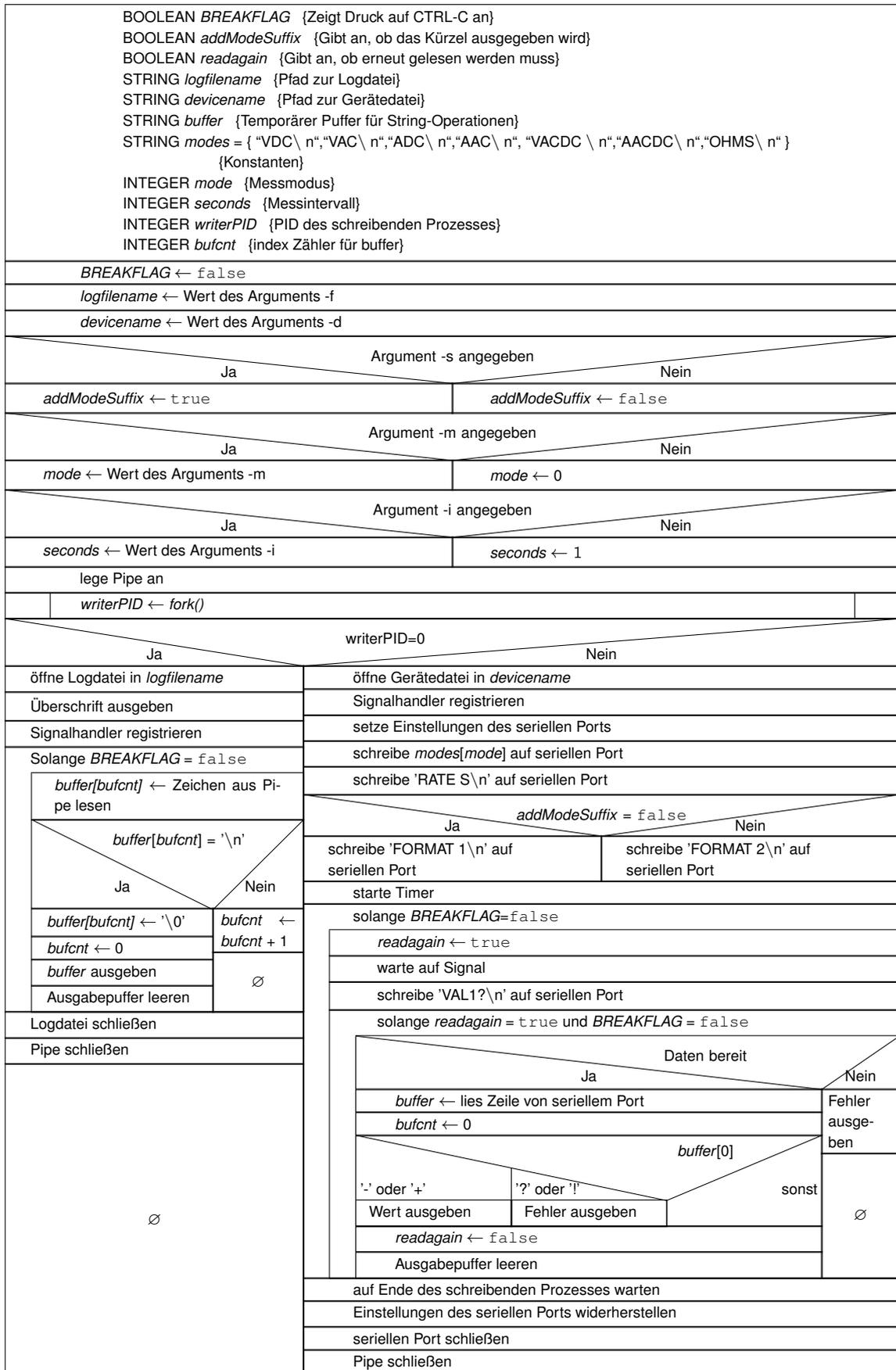


Abbildung 4.1.: DMM4020 Reader (v2) - Programmablauf

4.2. SpectrometerReader

Mit diesem Programm kann das Spektrometer „LR1-T“ von ASEQ Instruments angesteuert und zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Reflexionsspektren verwendet werden. Das Aufzeichnungsintervall und die Belichtungszeit sind einstellbar; der „Fast“-Modus, in dem das Spektrometer nach einem nicht näher bekannten Verfahren eine Interpolation durchführt und nur die Hälfte der Messpunkte ausgibt, wird ebenfalls unterstützt.

Für den Betrieb des Spektrometers werden keine weiteren Treiber benötigt. Es wird vom Linux-Kernel nach dem Anschließen als standard USB-HID-Gerät erkannt und ihm werden zwei Gerätedateien „/dev/hiddev#“ und „/dev/hidraw#“ zugewiesen. Letztere wird von diesem Programm zur Kommunikation mit dem Spektrometer verwendet.

Da in der Regel nur der „root“-Benutzer Zugriff auf die Gerätedatei hat, ist es ratsam, eine „udev“-Regel ¹ zu erstellen, die einem Benutzer oder einer Gruppe den Zugriff gestattet. Anhang B.2.4 zeigt ein Bash-Skript, das eine Gruppe „spectrometer“ einrichtet und eine entsprechende „udev“-Regel anlegt. Die Benutzer dieses Programms brauchen nur noch der neuen Gruppe hinzugefügt werden. Das Bash-Skript in Anhang B.2.5 entfernt die „udev“-Regel wieder und löscht die Gruppe „spectrometer“.

Aufruf:

```
SpectrometerReader -f file -d dev [-t] [-e expTime] [-i sec]
```

Tabelle 4.3 beschreibt die Parameter des Programms. Argumente in eckigen Klammern sind optional.

Tabelle 4.3.: SpectrometerReader - Parameter

Parameter	Beschreibung
-f	Logdatei. Wird ohne Warnung überschrieben, wenn sie existiert.
-d	Gerätedatei (raw) des Spektrometers.
[-s]	Benutzt den „Fast“-Modus, wenn angegeben.
[-i]	Messintervall in Sekunden. Standardwert ist 60 Sekunden.
[-e]	Belichtungszeit in Schritten von 2,375ms. Standardwert ist 1 (=2,375ms).

¹„userspace /dev“, Programm mit dem der Linux-Kernel zur Laufzeit dynamisch Gerätedateien hinzufügt oder entfernt

Funktionsweise:

Das Programm folgt dem gleichen Zwei-Prozess-Aufbau mit Softwareinterrupts und Timern, wie das im vorigen Kapitel 4.1 beschriebene Programm „DMM4020_reader_v2“.

Der Vorgang zum Lesen eines Spektrums folgt der Spezifikation [2] und dem Beispielcode des Herstellers. Nach der Initialisierung des Spektrometers folgt das Auslesen der fünf Koeffizienten (A, B, C, a, b) und des Korrekturspektrums. Diese Werte sind geräteabhängig, aber für alle Messungen gleich. Das Korrekturspektrum gleicht Unregelmäßigkeiten des verbauten CCD-Sensors². Zwei der Koeffizienten dienen der Grundlinienkorrektur, die übrigen drei geben die Wellenlänge der Messpunkte an. Die Messpunkte sind nicht äquidistant, sondern folgen einem Polynom zweiten Grades.

$$\lambda_i = A^2 \cdot i + B \cdot i + C \quad \text{für } 0 \leq i < 3653 \quad (4.1)$$

Nun kann die fortwährende Aufnahme von Spektren beginnen. Hierzu wird die Aufnahme gestartet und aktiv auf ihre Beendigung gewartet. Anschließend wird der interne Adresszeiger des Spektrometers zurückgesetzt und das Spektrum aus dem Speicher ausgelesen. Den grundlegenden Programmablauf zeigt Abbildung 4.2 in Form eines Nassi-Shneiderman-Diagramms. Anhang B.2.1 zeigt den Quellcode.

Für die notwendigen Interaktionen mit dem Spektrometer liefert der Hersteller eine DLL-Datei³ mit, wodurch der Einsatz jedoch auf PCs mit dem Windows-Betriebssystem von Microsoft beschränkt wird. Um die darin realisierten Funktionen auch auf dem hier zu verwendenden GNU/Linux-Betriebssystem bereitstellen zu können, wurde das Verhalten der DLL auf einem Windows-PC mit der Software „USB Pcap“ untersucht. Alle Funktionen, bis auf jeden zum Auslesen des Spektrums, konnten so nachgebildet werden. Jene Funktion liest nicht nur den Speicherinhalt mit den Messdaten aus, sondern wendet auf diese auch einen nichtlinearen Korrekturalgorithmus an. Dank der Kooperation des Herstellers, welcher den Quellcode der DLL zur Verfügung stellte, konnte auch diese Funktion nachgebildet werden. Abbildung 4.3 zeigt ein Struktogramm des Korrekturalgorithmus; die nachgebildeten Funktionen sind in den Anhängen B.2.2 und B.2.3 einsehbar.

²CCD, Charge coupled device, engl. für ladungsgekoppeltes Bauelement

³DLL, Dynamic link library

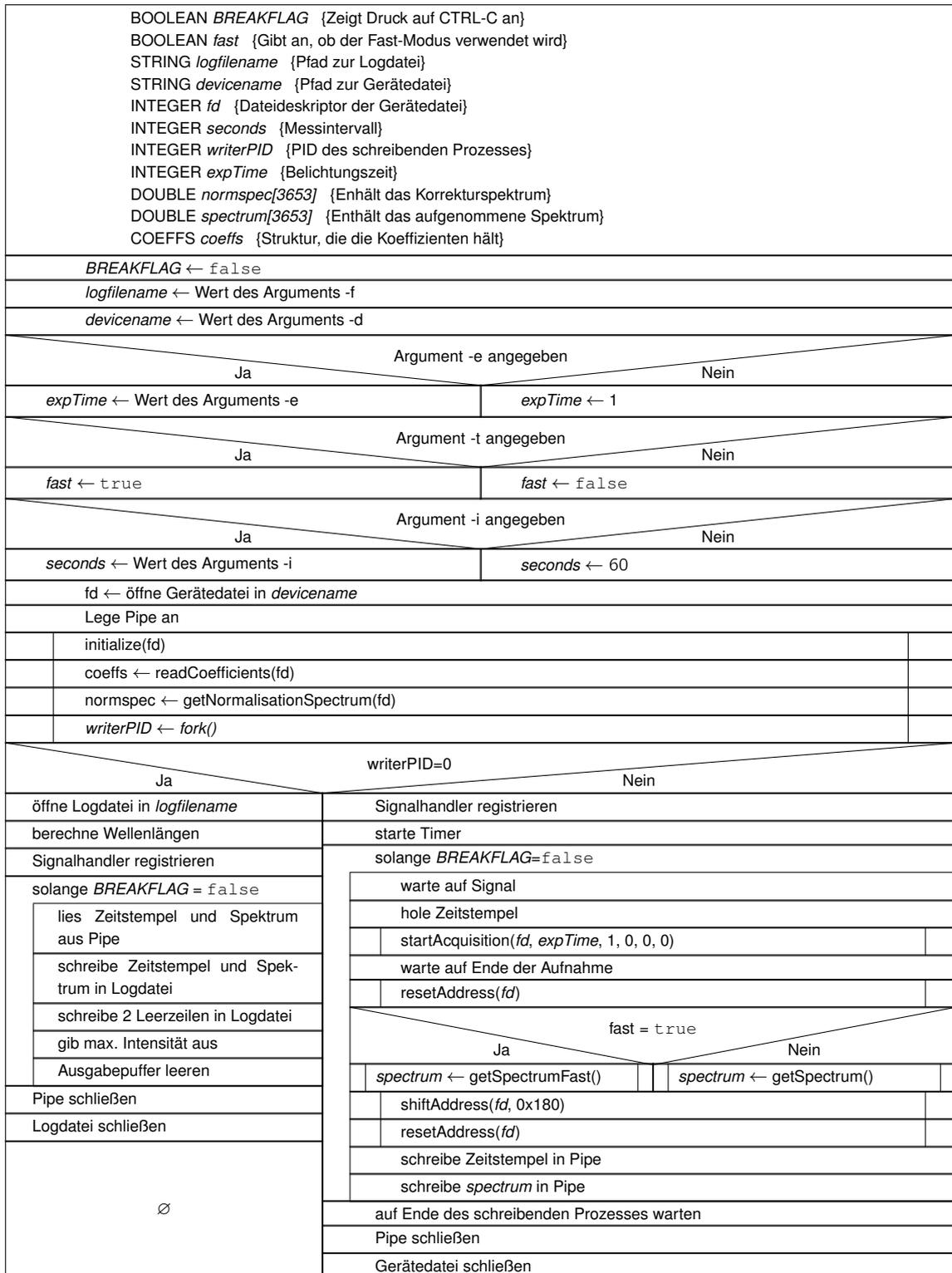


Abbildung 4.2.: SpectrometerReader - Programmablauf

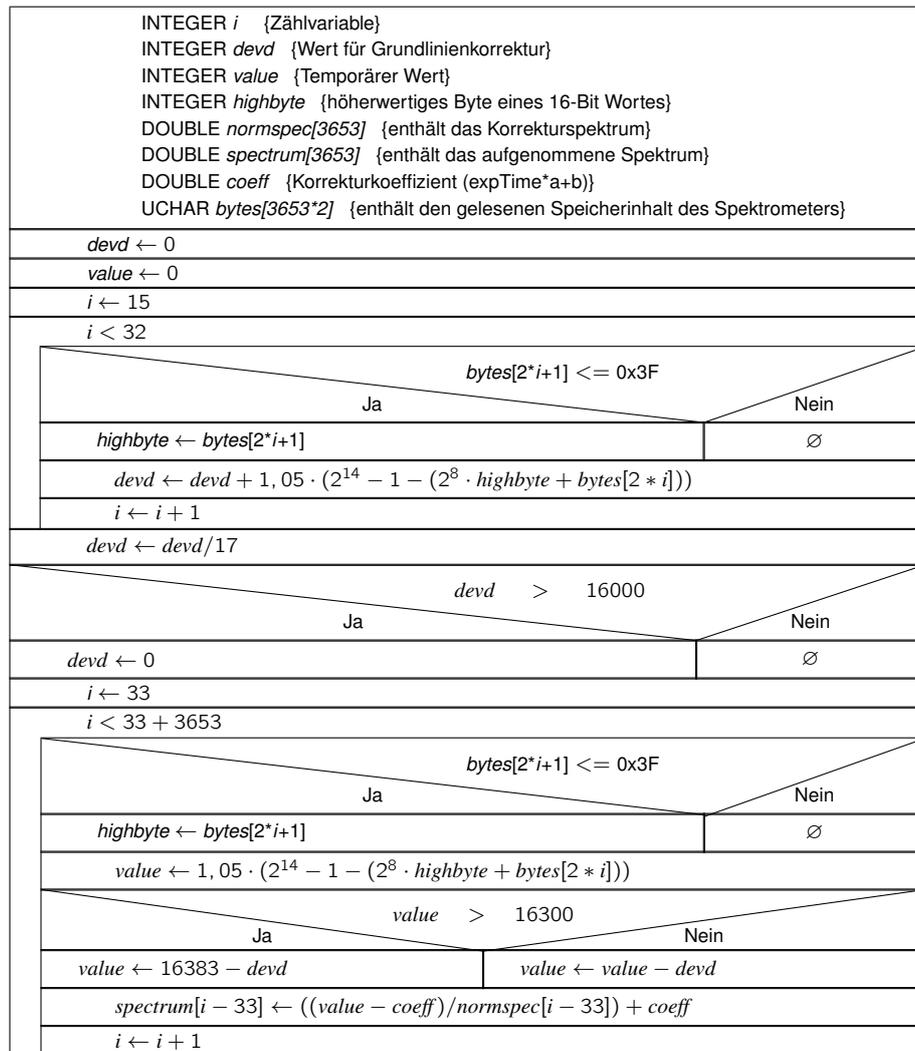


Abbildung 4.3.: SpectrometerReader - Korrekturalgorithmus für Spektrometerdaten

4.3. RelaisCardController

Dies ist das zentrale Programm für die Steuerung des Messaufbaus. Es dient der Steuerung einer beliebigen Anzahl von 8-Kanal-Relaiskarten der Firma Conrad, sofern diese an denselben seriellen Port angeschlossen sind. Bis zu 255 dieser Karten können gemäß Bedienungsanleitung [5] kaskadiert an einem seriellen Port betrieben werden und sind über fortlaufende, acht Bit breite Adressen ansprechbar. Die Adresse 0 stellt dabei die Broadcast-Adresse dar, mit der ein Kommando auf allen Karten zur Ausführung gebracht werden kann. Da dieses Programm nur ein Minimum der verfügbaren Kommandos benutzt, ist es nicht nur möglich Relaiskarten unterschiedlicher Schaltleistung, sondern auch ältere Karten früherer Revisionen gemeinsam zu betreiben.

Das Programm arbeitet eine Befehlsdatei, welche in Form einer reinen Textdatei vorliegen muss, ab. Es kennt dabei nur zwei unterschiedliche Befehle: „wait X“ und „setport X Y“. Erster hält die Ausführung für X Sekunden an, letzterer setzt das Ausgangsregister der Relaiskarte X auf den Wert Y. Die Wertigkeiten der einzelnen Relais zeigt Tabelle 3.3 in Kapitel 3.3.1. Eine Kombination von Relais kann durch Addition der einzelnen Wertigkeiten geschaltet werden. Der Befehl „setport 1 3“ würde die Relais 1 und 2 der Karte mit Adresse 1 einschalten und die Relais 3 bis 8 ausschalten. Die Schaltzustände der anderen Karten bleiben unbeeinflusst. Kommentarzeilen werden mit dem Symbol „#“ eingeleitet; die Groß-/Kleinschreibung der Befehle ist egal. Als Beispiel für eine Befehlsdatei seien hier die Zyklrierpläne in Anhang D.4 angeführt.

Die Ausführung kann jederzeit durch einen Druck auf CTRL-C abgebrochen werden.

Aufruf:

```
RelaisCardController -f file -d dev
```

Tabelle 4.4 beschreibt die Parameter des Programms.

Tabelle 4.4.: RelaisCardController - Parameter

Parameter	Beschreibung
-f	Befehlsdatei
-d	Gerätedatei des seriellen Ports.

Funktionsweise:

Nach dem Herstellen der Verbindung zur Relaiskarte und dem Öffnen der Befehlsdatei arbeitet das Programm als einfacher Text-Parser. Es liest jeweils eine Zeile der Befehlsdatei und prüft ihren Inhalt.

Beginnt die die Zeile mit einem „#“, wird direkt zur nächsten Zeile übergegangen; beginnt sie mit „wait“, so wird versucht eine nachfolgende Zahl auszulesen. Bei Erfolg wird die entsprechende Anzahl an Sekunden gewartet. Dies erfolgt mittels der Betriebssystemfunktion *sleep()*.

Fängt die Zeile mit „setport“ an, wird versucht, die nachfolgenden Parameter Adresse und Wert auszulesen. Bei Erfolg wird ein entsprechender Kommandorahmen vorbereitet und an die Relaiskarte gesendet.

Die Kommunikation mit der Relaiskarte erfolgt über das vom Hersteller vorgegebene, in Kapitel 3.3.3 beschriebene Protokoll. Zur einfacheren Handhabung dieses Protokolls verwendet dieses Programm folgende Unterfunktionen:

- **void** write_frame(**int** dev, FRAME *frame)
Sendet einen Kommandorahmen an die Relaiskarte.
- **int** read_frame(**int** dev, FRAME *frame)
Liest einen Kommandorahmen von der Relaiskarte. Rückgabewert 1 bei Erfolg; sonst -1.
- **unsigned char** calculate_checksum(**const** FRAME *frame)
Berechnet die Prüfsumme des Kommandorahmens und gibt diese zurück.
- **void** init_frame(FRAME *frame, **unsigned char** command, **unsigned char** address, **unsigned char** data)
Initialisiert einen neuen Kommandorahmen.
- **int** verify_frame(**const** FRAME *frame)
Testet den Kommandorahmen auf die korrekte Prüfsumme. Gibt 1 bei positivem, 0 bei negativem Testergebnis zurück.
- **void** place_command(**int** dev, FRAME *frame)
Sendet den Kommandorahmen solange wiederholt an die Relaiskarte, bis diese die Ausführung des Kommandos bestätigt.

Der vollständige Quellcode ist in Anhang B.3 abgedruckt. Den grundlegenden Programmablauf zeigt das Nassi-Shneiderman-Diagramm in Abbildung 4.4

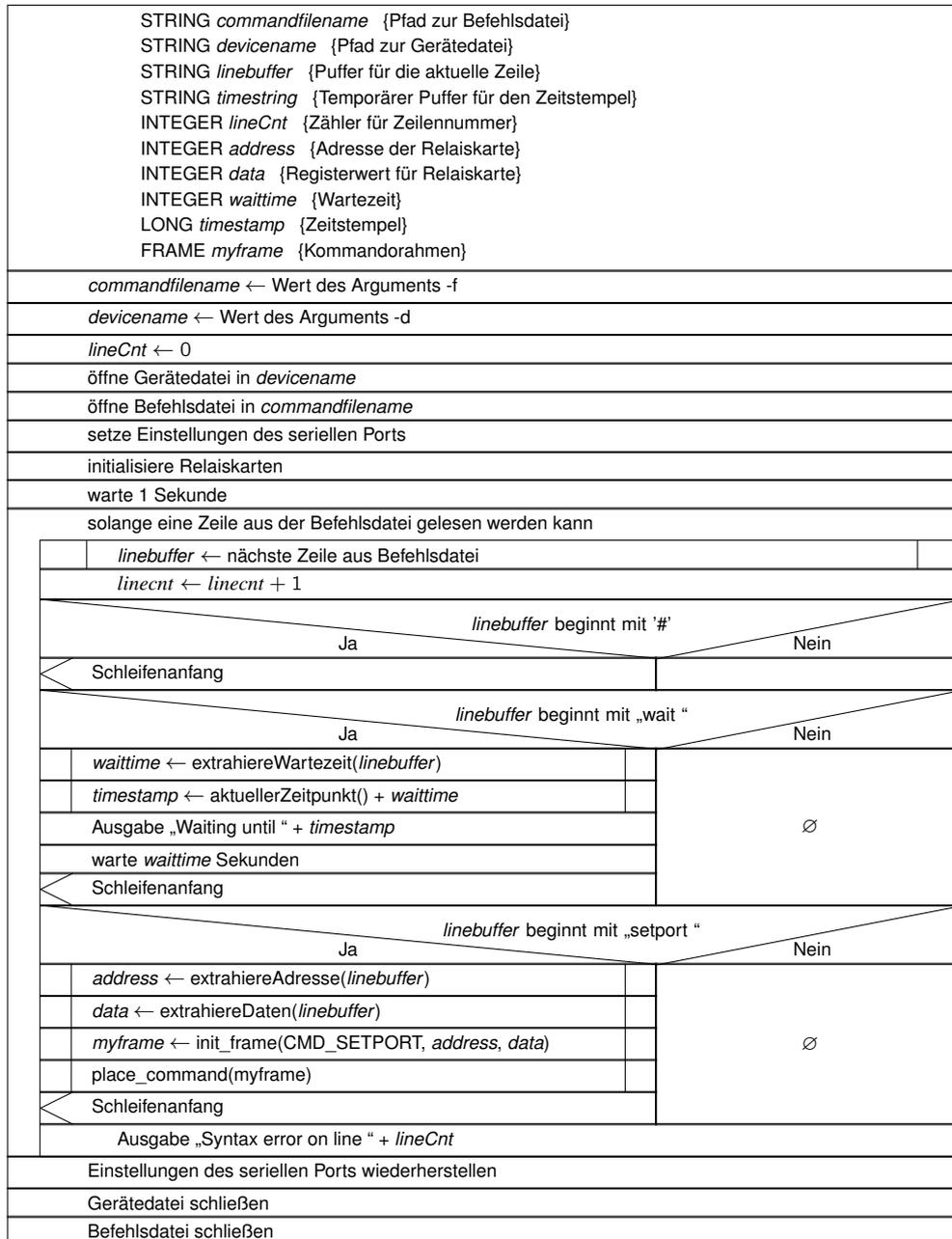


Abbildung 4.4.: relaisCardController - Programmablauf

4.4. FileChecker

Dieses Programm dient der Überprüfung von Befehlsdateien des im Kapitel 4.3 beschriebenen Programms „relaisCardController“. Da ein Fehler dort erst zum Zeitpunkt der Auswertung der betroffenen Zeile entdeckt werden kann, ist es wünschenswert, die Befehlsdatei direkt nach dem Editieren prüfen zu können.

Aufruf:

```
fileChecker -f file
```

Tabelle 4.5 beschreibt die Parameter des Programms.

Tabelle 4.5.: fileChecker - Parameter

Parameter	Beschreibung
-f	Befehlsdatei

Funktionsweise:

Die Funktionsweise des Programms entspricht etwa der des Programms „relaisCardController“. Es wurden lediglich die Programmteile, welche mit der Relaiskarte kommunizieren, gestrichen und einige Ausgaben ergänzt. Der Nutzer wird abschließend über die Anzahl der gefundenen Fehler, sowie über die Gesamtlaufzeit der Befehlsdatei informiert.

4.5. CurrentIntegrator

Dies ist das erste Filterprogramm, welches im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Es liest die Ausgabe des in Kapitel 4.1 beschriebenen Programms „DMM4020_reader_v2“ oder die des im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Filterprogramms „CurrentCorrector“ und berechnet das Integral der Messwerte über die Zeit in jedem Punkt. Damit ermöglicht es, aus einer Strommessung die umgesetzte Ladung in Amperesekunden bzw. Coulomb zu errechnen.

Zur numerischen Integration bedient sich das Filter der Sehnen trapezformel. Hierbei wird die Fläche unter einer Kurve auf einem Intervall durch ein Trapez, dessen einer Schenkel, der nicht im rechten Winkel zu den Grundseiten steht und die Kurve auf den Intervallgrenzen schneidet, angenähert. Abbildung 4.5 veranschaulicht dies. Die Fläche Q des Trapezes ist dabei gegeben durch [8]:

$$Q = (i(a) + i(b)) \cdot (b - a) \cdot \frac{1}{2} \quad (4.2)$$

Das Gesamtintegral wird durch Summation der Einzelflächen zwischen den Messpunkten gebildet.

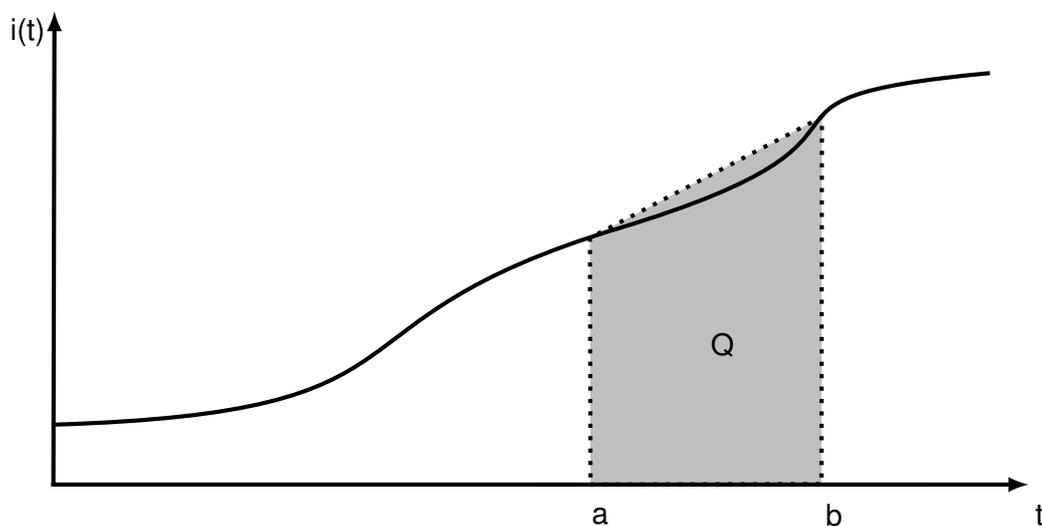


Abbildung 4.5.: Numerische Integration - Sehnen trapezregel

Aufruf:

```
CurrentIntegrator < inputfile > outputfile  
| CurrentIntegrator
```

Funktionsweise:

Das Filter liest zeilenweise von der Standardeingabe und extrahiert den Zeitstempel sowie den Messwert. Es berechnet die umgesetzte Ladung mittels der Daten aus der vorherigen Zeile und addiert sie zur gesamten Ladung auf, welche unter Verwendung des Zeitstempels der aktuellen Zeile auf die Standardausgabe geschrieben wird. Die ausgegebene Ladung für die erste verarbeitete Zeile beträgt 0; Kommentarzeilen werden unverändert übernommen. Ein Nassi-Shneiderman-Diagramm, welches den Algorithmus des Filter darstellt, zeigt Abbildung 4.6. Der Quellcode des Filters ist in Anhang B.5 einzusehen.

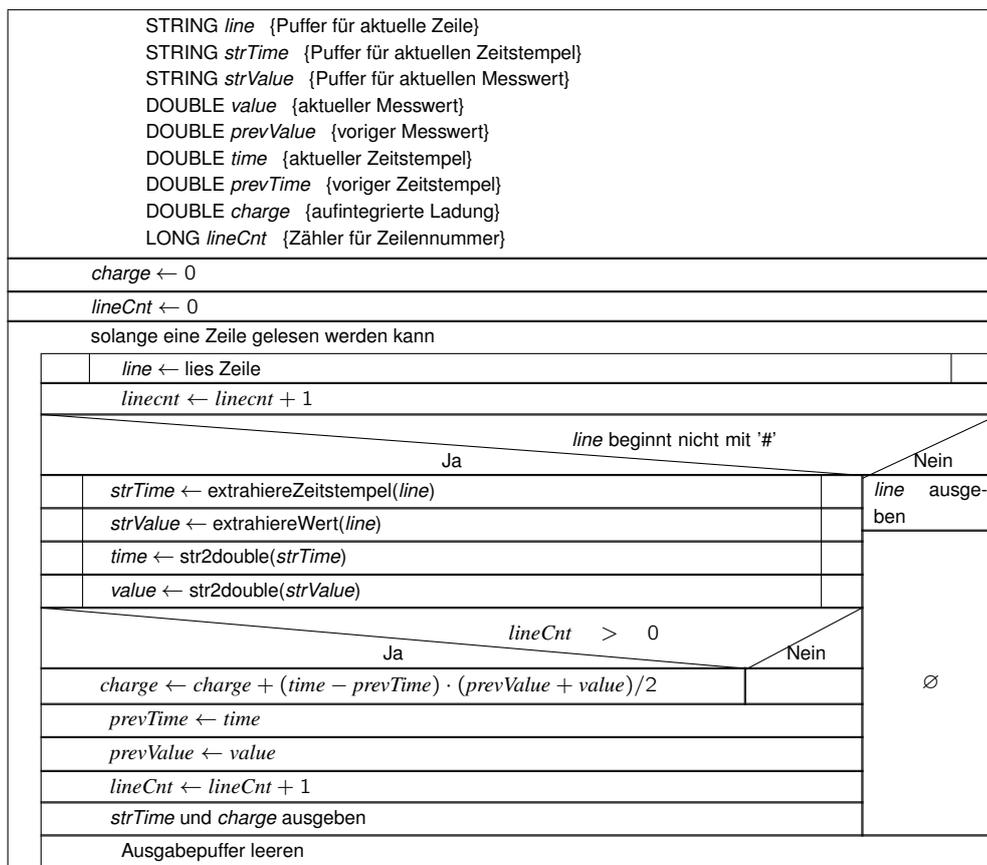


Abbildung 4.6.: CurrentIntegrator - Programmablauf

4.6. CurrentCorrector

Die in Kapitel 3.3.1 beschriebene Messschaltung führt zu einem systematischen Messfehler (vgl. Kapitel 3.3.2) bei der Messung des Zellstroms. Mit diesem Filterprogramm kann der Zellstrom I_Z aus dem gemessenen Strom I unter Angabe einiger Parameter mittels der in Kapitel 3.3.2 angegebenen zweiteiligen Funktionsvorschrift berechnet werden. Das Filter ist in der Lage, die Ausgabe des in Kapitel 4.1 beschriebenen Programms „DMM4020_reader_v2“ direkt zu verarbeiten.

Aufruf:

```
CurrentCorrector -l ohms -u volts -i ohms -c ohms
                < inputfile > outputfile
```

```
| CurrentCorrector -l ohms -u volts -i ohms -c ohms
```

Tabelle 4.6 beschreibt die Parameter des Programms.

Tabelle 4.6.: CurrentCorrector - Parameter

Parameter	Beschreibung
-f	Entladewiderstand in Ohm
-u	Ladespannung in Volt
-i	Innenwiderstand des Voltmeters in Ohm
-c	Ladewiderstand in Ohm

Funktionsweise:

Das Filter liest zeilenweise von der Standardeingabe und extrahiert den Zeitstempel, sowie den Messwert. Je nach Vorzeichen des Messwerts, wird der entsprechende Teil der Funktionsvorschrift angewendet. Das Ergebnis wird zusammen mit dem Zeitstempel auf die Standardausgabe geschrieben. Kommentarzeilen werden unverändert übernommen. Der Quellcode des Filterprogramms ist in Anhang B.6 einzusehen. Abbildung 4.7 zeigt ein Nassi-Shneiderman-Diagramm, welches den Programmfluss des Filters darstellt.

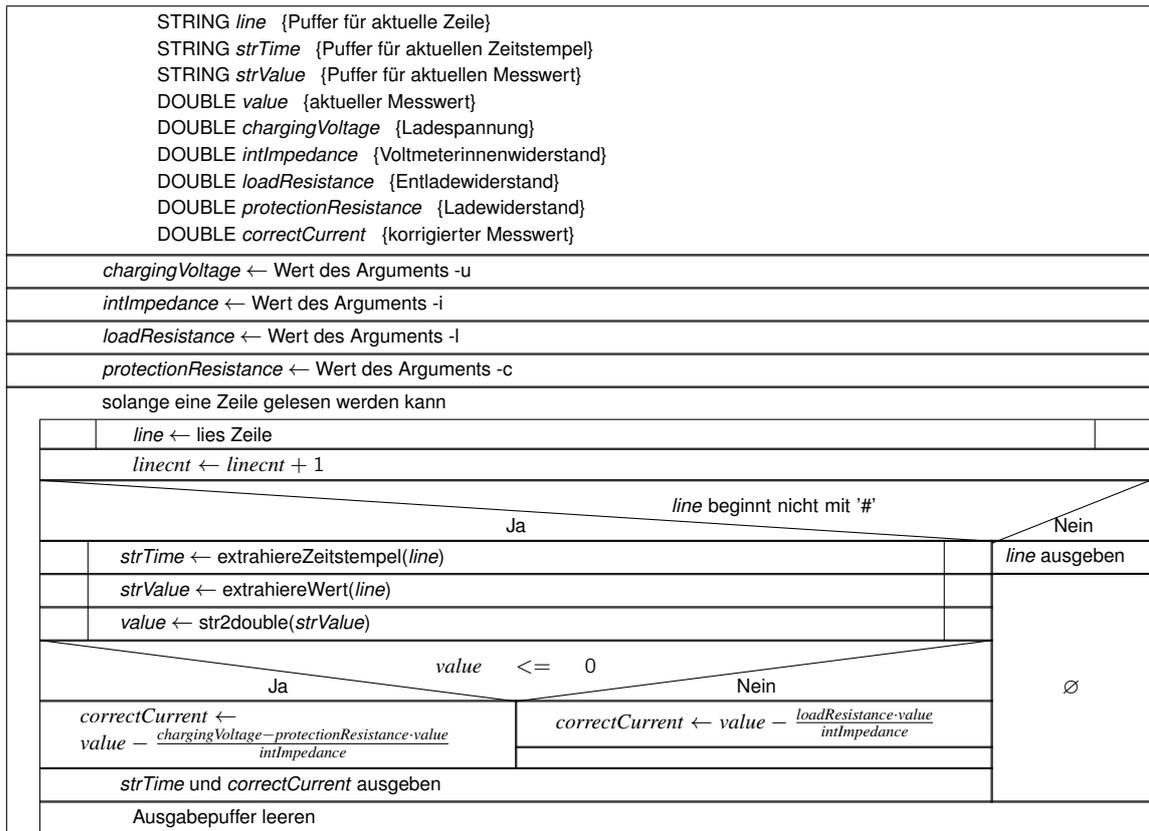


Abbildung 4.7.: CurrentCorrector - Programmablauf

4.7. Farbraumanalyse im RGB-Farbmodell

Das hier beschriebene MATLAB-Skript dient der Auswertung der von den Mikroskopkameras aufgezeichneten Bilddaten; es ist in Anhang B.7 abgedruckt.

Ziel der Auswertung ist ein Intensitätsverlauf über alle Aufnahmen für jeden der drei Farbkanaäle rot, grün und blau.

Den Kameras wird das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Verhalten unterstellt. Da auf die Belichtungssteuerung und den Weißabgleich der Kamera keinen Einfluss genommen werden kann, ist eine Kompensation der ermittelten absoluten Intensitätswerte erforderlich. Das Kompensationsverfahren, sowie die Auswahlkriterien für die benötigte Referenzfläche werden in den Unterkapiteln 4.7.1 und 4.7.2 beschrieben.

Für die Auswertung dürfen die Aufnahmen nicht verwackelt sein; ebenso darf der Bildausschnitt keine Verschiebungen zwischen den Aufnahmen aufweisen. Sind Verschiebungen aufgetreten, so sind die jeweiligen Bilderserien in getrennten Unterverzeichnissen abzuliegen. Diese Bilderserien ohne Verschiebungen des Bildausschnitts werden nachfolgend „Parts“ genannt.

Nach dem Start fragt das Skript zunächst die Anzahl der Parts ab. Anschließend folgt für jeden Part die Wahl des Verzeichnisses, des auszuwertenden Bildausschnitts und die des als Referenz zu verwendenden Bildausschnitts. Die Angabe eines Ausschnitts erfolgt über die Position seiner linken, oberen Ecke und seiner Größe. Alle Angaben erfolgen in Pixel, die Positionen sind in der üblichen Form mit null-basierten Indices anzugeben. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der linken, oberen Ecke des Bildes.

Danach liest das Skript alle Aufnahmen ein und berechnet für jeden Ausschnitt den Mittelwert der Intensität aller Pixel für jeden Farbkanal. Während der Berechnung wird der Fortschritt angezeigt.

Dann folgt die Kompensationsrechnung, die Ausgabe der Korrelation zwischen auszuwertender Fläche und Referenzfläche, sowie der Export der Intensitätswerte in eine Textdatei. Die Datei wird mit einem grafischen Dialog ausgewählt; sie hat folgendes Format:

```
Zeitstempel rot grün blau rot_kompensiert grün_kompensiert blau_kompensiert
```

Abschließend folgt eine grafische Darstellung der Intensitätsverläufe der auszuwertenden Fläche und der Referenzfläche sowie des kompensierten Intensitätsverlaufs in absoluten und relativ zur Gesamtintensität gesehenen Werten.

Tabelle 4.7 zeigt die nach der Ausführung des Skripts zur Verfügung stehenden Variablen und ihre Bedeutung.

Tabelle 4.7.: Variablen des Skripts „intensitaetsverlauf_kompensiert.m“

Variable	Bedeutung
blue	Intensitätswerte - blau
blue_c	Intensitätswerte - blau (kompensiert)
blue_ref	Intensitätswerte - blau (Referenzfläche)
dates	Aufnahmezeitpunkte
exportfile	Pfad zur exportierten Textdatei
green	Intensitätswerte - grün
green_c	Intensitätswerte - grün (kompensiert)
green_ref	Intensitätswerte - grün (Referenzfläche)
noFiles	Anzahl der Aufnahmen pro Part
parts	Anzahl der Parts
path	Pfade zu den Verzeichnissen je Part
red	Intensitätswerte - rot
red_c	Intensitätswerte - rot (kompensiert)
red_ref	Intensitätswerte - rot (Referenzfläche)
sumIntensity	Gesamtintensitätswerte
sumIntensity_c	Gesamtintensitätswerte (kompensiert)
sumIntensity_ref	Gesamtintensitätswerte (Referenzfläche)
xpos	horizontale Position des Bildausschnitts
xpos_ref	horizontale Position des Bildausschnitts (Referenzfläche)
xsize	horizontale Größe des Bildausschnitts
xsize_ref	horizontale Größe des Bildausschnitts (Referenzfläche)
ypos	vertikale Position des Bildausschnitts
ypos_ref	vertikale Position des Bildausschnitts (Referenzfläche)
ysize	vertikale Größe des Bildausschnitts
ysize_ref	vertikale Größe des Bildausschnitts (Referenzfläche)

4.7.1. Kompensationsverfahren

Die Kompensation der durch die Belichtungskorrektur der Kamera auftretenden Helligkeitsunterschiede soll durch die Verwendung einer Referenzfläche kompensiert werden. Der zu untersuchende Effekt darf sich nicht auf diese Referenzfläche auswirken.

Es ist davon auszugehen, dass die Belichtungsregelung der Kamera auf jeden Bildpunkt einer Aufnahme gleich angewendet wird, aber von Aufnahme zu Aufnahme unterschiedlich ist. Deshalb darf die Kompensation nicht auf Werten aus anderen Aufnahmen beruhen, sondern nur Werte aus der aktuellen Aufnahme verwenden. Durch die automatische Weißabgleichsregelung kann sich zusätzlich eine Verschiebung von Intensitätsanteilen von einem zu einem anderen Farbkanal ereignen. Die Kompensation sollte daher für jeden Farbkanal getrennt stattfinden und nur Werte des jeweiligen Farbkanals verwenden.

Unter den gegebenen Bedingungen gibt es nur zwei Möglichkeiten, nach denen die Kompensation erfolgen kann. Zum einen ist eine Verhältnisbildung der Intensitäten der auszuwertenden Fläche zur Referenzfläche möglich, zum anderen eine Differenzbildung der Intensitäten. Letztere ist nicht geeignet, da sie es erfordern würde, dass die Referenzfläche eine ähnliche absolute Helligkeit wie die auszuwertende Fläche aufweist. Die Referenzfläche kann der sich ändernden auszuwertenden Fläche jedoch nicht in ihrer Helligkeit folgen.

Die Kompensation wird folglich als Verhältnisbildung realisiert. Um ein etwa genauso großes Ausgangssignal zu erhalten, wird das Verhältnis mit dem Mittelwert aller Referenzwerte skaliert. Die Wahl dieses Faktors ist willkürlich. Die Gleichungen 4.3 bis 4.8 zeigen den funktionalen Zusammenhang.

Es gebe eine Bilderserie mit I Aufnahmen. Die M mal N Pixel große auszuwertende Fläche sei eine Matrix $E(i)$ der Dimension $M \times N$ von Vektoren C , die die drei Farbwerte eines jeden Bildpunkts enthalten.

$$C = \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Die Referenzfläche der Größe P mal Q Pixel, sei eine ebenso aufgebaute Matrix $R(i)$ der Dimension $P \times Q$. Der Mittelwert $\mu_E(i)$ der auszuwertenden Fläche für das i -te Bild ergibt sich dann zu:

$$\mu_E(i) = \begin{pmatrix} \mu_{E,r}(i) \\ \mu_{E,g}(i) \\ \mu_{E,b}(i) \end{pmatrix} = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E(i)_{m,n} \quad (4.4)$$

Der Mittelwert $\mu_R(i)$ der Referenzfläche für das i -te Bild ist dementsprechend:

$$\mu_R(i) = \begin{pmatrix} \mu_{R,r}(i) \\ \mu_{R,g}(i) \\ \mu_{R,b}(i) \end{pmatrix} = \frac{1}{P \cdot Q} \cdot \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q R(i)_{p,q} \quad (4.5)$$

Die kompensierten Intensitätsverläufe $V_r(i)$, $V_g(i)$ und $V_b(i)$ für die drei Farbkanäle errechnen sich dann nach:

$$V_r(i) = \frac{\mu_{E,r}(i)}{\mu_{R,r}(i)} \cdot \sum_{k=1}^I \mu_{R,r}(k) \quad (4.6)$$

$$V_g(i) = \frac{\mu_{E,g}(i)}{\mu_{R,g}(i)} \cdot \sum_{k=1}^I \mu_{R,g}(k) \quad (4.7)$$

$$V_b(i) = \frac{\mu_{E,b}(i)}{\mu_{R,b}(i)} \cdot \sum_{k=1}^I \mu_{R,b}(k) \quad (4.8)$$

4.7.2. Wahl der Referenzfläche

Als Referenzfläche kommen verschiedene Bereiche der Aufnahme in Betracht. Nachfolgend soll eine begründete Auswahl getroffen werden. Folgende Flächen sind von den Elektrodeneffekten nicht beeinflusst und potentiell geeignet.

- Deckel
- Deckel, eingefärbt
- Stromsammler
- Separator

Der Stromsammler bietet gegenüber dem Deckel den Vorteil, dass auch vom Glas verursachte Effekte, welche unerwünscht, aber eventuell vorhanden sind, in die Kompensation einfließen. Dies trifft gleichermaßen auf den Separator zu, welcher weiterhin die Einflüsse des Elektrolyts in die Kompensation einbringen kann. Er wäre daher die ideale Referenzfläche.

In der Praxis sieht dies jedoch anders aus. Dunkle Bereiche der Aufnahme, wie z.B. die zu untersuchende Elektrodenoberfläche, weisen gegenüber hellen Flächen ein nicht unerhebliches Rauschen in der Intensität auf. um dieses Rauschen mit dem zuvor beschriebenen

Kompensationsverfahren zu unterdrücken, muss der Betrag der Korrelation zwischen den mittleren Intensitätswerten der Referenzfläche und der auszuwertenden Fläche möglichst groß sein. Dies erfordert, dass die Referenzfläche der auszuwertenden Fläche in Farbgebung und Struktur ähnlich sein muss. Es wird daher ein dunkel eingefärbter Bereich des Deckels als Referenzfläche verwendet, da sich auf diesen ohne Beeinflussung der Zellchemie Farbstoffe aufbringen lassen.

4.8. Tools

Im Rahmen der Auswertung sind einige kleine Skripte entstanden. Sie werden hier kurz aufgezählt und ihre Funktion erläutert.

- **spectrometer2matlab.m** liest die Logdatei des Programms „SpectrometerReader“ und bringt sie in eine für MATLAB verwertbare Form. Dieses Skript macht von Betriebssystemfunktionen Gebrauch und ist nur in einer MATLAB-Installation auf einem GNU/Linux Betriebssystem lauffähig (Quellcode siehe Anhang B.8.2).
- **showSpectra.m** erzeugt eine grafische Auswertung der mittels „spectrometer2matlab“ erzeugten Datei. Es wird eine Absolutwertdarstellung und eine Differenzdarstellung berechnet (Quellcode siehe Anhang B.8.1).
- **restoreDate.sh** stellt die Datumsstempel aller Dateien im aktuellen Verzeichnis anhand der Exif-Tags wieder her. Das Verzeichnis darf nur JPEG-Dateien mit gültigen Exif-Tags enthalten (Quellcode siehe Anhang B.8.3).

5. Auswertung und Bewertung der Messreihen

Hier werden die durchgeführten Messreihen vorgestellt und bei der Auswertung gemachte Beobachtungen diskutiert. Eine vollständige Auswertung der elektrischen Messdaten befindet sich in Anhang D.1. Die Daten sind bis auf die Korrektur des systematischen Messfehlers der Strommessung unverändert. Eine vollständige unveränderte Auswertung der Kameradaten findet sich in Anhang D.2. Die Auswertung in Anhang D.3 macht von der Kompensationsrechnung (vgl. Kapitel 4.7.1) Gebrauch. Anhang D.4 zeigt die verwendeten Zyklierpläne. Sprünge in den Intensitätsverläufen sind in der Regel auf einen Neustart der Kameraaufzeichnung, welche mit einem erneuten Ausrichten des Bildausschnitts einhergeht, zurückzuführen. Sind zwei Bereiche des Intensitätsverlaufs durch eine Gerade verbunden, so wurden in diesem Zeitraum keine Bilddaten aufgezeichnet. Beide Erscheinungen betreffen stets alle drei Farbkanäle.

5.1. Übersicht über die Zellaufbauten

Die überwiegende Anzahl der Zellaufbauten aus elementarem Lithium als Anode und einer Kathode aus LiFePO_4 bzw. FePO_4 . Es wurden auch Anoden aus Graphit untersucht. Die genauen Aufbauten zeigt Tabelle 5.1; die Tabellen D.1 und D.2 in Anhang D schlüsseln die exakte stoffliche Zusammensetzung der Elektroden in absoluten Masseangaben, wie auch Gewichtsprozent auf.

Die für das Filterprogramm „CurrentCorrector“ verwendeten Parameter zeigen die Tabellen D.3 (Widerstandswerte) und D.4 (Ladespannungen) in Anhang D.1. Die Tabellen D.5, D.6 und D.7 in Anhang D.2 enthalten die zur Auswertung verwendeten Bildausschnitte.

Bis einschließlich der ersten Hälfte der Messreihe 5 wurde die Zyklierung manuell durchgeführt. Ab der zweiten Hälfte ist die automatische, mittels Relaiskarte gesteuerte Zyklierung in Betrieb genommen worden. Mit Beginn von Messreihe 7 wurde der Messplatz um eine dritte Messzelle erweitert. Die Abdeckkästen sind ab Messreihe 5 eingesetzt worden; seit Messreihe 7 verfügen sie über die aus Stoff gefertigte Umgebungslichtabschirmung für die Kabeldurchführung sowie gummierte Fußkanten.

Tabelle 5.1.: Elektrodenmaterialien: Material „V-4“ ist ITO-haltiges FePO_4 , Material „V-2“ ist mit ITO versetztes LiFePO_4 . Bei dem Material „I-1“ handelt es sich um LiFePO_4 mit Kohlenstoff, „I-5“ ist kohlenstofffreies LiFePO_4 . „C“ bezeichnet ein kommerzielles Anodenmaterial.

Messreihe	Aufbaudatum	Zelle 1		Zelle 2		Zelle 3	
		Anode	Kathode	Anode	Kathode	Anode	Kathode
2	28.03.2014	Li	V-4	Li	V-4		
3	07.04.2014	Li	V-4	Li	V-4		
4	15.04.2014	Li	V-4	Li	V-4		
5	25.04.2014	Li	V-4	Li	V-4		
6	12.05.2014	Li	I-1	Li	V-4		
7	23.05.2014	Li	I-1	Li	V-2	Li	Sp
8	11.06.2014	Li	I-1	Li	I-5	C	Li
9	20.06.2014	Li	I-5	Li	V-2	C	Li
10	04.07.2014	Li	I-1	Li	I-5	C	Li
11	23.07.2014	Li	I-5	Li	V-2	Li	V-4

Alle Zellen sind unter Argon-Schutzatmosphäre zusammengebaut worden. Die Aufzeichnung von Zellspannung und Zellstrom erfolgte bei allen Messreihen im Sekundentakt.

5.2. Messreihe 2

Messreihe 2 wird mit zwei gleichen Zellaufbauten durchgeführt. Die Zellen enthalten eine mit ITO versehene FePO_4 -Kathode (Probenbezeichnung „V-4“), welche gegen Lithiummetall als Anode betrieben wird. Da die Kathoden noch kein Lithium enthalten, befinden sich beide Zellen nach dem Zusammenbau chemisch gesehen im geladenen Zustand.

Es sollen die Veränderungen an den positiven Elektroden, sowie die Ströme und Ruhepotentiale der Zellen bei einmaliger Ladung bzw. Entladung untersucht werden. Hierfür wird der im Folgenden beschriebene Ablauf verwendet.

Beide Zellen werden einer mehrtägigen Ruhephase ausgesetzt. Anschließend folgt eine sechsstündige Entladung von Zelle 1 und eine ebenfalls sechsstündige Ladung von Zelle 2. Danach folgt wieder eine Ruhephase. Die Aufnahme der Bilddaten erfolgt viertelstündlich.

Während der ersten Ruhephase wird erwartet, dass die Farbgebung der Elektroden sowie das Ruhepotential unverändert bleiben. Bei der Entladung müsste sich die Kathode von Zelle 1 dunkel färben, wohingegen die Kathode der Zelle 2 bei der Ladung unverändert bleiben sollte. Ebenfalls sollte der Ladestrom der Zelle 2 sehr gering sein, da die Zelle bereits voll geladen ist.

Die Beobachtung hat gezeigt, dass die Ruhepotentiale beider Zellen zunächst um etwa 100 mV einbrechen, sich dann aber wieder stabilisieren. Bei beiden Zellen haben sich die Kathoden während der ersten Ruhephase leicht dunkel gefärbt. Dies lässt auf eine Selbstentladung oder eine Entladung, welche durch den Stromfluss durch das Voltmeter hindurch stattfindet, schließen. Der Ladestrom von Zelle 2 ist wie erwartet sehr gering. Nach der Entladung von Zelle 1 tritt eine deutlich erkennbare Dunkelfärbung der Kathode ein. Diese ist auch im Intensitätsverlauf zu erkennen und geht mit der prozentualen Senkung des Rotanteils einher, während der Blauanteil an der Gesamtintensität steigt. Abbildung 5.1 zeigt die Elektrodenoberfläche von Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten. Um die Reversibilität zu prüfen, ist der Ablauf um eine Lade- und eine Entlade-Phase für Zelle 1 erweitert worden. Eine Intensitätszunahme des von der Elektrodenoberfläche reflektierten Lichts bei Zelle 1 konnte nicht beobachtet werden. Der geringe Ladestrom legt den Schluss nahe, dass die Zelle nicht wieder aufgeladen werden kann.

Während der Aufzeichnung der elektrischen Messwerte sind einige nicht korrigierbare Fehler aufgetreten, die dazu führten, dass der Zellstrom zu Beginn eines Wechsels von einer Ruhephase zu einer Lade-/Entlade-Phase nicht aufgezeichnet wurde. Die aus dem Strom berechnete Ladung ist daher nur begrenzt aussagekräftig. Eine falsche Datumseinstellung in den Kameras, sowie die während des Versuchs aufgetretene Sommerzeitumstellung haben dafür gesorgt, dass eine zweifelsfreie Zuordnung der Bilddaten zu den elektrischen Messwerten nicht möglich ist.

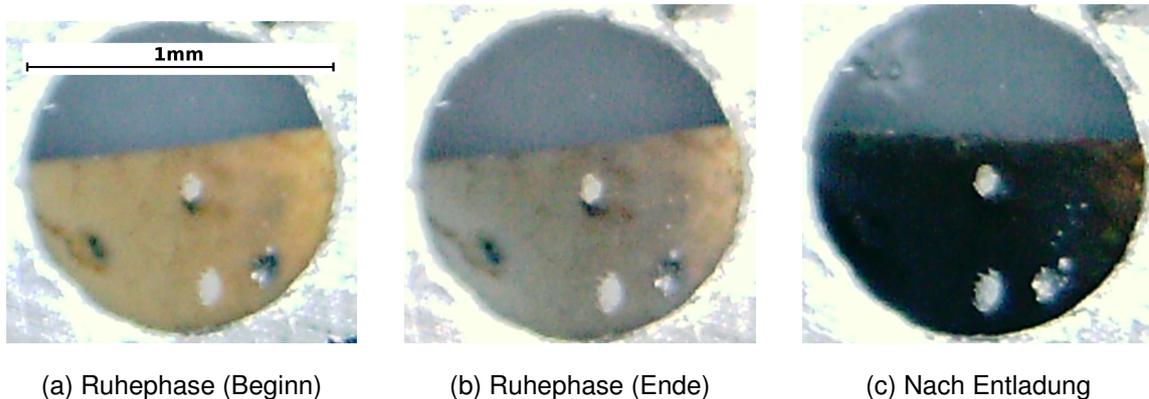


Abbildung 5.1.: Messreihe 2, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten

Die Anhänge D.1.1, D.2.1 und D.3.1 zeigen die elektrischen Messwerte sowie die Intensitätsverläufe ohne und mit angewandeter Kompensationsrechnung. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet.

5.3. Messreihe 3

Aufgrund der in Messreihe 2 aufgetretenen Unzulänglichkeiten bei der Messwerterfassung, wird der Versuch in Messreihe 3 in ähnlicher Form wiederholt. Dazu werden wieder zwei identische Messzellen mit demselben Elektrodenmaterial für die Kathoden aufgebaut. Beide Zellen durchlaufen eineinhalb Zyklen, wobei Zelle 1 mit einer Entladephase und Zelle 2 mit einer Ladephase startet. Die Bilddaten werden ebenfalls im Abstand von 15 Minuten aufgezeichnet.

Während der initialen Ruhephase wird auf die Spannungsmessung verzichtet, um eine Entladung durch das Voltmeter auszuschließen. Eine leichte Dunkelfärbung tritt dennoch auf und lässt auf Selbstentladung als Ursache schließen. Eine starke Dunkelfärbung der Kathode nach der ersten Entladung ist wieder bei beiden Zellen zu beobachten. Sie ist nicht durch Ladung der Zelle umkehrbar. Abbildung 5.2 zeigt die Elektrodenoberfläche von Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten.

Ebenfalls sind die Ladeströme wieder sehr gering und fließen nur für eine kurze Zeit der Ladephase. Eine Betrachtung der umgesetzten Ladung zeigt, dass auch diese Zellen während der Ladephase weniger Ladung aufnehmen, als sie bei der Entladung abgegeben haben.

Die Intensitätsverläufe der Zellen sind denen der Messreihe 2 ähnlich. Das Absinken der Intensität, welches bei der ersten Entladephase erfolgt, ist bei beiden Zellen wieder gut

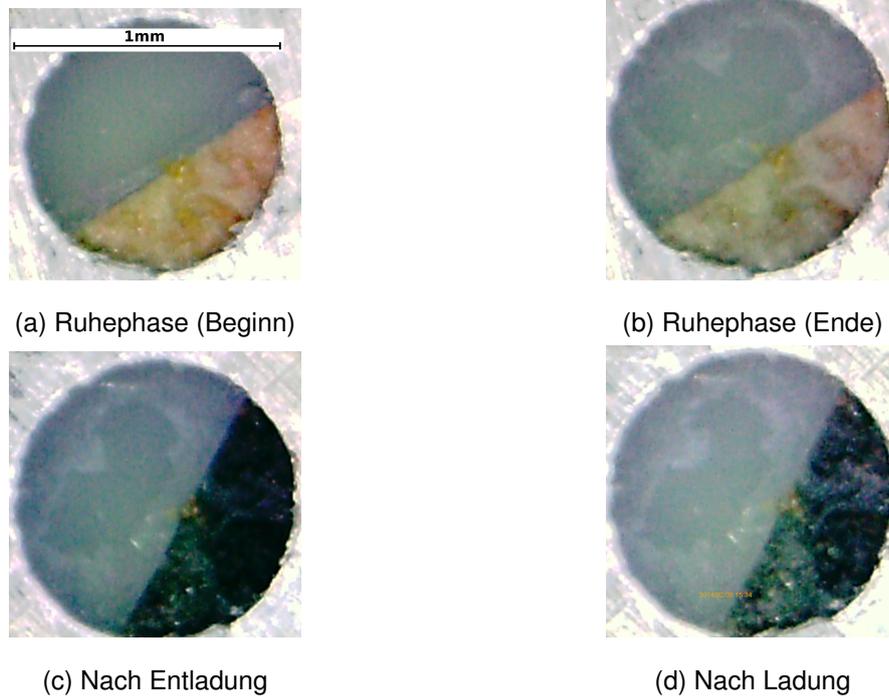


Abbildung 5.2.: Messreihe 3, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten

erkennbar und geht ebenfalls mit der Senkung des Rotanteils, sowie der Steigerung des Blauanteils einher. Zelle 1 weist eine kurzzeitige, unerklärliche Erhöhung der Intensität zu Beginn der zweiten Entladung auf.

Anhang D.1.2 zeigt die aufgezeichneten elektrischen Messwerte. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet. Die Anhänge D.2.2 und D.3.2 zeigen die Intensitätsverläufe ohne und mit angewendeter Kompensationsrechnung.

5.4. Messreihe 4

Messreihe 4 soll die Ergebnisse der vorigen beiden Messreihen bestätigen. Hierzu werden wieder zwei identische Messzellen mit dem bereits zuvor verwendeten, mit ITO versetzten Eisenphosphat-Kathodenmaterial der Bezeichnung „V-4“ aufgebaut. Die Aufzeichnung der Bilddaten erfolgt wieder in einem 15-minütigen Intervall und beginnt mit einer Ladephase. Die Ladephase wird zweimal für eine einstündige Entladephase unterbrochen. Vor und nach der Entladephase findet je eine 30-minütige Ruhephase statt.

Da mit einer Ladephase begonnen wird, müsste die leichte Dunkelfärbung, welche bei den vorigen Messreihen beobachtet wurde, ausbleiben, wenn diese tatsächlich auf Selbstentladung beruht. Diese Vermutung wird durch die Bilddaten bestätigt. Abbildung 5.3 zeigt die Kathodenoberfläche von Zelle 1 zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

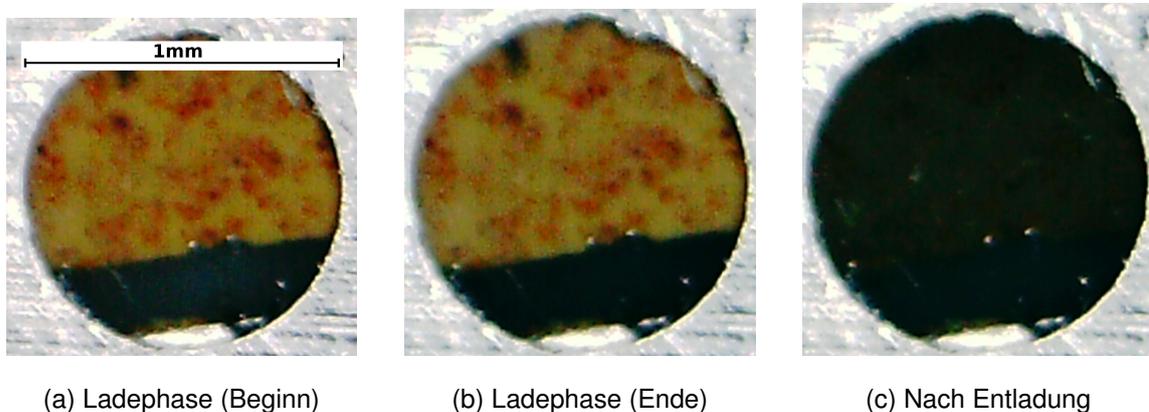
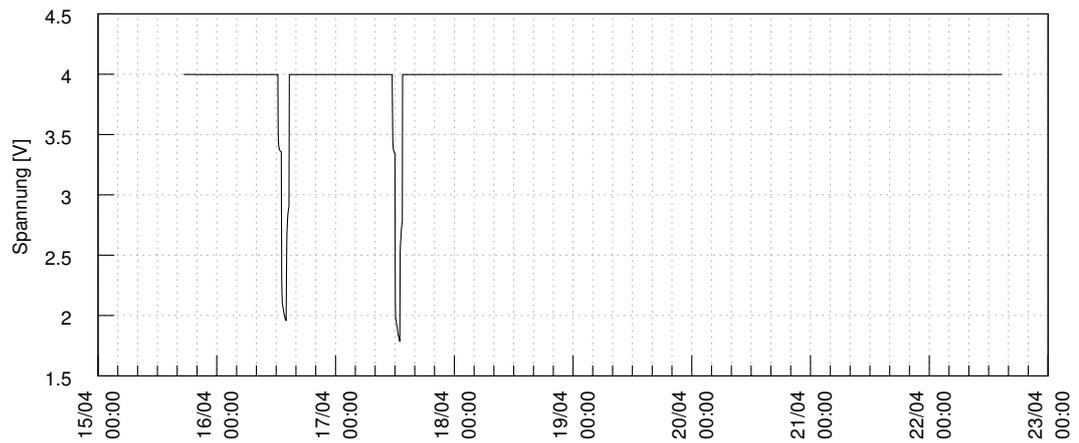


Abbildung 5.3.: Messreihe 4, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten

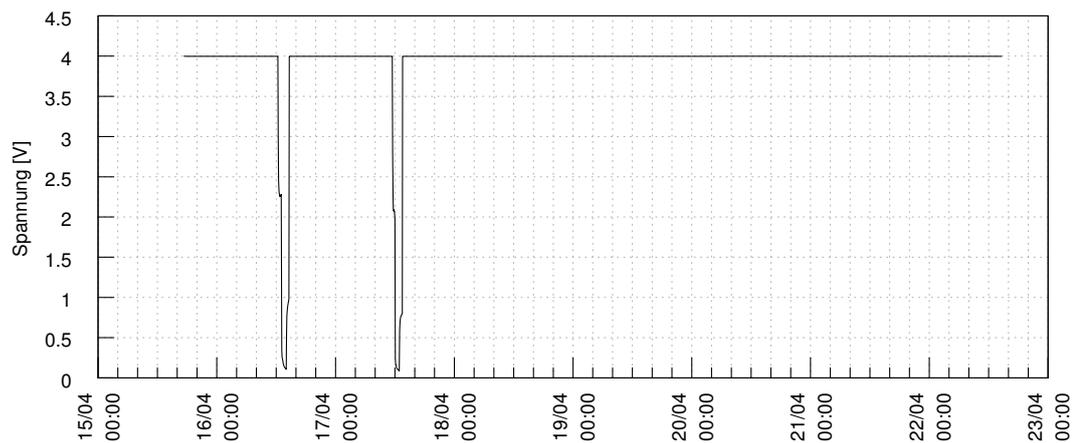
Wieder ist eine starke Dunkelfärbung der Kathodenoberfläche nach der ersten Entladephase zu beobachten. Beide Zellen lassen sich, wie zuvor, kaum aufladen. Dieses Verhalten ist bei Zelle 1 weniger stark ausgeprägt. Abbildung 5.4 zeigt die Spannungsverläufe der beiden Zellen.

Erstmalig folgt der rote Farbkanal der Ladung in seinem Intensitätsverlauf, so wie es in der Theorie erwartet wird. Dieses Verhalten zeigt Abbildung 5.5; es sind die Ladung und die Intensität des roten Farbkanals für Zelle 1 dargestellt.

Die Anhänge D.1.3, D.2.3 und D.3.3 zeigen die elektrischen Messwerte sowie die Intensitätsverläufe ohne und mit angewandeter Kompensationsrechnung. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet.

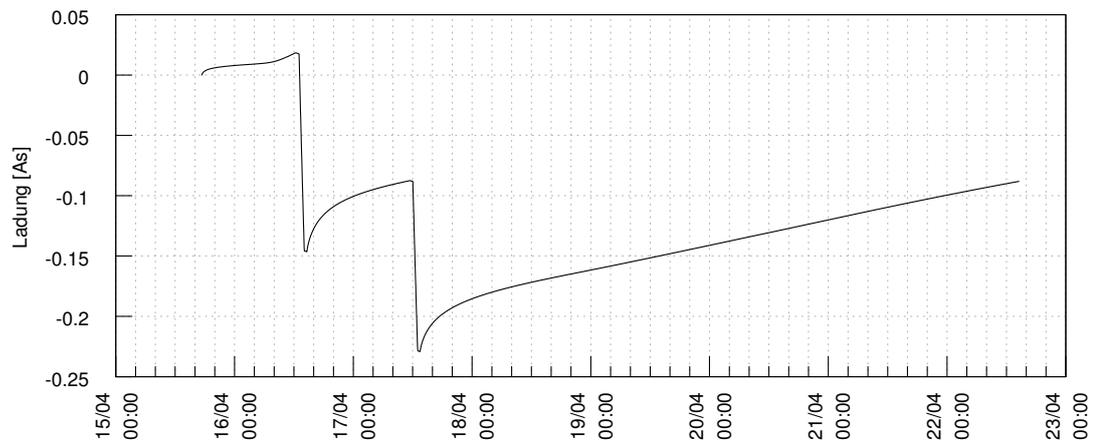


(a) Messreihe 4 - Zelle 1 - Spannung

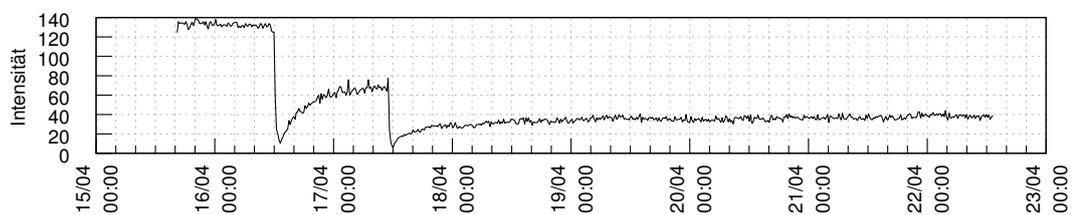


(b) Messreihe 4 - Zelle 2 - Spannung

Abbildung 5.4.: Messreihe 4 - Verlauf der Zellspannung



(a) Messreihe 4 - Zelle 1 - Ladung



(b) Messreihe 4 - Zelle 1 - Intensität rot

Abbildung 5.5.: Messreihe 4, Zelle 1 - Intensitätsverläufe (rot) und elektrische Ladung

5.5. Messreihe 5

Aufgrund des in Messreihe 4 erstmals beobachteten, der Ladung folgenden Intensitätsverlaufs, wird der Versuch abermals durchgeführt. Um das Ruhepotential der Zellen besser untersuchen zu können, wird die Ruhephase gegenüber Messreihe 4 von 30 Minuten auf eine Stunde erhöht. Es werden sechs vollständig Zyklen durchlaufen. Das Aufzeichnungsintervall für die Bilddaten beträgt wieder 15 Minuten.

Wie bei den zuvor durchgeführten Messreihen sind die Ströme während der Ladephase eher klein und die aus ihnen berechnete Ladung zeigt, dass die Zellen während der Entladephase mehr Ladung abgeben als sie in der Ladephase aufnehmen. Auch die starke Dunkelfärbung der Kathodenoberfläche nach der ersten Entladephase ist wieder zu beobachten. Sie ist im Intensitätsverlauf gut zu erkennen. Abbildung 5.7 zeigt dieses Verhalten, welches sich für Kathoden aus FePO_4 als typisch erwiesen hat. Keiner der drei Farbkanäle folgt dem Verlauf der umgesetzten Ladung; das in Messreihe 4 aufgetretene Verhalten kann nicht bestätigt werden. Eine leichte Dunkelfärbung des Kathodenmaterials blieb, wie bereits bei Messreihe 4 beobachtet, aufgrund der initialen Ladephase aus.

Die Ruhepotentiale vor und nach der Entladephase sinken von einem Zyklus zum nächsten stetig ab. Dies liegt in der zunehmenden Entladung der Zellen begründet.

Abbildung 5.6 zeigt die Elektrodenoberfläche von Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten.

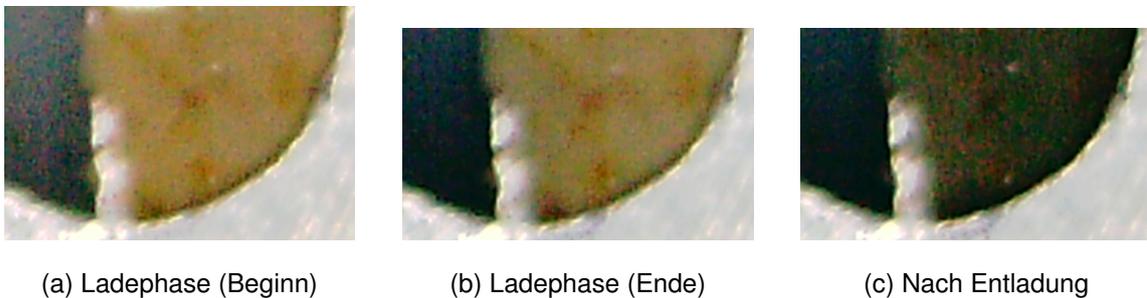


Abbildung 5.6.: Messreihe 5, Zelle 1 zu verschiedenen Zeitpunkten

Anhang D.1.4 zeigt alle aufgezeichneten elektrischen Messwerte. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet. Die Anhänge D.2.4 und D.3.4 zeigen die Intensitätsverläufe aller drei Farbkanäle ohne und mit angewandeter Kompensationsrechnung.

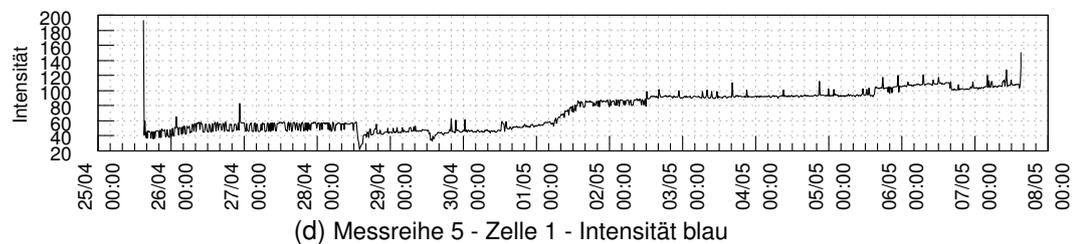
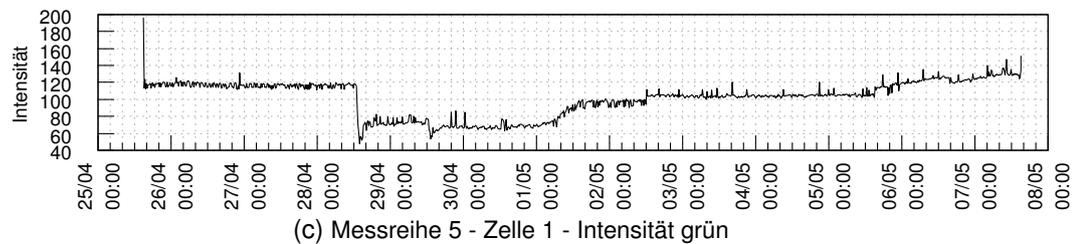
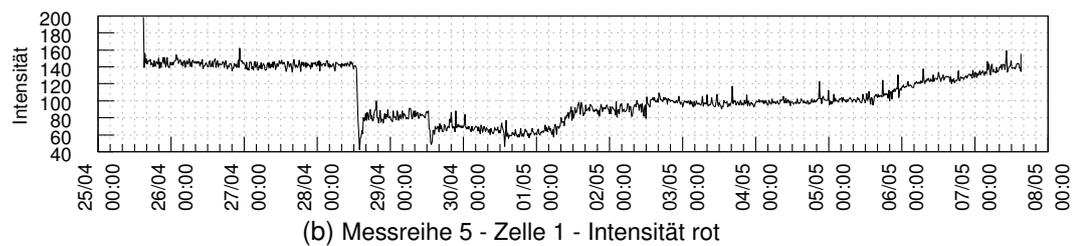
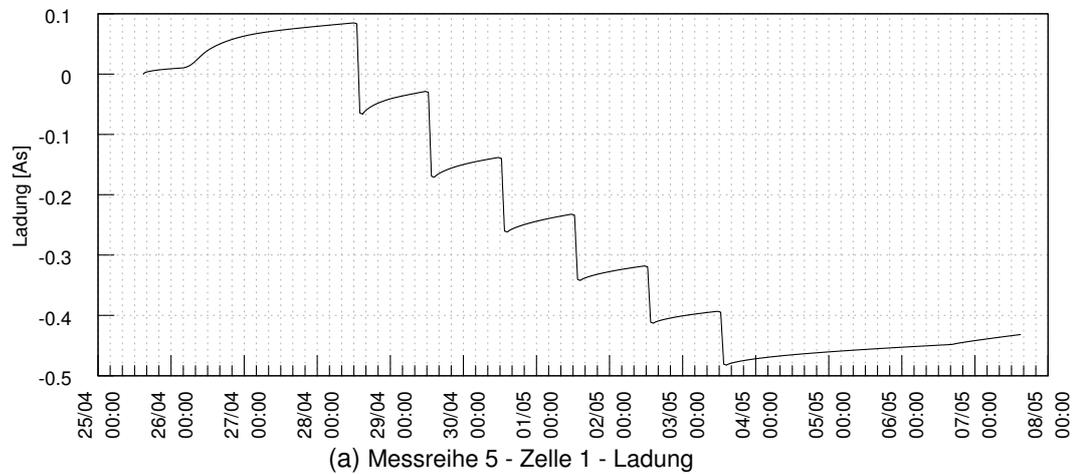


Abbildung 5.7.: Messreihe 5, Zelle 1 - Intensitätsverläufe und elektrische Ladung

5.6. Messreihe 6

Messreihe 6 wird erstmals mit zwei unterschiedlichen Zellaufbauten durchgeführt. Zelle 1 wird aus dem Elektrodenmaterial mit der Probenbezeichnung „I-1“ als Kathode und Lithiummetall als Anode zusammengebaut. Die Kathode besteht aus LiFePO_4 und hat einen Kohlenstoffanteil von ca. 10 %. Es wurde kein ITO beigemischt. Aufgrund des enthaltenen Lithiums ist die Zelle nach dem Zusammenbau teilentladen. Zelle 2 wird, wie in den Messreihen zuvor, mit dem Elektrodenmaterial der Probenbezeichnung „V-4“ bestückt und soll die bisherigen Ergebnisse stützen.

Die Aufnahme der Bilddaten erfolgt viertelstündlich. In den letzten drei Tagen der Messung sind die Bilddaten im Intervall von fünf Minuten aufgezeichnet worden.

Die Messung beginnt mit einer Ladephase, welche fünfmal von einer 60-minütigen Entladephase unterbrochen wird. Vor und nach jeder Entladephase findet eine einstündige Ruhephase statt. Die dazwischen liegenden Ladephasen dauern jeweils 21 Stunden.

Es wird erwartet, dass Zelle 1 aufgrund ihres teilentladenen Zustands zu Beginn der ersten Ladephase einen größeren Ladestrom als bisher aufweist. Die aufgezeichneten Messdaten haben diese Erwartung bestätigt. Der Strom während der initialen Ladephase ist im Startmoment mit etwa 0,5 mA circa eine Größenordnung größer als bei Zelle 2. Weiter ist aus den Messdaten zu erkennen, dass die in der Entladephase abgegebene Ladung in der Ladephase wieder aufgenommen wird. Die Zelle weist nach den fünf Zyklen eine Ladung auf, welche etwa 5,5 As größer als zum Startzeitpunkt ist. Die Ladung wurde bevorzugt in der initialen Ladephase aufgenommen. Das Ruhepotential nach der Entladung ist bei allen Zyklen konstant und liegt knapp unterhalb von 3,4 V. Zelle 1 ist damit die erste Messzelle, die das gewünschte Verhalten einer Sekundärbatterie aufweist.

Der Intensitätsverlauf von Zelle 1 ist anders als die zuvor beobachteten Intensitätsverläufe. Erstmals überwiegt die Intensität des blauen Farbkanals die Intensität des roten Farbkanals. Zudem sind Absenkungen der Intensität im blauen Farbkanal zu den Zeitpunkten der Entladephase zu erkennen. Sie treten nach der Kompensationsrechnung besonders deutlich hervor. Abbildung 5.8 zeigt dieses Verhalten; es sind die elektrische Ladung, die kompensierte Intensität des blauen Farbkanals sowie die anteilige Intensität des roten und des blauen Farbkanals nach der Kompensationsrechnung dargestellt.

Zelle 2 zeigt das bereits zuvor beobachtete Verhalten. Die abgegebene Ladung überwiegt die aufgenommene Ladung; infolge dessen sinkt das Ruhepotential. Mit der ersten Entladephase tritt eine Dunkelfärbung des Kathodenmaterials ein. Abbildung 5.9 zeigt die Elektrodenoberfläche von Zelle 2 zu verschiedenen Zeitpunkten.

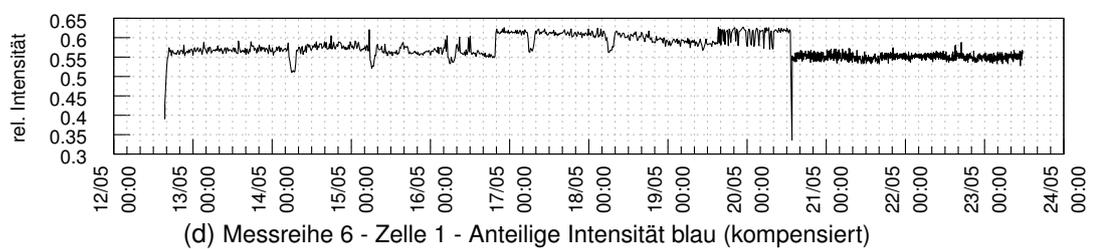
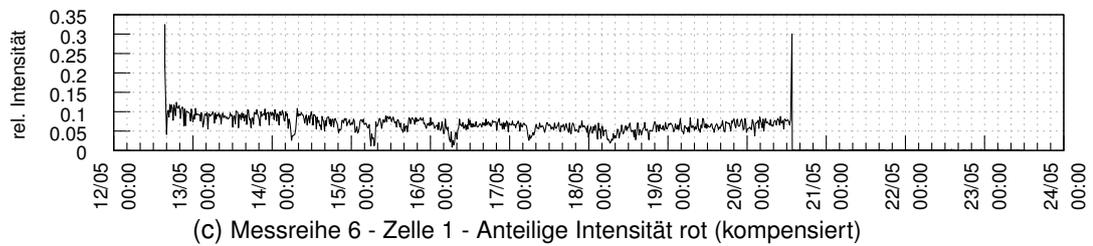
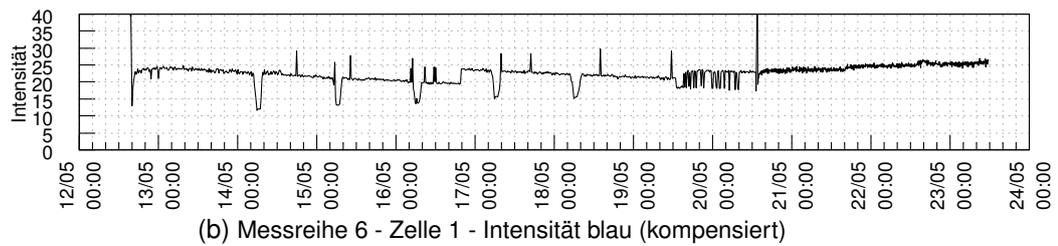
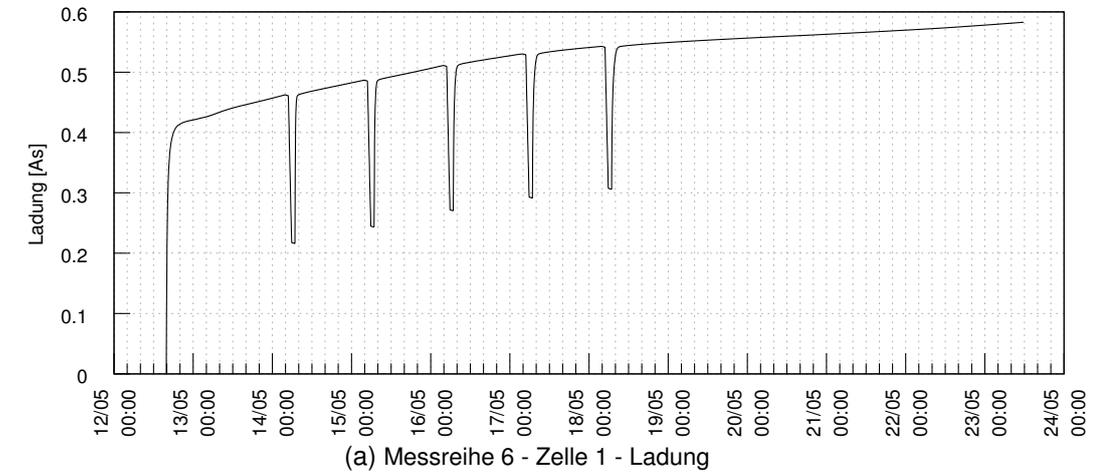


Abbildung 5.8.: Messreihe 6, Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert) und elektrische Ladung



(a) Ladephase (Beginn)

(b) Ladephase (Ende)

(c) Nach Entladung

Abbildung 5.9.: Messreihe 6, Zelle 2 zu verschiedenen Zeitpunkten

Die Anhänge D.1.5, D.2.5 und D.3.5 zeigen alle elektrischen Messwerte sowie die Intensitätsverläufe aller drei Farbkanäle ohne und mit angewendeter Kompensationsrechnung. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet.

5.7. Messreihe 7

Diese Messreihe greift den Aufbau von Zelle 1 aus der vorigen Messreihe auf. Zelle 2 wird mit dem Elektrodenmaterial der Bezeichnung „V-2“ aufgebaut. Es stellt die Kathode der Messzelle dar und wird gegen Lithiummetall als Anode betrieben. Das Material „V-2“ besteht aus LiFePO_4 mit einem ITO-Anteil von ca. 26 %; Kohlenstoff ist nicht enthalten. Dies lässt eine geringere elektrische Leitfähigkeit, dafür aber auch eine bessere Beobachtbarkeit des optischen Effekts erwarten.

Die Messung beginnt mit einer Ladephase. Zunächst wird der Zyklus aus Messreihe 6 (21 Std. laden, 1 Std. Ruhe, 1 Std. entladen, 1 Std. Ruhe) neunmal wiederholt. Anschließend folgt fünfmal, durch Ladephasen getrennt, ein Zyklus aus vier Entlade- und Ruhephasen gefolgt von vier Lade- und Ruhephasen. Die Bilddaten wurden in neun Bilderserien (nachfolgend mit dem Begriff „Parts“ bezeichnet) aufgenommen. In den Parts 1 bis 3 wurde ein fünfminütiges, in den Parts 6 bis 7 ein zweiminütiges und in den Parts 5 und 9 ein einminütiges Aufnahmeintervall verwendet. Für Part 4 wurde ein 15-minütiges, für Part 8 ein vierminütiges Aufnahmeintervall genutzt.

Erstmals wird eine dritte Zelle in einer Messreihe eingesetzt. Sie wird mit Lithiummetall als Anode und dem Elektrodenmaterial mit der Probenbezeichnung „Sp“ als Kathode aufgebaut. Bei der Kathode handelt es sich um eine dünne Schicht aus LiFePO_4 , welche im Sputterverfahren auf eine Aluminiumfolie aufgetragen wurde. Aufgrund der geringeren

Schichtdicke, wird eine geringere Kapazität der Zelle erwartet. Eine zuvor durchgeführte, manuell gesteuerte Entladephase hat gezeigt, dass der Stromfluss durch das Voltmeter die Zellspannung bereits einbrechen lässt. Sie wird daher abweichend von den anderen beiden Zellen zyklisiert. Während Zelle 1 und Zelle 2 in einer Ruhephase sind, verbleibt Zelle 3 in der Ladephase. Befinden sich die ersten beiden Zellen in der Entladephase, wird Zelle 3 in eine Ruhephase versetzt, in der sie sich durch das angeschlossene Voltmeter entlädt. Die in Tabelle D.3 in Anhang D.1 gezeigten Widerstandswerte geben die tatsächlich angeschlossenen Widerstände an. Da der für Zelle 3 angeschlossene Entladewiderstand aufgrund des Zyklisierungsplans nicht verwendet wird, wird er für die Korrekturrechnung des systematischen Messfehlers mit $100 \cdot 10^{12} \Omega$ angegeben.

Abbildung 5.10 zeigt die goldfarbene schimmernde Kathodenoberfläche von Zelle 3.

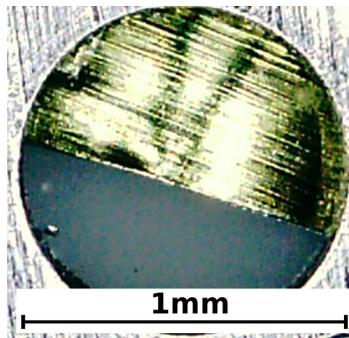


Abbildung 5.10.: Messreihe 7, Zelle 3 - Kathodenoberfläche zu Beginn der Ladephase

Da alle Zellen nach dem Zusammenbau im teilentladenen Zustand sind, wird in der initialen Ladephase ein erhöhter Stromfluss erwartet. Dies wird bei allen Zellen durch die Messungen bestätigt. Hierbei fällt auf, dass Zelle 1 höhere Spitzenströme als Zelle 2 zu Beginn der Ladephasen aufweist. Dies lässt auf eine bessere Leitfähigkeit des Kohlenstoffs gegenüber dem ITO schließen. Sowohl Zelle 1 als auch Zelle 2 zeigen das gewünschte Batterieverhalten, wie die umgesetzte elektrische Ladung erkennen lässt. In den letzten zwei Zyklen bricht die Zellspannung auf einen Wert unterhalb von 2 V ein.

Mit der Ladung korrelierende Bereiche im Intensitätsverlauf sind bei keiner der drei Zellen sichtbar.

Anhang D.1.6 zeigt die aufgezeichneten elektrischen Messwerte. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet. Die Anhänge D.2.6 und D.3.6 zeigen die Intensitätsverläufe ohne und mit angewandeter Kompensationsrechnung.

5.8. Messreihe 8

Messreihe 8 verwendet, wie die beiden vorigen Messreihen, das Elektrodenmaterial mit der Probenbezeichnung „I-1“ für den Aufbau von Zelle 1.

Zelle 2 wird mit dem ähnlichen Material „I-5“ als Kathode gegenüber Lithiummetall als Anode betrieben. Im Gegensatz zum Material „I-1“ enthält das Material „I-5“ keinen Kohlenstoff. Die hierdurch bedingte schlechtere Leitfähigkeit könnte sich in geringeren Strömen bemerkbar machen. Das Fehlen des Kohlenstoffs sollte sich positiv auf die Erfassbarkeit optischer Effekte auswirken.

In Zelle 3 wird erstmals ein Anodenmaterial untersucht. Es handelt sich dabei um eine Graphitanode aus der industriellen Batteriefertigung. Ihre genaue Zusammensetzung ist nicht bekannt. Sie wird hier unter der Probenbezeichnung „C“ geführt.

Die Zyklisierung erfolgt, wie zuletzt bei der Messreihe 7 angewendet, in Form von vier Entlade- und Ruhephasen gefolgt von vier Lade- und Ruhephasen. Es werden insgesamt drei Zyklen durchlaufen.

Entgegen der Erwartung wies Zelle 3 eine umgekehrte Polarität auf. Sie ist daher im ersten Zyklus nur geladen worden. Aufgrund eines fehlerhaften Zyklisierungsplans wurde im zweiten Zyklus ebenso verfahren. Die Bilddaten sind in drei Bilderserien (Parts) aufgezeichnet worden. Das Aufzeichnungsintervall für die ersten beiden Parts beträgt eine Minute, das für den letzten Part zwei Minuten.

Das elektrische Verhalten von Zelle 1 ist ähnlich dem bereits zuvor in Messreihe 6 und Messreihe 7 beobachteten Verhalten. Die Intensitätsverläufe aller drei Farbkanäle weisen eine Form auf, welche grob dem Verlauf der elektrischen Ladung folgt. In der kompensierten Auswertung des Intensitätsverlaufs ist dies besser zu erkennen.

Zelle 2 weist während der Ladephasen geringere Spitzenströme als Zelle 1 auf. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten. Insgesamt gibt die Zelle während der Entladephase mehr Ladung ab, als sie in der Ladephase aufnimmt. Im dritten Zyklus fällt ihre Zellspannung teils unter einen Wert von 2 V. Aufgrund des fehlenden Kohlenstoffs liegen die gemessenen Intensitäten wie erwartet, bei einem Vielfachen der Werte von Zelle 1. Auch hier lässt sich eine Form des Intensitätsverlaufs beobachten, die der umgesetzten Ladung folgt. Es sind ebenfalls alle drei Farbkanäle betroffen.

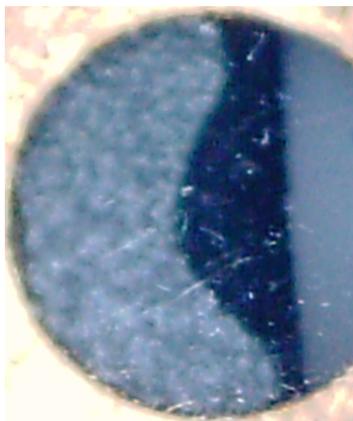
Zelle 3 zeigt aufgrund eines sinkenden Innenwiderstandes eine gesteigerte Stromaufnahme während der Ladephase. Es fließen zum Ende hin teils Ströme von bis zu 0,5 A; die Zelle ist dabei zerstört worden. Um eine solche Schädigung zukünftig zu vermeiden, werden in den folgenden Messreihen Widerstände zur Begrenzung der des Ladestromes eingesetzt. Da die beobachtete Elektrodenoberfläche von einer Blase bedeckt wird, lässt der Intensitätsverlauf von Zelle 3 nur im begrenzten Umfang Aussagen zu. Abbildung 5.11 zeigt die Ausbreitung der Blase.



(a) Beginn der Blasenbildung



(b) Nach 20 Minuten



(c) Nach 70 Minuten



(d) Nach 73 Minuten

Abbildung 5.11.: Messreihe 8, Zelle 3 - Ausbreitung einer Blase

Durch die hohen Ladeströme (etwa 150 mA) konnte der in Kapitel 2.1.4 beschriebene, von Harris, et al. entdeckte Effekt der rötlichen bis goldfarbenen Veränderung der Graphitelektrode beobachtet werden. Abbildung 5.12 zeigt die voranschreitende rötliche Verfärbung. Da während dieser Zeit keine Blase über dem beobachteten Bereich war, kann in der relativen Darstellung des Intensitätsverlaufs eine Zunahme der Intensität auf dem roten Farbkanal und eine Abnahme der Intensität auf dem blauen Farbkanal beobachtet werden. Abbildung 5.13 zeigt dieses Verhalten.



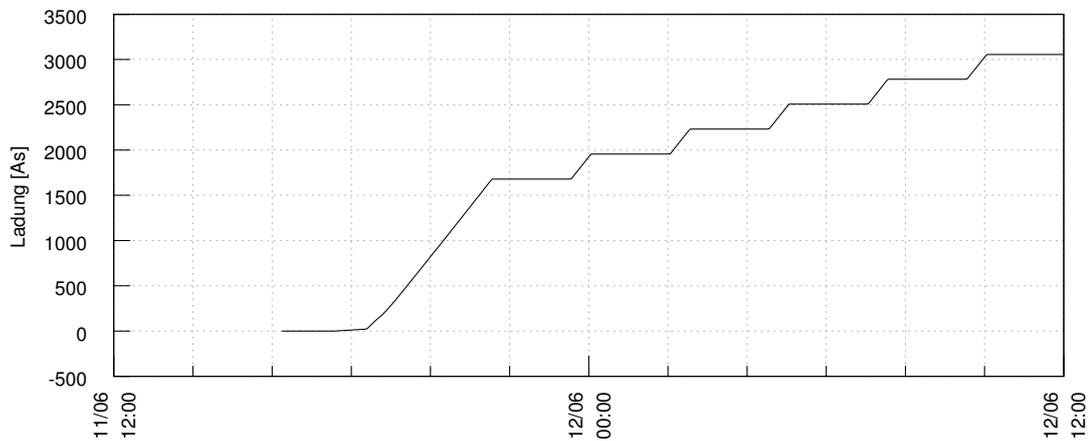
(a) Beginn des Effekts

(b) Nach 98 Minuten

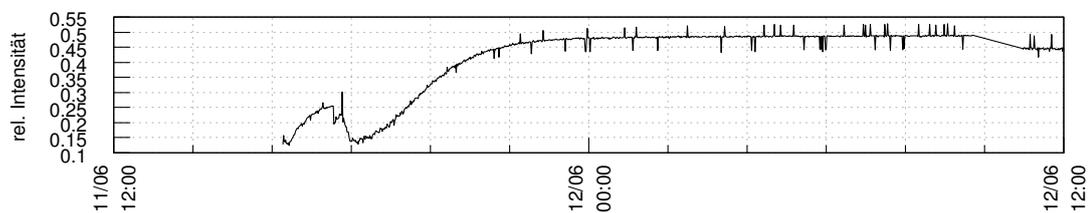
(c) Nach 373 Minuten

Abbildung 5.12.: Messreihe 8, Zelle 3 - Fortschreitende rötliche Verfärbung der Graphitanode

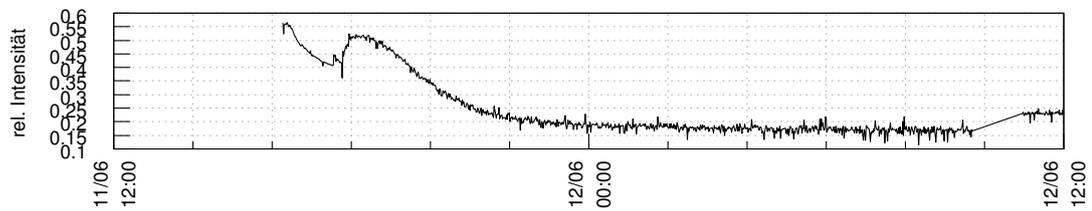
Die Anhänge D.1.7, D.2.7 und D.3.7 zeigen die elektrischen Messwerte sowie die Intensitätsverläufe ohne und mit angewandeter Kompensationsrechnung. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet.



(a) Messreihe 8 - Zelle 3 - Ladung



(b) Messreihe 8 - Zelle 3 - Anteilige Intensität rot



(c) Messreihe 8 - Zelle 3 - Anteilige Intensität blau

Abbildung 5.13.: Messreihe 8, Zelle 3 - Relative Intensitätsverläufe und elektrische Ladung

5.9. Messreihe 9

Messreihe 9 greift die an Zelle 2 in Messreihe 7 und Messreihe 8 gemachten Versuche auf. Zelle 1 wird mit dem Elektrodenmaterial „I-5“ als Kathode, Zelle 2 mit dem Material „V-2“ als Kathode bestückt. In beiden Zellen kommt Lithiummetall als Anode zum Einsatz. Zelle 3 wird in derselben Konfiguration wie zuvor betrieben. Erstmals werden in dieser Messreihe Widerstände zur Begrenzung des Ladestromes eingesetzt.

Die Zyklisierung erfolgt, wie in den beiden Messreihen zuvor, in Form von vier Entlade- und Ruhephasen, gefolgt von vier Lade- und Ruhephasen. Die Dauer der Lade-/Entladephasen beträgt 30 Minuten, die der Ruhephasen zwei Stunden. Es hätten fünf dieser Zyklen, getrennt durch Ladephasen, durchlaufen werden sollen. Da aufgrund eines fehlerhaften Zyklierplans bei Zelle 2 keine Entladephasen stattfanden, ist die Zyklisierung in der ersten Ladephase des dritten Zyklus abgebrochen worden. Nach der Korrektur des Zyklierplans sind die letzten beiden Zyklen wie geplant durchlaufen worden. Während die anderen Zellen eine Entladephase durchlaufen, verbleibt Zelle 3 in der Ruhephase. Die Messung der Zellspannung belastet diese ausreichend, um sie zu entladen.

Im Vergleich zu Zelle 2 aus Messreihe 8 zeigt Zelle 1 aus dieser Messreihe ein ähnliches elektrisches Verhalten. Die Spitzenladeströme fallen durch den Einsatz der Widerstände zur Ladestrombegrenzung mit einer Größe von etwa 20 mA um eine Größenordnung geringer aus. Die in der initialen Ladephase aufgenommene Ladung ist etwa 0,5 As geringer. Der aus den Bilddaten berechnete Intensitätsverlauf zeigt in dieser Messung keine Parallelen zur elektrischen Ladung.

Ein Vergleich der elektrischen Messwerte von Zelle 2 mit denen von Zelle 2 aus Messreihe 7 ist aufgrund der fehlerhaften Zyklisierung nicht möglich. Bei beiden Zellen ist kein Bereich im Intensitätsverlauf zu erkennen, der mit der elektrischen Ladung korreliert.

Die Messdaten für Zelle 3 sind nicht verwertbar. Bei der Strommessung traten Ströme von 6 mA und mehr auf. Dies dürfte aufgrund des Widerstandes zur Ladestrombegrenzung nicht passieren. Die Ursache dieser Messergebnisse konnte bisher nicht geklärt werden.

Anhang D.1.8 zeigt die aufgezeichneten elektrischen Messwerte. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet. Die Anhänge D.2.8 und D.3.8 zeigen die Intensitätsverläufe ohne und mit angewendeter Kompensationsrechnung.

5.10. Messreihe 10

Messreihe 8 zeigte stellenweise eine ladungsabhängige Intensität. Sie soll deshalb in Messreihe 10 wiederholt werden. Um einen größeren sichtbaren Bereich der Elektrodenoberfläche zu erhalten, wird das Loch in den Stromsammlern der Zellen vor dem Zusammenbau geweitet. Die damit einhergehende Verformung der Stromsammler führte in allen drei Zellen zu einem massiven Auftreten von Blasen. Abbildung 5.14 zeigt die Elektrodenoberflächen der drei Zellen; die Blasen sind deutlich sichtbar.

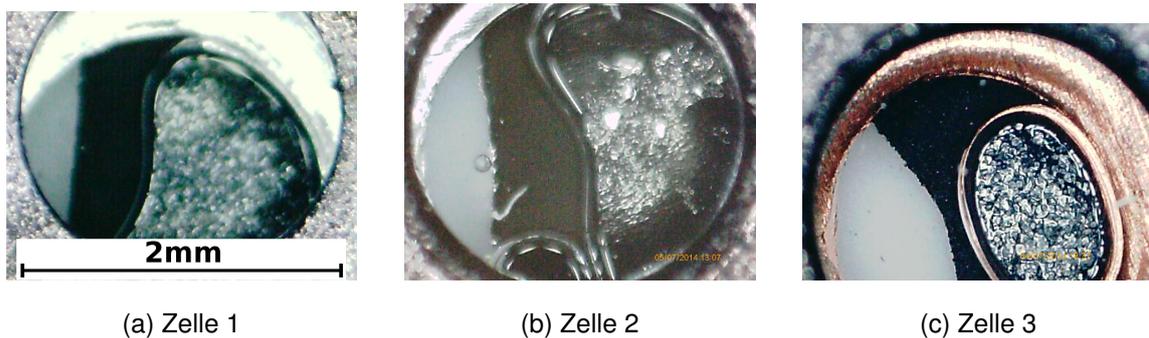


Abbildung 5.14.: Blasen in den Zellen der Messreihe 10

Die Auswertung der Bilddaten führt aufgrund der Blasenbildung zu keinem sinnvollen Ergebnis. Inwieweit die Zellchemie und damit auch die elektrischen Messwerte betroffen sind, ist nicht bekannt.

Zumindest die Bilanz der umgesetzten Ladung stimmt für Zelle 1 und Zelle 2 mit der aus Messreihe 8 überein. Zelle 1 hat mehr Ladung aufgenommen als abgegeben; bei Zelle 2 ist es andersherum. Für Zelle 3 gibt es keine verwertbaren Vergleichsdaten.

Die Anhänge D.1.9, D.2.9 und D.3.9 zeigen die elektrischen Messwerte sowie die Intensitätsverläufe ohne und mit angewendeter Kompensationsrechnung. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet.

5.11. Messreihe 11

In Messreihe 11 werden drei unterschiedliche Zellaufbauten untersucht. Zelle 1 enthält die kohlenstofffreie LiFePO_4 Kathode mit der Probenbezeichnung „I-5“. In Zelle 2 ist ebenfalls eine kohlenstofffreie LiFePO_4 Kathode verbaut. Sie trägt die Probenbezeichnung „V-2“ und hat einen ITO-Anteil von 26,2 %. Zelle 3 enthält eine FePO_4 Kathode mit 26,1 % ITO als Leitmittel. In allen Zellen kommt eine Anode aus Lithiummetall zum Einsatz.

Die Zellen 1 und 2 sind nach dem Zusammenbau teilentladen, da die Kathoden bereits Lithium enthalten; Zelle 3 ist vollständig geladen. Die Bilddaten wurden in vier (Zelle 1 und Zelle 3) bzw. drei (Zelle 2) Bilderserien (Parts) aufgezeichnet. Das Aufnahmeintervall des ersten Parts beträgt zwei Minuten. Die übrigen Parts haben ein Aufnahmeintervall von fünf Minuten. Wie bereits bei Messreihe 10 versucht wurde, sind auch bei dieser Messreihe die Löcher in den Stromsammlern aller Zellen vergrößert worden. Aufgrund der in der vorigen Messreihe beobachteten Blasenbildung wurde dabei darauf geachtet, dass keine zu großen Verformungen entstehen.

Gemäß der Ergebnisse von Messreihe 2 bis Messreihe 5 wird erwartet, dass sich Zelle 3 schlecht aufladen lässt und eine dunkler werdende Färbung der Kathode bei der Entladung eintritt. Beides wird durch die Messung bestätigt. Abbildung 5.15 zeigt die zunehmende Dunkelfärbung der Elektrode. Sie findet in vier Schritten, hervorgerufen durch vier halbstündige Entladephasen, statt. Die Intensitätsverläufe erlauben keine Aussage über die elektrische Ladung.



(a) 1. Entladephase



(b) 2. Entladephase



(c) 3. Entladephase



(d) 4. Entladephase

Abbildung 5.15.: Messreihe 11, Zelle 3 - Elektrodenoberfläche

Zelle 1 schließt die Messung mit einer negativen Bilanz der elektrischen Ladung ab. Dieses Verhalten wurde auch zuvor bei anderen Zellaufbauten, welche eine LiFePO_4 Kathode ohne Leitmittel enthalten, beobachtet. Das von Entladephase zu Entladephase zunehmende Einbrechen der Zellspannung geht hiermit einher. Auch bei dieser Zelle lassen die Intensitätsverläufe keine Rückschlüsse auf die elektrische Ladung zu.

Zelle 2 verhält sich elektrisch vergleichbar zu den zuvor durchgeführten Messungen mit dem gleichen Kathodenmaterial. Im direkten Vergleich zu Messreihe 9 Zelle 2 fällt der um etwa eine Größenordnung kleinere Ladestrom auf. Dies liegt in dem Begrenzungswiderstand für den Ladestrom begründet; er ist im Vergleich um den Faktor 10 größer.

Bei dieser Zelle kann erstmalig ein Intensitätsverlauf beobachtet werden, der gemäß des theoretisch erwarteten Effekts über den gesamten zeitlichen Verlauf der Untersuchung der elektrischen Ladung folgt. Der Intensitätsverlauf ist von einem Rauschen überlagert, welches weitestgehend durch die Kompensationsrechnung entfernt werden kann. Im kompensierten Intensitätsverlauf sind auch Details, wie die treppenförmigen Stufen im Verlauf der Ladung zu erkennen. In der relativen Darstellung des Intensitätsverlaufs fällt auf, dass eine Intensitätssteigerung mit einer Zunahme des Blauanteils und einer Abnahme des Rotanteils einher geht. Eine Intensitätssenkung zeigt das umgekehrte Verhalten. Abbildung 5.17 zeigt die kompensierten Intensitätsverläufe des roten und des blauen Farbkanals in absoluter und relativer Darstellung zusammen mit der elektrischen Ladung. In Abbildung 5.16 sind die Kathodenoberflächen von Zelle 2 im geladenen und im entladene Zustand dargestellt. Die Helligkeitsänderung ist mit bloßem Auge kaum zu erkennen.

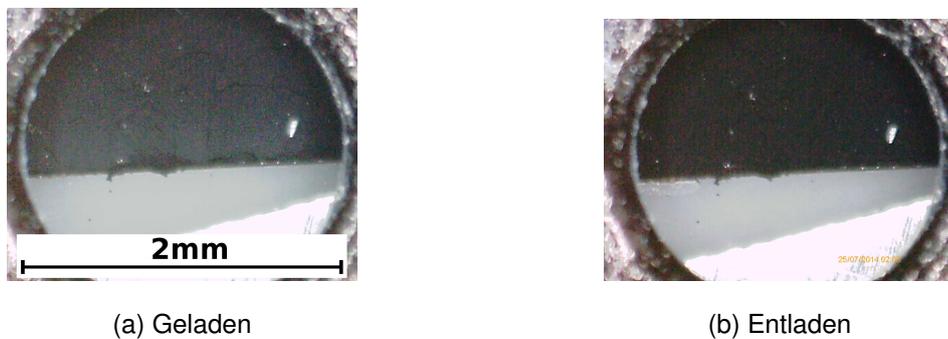


Abbildung 5.16.: Messreihe 11, Zelle 2 - Elektrodenoberfläche

Aufgrund der guten Ergebnisse der optischen Messdaten wird diese Zelle für die spektrometrische Untersuchung in (siehe folgendes Kapitel 6) ausgewählt.

Anhang D.1.10 zeigt alle aufgezeichneten elektrischen Messwerte. Der systematische Messfehler wurde für die Darstellung von Strom und Ladung bereits herausgerechnet. Die Anhänge D.2.10 und D.3.10 zeigen die Intensitätsverläufe aller drei Farbkanäle ohne und mit angewendeter Kompensationsrechnung.

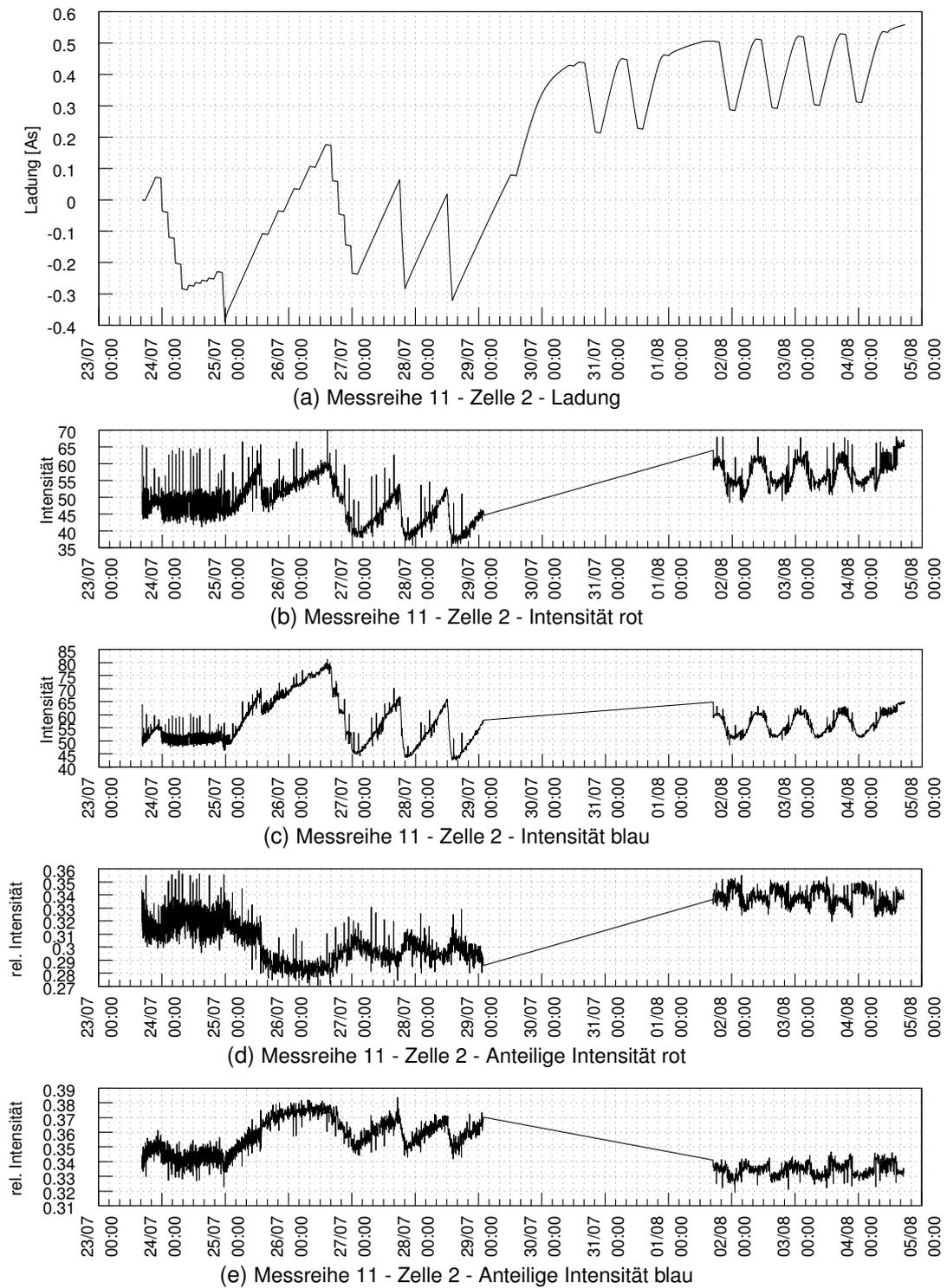


Abbildung 5.17.: Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert) und elektrische Ladung

6. Spektrometrische Messungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der spektrometrischen Untersuchungen vorgestellt. Diese bestehen hauptsächlich aus Testmessungen zur Erprobung der beiden entwickelten Sondenhalter (vgl. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Es wurden aber auch zwei exemplarische Langzeit-Spektralmessungen an Zelle 2 der Messreihe 11 durchgeführt.

Für die Testmessungen sind die in Abbildung 6.1 gezeigten, aus Pappe hergestellten Farbproben verwendet worden. Sie haben die Farben blau, dunkelgrün, grau, grün, hellblau, hellgrün, hellrot, lila, orange, pink, rot und schwarz. Die Farbbezeichnungen werden nachfolgend auch zur Benennung der Messungen verwendet.



Abbildung 6.1.: Farbproben für spektrometrische Test-Messungen

6.1. Testmessungen mit 0 Grad Sondenhalter

Der Sondenhalter für Reflexionsmessungen mit einem Einstrahl- und Beobachtungswinkel von 0 Grad ist an zwölf unterschiedlichen Farbproben, welche in den Deckel der Messzelle gelegt wurden, getestet worden. Die Tests erfolgten sowohl mit als auch ohne Glasscheibe. Die Belichtungszeiten wurden so gewählt, dass der Messbereich des Spektrometers möglichst gut ausgesteuert wird. Sie betragen 9,5 ms für die Messungen ohne Glasscheibe und 2,375 ms für die Messungen mit Glasscheibe.

Abbildung 6.2 zeigt das gemessene Spektrum für die Farbprobe hellrot. Das Intensitätsmaximum bei etwa 670 nm (der rote Farbbereich liegt zwischen 630 nm und 780 nm) ist deutlich zu erkennen. Auch eine Reflexion im nahen Infrarotbereich (> 780 nm) ist erkennbar; sie tritt bei allen Farbproben auf. Lediglich bei der schwarzen Farbprobe lässt sich aufgrund der geringen Intensität keine Aussage treffen.

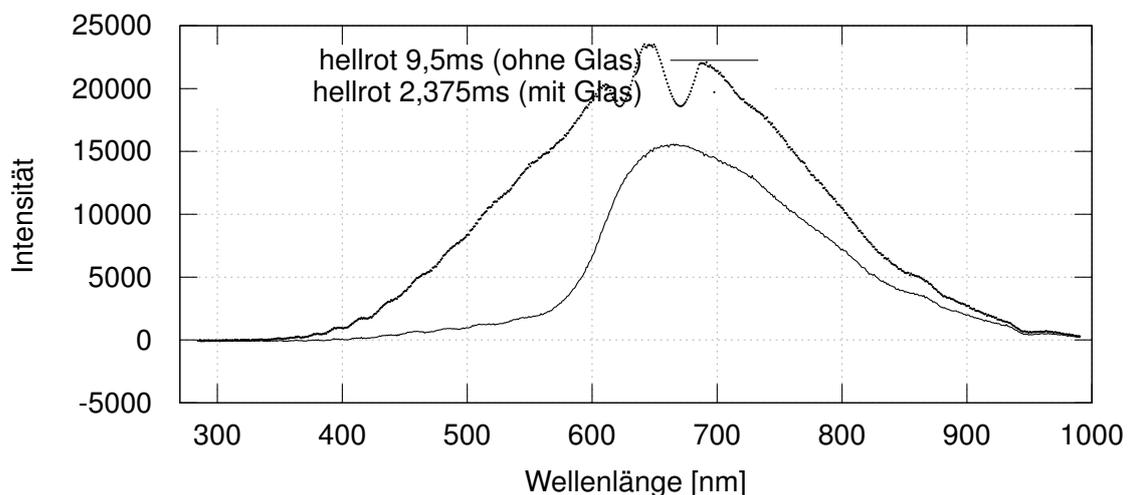


Abbildung 6.2.: Testmessung - 0 Grad - hellrot

Das gemessene Spektrum der hellgrünen Farbprobe ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Der charakteristische Peak für die Farbe grün bei einer Wellenlänge von etwa 550 nm ist, genauso wie die Reflexion im Infrarotbereich, gut erkennbar.

Bei den Messungen mit Glasscheibe wird bei allen Farbproben das Spektrum der zur Beleuchtung verwendeten Halogenlampe gemessen. Das Signal ist so stark, dass das Spektrometer selbst bei der geringst möglichen Belichtungszeit teilweise übersteuert. Die Übersteuerung ist an dem wellenförmigen Muster zu erkennen.

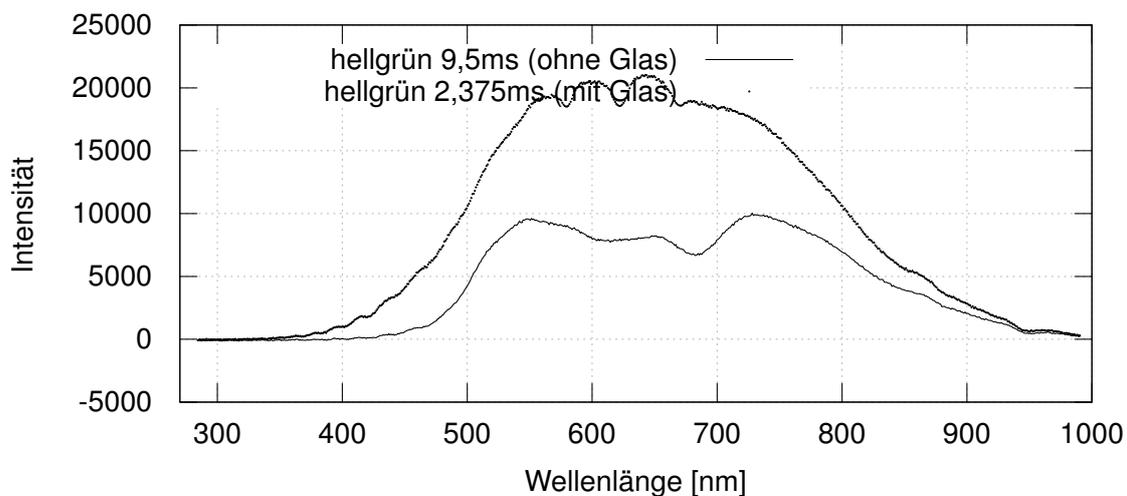


Abbildung 6.3.: Testmessung - 0 Grad - hellgrün

Aus dieser Beobachtung lässt sich schließen, dass das zur Beleuchtung eingestrahlte Licht nahezu vollständig an der Glasscheibe reflektiert wird. Eine Beobachtung der darunter liegenden Elektrodenoberfläche ist damit nicht möglich. Da die Glasscheibe für den Aufbau der Messzelle unerlässlich ist, ist der Sondenhalter für die Beobachtung der Elektrodenoberfläche ungeeignet.

Die gemessenen Spektren der zehn übrigen Farbproben zeigen die Abbildungen C.1 bis C.10 in Anhang C.1.

6.2. Testmessungen 45 Grad Sondenhalter

Die Testmessungen, bei denen ein Beobachtungswinkel verwendet wurde, der gegenüber dem Beleuchtungswinkel um 45 Grad verschoben ist, sind mit dem in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Prototypen durchgeführt worden. Es wurden dieselben zwölf Farbproben wie zuvor verwendet; es erfolgten jedoch ausschließlich Messungen mit Glasscheibe. Die Belichtungszeiten wurden aufgrund der geringen Reflexion auf 95 ms erhöht.

Abbildung 6.4 zeigt das gemessene Spektrum für die rote Farbprobe. Sie ist durch ihren Peak bei einer Wellenlänge von etwa 670 nm zu erkennen. Auch der infrarote Bereich weist wieder eine verhältnismäßig hohe Reflexion auf. Das Spektrum der grünen Farbprobe (vgl. 6.5) ist wie zuvor an dem Peak bei 550 nm zu erkennen; die Reflexion im Infrarotbereich tritt auch hier wieder auf.

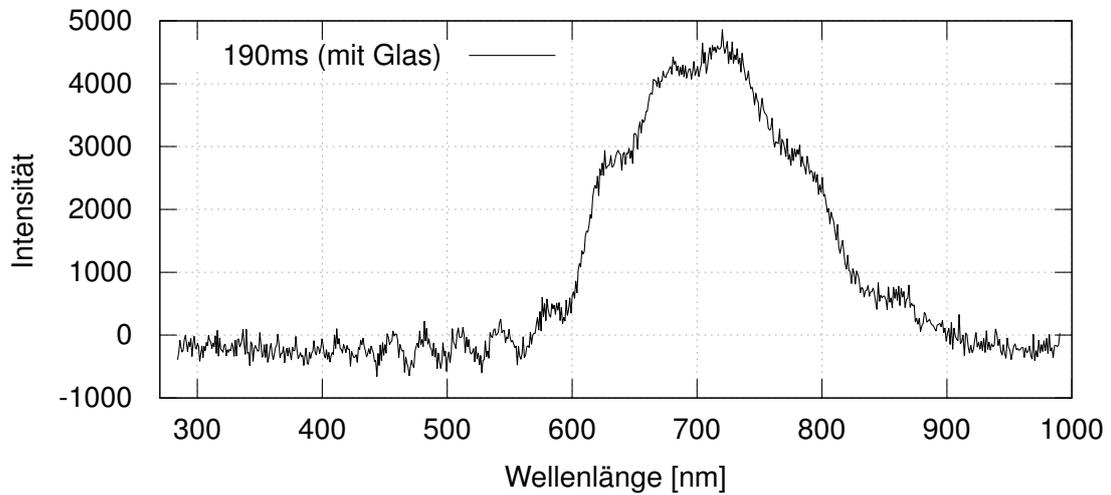


Abbildung 6.4.: Testmessung - 45 Grad - rot

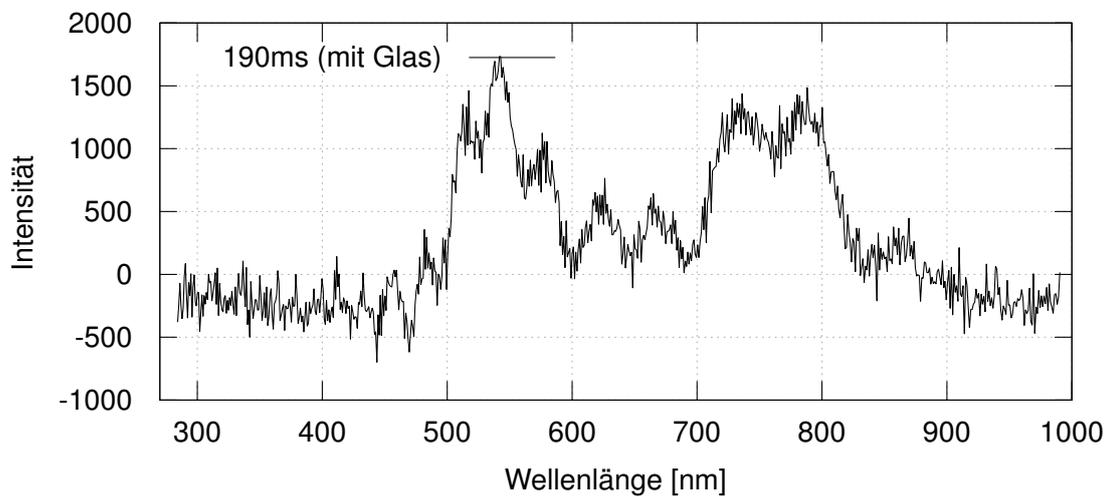


Abbildung 6.5.: Testmessung - 45 Grad - grün

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die gemessene Reflexion bei allen Farbproben wesentlich geringer gegenüber dem vorigen Messverfahren ist. Gerade bei den dunklen Farbproben ist kein vom Rauschen unterscheidbares Signal zu messen. Prinzipiell ist dieses Messverfahren aber geeignet, um das Reflexionsverhalten von Objekten durch die Glasscheibe hindurch zu beobachten.

Der gegenwärtig im Forschungsvorhaben BATSEN entwickelte Item-Sondenhalter, welcher neben frei einstellbaren Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln auch eine Fokussierung der Beleuchtung ermöglicht, wird hier bessere Ergebnisse liefern können. Durch die Fokussierung wird die Intensität des eingestrahlten Lichts und damit auch die Intensität des reflektierten Lichts erhöht.

Die gemessenen Spektren der zehn Farbproben, welche hier nicht dargestellt sind, zeigen die Abbildungen C.11 bis C.20 in Anhang C.2.

6.3. Exemplarische Spektralmessung

Vor der spektralen Untersuchung der Elektrodenoberfläche einer Messzelle ist das Langzeitverhalten der Lampe untersucht worden. Hierzu wurde der gleiche Aufbau wie in Kapitel 6.2 verwendet; es wurde die hellgrüne Farbprobe beobachtet. Abbildung 6.6 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Die Wellenlänge ist auf der x-Achse, die Zeit auf der y-Achse dargestellt; die Intensität wird durch die Farbe ausgedrückt. Wie bereits zuvor beobachtet, sind die für die hellgrüne Farbprobe typischen Intensitätsmaxima bei etwa 550 nm und im Infrarotbereich zu erkennen.

Es wurde eine horizontale Verschiebung der vertikal verlaufenden farbigen Balken vermutet. Dies entspräche einer Verschiebung des Spektrums und wäre der Temperaturerhöhung in der Lampe zu zuschreiben. Das vermutete Verhalten ist nicht eingetreten; die Lichtemission bleibt im gesamten betrachteten Wellenlängenbereich über die Zeit konstant. Daraus folgt, dass das Verhalten der Lampe in den nachfolgenden Messungen nicht beachtet werden muss.

Die horizontale blaue Linie zum Zeitpunkt 11:04 am 29.07.2014 ist auf ein absichtliches, kurzes Ausschalten der Lampe zurückzuführen. Bei den übrigen horizontalen Linien handelt es sich um Messfehler, deren Ursache noch unbekannt ist.

Für die hier folgende Untersuchung einer Messzelle im Zyklierbetrieb wurde die Zelle 2 der Messreihe 11 gewählt. Sie weist den bisher am stärksten ausgeprägten von der Ladung abhängigen Intensitätsverlauf auf. Als Elektrodenmaterial ist LiFePO_4 mit beigemengtem ITO verbaut. Das untersuchte Elektrodenmaterial stellt die Kathode der Zelle dar und wird gegen metallisches Lithium als Anode betrieben. Folglich findet die Interkalation der Lithium-Ionen bei der Entladung statt und es wird ein Intensitätsverlauf erwartet, der proportional

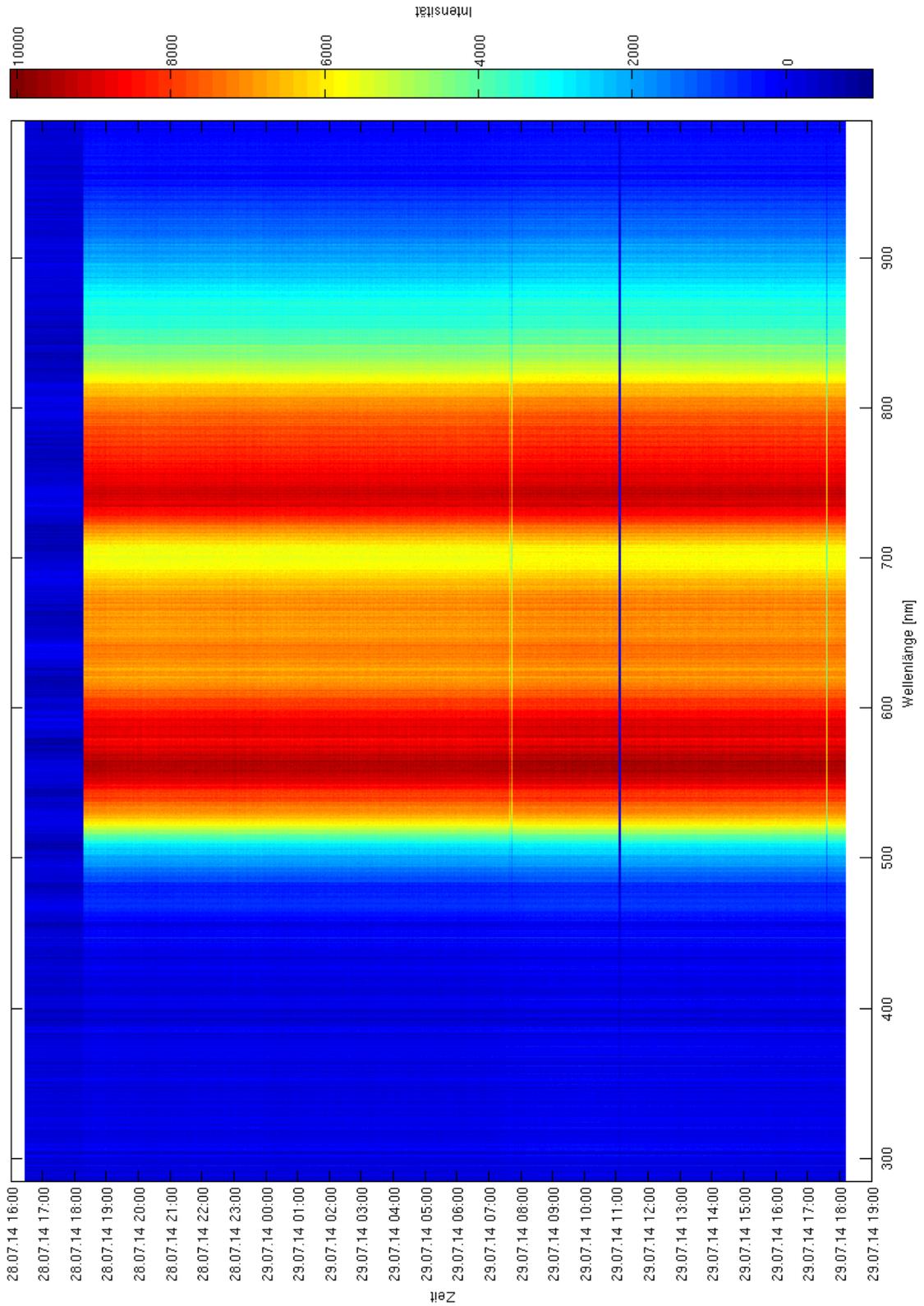


Abbildung 6.6.: Langzeitspektromessung - Lampe (grüne Farbprobe)

zum Ladungsumsatz ist. Die Auswertung in Kapitel 5.11 bestätigt diese Erwartung. Sie zeigt weiterhin, dass alle drei Farbkanäle gleichermaßen von der Intensitätsänderung betroffen sind. Für die spektrale Untersuchung heißt dies, dass eine breitbandige Intensitätsänderung zu erwarten ist.

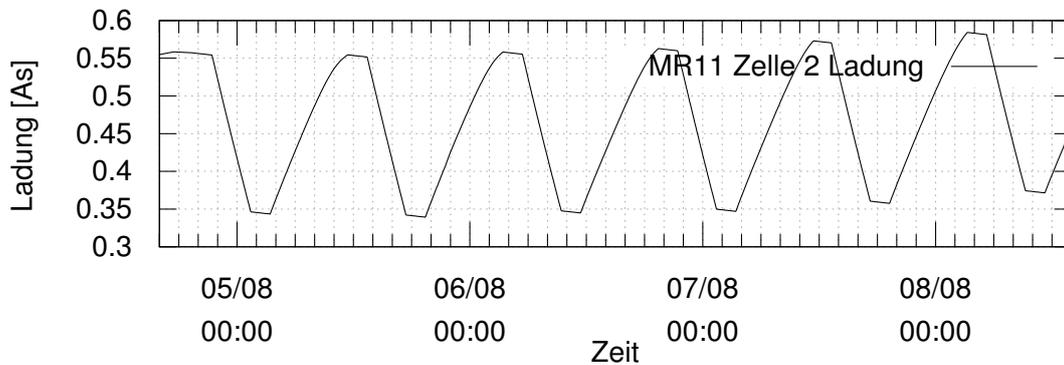


Abbildung 6.7.: Langzeitspektralmessung - Messreihe 11 Zelle 2 - Ladungsumsatz

Abbildung 6.8 zeigt das Ergebnis der Untersuchung; die Belichtungszeit betrug 190 ms. Zum Vergleich ist die umgesetzte Ladung in Abbildung 6.7 dargestellt. Es wurde eine ähnliche Darstellung wie in Abbildung 6.6 gewählt. Da die Intensitätsänderungen sehr gering sind, werden keine absoluten Intensitätswerte gezeigt, sondern eine Darstellungsart gewählt, die die Abweichung zum Mittelwert anzeigt. Eine Intensität von 0 steht hier für die durchschnittliche Intensität bei der jeweiligen Wellenlänge.

Während der Messung wurde in einem 16-Stunden Zyklus betrieben. Er besteht aus einer 4-stündigen Entladephase, gefolgt von einer 2-stündigen Ruhephase. Darauf folgt eine 8-stündige Ladephase und wieder eine 2-stündige Ruhephase. Die Entladephase startet am 04.08.2014 um 19:30. Die Zelle war zuvor voll geladen.

Mit der Entladung geht wie erwartet eine Verringerung der gemessenen Intensität einher. Sie bleibt über die Ruhephase unverändert, steigt aber, anders als bei der Beobachtung mittels Kamera, erst am Ende der Ladephase wieder an.

Zudem war es möglich mit dem noch nicht fertiggestellten item-Sondenhalter vorab eine Messung durchzuführen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6.9; die Belichtungszeit betrug 570 ms. Es wird dieselbe Form der Darstellung wie zuvor verwendet. Die Zelle wird mit demselben Zyklus betrieben. Um 05:30 Uhr am 06.08.2014 startet eine Entladephase.

Die Intensität folgt hier, wie erwartet, auch während der Ladephase der umgesetzten Ladung. Auch ist das Interferenzmuster des Spektrometers, welches verstärkt bei geringen Intensitäten und langen Belichtungszeiten auftritt, gut zu erkennen. Trotz der nur dreimal so langen Belichtungszeit ist die gemessene Intensität um ein Vielfaches höher. Dies ist auf den verbesserten Aufbau zurückzuführen.

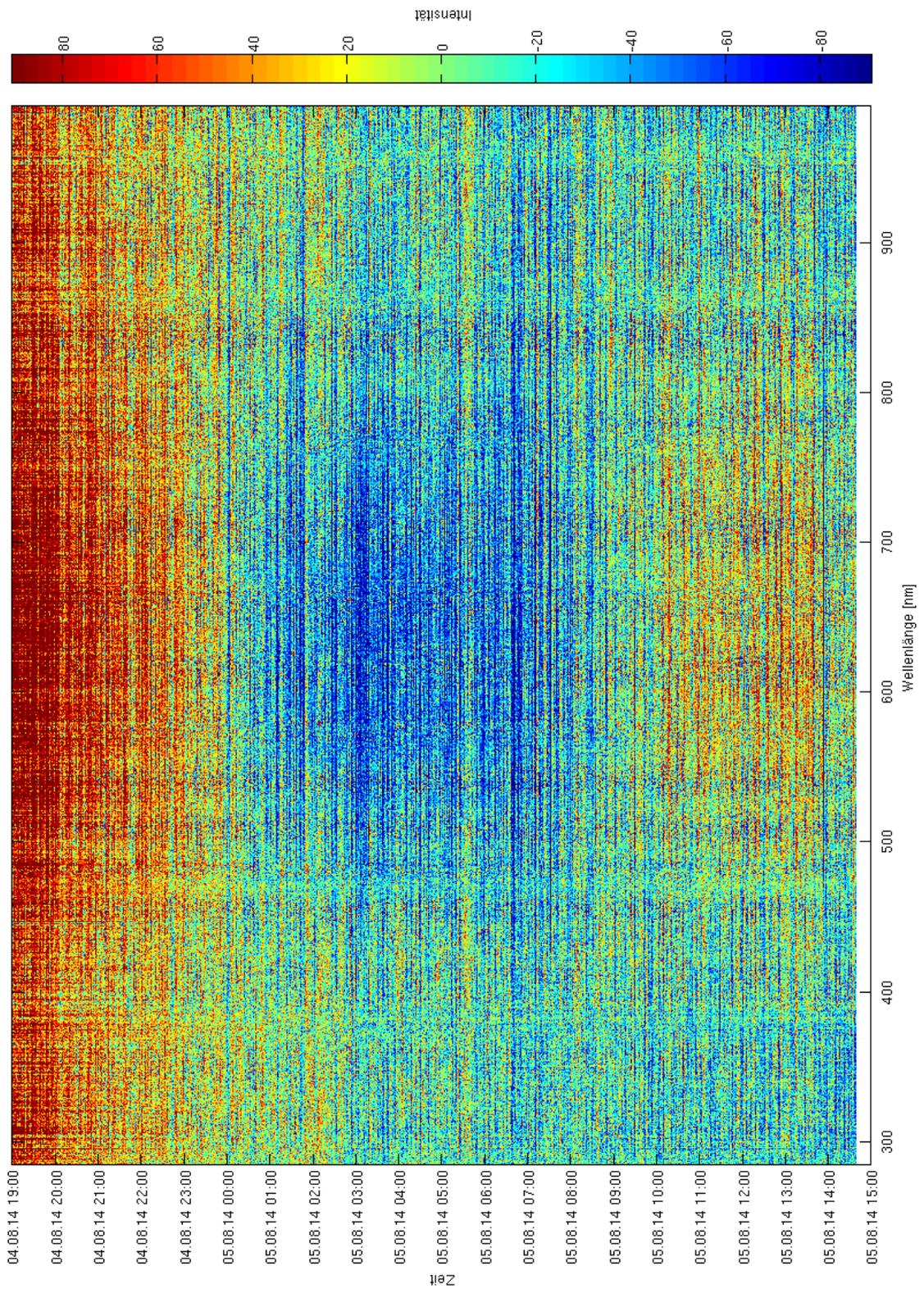


Abbildung 6.8.: Langzeitspektrometrie - Messreihe 11 Zelle 2 (45 Grad Sondenhalter)

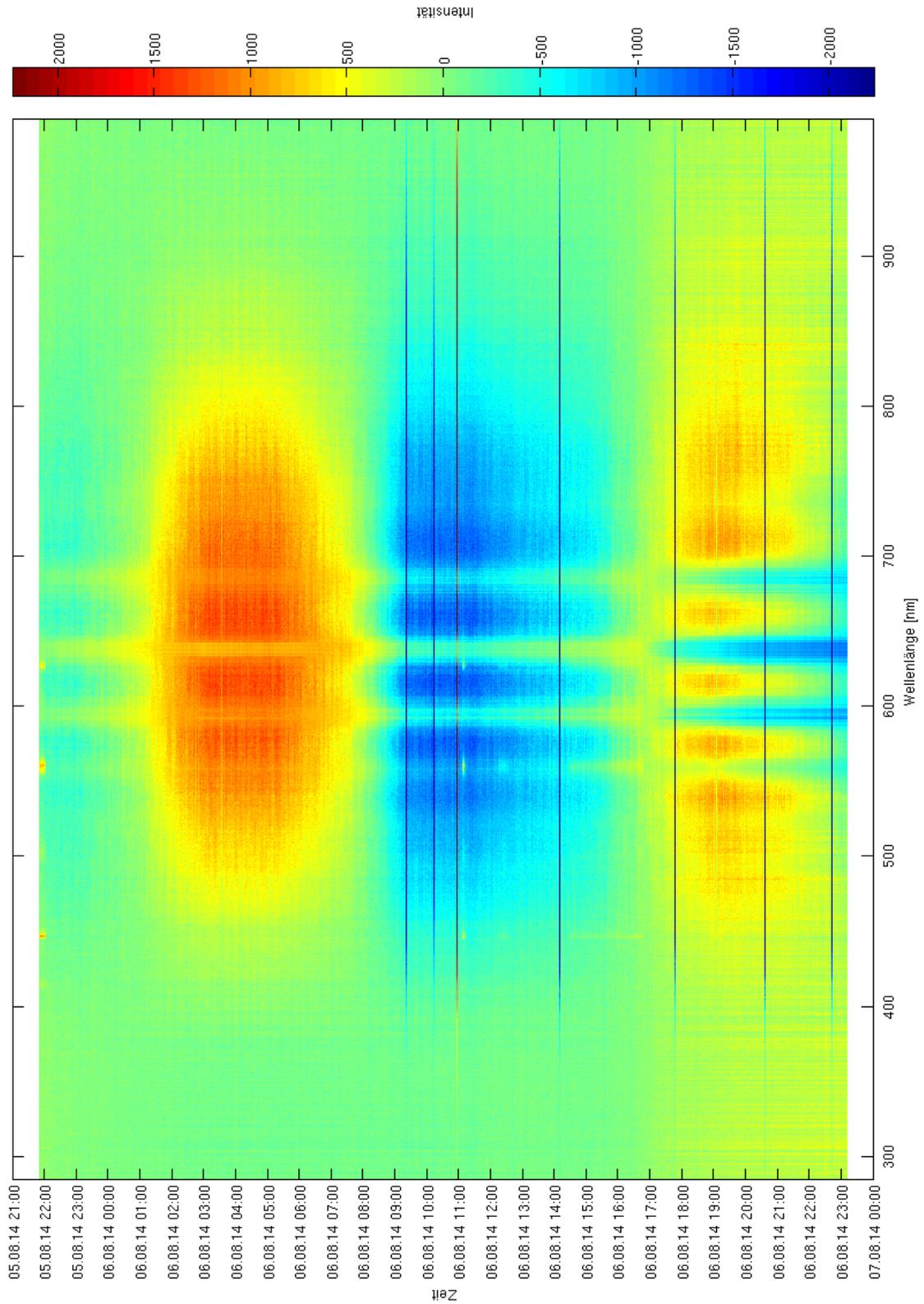


Abbildung 6.9.: Langzeitspektralmessung - Messreihe 11 Zelle 2 (item-Sondenhalter)

7. Fazit

Abschließend werden die durchgeführten Arbeiten und gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und das umgesetzte Messplatzkonzept sowie die Messergebnisse unter Berücksichtigung der in Kapitel 1.3 gestellten Anforderungen bewertet.

Weiterhin werden noch offene Punkte genannt und ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen bzw. Verbesserungen des Messplatzes und der Software gegeben.

7.1. Zusammenfassung

Die Aufgabe bestand darin einen Messplatz für den Betrieb von Messzellen mit optischem Sichtfenster zu entwerfen und in Betrieb zu nehmen. Der Messplatz soll die Überwachung der Messzellen mittels Kameras und Spektrometer ermöglichen; die elektrischen Größen Lade-/Entladestrom und Zellspannung sollen ebenfalls aufgezeichnet werden. Ein weitestgehend automatischer Betrieb des Messplatzes war dabei sicherzustellen.

Für die Steuerung und Messwerterfassung sowie für die Ansteuerung waren Softwarelösungen in der Programmiersprache C bzw. als Skript für MATLAB zu gestalten.

Die Auswertung sollte die Korrektur von systematischen Messfehlern berücksichtigen und neben der Darstellung der elektrischen Messwerte auch eine Berechnung des Ladungsumsatzes enthalten. Zudem sind die spektralen Änderungen sowie die Verschiebung der Farbanteile der Elektrodenoberfläche im Zyklbetrieb darzustellen.

Ausgehend von der Kenntnis, dass bei LiFePO_4 -Batterien Lithium und Eisen(III)phosphat zu Lithiumeisenphosphat umgesetzt werden (und umgekehrt), wird eine farbliche Veränderung der Kathode erwartet, die mit dem Ladungsumsatz korreliert. Eine Literaturrecherche hat weitere Effekte hervorgebracht, die bei den Messungen unter Umständen beobachtet werden können.

Für die Umsetzung dieser Aufgabenstellung wurde ein Kamerahalter (vgl. Kapitel 3.2) entwickelt, der die mechanisch stabile Ausrichtung der Kamera über der Messzelle ermöglicht. Ein Abdeckkasten hält störendes Umgebungslicht von dem Aufbau fern. Die Verwendung einer Relaiskarte gestattet den automatisierten Zyklbetrieb.

Zudem wurden zwei Konstruktionen entwickelt, mit denen das Reflexionsverhalten der Elektrodenoberfläche einer Messzelle im Betrieb beobachtet werden kann. Die Steuerung und Messwerterfassung erfolgt mit einzelnen Programmen, die nach einem modularen Softwarekonzept erstellt wurden. In diesem Konzept hat jedes Programm genau eine Aufgabe zu erfüllen. Programme für die Weiterverarbeitung von Messdaten wurden nach dem Konzept der UNIX-Filter entwickelt, wodurch ein flexibler Einsatz, auch aus anderen Programmen heraus, ermöglicht wird.

Die Messungen wurden mit verschiedenen Elektrodenmaterialien durchgeführt, um herauszufinden, ob und bei welchen Materialien der erwartete Effekt auftritt. Es wurden stets mehrere Messungen mit möglichst identischen Zellaufbauten durchgeführt. Dies hatte zum Ziel, die Reproduzierbarkeit der Beobachtungen zu überprüfen.

Die Messungen haben ergeben, dass sich FePO_4 -Kathoden bei der ersten Entladephase verfärben; sie werden durch die Interkalation des Lithiums dunkler. Dieser Effekt ist nicht umkehrbar und die Zellen lassen sich nicht aufladen.

Weiter hat sich gezeigt, dass Kathodenmaterialien ohne Leitmittel zu einer Zelle führen, welche sich schlechter aufladen als entladen lässt. Der von Harris et al. entdeckte Effekt der rötlichen Verfärbung von Graphitelektroden konnte an Zelle 2 in Messreihe 8 gezeigt werden.

Die erwartete Änderung im Reflexionsverhalten der Elektrodenoberfläche, welche dem Verlauf des Ladungsumsatzes entspricht, konnte stellenweise bei verschiedenen LiFePO_4 -Kathoden beobachtet werden. Eine Reproduzierbarkeit war bis hier nicht gegeben. Am deutlichsten und über den gesamten Messzeitraum trat dieser Effekt bei Zelle 2 der Messreihe 11 auf. Dort war eine mit ITO versetzte LiFePO_4 -Kathode verbaut. In einer später durchgeführten Messreihe, welche nicht mehr im Fokus dieser Arbeit steht, konnte dieses Verhalten mit einem identischen Zellaufbau erneut beobachtet werden. Die Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen den Verlauf der elektrischen Ladung und die kompensierten Intensitätsverläufe in absoluter und relativer Darstellungsform. Für einen sicheren Nachweis dieses Effektes müssen noch weitere Messungen durchgeführt werden.

Die spektrometrische Post-Mortem-Analyse einer Messzelle, welche in der Aufgabenstellung (siehe Anhang E.2) aufgeführt wird, wurde aufgrund der schlechten Durchführbarkeit der Messung gestrichen. Nachdem die Zelle geöffnet wurde und die Elektrode mit der Umgebungsluft in Kontakt gekommen ist, verändert sich ihr Reflexionsverhalten. Anstelle dieses Aufgabenpunktes ist die exemplarische Langzeitmessung des Reflexionsspektrums einer Zelle getreten (vgl. Kapitel 6.3). Dabei wurde das Reflexionsspektrum der Elektrodenoberfläche von Zelle 2 der Messreihe 11 in einem Intervall von zehn Sekunden über mehrere Stunden aufgezeichnet. Die Zelle befand sich währenddessen im Zyklierbetrieb.

In diesem Versuch konnte der bereits zuvor mittels Kamera beobachtete Effekt ebenfalls gezeigt werden. Er ist breitbandig und tritt über den gesamten betrachteten Spektralbereich auf.

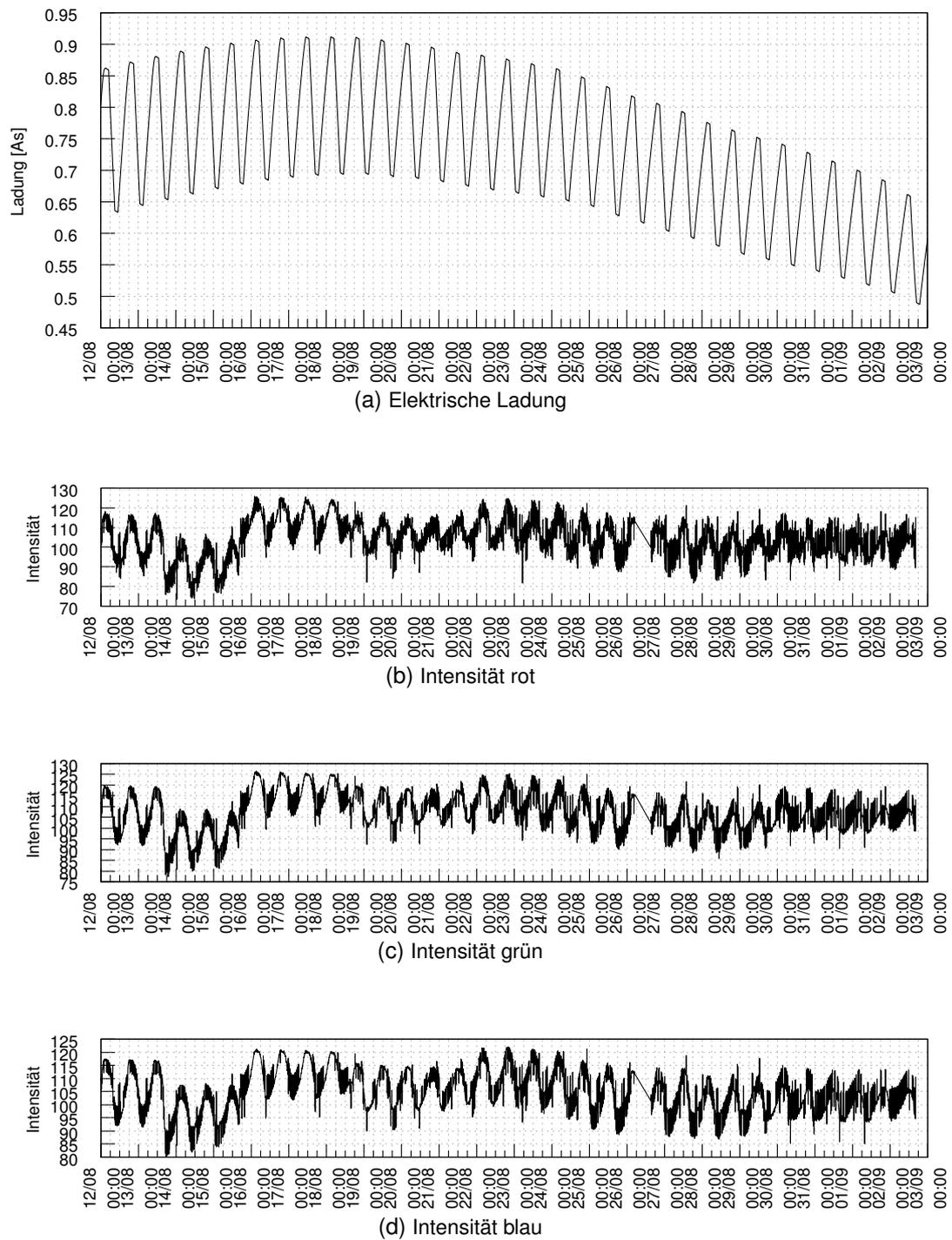


Abbildung 7.1.: Nachträgliche Messung - Ladung und Intensitätsverläufe (kompensiert): Die Sprünge im Intensitätsverlauf liegen in einer erneuten Ausrichtung der Kamera begründet.

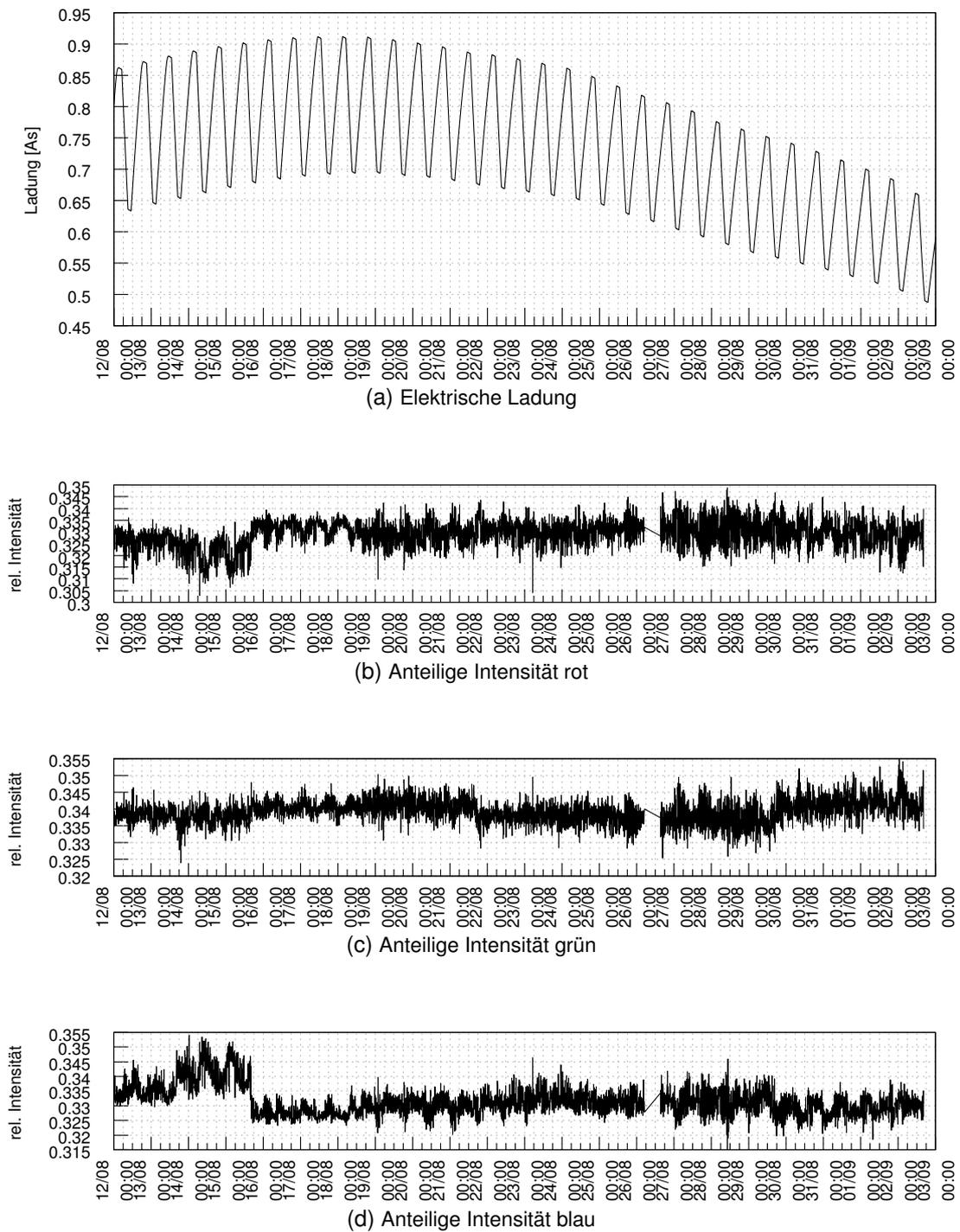


Abbildung 7.2.: Nachträgliche Messung - Ladung und relative Intensitätsverläufe (kompensiert): Die Sprünge im Intensitätsverlauf liegen in einer erneuten Ausrichtung der Kamera begründet.

7.2. Bewertung des Messplatzkonzeptes

Die Anforderung, welche an die Konstruktion des Messplatzes gestellt wurde, war, wackelfreie Aufnahmen bei konstanter Beleuchtung zu gewährleisten und einen automatischen Zyklbetrieb zu ermöglichen. Dies konnte mit dem Kamerahalter (siehe Kapitel 3.2) erreicht werden. Trotz der Möglichkeit, Messzelle und Kamera flexibel und präzise aufeinander ausrichten zu können, ist er mechanisch stabil genug. Der Abdeckkasten garantiert durch die Abschirmung des Umgebungslichtes die konstante Beleuchtung der Messzelle durch die Kamera. Er ist praktisch in der Handhabung und kann aufgesetzt bzw. entfernt werden, ohne den restlichen Aufbau zu stören. Die Automatisierung des Zyklbetriebs wurde durch den Einsatz einer Relaiskarte erreicht und gestattet eine exakte Reproduzierbarkeit der durchlaufenen Zyklen.

Die für die Aufzeichnung der Bilddaten eingesetzten Kameras erfüllen ihre Aufgabe nicht optimal. Die automatische interne Bildverarbeitung der Kamera, insbesondere Belichtungs-korrektur und Weißabgleich, sorgt dafür, dass aufeinander folgende Aufnahmen schwierig zu vergleichen sind. Das in Kapitel 4.7.1 vorgestellte Korrekturverfahren kann das Kameraverhalten nur begrenzt kompensieren. Es wäre daher wünschenswert, ein anderes Kameramodell zu verwenden, welches eine Abschaltung oder manuelle Einstellung der internen Bildverarbeitung zulässt. Auch die Tatsache, dass die eingesetzten Kameras nur Bilderserien mit maximal 1000 Bildern aufnehmen können, ist ein Kritikpunkt. Der hiermit bedingte Wechsel der SD-Karte ist stets mit einer erneuten Ausrichtung auf den zu beobachtenden Bildausschnitt verbunden.

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Sondenhalter für die spektrometrische Untersuchung der Elektrodenoberfläche im laufenden Zyklbetrieb sind nicht praktisch einsetzbar. Der Sondenhalter für die Messung und Beleuchtung unter einem Winkel von 0 Grad (vgl. Kapitel 3.2.1) zeigte eine starke Reflexion des eingestrahnten Lichts an der Glasscheibe der Messzelle. Mit ihm lassen sich keine Informationen über das Reflexionsverhalten der Elektrodenoberfläche gewinnen.

Der daraufhin entwickelte Sondenhalter (vgl. Kapitel 3.2.2) für eine Beleuchtung im Winkel von 0 Grad und eine Messung unter einem Winkel von 45 Grad zeigt, dass das Messprinzip funktioniert. Allerdings ist die Signalstärke für eine stichhaltige Auswertung zu gering.

Die für die Steuerung der Relaiskarte und für die Erfassung der elektrischen Messwerte entwickelten Programme liefen auch über einen Zeitraum von einer Woche hinaus sehr stabil. Das Konzept der UNIX-Filter hat sich für die Verarbeitung der Messdaten bewährt und ermöglichte zudem den Einsatz aus Gnuplot heraus, ohne dass Zwischenergebnisse in gesonderten Dateien abgelegt werden mussten.

Eine Überprüfung der Zyklpläne ist mittels des Programms „fileChecker“ (siehe Kapi-

tel 4.4) möglich. Hierbei hat sich als nachteilig herausgestellt, dass nur syntaktische Fehler gefunden werden können. Anregungen zur Vermeidung von Fehlern im Zyklrierplan werden im nachfolgenden Ausblick gegeben.

Das zur Erfassung der spektrometrischen Messdaten entwickelte Programm „SpectrometerReader“ (vgl. Kapitel 4.2) verhielt sich auf dem am Messplatz eingesetzten PC mit einem GNU/Linux Betriebssystem der Distribution „Linux Mint“ instabil. Dieses Problem trat auf dem zur Entwicklung eingesetzten PC nicht auf; dieser verwendete eine andere Linux-Distribution. Nach einem Update des Betriebssystems auf dem PC am Messplatz trat dieses Problem auch dort nicht mehr auf. Die Ursache ist bis jetzt ungeklärt.

Das eingesetzte Datenformat für die Speicherung der Messdaten ist ein reines Textformat. Dies hat den Nachteil, dass bei einer Langzeitmessung im Bezug zur tatsächlichen Information sehr viel Speicherplatz benötigt wird. Es wäre sinnvoll, hier ein anderes Dateiformat einzuführen.

Da über den erwarteten optischen Effekt noch nichts Näheres bekannt war, sind verschiedene Elektrodenmaterialien untersucht worden. Hierbei traten geringfügige Unterschiede bei den Zellaufbauten auf, z.B. variiert die Größe der Elektroden von Aufbau zu Aufbau und beeinflusst das elektrische Verhalten der Zelle. Auch die Zyklrierpläne wurden immer wieder angepasst, um zuvor beobachtete Effekte im Spannungs- und Stromverlauf (z.B. die Ruhepotentiale) besser untersuchen zu können. Dieses Vorgehen gestattet lediglich einen qualitativen Vergleich der Messergebnisse. Um eine quantitative Analyse zu ermöglichen, müssen möglichst identische Zellaufbauten nach demselben Zyklrierplan zyklriert werden.

7.3. Ausblick und offene Punkte

Trotz der umfassenden Erkenntnisse, welche in dieser Arbeit erlangt wurden, bleiben noch reichlich offene Punkte, die für die Entwicklung eines optischen Ladezustandssensors für LiFePO_4 -Batterien zu untersuchen sind.

Zunächst sollten mehrere Versuchsreihen unter gleichbleibenden Bedingungen mit ITO-haltigen LiFePO_4 -Kathoden gemacht werden, in denen sich die Ausprägung des Effektes quantitativ untersuchen lässt. Bei den Untersuchungen ist ein besonderes Augenmerk auf das bei einer Intensitätsänderung beobachtete, antiproportionale Verhalten des roten und des blauen Farbkanals zu legen. Dieses Verhalten lässt sich eventuell für die Entwicklung eines einfachen Sensors verwenden.

Für eine belastbare spektrometrische Untersuchung der Elektrodenoberfläche ist ein Aufbau¹ zu entwickeln, der nach dem in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Messprinzip funktioniert.

¹Die Entwicklung eines solchen Aufbaus wird im Forschungsvorhaben BATSEN gegenwärtig durchgeführt

Ebenfalls ist zu prüfen, ob andere Kameras verfügbar sind, die sich aufgrund einer manuell kontrollierbaren Bildverarbeitung besser für die Beobachtung eignen. Mit diesen Kameras könnte auch die Methode des sogenannten „Image Stacking“ näher auf die Tauglichkeit für die Beobachtung der Zellen untersucht werden. Es sollte auch überprüft werden, ob ein anderer Farbraum (vorzugsweise einer, in dem Helligkeits- und Farbinformationen getrennt betrachtet werden) für die Auswertung eventuell besser geeignet ist.

Die besten Ergebnisse wurden mit der Analyse eines möglichst großen Bereichs der Elektrodenoberfläche erzielt. Um den beobachteten Bereich zu maximieren, kann der Durchmesser des Lochs im Stromsammelvergrößert werden. Dabei findet jedoch eine mehr oder weniger starke Verformung des Stromsammlers statt. Da dies zu einer verstärkten Blasenbildung in der Messzelle führen kann, muss hier noch ein Verfahren entwickelt werden, dass die Verformung gering hält.

An dem in dieser Arbeit entwickelten Messplatz sind ebenfalls einige Dinge zu optimieren.

Ein Tool, welches die Zyklrierpläne graphisch darstellt, könnte dazu beitragen, logische Fehler im Zyklrierplan aufzudecken. Ebenfalls könnte das Programm „RelaisCardController“ um eine Schleifenfunktion erweitert werden. Dies minimiert das Fehlerrisiko bei sich wiederholenden Aufgaben.

Das Programm „SpectrometerReader“ verwendet ein Dateiformat, das bei längeren Messungen zu sehr großen Dateien führt. Das Ziel dieses reinen Textformates war es, die Messwerte direkt mit Gnuplot plotten zu können. Durch diese Anforderung wird die Information über die zu den Intensitätswerten zugehörigen Wellenlängen mit jedem Spektrum erneut abgespeichert. Ein einmaliges Abspeichern dieser Daten am Anfang der Datei hat das Potential, durch die Vermeidung der Redundanz etwa die Hälfte der Dateigröße einsparen zu können. Weitere Einsparungen wären durch die Verwendung eines binären Formats möglich. Beiden Optimierungen wären mit dem Verlust der Möglichkeit des direkten Plottens der Messdaten verbunden. Ein Filterprogramm, das das optimierte Dateiformat für Gnuplot expandiert, kann hier Abhilfe schaffen.

Eine weitere Idee ist, die Programme zur Steuerung und zur Messwerterfassung um eine Schnittstelle zu erweitern, über die sie Informationen absetzen und ferngesteuert werden können. Mittels eines übergeordneten Skriptes, welches die Informationen auswertet, könnte eine dynamische Zyklrierung erfolgen. Es wäre dann denkbar, eine Zelle nur solange zu entladen, bis eine gewisse Zellspannung erreicht ist. Ein mögliches Mittel zur Programmierung könnten die sogenannten UNIX-Domain-Sockets darstellen.

Die mittels eines Widerstandes realisierte Ladestrombegrenzung hat den Nachteil, dass auch bei einem unkritischen Ladestrom ein Teil der Ladespannung über dem Widerstand abfällt. Eine einstellbare aktive Strombegrenzung könnte den Widerstand ersetzen. Anhang E.1 zeigt ein Schaltungsbeispiel für solch eine einstellbare Strombegrenzung. Die Schaltung wurde aus zeitlichen Gründen nicht aufgebaut und erprobt. Die einzelnen Baugruppen der Schaltung stammen aus [23].

Bei einer Erweiterung des Messplatzes um weitere Zellen sollte darüber nachgedacht werden, wie die Zellen mittels weiterer Relaiskarten im Multiplexbetrieb an zwei Messgeräten angeschlossen werden können. Dadurch wäre der Erwerb weiterer Präzisionsmultimeter für die Erweiterung des Messplatzes nicht mehr erforderlich.

Literaturverzeichnis

- [1] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2012.* 2013. – URL http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_06082013ov.pdf. – Zugriffsdatum: 14.08.2014
- [2] ASEQ INSTRUMENTS: *LR1 - compact spectrometer - specification*
- [3] BHATTACHARYA, Sandeep ; RIAHI, A. R. ; ALPAS, Ahmet T.: In-situ observations of lithiation/de-lithiation induced graphite damage during electrochemical cycling. In: *Scripta Materialia* 64 (2011), Januar, Nr. 2, S. 165–168
- [4] CATALANO, Anthony W. ; FRYE, Robert C. ; FUKUDA, Tadaji ; HIROSE, Masataka ; KRUANGAM, Dusit ; MATSUMURA, Masakiyo ; MIYAZAKI, Seiichi ; MODDEL, Gerret ; PEREZ-MENDEZ, Victor ; RIETMAN, Edward A. ; ROSAN, Karlheinz ; SHIMIZU, Isamu ; SUZUKI, Kouji ; TAKEDA, Tashiro ; WONG, Chee C. ; KANICKI, Jerzy (Hrsg.): *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices: Optoelectronic Devices.* Artech House, Inc., 1991. – ISBN 0-89006-490-3
- [5] CONRAD ELECTRONIC SE: *8fach Relaiskarte.* 2012. – URL http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197730-an-01-ml-8_K_RELAIKARTE_PC230V_AC16A_de_en_fr_nl.pdf. – Zugriffsdatum: 17.08.2014
- [6] DIE BUNDESREGIERUNG: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung.* 2009. – URL http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf. – Zugriffsdatum: 10.08.2014
- [7] EL-CELL GMBH: *Electrochemical Test Cell ECC-Opto-Std, User Manual.* 2014. – URL http://el-cell.com/wp-content/uploads/manuals/ECC_OPTO_manual.pdf. – Zugriffsdatum: 24.08.2014
- [8] ENGELN-MÜLLGES, Gisela ; NIDERDRENK, Klaus ; WODICKA, Reinhard: *Numerik- Algorithmen.* Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-13472-2
- [9] FLUKE: *45 Multimeter mit Doppelanzeige.* – URL http://assets.fluke.com/manuals/45_____umger0400.pdf. – Zugriffsdatum: 17.08.2014

- [10] FURTNER, Uwe: *Farbverarbeitung mit Bayer-Mosaic-Sensoren*. 2001. – URL http://www.matrix-vision.com/tl_files/mv11/Glossary/art_bayermosaic_de.pdf. – Zugriffsdatum: 09.09.2014
- [11] HARRIS, Stephen J. ; TIMMONS, Adam ; BAKER, Daniel R. ; MONROE, Charles: Direct in situ measurements of Li transport in Li-ion battery negative electrodes. In: *Chemical Physics Letters* 485 (2009), Dezember, Nr. 4–6, S. 265–274
- [12] HECHT, Eugene: *Optik*. 3. vollst. überarb. Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001. – ISBN 3-486-24917-7
- [13] HOCHÉ, Detlef ; KÜBLBECK, Josef ; REICHWALD, Rainer ; SCHWARZ, Oliver ; MEYER, Lothar (Hrsg.) ; SCHMIDT, Gert-Dietrich (Hrsg.): *Abiturwissen Physik*. PAETEC Verlag für Bildungsmedien Berlin - Frankfurt a. M., 2004. – ISBN 3-411-00220-4
- [14] HOFFMANN, Kevin P.: *Energiepolitik: Windkraft-Vorbild Dänemark*. 2009. – URL <http://www.zeit.de/online/2009/27/windkraft-daenemark>. – Zugriffsdatum: 10.08.2014
- [15] JOSSEN, Andreas ; WEYDANZ, Wolfgang: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. 1. Auflage. Ubooks Verlag, 2006. – ISBN 3-937536-01-9
- [16] KORTHAUER, Reiner (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-642-30653-2
- [17] LINDEN, David ; REDDY, Thomas B.: *Linden's Handbook of Batteries*. Fourth edition. McGraw-Hill, 2011. – ISBN 978-0-07-162421-3
- [18] NASIMZADA, Wahid: *Hard- und Softwareentwicklung eines Lichtleiter-Sensors für die optische Analyse des Elektrolyten von Bleibatterien*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorthesis, 2013
- [19] RIEMSCHEIDER, Karl-Ragmar ; SCHNEIDER, Matthias: *Drahtlose Sensoren in den Zellen von Fahrzeug-Batterien*. 2011. – URL http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-IE/Daten/Docs/ESZ-ASP/IWKM21_Batsen.pdf. – Zugriffsdatum: 10.08.2014
- [20] SALOMON, David: *Data Compression, The Complete Reference*. 3rd edition. Springer, 2004. – ISBN 0-387-40697-2
- [21] SCHIEPEL, Philipp: *Messzelle für die optoelektronische Analyse von Lithium-Ionen-Batterien*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorthesis, 2014
- [22] TEKTRONIX INC.: *DMM4020 Digital Multimeter, Users Manual, 077-0364-00*
- [23] TIETZE, Ulrich ; SCHENK, Christoph ; GAMM, Eberhard: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer Vieweg, 2012. – ISBN 978-3-642-31025-6

-
- [24] TOSHIBA: *TCD1304AP*. 1997. – URL <http://www.spectronicdevices.com/pdf/TCD1304AP.pdf>. – Zugriffsdatum: 11.09.2014
- [25] WIKIPEDIA: *Bayer-Sensor* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. 2014. – URL <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bayer-Sensor&oldid=132170957>. – Zugriffsdatum: 09.09.2014
- [26] ZEDH ; MATT ; WIKIMEDIA COMMONS: *Elektromagnetisches Spektrum*. 2009. – URL <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg>. – Zugriffsdatum: 09.09.2014. – Lizenz: Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic, URL: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/deed.en>

A. Konstruktionszeichnungen

A.1. Abdeckkasten

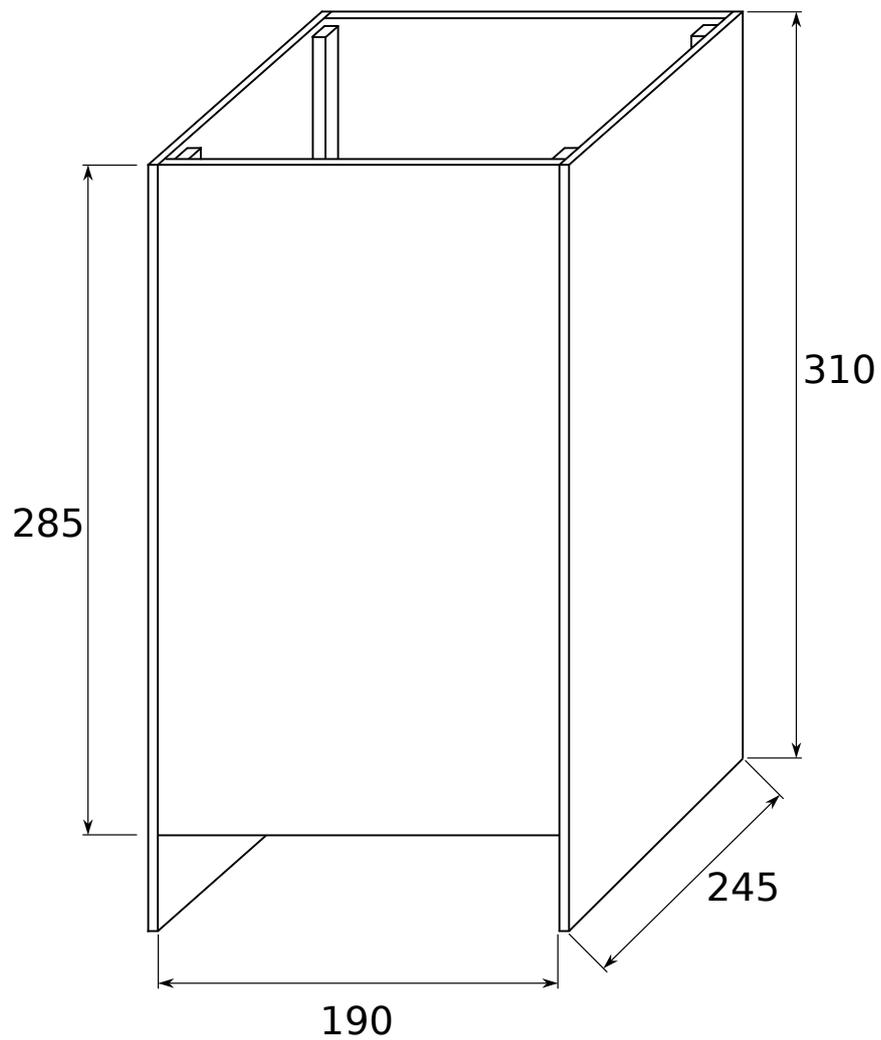


Abbildung A.1.: Abdeckkasten schräg von vorn (alle Angaben in Millimetern)

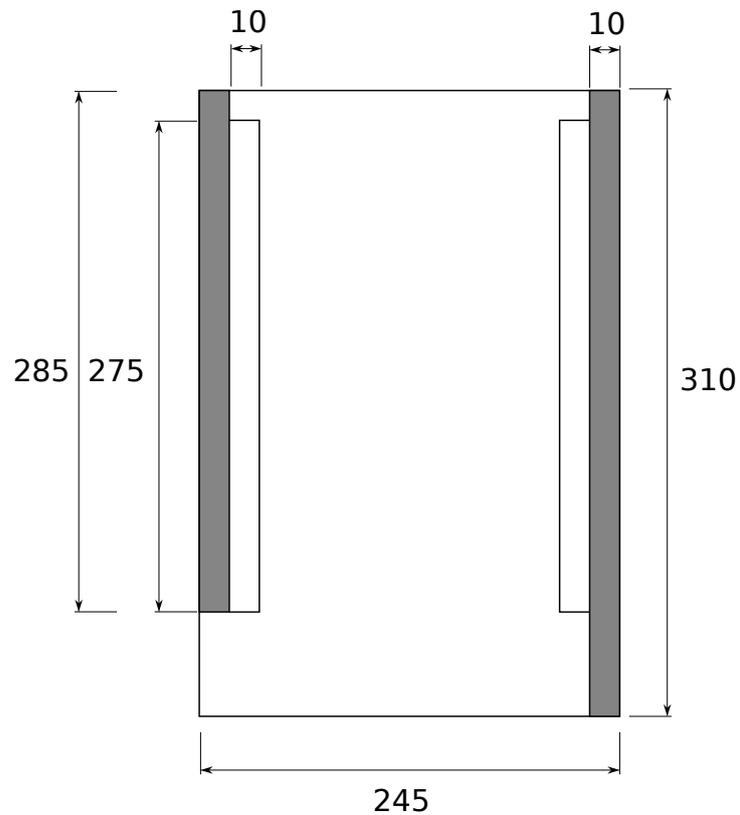


Abbildung A.2.: Abdeckkasten Längsschnitt (Sicht auf Seitenwand, alle Angaben in Millimetern)

Tabelle A.1.: Bauteile des Abdeckkastens

Bezeichnung	Anzahl	Material	Länge	Breite	Tiefe
Vorderseite	1	MDF	285 mm	190 mm	10 mm
Rückseite	1	MDF	310 mm	190 mm	10 mm
Seitenwand	2	MDF	310 mm	245 mm	10 mm
Deckel	1	MDF	225 mm	190 mm	10 mm
Kantholz	4	Kiefer	275 mm	10 mm	10 mm

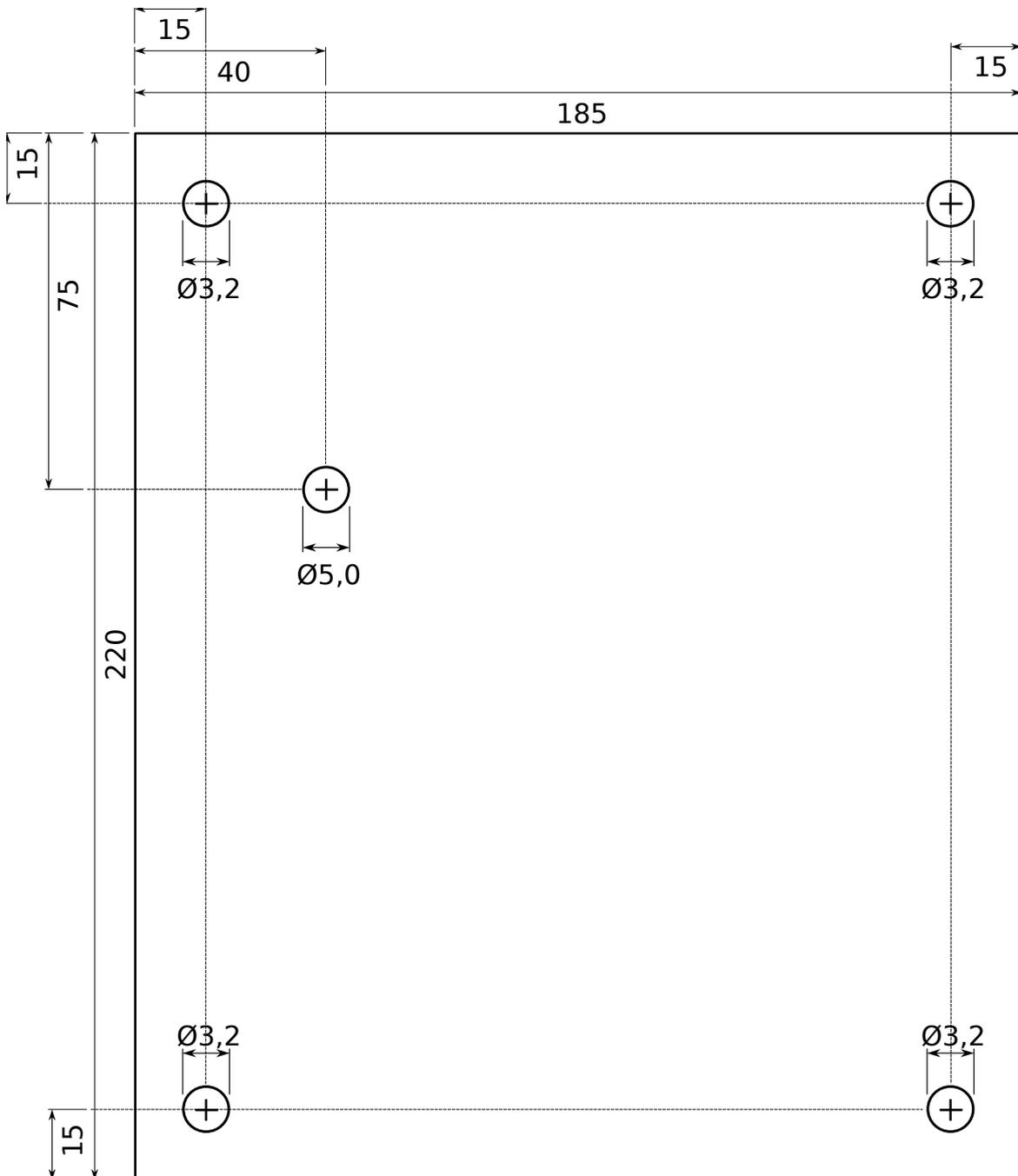
A.2. Kamerahalter

Abbildung A.3.: Grundplatte des Kamerahalters (Material: 1 mm starkes Eisenblech, alle Angaben in Millimetern)

A.3. Sondenhalter (0 Grad)

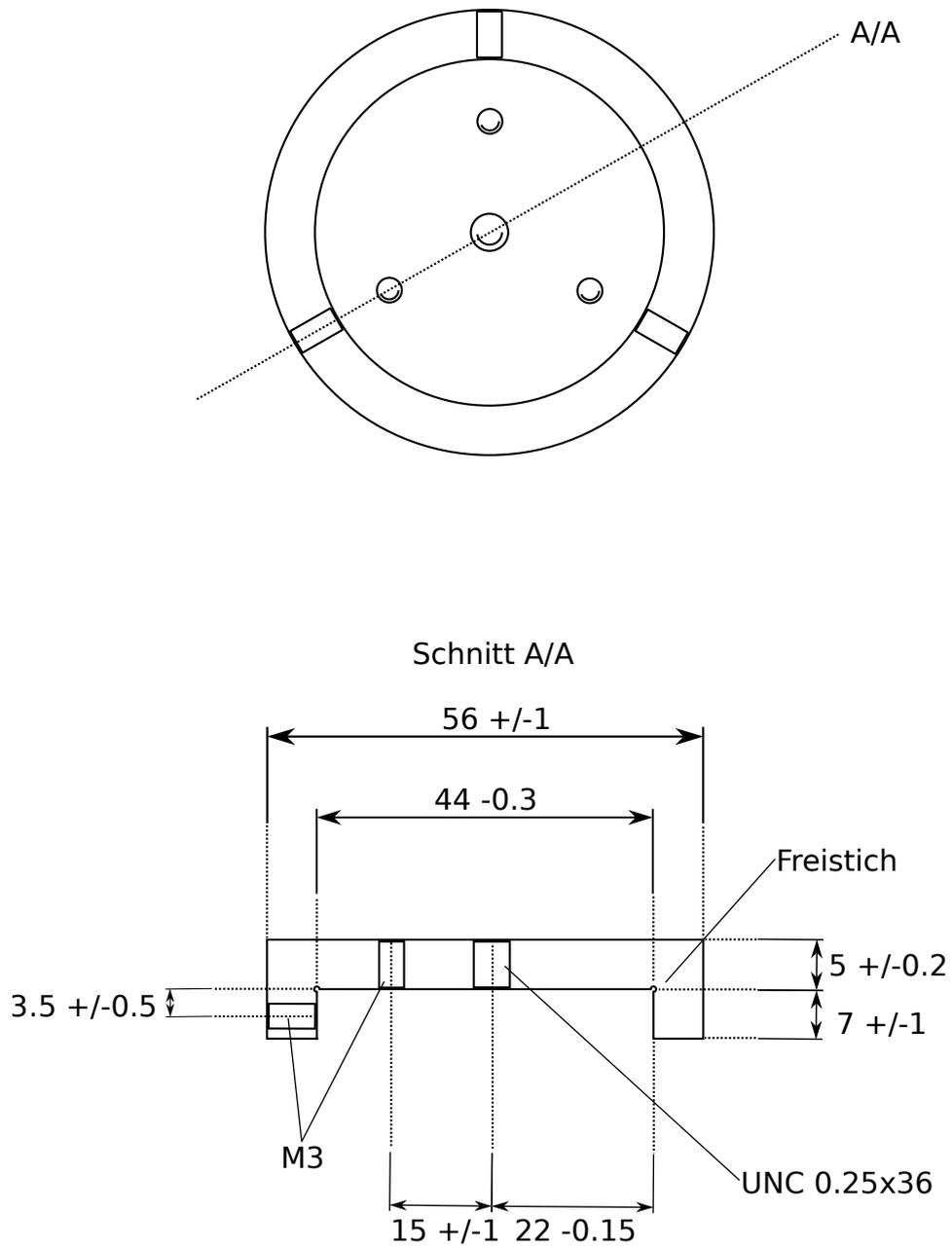


Abbildung A.4.: Sondenhalter 0 Grad (Material: Aluminium, alle Angaben in Millimetern)

B. Quellcodes

B.1. DMM4020_reader_v2.c

```
1  /*****
2  * Tektronix DMM4020 reader
3  *
4  * File:   DMM4020_reader.c
5  * Version: 0.2
6  * Date:   2014-03-25
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  *****/
10
11 #include <stdio.h>
12 #include <stdlib.h>
13 #include <time.h>
14 #include <signal.h>
15 #include <unistd.h>
16 #include <termios.h>
17 #include <string.h>
18 #include <fcntl.h>
19 #include <errno.h>
20 #include <sys/time.h>
21 #include <sys/wait.h>
22 #include <sys/types.h>
23
24 #define QUERYSTRING      "VAL1?\n"
25 #define RATESTRING       "RATE_S\n"
26 #define WITHMODE         "FORMAT_2\n"
27 #define WITHOUTMODE      "FORMAT_1\n"
28 #define BUFFSIZE         1024
29 #define READTIMEOUTUSEC  250000L /* 250ms */
30 #define MODESETTIME      5
31 #define MINCHARACTERS    10
32
33 #define MAXMODE 6
34 char *modes[] = { "\nVDC\n",
35                  "\nVAC\n",
36                  "\nADC\n",
37                  "\nAAC\n",
38                  "\nVACDC\n",
39                  "\nAACDC\n",
40                  "\nOHMS\n"
41                };
42 sig_atomic_t BREAKFLAG = 0;
43
44 void signalhandler(int signal)
45 {
46     signal = signal;
47 }
48
49 void siginhandler(int signal)
50 {
51     signal = signal;
52     BREAKFLAG = 1;
53 }
54
55 void usage(char *progname) {
56     fprintf(stderr, "\tUSAGE: \t\t%s -f file -d dev [-s] [-m mode] [-i sec]\n"
57              "\t\tOPTIONS: "
58              "\t\t-f \t\tLogfile; will be overwritten if exists\n"
59              "\t\t-d \t\tSerial port device\n"
60              "\t\t-s \t\tAdd mode suffix\n"
61              "\t\t-i \t\tInterval in seconds (default is 1).\n"
62              "\t\t\t\tIf set to 0, an interval of 500ms is used.\n"
63              "\t\t-m \t\tMode of operation (default is 0 - volts_DC)\n\n"
64              "\t\tMODES: \t\t"
```

```

65         "_0:_volts_DC\n"
66         "\\t\\t\\t_1:_volts_AC\n"
67         "\\t\\t\\t_2:_amperes_DC\n"
68         "\\t\\t\\t_3:_amperes_AC\n"
69         "\\t\\t\\t_4:_volts_true_RMS\n"
70         "\\t\\t\\t_5:_amperes_true_RMS\n"
71         "\\t\\t\\t_6:_ohms\n",
72     progname
73 );
74 }
75
76 int main(int argc, char *argv[])
77 {
78     pid_t        writerPid;
79     int          pipe_fd[2];
80     int          opt;
81     char         *logfile_name, *devicename;
82     int          mandatoryOptions = 2;
83     int          mode = 0;
84     long         seconds = 1;
85     char         addModeSuffix = 0;
86     sigset_t     sigset;
87     struct sigaction sigintaction;
88
89     /* evaluate commandline options */
90     while( (opt = getopt(argc, argv, "f:d:i:m:s")) != -1 ) {
91         switch( opt ) {
92             case 'f': logfile_name = optarg;
93                     mandatoryOptions--;
94             break;
95             case 'd': devicename = optarg;
96                     mandatoryOptions--;
97             break;
98             case 'i': seconds = atoi(optarg);
99                     break;
100            case 'm': mode = atoi(optarg);
101                    break;
102            case 's': addModeSuffix = 1;
103                    break;
104            default: usage(argv[0]);
105                    exit(EXIT_FAILURE);
106        }
107    }
108
109    /* limit checks */
110    if( (mandatoryOptions > 0)
111        || (mode < 0)
112        || (mode > MAXMODE)
113        || (seconds < 0)
114    ) {
115        usage(argv[0]);
116        exit(EXIT_FAILURE);
117    }
118
119    /* initialize structure and signal set */
120    memset(&sigintaction, 0x00, sizeof(sigintaction));
121    sigfillset(&sigset);
122    sigintaction.sa_mask = sigset;
123    sigintaction.sa_flags = 0;
124    sigintaction.sa_handler = &sigint_handler;
125
126    /* open pipe */
127    if(pipe(pipe_fd) < 0) {
128        fprintf(stderr, "Can't open pipe.\n");
129        return EXIT_FAILURE;
130    }
131
132    /* split into serialport-reader and logfile-writer processes */
133    writerPid = fork();
134    if(writerPid) { /* serialport reader process */
135        int          ser_fd;
136        FILE         *pipe_fp;
137        timer_t      timer_id;
138        struct sigaction sigusr1action;
139        struct sigevent sigalevent;
140        struct itimerspec timer;
141        struct termios current_settings, old_settings;
142        struct timeval readtimeout, timestamp;
143
144        /* open serial port */
145        if( (ser_fd = open(devicename, O_RDWR)) < 0 ) {
146            kill(writerPid, SIGINT); /* terminate writer-process */
147            fprintf(stderr, "Can't open serial port.\n");
148            close(pipe_fd[1]);
149            return EXIT_FAILURE;

```

```

150     }
151
152     /* open pipe filepointer */
153     if ( (pipe_fp = fdopen(pipe_fd[1], "w")) == NULL ) {
154         kill(writerPid, SIGINT); /* terminate writer-process */
155         fprintf(stderr, "Can't open pipe_(writing_end).\n");
156         close(ser_fd);
157         close(pipe_fd[1]);
158         return EXIT_FAILURE;
159     }
160
161     /* initialize structures */
162     memset(&sigevent, 0x00, sizeof(sigevent));
163     memset(&sigusr1action, 0x00, sizeof(sigusr1action));
164     memset(&timer, 0x00, sizeof(timer));
165     memset(&current_settings, 0x00, sizeof(current_settings));
166     memset(&old_settings, 0x00, sizeof(old_settings));
167     memset(&readtimeout, 0x00, sizeof(readtimeout));
168     memset(&timestamp, 0x00, sizeof(timestamp));
169     sigevent.sigev_notify = SIGEV_SIGNAL;
170     sigevent.sigev_signo = SIGUSR1;
171     sigusr1action.sa_flags = 0;
172     sigusr1action.sa_handler = &signalhandler;
173     sigusr1action.sa_mask = sigset;
174     timer.it_value.tv_sec = seconds;
175     timer.it_value.tv_nsec = (seconds == 0) ? 500000000L : 0L;
176     timer.it_interval.tv_sec = seconds;
177     timer.it_interval.tv_nsec = (seconds == 0) ? 500000000L : 0L;
178     current_settings.c_cflag = CLOCAL | CS8 | CREAD;
179     current_settings.c_iflag = 0;
180     current_settings.c_oflag = 0;
181     current_settings.c_lflag = 0;
182     current_settings.c_cc[VMIN] = (addModeSuffix) ? MINCHARACTERS : MINCHARACTERS + strlen(modes[mode]) - 1;
183     cfsetispeed(&current_settings, B9600);
184     cfsetospeed(&current_settings, B9600);
185
186     /* register signal handlers */
187     sigaction(SIGINT, &sigintaction, NULL);
188     sigaction(SIGUSR1, &sigusr1action, NULL);
189
190     /* save current serial port settings and apply new settings */
191     tcgetattr(ser_fd, &old_settings);
192     tcsetattr(ser_fd, TCSANOW, &current_settings);
193
194     /* apply mode, rate and format (suffix) settings */
195     write(ser_fd, modes[mode], strlen(modes[mode]));
196     write(ser_fd, RATESTRING, strlen(RATESTRING));
197     if (addModeSuffix != 0)
198         write(ser_fd, WITHMODE, strlen(WITHMODE));
199     else
200         write(ser_fd, WITHOUTMODE, strlen(WITHOUTMODE));
201     tcflush(ser_fd, TCOFLUSH);
202     sleep(MODESETTIME);
203
204     /* create and start timer */
205     if ( timer_create(CLOCK_REALTIME, &sigevent, &timer_id) < 0 ) {
206         kill(writerPid, SIGINT); /* terminate writer-process */
207         fprintf(stderr, "Can't create timer.\n");
208         close(ser_fd);
209         fclose(pipe_fp);
210         close(pipe_fd[1]);
211         return EXIT_FAILURE;
212     }
213     timer_settime(timer_id, 0, &timer, NULL);
214
215     while( !BREAKFLAG ) {
216         char readagain = 1;
217
218         /* wait for a signal */
219         pause();
220
221         /* flush the input queue and request new value */
222         tcflush(ser_fd, TCIFLUSH);
223         write(ser_fd, QUERYSTRING, strlen(QUERYSTRING));
224         tcflush(ser_fd, TCOFLUSH);
225
226         while(readagain & !BREAKFLAG) {
227             int retval, bufcnt = 0;
228             char buffer[BUFSIZE];
229             fd_set readset; //, writeset, exceptionset;
230
231             /* initialize filedescriptor sets and timeout structure */
232             FD_ZERO(&readset);
233             FD_SET(ser_fd, &readset);
234             readtimeout.tv_sec = 0L;

```

```

235     readtimeout.tv_usec = READTIMEOUTUSEC;
236
237     /* wait for input data */
238     retval = select(ser_fd+1, &readset, NULL, NULL, &readtimeout);
239     if( retval < 0 ) {
240         if( errno != EINTR ) {
241             fprintf(pipe_fp, "#_ERROR:_%s\n", strerror(errno));
242             fflush(pipe_fp);
243         }
244         break;
245     }
246     if( retval == 0 ) {
247         fprintf(pipe_fp, "#_Multimeter_did_not_respond_in_time\n");
248         fflush(pipe_fp);
249         break;
250     }
251
252     /* read a line */
253     do {
254         read(ser_fd, buffer+bufcnt++, 1);
255     } while((buffer[bufcnt-1] != '\n'));
256     buffer[bufcnt] = '\0';
257
258     gettimeofday(&timestamp, NULL);
259     switch(buffer[0]) {
260         /* -/+ indicate a value => write output to logfile and console */
261         case '+':
262             fprintf(pipe_fp, "%ld.%03d\t%s", timestamp.tv_sec, (int)(timestamp.tv_usec/1000), buffer);
263             readagain = 0;
264             break;
265         /* = indicates prompt => do nothing */
266         case '=': break;
267         /* !/? indicate error => put a message */
268         case '!':
269             fprintf(pipe_fp, "#_ERROR:_Multimeter_returned_error-prompt\n");
270             readagain = 0;
271         default: break;
272     }
273
274     /* flush written data */
275     if(!readagain)
276         fflush(pipe_fp);
277 }
278
279 /* wait until the writer-process terminates */
280 wait(NULL);
281
282 /* restore serial port settings */
283 tcsetattr(ser_fd, TCSANOW, &old_settings);
284
285 /* close pipe */
286 fclose(pipe_fp);
287 close(pipe_fd[1]);
288
289 /* close serial port */
290 close(ser_fd);
291 }
292
293
294 else { /* logfile-writer process */
295     char buffer[BUFFSIZE];
296     int  bufcnt = 0;
297     FILE *log_fp;
298
299     /* open logfile */
300     if( (log_fp = fopen(logfilename, "w")) == NULL ) {
301         fprintf(stderr, "Can't open logfile.\n");
302         close(pipe_fd[0]);
303         kill(getppid(), SIGINT); /* terminate parent */
304         return EXIT_FAILURE;
305     }
306
307     /* output caption */
308     fprintf(log_fp, "#_Mode:_%s", modes[mode]+1);
309     fprintf(stdout, "#_Mode:_%s", modes[mode]+1);
310     fprintf(log_fp, "#_Timestamp\tValue\n");
311     fprintf(stdout, "#_Timestamp\tValue\n");
312
313     /* register signal handler */
314     sigaction(SIGINT, &sigintaction, NULL);
315
316     while( !BREAKFLAG ) {
317         read(pipe_fd[0], buffer+bufcnt++, 1);
318         if( errno == EINTR )
319             break; /* skip the output, if a signal occured */

```

```

320
321     if (buffer[bufcnt-1] == '\n') {
322         buffer[bufcnt] = '\0';
323         bufcnt = 0;
324         fprintf(log_fp, "%s", buffer); /* write output to logfile */
325         fprintf(stdout, "%s",buffer); /* write output to stdout */
326         fflush(log_fp);
327         fflush(stdout);
328     }
329 }
330
331 /* close logfile and pipe filepointer */
332 fclose(log_fp);
333 close(pipe_fd[0]);
334 }
335 return EXIT_SUCCESS;
336 }

```

B.2. SpectrometerReader

B.2.1. SpectrometerReader.c

```

1  /*****
2  * ASEQ Instruments LRT reader
3  *
4  * File: SpectrometerReader.c
5  * Version: 0.1
6  * Date: 2014-05-28
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  *****/
10
11
12 #include <stdio.h>
13 #include <fcntl.h>
14 #include <unistd.h>
15 #include <stdlib.h>
16 #include <string.h>
17 #include <signal.h>
18 #include <time.h>
19 #include <float.h>
20 #include <sys/time.h>
21 #include <sys/wait.h>
22
23 #include "SpectrometerFunctions.h"
24
25 /* globals */
26 static sig_atomic_t BREAKFLAG = 0;
27
28 /* signal handlers */
29 void siginhandler(int signal)
30 {
31     signal = signal;
32     BREAKFLAG = 1;
33 }
34
35 void signalhandler(int signal)
36 {
37     signal = signal;
38 }
39
40 /* functions */
41 void usage(char *progname) {
42     fprintf(stderr, "\t\\USAGE:\t\t%-f_file_d_dev_[-i_sec]_[-t]\n"
43             "\t\\OPTIONS:"
44             "\t\t-f\tLogfile;_will_be_overwritten_if_exists\n"
45             "\t\t-d\tRaw_hid_device\n"
46             "\t\t-i\tInterval_in_seconds._Default_is_60_seconds\n"
47             "\t\t-e\tExposure_time_steps._Each_step_is_2.375ms._Default_is_1_step.\n"
48             "\t\t-t\tUse_fast_mode\n",
49             progname
50     );
51 }
52
53 int main( int argc, char *argv[] )
54 {
55     COEFFICIENTS     coeffs;
56     double           normalizationSpectrum[3653];

```

```

57  char          *logfile, *devicename;
58  int           i, opt, fd, pipe_fd[2], mandatoryOptions = 2;
59  unsigned short exposureTime = 1;
60  unsigned char fast          = 0;
61  long          seconds       = 60L;
62  short         datapoints;
63  pid_t         writerPid;
64  sigset_t      sigset;
65  struct sigaction sigintaction;
66
67  /* evaluate commandline options */
68  while( (opt = getopt(argc, argv, "f:d:i:e:t")) != -1 ) {
69      switch( opt ) {
70          case 'f': logfile = optarg;
71                  mandatoryOptions--;
72          break;
73          case 'd': devicename = optarg;
74                  mandatoryOptions--;
75          break;
76          case 'i': seconds = atoi(optarg);
77          break;
78          case 'e': exposureTime = (unsigned short) atoi(optarg);
79          break;
80          case 't': fast = 1;
81          break;
82          default: usage(argv[0]);
83                  exit(EXIT_FAILURE);
84      }
85  }
86
87  /* limit checks */
88  if( ( mandatoryOptions > 0 )
89      ||( seconds < 0 )
90      ||( exposureTime < 1 )
91  ) {
92      usage(argv[0]);
93      exit(EXIT_FAILURE);
94  }
95
96  datapoints = (fast) ? NOFASTDATAPOINTS : NODATAPOINTS;
97
98  /* open hid device */
99  if( (fd = open(devicename, O_RDWR)) < 0 ) {
100      fprintf(stderr, "Can't open hid device.\n");
101      return EXIT_FAILURE;
102  }
103
104  /* initialize structure and signal set */
105  memset(&sigintaction, 0x00, sizeof(sigintaction));
106  sigfillset(&sigset);
107  sigintaction.sa_mask = sigset;
108  sigintaction.sa_flags = SA_RESTART;
109  sigintaction.sa_handler = &siginthandler;
110
111  /* open pipe */
112  if(pipe(pipe_fd) < 0) {
113      fprintf(stderr, "Can't open pipe.\n");
114      close(fd);
115      return EXIT_FAILURE;
116  }
117
118  /* read coefficients and correction spectrum */
119  initialize(fd);
120  readCoefficients(fd, &coeffs);
121  getNormalisationSpectrum(fd, &normalizationSpectrum);
122
123  /* split into reader and writer process */
124  writerPid = fork();
125  if(writerPid > 0) {
126      timer_t timer_id;
127      struct sigaction sigusr1action;
128      struct sigevent sigalevent;
129      struct itimerspec timer;
130      struct timeval timestamp;
131
132      /* initialize structures */
133      memset(&sigalevent, 0x00, sizeof(sigalevent));
134      memset(&sigusr1action, 0x00, sizeof(sigusr1action));
135      memset(&timer, 0x00, sizeof(timer));
136      memset(&timestamp, 0x00, sizeof(timestamp));
137      sigalevent.sigev_notify = SIGEV_SIGNAL;
138      sigalevent.sigev_signo = SIGUSR1;
139      sigusr1action.sa_flags = 0;
140      sigusr1action.sa_handler = &signalhandler;
141      sigusr1action.sa_mask = sigset;

```

```

142 timer.it_value.tv_sec = seconds;
143 timer.it_value.tv_nsec = 0L;
144 timer.it_interval.tv_sec = seconds;
145 timer.it_interval.tv_nsec = 0L;
146
147 /* register signal handlers */
148 sigaction(SIGINT, &sigintaction, NULL);
149 sigaction(SIGUSR1, &sigusr1action, NULL);
150
151 /* create and start timer */
152 if( timer_create(CLOCK_REALTIME, &sigevent, &timer_id) < 0 ) {
153     kill(writerPid, SIGINT); /* terminate writer-process */
154     fprintf(stderr, "Can't_create_timer.\n");
155     close(fd);
156     close(pipe_fd[1]);
157     return EXIT_FAILURE;
158 }
159 timer_settime(timer_id, 0, &timer, NULL);
160
161 while(!BREAKFLAG) {
162     double spectrum[NODATAPOINTS];
163
164     /* wait for a signal */
165     pause();
166
167     gettimeofday(&timestamp, NULL);
168     startAcquisition(fd, exposureTime, 1, 0, 0, 0);
169     /* wait until acquisition is done (busy-waiting) */
170     while(isAcquisitionInProgress(fd))
171         ;
172     resetAddress(fd);
173     if(fast) {
174         getSpectrumFast(fd, NORMAL2FAST(&spectrum), &normalizationSpectrum, &coeffs, exposureTime, 1);
175     } else {
176         getSpectrum(fd, &spectrum, &normalizationSpectrum, &coeffs, exposureTime, 1);
177     }
178     shiftAddress(fd, 0x0180);
179     resetAddress(fd);
180
181     /* write timestamp and spectrum to pipe */
182     write(pipe_fd[1], &timestamp, sizeof(timestamp));
183     write(pipe_fd[1], &spectrum, datapoints*sizeof(double));
184 }
185
186 /* wait until the writer-process terminates */
187 wait(NULL);
188
189 /* close pipe and hid device */
190 close(pipe_fd[1]);
191 close(fd);
192 }
193 else {
194     FILE *log_fp;
195     double wavelength[NODATAPOINTS];
196
197     /* open logfile */
198     if( (log_fp = fopen(logfilename, "w")) == NULL ) {
199         fprintf(stderr, "Can't_open_logfile.\n");
200         close(pipe_fd[0]);
201         kill(getppid(), SIGINT); /* terminate parent */
202         return EXIT_FAILURE;
203     }
204
205     /* calculate wavelength */
206     for(i=0; i<NODATAPOINTS; i++)
207         wavelength[i] = coeffs.A1*i + coeffs.B1*i + coeffs.C1;
208
209     /* register signal handler */
210     sigaction(SIGINT, &sigintaction, NULL);
211
212     while( !BREAKFLAG ) {
213         double spectrum[NODATAPOINTS];
214         double maxIntensity = -DBL_MAX;
215         struct timeval timestamp;
216
217         /* read timestamp and spectrum */
218         read(pipe_fd[0], &timestamp, sizeof(timestamp));
219         read(pipe_fd[0], &spectrum, datapoints*sizeof(double));
220
221         /* write to logfile */
222         fprintf(log_fp, "#Time_of_acquisition:_%d\n", timestamp.tv_sec);
223         for(i=0; i<datapoints; i++) {
224             if( fast ) {
225                 fprintf(log_fp, "%.2f\t%f\n", wavelength[2*i], spectrum[i]);
226             } else {

```

```

227         fprintf(log_fp, "%.2f\\t%f\\n", wavelength[i], spectrum[i]);
228     }
229     maxIntensity = (spectrum[i] > maxIntensity) ? spectrum[i] : maxIntensity;
230 }
231 fprintf(log_fp, "\\n\\n");
232 fflush(log_fp);
233
234 /* write to console */
235 fprintf(stdout, "#Time_of_acquisition:%ld\\t\\t_max_intensity%f\\n", timestamp.tv_sec, maxIntensity);
236 }
237 close(pipe_fd[0]);
238 fclose(log_fp);
239 }
240 return EXIT_SUCCESS;
241 }

```

B.2.2. SpectrometerFunctions.h

```

1  /******
2  * ASEQ Instruments LR1-T reader
3  *
4  * File: SpectrometerFunctions.h / SpectrometerFunctions.c
5  * Version: 0.1
6  * Date: 2014-05-28
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  *****/
10
11 /* spectrometer commands */
12 #define CMD_INIT 0xF1
13 #define CMD_READFLASH 0xA1
14 #define CMD_READSPEC 0x04
15 #define CMD_SETACQPARAM 0x01
16 #define CMD_CHECKACQSTATUS 0x02
17 #define CMD_RESETADDRESS 0x03
18 #define CMD_SHIFTADDRESS 0x09
19
20 /* spectrometer command arguments */
21 #define ARG_SPECSTART 0x01
22 #define ARG_SPECNEXT 0x00
23 #define ARG_SPECSTOP 0x02
24 #define ARG_USETRIGGER 0x01
25 #define ARG_KEEPTRIGGER 0x02
26 #define ARG_ACQINPROGRESS 0x01
27
28 /* flash memory addresses */
29 #define ADR_COEFFS 0
30 #define ADR_NORMSPEC 4096
31
32 /* constants */
33 #define NODATAPOINTS 3653
34 #define NOFASTDATAPOINTS 1827
35 #define NOPACKETS 116
36 #define NOFASTPACKETS 58
37 #define NODUMMYVALUES 33
38 #define NOBITSRESOLUTION 14
39 #define SPECTRALOFFSET 49427
40 #define EXPOSURETIMETICKS 2.375
41 #define REQUESTSIZE 8
42 #define ANSWERSIZE 64
43
44 /* make a pointer to an 3653 element double array pretend it's a pointer to an 1827 element double array */
45 #define NORMAL2FAST(X) ((double (*)(NOFASTDATAPOINTS)) (X))
46
47 /* structure for calibration coefficients */
48 typedef struct coefficients {
49     double A1;
50     double B1;
51     double C1;
52     double a1;
53     double b1;
54 } COEFFICIENTS;
55
56 /* functions */
57 void sendRequest(int fd, unsigned char (*request)[REQUESTSIZE], unsigned char (*answer)[ANSWERSIZE]);
58 void initialize(int fd);
59 void resetAddress(int fd);
60 void shiftAddress(int fd, unsigned short address);
61 void readFlash(int fd, int startAddress, unsigned char *buffer, int size);
62 void readCoefficients(int fd, COEFFICIENTS *coeffs);
63 /* void showCoefficients(const COEFFICIENTS *coeffs); */
64 void getNormalisationSpectrum(int fd, double (*spec)[NODATAPOINTS]);

```

```

65 void startAcquisition( int fd, unsigned short exposureTime,
66                      unsigned char scans, unsigned char blankScans,
67                      unsigned char useTrigger, unsigned char keepTrigger );
68 int isAcquisitionInProgress(int fd);
69 void getSpectrum( int fd, double (*spec)[NODATAPOINTS], double (*normspec)[NODATAPOINTS],
70                 COEFFICIENTS *coeffs, unsigned short exposureTime, unsigned char specNumber);
71 void getSpectrumFast( int fd, double (*spec)[NOFASTDATAPOINTS], double (*normspec)[NODATAPOINTS],
72                      COEFFICIENTS *coeffs, unsigned short exposureTime, unsigned char specNumber);

```

B.2.3. SpectrometerFunctions.c

```

1  /*****
2  * ASEQ Instruments LRT-T reader
3  *
4  * File: SpectrometerFunctions.c / SpectrometerFunctions.h
5  * Version: 0.1
6  * Date: 2014-05-28
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  *****/
10
11 #include <string.h>
12 #include <unistd.h>
13 #include <stdlib.h>
14 /*#include <stdio.h>*/
15
16 #include "SpectrometerFunctions.h"
17
18 void sendRequest(int fd, unsigned char (*request)[REQUESTSIZE], unsigned char (*answer)[ANSWERSIZE])
19 {
20     write(fd, request, REQUESTSIZE*sizeof(unsigned char));
21     read(fd, answer, ANSWERSIZE *sizeof(unsigned char));
22 }
23
24 void initialize(int fd)
25 {
26     unsigned char request[REQUESTSIZE];
27     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
28
29     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
30     request[0] = CMD_INIT;
31     sendRequest(fd, &request, &answer);
32 }
33
34 void resetAddress(int fd)
35 {
36     unsigned char request[REQUESTSIZE];
37     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
38
39     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
40     request[0] = CMD_RESETADDRESS;
41     sendRequest(fd, &request, &answer);
42 }
43
44 void shiftAddress(int fd, unsigned short address)
45 {
46     unsigned char request[REQUESTSIZE];
47     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
48
49     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
50     request[0] = CMD_SHIFTADDRESS;
51     request[1] = address >> 8;
52     request[2] = address & 0xFF;
53     sendRequest(fd, &request, &answer);
54 }
55
56 void readFlash(int fd, int startAddress, unsigned char *buffer, int size)
57 {
58     unsigned char request[REQUESTSIZE];
59     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
60     int i, noBytes;
61
62     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
63     request[0] = CMD_READFLASH;
64
65     while(size > 0) {
66         request[1] = (unsigned char)(startAddress >> 16);
67         request[2] = (unsigned char)(startAddress >> 8);
68         request[3] = (unsigned char)(startAddress);
69         sendRequest(fd, &request, &answer);
70
71         noBytes = (size > ANSWERSIZE) ? ANSWERSIZE : size;

```

```

72     for(i=0; i<noBytes; i++)
73         *(buffer+i)= answer[i];
74
75     size      -= noBytes;
76     buffer    += noBytes;
77     startAddress += noBytes;
78 }
79 }
80
81 void readCoefficients(int fd, COEFFICIENTS *coeffs)
82 {
83     unsigned char temp[5*16];
84     char tempString[16];
85
86     readFlash(fd, ADR_COEFFS, temp, 5*16);
87
88     memcpy(tempString, temp + 16*0, 16);
89     coeffs->A1 = atof(tempString);
90     memcpy(tempString, temp + 16*1, 16);
91     coeffs->B1 = atof(tempString);
92     memcpy(tempString, temp + 16*2, 16);
93     coeffs->C1 = atof(tempString);
94     memcpy(tempString, temp + 16*3, 16);
95     coeffs->a1 = atof(tempString);
96     memcpy(tempString, temp + 16*4, 16);
97     coeffs->b1 = atof(tempString);
98 }
99
100 /* void showCoefficients(const COEFFICIENTS *coeffs)
101 {
102     printf( "Coefficients:\n"
103            "A1 = %E\nB1 = %E\nC1 = %E\na1 = %E\nb1 = %E\n",
104            coeffs->A1,
105            coeffs->B1,
106            coeffs->C1,
107            coeffs->a1,
108            coeffs->b1
109            );
110 }*/
111
112 void getNormalisationSpectrum(int fd, double (*spec)[NODATAPOINTS])
113 {
114     unsigned char temp[NODATAPOINTS*2];
115     int i;
116
117     readFlash(fd, ADR_NORMSPEC, temp, NODATAPOINTS*2);
118
119     for(i=0; i<NODATAPOINTS; i++)
120         (*spec)[i] = (double)(( temp[2*i+1] << 8 ) + temp[2*i]) / 32768;
121 }
122
123 void startAcquisition( int fd, unsigned short exposureTime,
124                       unsigned char scans, unsigned char blankScans,
125                       unsigned char useTrigger, unsigned char keepTrigger )
126 {
127     unsigned char request[REQUESTSIZE];
128     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
129
130     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
131     request[0] = CMD_SETACQPARAM;
132     request[1] = (unsigned char) exposureTime;
133     request[2] = scans;
134     request[3] = blankScans;
135     request[4] = 1;
136     request[5] = (!useTrigger)? 0 : (ARG_USETRIGGER | ((!keepTrigger)? 0 : ARG_KEEPTRIGGER ));
137     request[6] = (unsigned char) (exposureTime >> 8);
138     sendRequest(fd, &request, &answer);
139
140     /* wait minimum acquisition time (non-busy waiting) */
141     usleep(exposureTime * EXPOSURETIMETICKS * scans * blankScans);
142 }
143
144 int isAcquisitionInProgress(int fd)
145 {
146     unsigned char request[REQUESTSIZE];
147     unsigned char answer[ANSWERSIZE];
148
149     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
150     request[0] = CMD_CHECKACQSTATUS;
151     sendRequest(fd, &request, &answer);
152
153     return answer[2];
154 }
155

```

```

156 void getSpectrum(int fd, double (*spec)[NODATAPOINTS], double (*normspec)[NODATAPOINTS], COEFFICIENTS *coeffs, unsigned short
    exposureTime, unsigned char specNumber)
157 {
158     int i, devd;
159     double correctionCoefficient;
160     unsigned char request[REQUESTSIZE], highbyte = 0;
161
162     /* make answer accessible as packets of 64 bytes and as a large bytearray */
163     union {
164         unsigned char packets[NOPACKETS][ANSWERSIZE];
165         unsigned char bytes[NOPACKETS*ANSWERSIZE];
166     } answer;
167
168     /* setup request*/
169     memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
170     request[0] = CMD_READSPEC;
171     request[1] = ARG_SPECSTART;
172     request[2] = specNumber;
173     request[3] = 0;
174     request[4] = 1;
175     request[5] = 0;
176     request[6] = 0;
177     request[7] = 0xcc;
178
179     /* send start request */
180     sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[0]));
181
182     /* send next requests */
183     request[1] = ARG_SPECNEXT;
184     for(i=1; i<=(NOPACKETS-2); i++)
185         sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[i]));
186
187     /* send stop request */
188     request[1] = ARG_SPECSTOP;
189     sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[i]));
190
191     /* calculate devd (dark current baseline correction) */
192     devd = 0;
193     for(i=15; i<32; i++) {
194         short value;
195
196         highbyte = (answer.bytes[2*i+1] <= 0x3F) ? answer.bytes[2*i+1] : highbyte;
197         value = ((1<<NOBITSRESOLUTION)-1) - ((highbyte << 8) | answer.bytes[2*i]);
198         value *= 1.05;
199         devd += value;
200     }
201     devd /= 17;
202     devd = (devd > 16000) ? 0 : devd;
203
204     /* calculate spectrum and apply correction
205     correctionCoefficient = exposureTime*coeffs->a1 + coeffs->b1;
206     for(i=NODUMMYVALUES; i<NODUMMYVALUES+NODATAPOINTS; i++) {
207         short value;
208         double intensity;
209
210         /* use highbyte of previous value if this one is larger than 0x3F <= ??? */
211         highbyte = (answer.bytes[2*i+1] <= 0x3F) ? answer.bytes[2*i+1] : highbyte;
212
213         value = (highbyte << 8) | answer.bytes[2*i]; /* assemble bytes */
214         value = ((1<<NOBITSRESOLUTION)-1) - value; /* inversion => absorption to transmission */
215         value *= 1.05; /* apply magic factor */
216         value = (value > 16300) ? 16383 : value; /* dark current correction */
217         value -= devd;
218
219         intensity = ((double) value) - correctionCoefficient; /* apply baseline correction */
220         intensity /= (*normspec)[i-NODUMMYVALUES]; /* and normalization spectrum */
221         intensity += correctionCoefficient;
222
223         (*spec)[i-NODUMMYVALUES] = intensity;
224     }
225 }
226
227 void getSpectrumFast(int fd, double (*spec)[NOFASTDATAPOINTS], double (*normspec)[NODATAPOINTS], COEFFICIENTS *coeffs,
    unsigned short exposureTime, unsigned char specNumber)
228 {
229     int i, devd;
230     double correctionCoefficient;
231     unsigned char request[REQUESTSIZE], highbyte = 0;
232
233     /* make answer accessible as packets of 64 bytes and as a large bytearray */
234     union {
235         unsigned char packets[NOFASTPACKETS][ANSWERSIZE];
236         unsigned char bytes[NOFASTPACKETS*ANSWERSIZE];
237     } answer;
238

```

```

239  /* setup request */
240  memset(request, 0x00, REQUESTSIZE);
241  request[0] = CMD_READSPEC;
242  request[1] = ARG_SPECSTART;
243  request[2] = specNumber;
244  request[3] = 1;
245  request[4] = 1;
246  request[5] = 0;
247  request[6] = 0;
248  request[7] = 0xcc;
249
250  /* send start request */
251  sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[0]));
252
253  /* send next requests */
254  request[1] = ARG_SPECNEXT;
255  for(i=1; i<=(NOFASTPACKETS-2); i++)
256    sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[i]));
257
258  /* send stop request */
259  request[1] = ARG_SPECSTOP;
260  sendRequest(fd, &request, &(answer.packets[i]));
261
262  /* calculate devd (dark current baseline correction) */
263  devd = 0;
264  for(i=8; i<16; i++) {
265    short value;
266
267    highbyte = (answer.bytes[2*i+1] <= 0x3F) ? answer.bytes[2*i+1] : highbyte;
268
269    value = ((1<<NOBITSRESOLUTION)-1) - ((highbyte << 8) | answer.bytes[2*i]);
270    value *= 1.05;
271    devd += value;
272  }
273  devd /= 8;
274  devd = (devd > 16000) ? 0 : devd;
275
276  // calculate spectrum and apply correction
277  correctionCoefficient = exposureTime*coeffs->a1 + coeffs->b1;
278  for(i=NODUMMYVALUES/2; i<NODUMMYVALUES/2+NOFASTDATAPOINTS; i++) {
279    short value;
280    double intensity;
281
282    /* use highbyte of previous value if this one is larger than 0x3F <= ??? */
283    highbyte = (answer.bytes[2*i+1] <= 0x3F) ? answer.bytes[2*i+1] : highbyte;
284
285    value = ((highbyte << 8) | answer.bytes[2*i]);          /* assemble bytes */
286    value = ((1<<NOBITSRESOLUTION)-1) - value;           /* inversion => absorption to transmission */
287    value *= 1.05;                                         /* apply magic factor */
288    value = (value > 16300) ? 16383 : value;              /* dark current correction */
289    value -= devd;
290
291    intensity = ((double) value) - correctionCoefficient; /* apply baseline correction */
292    intensity /= (*normspec)[2*(i-NODUMMYVALUES/2)];     /* and normalization spectrum */
293    intensity += correctionCoefficient;
294
295    (*spec)[i-NODUMMYVALUES/2] = intensity;
296  }
297 }

```

B.2.4. setupSpectrometerAccess.sh

```

1  #!/bin/bash
2
3  #only root can do the following actions
4  if [[ $EUID -ne 0 ]] ; then
5    echo "Only root can do this!"
6    exit 1
7  fi
8
9
10 #create spectrometer group
11 groupadd -f spectrometer
12
13 #add udev rule
14 echo 'KERNEL=="hidraw*", SUBSYSTEM=="hidraw", MODE="0660", GROUP="spectrometer" > /etc/udev/rules.d/99-hidraw-spectrometer.rules'
15
16 #make udev reload the rules
17 udevadm control --reload--rules
18
19 #display help message

```

```

20 echo "add_the_desired_user_to_the_spectrometer_group_using_the_following_command"
21 echo "usermod -a -G spectrometer_USERNAME"

```

B.2.5. removeSpectrometerAccess.sh

```

1  #!/bin/bash
2
3  #only root can do the following actions
4  if [[ $EUID -ne 0 ]] ; then
5      echo "Only root can do this!"
6      exit 1
7  fi
8
9  #remove udev rule
10 rm /etc/udev/rules.d/99-hidraw-spectrometer.rules
11
12 #remove spectrometer group
13 groupdel spectrometer
14
15 #make udev reload the rules
16 udevadm control --reload-rules

```

B.3. relaisCardController.c

```

1  /*****
2  * RelaisCard controller (Conrad 197730)
3  *
4  * File:   relaisCardController.c
5  * Version: 0.1
6  * Date:   2014-04-18
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  *****/
10
11 #include <stdio.h>
12 #include <stdlib.h>
13 #include <unistd.h>
14 #include <termios.h>
15 #include <sys/select.h>
16 #include <string.h>
17 #include <fcntl.h>
18 #include <errno.h>
19 #include <time.h>
20 #include <sys/time.h>
21
22 #define TRUE 1
23 #define FALSE 0
24
25 #define READTIMEOUTUSEC 25000L /* 25ms */
26 #define FRAMELENGTH 4
27 #define BUFFERSIZE 100
28
29 #define CMD_NOOPERATION 0
30 #define CMD_SETUP 1
31 #define CMD_GETPORT 2
32 #define CMD_SETPORT 3
33 #define CMD_GETOPTION 4
34 #define CMD_SETOPTION 5
35 #define CMD_SETSINGLE 6
36 #define CMD_DELSINGLE 7
37 #define CMD_TOGGLE 8
38
39
40 struct str_frame
41 {
42     unsigned char command;
43     unsigned char address;
44     unsigned char data;
45     unsigned char checksum;
46 };
47
48 typedef union un_frame
49 {
50     unsigned char buffer[FRAMELENGTH];
51     struct str_frame frame;
52 } FRAME;
53

```

```

54 void usage(char *progname) {
55     fprintf(stderr, "\tUSAGE:\t\t%s\t-f_commandfile\t-d_device\n"
56             "\t\tOPTIONS:"
57             "\t\t-f\tfile\t\tcontaining\tcontrol\tcommands\n"
58             "\t\t\t-d\t\tSerial\tport\tdevice\n",
59             progname
60     );
61 }
62
63 void write_frame(int dev, FRAME *frame)
64 {
65     write(dev, frame->buffer, FRAMELENGTH * sizeof(unsigned char));
66     tcflush(dev, TCIFLUSH); /* force the data to be sent */
67 }
68
69 int read_frame(int dev, FRAME *frame)
70 {
71     int         retval;
72     struct timeval readtimeout;
73     fd_set      readset;
74
75     /* initialize filedescriptor sets and timeout structure */
76     FD_ZERO(&readset);
77     FD_SET(dev, &readset);
78     readtimeout.tv_sec = 0L;
79     readtimeout.tv_usec = READTIMEOUTUSEC;
80
81     /* wait for input data */
82     retval = select(dev+1, &readset, NULL, NULL, &readtimeout);
83     if( retval < 0 ) {
84         fprintf(stderr, "#_ERROR: %s\n", strerror(errno));
85         return -1;
86     }
87     if( retval == 0 ) {
88         fprintf(stderr, "Relaiscard_did_not_respond_in_time\n");
89         return -1;
90     }
91
92     /* read return value from card */
93     read(dev, frame->buffer, FRAMELENGTH);
94     return 1;
95 }
96
97 unsigned char calculate_checksum(const FRAME *frame)
98 {
99     return (frame->frame.command ^ frame->frame.address ^ frame->frame.data);
100 }
101
102 void init_frame(FRAME *frame, unsigned char command, unsigned char address, unsigned char data)
103 {
104     frame->frame.address = address;
105     frame->frame.command = command;
106     frame->frame.data = data;
107     frame->frame.checksum = calculate_checksum(frame);
108 }
109
110 int verify_frame(const FRAME *frame)
111 {
112     return ( calculate_checksum(frame) == frame->frame.checksum ) ? TRUE : FALSE;
113 }
114
115 void place_command(int dev, FRAME *frame)
116 {
117     FRAME answer;
118     int result;
119
120     tcflush(dev, TCIFLUSH);
121     write_frame(dev, frame);
122     result = read_frame(dev, &answer);
123
124     while( (result < 0) /* read failed */
125           || !verify_frame(&answer) /* frame corrupt */
126           || (answer.frame.command != (unsigned char)~(frame->frame.command)) /* invalid answer */
127           ) {
128         fprintf(stderr, "Command_failed ,_retrying\n");
129         tcflush(dev, TCIFLUSH);
130         write_frame(dev, frame);
131         result = read_frame(dev, &answer);
132     }
133 }
134
135 int main(int argc, char *argv[])
136 {
137     int         ser_fd, opt;
138     FILE        *cmd_fp;

```

```

139 char          *cmdfilename, *devicename, linebuffer[100];
140 int           mandatoryOptions = 2;
141 struct termios current_settings, old_settings;
142 FRAME        myframe;
143 int          linecnt = 0;
144
145 /* evaluate commandline options */
146 while( (opt = getopt(argc, argv, "f:d:")) != -1 ) {
147     switch( opt ) {
148         case 'f': cmdfilename = optarg;
149                 mandatoryOptions--;
150         break;
151         case 'd': devicename = optarg;
152                 mandatoryOptions--;
153         break;
154         default: usage(argv[0]);
155                 exit(EXIT_FAILURE);
156     }
157 }
158
159 if( mandatoryOptions > 0 ) {
160     usage(argv[0]);
161     exit(EXIT_FAILURE);
162 }
163
164 /* initialize termios structure */
165 memset(&current_settings, 0x00, sizeof(current_settings));
166 memset(&old_settings, 0x00, sizeof(old_settings));
167 current_settings.c_cflag = CLOCAL | CS8 | CREAD;
168 current_settings.c_iflag = IGNPAR;
169 current_settings.c_oflag = 0;
170 current_settings.c_lflag = 0;
171 current_settings.c_cc[VMIN] = 4;
172 current_settings.c_cc[VTIME] = 0;
173 cfsetispeed(&current_settings, B19200);
174 cfsetospeed(&current_settings, B19200);
175
176 /* open serial port */
177 if( (ser_fd = open(devicename, O_RDWR)) < 0 ) {
178     fprintf(stderr, "Can't open serial port.\n");
179     return EXIT_FAILURE;
180 }
181
182 /* open commandfile */
183 if( (cmd_fp = fopen(cmdfilename, "r")) == NULL ) {
184     fprintf(stderr, "Can't open commandfile.\n");
185     close(ser_fd);
186     return EXIT_FAILURE;
187 }
188
189 /* save current serial port settings and apply new settings */
190 tcgetattr(ser_fd, &old_settings);
191 tcsetattr(ser_fd, TCSANOW, &current_settings);
192
193 /* initialize cards */
194 memset(&myframe, 0x00, sizeof(myframe));
195 init_frame(&myframe, CMD_SETUP, 1, 0);
196 place_command(ser_fd, &myframe);
197 sleep(1); /* initialization may take a while, thus wait a second */
198
199 /* process the command file */
200 while(NULL != fgets(linebuffer, BUFFERSIZE, cmd_fp)) {
201     int address, data, waittime = 0;
202     struct tm *timestruct;
203     struct timeval timestamp;
204     char timestring[50];
205
206     linecnt++;
207
208     /* check if line is a comment */
209     if( linebuffer[0] == '#' )
210         continue;
211
212     /* check if line is a wait statement */
213     if( 0 == strncasecmp(linebuffer, "wait_", 5) ) {
214         if( 1 != sscanf(linebuffer+5, "%d\n", &waittime) ) {
215             fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
216             continue;
217         }
218         gettimeofday(&timestamp, NULL);
219         timestamp.tv_sec += waittime;
220         timestruct = localtime(&(timestamp.tv_sec));
221         strftime(timestring, 50, "Waiting_until_%Y-%m-%d_%H:%M:%S.", timestruct);
222         puts(timestring);
223         sleep(waittime);

```

```

224         continue;
225     }
226
227     /* check if line is a setport statement */
228     if( 0 == strncasecmp(linebuffer, "setport_", 8) ) {
229         if( 2 != sscanf(linebuffer+8, "%d_%d\n", &address, &data) ) {
230             fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
231             continue;
232         }
233         init_frame(&myframe, CMD_SETPORT, address, data);
234         place_command(ser_fd, &myframe);
235         continue;
236     }
237
238     /* check if line is a setsingle statement */
239     // if( 0 == strncasecmp(linebuffer, "setsingle ", 10) ) {
240     //     if( 2 != sscanf(linebuffer+10, "%d %d\n", &address, &data) ) {
241     //         fprintf(stderr, "Syntax error on line %d.\n", linecnt);
242     //         continue;
243     //     }
244     //     init_frame(&myframe, CMD_SETSINGLE, address, data);
245     //     place_command(ser_fd, &myframe);
246     //     continue;
247     // }
248
249     /* check if line is a clearsingel statement */
250     // if( 0 == strncasecmp(linebuffer, "clearsingle ", 12) ) {
251     //     if( 2 != sscanf(linebuffer+12, "%d %d\n", &address, &data) ) {
252     //         fprintf(stderr, "Syntax error on line %d.\n", linecnt);
253     //         continue;
254     //     }
255     //     init_frame(&myframe, CMD_DELSINGLE, address, data);
256     //     place_command(ser_fd, &myframe);
257     //     continue;
258     // }
259
260     /* if line is none of the statements above, it's probably a syntax error */
261     fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
262 }
263
264 /* restore serial port settings */
265 tcsetattr(ser_fd, TCSANOW, &old_settings);
266
267 /* close serial port */
268 close(ser_fd);
269
270 /* close commandfile */
271 fclose(cmd_fp);
272
273 return EXIT_SUCCESS;
274 }

```

B.4. fileChecker.c

```

1  /*****
2  * File checker for command-files used by RelaisCardController
3  *
4  * File:   fileChecker.c
5  * Version: 0.2
6  * Date:   2014-05-18
7  * Author: Jan Griessbach
8  *
9  * Changes: 0.1: first version
10 *           0.2: total runtime output added
11 *
12 *****/
13
14 #include <stdio.h>
15 #include <stdlib.h>
16 #include <unistd.h>
17 #include <string.h>
18 #include <fcntl.h>
19
20 #define TRUE 1
21 #define FALSE 0
22 #define BUFFERSIZE 100
23
24 void usage(char *progname) {
25     fprintf(stderr, "\USAGE:\t_%s_-f_commandfile\n"
26             "\n\OPTIONS:-"
27             "_-f\file_containing_control_commands\n",

```

```

28     progname
29 );
30 }
31
32 int main(int argc, char *argv[])
33 {
34     int      opt, h, m;
35     FILE     *cmd_fp;
36     char     *cmdfilename, linebuffer[100];
37     int      mandatoryOptions = 1;
38     int      linecnt = 0;
39     int      errors = 0;
40     unsigned long totRunTime = 0;
41
42     /* evaluate commandline options */
43     while( (opt = getopt(argc, argv, "f:")) != -1 ) {
44         switch( opt ) {
45             case 'f': cmdfilename = optarg;
46                     mandatoryOptions--;
47             break;
48             default: usage(argv[0]);
49                     exit(EXIT_FAILURE);
50         }
51     }
52
53     if(mandatoryOptions > 0) {
54         usage(argv[0]);
55         exit(EXIT_FAILURE);
56     }
57
58     /* open commandfile */
59     if( (cmd_fp = fopen(cmdfilename, "r")) == NULL ) {
60         fprintf(stderr, "Can't open_commandfile.\n");
61         return EXIT_FAILURE;
62     }
63
64     /* process the command file */
65     while(NULL != fgets(linebuffer, BUFFERSIZE, cmd_fp)) {
66         int address, data, waittime = 0;
67
68         linecnt++;
69
70         /* check if line is a comment */
71         if( linebuffer[0] == '#' )
72             continue;
73
74         /* check if line is a wait statement */
75         if( 0 == strcasecmp(linebuffer, "wait_", 5) ) {
76             if( 1 != sscanf(linebuffer+5, "%d\n", &waittime) ) {
77                 fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
78                 errors++;
79                 continue;
80             }
81             totRunTime += waittime;
82
83             /* calculate hours, minutes and seconds */
84             h = waittime / 3600;
85             waittime %= 3600;
86             m = waittime / 60;
87             waittime %= 60;
88
89             printf("Wait_%d_hour(s),_%d_minute(s)_and_%d_second(s).\n", h, m, waittime);
90             continue;
91         }
92
93         /* check if line is a setport statement */
94         if( 0 == strcasecmp(linebuffer, "setport_", 8) ) {
95             if( 2 != sscanf(linebuffer+8, "%d_%d\n", &address, &data) ) {
96                 fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
97                 errors++;
98                 continue;
99             }
100             if( address<0 || address >255 ) {
101                 printf("Invalid_address_on_line_%d.\n", linecnt);
102                 errors++;
103                 continue;
104             }
105             if( data<0 || data >255 ) {
106                 printf("Invalid_data_on_line_%d.\n", linecnt);
107                 errors++;
108                 continue;
109             }
110             printf("Set_card_%d_to_%d.\n", address, data);
111             continue;
112         }

```

```

113
114     /* if line is none of the statements above, it's probably a syntax error */
115     fprintf(stderr, "Syntax_error_on_line_%d.\n", linecnt);
116     errors++;
117 }
118
119 /* close commandfile */
120 fclose(cmd_fp);
121
122 /* calculate hours, minutes and seconds of total run time */
123 h = totRunTime / 3600;
124 totRunTime %= 3600;
125 m = totRunTime / 60;
126 totRunTime %= 60;
127
128 /* generate output */
129 printf("\n\n%d_error(s)_found.\n", errors);
130 printf("Total_run_time:%d_hour(s)_%d_minute(s)_and_%d_second(s).\n", h, m, totRunTime);
131 return EXIT_SUCCESS;
132 }

```

B.5. CurrentIntegrator.c

```

1  /******
2  * Filter to calculate the integral of current measurements made
3  * with "DMM4020_reader" or "DMM4020_reader_v2"
4  *
5  * USAGE: ./CurrentIntegrator < infile.txt > outfile.txt
6  *
7  *
8  * File:    CurrentIntegrator.c
9  * Version: 0.1
10 * Date:    2014-05-07
11 * Author:  Jan Griessbach
12 *
13 * *****/
14
15 #include <stdio.h>
16 #include <stdlib.h>
17
18 #define BUFFERSIZE 32
19 #define LINESIZE 2
20
21 int main( void )
22 {
23     char      strTime[BUFFERSIZE]; /* #####.##\0 */
24     char      strValue[BUFFERSIZE]; /* +##.##E-# XXXX\0 */
25     char      line[LINESIZE*BUFFERSIZE];
26     double    value, prevValue;
27     double    time, prevTime;
28     double    charge = 0;
29     unsigned long lineCnt = 0;
30
31     /* loop through all lines */
32     while( NULL != fgets(line, LINESIZE*BUFFERSIZE, stdin) ) {
33         /* current integration at non-comment lines only */
34         if( line[0] != '#' ) {
35
36             /* isolate timestamp and value */
37             sscanf(line, "%s\%s\n", strTime, strValue);
38             time = atof(strTime);
39             value = atof(strValue);
40
41             /* calculate charge, except on first line*/
42             if( lineCnt > 0 )
43                 charge += (time - prevTime) * (prevValue + value) / 2;
44
45             /* backup data */
46             prevTime = time;
47             prevValue = value;
48             lineCnt++;
49
50             /* output */
51             fprintf(stdout, "%s\%E\n", strTime, charge);
52         }
53         else {
54             /* copy comment lines */
55             fprintf(stdout, "%s", line);
56         }
57         fflush(stdout); /* line buffering, if output is redirected via pipe */
58     }

```

```

59     return EXIT_SUCCESS;
60 }

```

B.6. CurrentCorrector.c

```

1  /*****
2  * Filter to correct the deviation of current measurements that
3  * are caused by the internal impedance of the voltmeter
4  *
5  * USAGE: ./CurrentCorrector -u volts -l ohms -i ohms
6  *          < infile.txt > outfile.txt
7  *
8  * File:    CurrentCorrector.c
9  * Version: 0.3
10 * Date:   2014-07-02
11 * Author: Jan Griessbach
12 *
13 * Changes: 0.1: first version
14 *           0.2: fix buffering
15 *           0.3: add overcurrent protection resistor
16 *
17 *****/
18
19 #include <stdio.h>
20 #include <stdlib.h>
21 #include <unistd.h>
22
23 #define BUFFERSIZE 32
24 #define LINESIZE 2
25
26 void usage(char *progname) {
27     fprintf(stderr, "\tUSAGE: \t%s -u volts -l ohms -i ohms [ <_infile ] [ >_outfile ]\n"
28             "\n\tOPTIONS:"
29             "\t\t-u\tCharging_voltage_(in_volts)\n"
30             "\t\t-l\tLoad_resistance_(in_ohms)\n"
31             "\t\t-i\tInner_impedance_of_the_voltmeter_(in_ohms)\n"
32             "\t\t-c\tOvercurrent_protection_resistor_(in_ohms);_default_is_0\n\n",
33             progname
34     );
35 }
36
37 int main(int argc, char *argv[])
38 {
39     char mandatoryOptions = 3;
40     int opt;
41     char line[LINESIZE*BUFFERSIZE];
42     double chargingVoltage, loadResistance, intImpedance, protectionResistance = 0;
43
44     /* evaluate commandline options */
45     while( (opt = getopt(argc, argv, "u:l:i:c:")) != -1 ) {
46         switch( opt ) {
47             case 'u': chargingVoltage = atof(optarg);
48                     mandatoryOptions--;
49                     break;
50             case 'l': loadResistance = atof(optarg);
51                     mandatoryOptions--;
52                     break;
53             case 'c': protectionResistance = atof(optarg);
54                     break;
55             case 'i': intImpedance = atof(optarg);
56                     mandatoryOptions--;
57                     break;
58             default: usage(argv[0]);
59                     exit(EXIT_FAILURE);
60         }
61     }
62
63     /* limit checks */
64     if( (mandatoryOptions != 0)
65         ||(chargingVoltage < 0)
66         ||(loadResistance < 0)
67         ||(intImpedance < 0)
68     ) {
69         usage(argv[0]);
70         exit(EXIT_FAILURE);
71     }
72
73     /* loop through all lines */
74     while( NULL != fgets(line, LINESIZE*BUFFERSIZE, stdin) ) {
75         /* current integration at non-comment lines only */
76         if( line[0] != '#' ) {

```

```

77     double correctCurrent, value;
78     char   strTime[BUFFERSIZE], strValue[BUFFERSIZE];
79
80     /* isolate timestamp and value */
81     sscanf(line, "%s\t%s\n", strTime, strValue);
82     value = atof(strValue);
83
84     /* calculate correct value */
85     correctCurrent = (value >= 0)
86         ? (value - (chargingVoltage - protectionResistance * value) / intImpedance)
87         : (value - (loadResistance * value) / intImpedance);
88
89     /* output */
90     fprintf(stdout, "%s\t%E\n", strTime, correctCurrent);
91 }
92 else {
93     /* copy comment lines */
94     fprintf(stdout, "%s", line);
95 }
96 fflush(stdout); /* line buffering, if output is redirected via pipe */
97 }
98 return EXIT_SUCCESS;
99 }

```

B.7. intensitaetsverlauf_kompensiert.m

```

1  %% clean up
2  close all;
3  clear all;
4  clc;
5
6  %% get the number of parts
7  parts = str2num(char(inputdlg('Number_of_parts', 'Number_of_parts', 1, {'1'}) ));
8
9  %% allocate memory for arrays
10 xpos = zeros(parts, 1);
11 ypos = zeros(parts, 1);
12 xsize = zeros(parts, 1);
13 ysize = zeros(parts, 1);
14 xpos_ref = zeros(parts, 1);
15 ypos_ref = zeros(parts, 1);
16 xsize_ref = zeros(parts, 1);
17 ysize_ref = zeros(parts, 1);
18 path = cell(parts, 1);
19 channels = cell(7, parts); % RGB timestamps RGB(reference)
20 noFiles = zeros(parts, 1);
21
22 %% get paths and section information
23 for m=1:1:parts
24     path(m) = cellstr(uigetdir());
25
26     % get position & size
27     invalues = str2num(char(inputdlg({'X_position', 'Y_position', 'X_size', 'Y_size', 'X_position_(reference)', 'Y_position_(reference)', 'X_size_(reference)', 'Y_size_(reference)'}, ...
28                                     ['Image_section_for_part' num2str(m)], ...
29                                     1, ...
30                                     {'0', '0', '0', '0', '0', '0', '0', '0'} ...
31                                     )));
32     xpos(m) = invalues(1)+1;
33     ypos(m) = invalues(2)+1;
34     xsize(m) = invalues(3);
35     ysize(m) = invalues(4);
36     xpos_ref(m) = invalues(5)+1;
37     ypos_ref(m) = invalues(6)+1;
38     xsize_ref(m) = invalues(7);
39     ysize_ref(m) = invalues(8);
40     clear invalues;
41 end
42
43 %% process images
44 for m=1:1:parts
45     % get all .jpg files in given directory
46     files = dir(fullfile(char(path(m)), '*.JPG'));
47
48     % calculate commonly used values
49     noFiles(m) = size(files, 1);
50     noPixels = xsize(m) * ysize(m);
51     noPixels_ref = xsize_ref(m) * ysize_ref(m);
52
53     % initialize variables
54     red = zeros(noFiles(m), 2);

```

```

55     green = zeros(noFiles(m), 2);
56     blue  = zeros(noFiles(m), 2);
57     dates = zeros(noFiles(m), 1);
58
59     % process every file
60     for n=1:1:noFiles(m)
61         % get image data
62         [A, MAP, ALPHA] = imread(fullfile(char(path(m)), files(n).name), 'JPEG');
63         dates(n)       = files(n).datenum;
64
65         % extract section
66         section       = A(ypos(m):ypos(m)+ysize(m)-1, xpos(m):xpos(m)+xsize(m)-1, :);
67         section_ref   = A(ypos_ref(m):ypos_ref(m)+ysize_ref(m)-1, xpos_ref(m):xpos_ref(m)+xsize_ref(m)-1, :);
68         clear A MAP ALPHA;
69
70         % sum-up intensities on every channel
71         red(n,1)      = sum(sum(section(:, :, 1))) / noPixels;
72         green(n,1)    = sum(sum(section(:, :, 2))) / noPixels;
73         blue(n,1)     = sum(sum(section(:, :, 3))) / noPixels;
74         red(n,2)      = sum(sum(section_ref(:, :, 1))) / noPixels_ref;
75         green(n,2)    = sum(sum(section_ref(:, :, 2))) / noPixels_ref;
76         blue(n,2)     = sum(sum(section_ref(:, :, 3))) / noPixels_ref;
77         clear section section_ref;
78
79         disp(['Part:_' num2str(m) '/' num2str(parts) '_Date:_' num2str(n), '/', num2str(noFiles(m))]);
80     end
81     channels{1, m} = red(:,1);
82     channels{2, m} = green(:,1);
83     channels{3, m} = blue(:,1);
84     channels{4, m} = dates;
85     channels{5, m} = red(:,2);
86     channels{6, m} = green(:,2);
87     channels{7, m} = blue(:,2);
88     clear n red green blue dates files noPixels noPixels_ref;
89 end
90
91 % concatenate parts
92 red   = vertcat(channels{1, :});
93 green = vertcat(channels{2, :});
94 blue  = vertcat(channels{3, :});
95 dates = vertcat(channels{4, :});
96 red_ref = vertcat(channels{5, :});
97 green_ref = vertcat(channels{6, :});
98 blue_ref = vertcat(channels{7, :});
99 clear channels m;
100
101
102 %% apply correction
103 red_c = (red ./ red_ref) * mean(red_ref);
104 green_c = (green ./ green_ref) * mean(green_ref);
105 blue_c = (blue ./ blue_ref) * mean(blue_ref);
106
107 %% output correlation
108 disp(['Korrelation_rot:_' num2str(corr(red, red_ref))]);
109 disp(['Korrelation_grün:_' num2str(corr(green, green_ref))]);
110 disp(['Korrelation_blaue:_' num2str(corr(blue, blue_ref))]);
111
112 %% calculate summarized intensity
113 sumIntensity = (red + green + blue);
114 sumIntensity_ref = (red_ref + green_ref + blue_ref);
115 sumIntensity_c = (red_c + green_c + blue_c);
116
117 %% export data
118 [exportfile exportpath] = uiputfile;
119 exportfile = strcat(exportpath, exportfile);
120 udates = round(864e5 * (dates - datenum('1970', 'yyyy')))/1000;
121 exportMatrix = [udates red green blue red_c green_c blue_c];
122 dlmwrite(exportfile, sprintf('#timestamp\tred_(raw)\tgreen_(raw)\tblue_(raw)\tred_(compensated)\tgreen_(compensated)\tblue_(compensated)'), 'delimiter', '');
123 dlmwrite(exportfile, exportMatrix, '-append', 'delimiter', '\t', 'precision', 15);
124 clear exportpath udates exportMatrix;
125
126 %% plot
127 figure(1);
128 plot(dates, red, 'r', ...
129      dates, green, 'g', ...
130      dates, blue, 'b');
131 datetick('x', 'dd.mm.yy_HH:MM');
132 xlabel('Zeit');
133 ylabel('Intensität');
134 title('Absolutwerte');
135 grid on;
136
137 figure(2);
138 plot(dates, red_ref, 'r', ...

```

```

139     dates, green_ref, 'g', ...
140     dates, blue_ref, 'b');
141     datetick('x', 'dd.mm.yy_HH:MM');
142     xlabel('Zeit');
143     ylabel('Intensität');
144     title('Absolutwerte_(Referenzfeld)');
145     grid on;
146
147     figure(3);
148     plot(dates, red_c, 'r', ...
149          dates, green_c, 'g', ...
150          dates, blue_c, 'b');
151     datetick('x', 'dd.mm.yy_HH:MM');
152     xlabel('Zeit');
153     ylabel('Intensität');
154     title('Absolutwerte_(kompensiert)');
155     grid on;
156
157     figure(4);
158     plot(dates, red_c./sumIntensity_c, 'r', ...
159          dates, green_c./sumIntensity_c, 'g', ...
160          dates, blue_c./sumIntensity_c, 'b');
161     datetick('x', 'dd.mm.yy_HH:MM');
162     xlabel('Zeit');
163     ylabel('Intensität');
164     title('Relativwerte_(kompensiert)');
165     grid on;

```

B.8. Tools

B.8.1. showSpectra.m

```

1  clc;
2  clear all;
3
4  %load data set
5  [file, path] = uigetfile({'*.mat', 'MATLAB_data_file_(*.mat)'}, 'Select_a_file');
6  load(strcat(path, file));
7  clear path file;
8
9  % apply timezone and summertime offsets
10 time = timestamp + 2*3600;
11
12 % convert from unix timestamp to matlab timestamp
13 time = time./86400 + datenum('1-1-1970');
14
15 %
16 meanval = mean(spectra,2);
17 diffspectra = zeros(3653, size(spectra,2));
18 for n=1:size(spectra,2)
19     diffspectra(:,n)=spectra(:,n)-meanval;
20 end
21 clear n;
22
23 % create graphic
24 figure(1);
25 imagesc(wavelength, time, spectra');
26 set(gca, 'YTick', ...
27         floor(24*time(1,1))/24 ...
28         :1/24: ...
29         floor(24*time(end,1)+1)/24);
30 datetick('y', 'dd.mm.yy_HH:MM', 'keepticks');
31 % set descriptions
32 xlabel('wavelength_[nm]');
33 ylabel('time');
34 % create colorbar with label
35 ylabel(colorbar, 'intensity');
36
37 figure(2);
38 imagesc(wavelength, time, diffspectra', [-std(meanval)/2 std(meanval)/2]);
39 set(gca, 'YTick', ...
40         floor(24*time(1,1))/24 ...
41         :1/24: ...
42         floor(24*time(end,1)+1)/24);
43 datetick('y', 'dd.mm.yy_HH:MM', 'keepticks');
44 % set descriptions
45 xlabel('wavelength_[nm]');
46 ylabel('time');

```

```

47 % create colorbar with label
48 ylabel(colorbar, 'intensity');

```

B.8.2. spectrometer2matlab.m

```

1  clc;
2  clear all;
3
4  % get data file
5  [file, path] = uigetfile({'*.dat', 'Data_file_(*.dat)'}, 'Select_a_file ');
6
7  % extract timestamps
8  [retval output] = system(['cat_' path file '_|grep_"#"_|sed_"e_"s/.*:_/g"']);
9  timestamp = cell2mat(textscan(output, '%f\n'));
10
11 % extract spectra and wavelengths
12 [wavelength spectra] = textread(strcat(path, file), '%f\t%f\n', -1, 'commentstyle', 'shell');
13
14 % reshape matrices
15 N = size(wavelength,1)/3653;
16 spectra = reshape(spectra, 3653, N);
17 wavelength = reshape(wavelength, 3653, N);
18
19 % remove redundant wavelengths
20 wavelength = wavelength(:,1);
21
22 % clean up
23 clear file path retval output N;
24
25 % save data to *.mat-file
26 uisave;

```

B.8.3. restoreDate.sh

```

1  #!/bin/bash
2
3  for file in $PWD/*;
4  do
5  BASEFILE='basename $file '
6  DATEVAL='exiftool -p '$DateTimeOriginal' $BASEFILE | sed 's/[: ]//g' | sed 's/^\(.{12}\)/\1./'
7  touch -t $DATEVAL $file;
8  done;

```

C. Spektrometer-Messungen

C.1. Testmessungen mit 0 Grad Sondenhalter

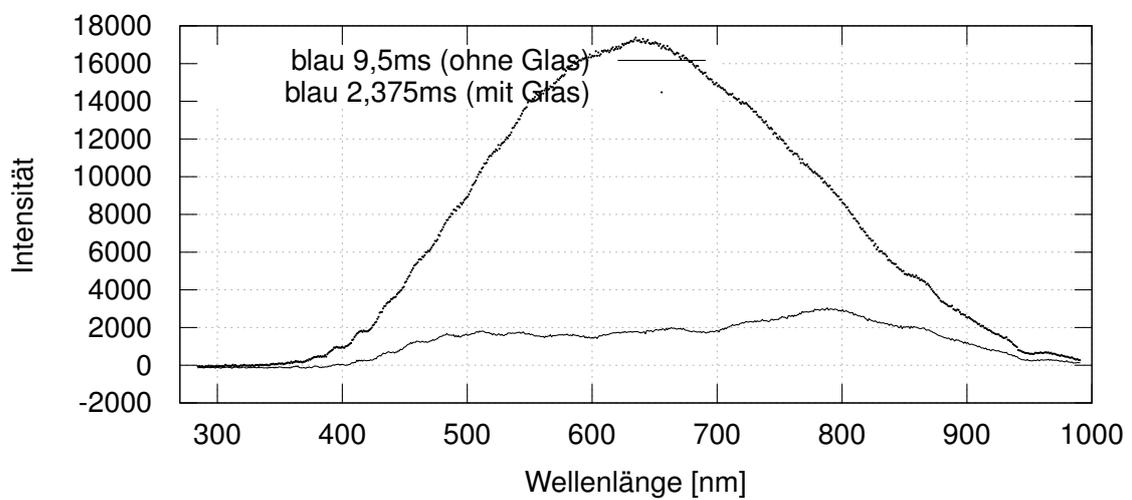


Abbildung C.1.: Testmessung - 0 Grad - blau

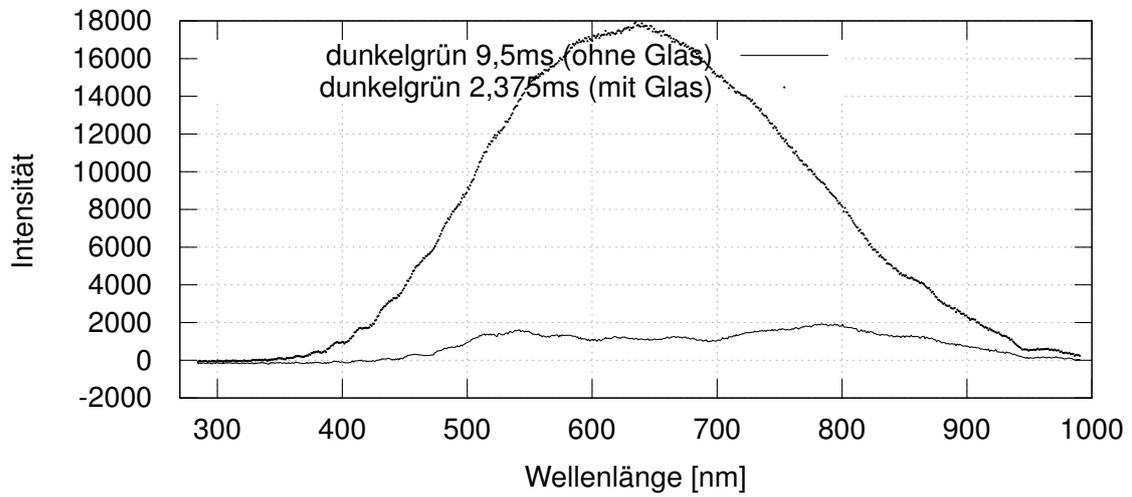


Abbildung C.2.: Testmessung - 0 Grad - dunkelgrün

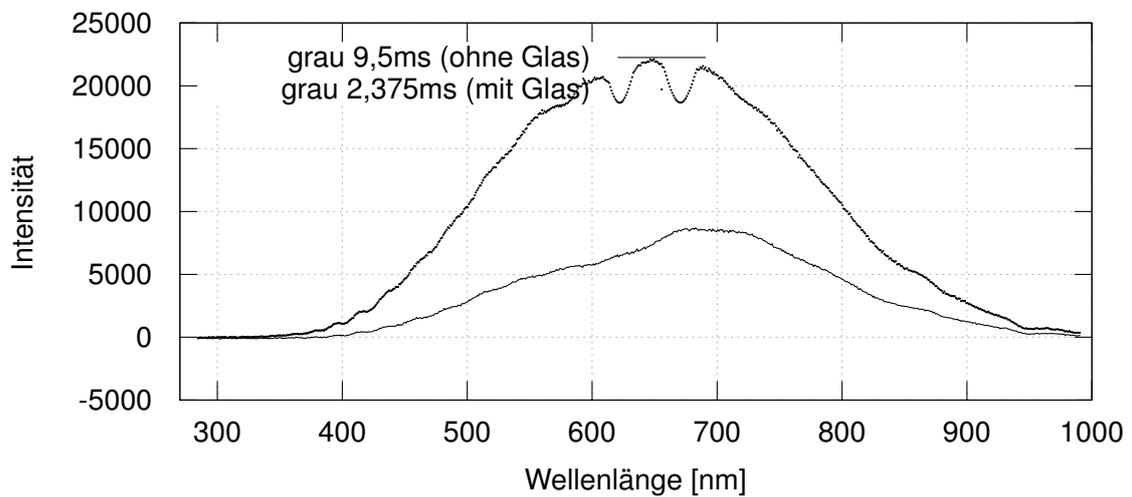


Abbildung C.3.: Testmessung - 0 Grad - grau

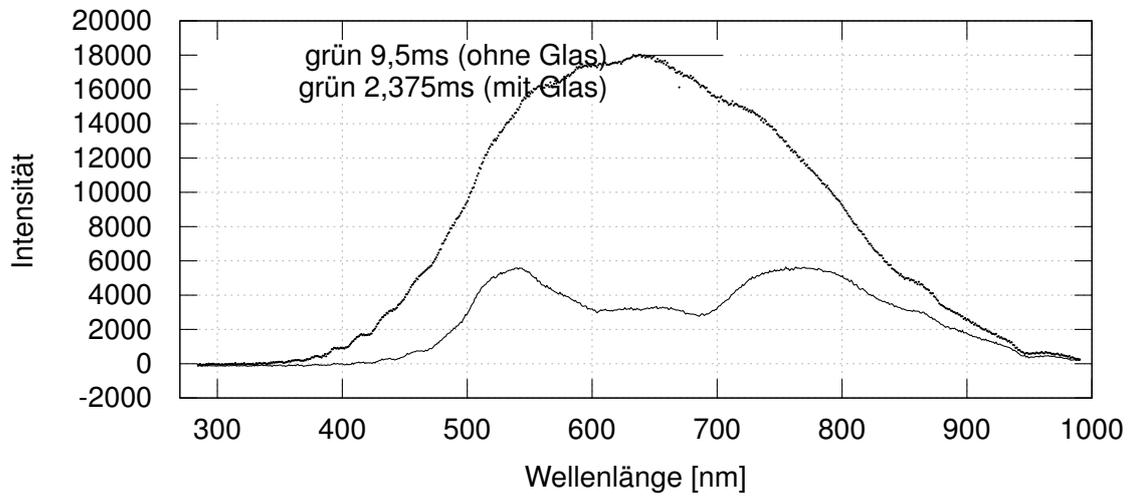


Abbildung C.4.: Testmessung - 0 Grad - grün

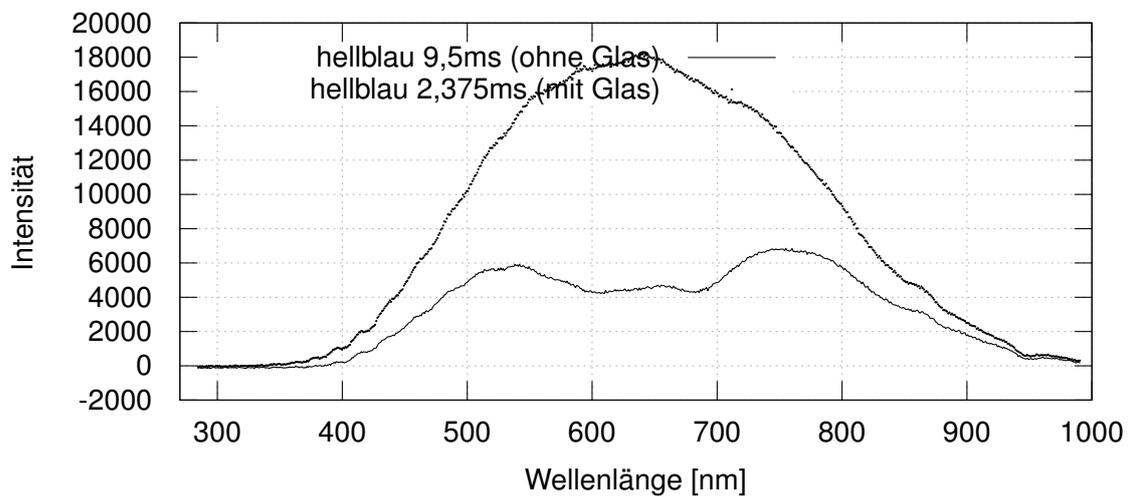


Abbildung C.5.: Testmessung - 0 Grad - hellblau

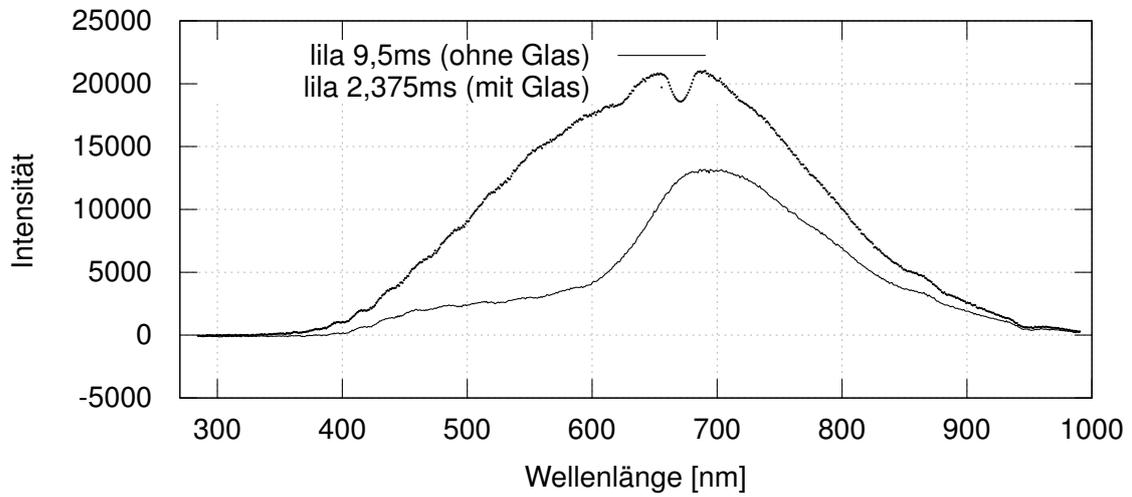


Abbildung C.6.: Testmessung - 0 Grad - lila

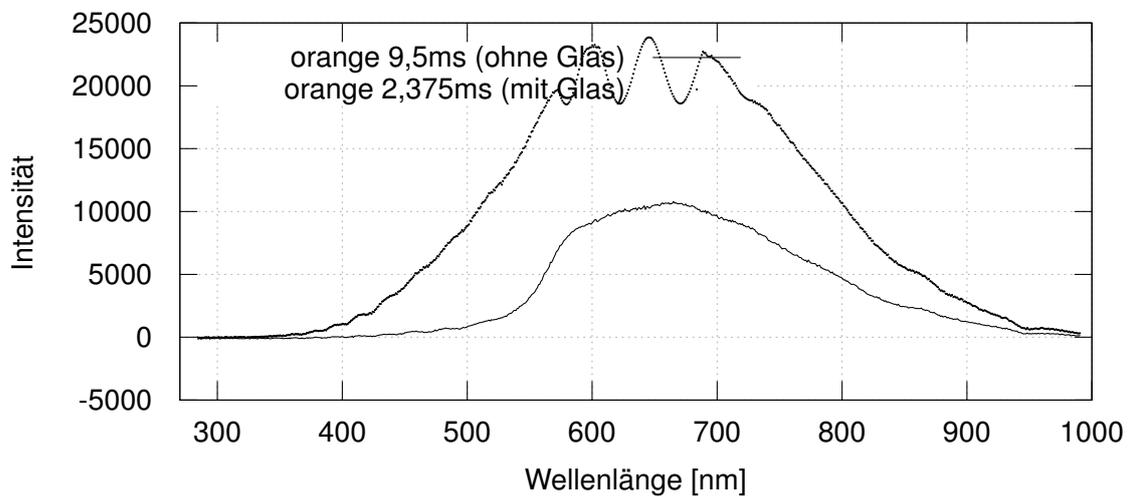


Abbildung C.7.: Testmessung - 0 Grad - orange

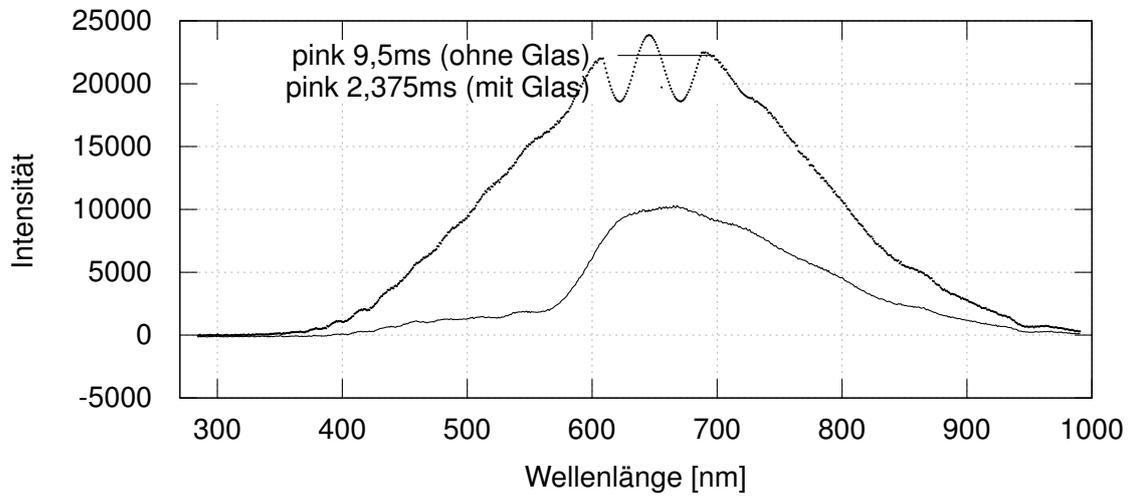


Abbildung C.8.: Testmessung - 0 Grad - pink

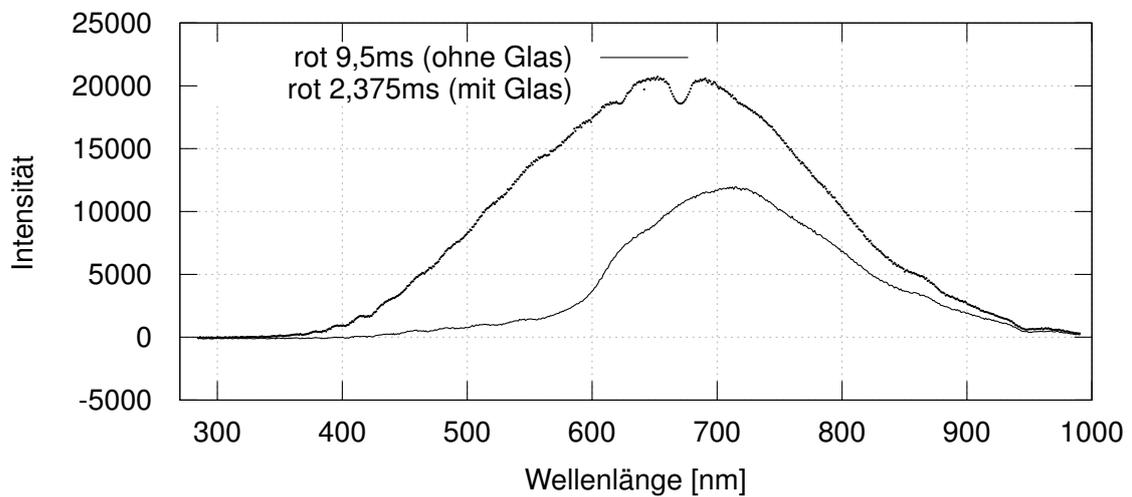


Abbildung C.9.: Testmessung - 0 Grad - rot

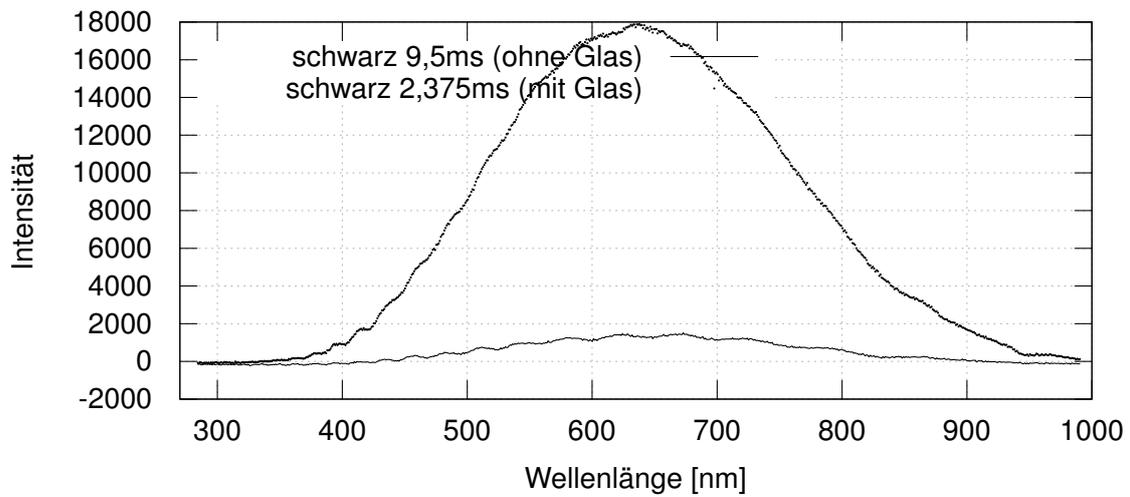


Abbildung C.10.: Testmessung - 0 Grad - schwarz

C.2. Testmessungen mit 45 Grad Sondenhalter

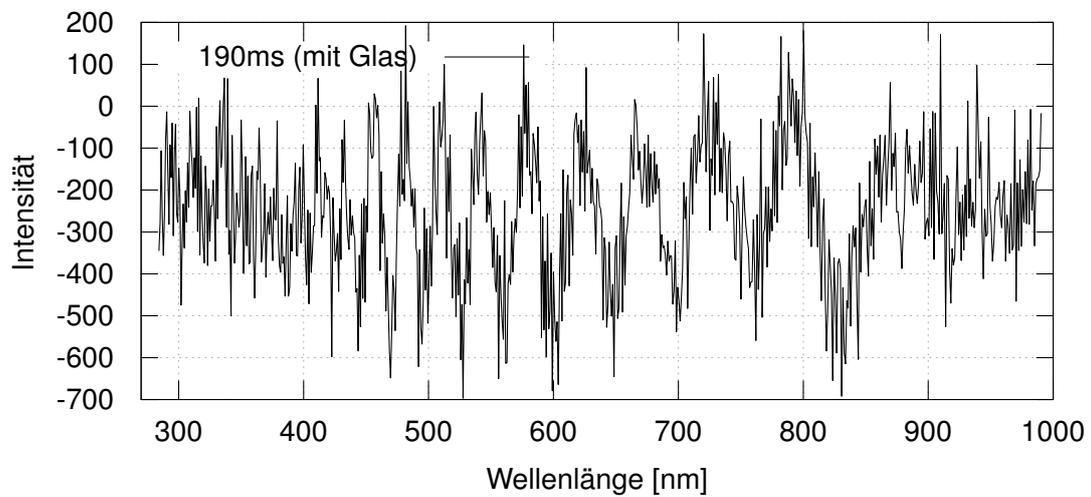


Abbildung C.11.: Testmessung - 45 Grad - blau

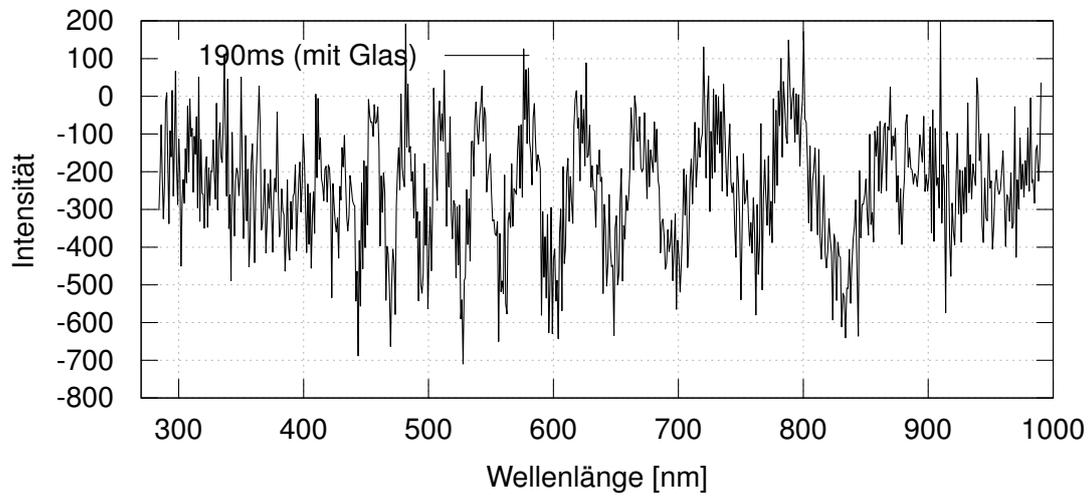


Abbildung C.12.: Testmessung - 45 Grad - dunkelgrün

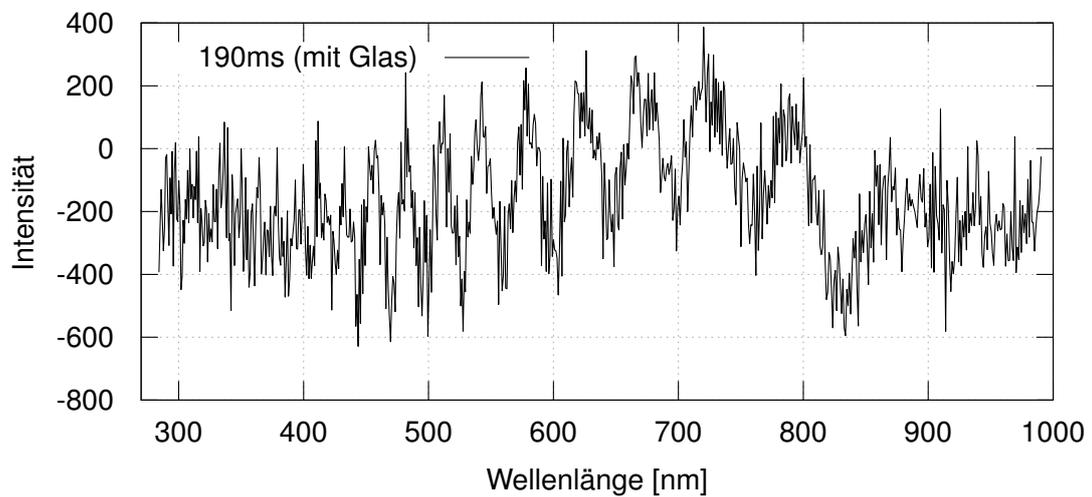


Abbildung C.13.: Testmessung - 45 Grad - grau

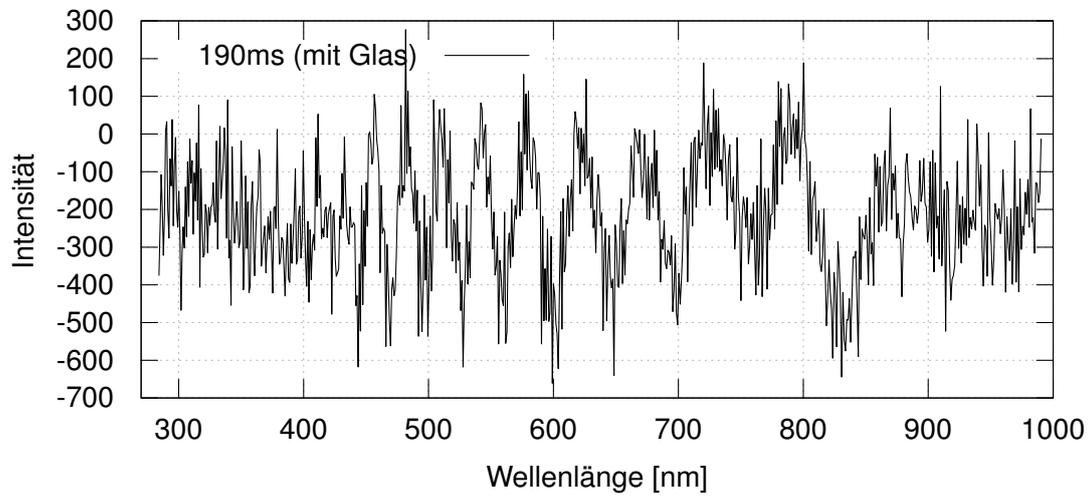


Abbildung C.14.: Testmessung - 45 Grad - hellblau

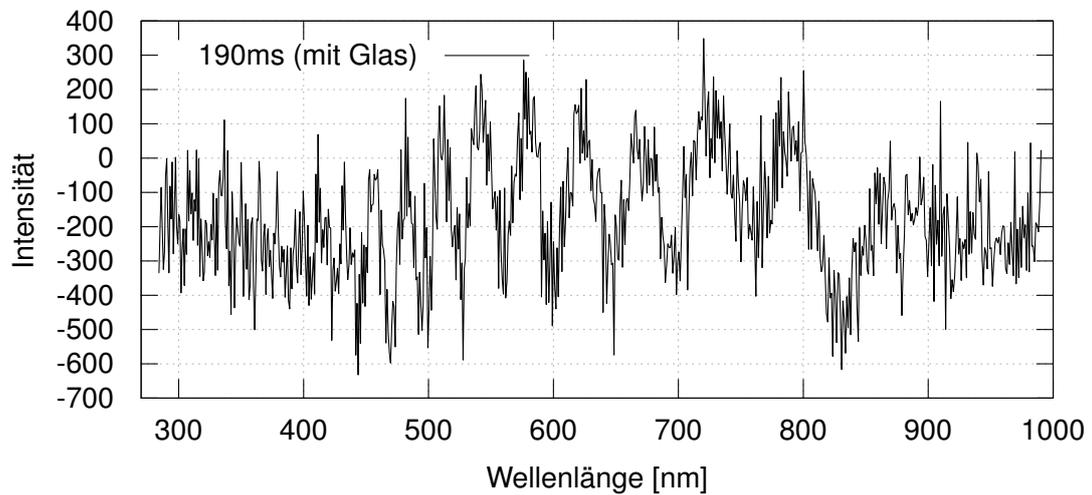


Abbildung C.15.: Testmessung - 45 Grad - hellgrün

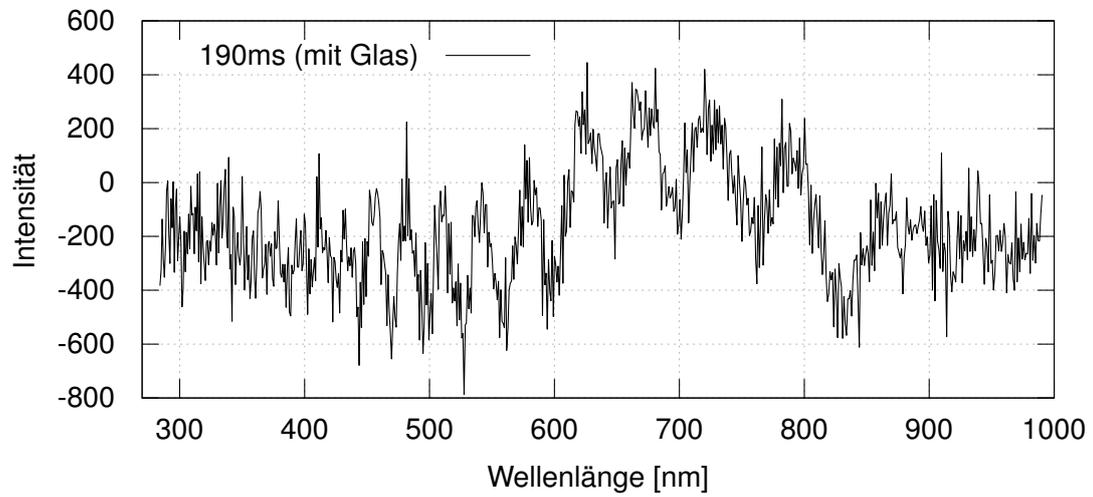


Abbildung C.16.: Testmessung - 45 Grad - hellrot

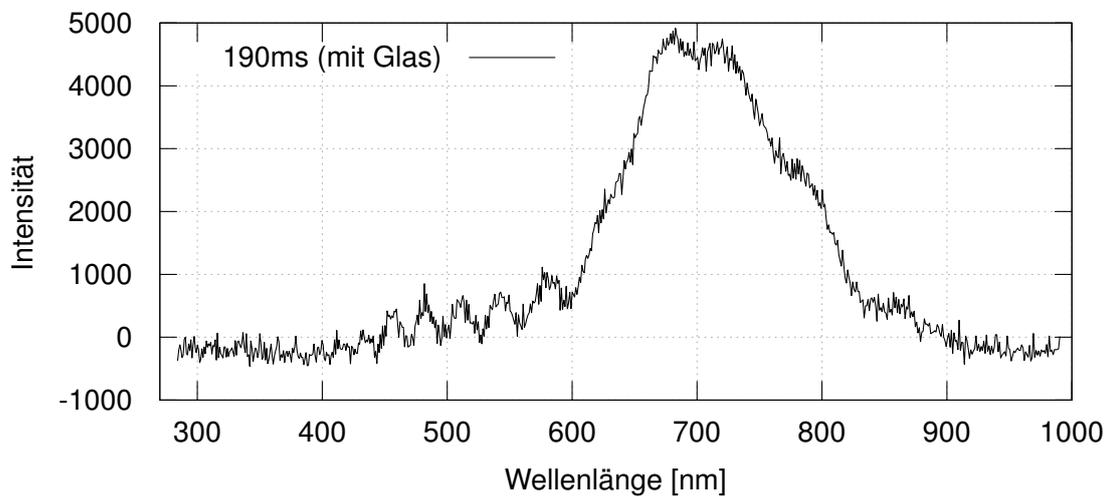


Abbildung C.17.: Testmessung - 45 Grad - lila

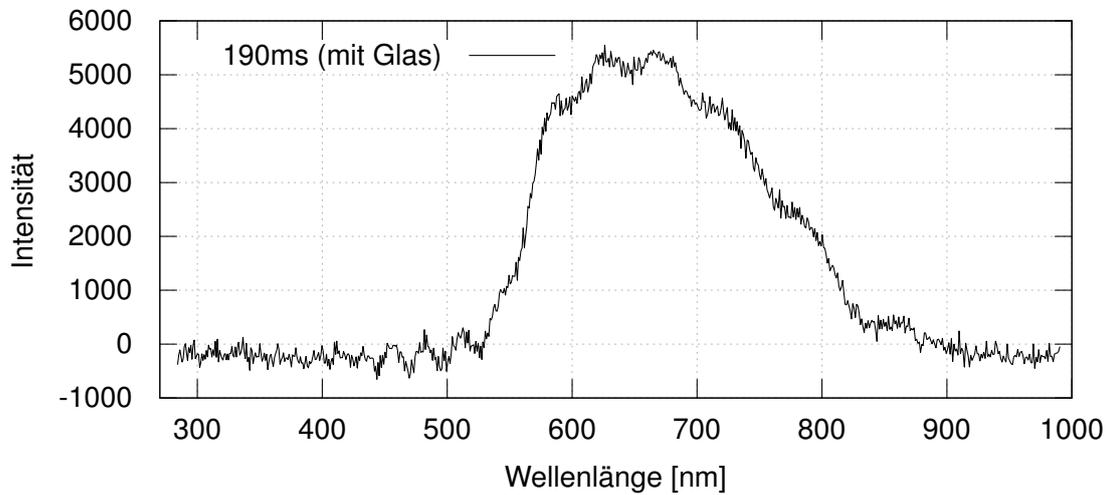


Abbildung C.18.: Testmessung - 45 Grad - orange

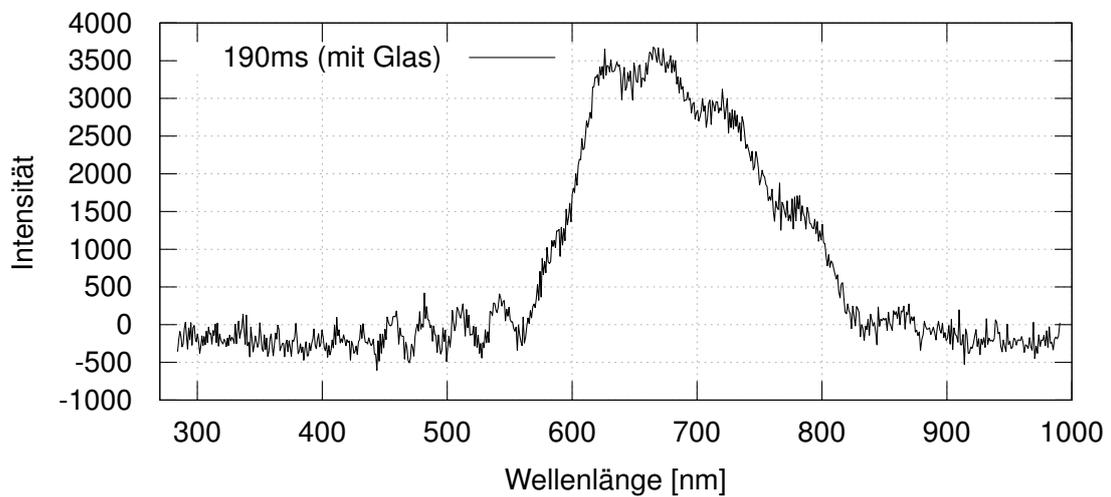


Abbildung C.19.: Testmessung - 45 Grad - pink

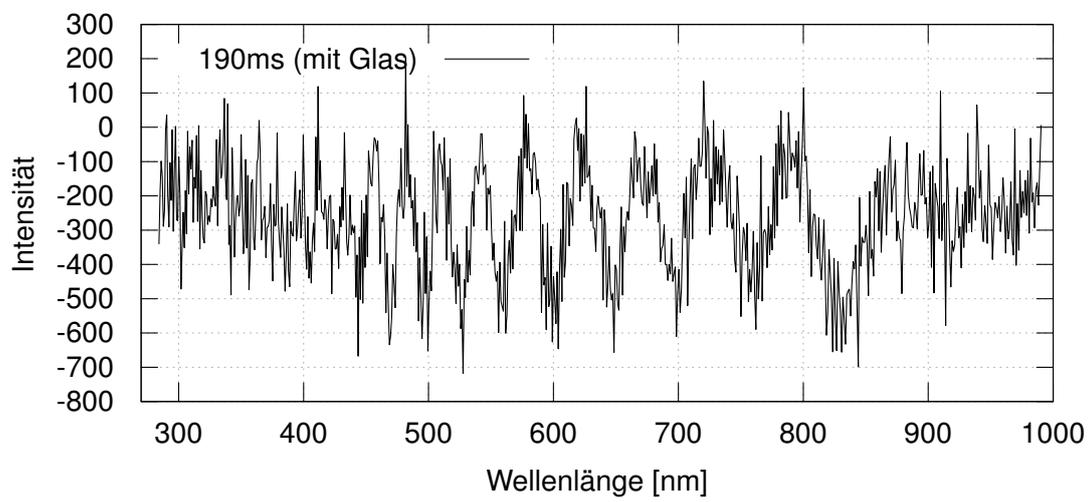


Abbildung C.20.: Testmessung - 45 Grad - schwarz

D. Messreihen

Tabelle D.1.: Elektrodenmaterialien - Zusammensetzung (Absolute Mengen)

Proben- bezeich- nung	10% PVDF in NMP [mg]	Kohlen- stoff [mg]	ITO [mg]	LiFePO ₄ [mg]	FePO ₄ [mg]
I-1	622,0	63,4	0,0	500,0	0,0
I-2	625,4	46,3	0,0	515,5	0,0
I-3	631,3	31,2	0,0	531,7	0,0
I-4	631,2	15,8	0,0	546,5	0,0
I-5	636,6	0,0	0,0	601,3	0,0
II-1	618,8	62,8	0,0	0,0	500,2
II-3	620,1	32,3	0,0	0,0	531,5
II-5	625,1	0,0	0,0	0,0	562,2
III-1	626,7	0,0	63,2	500,0	0,0
III-2	611,9	0,0	32,5	497,1	0,0
III-3	631,7	0,0	134,4	503,2	0,0
III-4	626,2	0,0	242,9	500,0	0,0
III-5	624,3	62,6	0,0	500,0	0,0
IV-1	622,4	0,0	0,0	505,9	0,0
IV-2	628,8	0,0	103,0	503,0	0,0
IV-3	620,3	0,0	201,1	502,5	0,0
IV-4	622,3	0,0	403,2	505,9	0,0
IV-5	631,3	65,0	0,0	501,7	0,0
V-1	627,7	0,0	99,4	499,9	0,0
V-2	629,2	0,0	198,5	494,9	0,0
V-3	626,8	0,0	397,5	500,3	0,0
V-4	626,9	0,0	199,1		500,6

Tabelle D.2.: Elektrodenmaterialien - Zusammensetzung (Gewichtsprozent)

Probenbezeichnung	PVDF	Kohlenstoff	ITO	LiFePO₄	FePO₄
I-1	9,942	10,134	0,000	79,923	0,000
I-2	10,017	7,416	0,000	82,567	0,000
I-3	10,084	4,984	0,000	84,932	0,000
I-4	10,092	2,526	0,000	87,381	0,000
I-5	9,574	0,000	0,000	90,426	0,000
II-1	9,903	10,050	0,000	0,000	80,047
II-3	9,909	5,161	0,000	0,000	84,930
II-5	10,006	0,000	0,000	0,000	89,994
III-1	10,013	0,000	10,098	79,889	0,000
III-2	10,357	0,000	5,501	84,142	0,000
III-3	9,014	0,000	19,179	71,807	0,000
III-4	7,774	0,000	30,154	62,072	0,000
III-5	9,988	10,016	0,000	79,996	0,000
IV-1	10,955	0,000	0,000	89,045	0,000
IV-2	9,401	0,000	15,399	75,200	0,000
IV-3	8,102	0,000	26,266	65,632	0,000
IV-4	6,407	0,000	41,510	52,083	0,000
IV-5	10,023	10,320	0,000	79,656	0,000
V-1	9,481	0,000	15,014	75,506	0,000
V-2	8,319	0,000	26,246	65,435	0,000
V-3	6,526	0,000	41,386	52,089	0,000
V-4	8,223	0,000	26,115	0,000	65,662

D.1. Elektrische Messdaten

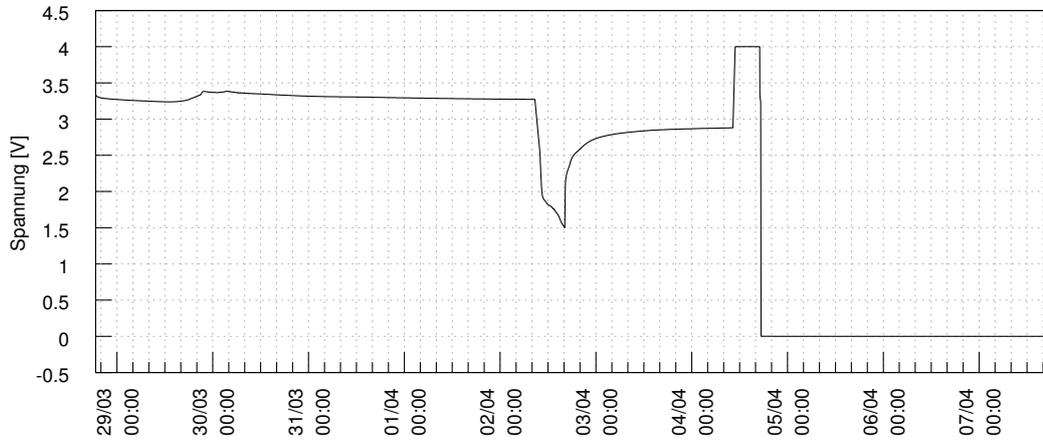
Tabelle D.3.: Lade-/ Entladewiderstände

Messreihe	Dateipräfix	Entladewiderstand (in Ohm)			Ladewiderstand (in Ohm)		
		Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3
2	20140328_	47127	47127		0	0	
	20140402_	47127	47127		0	0	
	20140404_	47127	47127		0	0	
3	20140408_	47020	47020		0	0	
4	20140415_1722	47020	47020		0	0	
5	20140425_1456	46979	47020		0	0	
6	20140512_1550	46979	47025		0	0	
7	20140523_2010	46979	47025	47132	0	0	0
	20140610_1550	46979	47025		0	0	
8	20140611_1615	46979	47025	47132	0	0	0
	20140617_1359	46979	47025		0	0	
9	20140620_1304	46979	47025	47132	9934	9883	9944
	20140627_1510	46979	47025		9934	9883	
10	20140704_1430	46979	47025	47132	9934	9883	9944
	20140707_1345	46979	47025	47132	9934	9883	9944
	20140718_1520	46979	47025	47132	100680	99950	100130
11	20140723_1635	46979	47025	47132	100680	99950	100130
	20140729_1220	200900	200000	199820	46979	47025	47132
	20140801_1710	200900	200000	199820	46979	47025	47132
	20140804_1925		200000			47025	

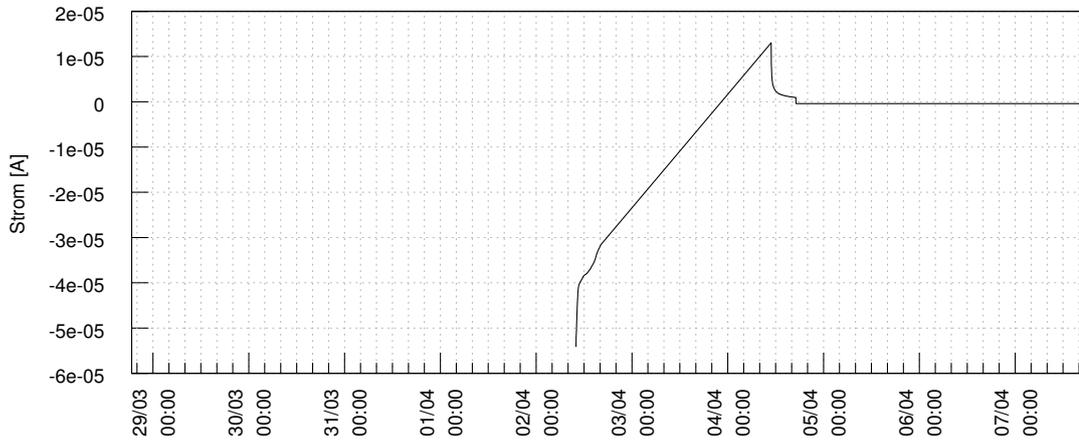
Tabelle D.4.: Ladespannungen

Messreihe	Dateipräfix	Ladespannung (in Volt)		
		Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3
2	20140328_	3,9997	3,9999	
	20140402_	3,9997	3,9999	
	20140404_	3,9997	3,9999	
3	20140408_	4,0002	4,0008	
4	20140415_1722	3,9980	3,9980	
5	20140425_1456	4,0010	4,0220	
6	20140512_1550	4,0006	4,0001	
7	20140523_2010	4,0111	4,0100	4,0033
	20140610_1550	4,5026	4,5065	
8	20140611_1615	4,0510	4,0122	0,4950
	20140617_1359	4,0495	4,0119	
9	20140620_1304	4,0070	4,0118	3,9990
	20140627_1510	4,0070	4,0118	
10	20140704_1430	3,9994	4,0018	4,0071
	20140707_1345	3,9994	4,0018	4,0071
	20140718_1520	3,9994	4,0018	4,0071
11	20140723_1635	3,9994	4,0018	4,0071
	20140729_1220	3,9994	4,0018	4,0071
	20140801_1710	3,9994	4,0018	4,0071
	20140804_1925		4,0018	

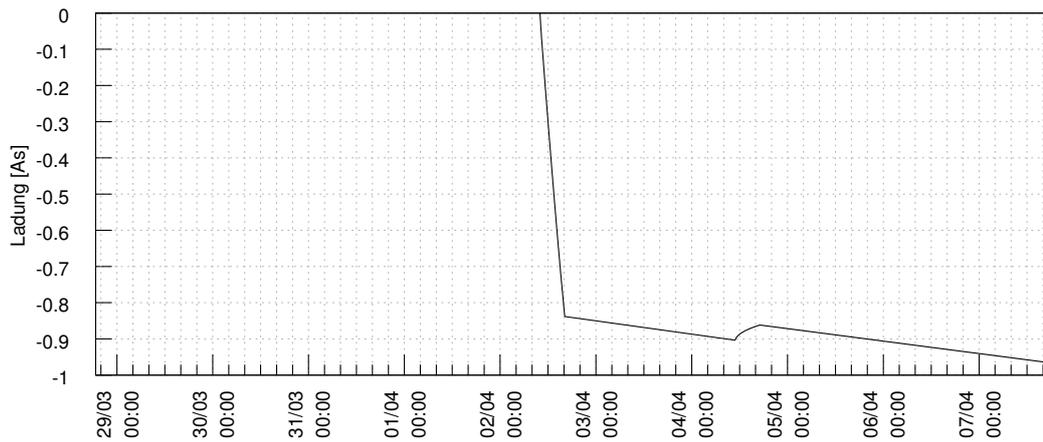
D.1.1. Messreihe 2



(a) Messreihe 2 - Zelle 1 - Spannung

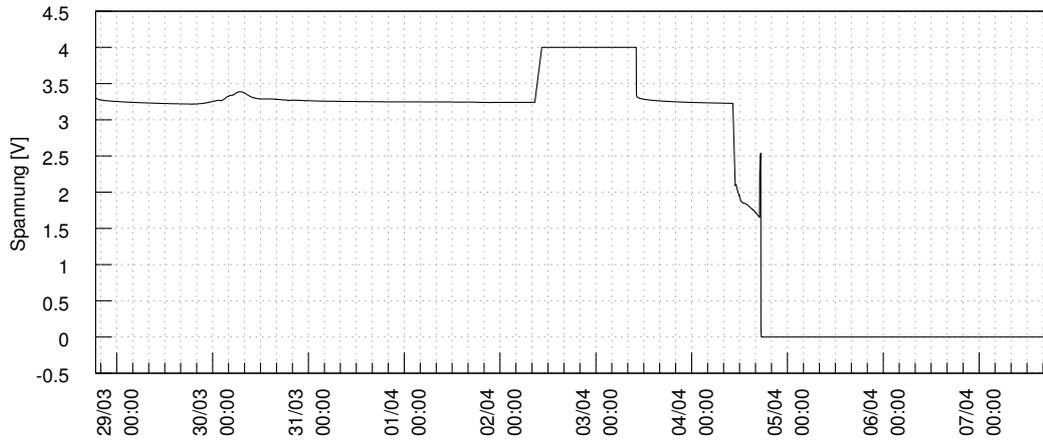


(b) Messreihe 2 - Zelle 1 - Strom

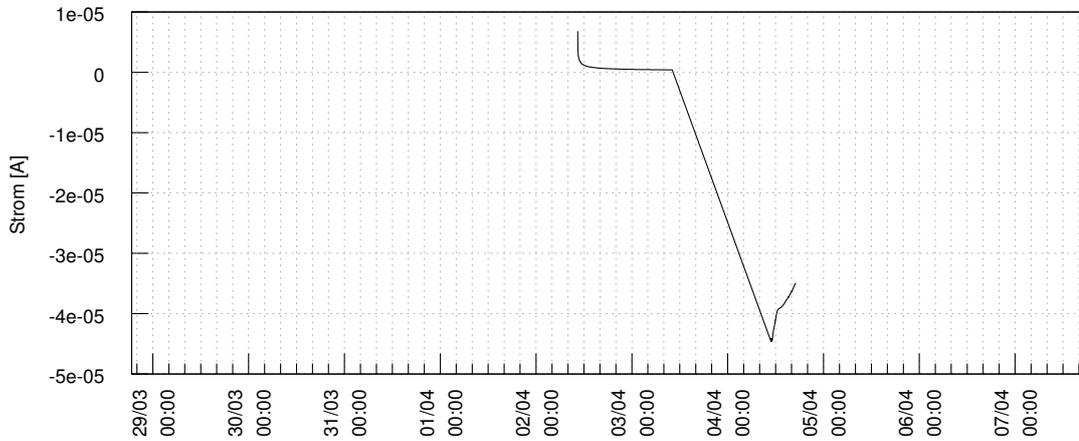


(c) Messreihe 2 - Zelle 1 - Ladung

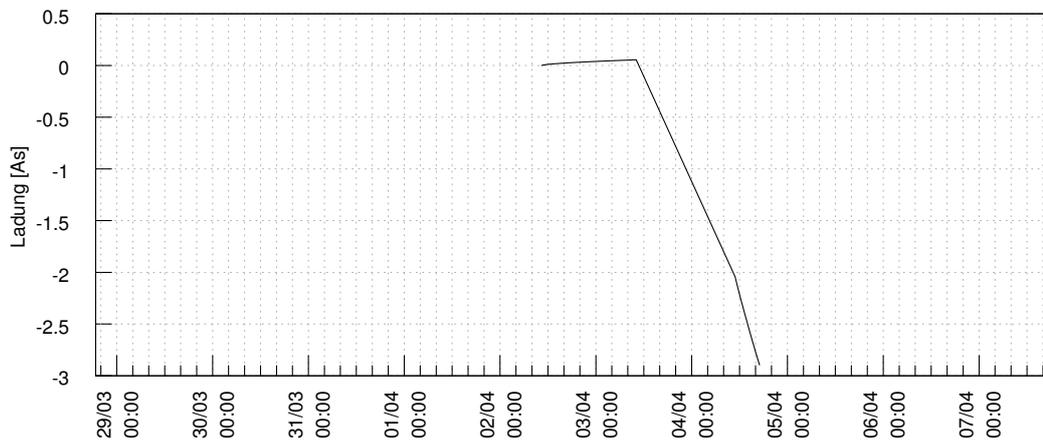
Abbildung D.1.: Messreihe 2 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 2 - Zelle 2 - Spannung



(b) Messreihe 2 - Zelle 2 - Strom



(c) Messreihe 2 - Zelle 2 - Ladung

Abbildung D.2.: Messreihe 2 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

D.1.2. Messreihe 3

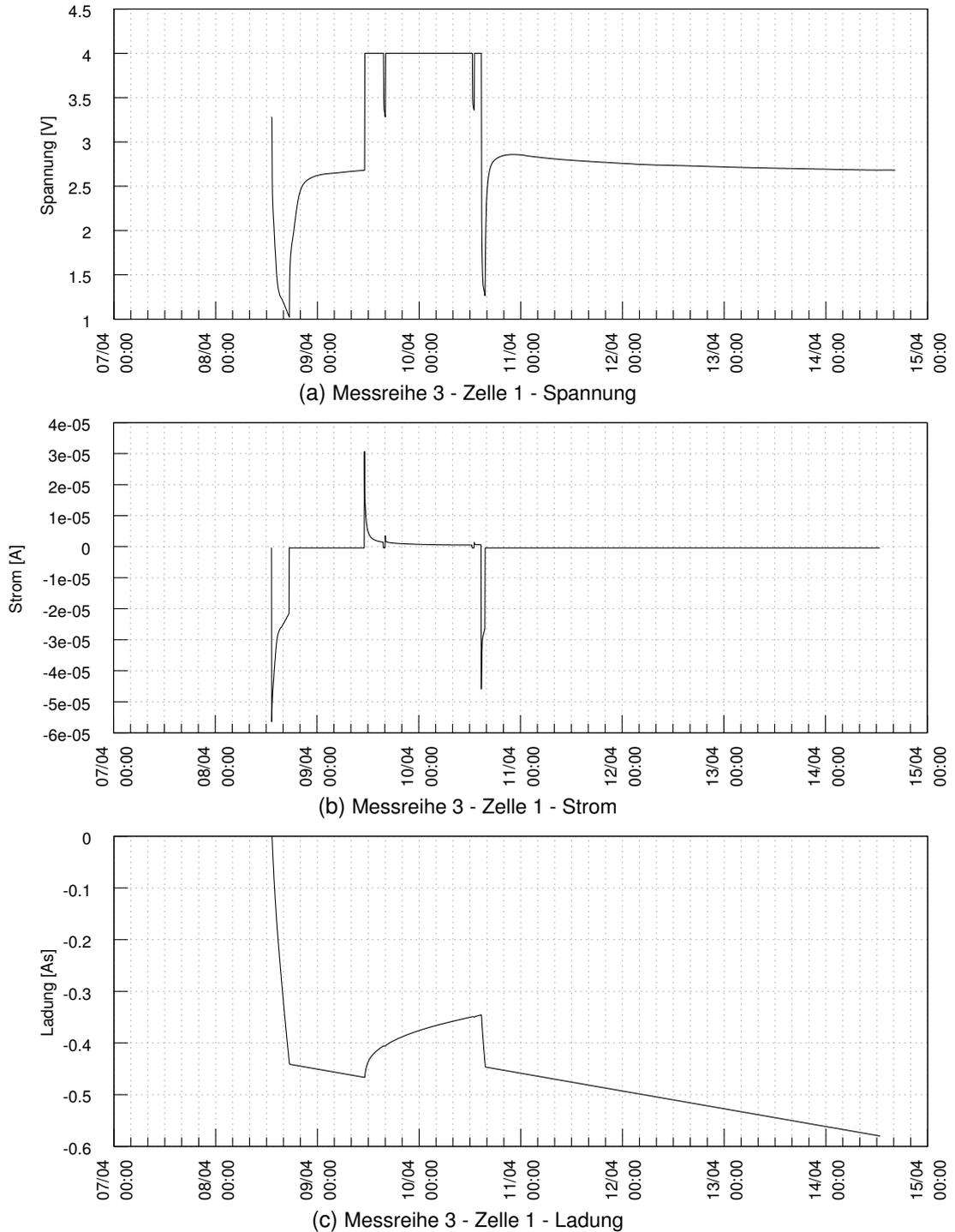


Abbildung D.3.: Messreihe 3 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte

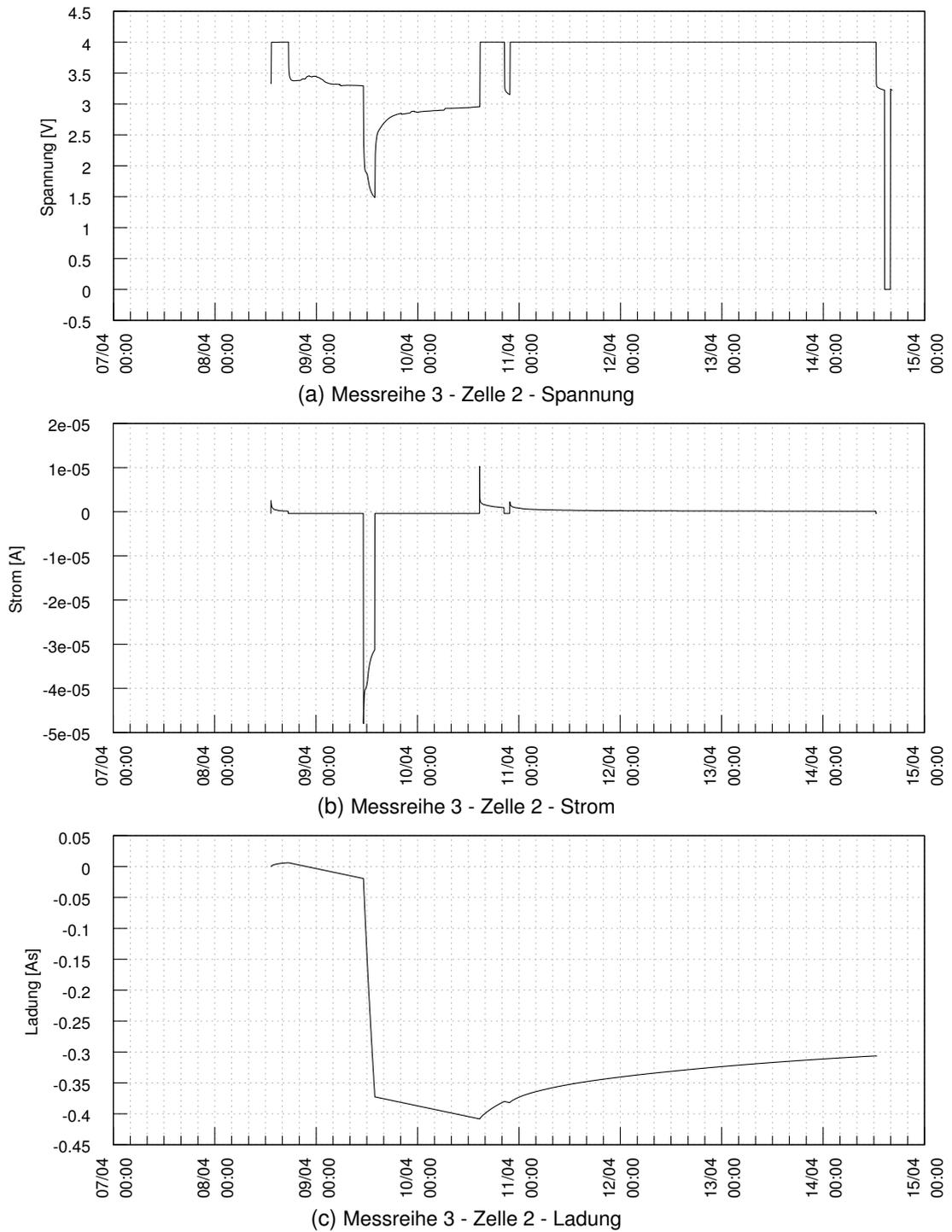


Abbildung D.4.: Messreihe 3 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

D.1.3. Messreihe 4

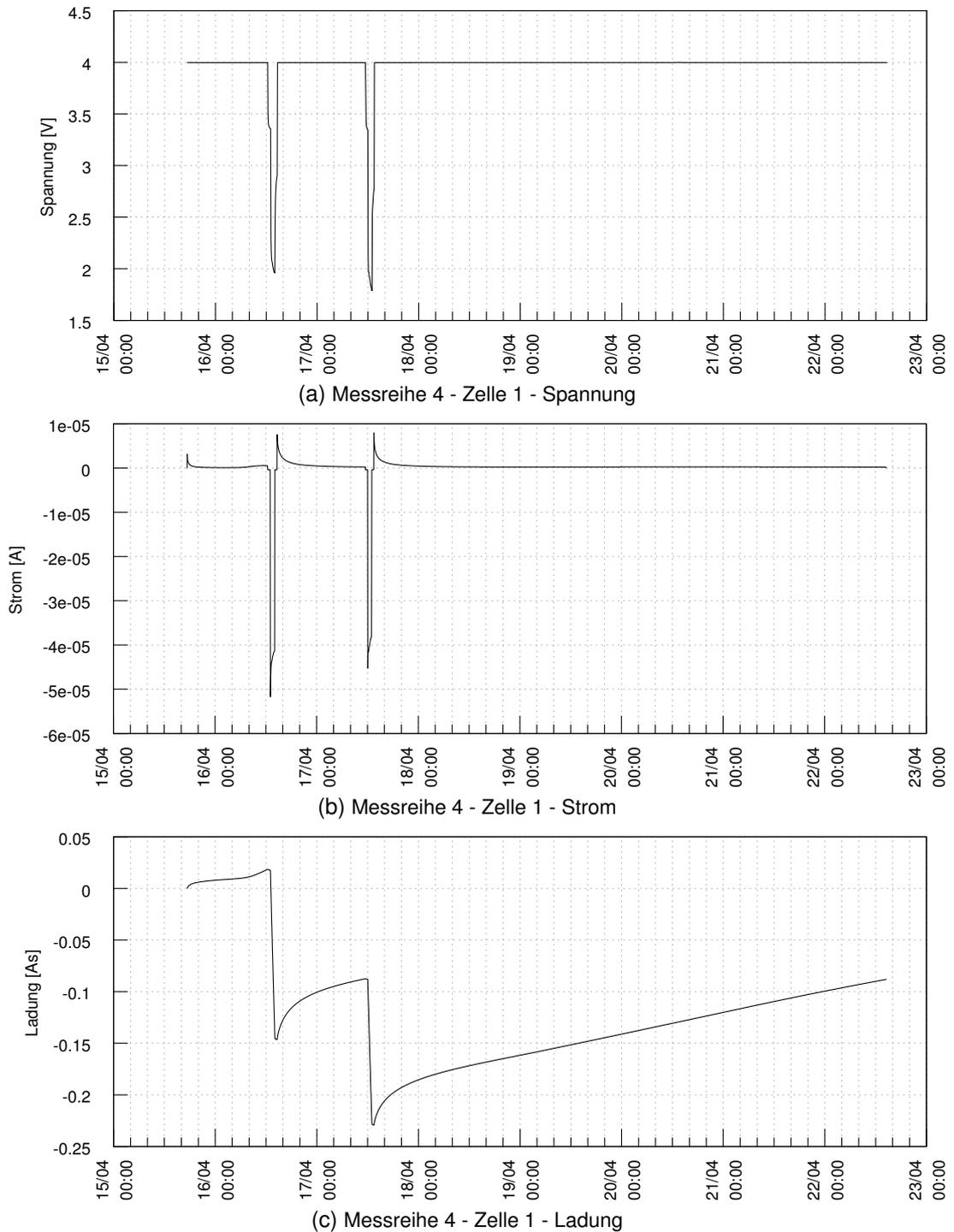
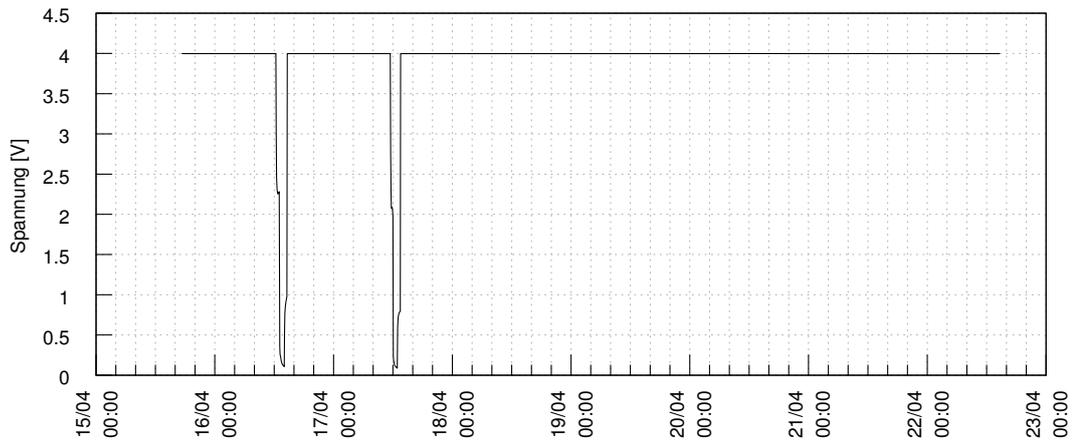
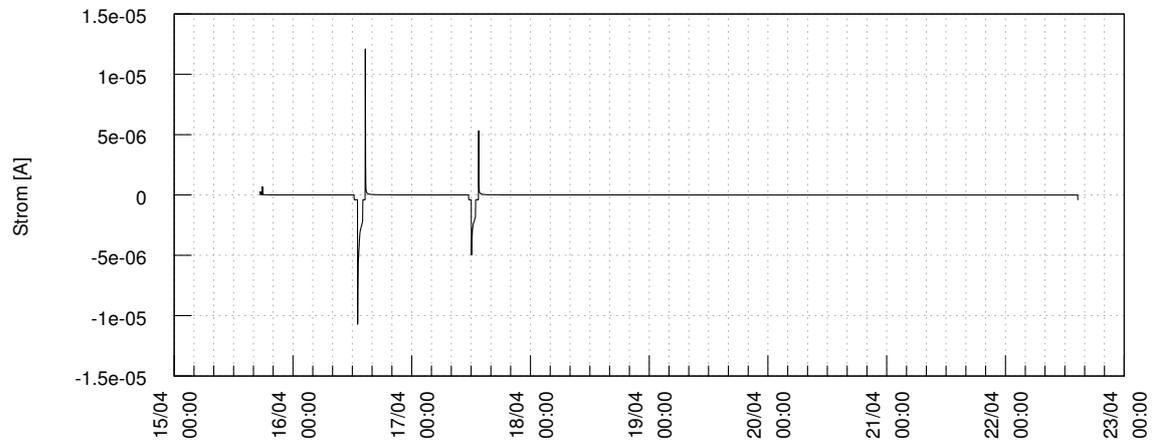


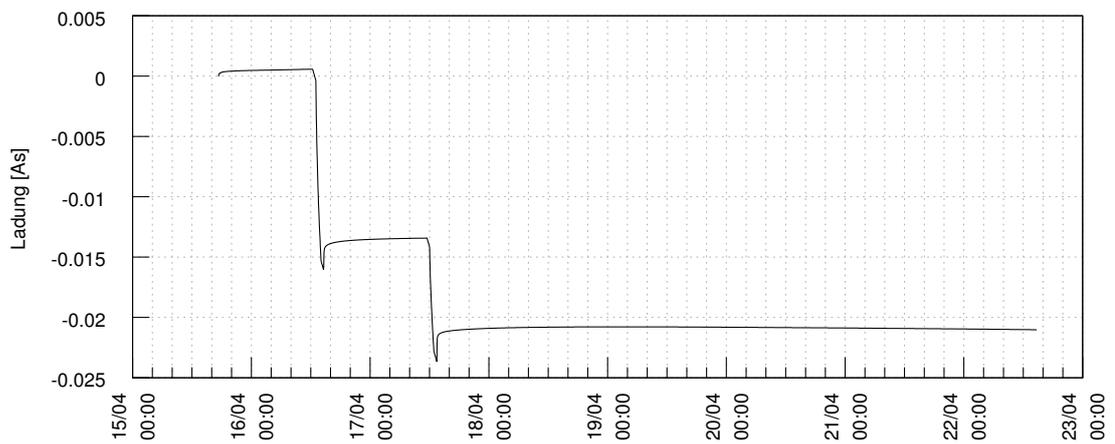
Abbildung D.5.: Messreihe 4 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 4 - Zelle 2 - Spannung



(b) Messreihe 4 - Zelle 2 - Strom



(c) Messreihe 4 - Zelle 2 - Ladung

Abbildung D.6.: Messreihe 4 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

D.1.4. Messreihe 5

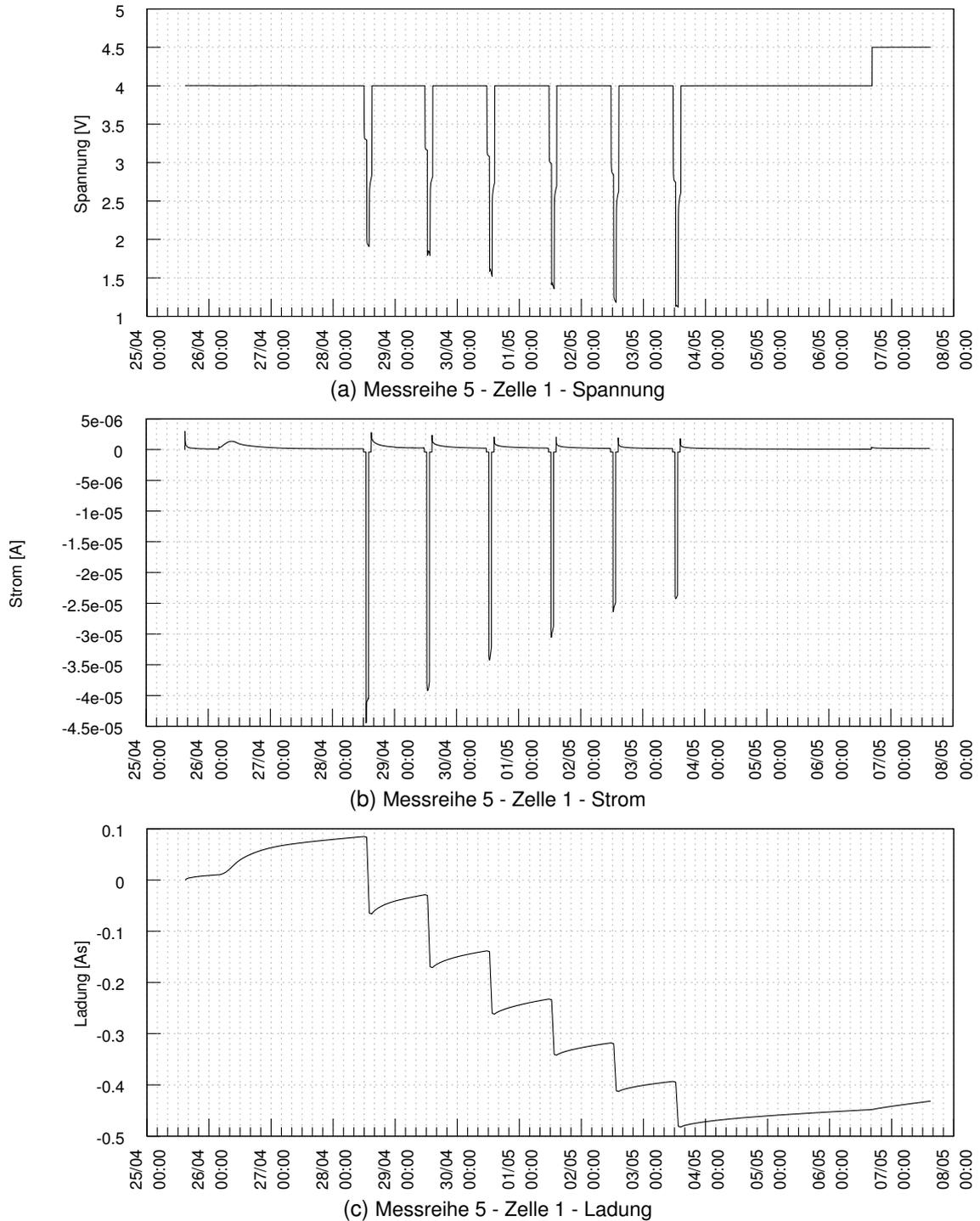


Abbildung D.7.: Messreihe 5 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte

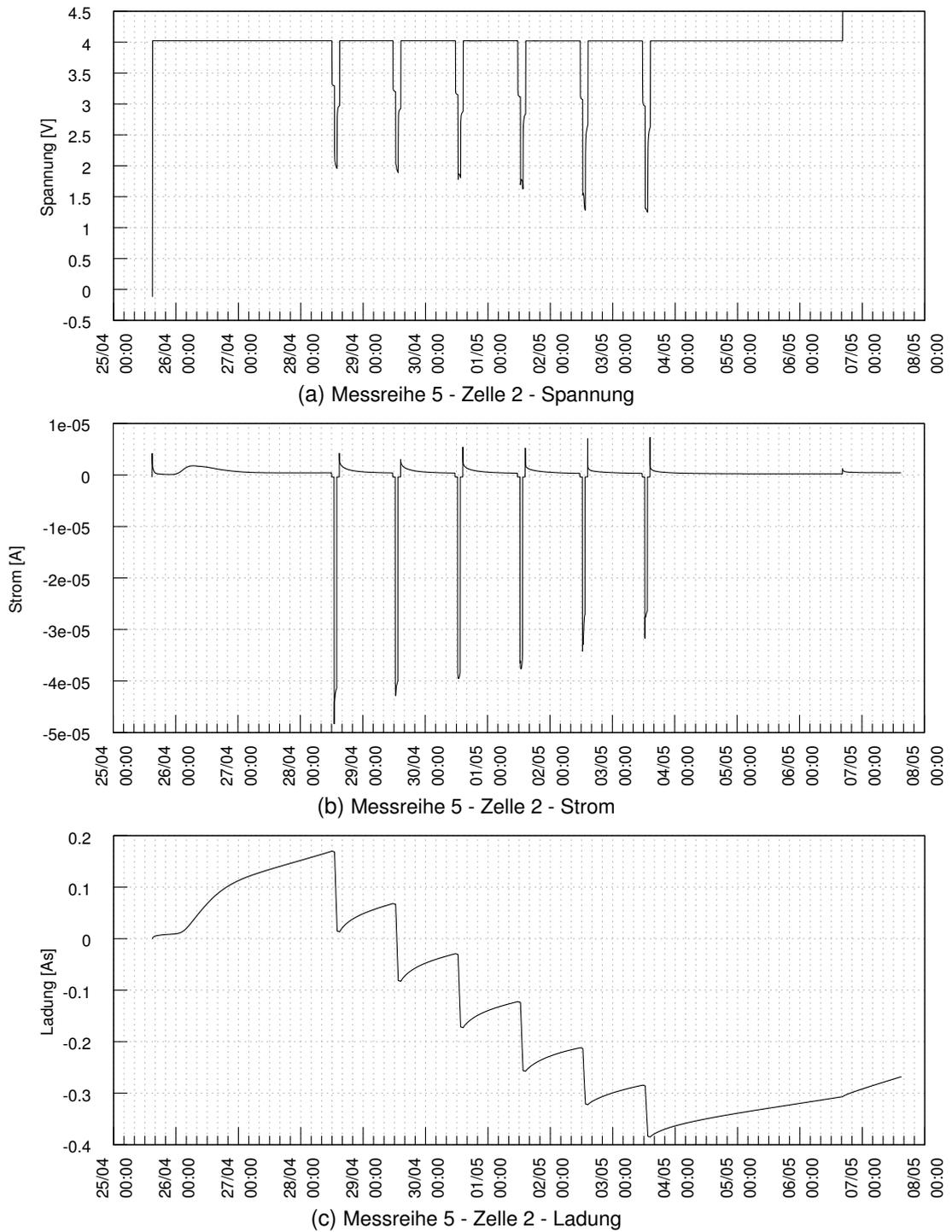


Abbildung D.8.: Messreihe 5 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

D.1.5. Messreihe 6

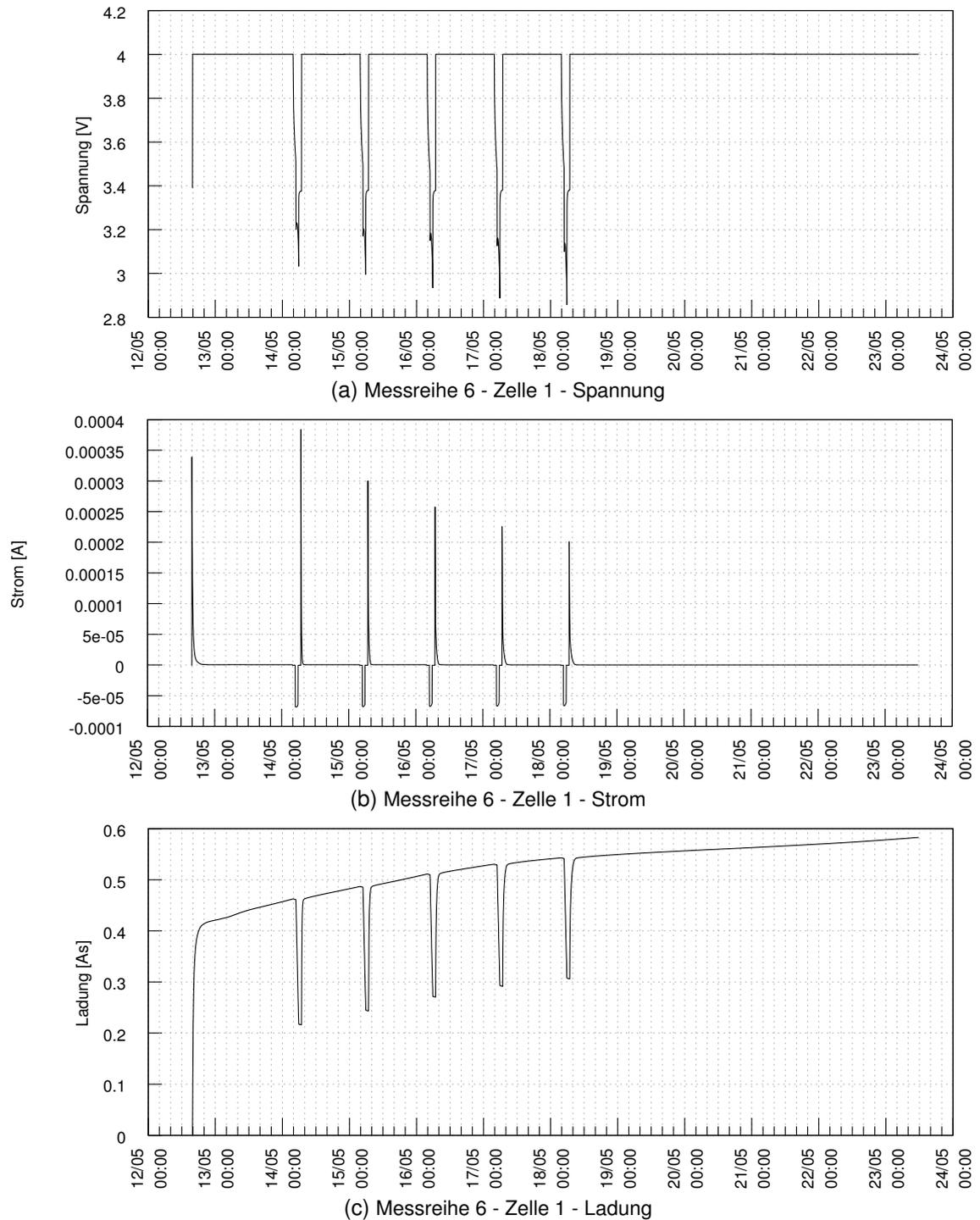


Abbildung D.9.: Messreihe 6 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte

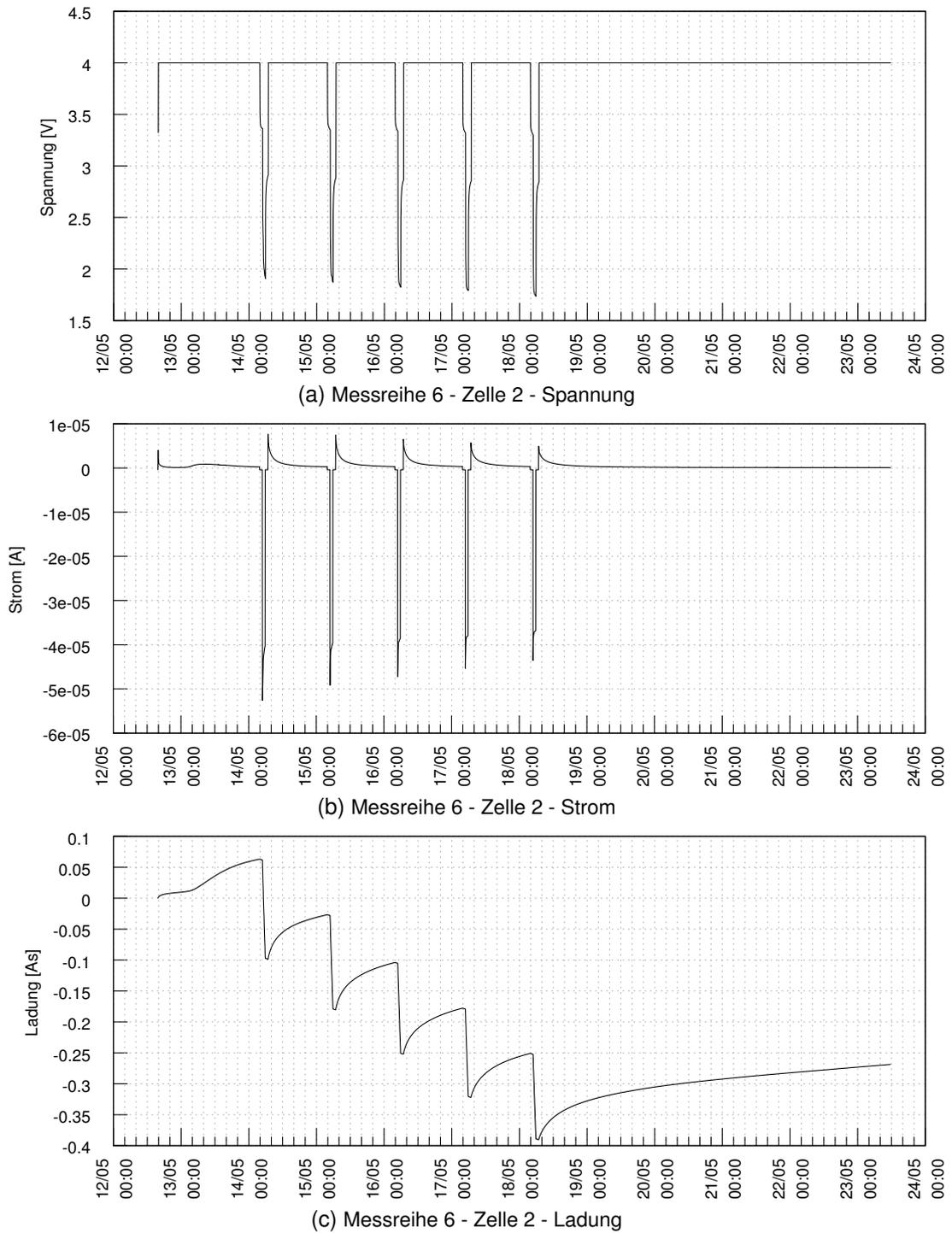


Abbildung D.10.: Messreihe 6 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

D.1.6. Messreihe 7

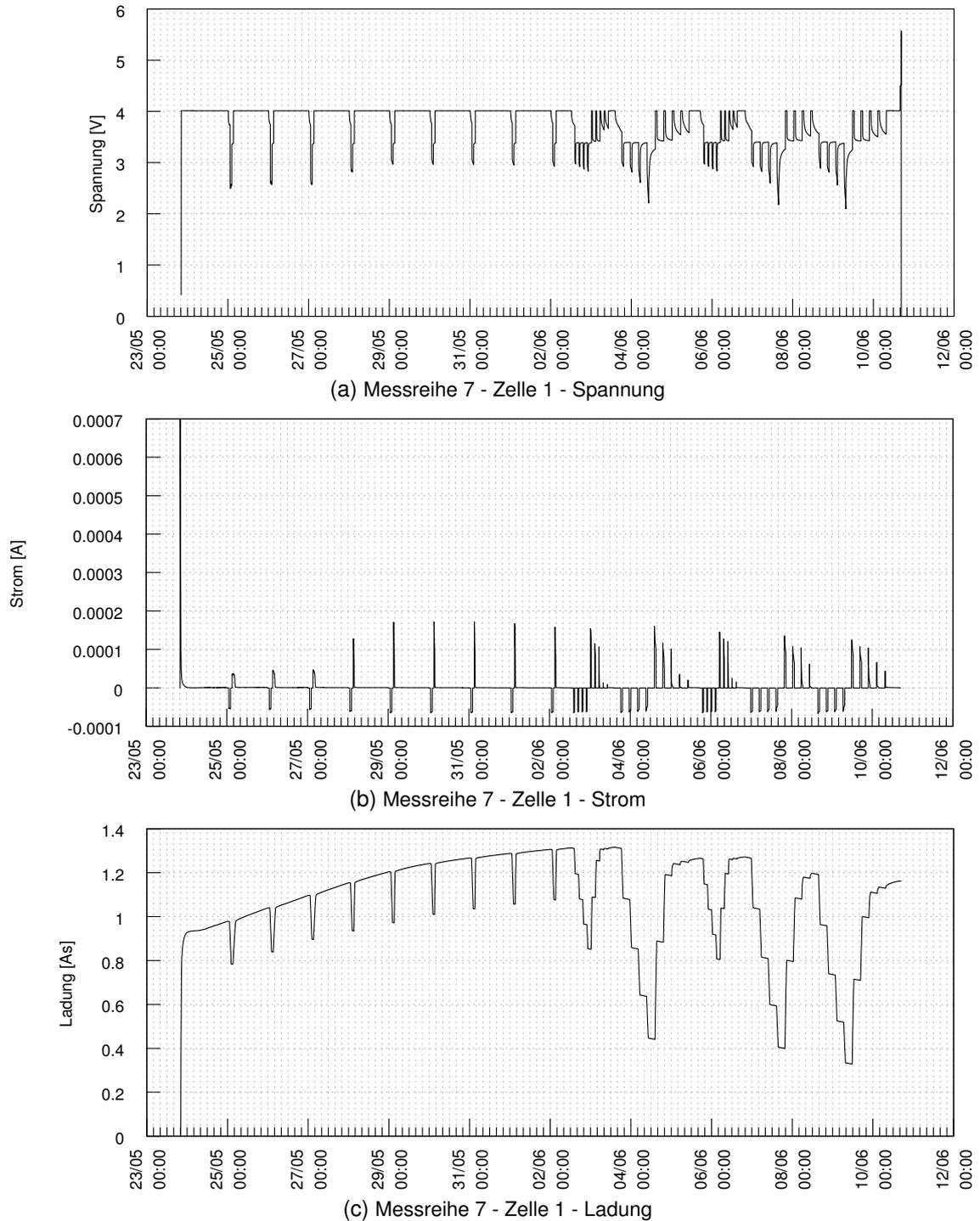
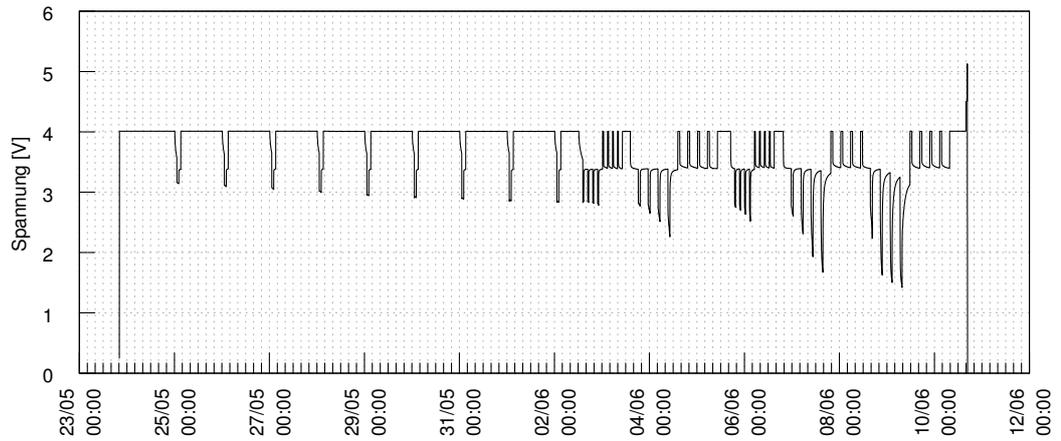
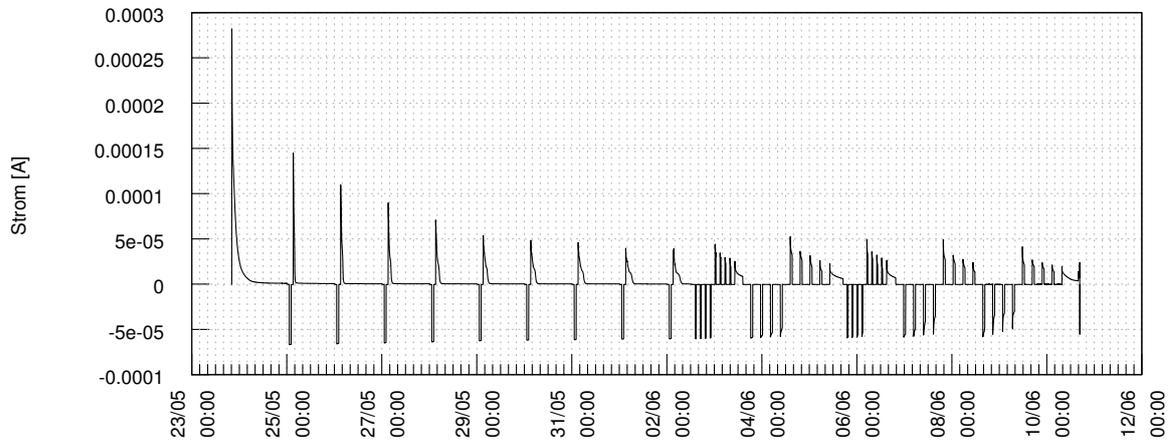


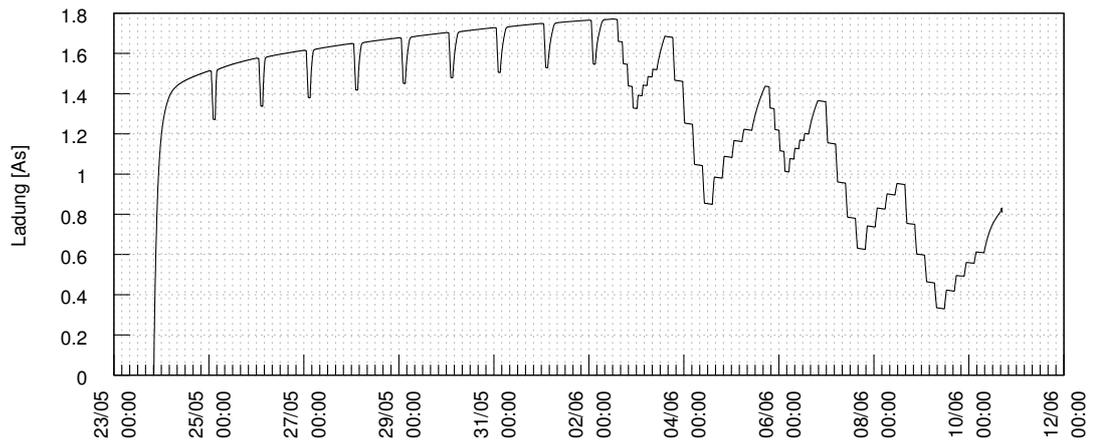
Abbildung D.11.: Messreihe 7 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 7 - Zelle 2 - Spannung



(b) Messreihe 7 - Zelle 2 - Strom



(c) Messreihe 7 - Zelle 2 - Ladung

Abbildung D.12.: Messreihe 7 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

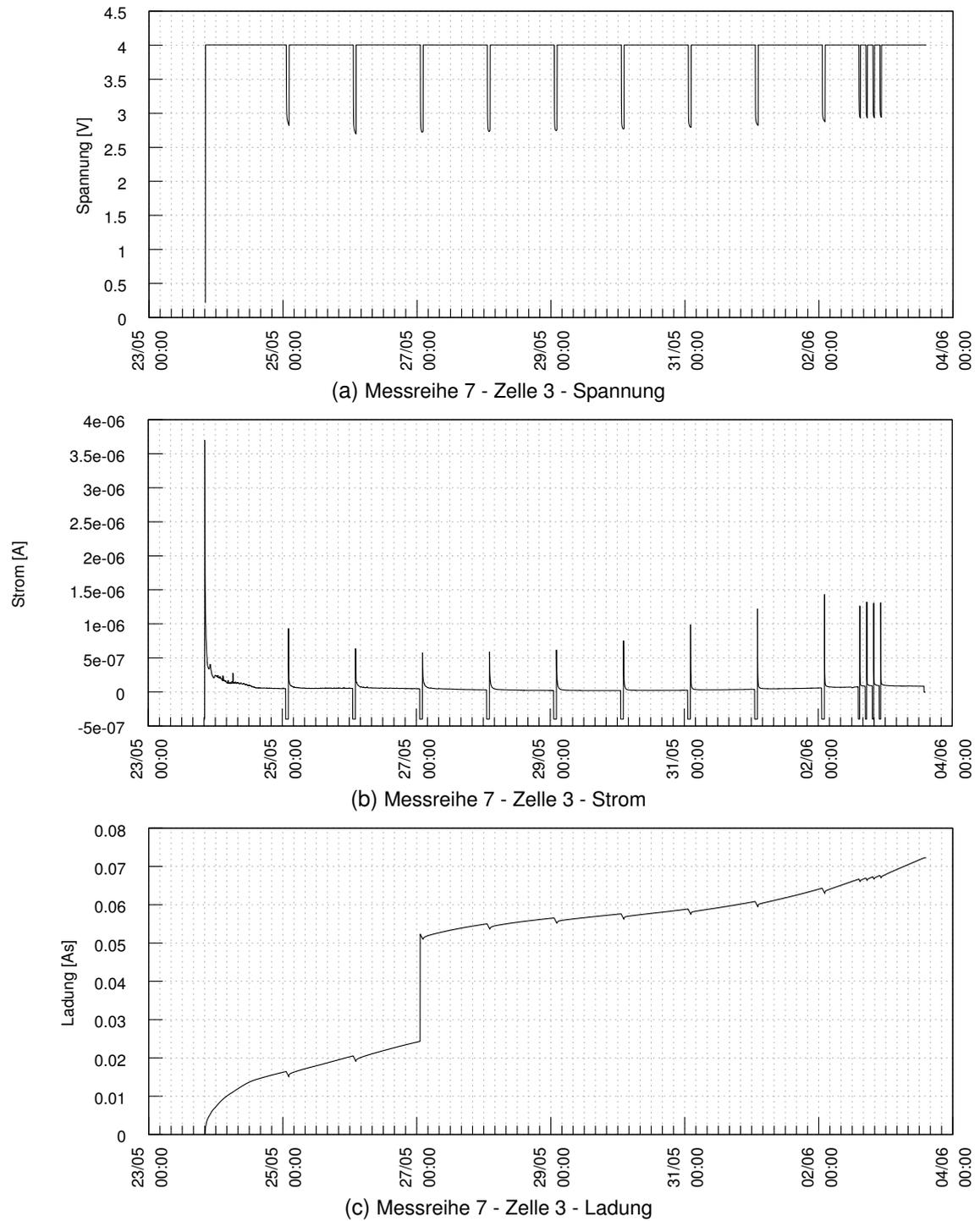


Abbildung D.13.: Messreihe 7 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte

D.1.7. Messreihe 8

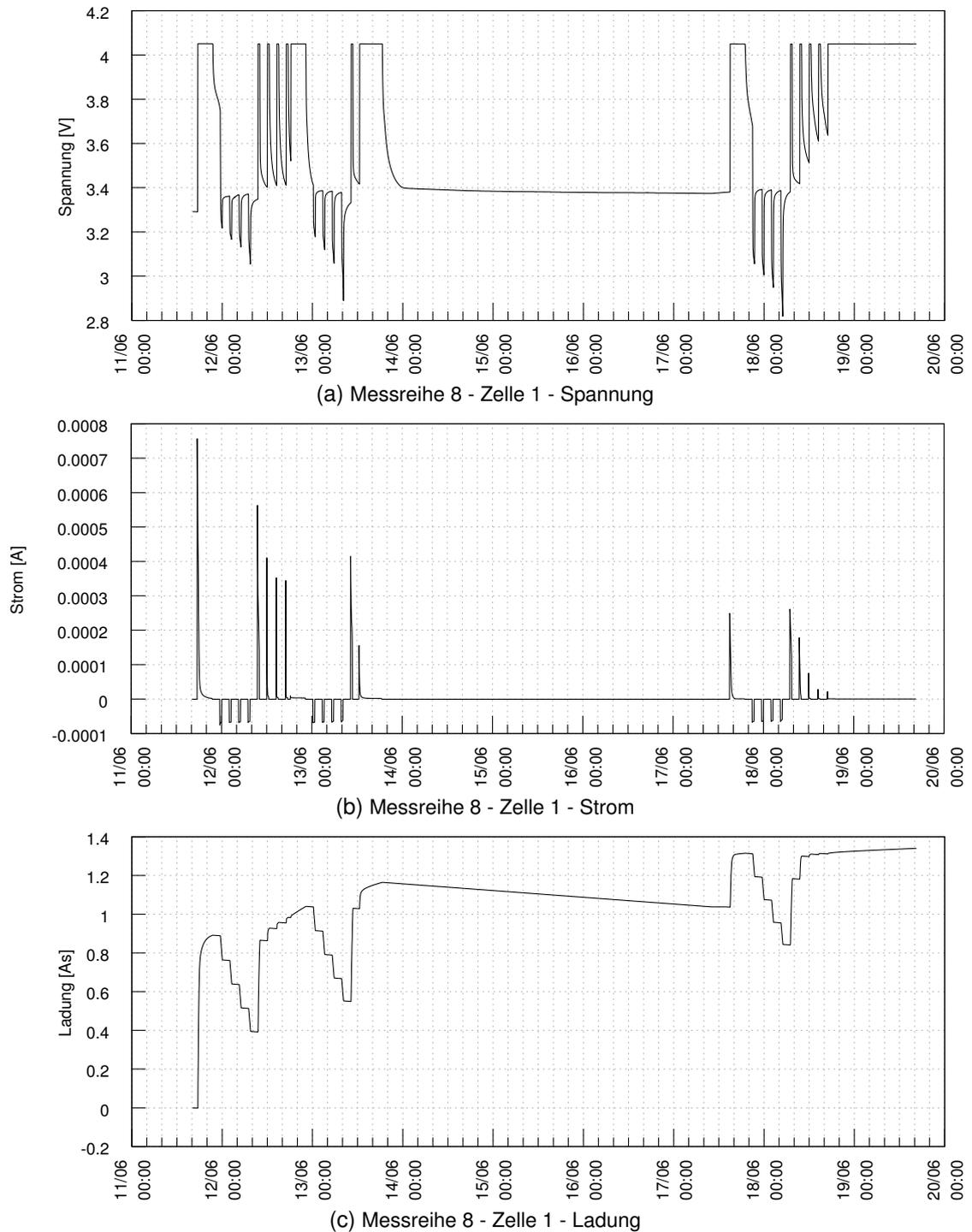
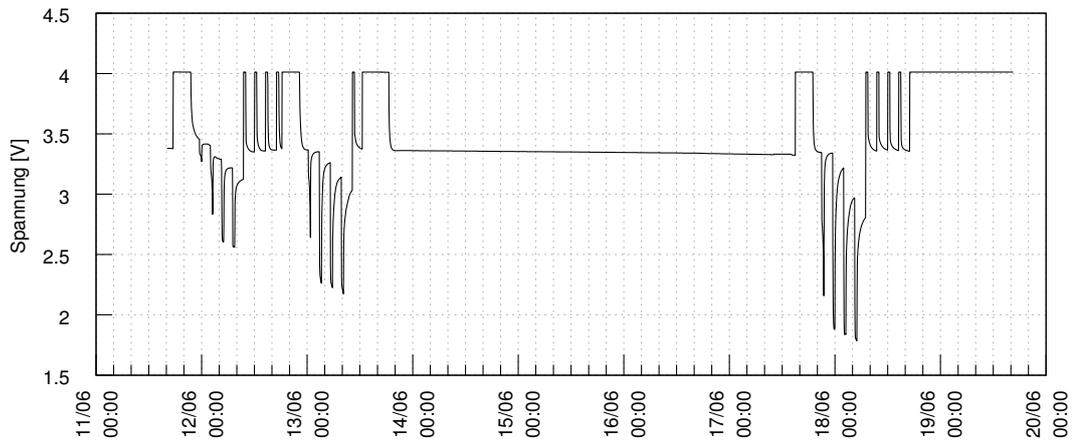
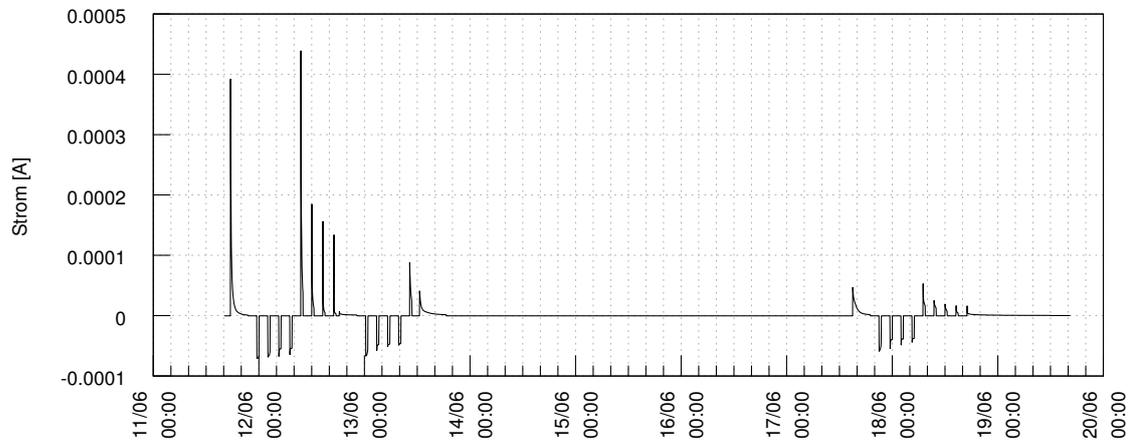


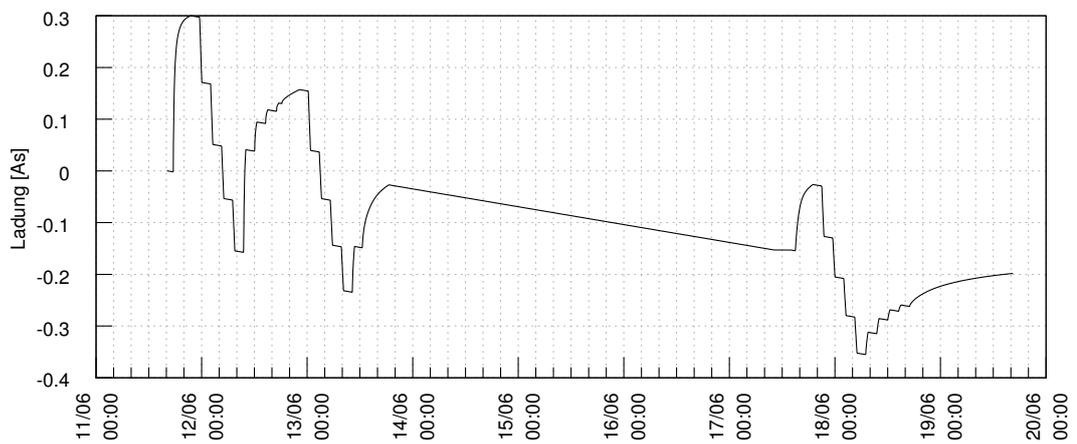
Abbildung D.14.: Messreihe 8 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 8 - Zelle 2 - Spannung

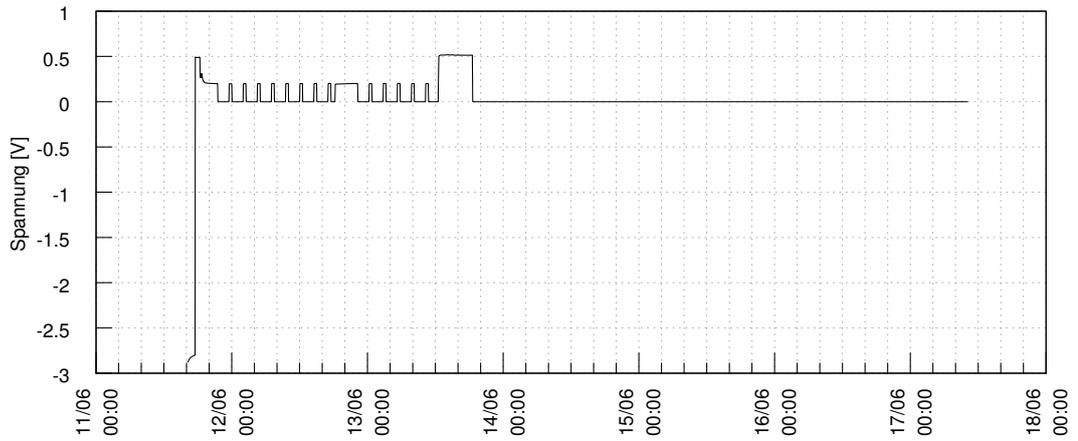


(b) Messreihe 8 - Zelle 2 - Strom

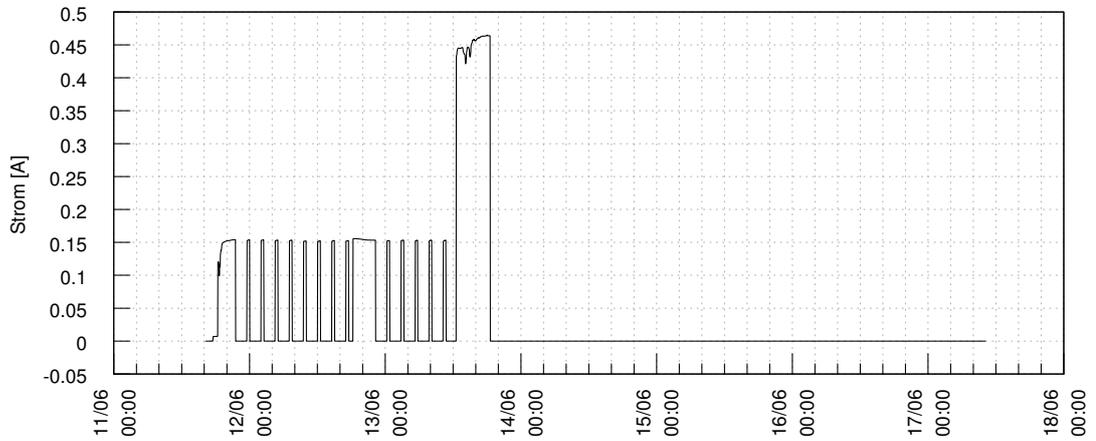


(c) Messreihe 8 - Zelle 2 - Ladung

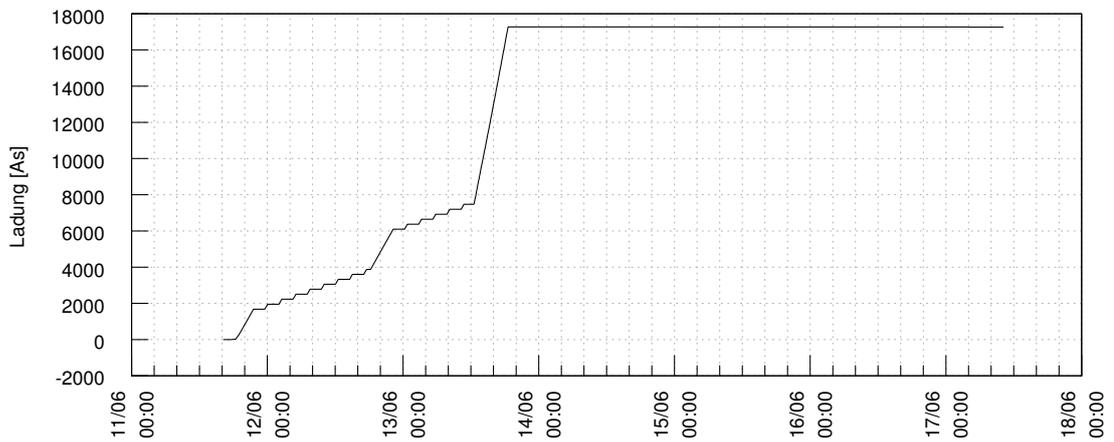
Abbildung D.15.: Messreihe 8 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 8 - Zelle 3 - Spannung



(b) Messreihe 8 - Zelle 3 - Strom



(c) Messreihe 8 - Zelle 3 - Ladung

Abbildung D.16.: Messreihe 8 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte

D.1.8. Messreihe 9

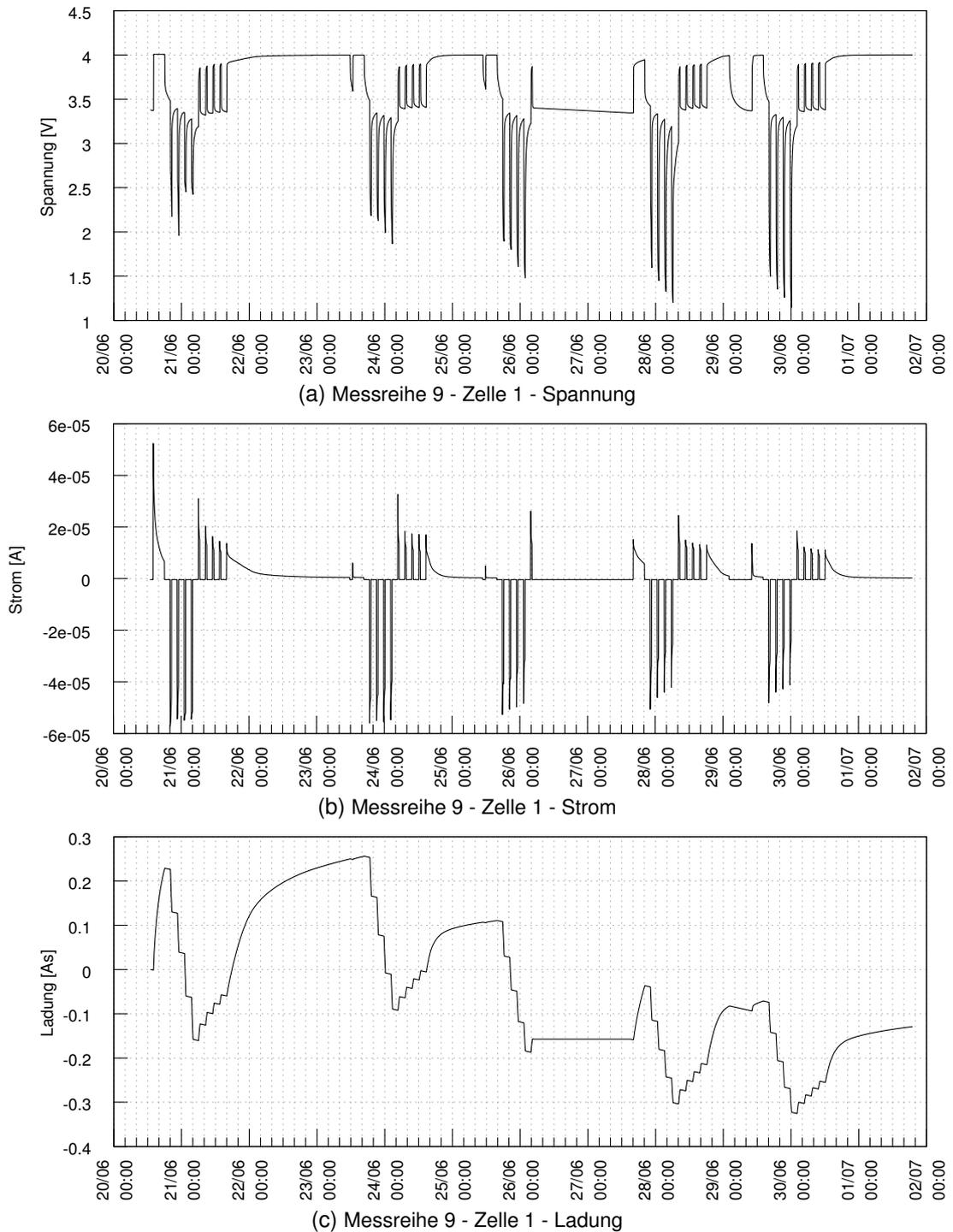
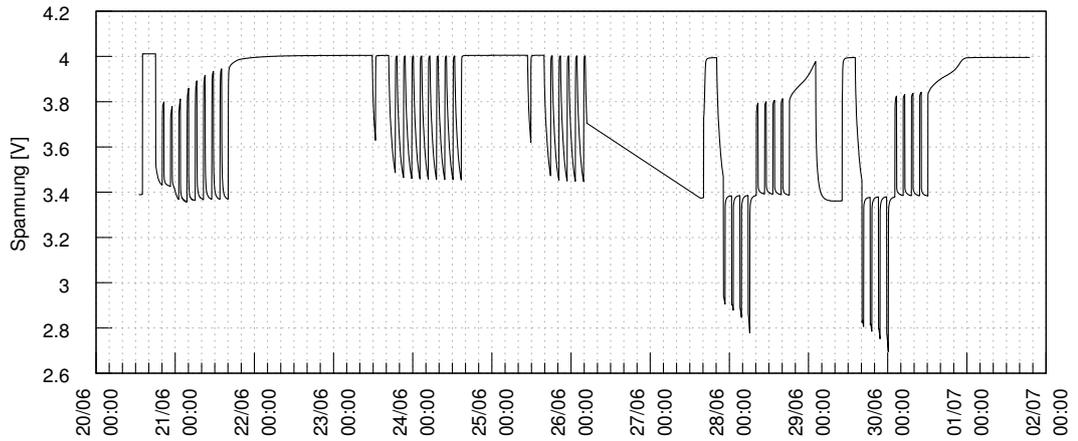
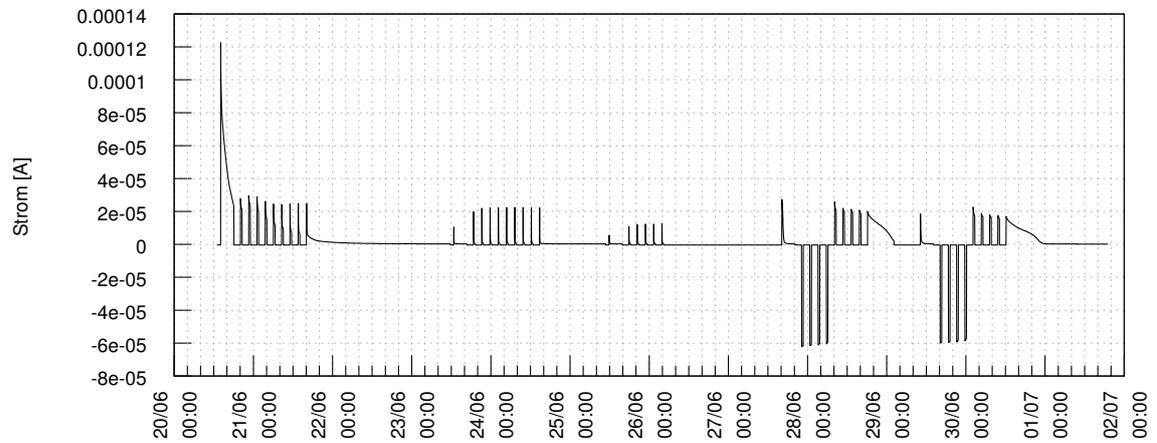


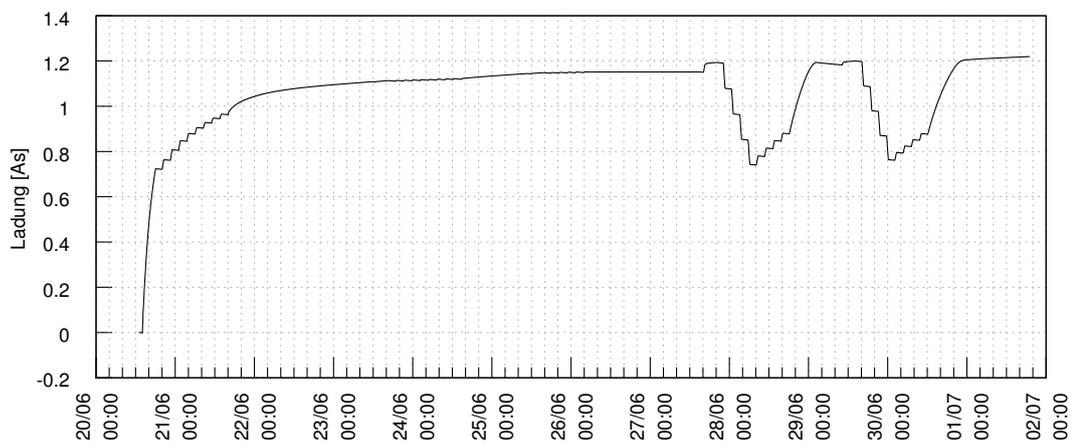
Abbildung D.17.: Messreihe 9 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 9 - Zelle 2 - Spannung



(b) Messreihe 9 - Zelle 2 - Strom



(c) Messreihe 9 - Zelle 2 - Ladung

Abbildung D.18.: Messreihe 9 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte

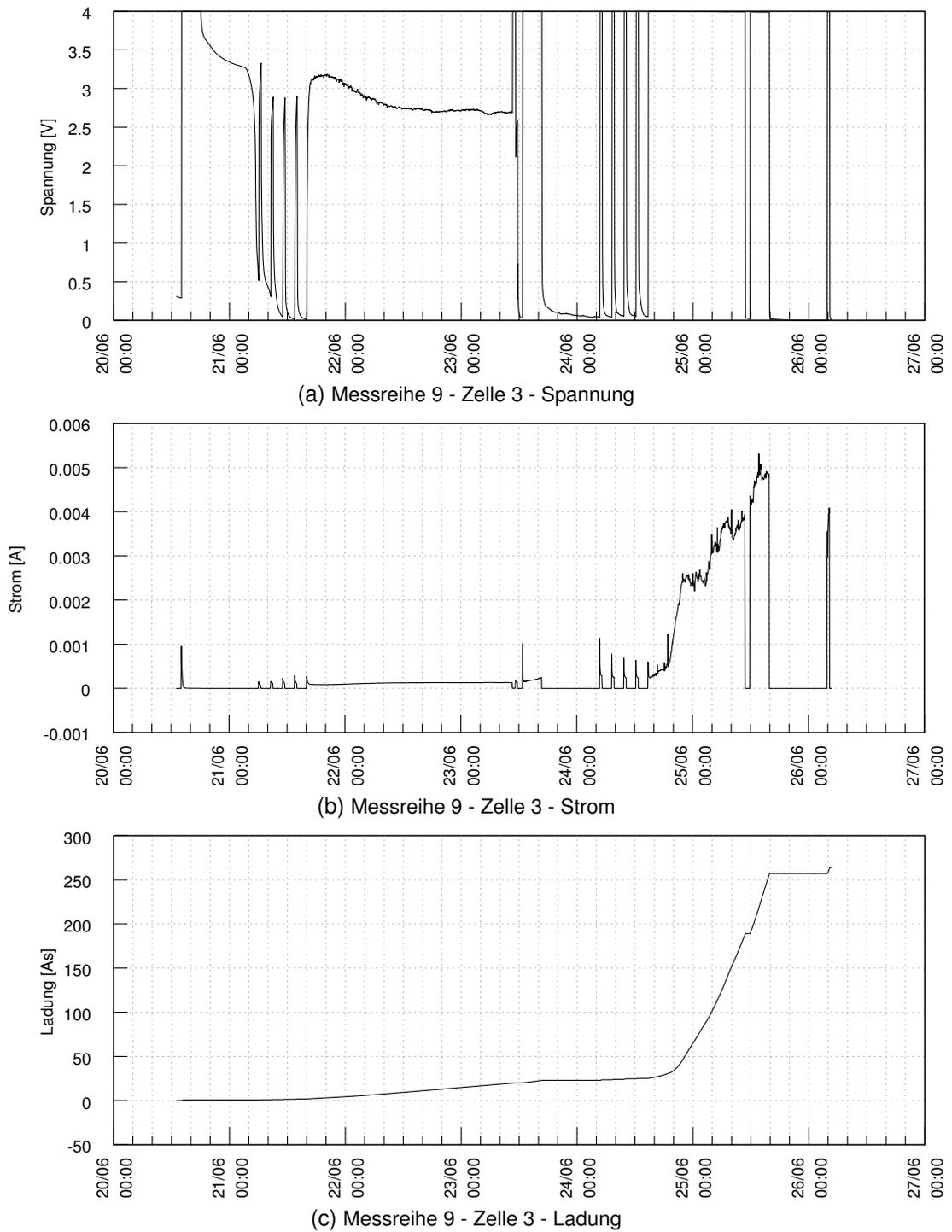


Abbildung D.19.: Messreihe 9 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte

D.1.9. Messreihe 10

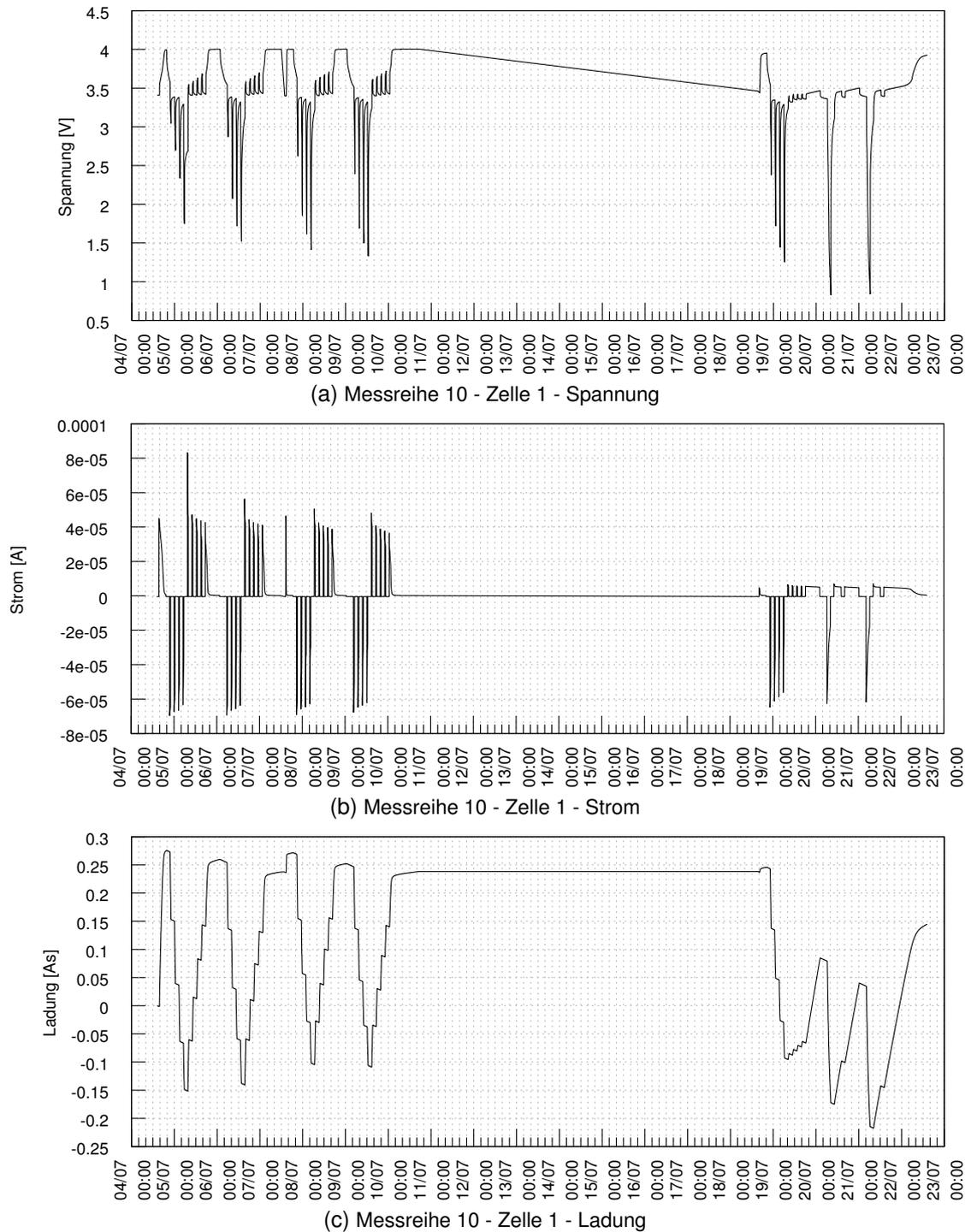
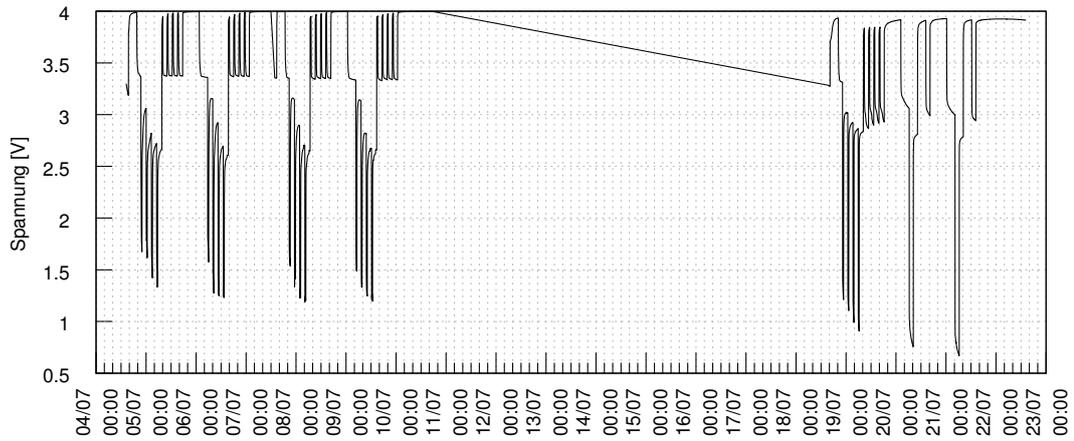
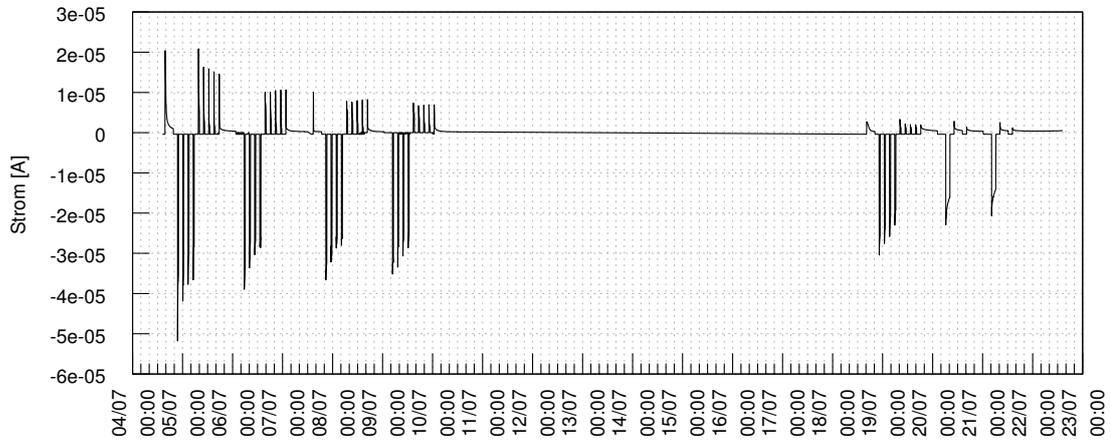


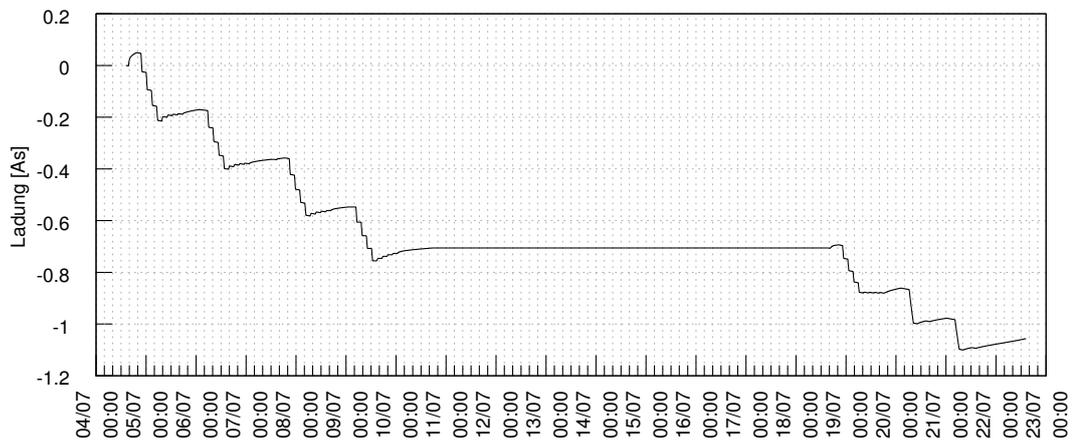
Abbildung D.20.: Messreihe 10 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 10 - Zelle 2 - Spannung

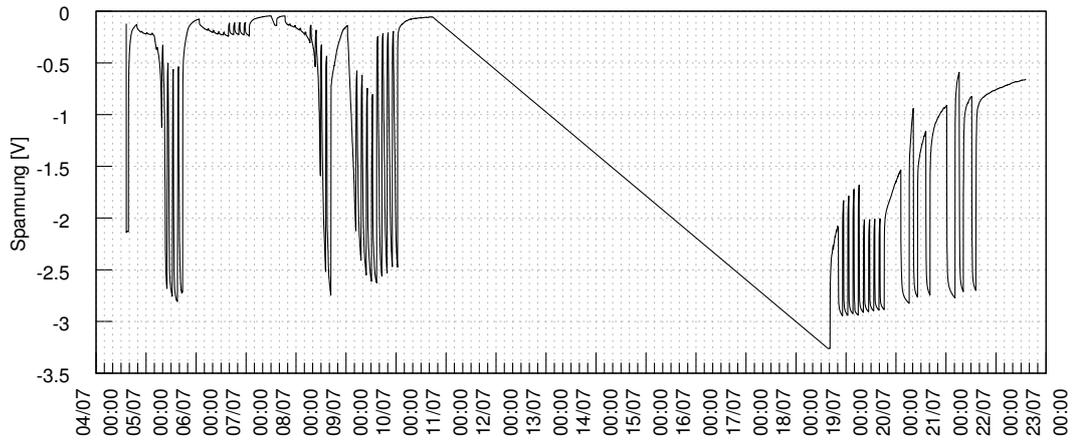


(b) Messreihe 10 - Zelle 2 - Strom

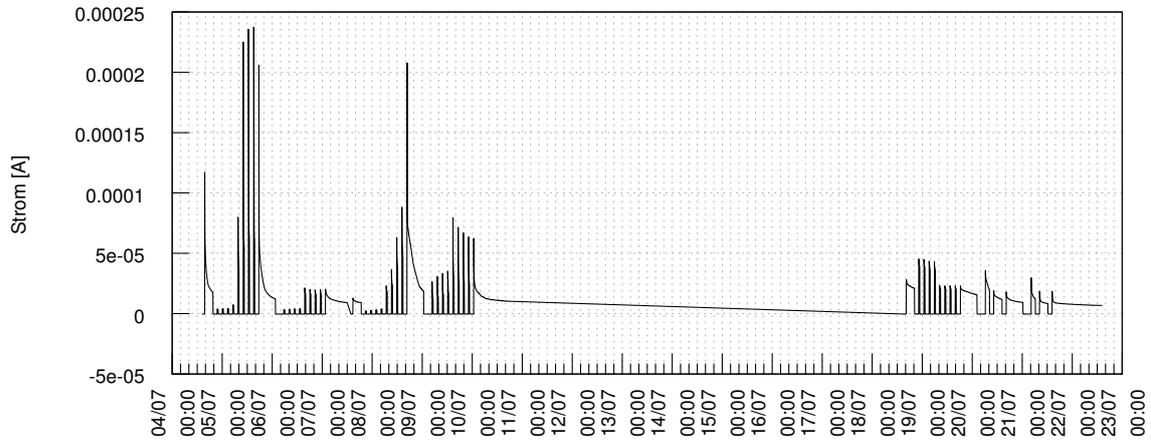


(c) Messreihe 10 - Zelle 2 - Ladung

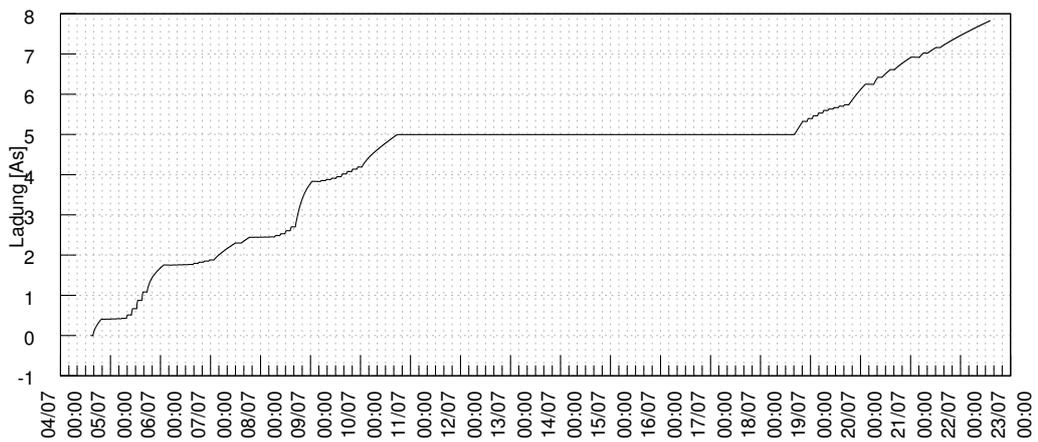
Abbildung D.21.: Messreihe 10 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 10 - Zelle 3 - Spannung



(b) Messreihe 10 - Zelle 3 - Strom



(c) Messreihe 10 - Zelle 3 - Ladung

Abbildung D.22.: Messreihe 10 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte

D.1.10. Messreihe 11

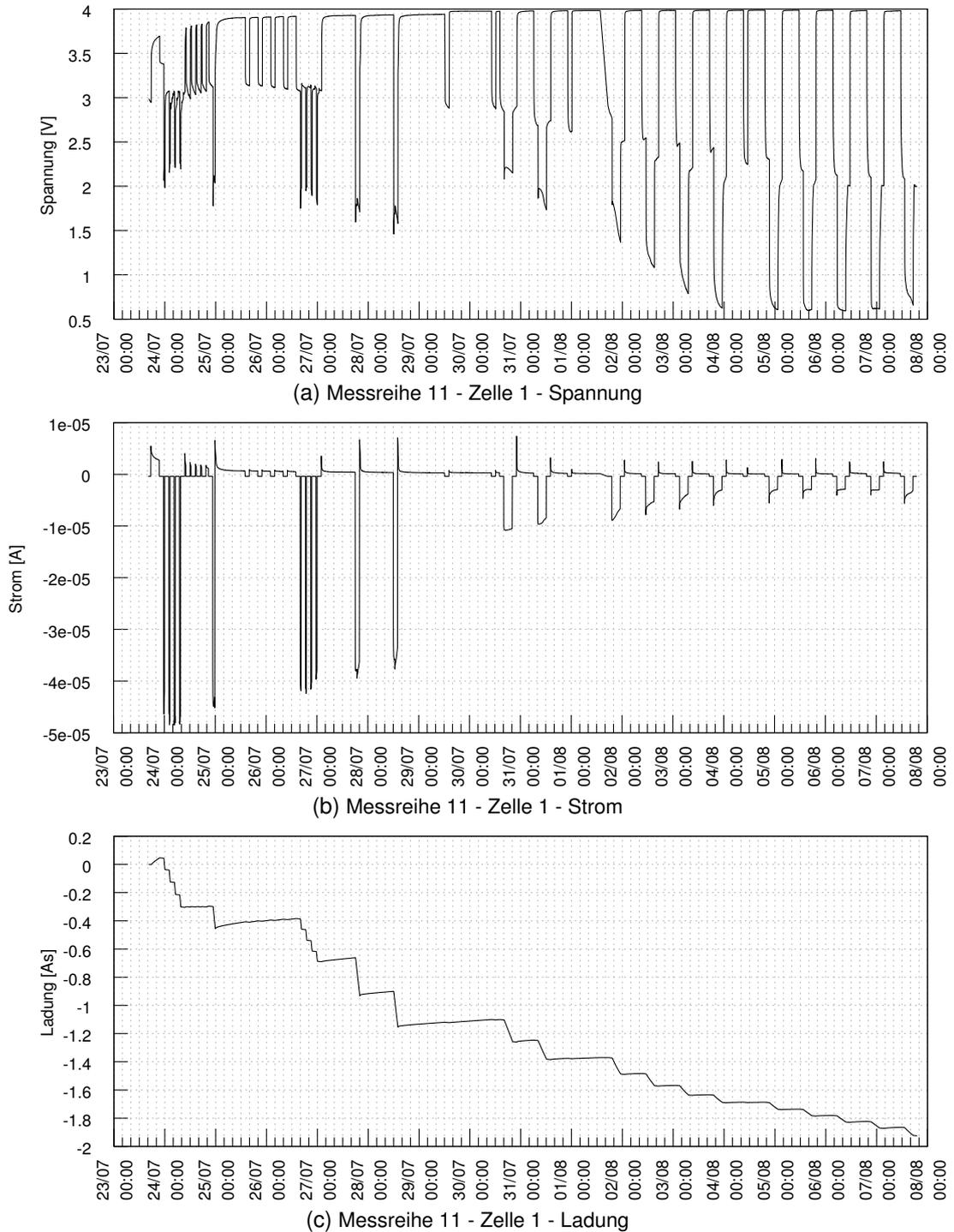


Abbildung D.23.: Messreihe 11 - Zelle 1 - Elektrische Messwerte

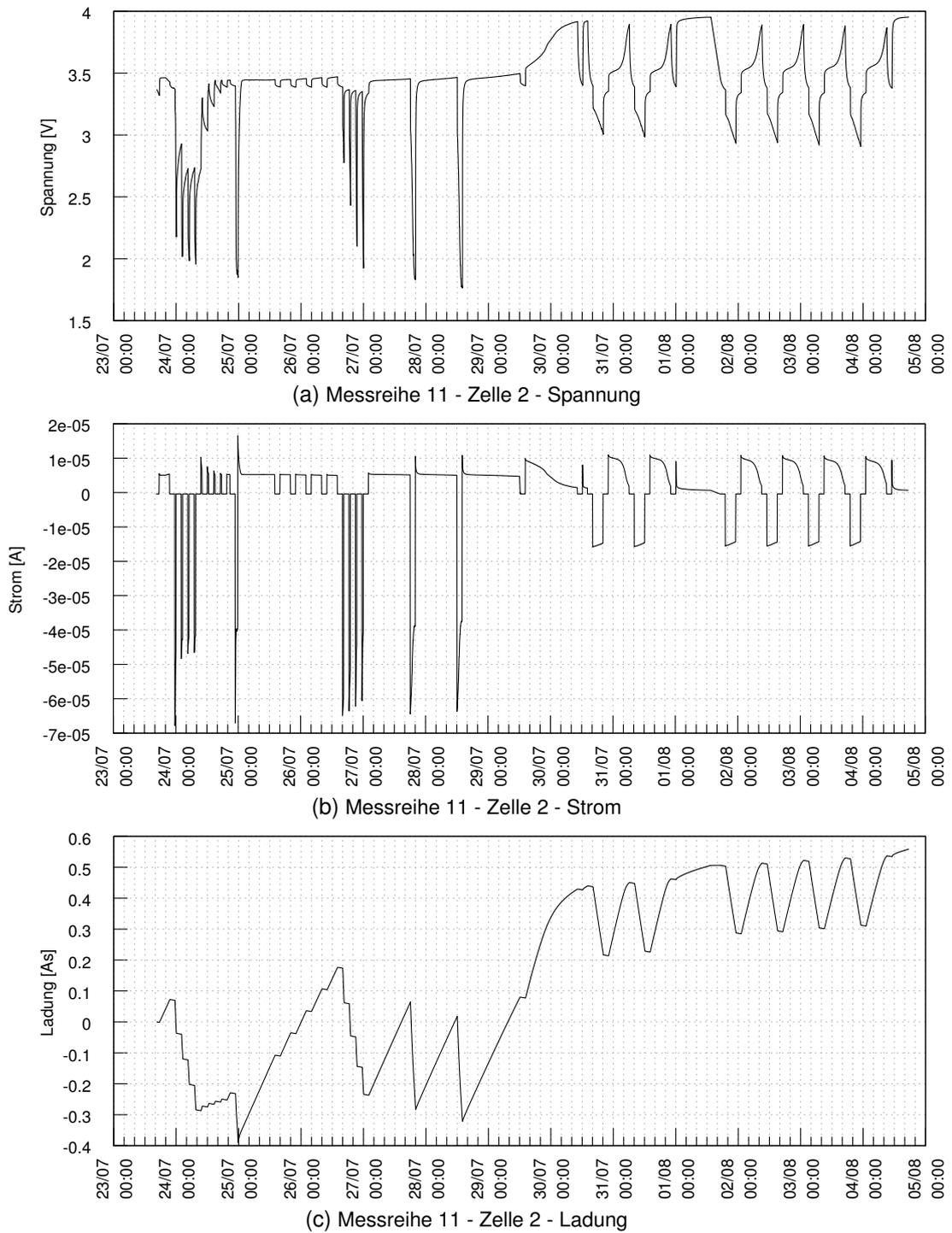
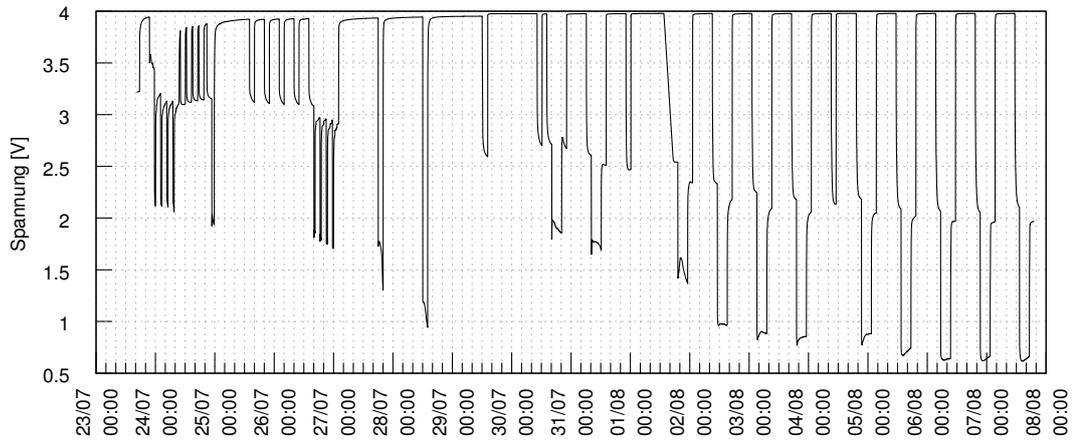
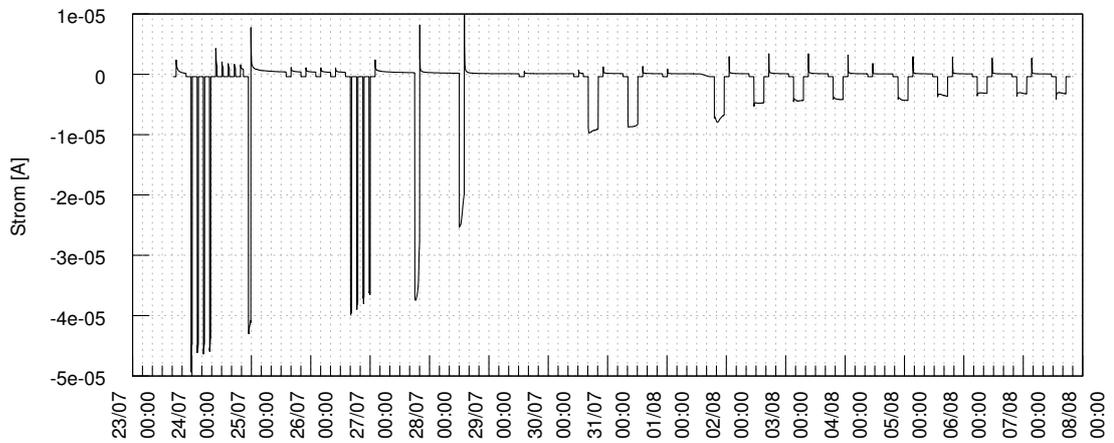


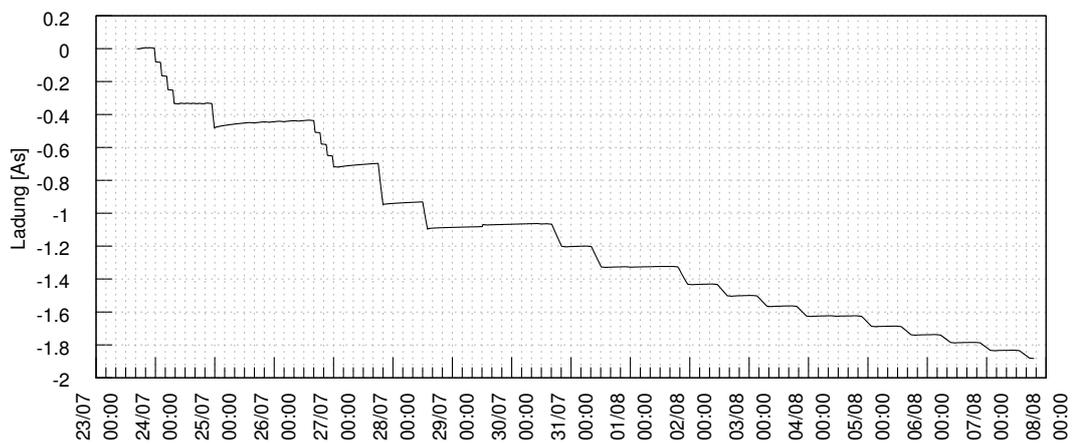
Abbildung D.24.: Messreihe 11 - Zelle 2 - Elektrische Messwerte



(a) Messreihe 11 - Zelle 3 - Spannung



(b) Messreihe 11 - Zelle 3 - Strom



(c) Messreihe 11 - Zelle 3 - Ladung

Abbildung D.25.: Messreihe 11 - Zelle 3 - Elektrische Messwerte

D.2. Intensitätsverläufe (ohne Kompensationsrechnung)

Tabelle D.5.: Mess- und Referenzflächen für Zelle 3

Messreihe	Part	Messfläche				Referenzfläche			
		X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.	X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.
7	1	1720	180	620	350	0	0	350	1900
	2	1660	150	620	350	0	0	350	1900
	3	1700	170	620	350	0	0	350	1900
	4	1600	140	620	350	0	0	350	1900
	5	1680	90	620	350	0	0	350	1900
8	1	220	460	510	580	1280	0	1300	1700
	1b	400	360	510	580	1280	0	1300	1700
	2	200	350	510	580	1180	0	1400	1700
	2b	200	300	510	580	1180	0	1400	1700
9	1	770	430	870	520	2190	0	400	1700
	2	300	260	520	870	1580	0	1000	1700
	2b	280	320	520	870	1580	0	1000	1700
10	1	1170	770	660	970	0	0	200	1900
	2	1020	320	660	970	2390	0	200	1900
	3	1370	710	660	970	0	0	200	1900
11	1	700	650	1630	900	0	1640	300	300
	2	800	710	1630	900	0	1640	300	300
	3	760	490	1630	900	0	1640	300	300
	4	570	490	1630	900	0	1640	300	300

Tabelle D.6.: Mess- und Referenzflächen für Zelle 1

Messreihe	Part	Messfläche				Referenzfläche			
		X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.	X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.
2	1	2270	810	1200	560	150	150	600	700
	2	1260	790	1200	560	3430	2310	600	700
	3	1110	850	1200	560	3430	2310	600	700
3	1	2800	1360	620	320	610	350	600	700
	1b	2850	1840	350	640	610	350	600	700
4	1	590	1100	1200	660	3020	2010	600	700
	1b	860	1010	1200	660	3090	2290	600	700
5	1	570	70	490	490	3430	2260	600	700
	2	240	140	420	420	3430	1990	600	700
6	1	700	1700	800	800	3200	1300	330	330
	2	600	300	650	450	2000	860	330	330
7	1	1220	200	650	530	0	1700	370	240
	2	1100	210	650	570	0	1700	370	240
	3	1060	250	710	520	0	1700	370	240
	4	1040	220	700	540	0	1700	370	240
	5	950	200	700	540	0	1700	370	240
	6	1590	160	830	540	0	0	900	1900
	7	1640	110	780	500	0	0	900	1900
	8	1640	300	800	500	0	0	900	1900
	9	1540	160	800	500	0	0	900	1900
8	1	1600	360	820	460	0	0	900	1900
	2	1615	400	820	460	0	0	900	1900
	3	1810	800	480	620	0	0	900	1900
9	1	1050	480	840	500	2300	1180	290	760
	2	260	620	500	840	1180	0	1400	1700
	3	300	490	500	800	1180	0	1400	1700
10	1	650	560	1350	990	0	1560	470	380
	2	930	330	1350	990	0	1230	700	700
	3	820	350	1350	990	0	1330	600	600
11	1	590	200	1500	1500	2340	5	250	250
	2	550	10	1400	1400	0	0	250	250
	3	620	90	1500	1500	0	0	250	250
	4	640	320	1400	1400	0	0	250	250

Tabelle D.7.: Mess- und Referenzflächen für Zelle 2

Messreihe	Part	Messfläche				Referenzfläche			
		X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.	X Pos.	Y Pos.	X Gr.	Y Gr.
2	1	1600	1350	540	920	3430	800	600	700
	2	1160	1340	540	920	3430	800	600	700
	3	1710	1390	540	920	3430	800	600	700
3	1	2100	390	1200	900	470	2400	700	600
	1b	640	510	1200	900	3340	1430	600	700
4	1	1450	250	1060	400	3410	2300	600	700
	1b	680	945	1060	400	3410	2300	600	700
5	1	2400	950	900	900	0	0	600	700
	2	2300	700	900	900	0	0	600	700
6	1	2650	200	750	400	880	2530	490	490
	2	1680	80	525	290	280	1450	490	490
7	1	1510	330	330	680	0	0	200	1000
	2	1540	370	370	560	50	0	200	1000
	3	1520	260	350	460	0	0	200	1000
	4	1500	230	350	470	0	0	200	1000
	5	1440	320	350	470	0	0	120	1000
	6	270	270	700	470	1690	0	900	1900
	7	560	390	700	470	1690	0	900	1900
	8	520	290	700	470	1690	0	900	1900
	9	520	300	700	470	1690	0	900	1900
8	1	1440	310	820	460	0	0	1000	1900
	2	1570	240	820	460	0	0	1000	1900
	3	1440	690	820	460	0	0	1000	1900
9	1	1200	690	860	480	0	0	480	1900
	2	600	280	480	860	1690	0	900	1700
	2b	540	330	480	860	1690	0	900	1700
	3	550	360	480	860	1690	0	900	1700
10	1	660	170	1290	1470	2390	0	200	1900
	2	610	10	1290	1470	2390	0	200	1900
	3	380	330	1470	1290	2390	0	200	1900
11	1	580	210	1440	890	0	630	180	490
	2	610	30	1440	890	0	515	180	490
	3	400	400	1440	890	2290	860	180	490

D.2.1. Messreihe 2

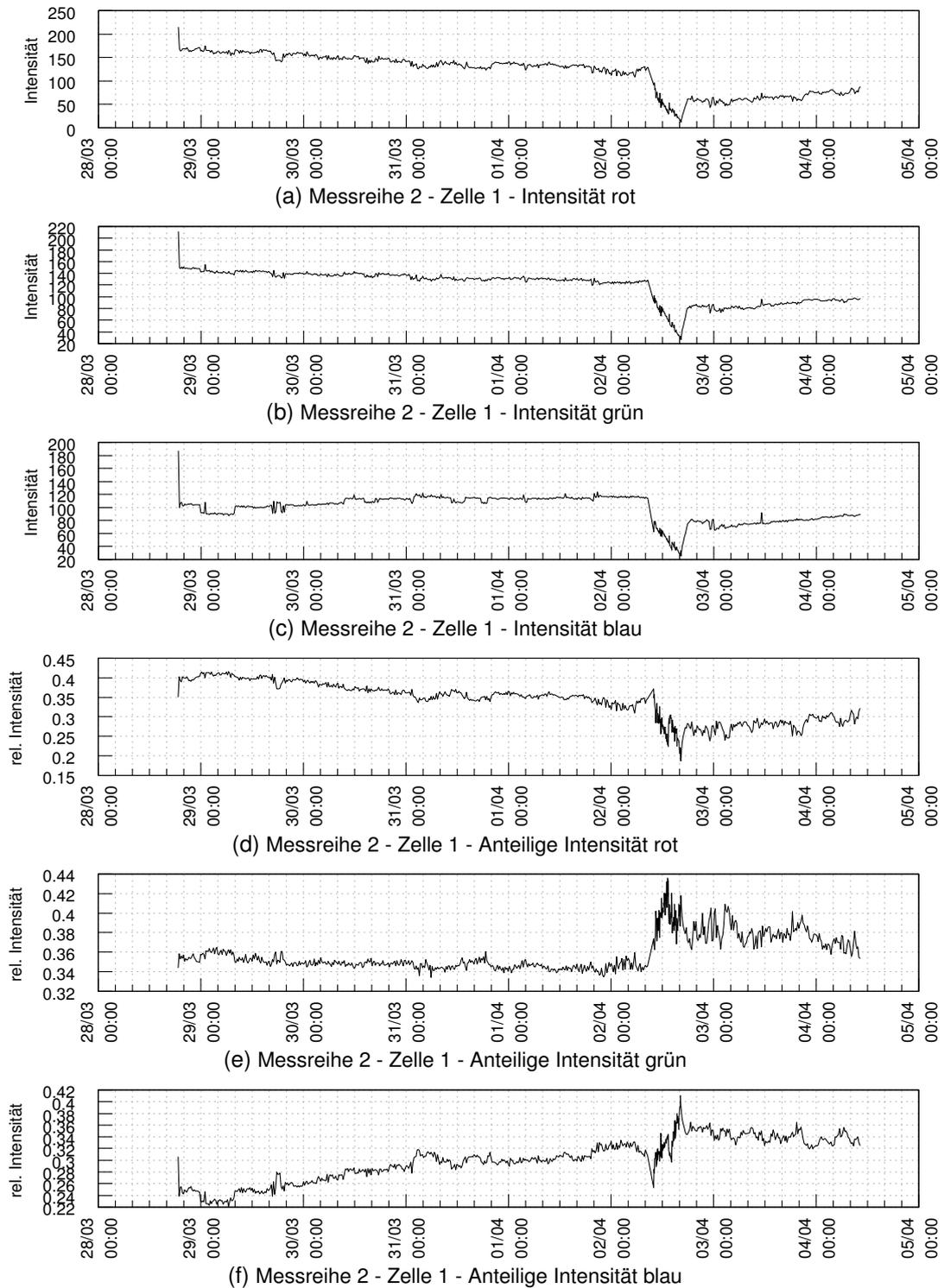


Abbildung D.26.: Messreihe 2 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

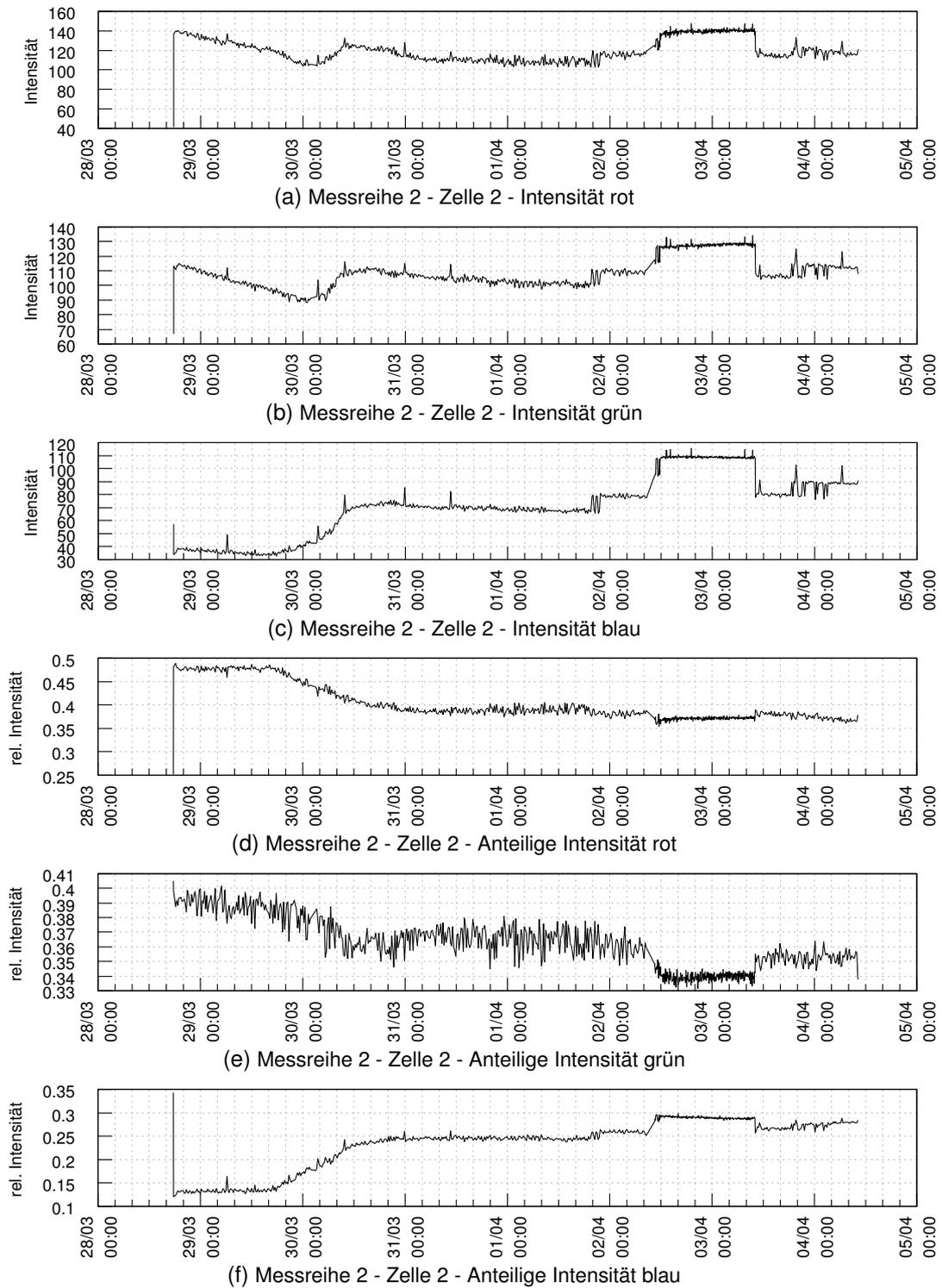


Abbildung D.27.: Messreihe 2 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

D.2.2. Messreihe 3

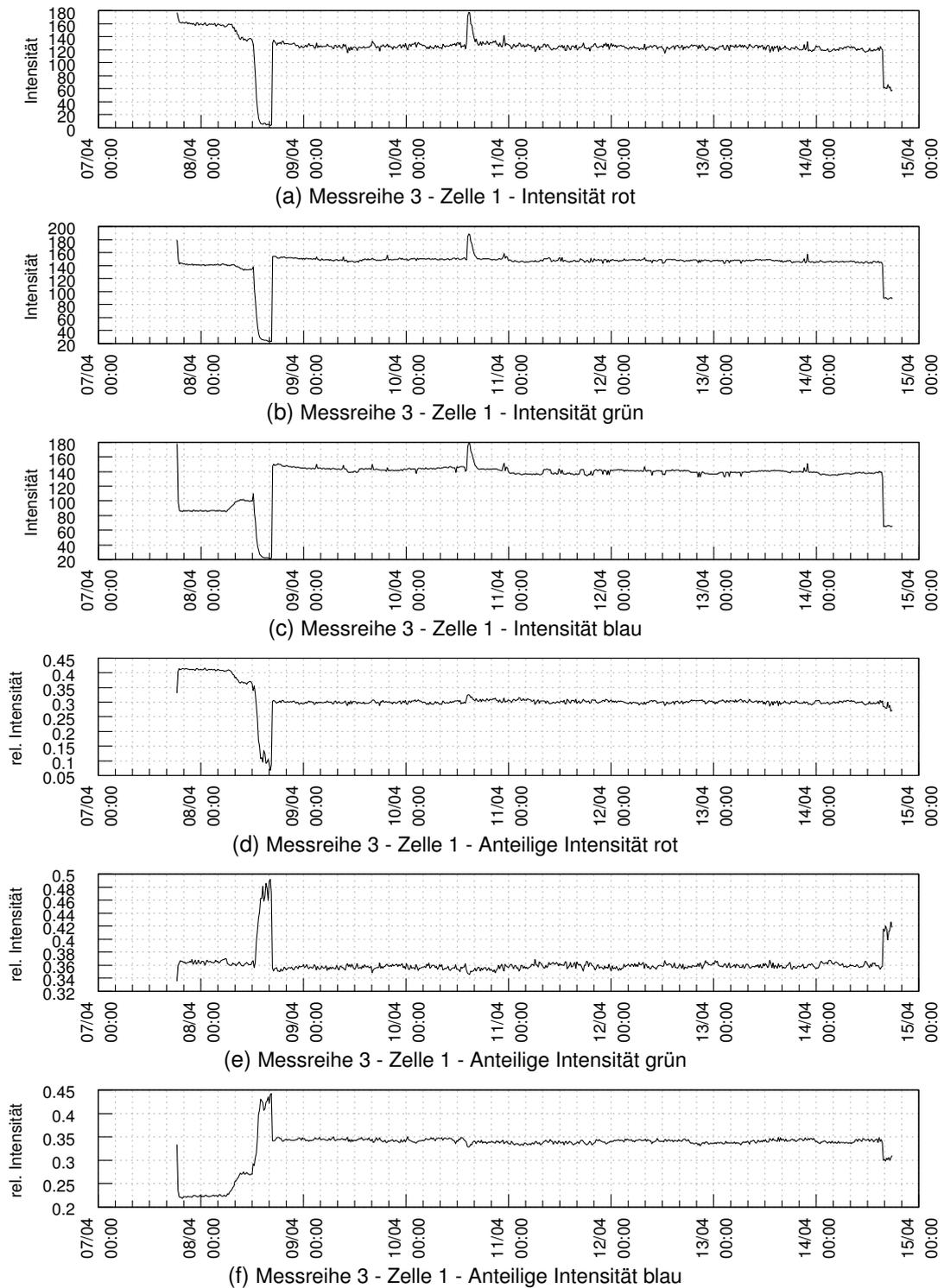


Abbildung D.28.: Messreihe 3 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

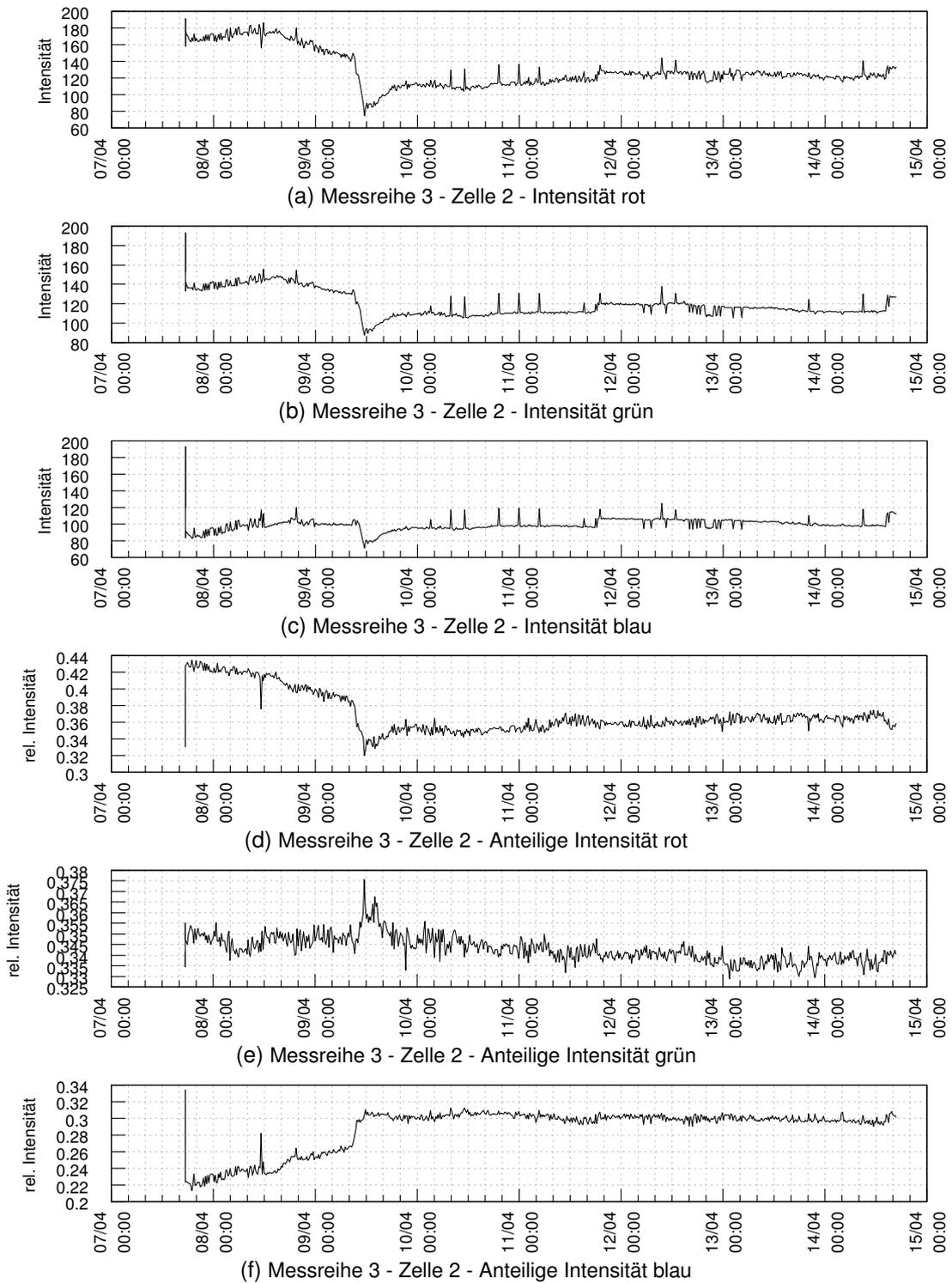


Abbildung D.29.: Messreihe 3 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

D.2.3. Messreihe 4

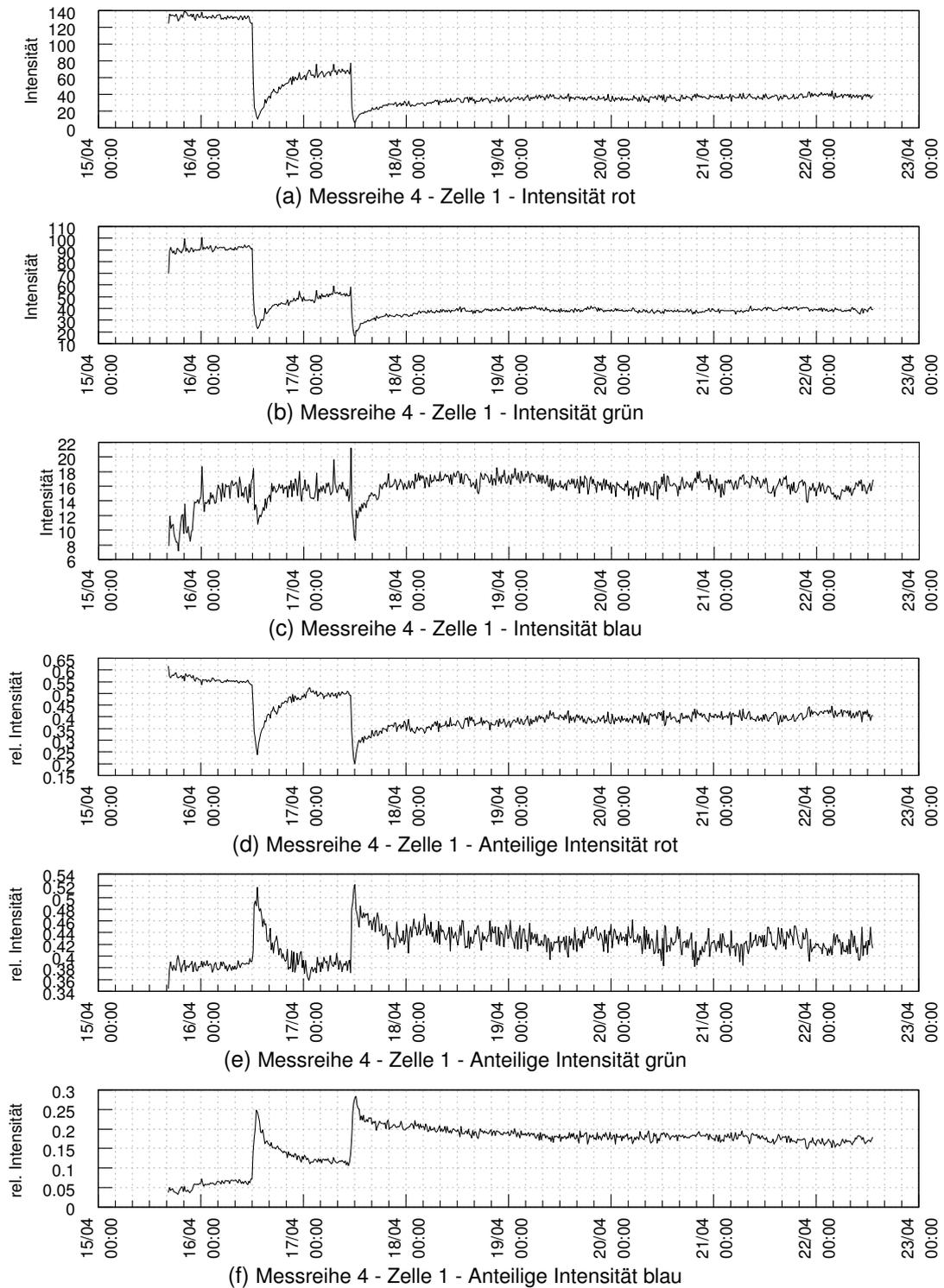


Abbildung D.30.: Messreihe 4 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

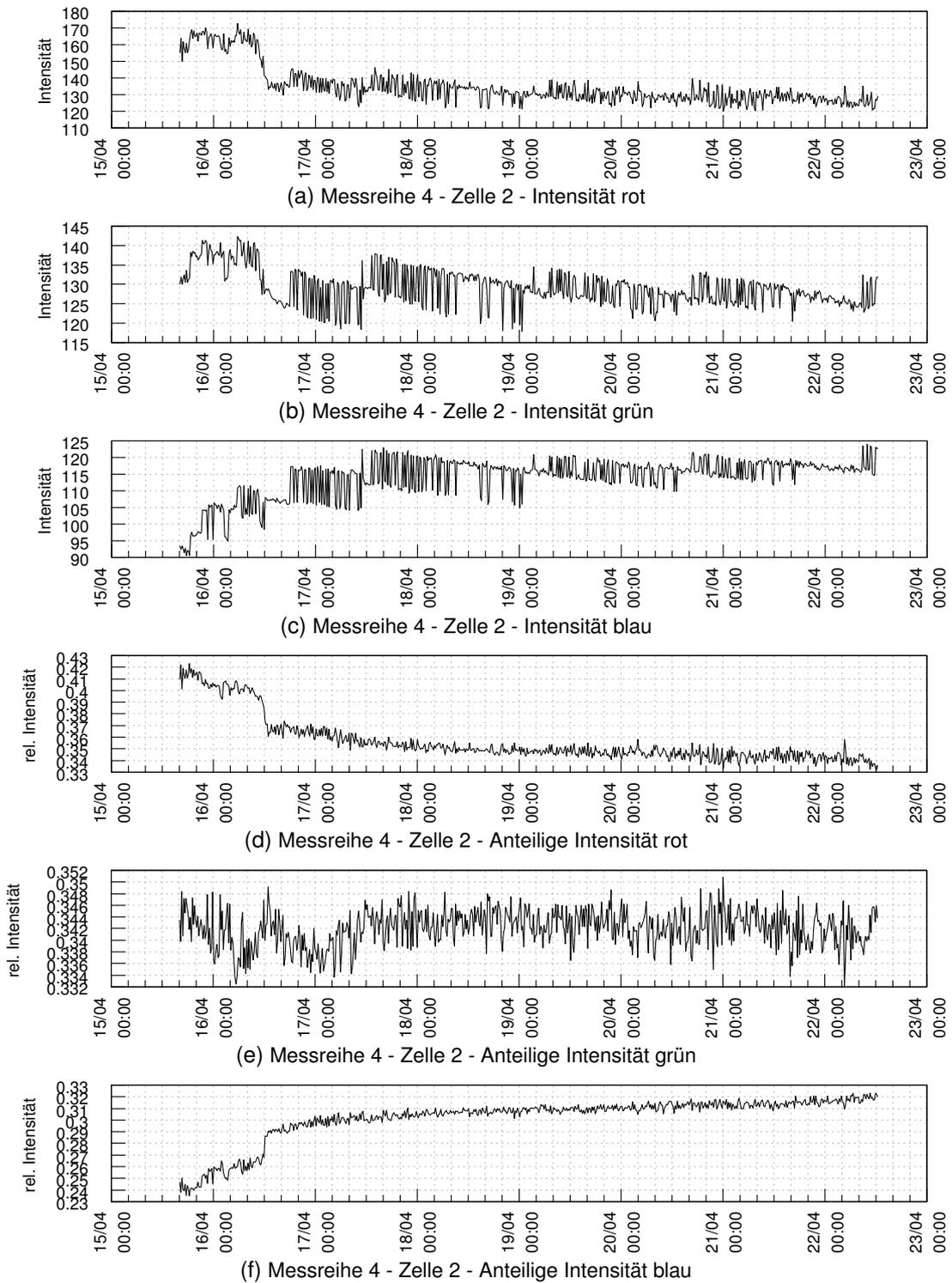


Abbildung D.31.: Messreihe 4 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

D.2.4. Messreihe 5

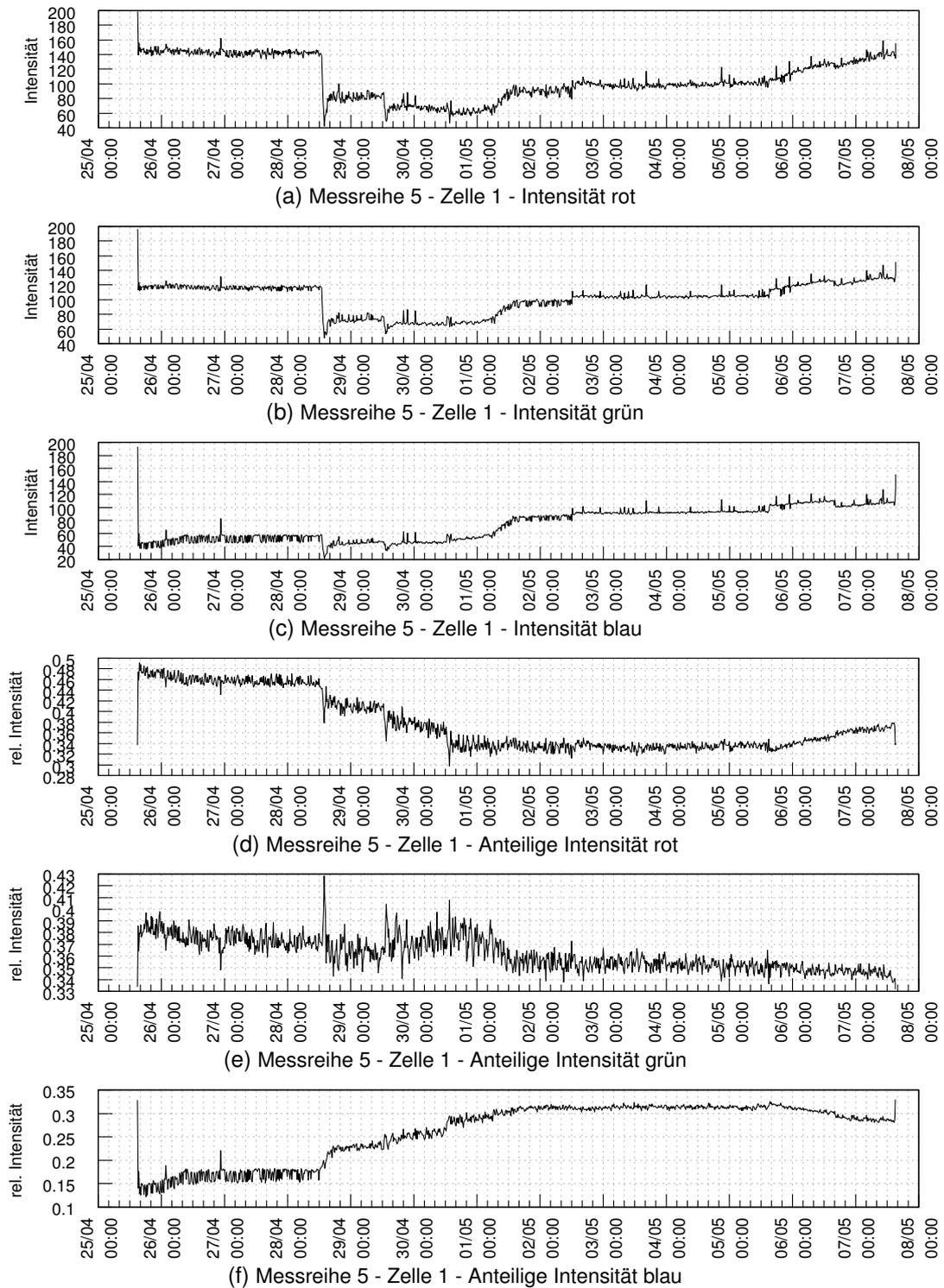


Abbildung D.32.: Messreihe 5 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

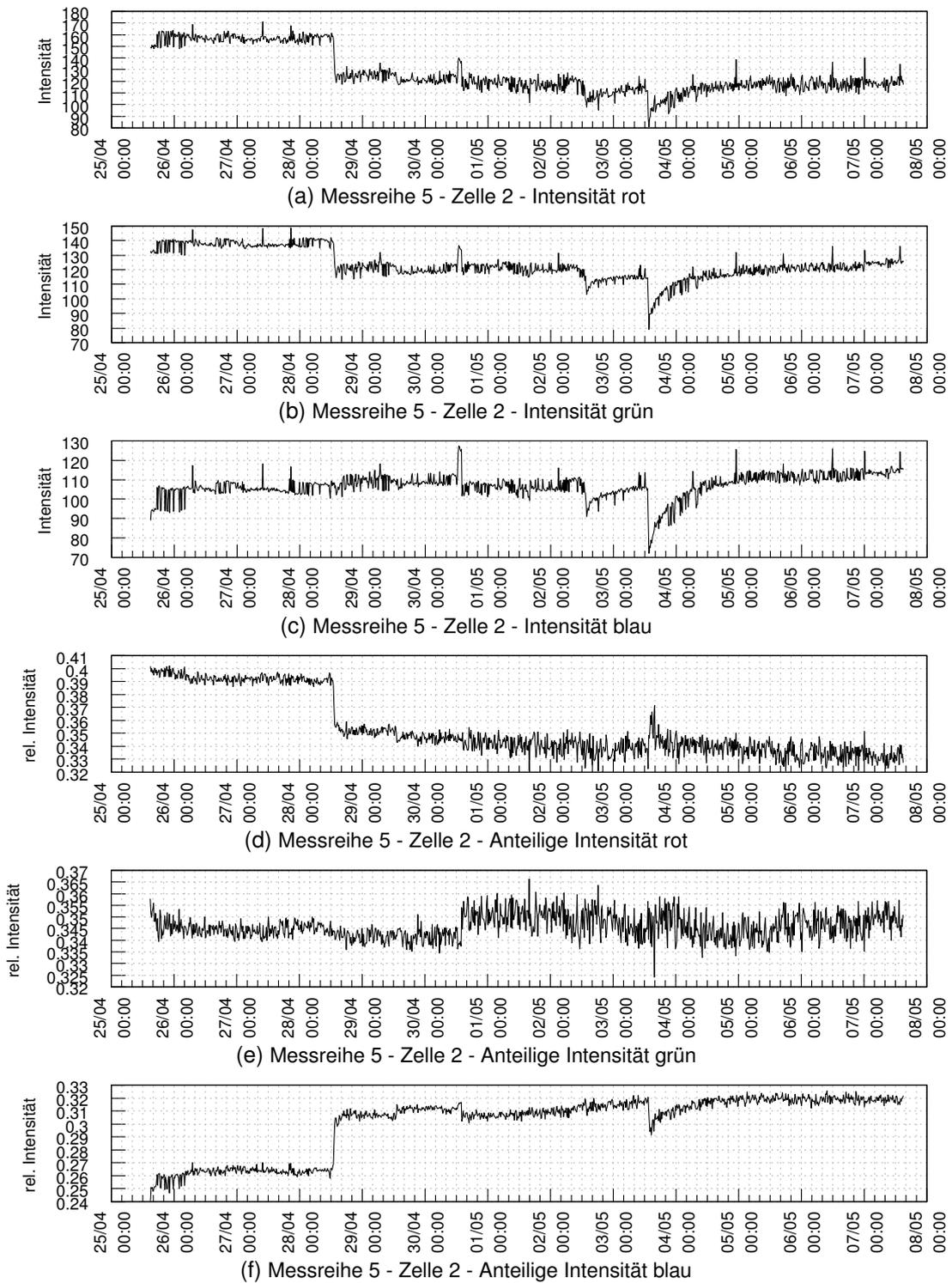


Abbildung D.33.: Messreihe 5 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

D.2.5. Messreihe 6

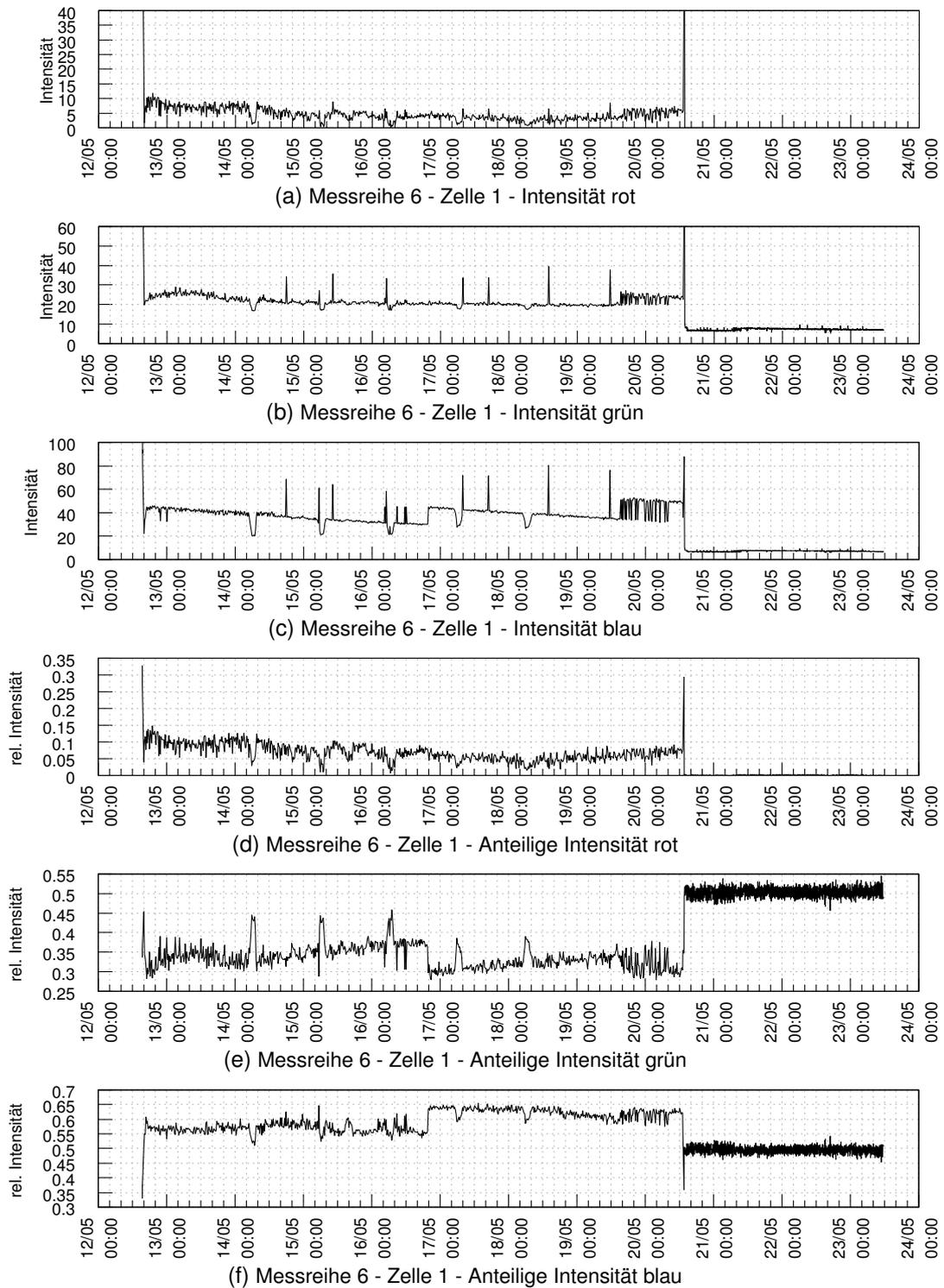


Abbildung D.34.: Messreihe 6 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

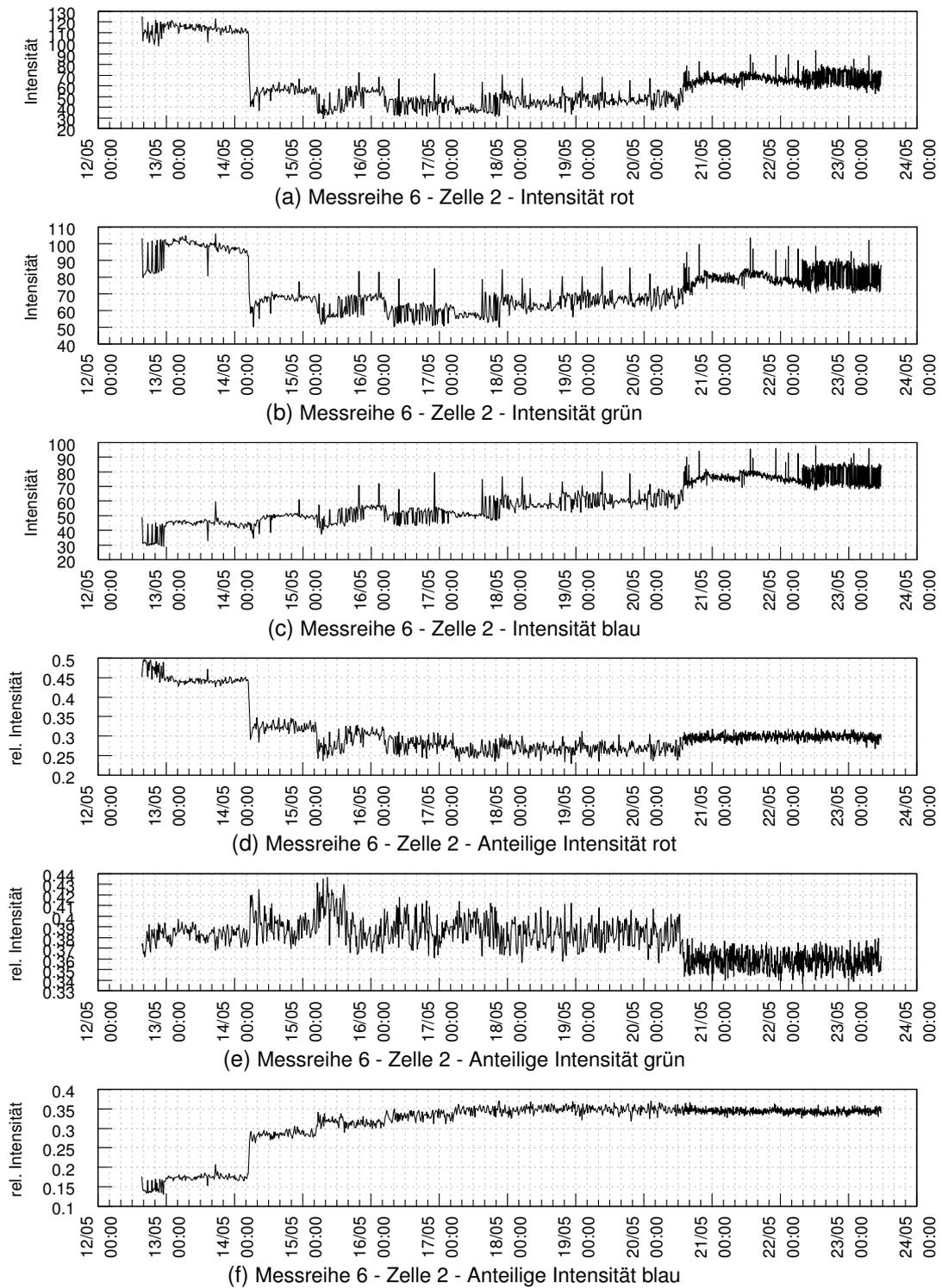


Abbildung D.35.: Messreihe 6 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

D.2.6. Messreihe 7

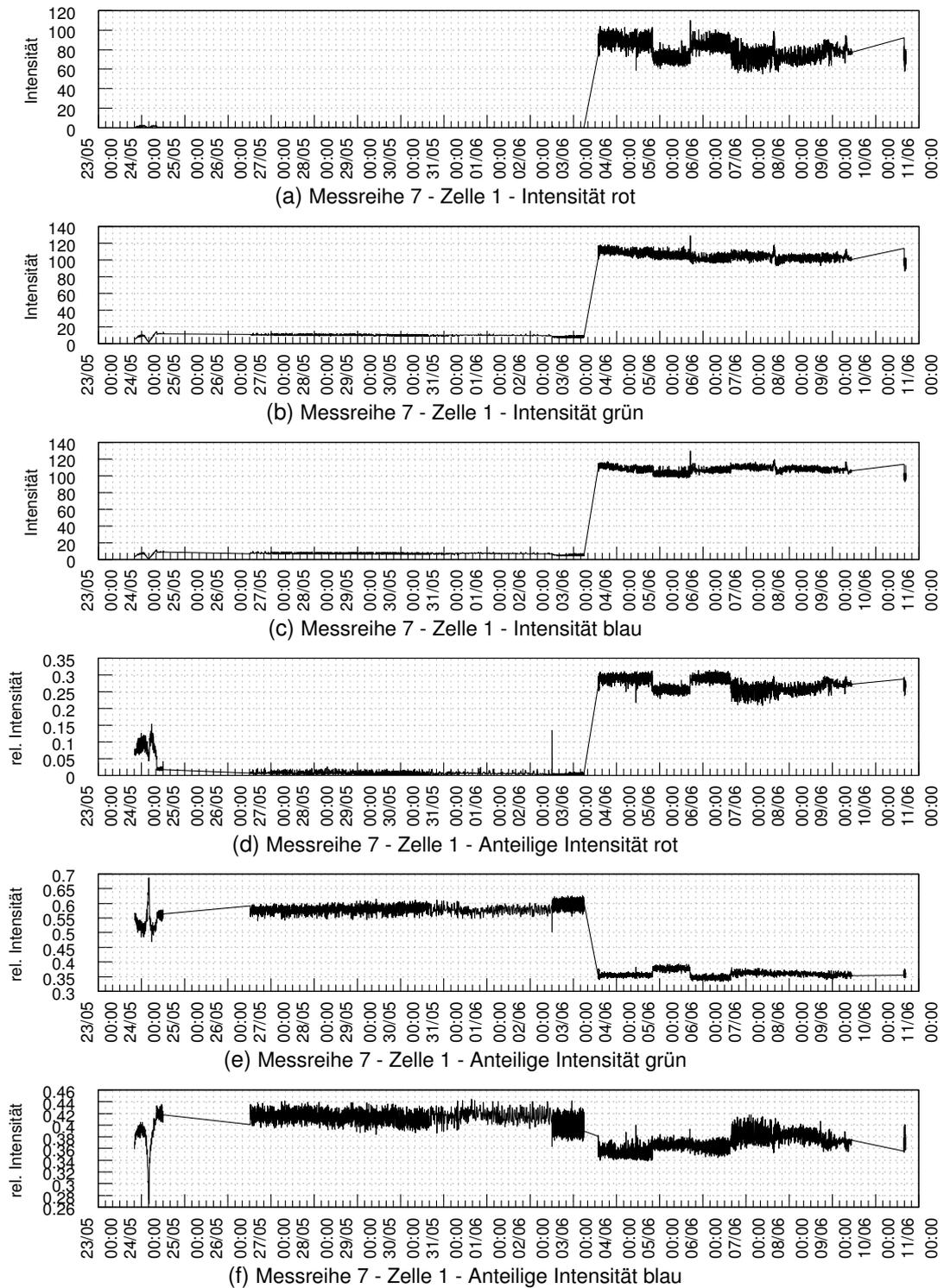


Abbildung D.36.: Messreihe 7 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

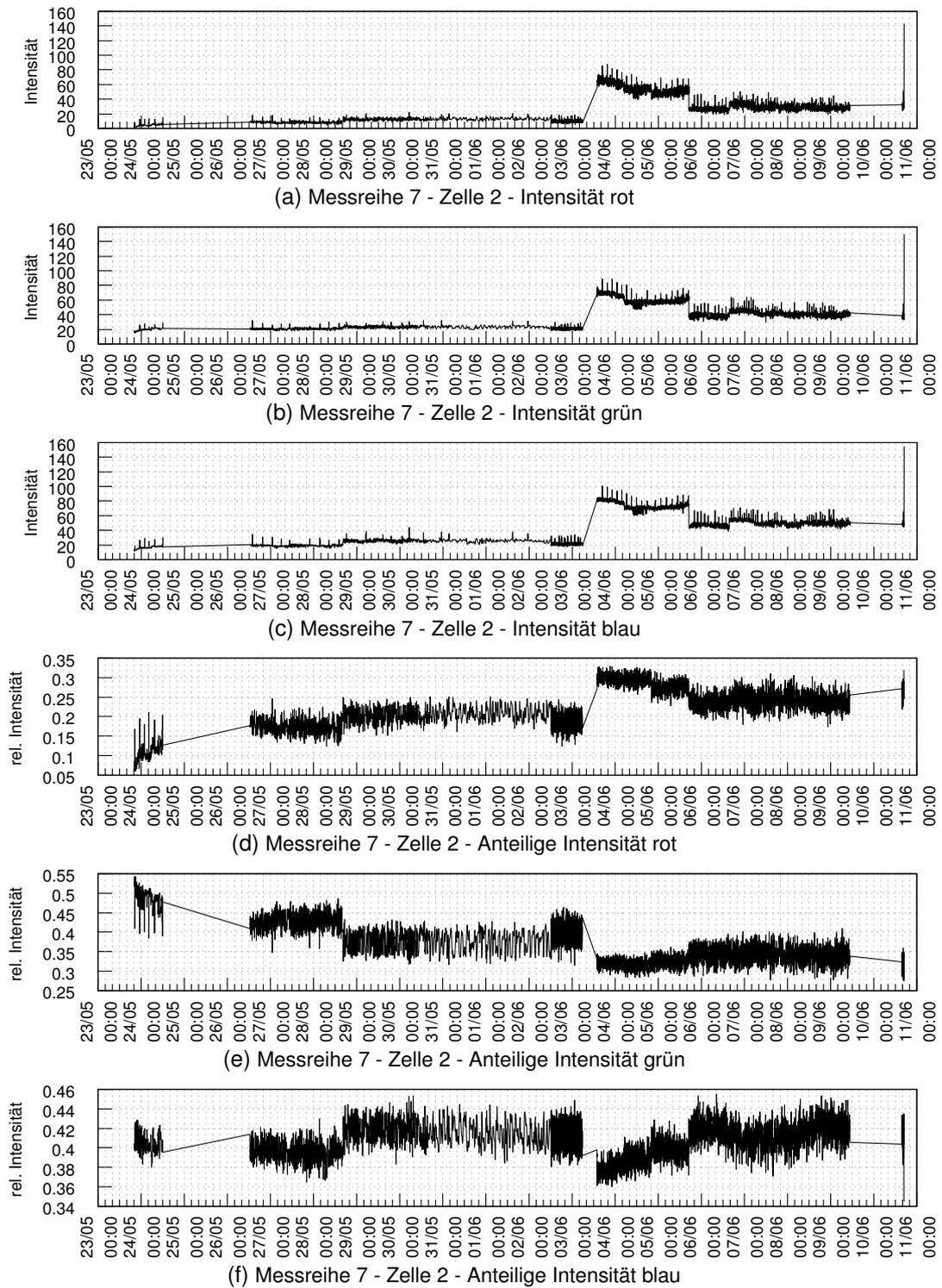


Abbildung D.37.: Messreihe 7 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

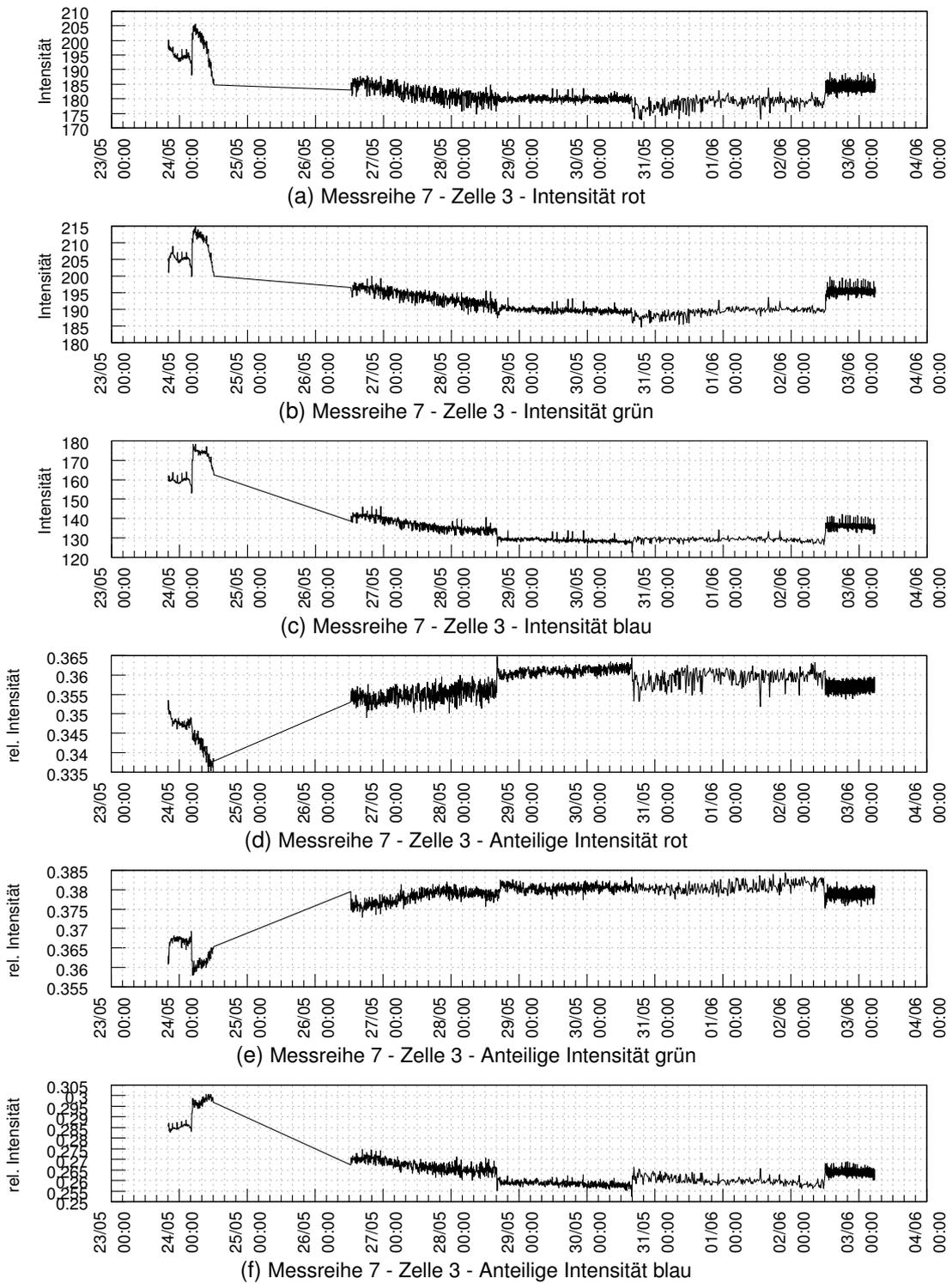


Abbildung D.38.: Messreihe 7 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe

D.2.7. Messreihe 8

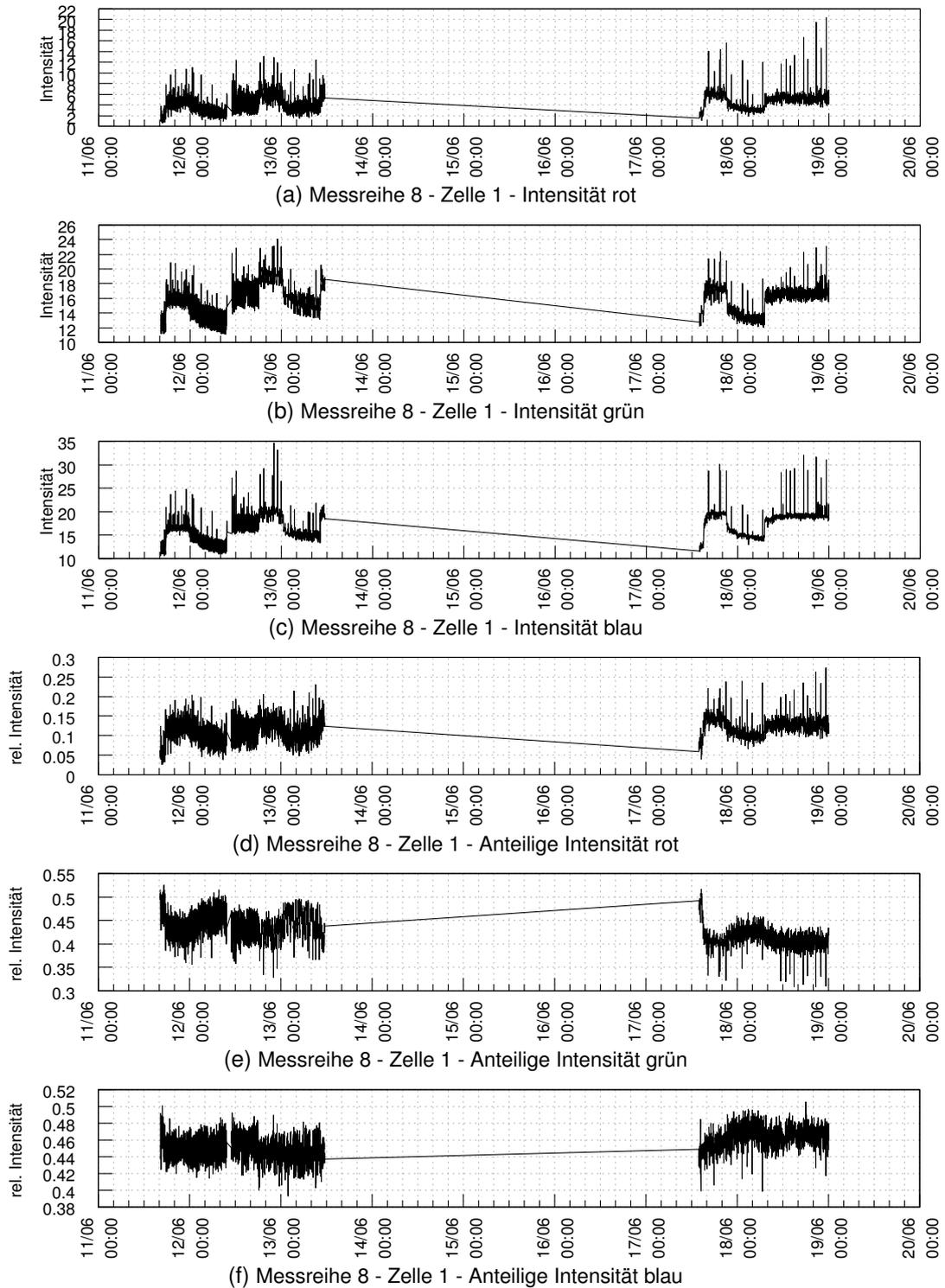


Abbildung D.39.: Messreihe 8 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

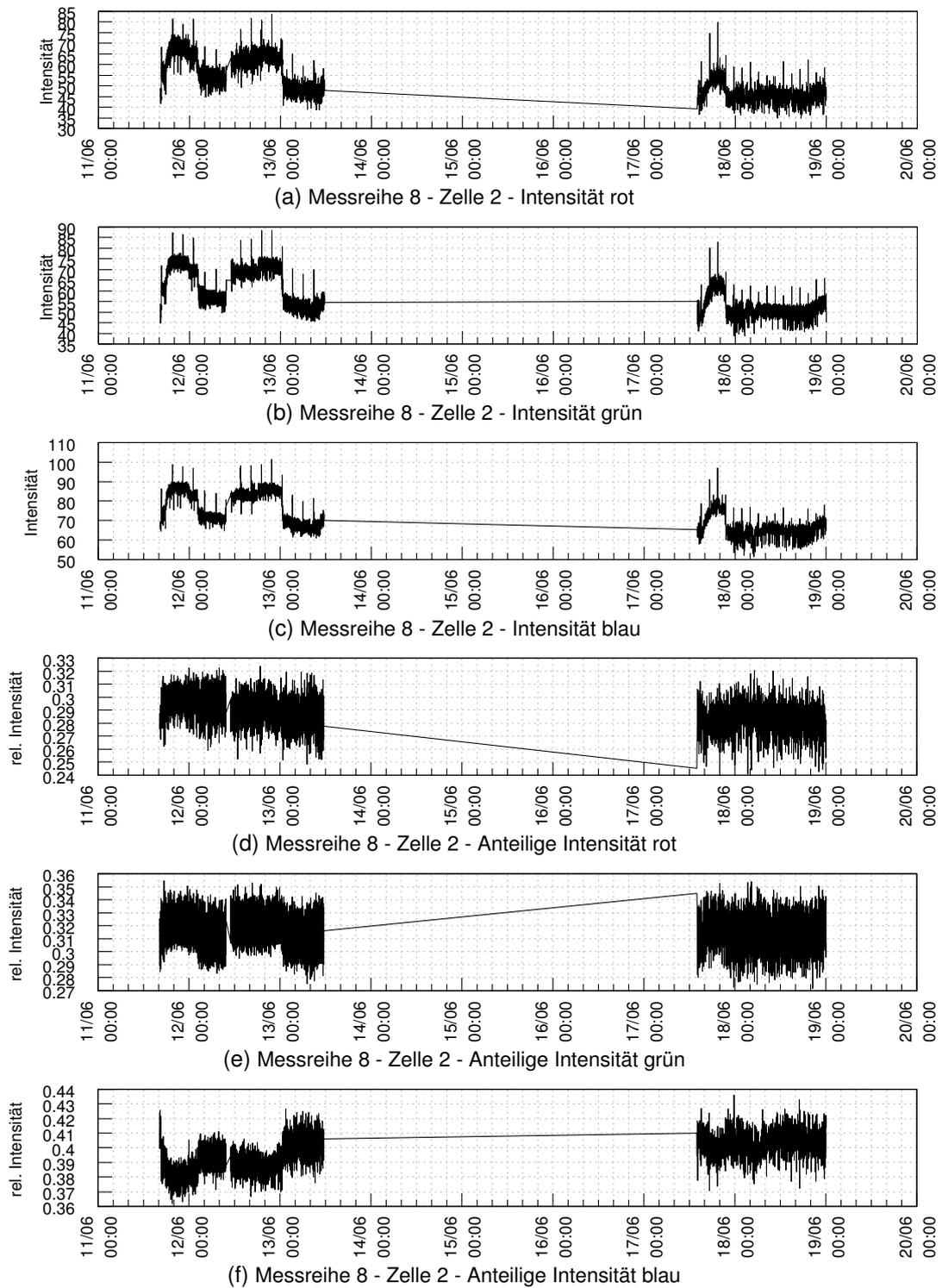


Abbildung D.40.: Messreihe 8 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

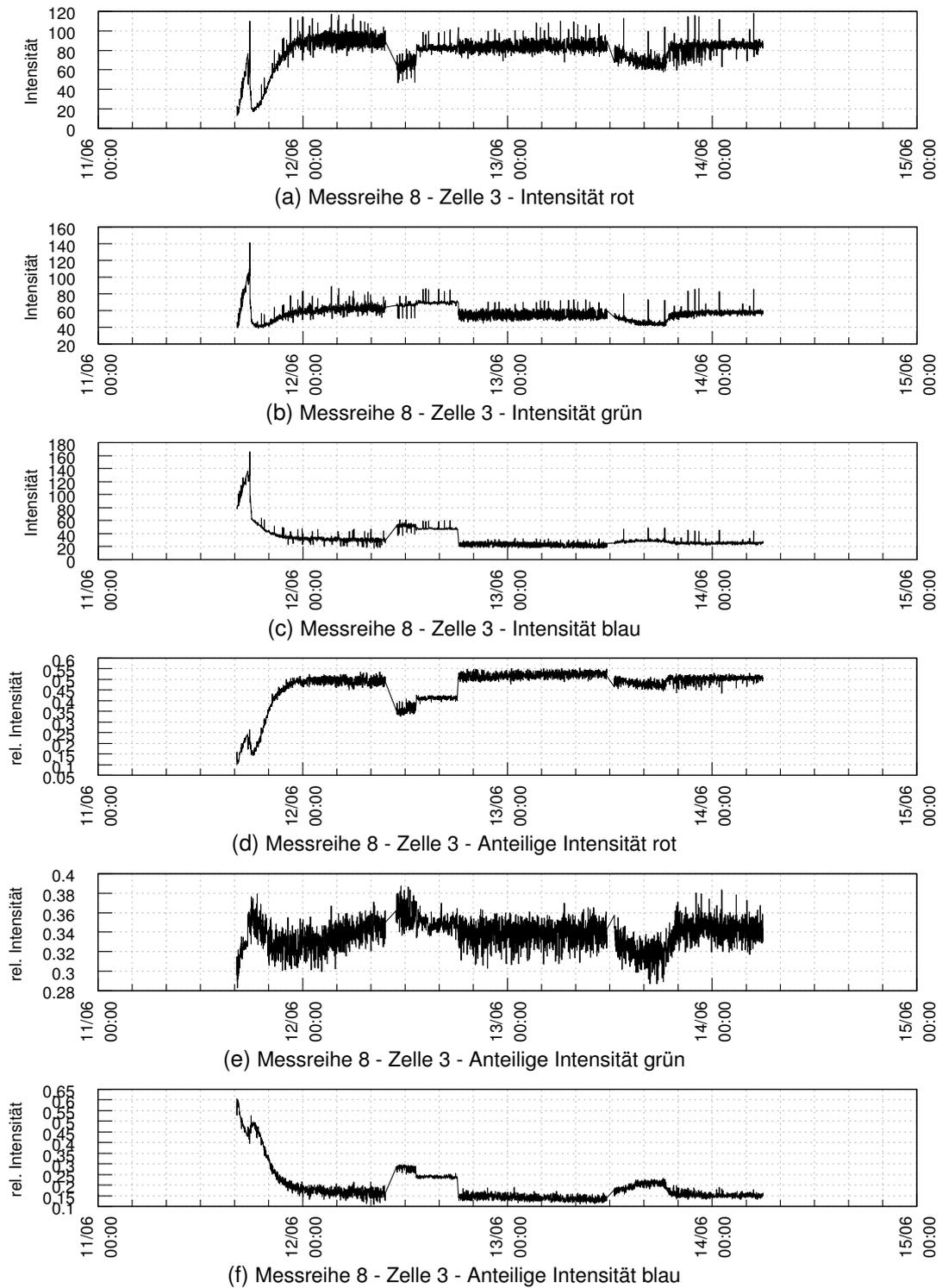
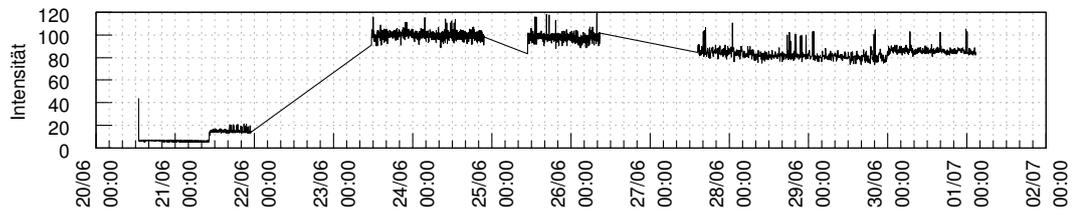
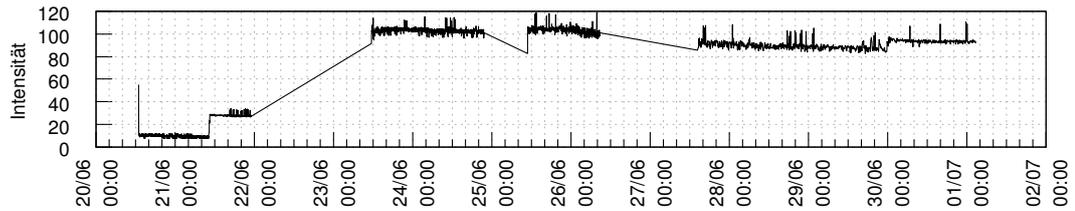


Abbildung D.41.: Messreihe 8 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe

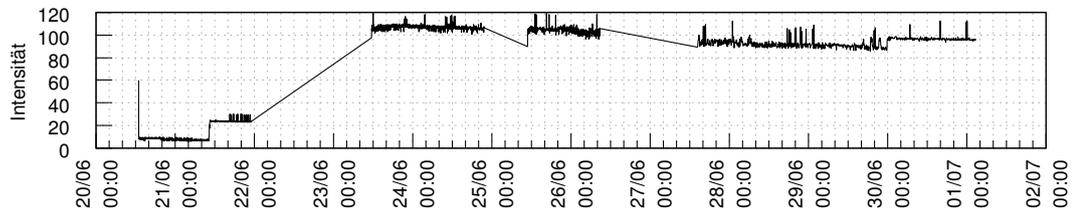
D.2.8. Messreihe 9



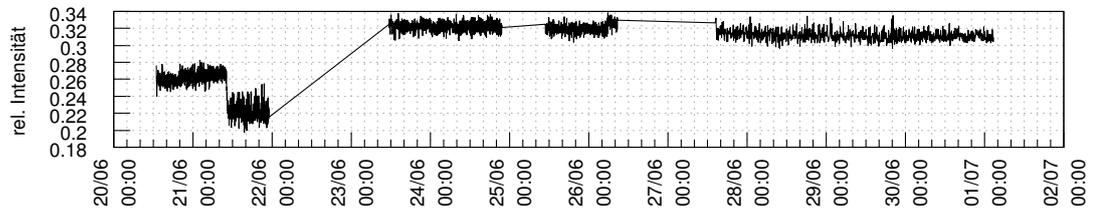
(a) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität rot



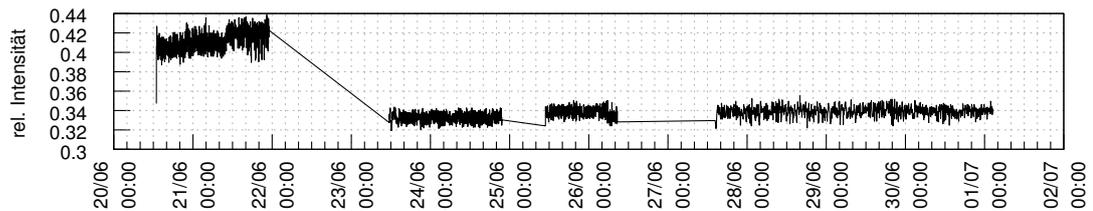
(b) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität grün



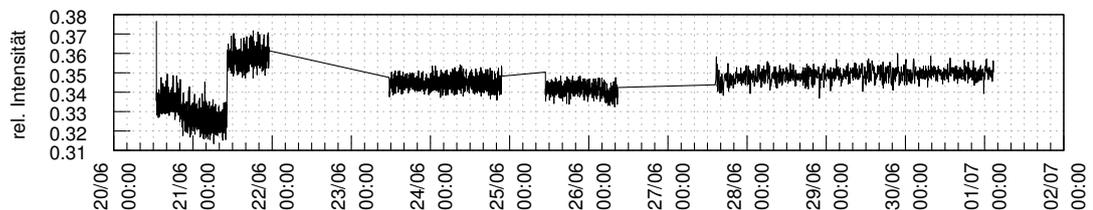
(c) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität blau



(d) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität rot



(e) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität grün



(f) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität blau

Abbildung D.42.: Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

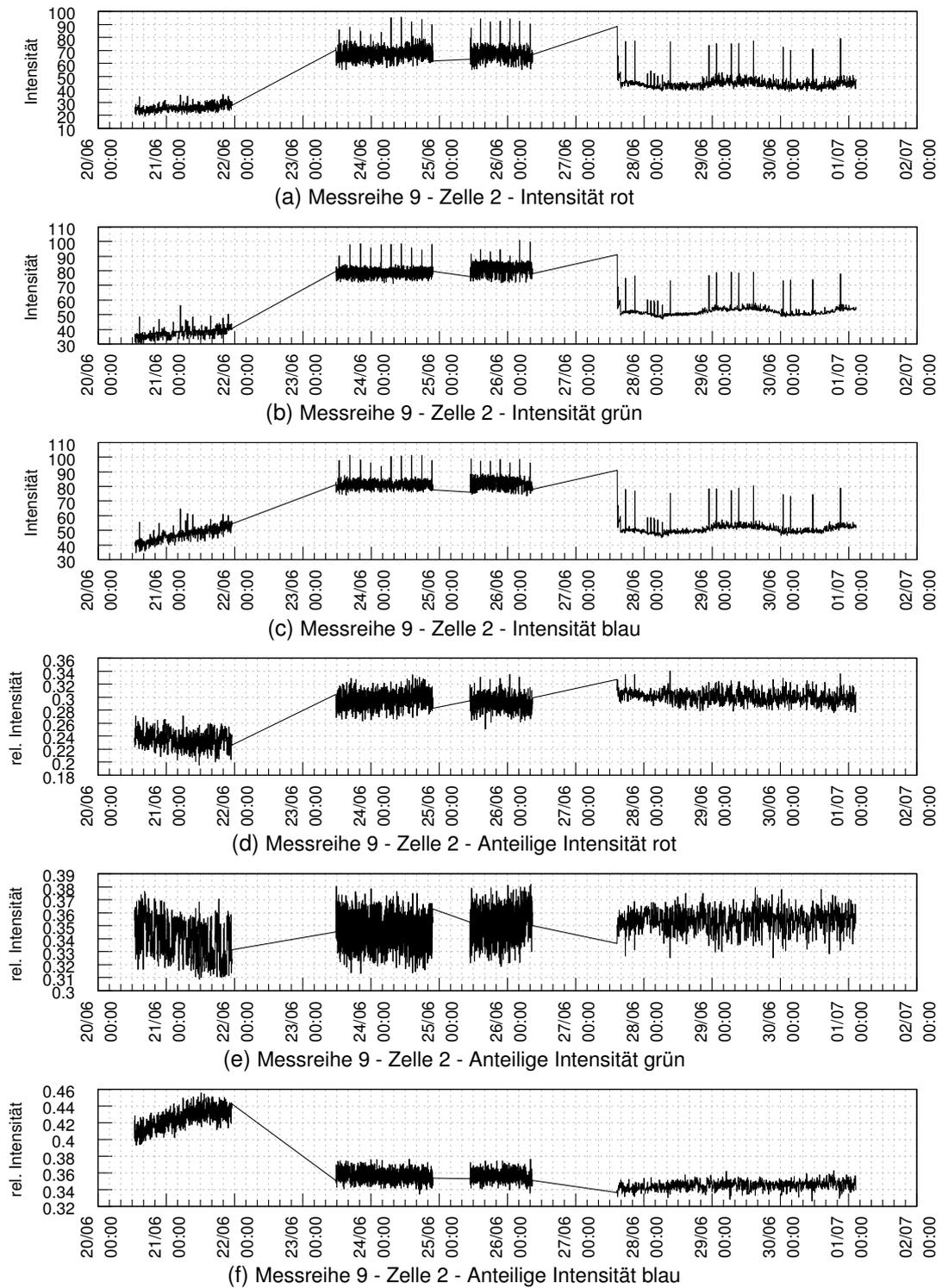


Abbildung D.43.: Messreihe 9 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

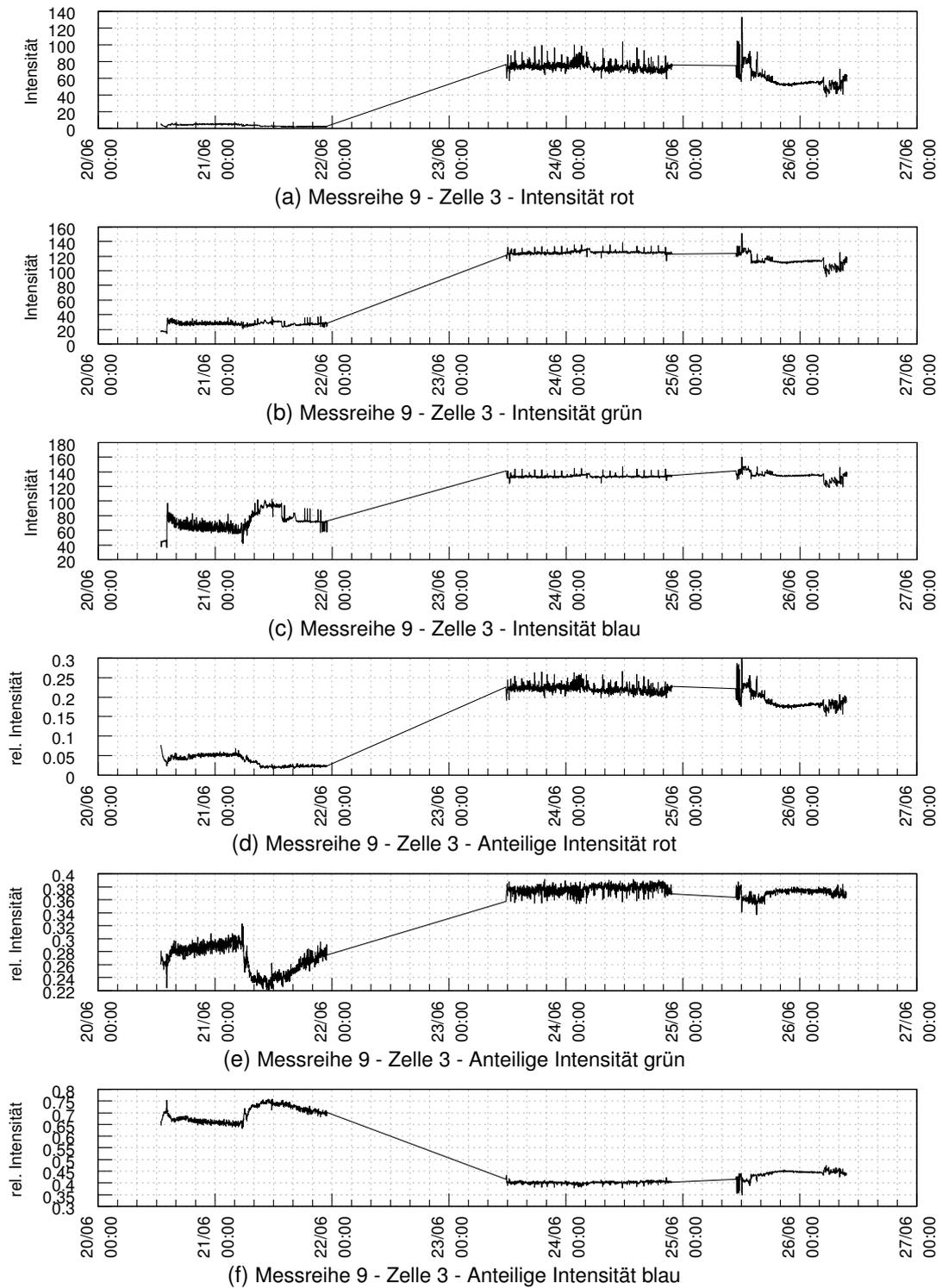


Abbildung D.44.: Messreihe 9 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe

D.2.9. Messreihe 10

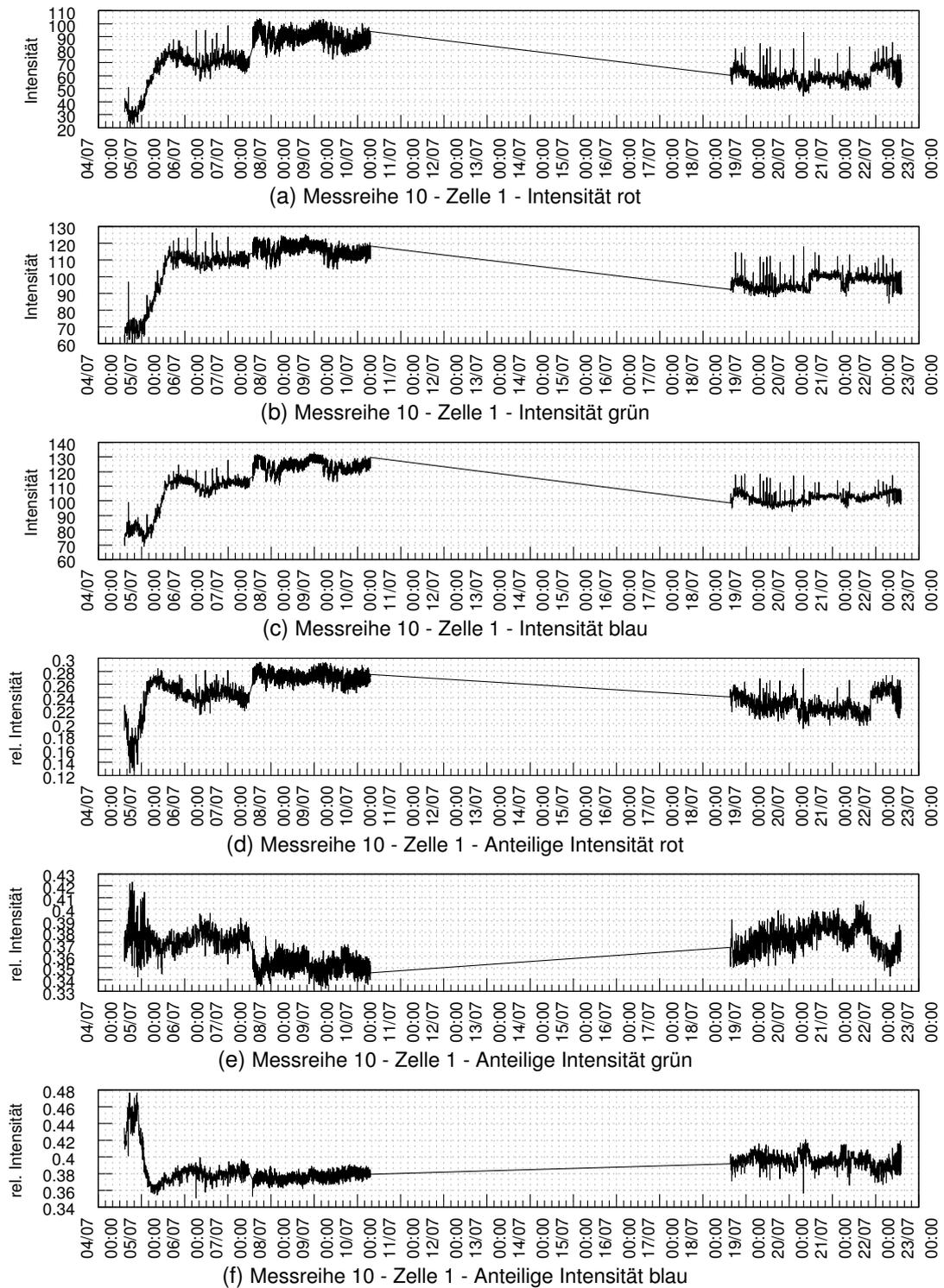


Abbildung D.45.: Messreihe 10 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

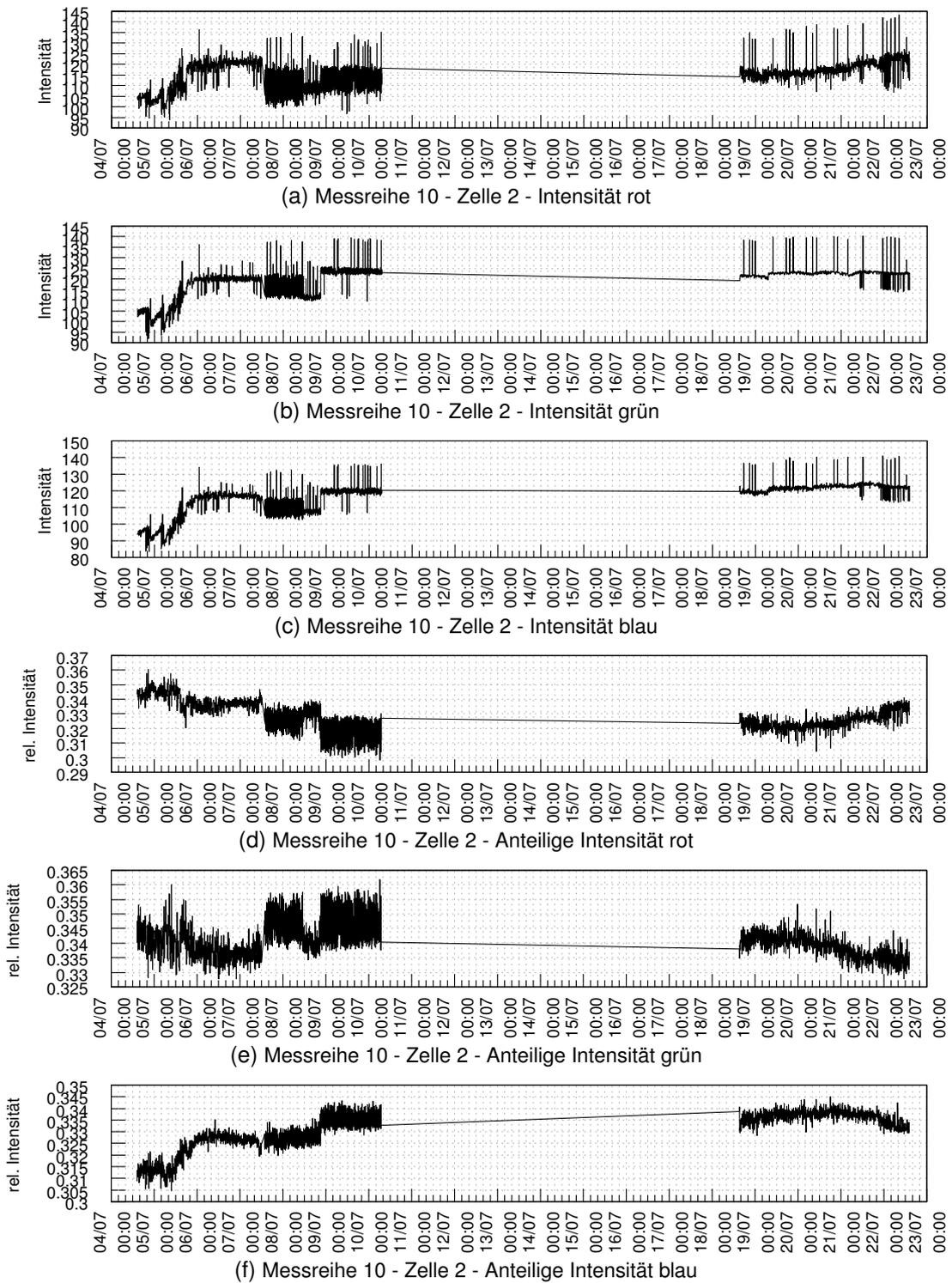


Abbildung D.46.: Messreihe 10 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

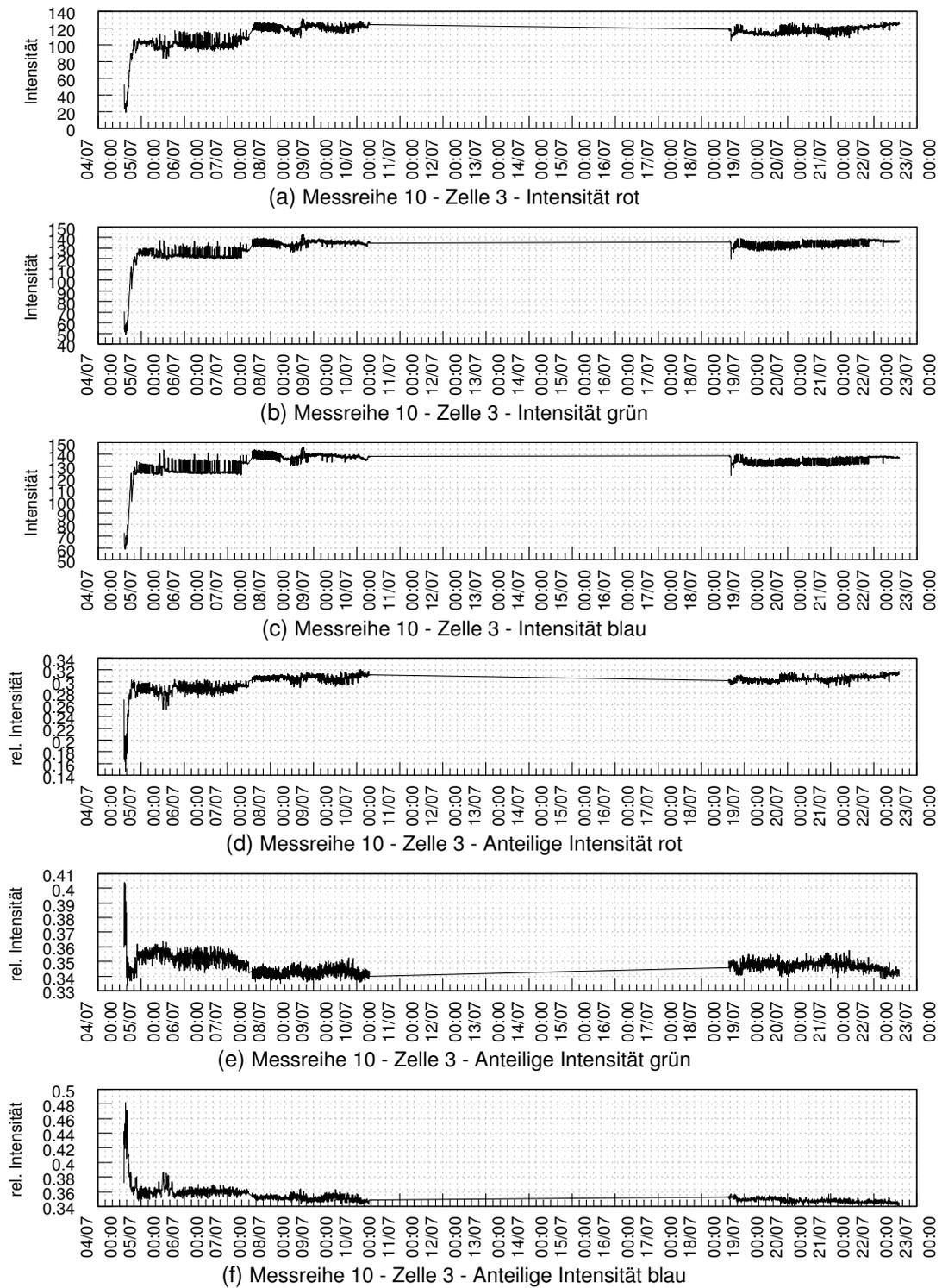


Abbildung D.47.: Messreihe 10 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe

D.2.10. Messreihe 11

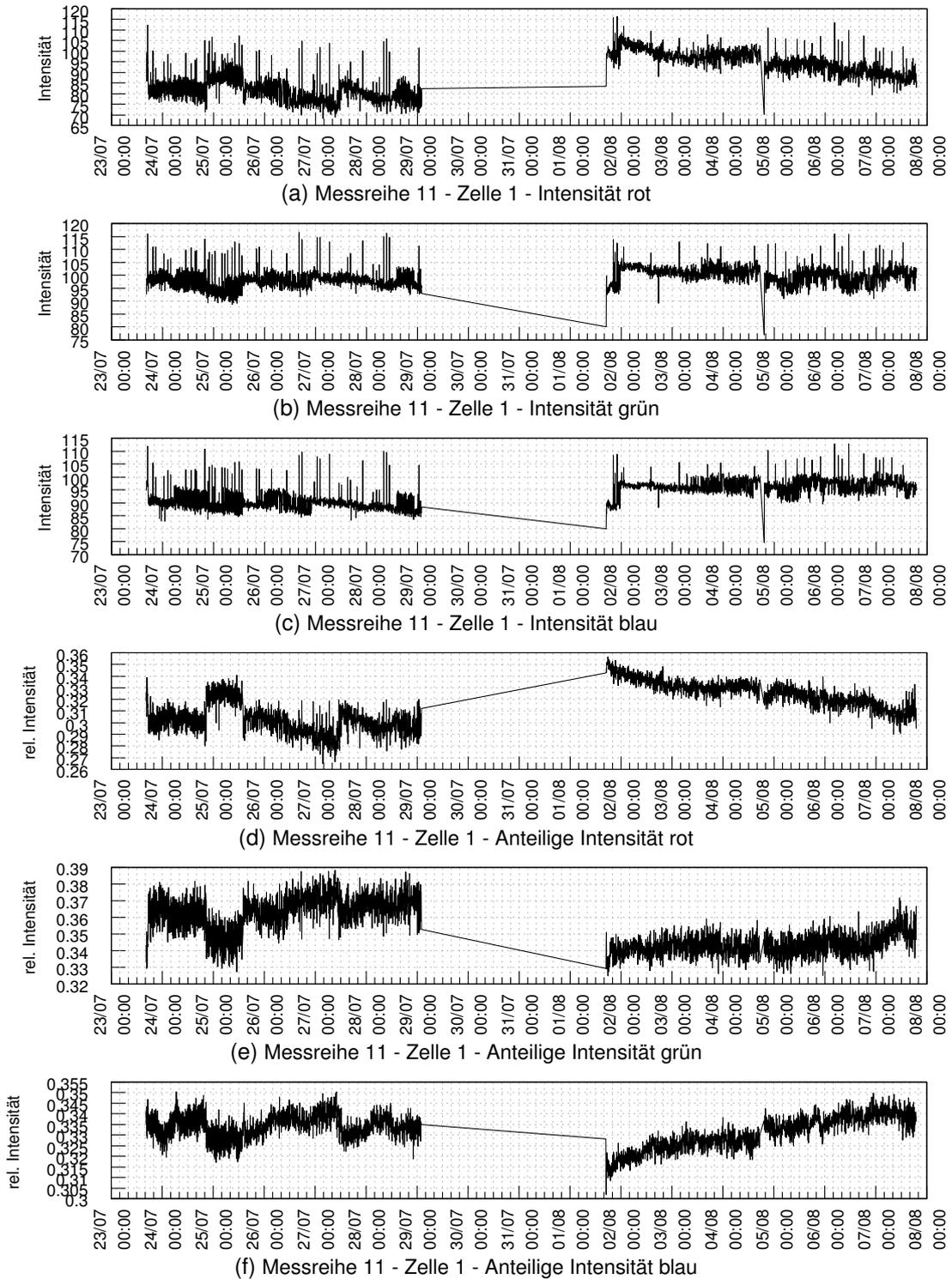


Abbildung D.48.: Messreihe 11 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe

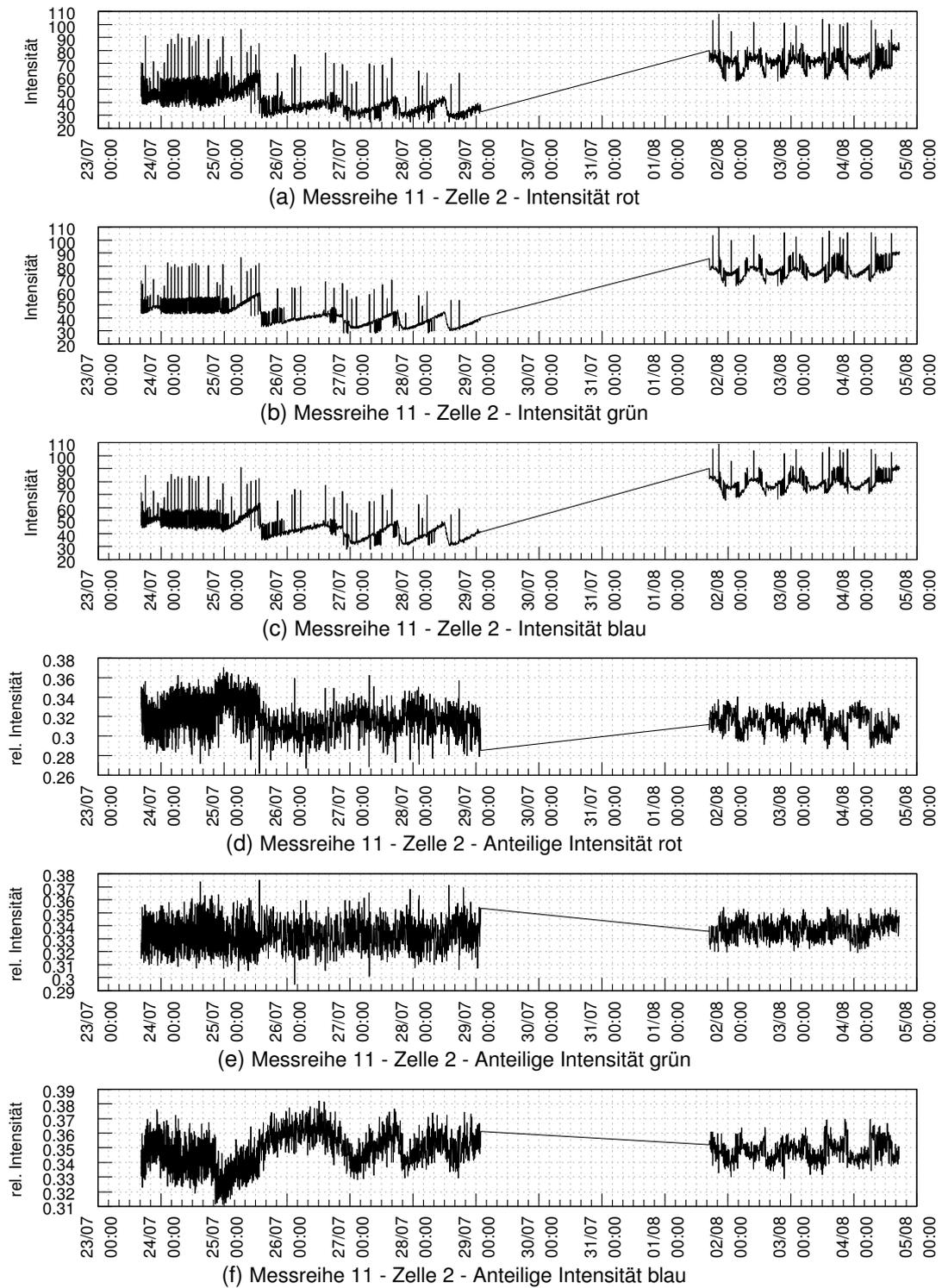


Abbildung D.49.: Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe

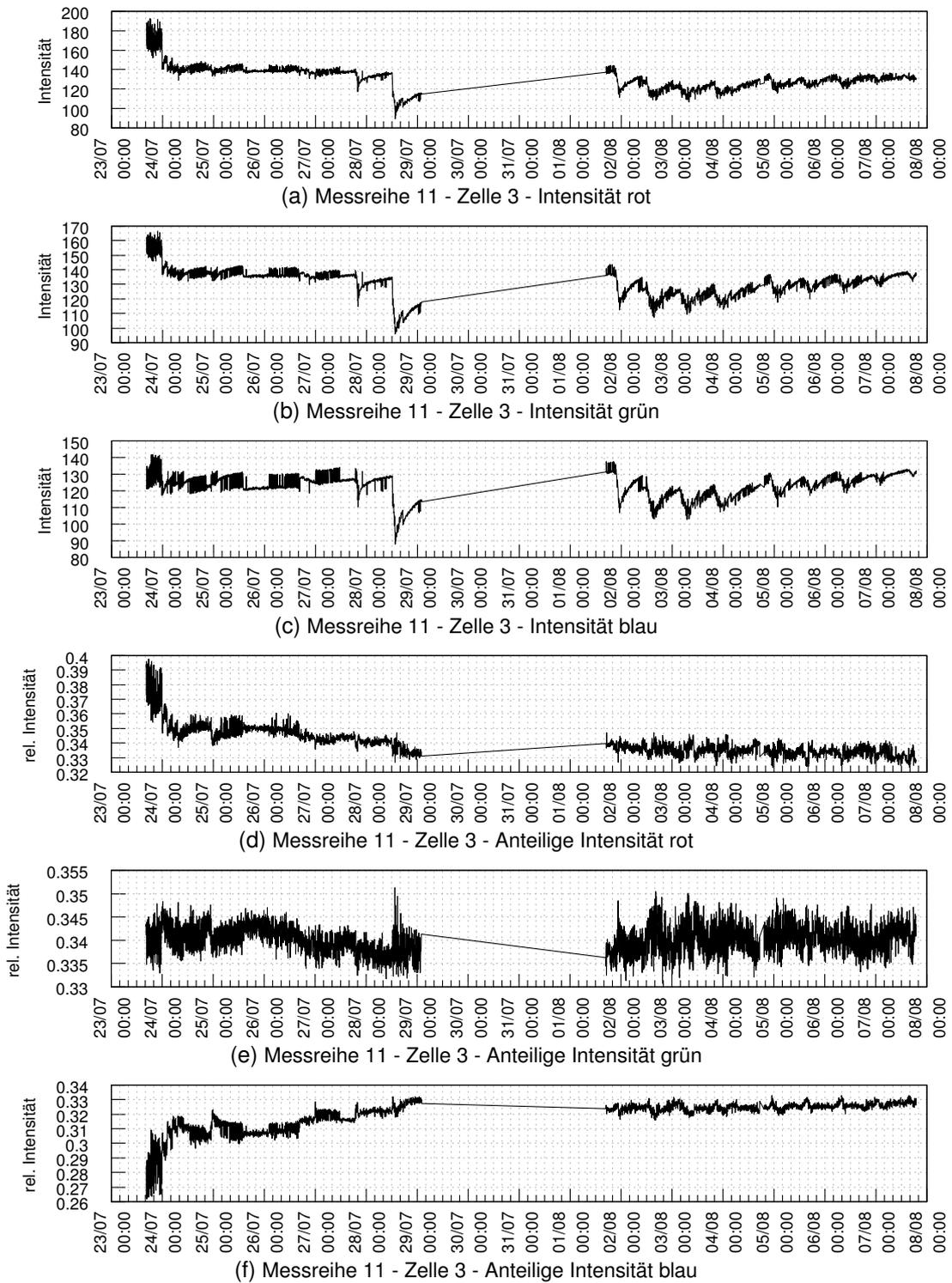


Abbildung D.50.: Messreihe 11 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe

D.3. Intensitätsverläufe (mit Kompensationsrechnung)

D.3.1. Messreihe 2

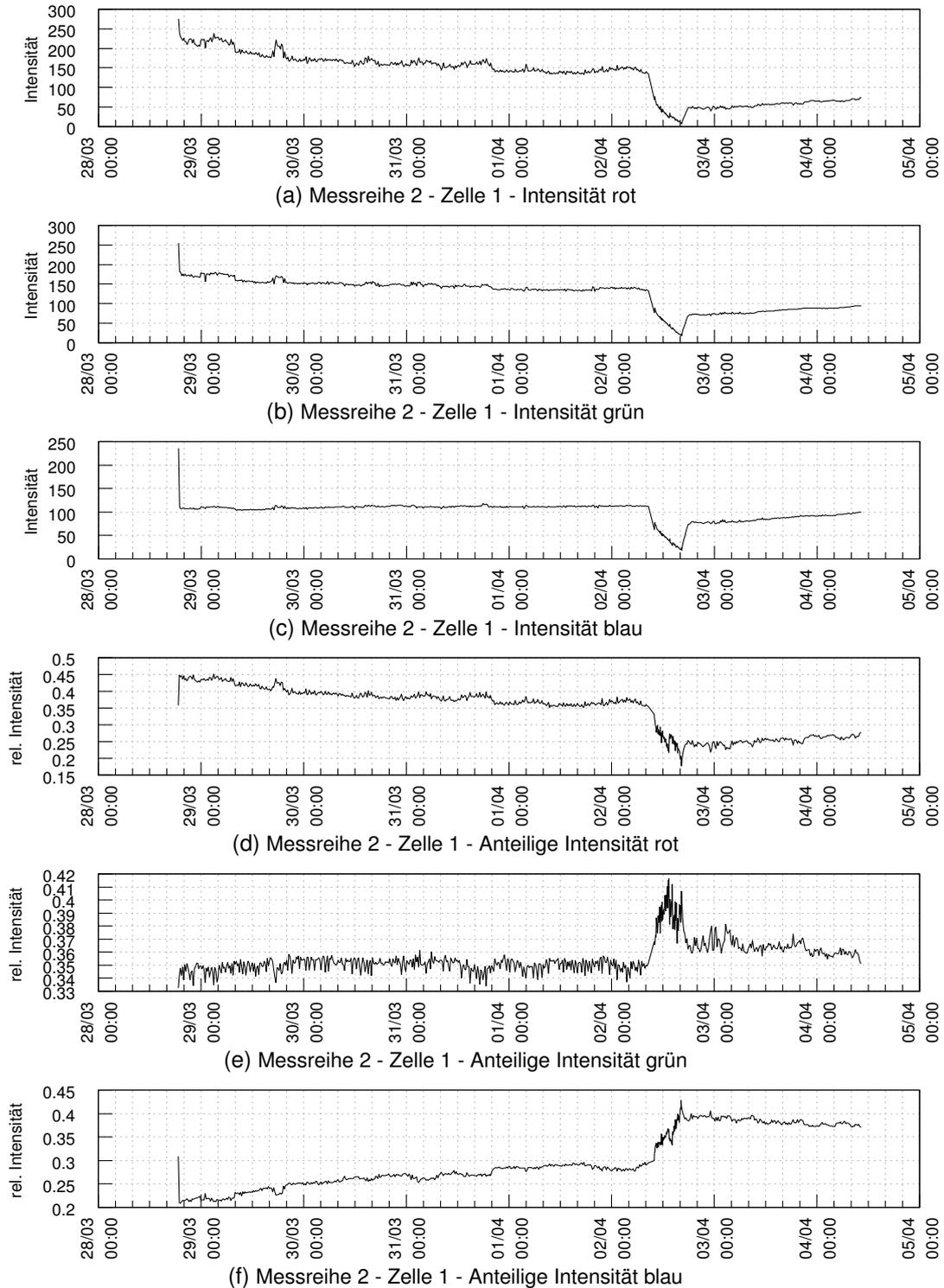


Abbildung D.51.: Messreihe 2 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

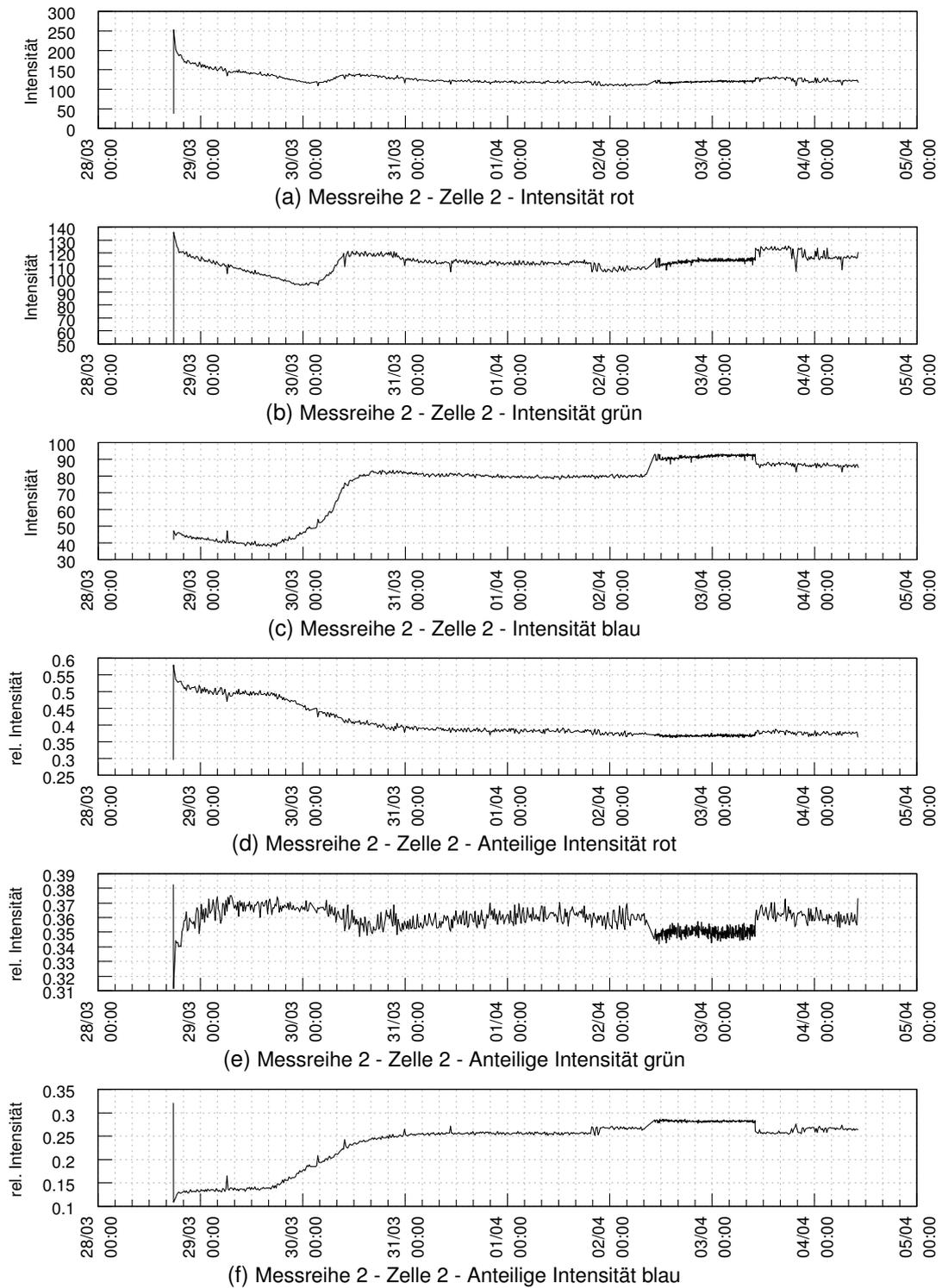


Abbildung D.52.: Messreihe 2 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.2. Messreihe 3

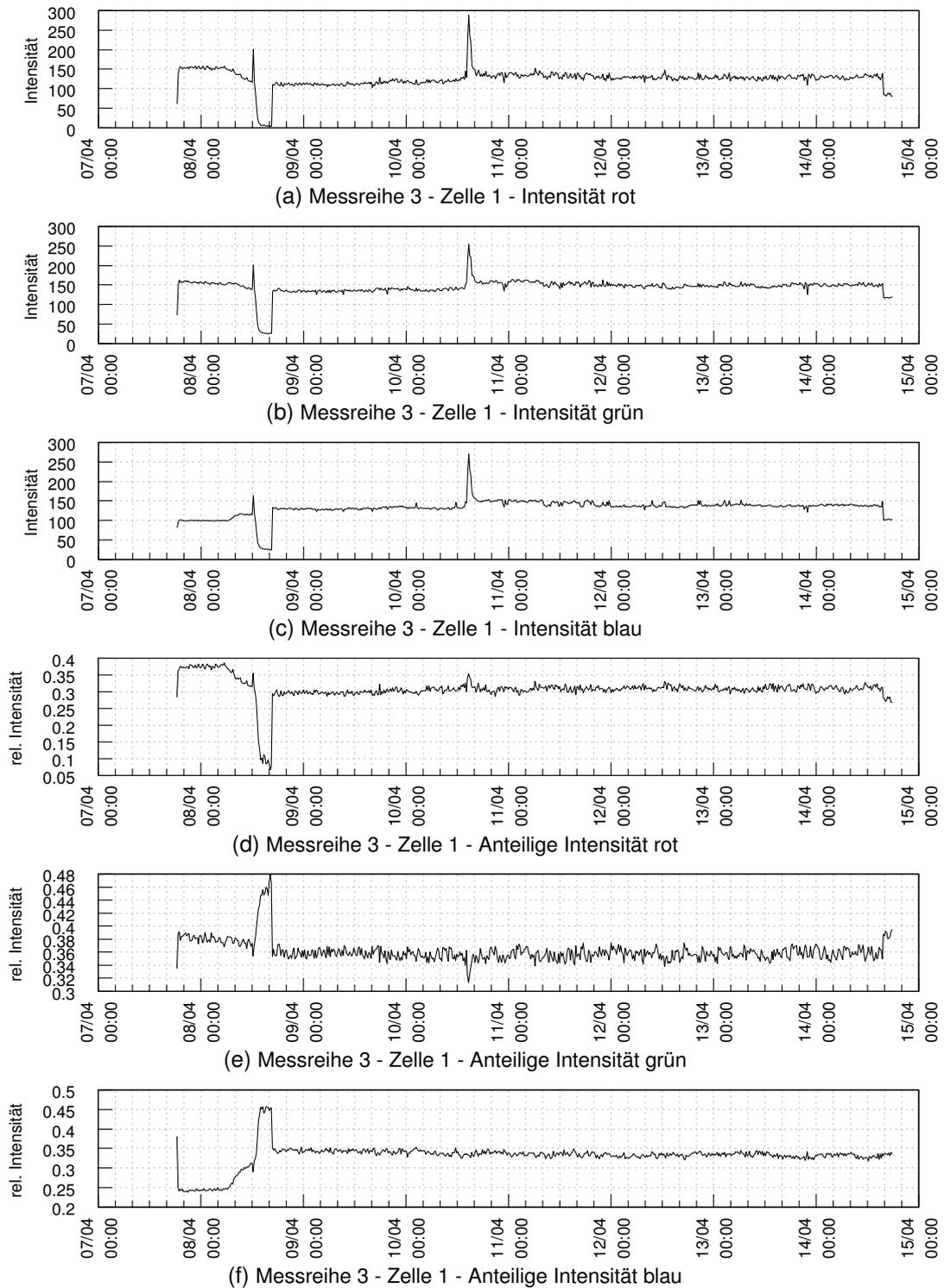


Abbildung D.53.: Messreihe 3 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

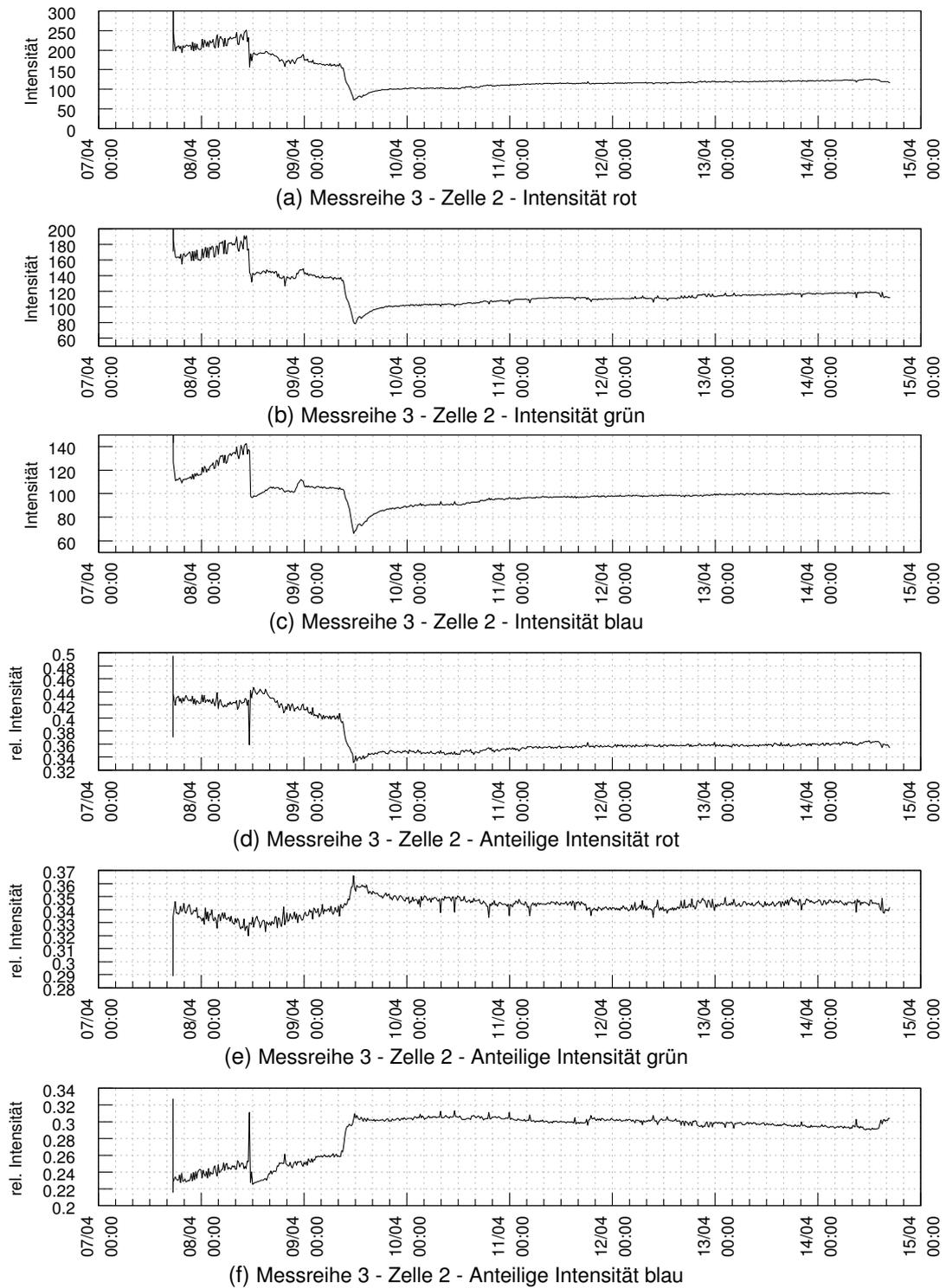


Abbildung D.54.: Messreihe 3 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.3. Messreihe 4

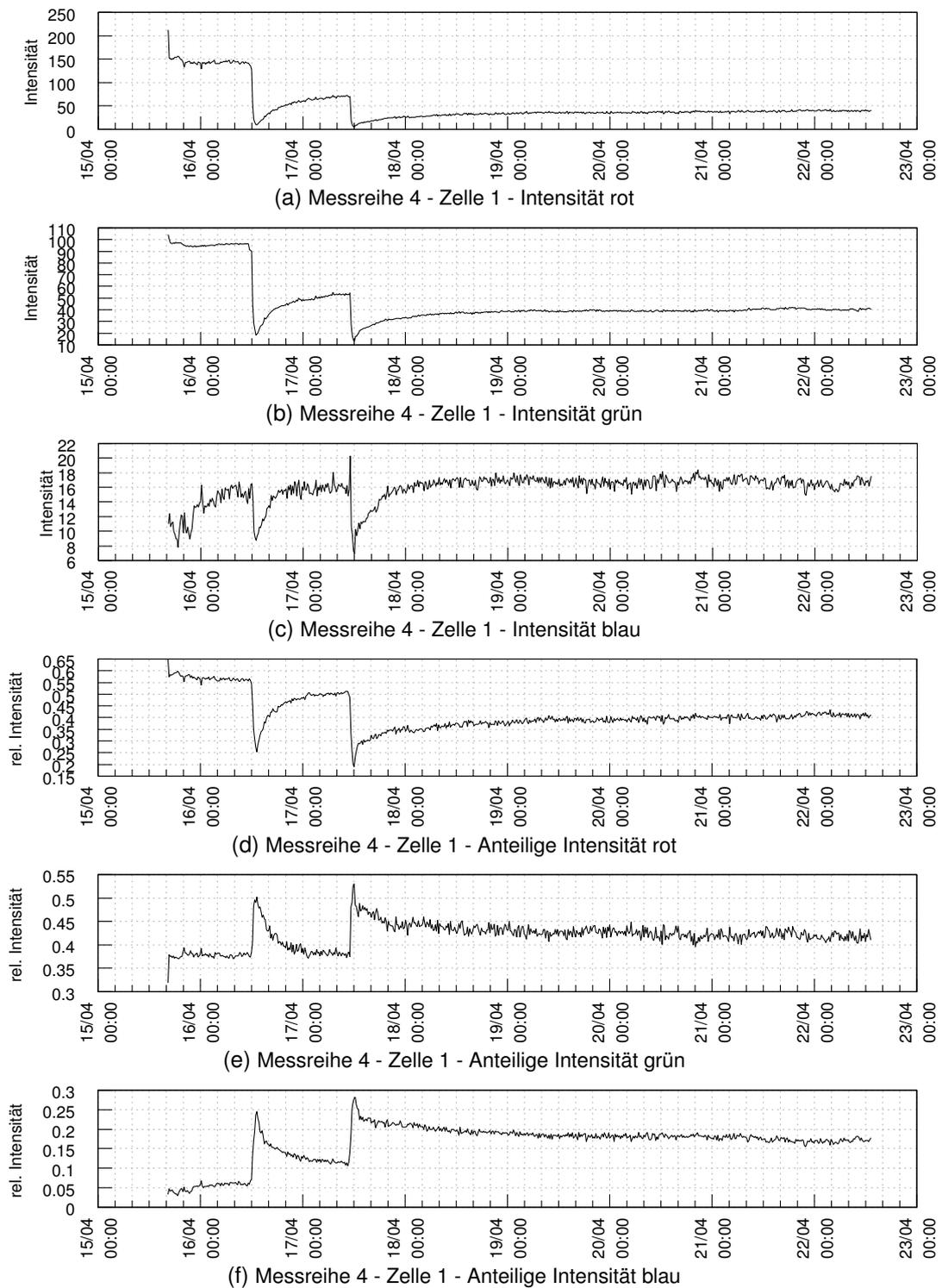


Abbildung D.55.: Messreihe 4 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

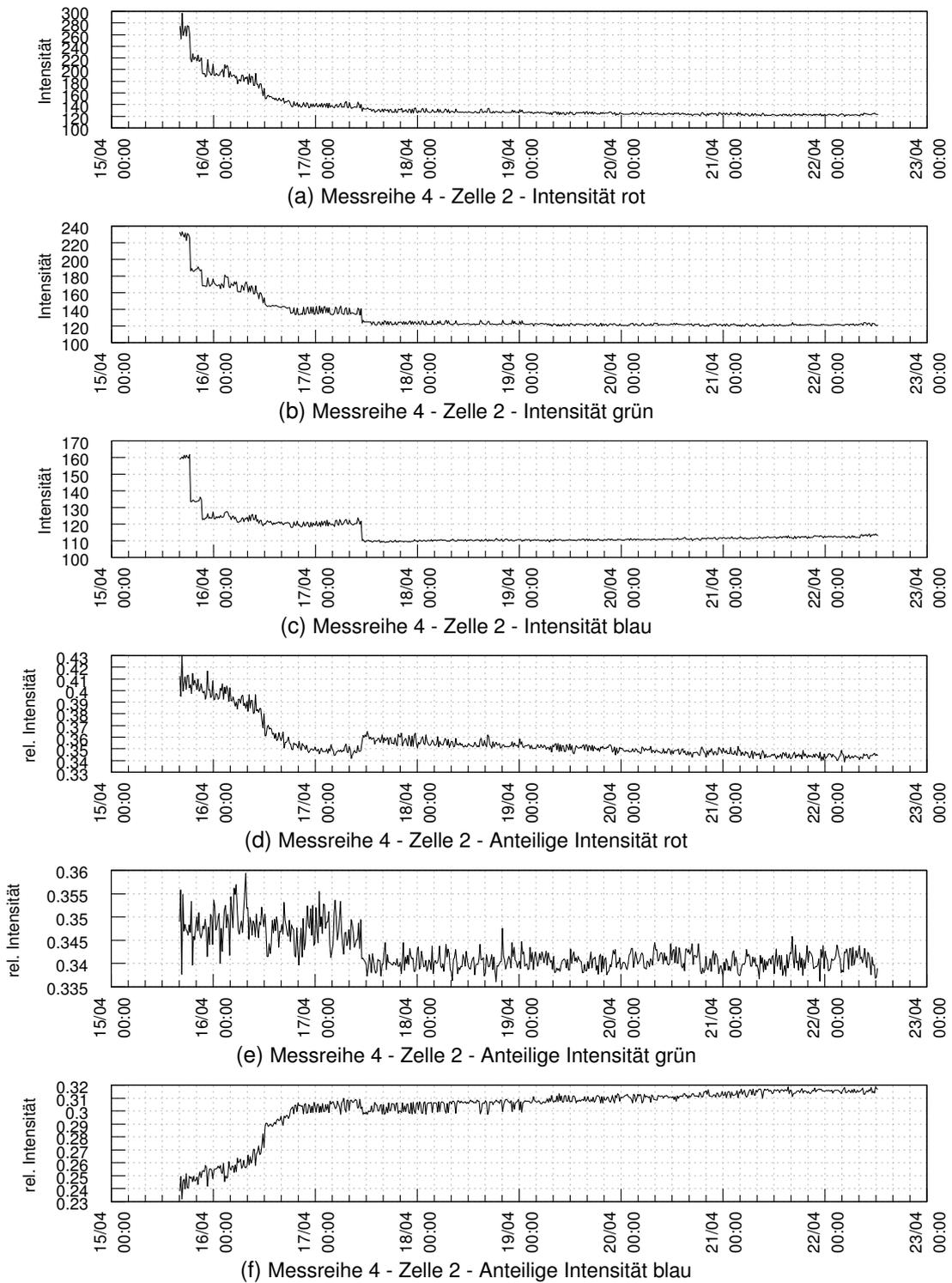


Abbildung D.56.: Messreihe 4 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.4. Messreihe 5

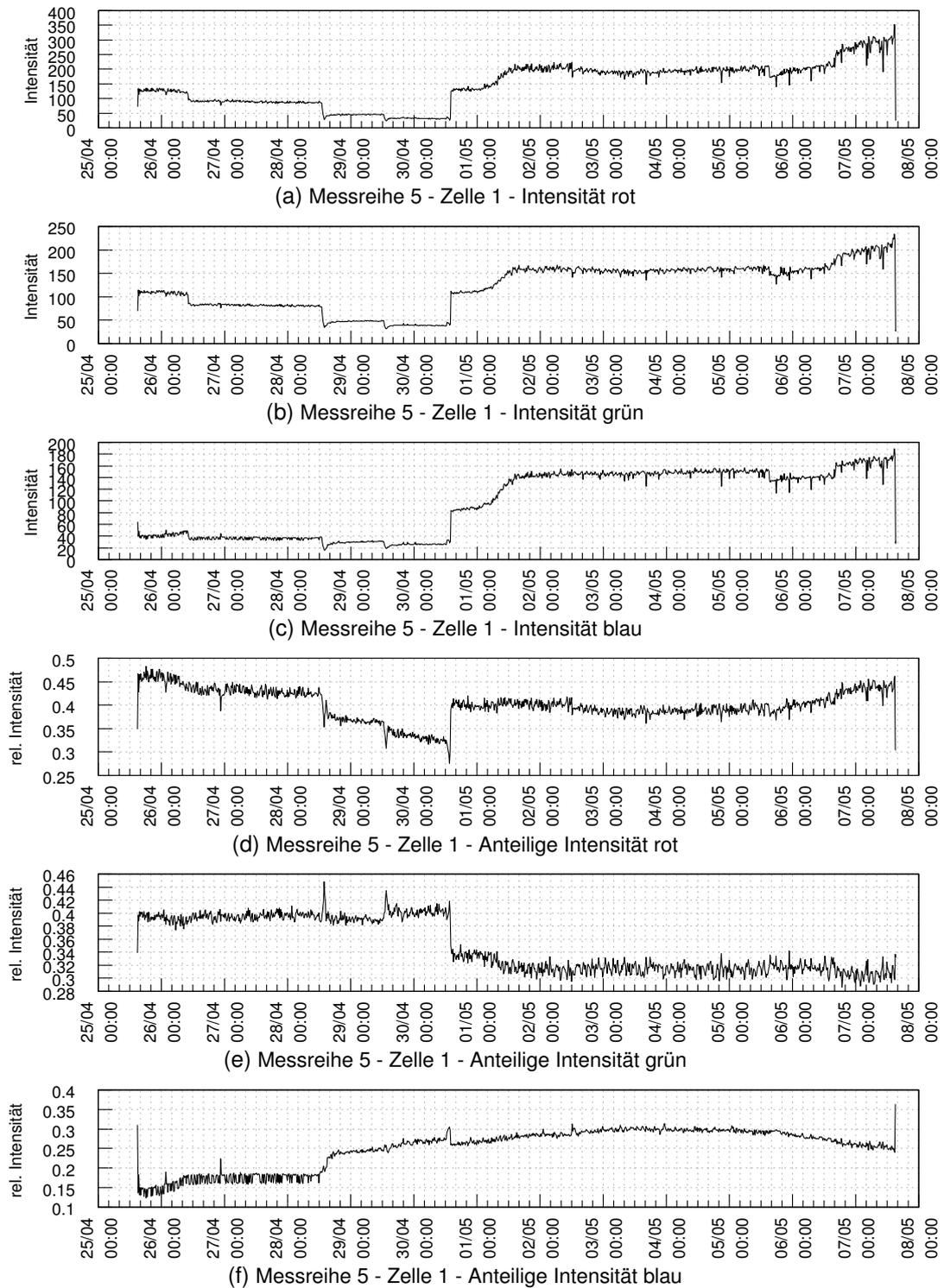


Abbildung D.57.: Messreihe 5 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

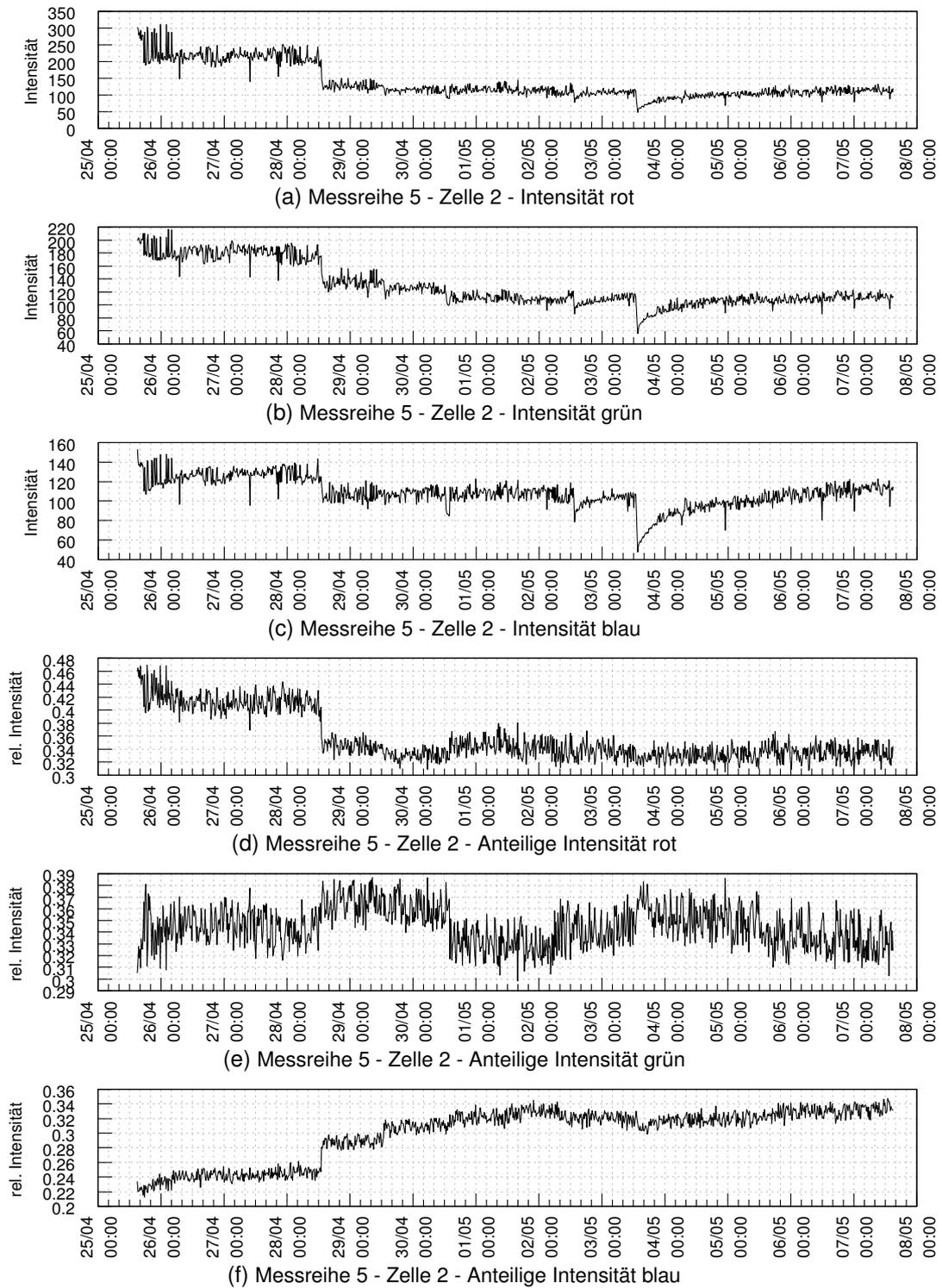


Abbildung D.58.: Messreihe 5 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.5. Messreihe 6

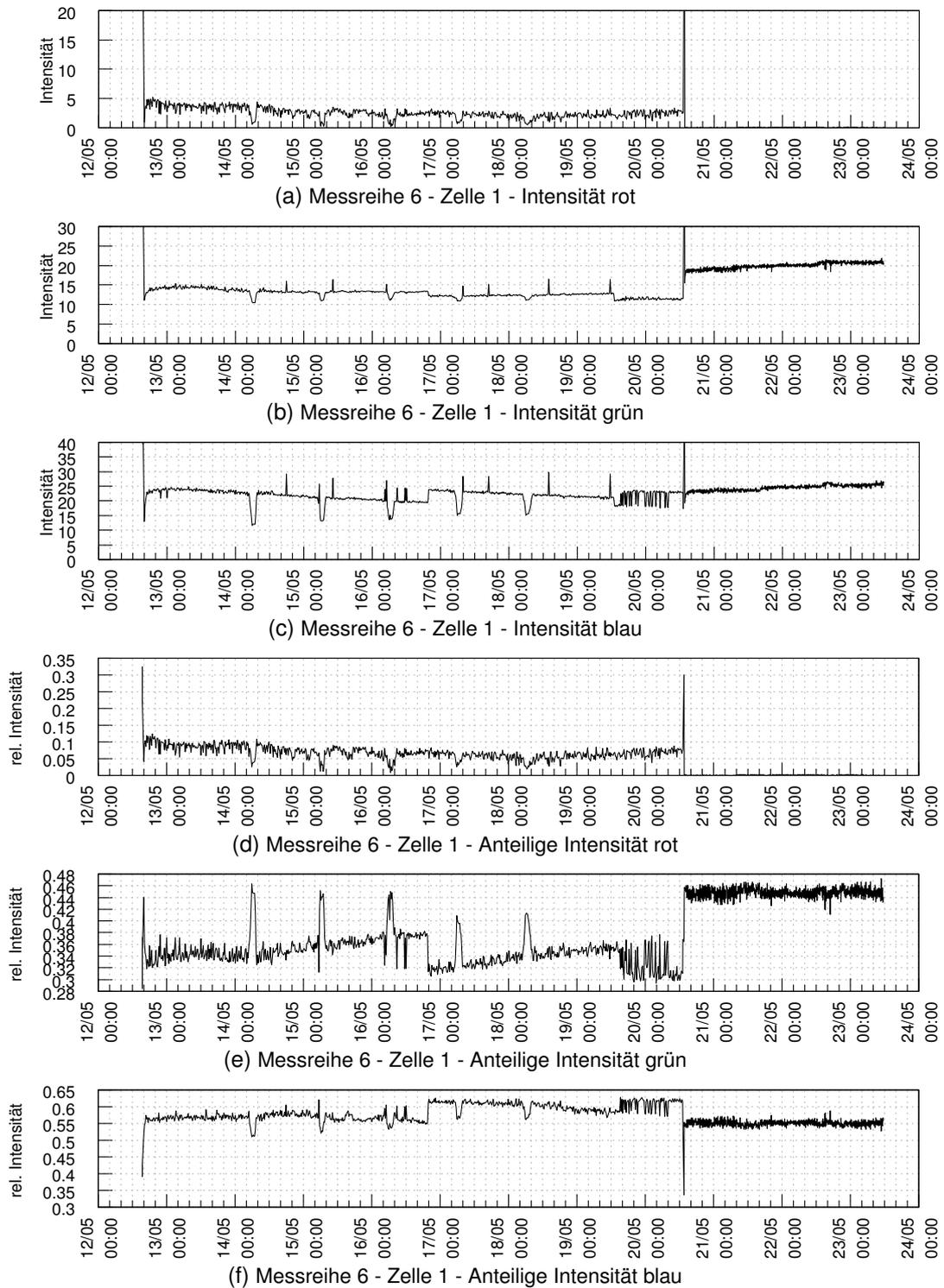


Abbildung D.59.: Messreihe 6 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

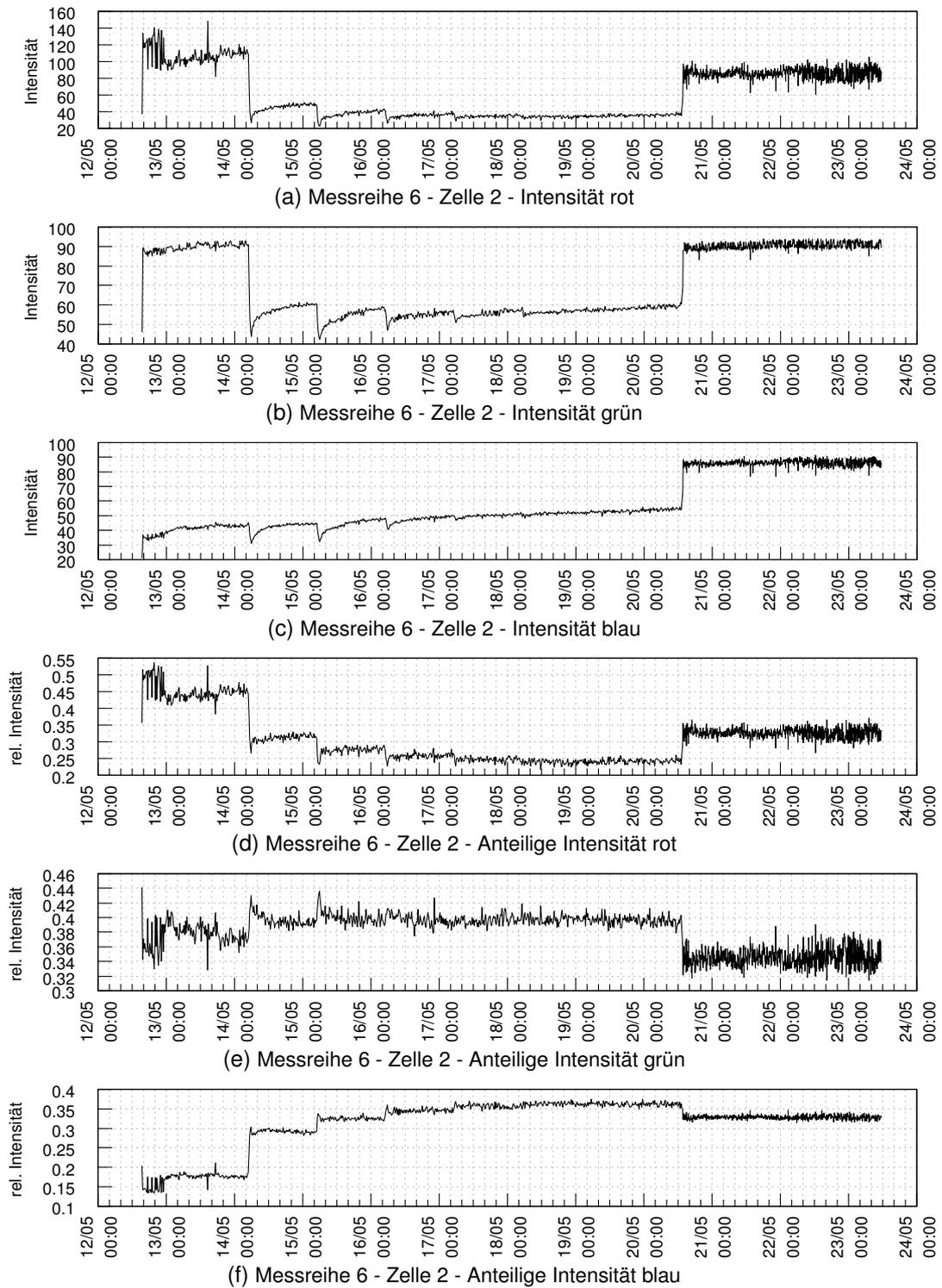


Abbildung D.60.: Messreihe 6 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.6. Messreihe 7

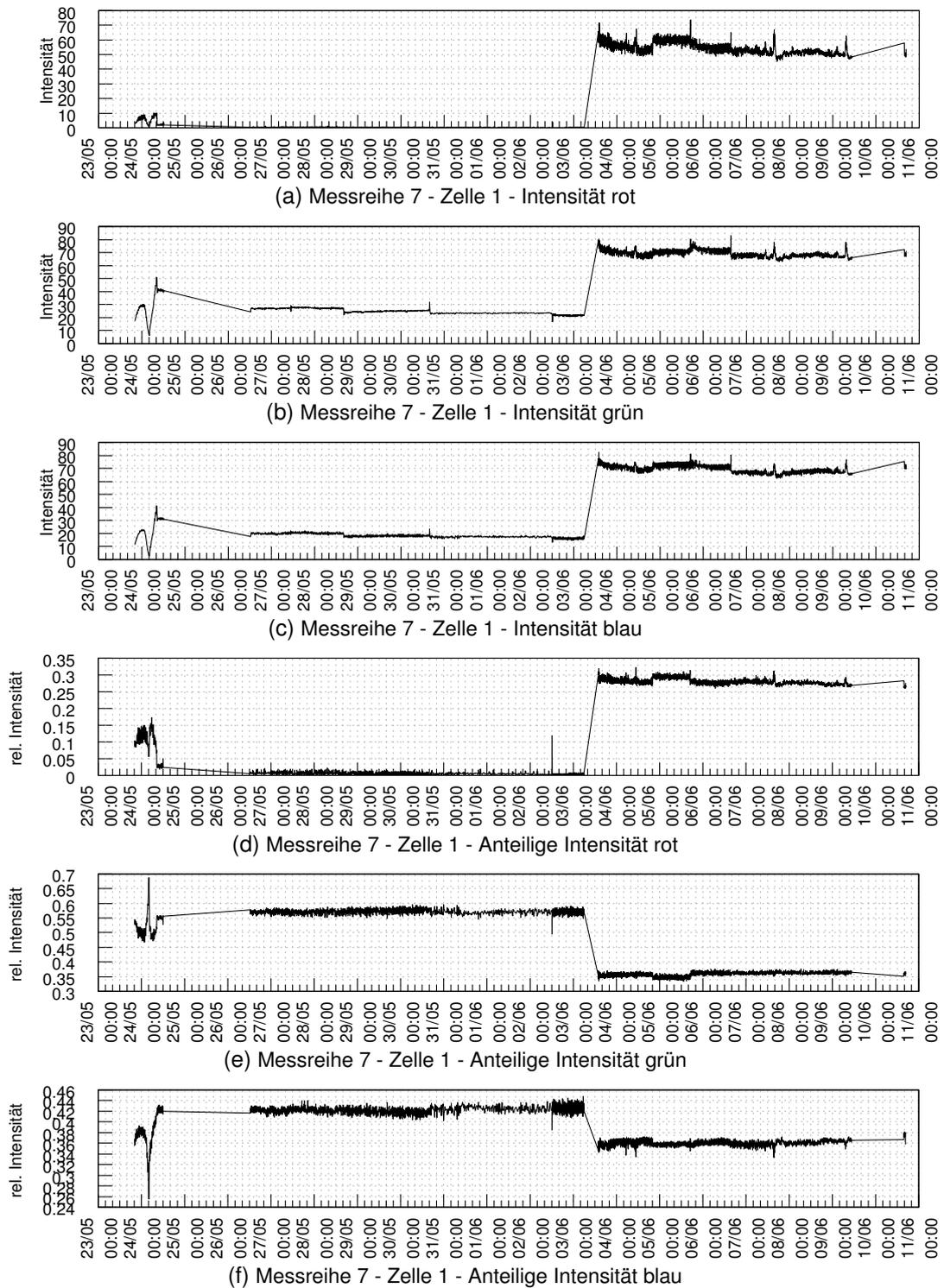


Abbildung D.61.: Messreihe 7 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

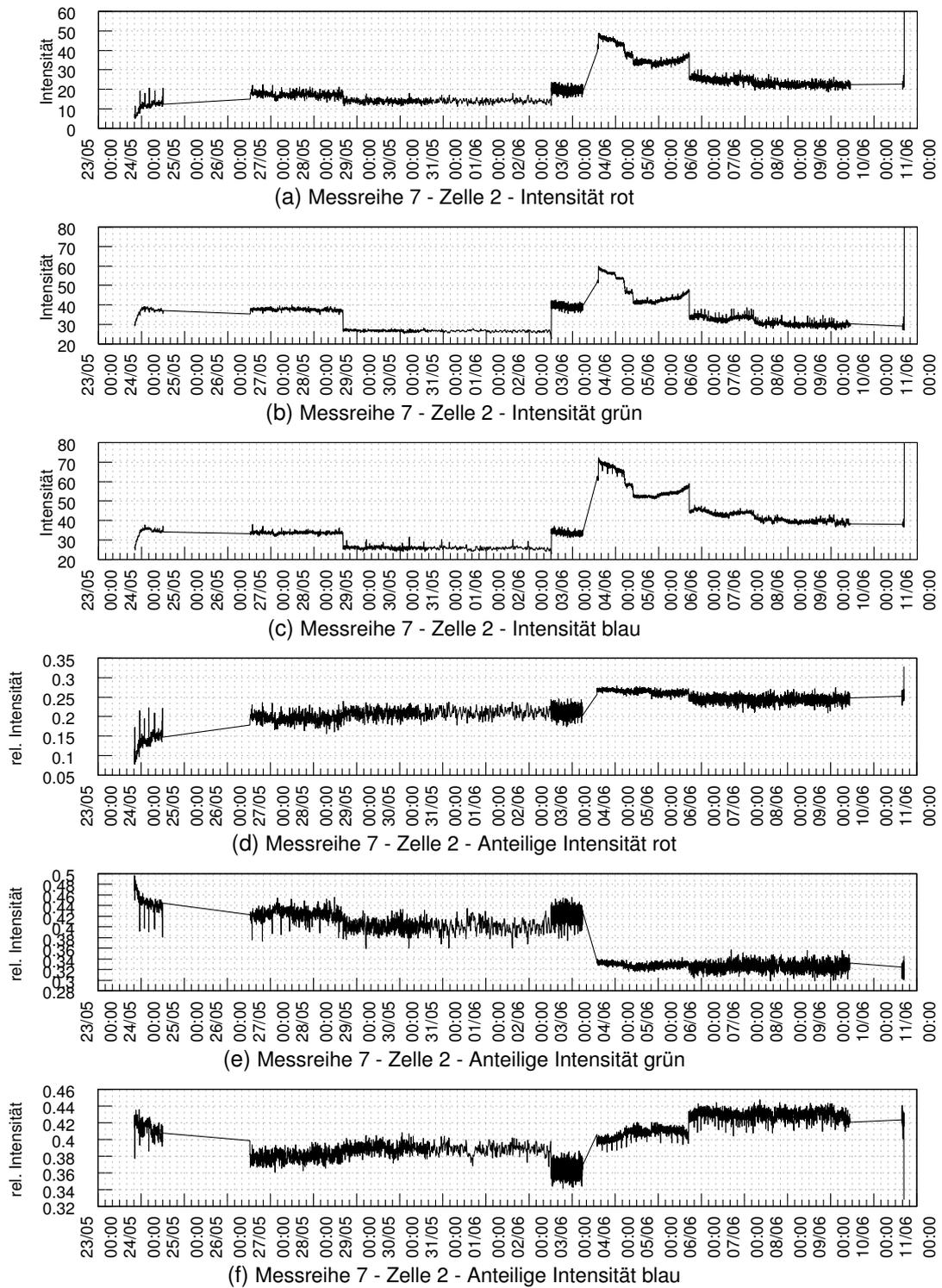


Abbildung D.62.: Messreihe 7 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

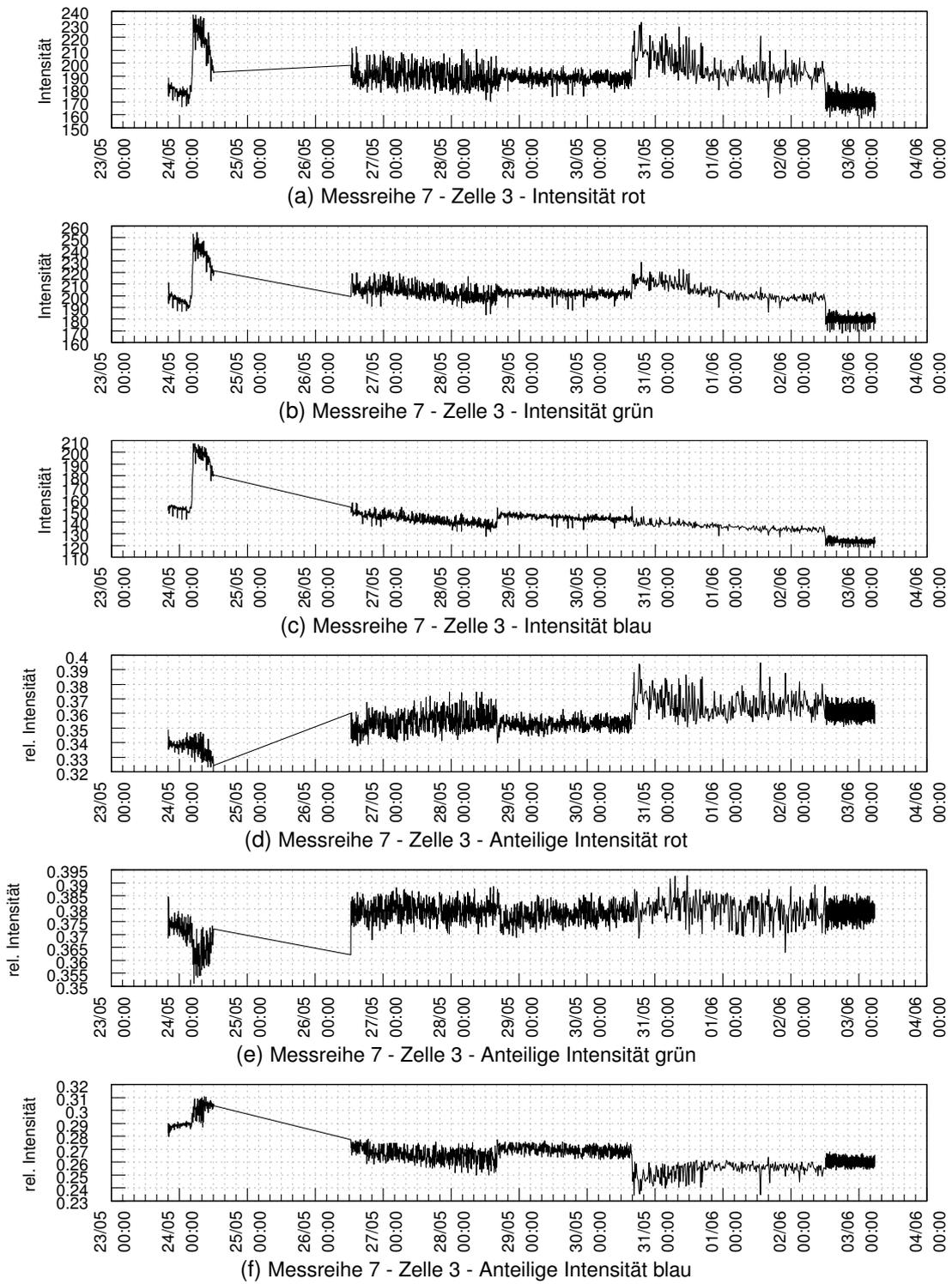


Abbildung D.63.: Messreihe 7 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.7. Messreihe 8

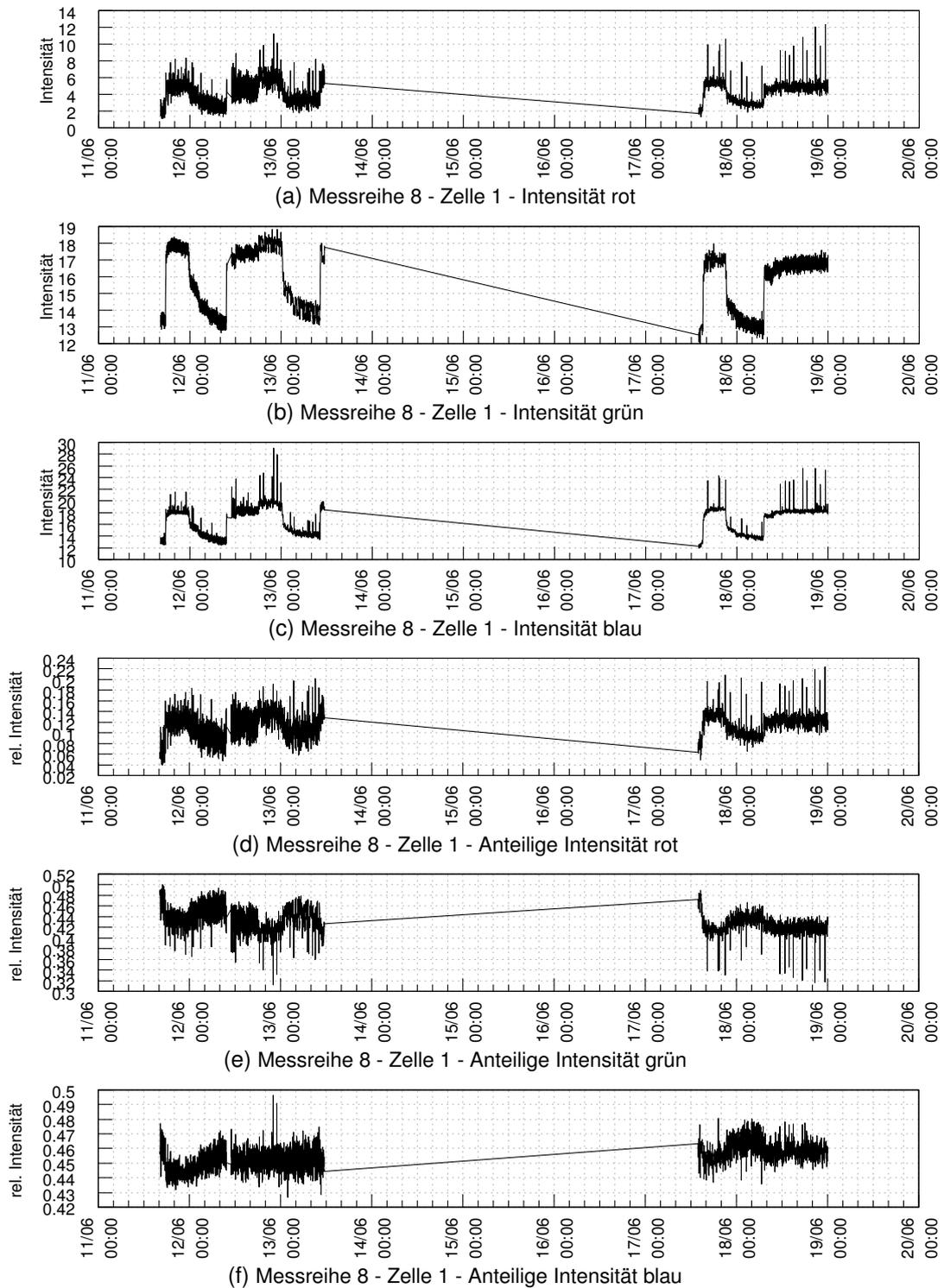


Abbildung D.64.: Messreihe 8 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

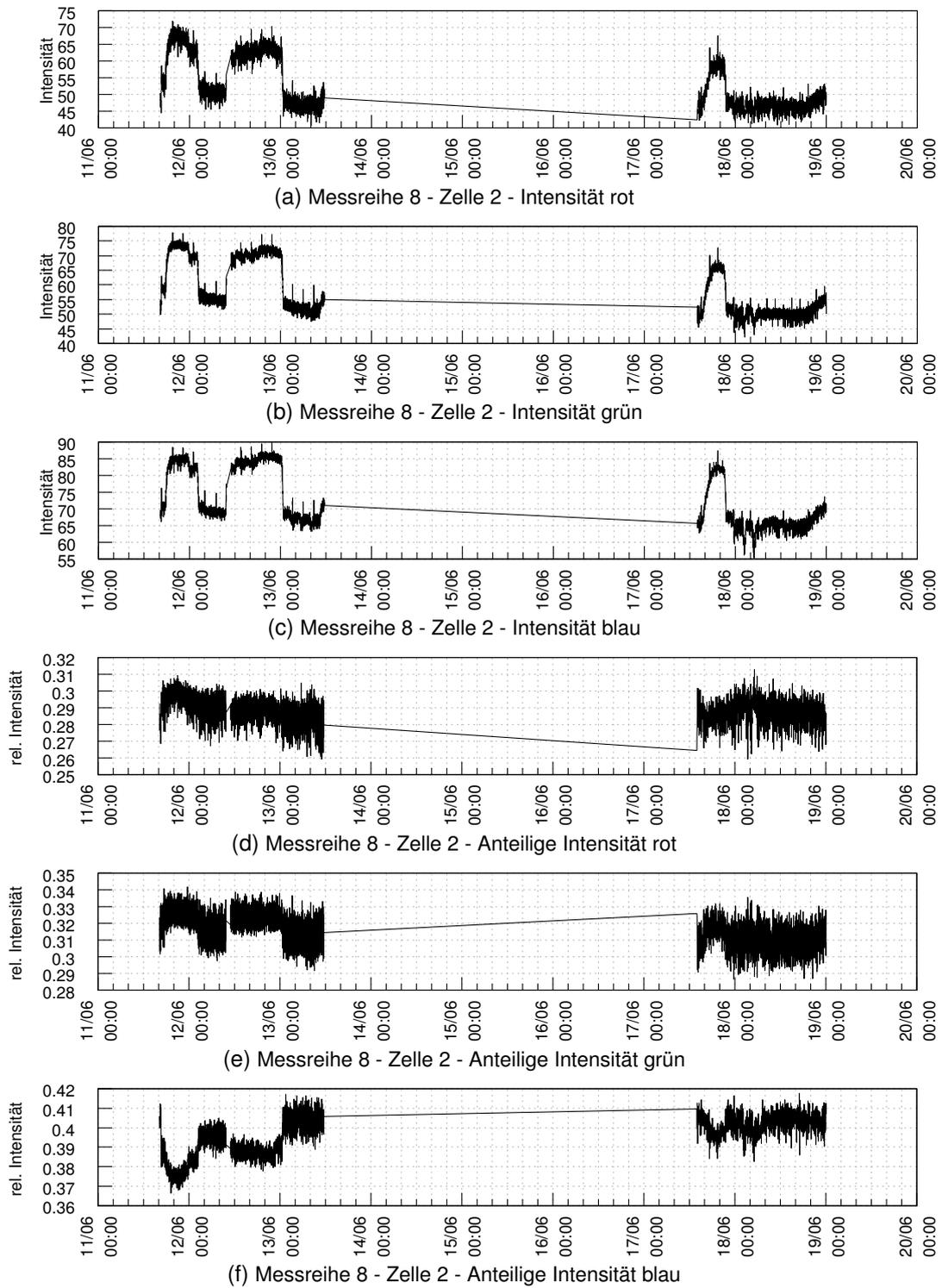


Abbildung D.65.: Messreihe 8 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

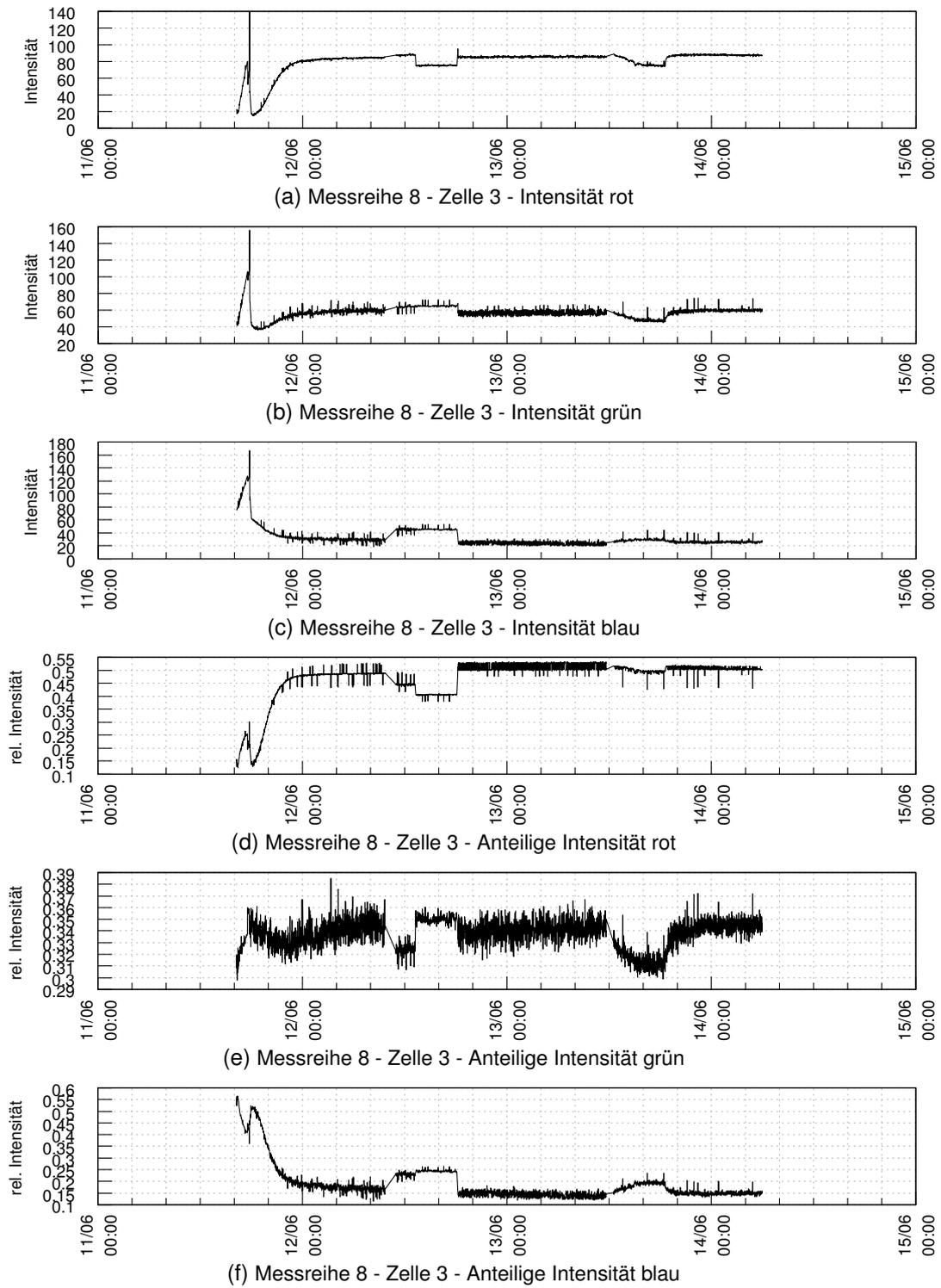
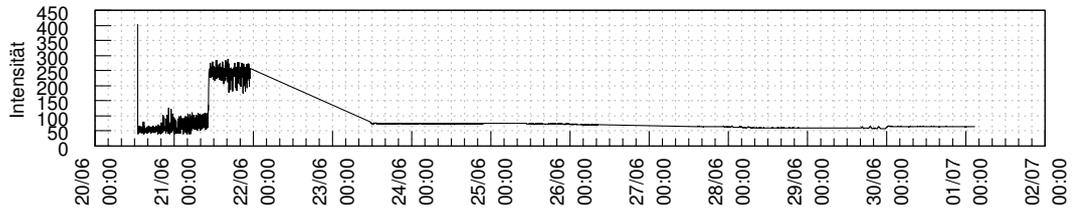
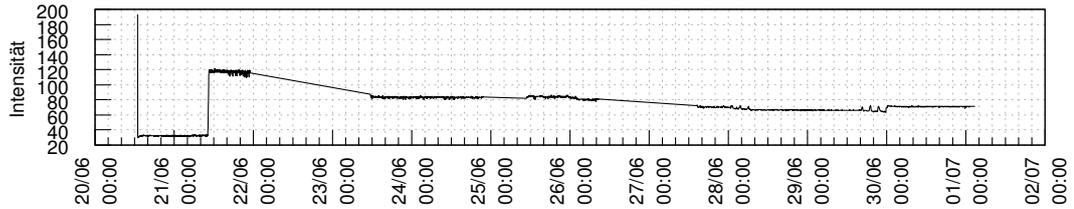


Abbildung D.66.: Messreihe 8 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

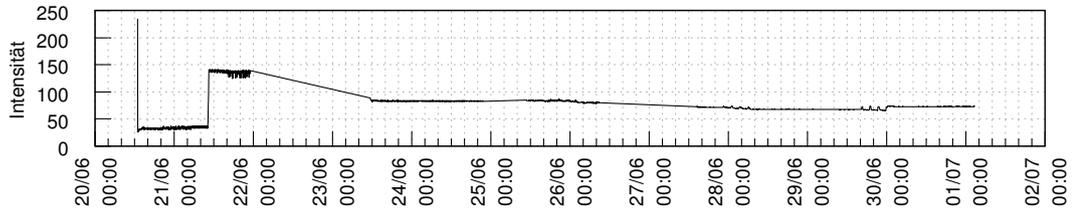
D.3.8. Messreihe 9



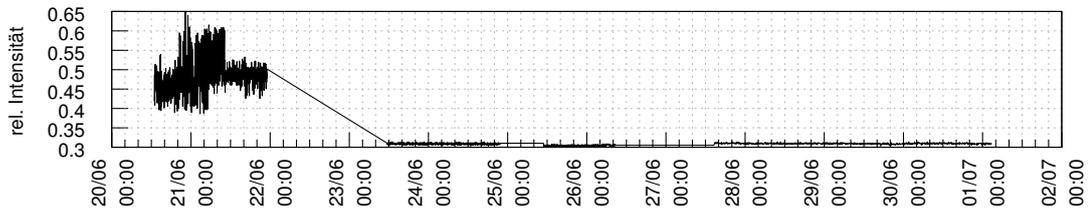
(a) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität rot



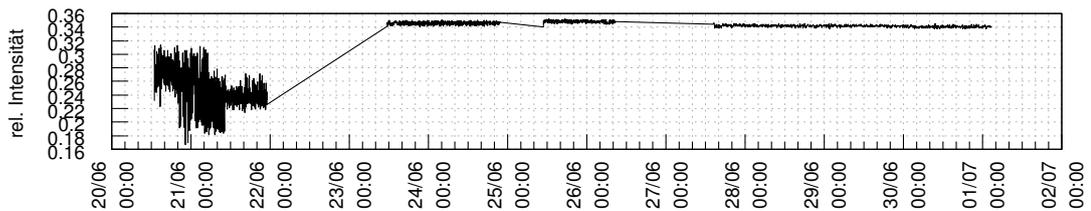
(b) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität grün



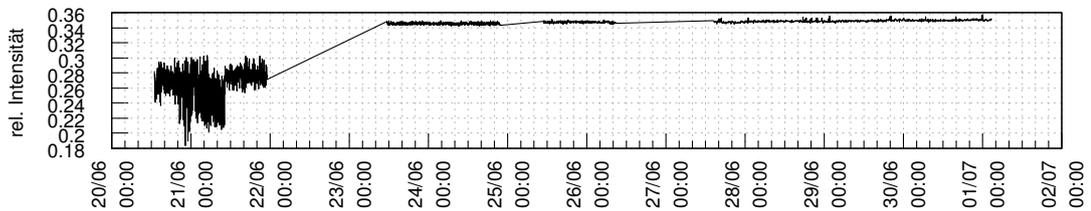
(c) Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensität blau



(d) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität rot



(e) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität grün



(f) Messreihe 9 - Zelle 1 - Anteilige Intensität blau

Abbildung D.67.: Messreihe 9 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

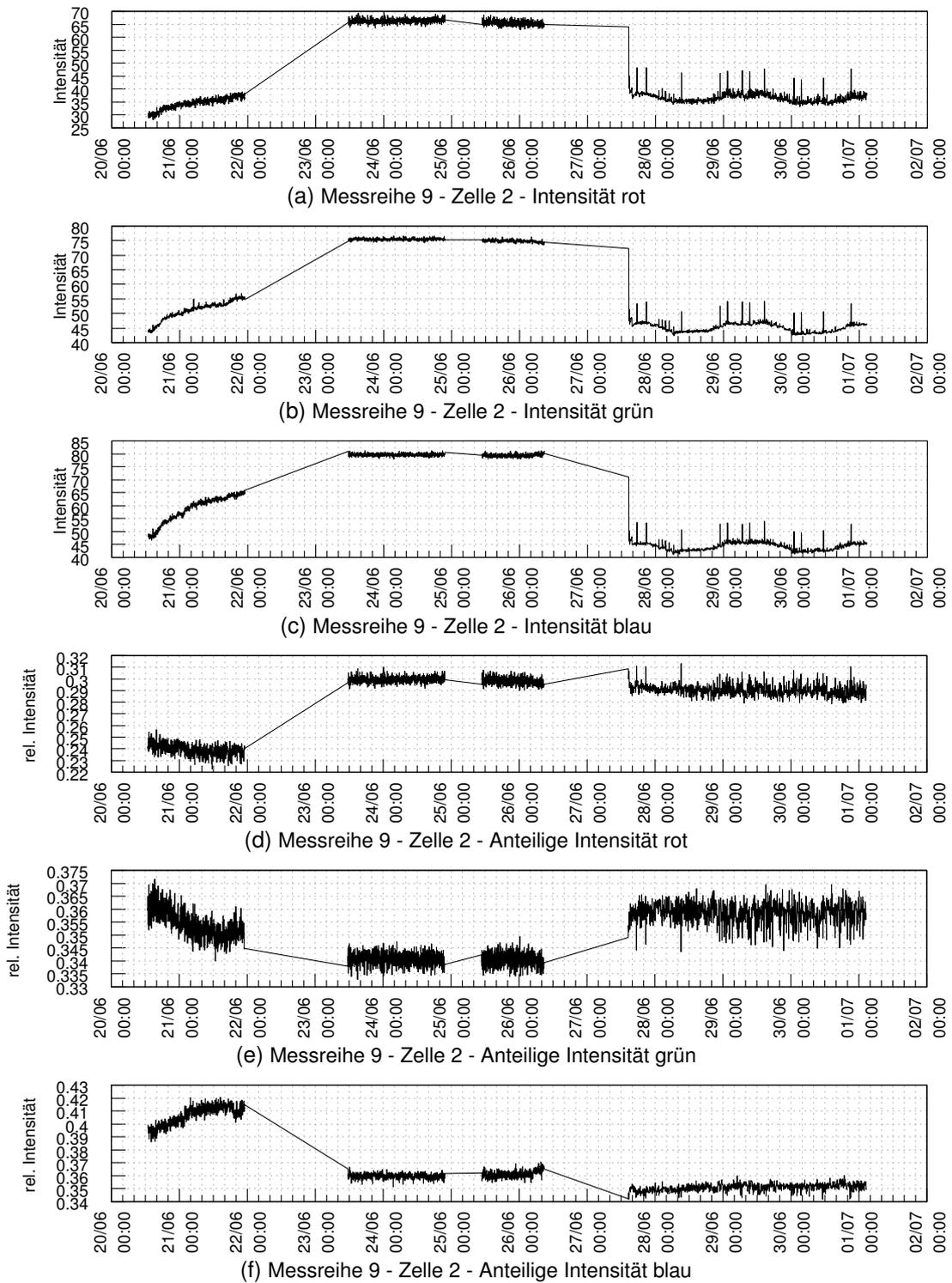


Abbildung D.68.: Messreihe 9 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

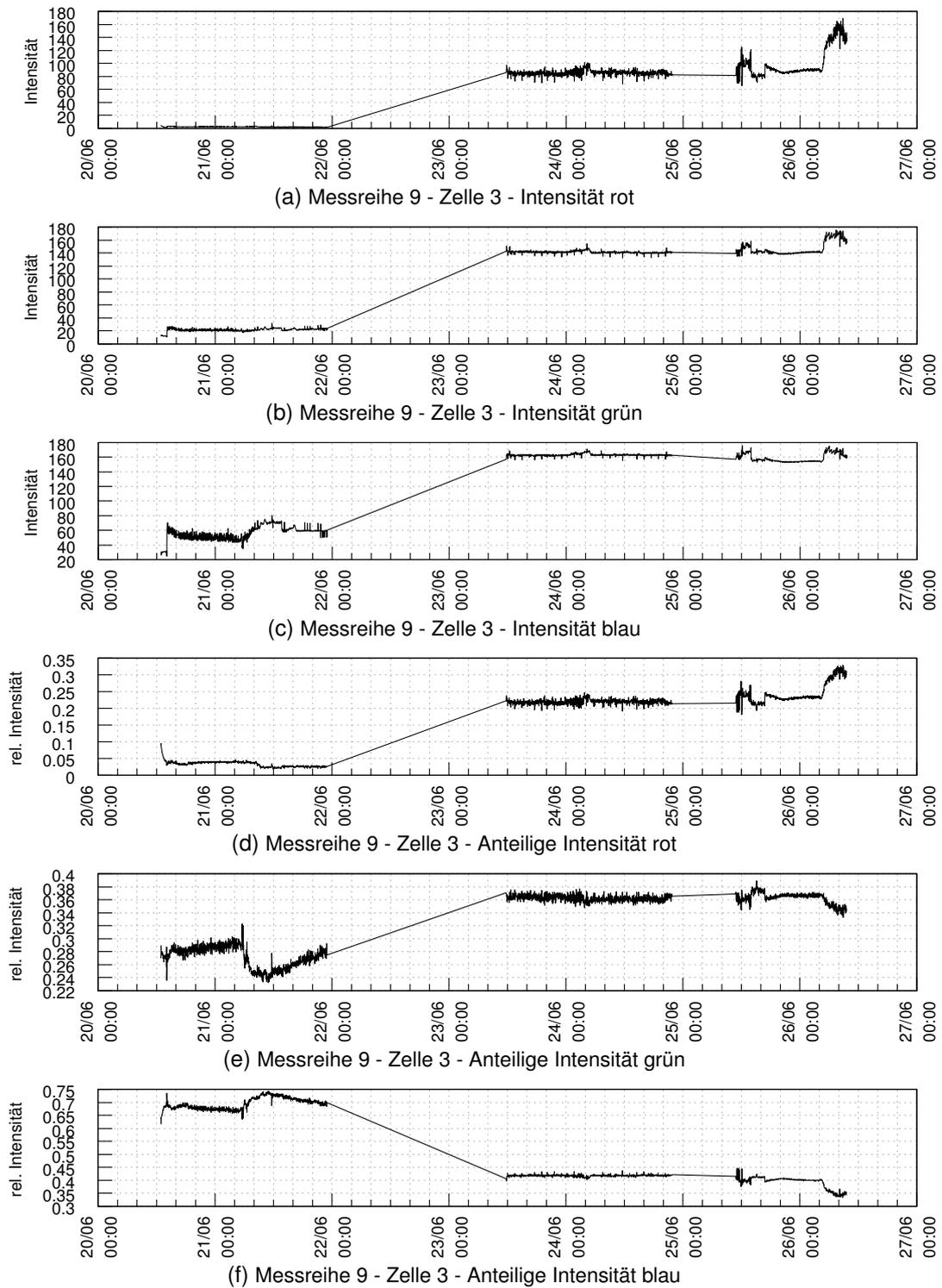


Abbildung D.69.: Messreihe 9 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.9. Messreihe 10

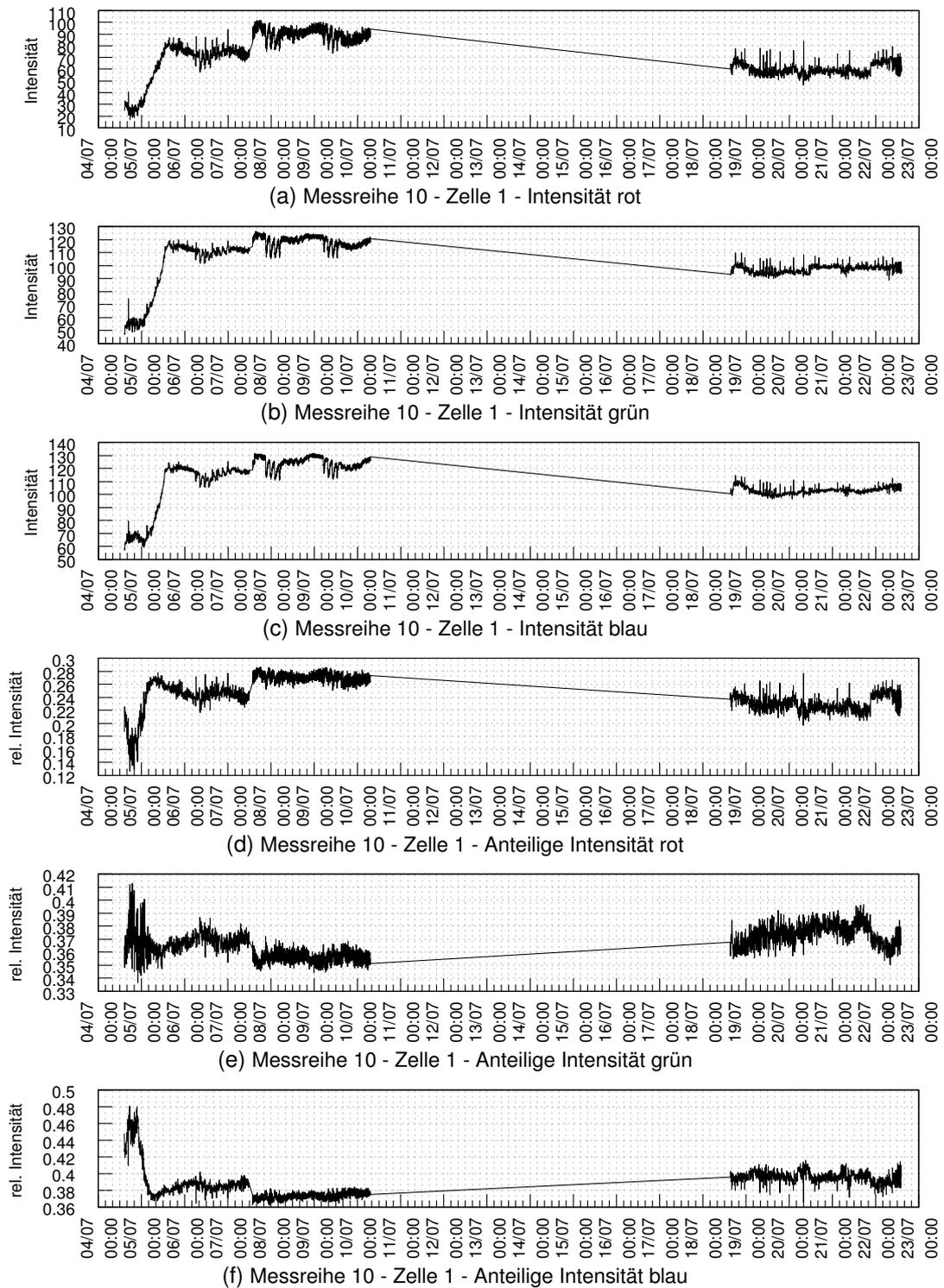


Abbildung D.70.: Messreihe 10 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

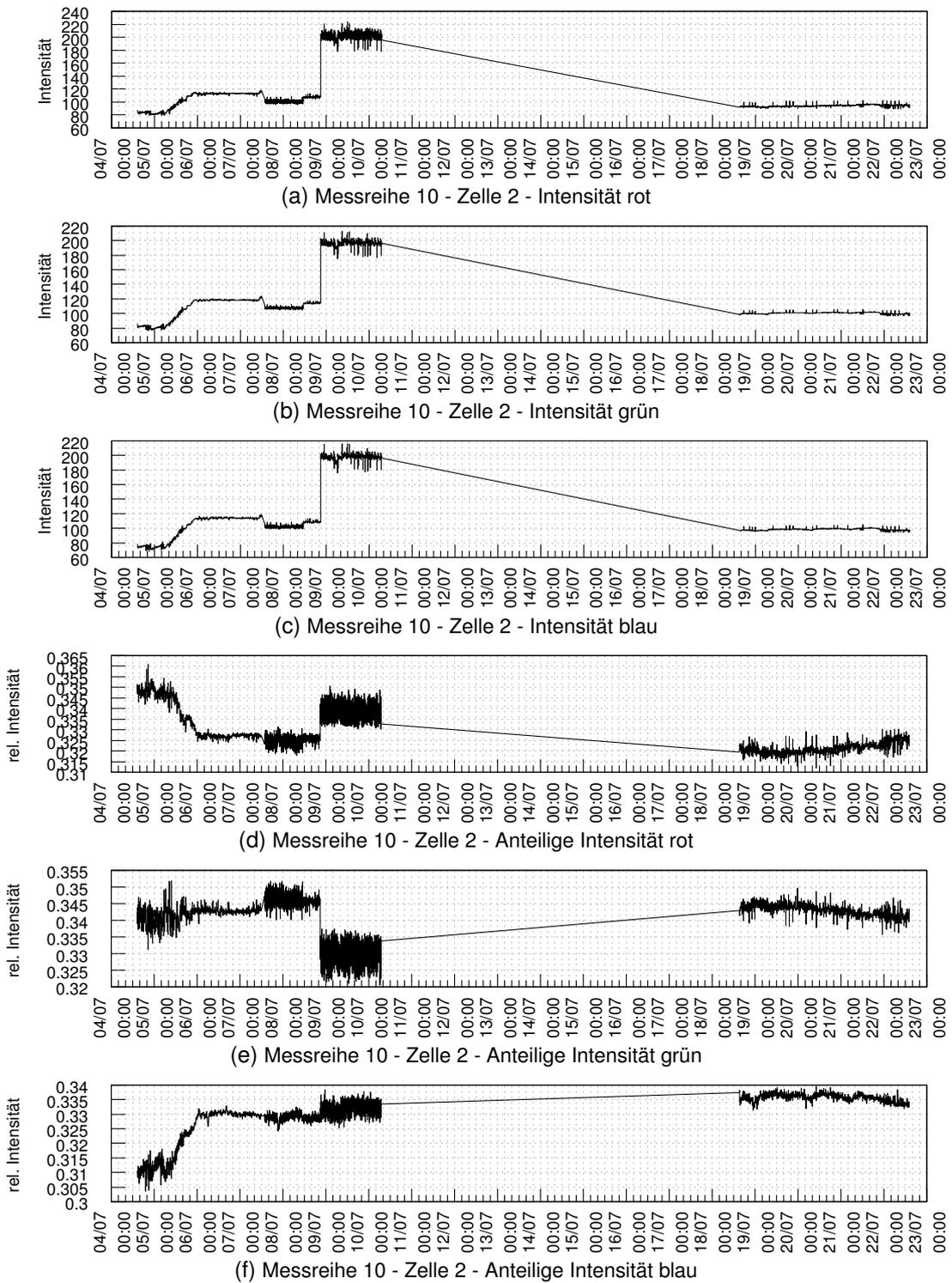


Abbildung D.71.: Messreihe 10 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

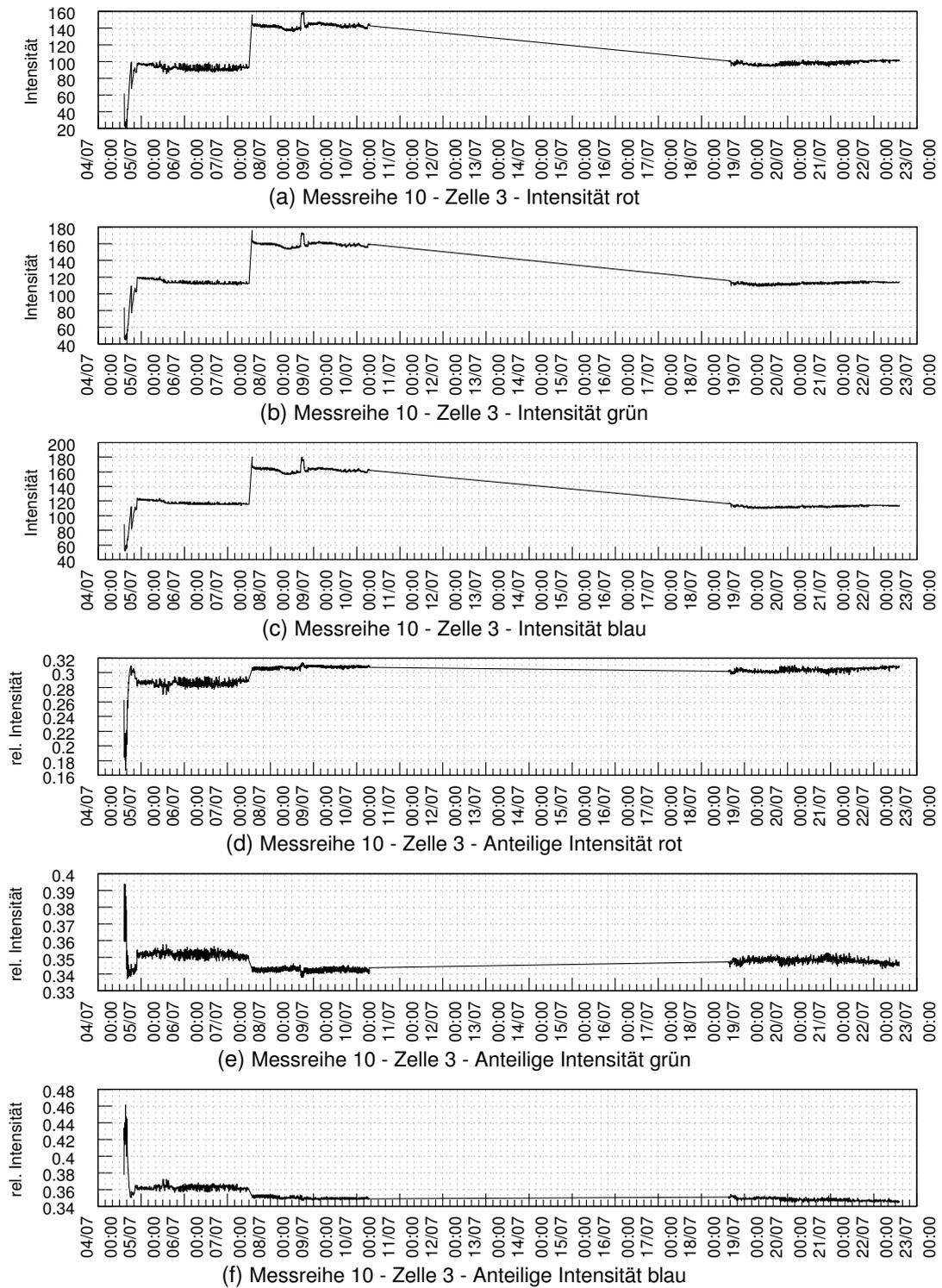


Abbildung D.72.: Messreihe 10 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.3.10. Messreihe 11

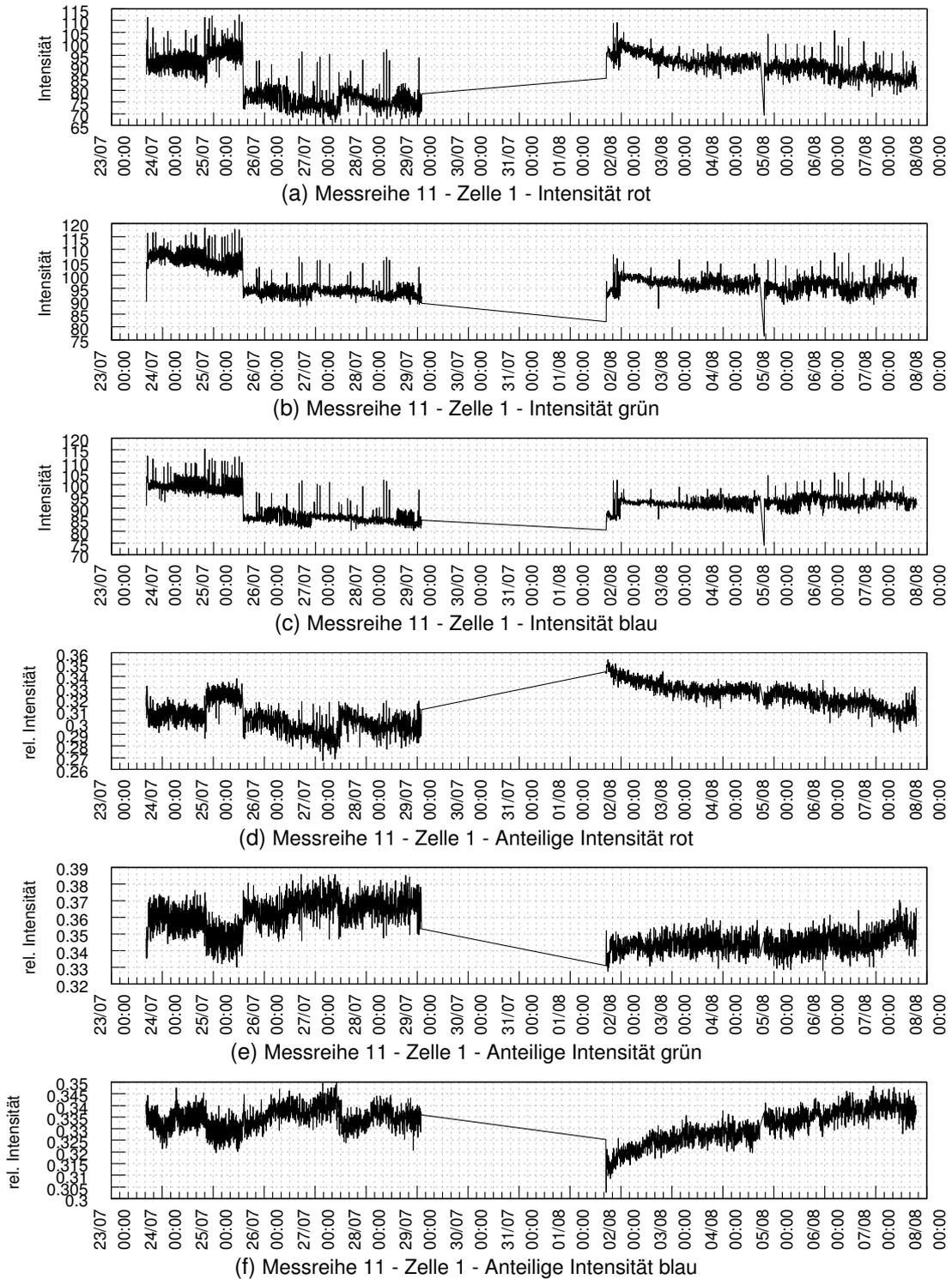


Abbildung D.73.: Messreihe 11 - Zelle 1 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

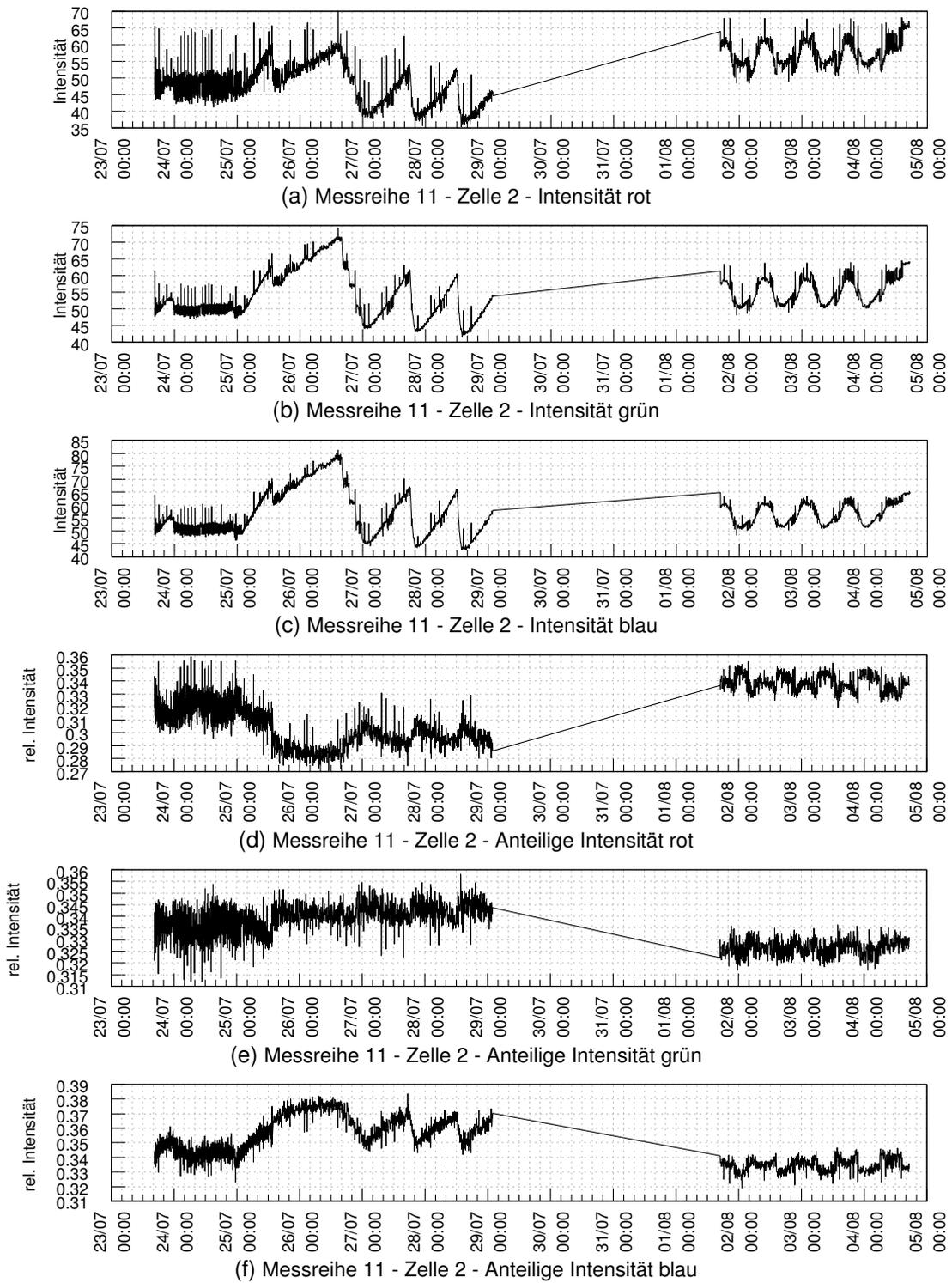


Abbildung D.74.: Messreihe 11 - Zelle 2 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

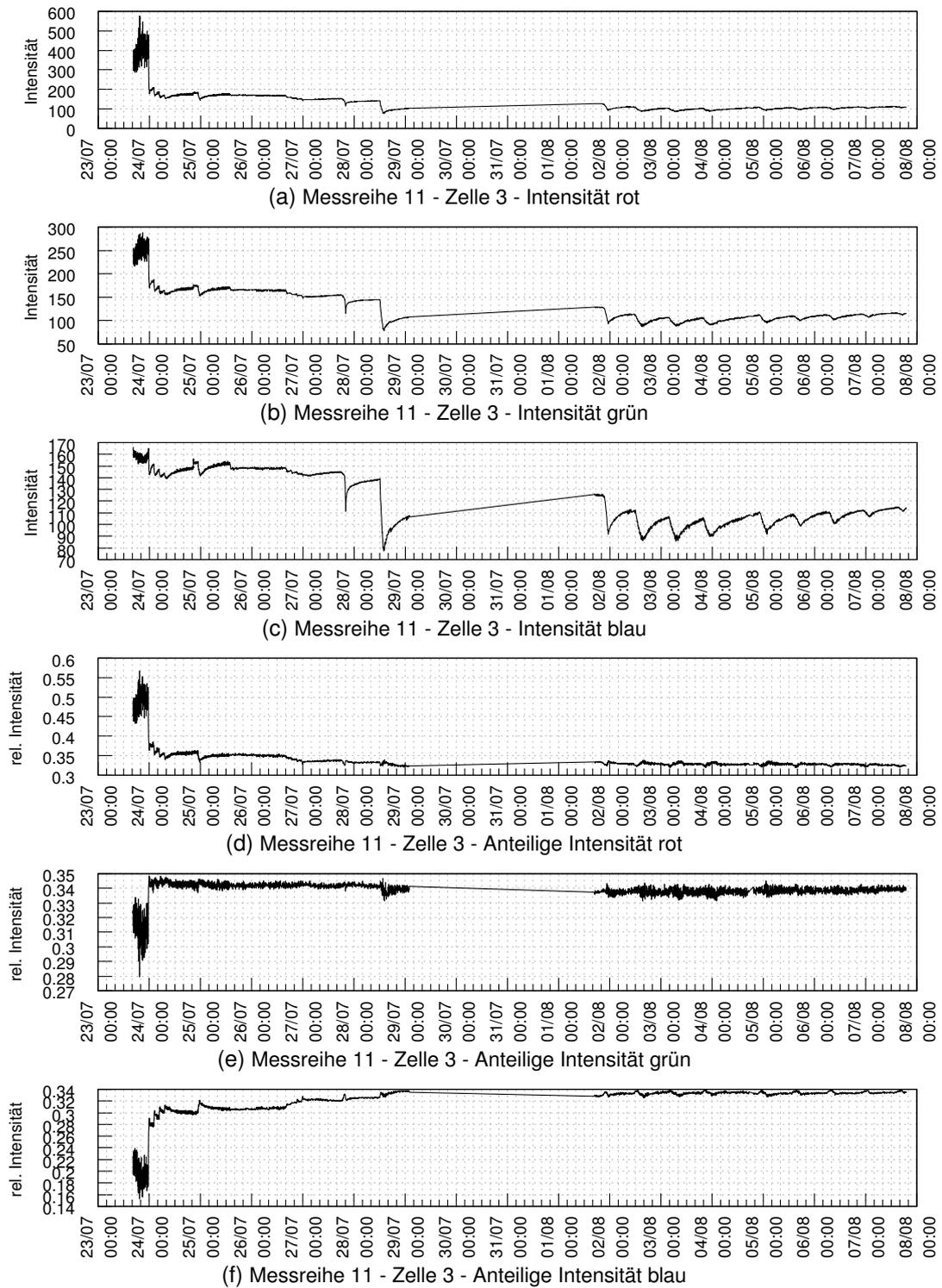


Abbildung D.75.: Messreihe 11 - Zelle 3 - Intensitätsverläufe (kompensiert)

D.4. Zyklrierpläne

D.4.1. Messreihe 5

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 #
6 #
7 #
8 #MI
9 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
10 setport 1 0
11 # 0,5 Stunde warten
12 wait 1800
13 #
14 #
15 #
16 #
17 #DO
18 # Zelle 1 und 2 – laden
19 setport 1 10
20 # 21 Stunden warten
21 wait 75600
22 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
23 setport 1 0
24 # 1 Stunde warten
25 wait 3600
26 # Zelle 1 und 2 entladen
27 setport 1 5
28 # 1 Stunde warten
29 wait 3600
30 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
31 setport 1 0
32 # 1 Stunde warten
33 wait 3600
34 #
35 #
36 #
37 #FR
38 # Zelle 1 und 2 – laden
39 setport 1 10
40 # 21 Stunden warten
41 wait 75600
42 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 1 Stunde warten
45 wait 3600
46 # Zelle 1 und 2 entladen
47 setport 1 5
48 # 1 Stunde warten
49 wait 3600
50 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 1 Stunde warten
53 wait 3600
54 #
55 #
56 #
57 #SA
58 # Zelle 1 und 2 – laden
59 setport 1 10
60 # 21 Stunden warten
61 wait 75600
62 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
63 setport 1 0
64 # 1 Stunde warten
65 wait 3600
66 # Zelle 1 und 2 entladen
67 setport 1 5
68 # 1 Stunde warten
69 wait 3600
70 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
71 setport 1 0
72 # 1 Stunde warten
73 wait 3600
74 #
75 #
76 #
77 #SO
78 # Zelle 1 und 2 – laden
79 setport 1 10
80 # ENDE

```

D.4.2. Messreihe 6

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 #
6 #
7 #
8 #MO, DI
9 # Zelle 1 und 2 – laden
10 setport 1 10
11 # 36 Stunden warten
12 wait 129600
13 #
14 #
15 #MI
16 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
17 setport 1 0
18 # 1 Stunde warten
19 wait 3600
20 # Zelle 1 und 2 entladen
21 setport 1 5
22 # 1 Stunde warten
23 wait 3600
24 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
25 setport 1 0
26 # 1 Stunde warten
27 wait 3600
28 # Zelle 1 und 2 – laden
29 setport 1 10
30 # 21 Stunden warten
31 wait 75600
32 #
33 #
34 #DO
35 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
36 setport 1 0
37 # 1 Stunde warten
38 wait 3600
39 # Zelle 1 und 2 entladen
40 setport 1 5
41 # 1 Stunde warten
42 wait 3600
43 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
44 setport 1 0
45 # 1 Stunde warten
46 wait 3600
47 # Zelle 1 und 2 – laden
48 setport 1 10
49 # 21 Stunden warten
50 wait 75600

```

```

51 #
52 #
53 #FR
54 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
55 setport 1 0
56 # 1 Stunde warten
57 wait 3600
58 # Zelle 1 und 2 entladen
59 setport 1 5
60 # 1 Stunde warten
61 wait 3600
62 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
63 setport 1 0
64 # 1 Stunde warten
65 wait 3600
66 # Zelle 1 und 2 – laden
67 setport 1 10
68 # 21 Stunden warten
69 wait 75600
70 #
71 #
72 #SA
73 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
74 setport 1 0
75 # 1 Stunde warten
76 wait 3600
77 # Zelle 1 und 2 entladen
78 setport 1 5
79 # 1 Stunde warten
80 wait 3600
81 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
82 setport 1 0
83 # 1 Stunde warten
84 wait 3600
85 # Zelle 1 und 2 – laden
86 setport 1 10
87 # 21 Stunden warten
88 wait 75600
89 #
90 #
91 #SO
92 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
93 setport 1 0
94 # 1 Stunde warten
95 wait 3600
96 # Zelle 1 und 2 entladen
97 setport 1 5
98 # 1 Stunde warten
99 wait 3600
100 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
101 setport 1 0
102 # 1 Stunde warten
103 wait 3600
104 # Zelle 1 und 2 – laden
105 setport 1 10
106 # 21 Stunden warten
107 wait 75600
108 # ENDE

```

D.4.3. Messreihe 7

Teil 1:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #FR
11 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
12 setport 1 42
13 # 28 Stunden warten
14 wait 100800
15 #
16 #
17 #SA
18 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
19 setport 1 32
20 # 1 Stunde warten
21 wait 3600
22 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
23 setport 1 5
24 # 1 Stunde warten
25 wait 3600
26 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
27 setport 1 32
28 # 1 Stunde warten
29 wait 3600
30 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
31 setport 1 42
32 # 21 Stunden warten
33 wait 75600
34 #
35 #
36 #SO
37 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
38 setport 1 32
39 # 1 Stunde warten
40 wait 3600
41 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
42 setport 1 5
43 # 1 Stunde warten
44 wait 3600
45 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
46 setport 1 32
47 # 1 Stunde warten
48 wait 3600
49 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
50 setport 1 42
51 # 21 Stunden warten
52 wait 75600
53 #
54 #
55 #MO
56 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
57 setport 1 32
58 # 1 Stunde warten
59 wait 3600
60 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
61 setport 1 5
62 # 1 Stunde warten
63 wait 3600
64 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
65 setport 1 32
66 # 1 Stunde warten
67 wait 3600
68 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
69 setport 1 42
70 # 21 Stunden warten
71 wait 75600
72 #
73 #
74 #DI
75 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
76 setport 1 32
77 # 1 Stunde warten
78 wait 3600

```

```

79 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
80 setport 1 5
81 # 1 Stunde warten
82 wait 3600
83 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
84 setport 1 32
85 # 1 Stunde warten
86 wait 3600
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
88 setport 1 42
89 # 21 Stunden warten
90 wait 75600
91 #
92 #
93 #Ml
94 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
95 setport 1 32
96 # 1 Stunde warten
97 wait 3600
98 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
99 setport 1 5
100 # 1 Stunde warten
101 wait 3600
102 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
103 setport 1 32
104 # 1 Stunde warten
105 wait 3600
106 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
107 setport 1 42
108 # 21 Stunden warten
109 wait 75600
110 #
111 #
112 #DO
113 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
114 setport 1 32
115 # 1 Stunde warten
116 wait 3600
117 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
118 setport 1 5
119 # 1 Stunde warten
120 wait 3600
121 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
122 setport 1 32
123 # 1 Stunde warten
124 wait 3600
125 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
126 setport 1 42
127 # 21 Stunden warten
128 wait 75600
129 #
130 #
131 #FR
132 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
133 setport 1 32
134 # 1 Stunde warten
135 wait 3600
136 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
137 setport 1 5
138 # 1 Stunde warten
139 wait 3600
140 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
141 setport 1 32
142 # 1 Stunde warten
143 wait 3600
144 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
145 setport 1 42
146 # 21 Stunden warten
147 wait 75600
148 #
149 #
150 #SA
151 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
152 setport 1 32
153 # 1 Stunde warten
154 wait 3600
155 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
156 setport 1 5
157 # 1 Stunde warten
158 wait 3600
159 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
160 setport 1 32
161 # 1 Stunde warten
162 wait 3600
163 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
164 setport 1 42
165 # 21 Stunden warten
166 wait 75600
167 #
168 #
169 #SO
170 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
171 setport 1 32
172 # 1 Stunde warten
173 wait 3600
174 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
175 setport 1 5
176 # 1 Stunde warten
177 wait 3600
178 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
179 setport 1 32
180 # 1 Stunde warten
181 wait 3600
182 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
183 setport 1 42
184 # 21 Stunden warten
185 wait 75600
186 #
187 #
188 #MO
189 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
190 setport 1 32
191 # 1 Stunde warten
192 wait 3600
193 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
194 setport 1 5
195 # 1 Stunde warten
196 wait 3600
197 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
198 setport 1 32
199 # 1 Stunde warten
200 wait 3600
201 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
202 setport 1 42
203 # 21 Stunden warten
204 wait 75600
205 # ENDE

```

Teil 2:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
12 setport 1 32
13 # 2 Stunde warten
14 wait 7200
15 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
16 setport 1 5
17 # 0.5 Stunde warten

```

```

18 wait 1800
19 # Entladung 2
20 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
21 setport 1 32
22 # 2 Stunde warten
23 wait 7200
24 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
25 setport 1 5
26 # 0.5 Stunde warten
27 wait 1800
28 # Entladung 3
29 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
30 setport 1 32
31 # 2 Stunde warten
32 wait 7200
33 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
34 setport 1 5
35 # 0.5 Stunde warten
36 wait 1800
37 # Entladung 4
38 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
39 setport 1 32
40 # 2 Stunde warten
41 wait 7200
42 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
43 setport 1 5
44 # 0.5 Stunde warten
45 wait 1800
46 # Ladung 1
47 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
48 setport 1 32
49 # 2 Stunde warten
50 wait 7200
51 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
52 setport 1 42
53 # 0.5 Stunden warten

54 wait 1800
55 # Ladung 2
56 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
57 setport 1 32
58 # 2 Stunde warten
59 wait 7200
60 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
61 setport 1 42
62 # 0.5 Stunden warten
63 wait 1800
64 # Ladung 3
65 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
66 setport 1 32
67 # 2 Stunde warten
68 wait 7200
69 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
70 setport 1 42
71 # 0.5 Stunden warten
72 wait 1800
73 # Ladung 4
74 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
75 setport 1 32
76 # 2 Stunde warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
79 setport 1 42
80 # 0.5 Stunden warten
81 wait 1800
82 # Schlussladung
83 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
84 setport 1 32
85 # 2 Stunde warten
86 wait 7200
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

Teil 3:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
12 setport 1 32
13 # 4 Stunde warten
14 wait 14400
15 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
16 setport 1 5
17 # 1 Stunde warten
18 wait 3600
19 # Entladung 2
20 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
21 setport 1 32
22 # 4 Stunden warten
23 wait 14400
24 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
25 setport 1 5
26 # 1 Stunde warten
27 wait 3600
28 # Entladung 3
29 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
30 setport 1 32
31 # 4 Stunden warten
32 wait 14400
33 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
34 setport 1 5

35 # 1 Stunde warten
36 wait 3600
37 # Entladung 4
38 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
39 setport 1 32
40 # 4 Stunden warten
41 wait 14400
42 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
43 setport 1 5
44 # 1 Stunde warten
45 wait 3600
46 # Ladung 1
47 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
48 setport 1 32
49 # 4 Stunden warten
50 wait 14400
51 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
52 setport 1 42
53 # 1 Stunden warten
54 wait 3600
55 # Ladung 2
56 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
57 setport 1 32
58 # 4 Stunden warten
59 wait 14400
60 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
61 setport 1 42
62 # 1 Stunden warten
63 wait 3600
64 # Ladung 3
65 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
66 setport 1 32
67 # 4 Stunden warten
68 wait 14400
69 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
70 setport 1 42

```

```

71 # 1 Stunden warten
72 wait 3600
73 # Ladung 4
74 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
75 setport 1 32
76 # 4 Stunden warten
77 wait 14400
78 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
79 setport 1 42
80 # 1 Stunden warten
81 wait 3600

82 # Schlussladung
83 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
84 setport 1 32
85 # 4 Stunden warten
86 wait 14400
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

Teil 4:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #FR
11 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
12 setport 1 42
13 # 4 Stunde warten
14 wait 14400
15 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
16 setport 1 32
17 # 4 Stunden warten
18 wait 14400
19 #
20 # SA
21 # Entladung 1
22 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
23 setport 1 5
24 # 1 Stunde warten
25 wait 3600
26 # Entladung 2
27 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
28 setport 1 32
29 # 4 Stunden warten
30 wait 14400
31 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
32 setport 1 5
33 # 1 Stunde warten
34 wait 3600
35 # Entladung 3
36 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
37 setport 1 32
38 # 4 Stunden warten
39 wait 14400
40 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
41 setport 1 5
42 # 1 Stunde warten
43 wait 3600
44 # Entladung 4
45 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
46 setport 1 32
47 # 4 Stunden warten
48 wait 14400
49 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
50 setport 1 5
51 # 1 Stunde warten
52 wait 3600
53 # Ladung 1
54 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
55 setport 1 32
56 # 4 Stunden warten
57 wait 14400
58 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
59 setport 1 42
60 # 1 Stunden warten
61 wait 3600

62 # Ladung 2
63 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
64 setport 1 32
65 # 4 Stunden warten
66 wait 14400
67 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
68 setport 1 42
69 # 1 Stunden warten
70 wait 3600
71 # Ladung 3
72 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
73 setport 1 32
74 # 4 Stunden warten
75 wait 14400
76 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
77 setport 1 42
78 # 1 Stunden warten
79 wait 3600
80 # Ladung 4
81 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
82 setport 1 32
83 # 4 Stunden warten
84 wait 14400
85 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
86 setport 1 42
87 # 1 Stunden warten
88 wait 3600
89 # Schlussladung
90 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
91 setport 1 32
92 # 4 Stunden warten
93 wait 14400
94 #
95 # MO
96 #
97 # Entladung 1
98 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
99 setport 1 5
100 # 1 Stunde warten
101 wait 3600
102 # Entladung 2
103 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
104 setport 1 32
105 # 4 Stunden warten
106 wait 14400
107 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
108 setport 1 5
109 # 1 Stunde warten
110 wait 3600
111 # Entladung 3
112 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
113 setport 1 32
114 # 4 Stunden warten
115 wait 14400
116 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
117 setport 1 5
118 # 1 Stunde warten
119 wait 3600
120 # Entladung 4
121 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
122 setport 1 32
123 # 4 Stunden warten

```

```

124 wait 14400
125 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
126 setport 1 5
127 # 1 Stunde warten
128 wait 3600
129 # Ladung 1
130 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
131 setport 1 32
132 # 4 Stunden warten
133 wait 14400
134 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
135 setport 1 42
136 # 1 Stunden warten
137 wait 3600
138 # Ladung 2
139 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
140 setport 1 32
141 # 4 Stunden warten
142 wait 14400
143 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
144 setport 1 42
145 # 1 Stunden warten
146 wait 3600
147 # Ladung 3
148 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
149 setport 1 32
150 # 4 Stunden warten

151 wait 14400
152 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
153 setport 1 42
154 # 1 Stunden warten
155 wait 3600
156 # Ladung 4
157 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
158 setport 1 32
159 # 4 Stunden warten
160 wait 14400
161 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
162 setport 1 42
163 # 1 Stunden warten
164 wait 3600
165 # Schlussladung
166 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
167 setport 1 32
168 # 4 Stunden warten
169 wait 14400
170 #
171 # MI
172 #
173 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
174 setport 1 42
175 # 26 Stunden warten
176 wait 93600
177 #
178 # ENDE

```

D.4.4. Messreihe 8

Teil 1:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
12 setport 1 0
13 # 1 Stunde warten
14 wait 3600
15 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
16 setport 1 42
17 # 4 Stunden warten
18 wait 14400
19 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
20 setport 1 0
21 # 2 Stunde warten
22 wait 7200
23 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 laden — Entladung 1
24 setport 1 37
25 # 0.5 Stunden warten
26 wait 1800
27 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
28 setport 1 0
29 # 2 Stunden warten
30 wait 7200
31 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 laden — Entladung 2
32 setport 1 37
33 # 0.5 Stunden warten
34 wait 1800
35 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
36 setport 1 0
37 # 2 Stunden warten
38 wait 7200
39 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 laden — Entladung 3
40 setport 1 37
41 # 0.5 Stunden warten
42 wait 1800

43 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
44 setport 1 0
45 # 2 Stunden warten
46 wait 7200
47 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 laden — Entladung 4
48 setport 1 37
49 # 0.5 Stunden warten
50 wait 1800
51 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
52 setport 1 0
53 # 2 Stunden warten
54 wait 7200
55 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
56 setport 1 42
57 # 0.5 Stunden warten
58 wait 1800
59 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
60 setport 1 0
61 # 2 Stunden warten
62 wait 7200
63 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
64 setport 1 42
65 # 0.5 Stunden warten
66 wait 1800
67 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
68 setport 1 0
69 # 2 Stunden warten
70 wait 7200
71 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
72 setport 1 42
73 # 0.5 Stunden warten
74 wait 1800
75 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
76 setport 1 0
77 # 2 Stunden warten
78 wait 7200
79 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
80 setport 1 42
81 # 0.5 Stunden warten
82 wait 1800
83 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
84 setport 1 0

```



```

28 # Entladung 3
29 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
30 setport 1 32
31 # 4 Stunden warten
32 wait 14400
33 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
34 setport 1 5
35 # 1 Stunde warten
36 wait 3600
37 # Entladung 4
38 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
39 setport 1 32
40 # 4 Stunden warten
41 wait 14400
42 # Zelle 1 und 2 entladen, Zelle 3 – Ruhe (entladen ueber
    Voltmeter)
43 setport 1 5
44 # 1 Stunde warten
45 wait 3600
46 # Ladung 1
47 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
48 setport 1 32
49 # 4 Stunden warten
50 wait 14400
51 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
52 setport 1 42
53 # 1 Stunden warten
54 wait 3600
55 # Ladung 2
56 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
57 setport 1 32
58 # 4 Stunden warten
59 wait 14400

60 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
61 setport 1 42
62 # 1 Stunden warten
63 wait 3600
64 # Ladung 3
65 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
66 setport 1 32
67 # 4 Stunden warten
68 wait 14400
69 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
70 setport 1 42
71 # 1 Stunden warten
72 wait 3600
73 # Ladung 4
74 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
75 setport 1 32
76 # 4 Stunden warten
77 wait 14400
78 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
79 setport 1 42
80 # 1 Stunden warten
81 wait 3600
82 # Schlussladung
83 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase, Zelle 3 – laden
84 setport 1 32
85 # 4 Stunden warten
86 wait 14400
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

D.4.5. Messreihe 9

Teil 1:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
12 setport 1 0
13 # 1 Stunde warten
14 wait 3600
15 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
16 setport 1 42
17 # 4 Stunden warten
18 wait 14400
19 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
20 setport 1 0
21 # 2 Stunde warten
22 wait 7200
23 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
24 setport 1 9
25 # 0.5 Stunden warten
26 wait 1800
27 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
28 setport 1 0
29 # 2 Stunden warten
30 wait 7200
31 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
32 setport 1 9
33 # 0.5 Stunden warten
34 wait 1800
35 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
36 setport 1 0

37 # 2 Stunden warten
38 wait 7200
39 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
40 setport 1 9
41 # 0.5 Stunden warten
42 wait 1800
43 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
44 setport 1 0
45 # 2 Stunden warten
46 wait 7200
47 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
48 setport 1 9
49 # 0.5 Stunden warten
50 wait 1800
51 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
52 setport 1 0
53 # 2 Stunden warten
54 wait 7200
55 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
56 setport 1 42
57 # 0.5 Stunden warten
58 wait 1800
59 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
60 setport 1 0
61 # 2 Stunden warten
62 wait 7200
63 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
64 setport 1 42
65 # 0.5 Stunden warten
66 wait 1800
67 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
68 setport 1 0
69 # 2 Stunden warten
70 wait 7200
71 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
72 setport 1 42

```

```

73 # 0.5 Stunden warten
74 wait 1800
75 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
76 setport 1 0
77 # 2 Stunden warten
78 wait 7200
79 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
80 setport 1 42
81 # 0.5 Stunden warten
82 wait 1800
83 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
84 setport 1 0
85 # 2 Stunden warten
86 wait 7200
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

Teil 2:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
12 setport 1 0
13 # 1 Stunde warten
14 wait 3600
15 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
16 setport 1 42
17 # 4 Stunden warten
18 wait 14400
19 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
20 setport 1 0
21 # 2 Stunde warten
22 wait 7200
23 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
24 setport 1 9
25 # 0.5 Stunden warten
26 wait 1800
27 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
28 setport 1 0
29 # 2 Stunden warten
30 wait 7200
31 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
32 setport 1 9
33 # 0.5 Stunden warten
34 wait 1800
35 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
36 setport 1 0
37 # 2 Stunden warten
38 wait 7200
39 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
40 setport 1 9
41 # 0.5 Stunden warten
42 wait 1800
43 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
44 setport 1 0
45 # 2 Stunden warten
46 wait 7200
47 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
48 setport 1 9
49 # 0.5 Stunden warten
50 wait 1800
51 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
52 setport 1 0
53 # 2 Stunden warten
54 wait 7200
55 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
56 setport 1 42
57 # 0.5 Stunden warten
58 wait 1800
59 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
60 setport 1 0
61 # 2 Stunden warten
62 wait 7200
63 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
64 setport 1 42
65 # 0.5 Stunden warten
66 wait 1800
67 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
68 setport 1 0
69 # 2 Stunden warten
70 wait 7200
71 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
72 setport 1 42
73 # 0.5 Stunden warten
74 wait 1800
75 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
76 setport 1 0
77 # 2 Stunden warten
78 wait 7200
79 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
80 setport 1 42
81 # 0.5 Stunden warten
82 wait 1800
83 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
84 setport 1 0
85 # 2 Stunden warten
86 wait 7200
87 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

Teil 3:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 #MO
11 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
12 setport 1 0
13 # 1 Stunde warten
14 wait 3600
15 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
16 setport 1 42
17 # 4 Stunden warten
18 wait 14400
19 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
20 setport 1 0

```

```

21 # 2 Stunde warten
22 wait 7200
23 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
24 setport 1 9
25 # 0.5 Stunden warten
26 wait 1800
27 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
28 setport 1 0
29 # 2 Stunden warten
30 wait 7200
31 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
32 setport 1 9
33 # 0.5 Stunden warten
34 wait 1800
35 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
36 setport 1 0
37 # 2 Stunden warten
38 wait 7200
39 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
40 setport 1 9
41 # 0.5 Stunden warten
42 wait 1800
43 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
44 setport 1 0
45 # 2 Stunden warten
46 wait 7200
47 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
48 setport 1 9
49 # 0.5 Stunden warten
50 wait 1800
51 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
52 setport 1 0
53 # 2 Stunden warten
54 wait 7200
55 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
56 setport 1 42
57 # 0.5 Stunden warten
58 wait 1800
59 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
60 setport 1 0
61 # 2 Stunden warten
62 wait 7200
63 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
64 setport 1 42
65 # 0.5 Stunden warten
66 wait 1800
67 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
68 setport 1 0
69 # 2 Stunden warten
70 wait 7200
71 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
72 setport 1 42
73 # 0.5 Stunden warten
74 wait 1800
75 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
76 setport 1 0
77 # 2 Stunden warten
78 wait 7200
79 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
80 setport 1 42
81 # 0.5 Stunden warten
82 wait 1800
83 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
84 setport 1 0
85 # 2 Stunden warten
86 wait 7200
87 # Zelle 1, 2 und 3 — laden — Schlussladung
88 setport 1 42
89 # 26 Stunden warten
90 wait 93600
91 #
92 # ENDE

```

Teil 4:

```

1 # Relais 1 (1) — Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) — Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) — Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) — Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) — Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) — Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 1 Stunde warten
13 wait 3600
14 # Zelle 1, 2 und 3 — laden
15 setport 1 10
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 1
23 setport 1 5
24 # 0.5 Stunden warten
25 wait 1800
26 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunden warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 2
31 setport 1 5
32 # 0.5 Stunden warten
33 wait 1800
34 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunden warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 3
39 setport 1 5
40 # 0.5 Stunden warten
41 wait 1800
42 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunden warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 4
47 setport 1 5
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunden warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 1
55 setport 1 10
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunden warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 2
63 setport 1 10
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunden warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
71 setport 1 10
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1 und 2 — Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunden warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 4
79 setport 1 10
80 # 0.5 Stunden warten

```

```

81 wait 1800
82 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
83 setport 1 0
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Ladephase vor neuem Zyklus
87 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
88 setport 1 10
89 # 8 Stunden warten
90 wait 28800
91 # ZWEITER ZYKLUS
    ++++++
92 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
93 setport 1 0
94 # 8 Stunden warten
95 wait 28800
96 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
97 setport 1 10
98 # 4 Stunden warten
99 wait 14400
100 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
101 setport 1 0
102 # 2 Stunde warten
103 wait 7200
104 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 1
105 setport 1 5
106 # 0.5 Stunden warten
107 wait 1800
108 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
109 setport 1 0
110 # 2 Stunden warten
111 wait 7200
112 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 2
113 setport 1 5
114 # 0.5 Stunden warten
115 wait 1800
116 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
117 setport 1 0
118 # 2 Stunden warten
119 wait 7200
120 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 3
121 setport 1 5
122 # 0.5 Stunden warten
123 wait 1800
124 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
125 setport 1 0
126 # 2 Stunden warten

127 wait 7200
128 # Zelle 1 und 2 entladen — Entladung 4
129 setport 1 5
130 # 0.5 Stunden warten
131 wait 1800
132 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
133 setport 1 0
134 # 2 Stunden warten
135 wait 7200
136 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 1
137 setport 1 10
138 # 0.5 Stunden warten
139 wait 1800
140 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
141 setport 1 0
142 # 2 Stunden warten
143 wait 7200
144 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 2
145 setport 1 10
146 # 0.5 Stunden warten
147 wait 1800
148 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
149 setport 1 0
150 # 2 Stunden warten
151 wait 7200
152 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
153 setport 1 10
154 # 0.5 Stunden warten
155 wait 1800
156 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
157 setport 1 0
158 # 2 Stunden warten
159 wait 7200
160 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 4
161 setport 1 10
162 # 0.5 Stunden warten
163 wait 1800
164 # Zelle 1 und 2 – Ruhephase
165 setport 1 0
166 # 2 Stunden warten
167 wait 7200
168 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
169 setport 1 10
170 # 26 Stunden warten
171 wait 93600
172 #
173 # ENDE

```

D.4.6. Messreihe 10

Teil 1:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 1 Stunde warten
13 wait 3600
14 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
15 setport 1 42
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
23 setport 1 21

24 # 0.5 Stunden warten
25 wait 1800
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunden warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 0.5 Stunden warten
33 wait 1800
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunden warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
39 setport 1 21
40 # 0.5 Stunden warten
41 wait 1800
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunden warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4

```

```

47 setport 1 21
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunden warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
55 setport 1 42
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunden warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
63 setport 1 42
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunden warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
71 setport 1 42
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunden warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
79 setport 1 42
80 # 0.5 Stunden warten
81 wait 1800
82 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
83 setport 1 0
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Ladephase vor neuem Zyklus
87 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
88 setport 1 42
89 # 8 Stunden warten
90 wait 28800
91 # ZWEITER ZYKLUS
92 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
93 setport 1 0
94 # 4 Stunde warten
95 wait 14400
96 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
97 setport 1 21
98 # 0.5 Stunden warten
99 wait 1800
100 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
101 setport 1 0
102 # 2 Stunden warten
103 wait 7200
104 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
105 setport 1 21
106 # 0.5 Stunden warten
107 wait 1800
108 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase

109 setport 1 0
110 # 2 Stunden warten
111 wait 7200
112 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
113 setport 1 21
114 # 0.5 Stunden warten
115 wait 1800
116 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
117 setport 1 0
118 # 2 Stunden warten
119 wait 7200
120 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
121 setport 1 21
122 # 0.5 Stunden warten
123 wait 1800
124 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
125 setport 1 0
126 # 2 Stunden warten
127 wait 7200
128 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
129 setport 1 42
130 # 0.5 Stunden warten
131 wait 1800
132 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
133 setport 1 0
134 # 2 Stunden warten
135 wait 7200
136 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
137 setport 1 42
138 # 0.5 Stunden warten
139 wait 1800
140 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
141 setport 1 0
142 # 2 Stunden warten
143 wait 7200
144 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
145 setport 1 42
146 # 0.5 Stunden warten
147 wait 1800
148 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
149 setport 1 0
150 # 2 Stunden warten
151 wait 7200
152 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
153 setport 1 42
154 # 0.5 Stunden warten
155 wait 1800
156 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
157 setport 1 0
158 # 2 Stunden warten
159 wait 7200
160 # Ladephase vor neuem Zyklus
161 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
162 setport 1 42
163 # 8 Stunden warten
164 wait 28800
165 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
166 setport 1 42
167 # 26 Stunden warten
168 wait 93600
169 #
170 # ENDE

```

Teil 2:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 1 Stunde warten
13 wait 3600
14 # Zelle 1, 2 und 3 – laden

15 setport 1 42
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
23 setport 1 21
24 # 0.5 Stunden warten
25 wait 1800
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunden warten

```

```

29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 0.5 Stunden warten
33 wait 1800
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunden warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
39 setport 1 21
40 # 0.5 Stunden warten
41 wait 1800
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunden warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
47 setport 1 21
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunden warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
55 setport 1 42
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunden warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
63 setport 1 42
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunden warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
71 setport 1 42
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunden warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
79 setport 1 42
80 # 0.5 Stunden warten
81 wait 1800
82 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
83 setport 1 0
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Ladephase vor neuem Zyklus
87 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
88 setport 1 42
89 # 8 Stunden warten
90 wait 28800
91 # ZWEITER ZYKLUS
92 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
93 setport 1 0
94 # 4 Stunde warten
95 wait 14400
96 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
97 setport 1 21
98 # 0.5 Stunden warten
99 wait 1800
100 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
101 setport 1 0
102 # 2 Stunden warten
103 wait 7200
104 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
105 setport 1 21
106 # 0.5 Stunden warten
107 wait 1800
108 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
109 setport 1 0
110 # 2 Stunden warten
111 wait 7200
112 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
113 setport 1 21
114 # 0.5 Stunden warten
115 wait 1800
116 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
117 setport 1 0
118 # 2 Stunden warten
119 wait 7200
120 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
121 setport 1 21
122 # 0.5 Stunden warten
123 wait 1800
124 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
125 setport 1 0
126 # 2 Stunden warten
127 wait 7200
128 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
129 setport 1 42
130 # 0.5 Stunden warten
131 wait 1800
132 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
133 setport 1 0
134 # 2 Stunden warten
135 wait 7200
136 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
137 setport 1 42
138 # 0.5 Stunden warten
139 wait 1800
140 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
141 setport 1 0
142 # 2 Stunden warten
143 wait 7200
144 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
145 setport 1 42
146 # 0.5 Stunden warten
147 wait 1800
148 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
149 setport 1 0
150 # 2 Stunden warten
151 wait 7200
152 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
153 setport 1 42
154 # 0.5 Stunden warten
155 wait 1800
156 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
157 setport 1 0
158 # 2 Stunden warten
159 wait 7200
160 # Ladephase vor neuem Zyklus
161 # Zelle 1 und 2 laden — Ladung 3
162 setport 1 42
163 # 8 Stunden warten
164 wait 28800
165 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
166 setport 1 42
167 # 26 Stunden warten
168 wait 93600
169 #
170 # ENDE

```

Teil 3:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 #
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase

```

```

11 setport 1 0
12 # 1 Stunde warten
13 wait 3600
14 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
15 setport 1 42
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
23 setport 1 21
24 # 0.5 Stunden warten
25 wait 1800
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunden warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 0.5 Stunden warten
33 wait 1800
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunden warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
39 setport 1 21
40 # 0.5 Stunden warten
41 wait 1800
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunden warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
47 setport 1 21
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunden warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
55 setport 1 42
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunden warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
63 setport 1 42
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunden warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
71 setport 1 42
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunden warten

77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
79 setport 1 42
80 # 0.5 Stunden warten
81 wait 1800
82 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
83 setport 1 0
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Ladephase vor neuem Zyklus
87 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
88 setport 1 42
89 # 8 Stunden warten
90 wait 28800
91 # ZWEITER ZYKLUS
92 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
93 setport 1 0
94 # 4 Stunde warten
95 wait 14400
96 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
97 setport 1 21
98 # 2 Stunden warten
99 wait 7200
100 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
101 setport 1 0
102 # 2 Stunden warten
103 wait 7200
104 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
105 setport 1 42
106 # 4 Stunden warten
107 wait 14400
108 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
109 setport 1 0
110 # 2 Stunden warten
111 wait 7200
112 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
113 setport 1 42
114 # 8 Stunden warten
115 wait 28800
116 # DRITTER ZYKLUS
117 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
118 setport 1 0
119 # 4 Stunde warten
120 wait 14400
121 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
122 setport 1 21
123 # 2 Stunden warten
124 wait 7200
125 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
126 setport 1 0
127 # 2 Stunden warten
128 wait 7200
129 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
130 setport 1 42
131 # 4 Stunden warten
132 wait 14400
133 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
134 setport 1 0
135 # 2 Stunden warten
136 wait 7200
137 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
138 setport 1 42
139 # 26 Stunden warten
140 wait 93600
141 #
142 # ENDE

```

D.4.7. Messreihe 11

Teil 1:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden

5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #

```

```

9 #
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 1 Stunde warten
13 wait 3600
14 # Zelle 1, 2 und 3 – laden
15 setport 1 42
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
23 setport 1 21
24 # 0.5 Stunden warten
25 wait 1800
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunden warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 0.5 Stunden warten
33 wait 1800
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunden warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
39 setport 1 21
40 # 0.5 Stunden warten
41 wait 1800
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunden warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
47 setport 1 21
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunden warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1

55 setport 1 42
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunden warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
63 setport 1 42
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunden warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
71 setport 1 42
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunden warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
79 setport 1 42
80 # 0.5 Stunden warten
81 wait 1800
82 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
83 setport 1 0
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Ladephase vor neuem Zyklus
87 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
88 setport 1 42
89 # 8 Stunden warten
90 wait 28800
91 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
92 setport 1 0
93 # 2 Stunden warten
94 wait 7200
95 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
96 setport 1 42
97 # 26 Stunden warten
98 wait 93600
99 #
100 # ENDE

```

Teil 2:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten

13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
15 setport 1 21
16 # 1 Stunden warten
17 wait 3600
18 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
19 setport 1 42
20 # 26 Stunden warten
21 wait 93600
22 #
23 # ENDE

```

Teil 3:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #

9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten
13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
15 setport 1 42
16 # 4 Stunde warten

```

```

17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
23 setport 1 42
24 # 4 Stunde warten
25 wait 14400
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunde warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
31 setport 1 42
32 # 4 Stunde warten
33 wait 14400
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunde warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
39 setport 1 42
40 # 4 Stunde warten
41 wait 14400
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunde warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
47 setport 1 21
48 # 0.5 Stunden warten
49 wait 1800
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunde warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
55 setport 1 21
56 # 0.5 Stunden warten
57 wait 1800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase

59 setport 1 0
60 # 2 Stunde warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
63 setport 1 21
64 # 0.5 Stunden warten
65 wait 1800
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunde warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
71 setport 1 21
72 # 0.5 Stunden warten
73 wait 1800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunde warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 5
79 setport 1 42
80 # 16 Stunde warten
81 wait 57600
82 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 5
83 setport 1 21
84 # 2 Stunden warten
85 wait 7200
86 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 6
87 setport 1 42
88 # 16 Stunde warten
89 wait 57600
90 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 6
91 setport 1 21
92 # 2 Stunden warten
93 wait 7200
94 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
95 setport 1 42
96 # 26 Stunden warten
97 wait 93600
98 #
99 # ENDE

```

Teil 4:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten
13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1

15 setport 1 42
16 # 20 Stunden warten
17 wait 72000
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
23 setport 1 42
24 # 4 Stunde warten
25 wait 14400
26 #
27 # ENDE

```

Teil 5:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase

11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten
13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
15 setport 1 21
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten

```

```

21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
23 setport 1 42
24 # 8 Stunde warten
25 wait 28800
26 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunde warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 4 Stunden warten
33 wait 14400
34 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunde warten

37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
39 setport 1 42
40 # 8 Stunde warten
41 wait 28800
42 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunde warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 — laden — Schlussladung
47 setport 1 42
48 # 26 Stunden warten
49 wait 93600
50 #
51 # ENDE

```

Teil 6:

```

1 # Relais 1 (1) — Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) — Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) — Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) — Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) — Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) — Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten
13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
15 setport 1 21
16 # 4 Stunden warten
17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
23 setport 1 42
24 # 8 Stunde warten
25 wait 28800
26 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunde warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 4 Stunden warten
33 wait 14400
34 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunde warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
39 setport 1 42
40 # 8 Stunde warten
41 wait 28800
42 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase

43 setport 1 0
44 # 2 Stunde warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
47 setport 1 21
48 # 4 Stunden warten
49 wait 14400
50 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
51 setport 1 0
52 # 2 Stunde warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
55 setport 1 42
56 # 8 Stunde warten
57 wait 28800
58 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunde warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
63 setport 1 21
64 # 4 Stunden warten
65 wait 14400
66 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunde warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
71 setport 1 42
72 # 8 Stunde warten
73 wait 28800
74 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunde warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 — laden — Schlussladung
79 setport 1 42
80 # 26 Stunden warten
81 wait 93600
82 #
83 # ENDE

```

Teil 7:

```

1 # Relais 1 (1) — Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) — Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) — Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) — Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) — Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) — Zelle 3, laden
7 #
8 #

9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 — Ruhephase
11 setport 1 0
12 # 2 Stunde warten
13 wait 7200
14 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
15 setport 1 21
16 # 4 Stunden warten

```

```

17 wait 14400
18 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
19 setport 1 0
20 # 2 Stunde warten
21 wait 7200
22 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
23 setport 1 42
24 # 8 Stunde warten
25 wait 28800
26 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
27 setport 1 0
28 # 2 Stunde warten
29 wait 7200
30 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
31 setport 1 21
32 # 4 Stunden warten
33 wait 14400
34 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
35 setport 1 0
36 # 2 Stunde warten
37 wait 7200
38 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
39 setport 1 42
40 # 8 Stunde warten
41 wait 28800
42 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
43 setport 1 0
44 # 2 Stunde warten
45 wait 7200
46 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
47 setport 1 21
48 # 4 Stunden warten
49 wait 14400
50 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase

51 setport 1 0
52 # 2 Stunde warten
53 wait 7200
54 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
55 setport 1 42
56 # 8 Stunde warten
57 wait 28800
58 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
59 setport 1 0
60 # 2 Stunde warten
61 wait 7200
62 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
63 setport 1 21
64 # 4 Stunden warten
65 wait 14400
66 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
67 setport 1 0
68 # 2 Stunde warten
69 wait 7200
70 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
71 setport 1 42
72 # 8 Stunde warten
73 wait 28800
74 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
75 setport 1 0
76 # 2 Stunde warten
77 wait 7200
78 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
79 setport 1 42
80 # 26 Stunden warten
81 wait 93600
82 #
83 # ENDE

```

Teil 8:

```

1 # Relais 1 (1) – Zelle 1, entladen
2 # Relais 2 (2) – Zelle 1, laden
3 # Relais 3 (4) – Zelle 2, entladen
4 # Relais 4 (8) – Zelle 2, laden
5 # Relais 5 (16) – Zelle 3, entladen
6 # Relais 6 (32) – Zelle 3, laden
7 #
8 #
9 # Entladen
10 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 1
11 setport 1 21
12 # 4 Stunden warten
13 wait 14400
14 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
15 setport 1 0
16 # 2 Stunde warten
17 wait 7200
18 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 1
19 setport 1 42
20 # 8 Stunde warten
21 wait 28800
22 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
23 setport 1 0
24 # 2 Stunde warten
25 wait 7200
26 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 2
27 setport 1 21
28 # 4 Stunden warten
29 wait 14400
30 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
31 setport 1 0
32 # 2 Stunde warten
33 wait 7200
34 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 2
35 setport 1 42
36 # 8 Stunde warten
37 wait 28800
38 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
39 setport 1 0
40 # 2 Stunde warten

41 wait 7200
42 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 3
43 setport 1 21
44 # 4 Stunden warten
45 wait 14400
46 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
47 setport 1 0
48 # 2 Stunde warten
49 wait 7200
50 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 3
51 setport 1 42
52 # 8 Stunde warten
53 wait 28800
54 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
55 setport 1 0
56 # 2 Stunde warten
57 wait 7200
58 # Zelle 1, 2 und 3 entladen — Entladung 4
59 setport 1 21
60 # 4 Stunden warten
61 wait 14400
62 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
63 setport 1 0
64 # 2 Stunde warten
65 wait 7200
66 # Zelle 1, 2 und 3 laden — Ladung 4
67 setport 1 42
68 # 8 Stunde warten
69 wait 28800
70 # Zelle 1, 2 und 3 – Ruhephase
71 setport 1 0
72 # 2 Stunde warten
73 wait 7200
74 # Zelle 1, 2 und 3 – laden — Schlussladung
75 setport 1 42
76 # 26 Stunden warten
77 wait 93600
78 #
79 # ENDE

```

E. Verschiedenes

E.1. Schaltungsbeispiel - Sub-Milliampere-Strombegrenzung

Tabelle E.1.: Stückliste Sub-mA Strombegrenzung

Bauteil	Beschreibung	Wert
U1, U2	LM358N	-
R1	1/4W; 0,1%	47 k Ω
R2	1/4W; 0,1%	1 k Ω
R3	1/4W; 0,1%	10 k Ω
R4	1/4W; 5%	4,7 k Ω
R5	1/4W; 5%	1 k Ω
D1	BZX83C5V1	-
VR1	Potentiometer	100 k Ω
T1	BC547B	-
R _M	1/4W; 0,1%	10 Ω

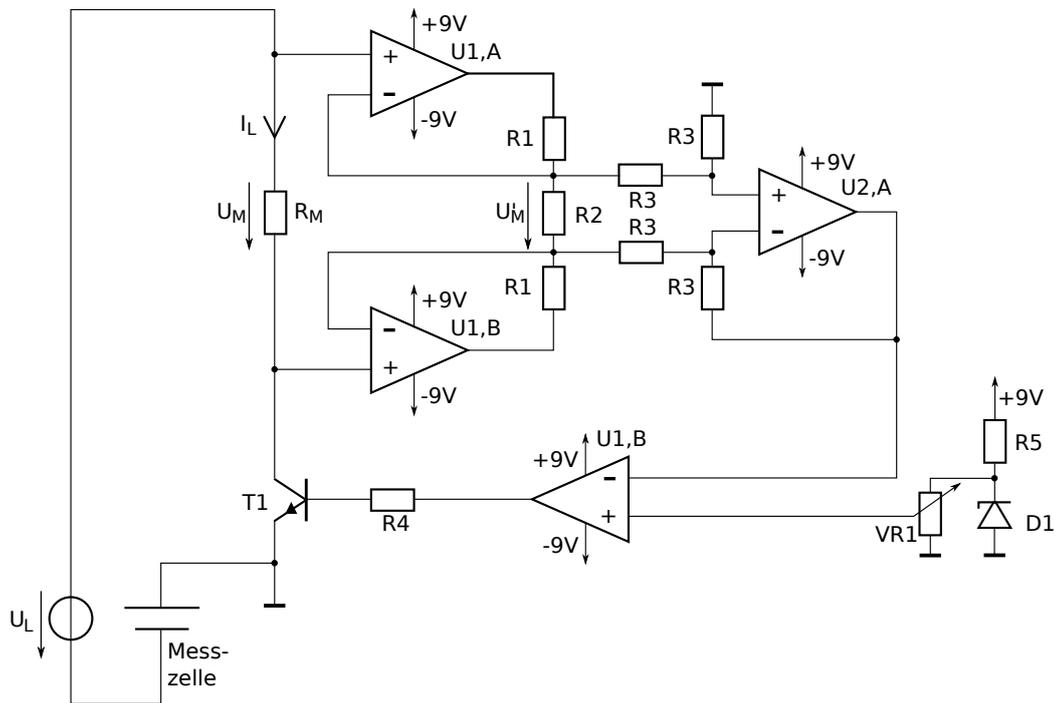


Abbildung E.1.: Schaltplan einstellbare Sub-mA Strombegrenzung, Baugruppen nach [23]

$$U_M = R_M \cdot I_L \quad (\text{E.1})$$

$$U'_M = U_M \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_2} \right) \quad (\text{E.2})$$

E.2. Aufgabenbeschreibung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Informations- und Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider

14. Mai 2014

Bachelorthesis Jan Griebach

Messaufbau mit Steuer- und Analysesoftware für die optische Zustandsbeobachtung von Lithiumbatterien

Motivation

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsvorhabens BATSEN (drahtlose Zellsensoren für Fahrzeugbatterien) und der Graduiertenschule „Key Technologies for Sustainable Energy Systems in Smart Grids“ soll der Zustand von Batterien durch Sensorik erfasst werden.

Für Lithiumbatterien ist die Verbesserung der Erfassung des Batteriezustandes wünschenswert. Die elektrisch erfassbaren Größen wie Klemmspannung, Batteriestrom und Temperatur sollen im Rahmen der Forschungsarbeiten um eine physikalische/chemische Beobachtung des Elektrodenmaterials ergänzt werden, die geeignet ist, in den laufenden Batteriebetrieb integriert zu werden.

Aufgabe

Herr Jan Griebach erhält die Aufgabe, einen Messaufbau für die optische Beobachtung von LiFePO₄-Batterien zu entwickeln. Dabei soll der Batteriebetrieb in-situ beobachtet werden. Es sind Elektrodenproben in verfügbare Messzellen mit optischem Fenster einzubringen und als Testbatterien gesteuert zu betreiben. Dafür ist ein Messaufbau zu entwickeln und durch geeignete Steuersoftware zu automatisieren. Für die Auswertung der erfassten Daten sind geeignete Softwaremodule zu entwickeln, die insbesondere den Zusammenhang zwischen elektrischen Messgrößen (Spannung, Strom, Ladung) und optischen Messgrößen (Farbwerte eines Kamerabildes oder Spektrometerdaten) im zeitlichen Verlauf darstellen. Durch umfangreiche Messreihen ist die Methode des optischen Messkonzepts zu überprüfen und zu beurteilen.

Für die Abschlussarbeit sind die folgenden Arbeitspakete geplant:

1. Einarbeitung und Vorarbeiten für optische Messverfahren in LiFePO₄-Zellen
 - Einarbeitung in Grundlagen und Effekte bei Lithium-Batterien
 - Inbetriebnahme der Mikroskopkamera und des Spektrometers (inkl. Softwaresteuerung)
 - Entwurf und Modifikation von Matlab-Skripten und C-Programmen zur Auswertung
 - Vorabmessungen mit Versuchsaufbauten
2. Entwicklung des Messaufbaus
 - Montage von Testzellen (Fa. El-Cell) mit Elektrodenproben
 - Konzeption eines Laboraufbaus für optische und elektrische Messungen an den Testzellen:
 - Überwachung mittels Kamera und Spektrometer
 - Betrieb der Messzellen mit Präzisions-Volt- und Amperemetern
 - Automatisierte Datenerfassung von elektrischen und optischen Messgeräten
 - kontinuierliche Steuerung des Messbetriebs durch eine Relaiskarte
 - Mechanische Konstruktion und Aufbau von drei Messplätzen zur Aufnahme der Reflexionsprobe (Kamerahalterung, Abdunkelung, elektrische Anschlüsse, Adapter Spektrometer-Lichtleiterprobe)
 - Prüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen

3. Labormessungen, Versuchsdurchführung und Analysen

- Planung und Durchführung von umfangreichen Messreihen
- Schrittweise Verbesserung und Anpassung des Messbetriebs an Erkenntnisse aus Zwischenauswertungen
- Aufnahme von elektrischen Werten wie Strom- und Spannungsverlauf sowie Berechnung des Ladungsumsatzes
- Korrektur von systematischen Messfehlern (z.B. stromrichtige Schaltung) und ggf. weiteren Störeinflüssen (z.B. Umgebungstemperatur)
- Darstellung der Änderung der Farbanteile im Zyklierbetrieb
- Untersuchung zur Spektrumserfassung und ggf. Darstellung von vorhandenen Spektrumsveränderungen im Zyklierbetrieb
- Auswertung und Zusammenführung der Messdaten und kombinierte graphische Darstellung durch eigene Softwarelösungen
- Sicherstellung der Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit der Software
- Exemplarische Post-Mortem-Untersuchung der zyklisierten Elektroden

4. Einordnung, Bewertung und Ausblick

- Zusammenfassung der Ergebnisse, Beurteilung des Messkonzeptes
- Bewertung der gewählten Konzepte und Lösungsvarianten
- Offene Punkte sowie einschränkende Erfahrungen und Beobachtungen

Dokumentation

Die Fachliteratur und die kommerziellen Unterlagen bzw. Datenblätter sind zielgerichtet zu recherchieren. Dabei sind insbesondere wichtige Grundlagen der Batterieeffekte näher zu betrachten. Die entwickelte Software, die gewählten Lösungen und die Funktionsweise sind gut nachvollziehbar und für die zukünftige Nutzung zu dokumentieren. Die Messergebnisse sind in aussagefähigem Umfang zu erfassen und auszuwerten. Die realisierten Lösungen und die Ergebnisse sind kritisch einordnend zu bewerten. Ansätze für Verbesserungen und weitere Arbeiten sind zu nennen.

E.3. Messplatz-Kurz-Dokumentation

Messwerterfassung

DMM4020 reader v2:

```
./DMM4020_reader_v2 -f file -d dev [-s] [-m mode] [-i sec]
```

Argumente: -f Logdatei. Wird ohne Warnung überschrieben.

- d Gerätedatei des seriellen Ports
- s Fügt das Messmodus-Kürzel an jeden Messwert an, wenn angegeben.
- i Messintervall in Sekunden. Standard ist 1. 0 steht für ein Intervall von 500ms
- m Messmodus. Standard ist 0.
 - 0: (VDC) Gleichspannung
 - 1: (VAC) Wechselspannung
 - 2: (ADC) Gleichstrom
 - 3: (AAC) Wechselstrom
 - 4: (VACDC) Spannung TrueRMS
 - 5: (AACDC) Strom TrueRMS
 - 6: (OHMS) Widerstand

Belegung der seriellen Ports	
<u>Port:</u>	<u>Funktion:</u>
/dev/ttyUSB0	Zelle 1 Spannung
/dev/ttyUSB1	Zelle 2 Spannung
/dev/ttyUSB2	Zelle 2 Strom
/dev/ttyUSB3	Zelle 1 Strom
/dev/ttyUSB4	Zelle 3 Strom
/dev/ttyUSB5	Relaiskarte
/dev/ttyUSB6	nicht belegt
/dev/ttyUSB7	Zelle 3 Spannung

Steuerung

relaisCardController:

```
./relaisCardController -f file -d dev
```

Argumente: -f Befehlsdatei

- d Gerätedatei des seriellen Ports

fileChecker:

```
./fileChecker -f file
```

Argumente: -f Befehlsdatei

Belegung der Relais	
<u>Relais (Wert):</u>	<u>Funktion:</u>
1 (1)	Zelle 1 entladen
2 (2)	Zelle 1 laden
3 (4)	Zelle 2 entladen
4 (8)	Zelle 2 laden
5 (16)	Zelle 3 entladen
6 (32)	Zelle 3 laden
7 (64)	nicht belegt
8 (128)	nicht belegt

Filter

CurrentIntegrator:

```
./CurrentIntegrator < infile > outfile  
|./CurrentIntegrator
```

CurrentCorrector:

```
./CurrentCorrector -u volts -l ohms -i ohms -c ohms < infile > outfile  
|./CurrentCorrector -u volts -l ohms -i ohms -c ohms
```

Argumente: -u Ladespannung in Volt

- l Entladewiderstand in Ohm
- i Innenwiderstand des Voltmeters in Ohm
- c Ladewiderstand in Ohm

Spektrometer

SpectrometerReader:

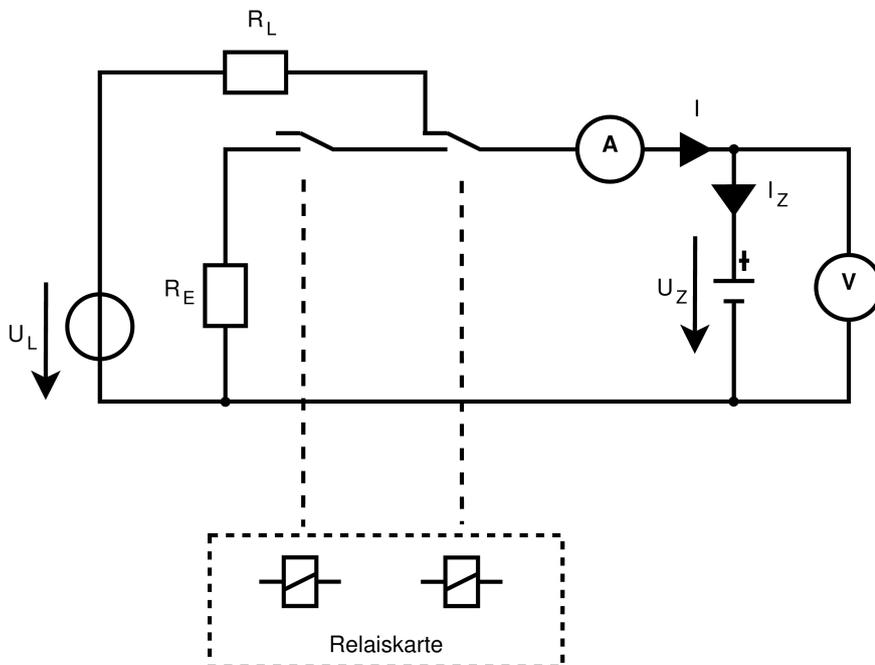
```
./SpectrometerReader -f file -d dev [-t] [-e expTime] [-i sec]
```

- Argumente:
- f Logdatei. Wird ohne Warnung überschrieben.
 - d Gerätedatei des HID Geräts (raw)
 - t Fast-Modus benutzen
 - i Messintervall in Sekunden. Standard ist 60.
 - e Belichtungszeit in Schritten. Ein Schritt entspricht 2.375ms. Standard ist 1 (= 2.375ms).

Beispiel für eine Befehlsdatei

```
#Karte 1: Relais 1, 3, 5 einschalten. Relais 2, 4, 6, 7, 8 ausschalten
setport 1 21
#Zwei Minuten warten
wait 120
#Karte 1: Relais 2, 4 einschalten; alle anderen Relais ausschalten
setport 1 10
#eine Stunde warten
wait 3600
#ENDE
```

Messschaltung



Korrektur der Strommessung

$$I_Z = \begin{cases} I - \frac{U_L - R_L \cdot I}{R_I} & I \geq 0 \\ I - \frac{R_E \cdot I}{R_I} & I < 0 \end{cases}$$

E.4. Datenträgerinhalt

Alle entwickelten Programme und aufgezeichneten Messdaten, die in dieser Arbeit verwendet wurden, sind auf einem Datenträgersatz einzusehen. Der Datenträgersatz hinterliegt beim Erst- und beim Zweitprüfer. Der Inhalt der einzelnen Datenträger ist nachfolgend aufgelistet:

DVD 1 / 22:

- Thesis
- Online Quellen
- Quellcodes
- Elektrische Messdaten
- Skriptdateien für die kombinierte Darstellung
- Langzeitspektralaufnahmen
- Spektrale Testmessungen
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 8)

DVD 2 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 3 - Part 3)

DVD 3 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 3 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 3 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 4 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 4 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 9)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 9)

DVD 4 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 5 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 5 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 5 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 5 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 1)

DVD 5 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 6 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 6 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 6 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 4)
- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 2 - Part 3)

DVD 6 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 2 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 6)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 6)

DVD 7 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 4)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 5)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 8)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 5)

DVD 8 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 6 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 3 - Part 2)

DVD 9 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 3 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 2 - Part 1)

DVD 10 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 3 - Part 1)

DVD 11 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 4)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 3 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 3 - Part 4)

DVD 12 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 3 - Part 2)

DVD 13 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 1 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 2 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 1 - Part 2)

DVD 14 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 1 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 1 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 3 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 2 - Part 3)

DVD 15 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 3 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 1 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 1 - Part 4)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 3 - Part 2)

DVD 16 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 2 - Part 7)
- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 2 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 11 - Zelle 2 - Part 2)

DVD 17 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 8)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 3 - Part 2)

DVD 18 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 5)
- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 1 - Part 2)

DVD 19 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 1 - Part 7)
- Bilddaten (Messreihe 7 - Zelle 3 - Part 0)

- Bilddaten (Messreihe 8 - Zelle 1 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 1 - Part 3)

DVD 20 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 2 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 4)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 5)

DVD 21 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 2)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 3)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 6)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 7)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 9)
- Bilddaten (Messreihe 12 - Zelle 3 - Part 10)

DVD 22 / 22:

- Bilddaten (Messreihe 9 - Zelle 2 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 1 - Part 1)
- Bilddaten (Messreihe 10 - Zelle 2 - Part 3)

Glossar

LiNiO₂ Chemische Summenformel von Lithium-Nickeldioxid

FePO₄ Chemische Summenformel von Eisen(III)phosphat

LiCoO₂ Chemische Summenformel für Lithium-Cobaltdioxid

LiFePO₄ Chemische Summenformel für Lithium-Eisenphosphat

LiMn₂O₄ Chemische Summenformel für Lithium-Mangan(III,IV)oxid

LiPF₆ Chemische Summenformel für Lithiumhexafluorophosphat

Li₄Ti₅O₁₂ Chemische Summenformel von Lithiumtitanat

Akkumulator lat. für Anhäufener, von lat. accumulare, anhäufen

Bash Bourne Again Shell, vorrangig genutzter Kommandointerpreter auf GNU/Linux Systemen

CCD Charge coupled device, engl. für ladungsgekoppeltes Bauelement

CE Counter electrode, engl. für Gegenelektrode

CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor, engl. für komplementierender Metalloxid Halbleiter

CPU Central processing unit, engl. Hauptprozessor

DCT Diskrete Cosinus-Transformation

DLL Dynamic link library

FSMA Fiber subminiature assembly

HID Human interface device

ITO Indium tin oxide, engl. für Indium-Zinnoxid

LED Light emitting diode, engl. für Licht emittierende Diode

PSP Projektstrukturplan

PVDF Polyvinylidenfluorid, ein Polymer

RE Reference electrode, engl. für Referenzelektrode

SOC State of charge, engl. für Ladezustand

SOH State of health, engl. für Alterungszustand

USB Universal serial bus

WE Working electrode, engl. für Arbeitselektrode

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 25. September 2014

Ort, Datum

Unterschrift